



**MANUAL DO
PROFESSOR**

**Glorinha Martini
Walter Spinelli
Hugo Carneiro Reis
Blaidi Sant'Anna**

Conexões com a Física

Componente curricular: FÍSICA



**Estudo do calor
Óptica geométrica
Fenômenos ondulatórios**

Glorinha Martini

Mestre em Ciências (área: Modalidade Ensino de Física) pela Universidade de São Paulo.
Professora de Física em escolas de Ensino Médio.
Coordenadora pedagógica em escolas de Ensino Médio.

Walter Spinelli

Doutor em Educação (área de concentração: Educação – Ensino de Ciências e Matemática)
pela Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo.
Professor de Física em escolas de Ensino Médio. Consultor pedagógico.

Hugo Carneiro Reis

Doutor em Ciências (área de concentração: Física das Partículas Elementares)
pelo Instituto de Física da Universidade de São Paulo.
Professor de Física no Ensino Superior e em escolas de Ensino Médio.

Blaidi Sant’Anna

Licenciado em Física pela Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo.
Professor de Física em escolas de Ensino Médio.
Diretor e coordenador pedagógico em escolas de Ensino Médio.

Conexões com a **Física**

2 **Estudo do calor**
Óptica geométrica
Fenômenos ondulatórios
Ensino Médio

Componente curricular: FÍSICA

MANUAL DO PROFESSOR

3ª edição

São Paulo, 2016



Coordenação editorial: Fabio Martins de Leonardo

Edição de texto: Marilu Maranhão Tassetto, Luiz Alberto de Paula, Livia Santaclara de Azevedo Ferreira, Jeferson Felix da Silva, Livia Aceto

Assistência editorial: Denise de Almeida, Humberto Henrique Megiolaro, Gislaíne Maria da Silva, Paula Sousa

Gerência de design e produção gráfica: Sandra Botelho de Carvalho Homma

Coordenação de produção: Everson de Paula

Suporte administrativo editorial: Maria de Lourdes Rodrigues (coord.)

Coordenação de design e projetos visuais: Marta Cerqueira Leite

Projeto gráfico: Marta Cerqueira Leite, Douglas Rodrigues José

Capa: Mariza de Souza Porto

Foto: Jovem fazendo manobras em uma pista de skate.

© Zachary Miller/Getty Images.

Coordenação de arte: Wilson Gazzoni Agostinho

Edição de arte: Edivar Goularth

Editoração eletrônica: Setup Bureau Editoração Eletrônica

Edição de infografia: Luiz Iria

Coordenação de revisão: Adriana Bairrada

Revisão: Cecília Setsuko Oku, Geuid Dib Jardim, Rita de Cássia Sam, Vânia Bruno

Coordenação de pesquisa iconográfica: Luciano Baneza Gabarron

Pesquisa iconográfica: Carol Böck, Marcia Sato

Coordenação de bureau: Américo Jesus

Tratamento de imagens: Denise Feitoza Maciel, Marina M. Buzzinaro, Rubens M. Rodrigues

Pré-impressão: Alexandre Petreca, Everton L. de Oliveira, Fabio N. Precendo, Hélio P. de Souza Filho, Marcio H. Kamoto, Vitória Sousa

Coordenação de produção industrial: Viviane Pavani

Impressão e acabamento:

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Conexões com a física / Glorinha Martini... [et al.]. — 3. ed. — São Paulo : Moderna, 2016.

Outros autores : Walter Spinelli, Hugo Carneiro Reis, Blaidi Sant'Anna

"Componente curricular : Física".

Obra em 3 v.

Conteúdo: v. 1. Estudo dos movimentos — Leis de Newton — Leis da conservação — v. 2. Estudo do calor — Óptica geométrica — Fenômenos ondulatórios — v. 3. Eletricidade — Física do Século XXI.

Bibliografia.

1. Física (Ensino Médio) I. Martini, Glorinha.
II. Spinelli, Walter. III. Reis, Hugo Carneiro.
IV. Sant'Anna, Blaidi.

16-01378

CDD-530.07

Índices para catálogo sistemático:

1. Física : Ensino médio 530.07

Reprodução proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

Todos os direitos reservados

EDITORA MODERNA LTDA.

Rua Padre Adelino, 758 - Belenzinho
São Paulo - SP - Brasil - CEP 03303-904
Vendas e Atendimento: Tel. (0__11) 2602-5510
Fax (0__11) 2790-1501
www.moderna.com.br
2016
Impresso no Brasil



Apresentação

Caro estudante

Foi com sua idade que nos encantamos por um saber muito especial, a Física. Cada um de nós, autores desta coleção, é capaz de se lembrar da origem desse deslumbramento. Com certeza, o que nos encanta está vinculado à nossa vivência escolar: àquilo que aprendemos nas aulas, às leituras que fizemos, aos problemas que resolvemos, aos inúmeros porquês que foram respondidos; enfim, ao modo como nós, quando alunos, fomos nos deixando cativar pelo prazer de aprender Física. Poder propiciar essa satisfação para mais pessoas foi uma das razões que nos fizeram escolher ser professores.

Seu professor e nós esperamos contribuir para transformar o olhar de nossos alunos sobre as coisas do mundo. Reconhecer as leis que regem e explicam os fatos com os quais convivemos diariamente, aprender sobre a tecnologia que permite a criação de aparelhos que tornam nossa vida mais confortável e agradável, analisar criticamente as informações – por vezes não tão científicas – veiculadas pelas mídias, identificar no fazer científico uma intenção, tudo isso é apenas parte da contribuição do saber físico para sua formação. Acreditamos, também, que conhecer Física pode ser inquietante porque nada daquilo que pensamos ou explicamos sobre um fenômeno é completo ou válido para sempre. O saber físico é construído todos os dias pelos cientistas, pesquisadores, por nós, professores, e também por você, aluno.

Este livro pretende guiá-lo nessa construção. Ele foi escrito porque acreditamos que aprender Física é muito estimulante e desafiador. Quando passamos a enxergar o que não víamos, quando desvendamos o que outrora era mistério, quando alcançamos abstrações antes impossíveis, tornamo-nos mais capazes de compreender e de apreciar o mundo onde vivemos e de olhar para o entorno buscando novos mistérios. Nossa expectativa é que esta coleção contribua para que você se deixe encantar pela Física tanto quanto nós nos encantamos um dia...

Os autores



Organização da coleção

Para começo de conversa

A partir de uma situação contextualizada, você responde o que sabe sobre o tema baseando-se no que está exposto na abertura da unidade.

UNIDADE

1

Calor e temperatura

Para começo de conversa

O que são "ilhas de calor" de uma região?

Capítulos

- Temperatura, calor e sua propagação
- Termômetros: grandezas e equações de conversão
- Dilatação dos sólidos
- Dilatação dos líquidos
- Calorimetria

As ilhas de calor são fenômenos climáticos que ocorrem principalmente nas cidades com elevado grau de adensamento urbano. Nessas cidades, a temperatura média costuma ser mais elevada nos bairros intensamente verticalizados e com poucas áreas verdes do que nos bairros mais arborizados. Assim, uma cidade com grande concentração de ruas e avenidas asfaltadas, muitos edifícios de concreto e poucas áreas arborizadas concentra mais calor, fazendo com que a temperatura fique acima da média dos municípios da região. As ilhas de calor são negativas para o meio ambiente, pois favorecem a intensificação do fenômeno do aquecimento global. Muitas cidades brasileiras já apresentam esse fenômeno, em maior ou menor grau, como São Paulo, Manaus, Belém e Recife, cidade retratada nesta foto.

Ilhas de calor na cidade do Recife

Estudo revela ilhas de calor do Recife. Disponível em: <https://globo.com>. Acesso em: 28 Nov 2025.

14

Lentes esféricas:
formação de imagens

ou: É possível obter fogo usando gelo?

1

Introdução

Todos conhecemos alguém que precisa usar óculos para enxergar melhor; talvez você mesmo use. Os primeiros óculos de que se tem notícia foram feitos com pedras que não conseguiram ver bem os objetos próximos dos olhos. Na Grécia antiga, filósofos usavam vidros côncavos para ler melhor. No século XVI, a luneta de Galileu abriu a revolução na forma como se vê o Universo. Uma lupa aumenta muitas vezes os objetos que vemos através dela (fig. 1). Óculos, lupas e lunetas são apenas alguns dos instrumentos criados com base no conhecimento das propriedades das lentes esféricas.

Figura 1 – Lupas são instrumentos ópticos constituídos por lentes esféricas.

Antes de iniciar os estudos, convidamos você a responder à questão que problematiza alguns dos conceitos que serão estudados no capítulo.

Questões propostas

Nas questões propostas, você é convidado a interpretar o contexto expresso no enunciado, analisando-o com base nos princípios estudados e, quando necessário, estabelecendo a relação conceitual-algébrica.

QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

- Na parede de uma sala de aula de uma escola brasileira, são colocados dois termômetros graduados nas escalas Celsius e Fahrenheit. Numericamente, qual deles apresentará maior leitura? Justifique sua resposta.
- Julius, estudante de Física, realizava no laboratório um experimento no qual deveria aquecer certa massa de água inicialmente a temperatura de 25°C . Ao colocar sobre a massa o termômetro utilizado para medir a temperatura inicial da água, o instrumento caiu e quebrou. Procurando outro termômetro, Julius encontrou um graduado na escala Kelvin e utilizou-o para medir a temperatura ao final do aquecimento da água, encontrando o valor de 318 K . Em sua relatoria, o estudante deveria empregar a variação de temperatura da água na escala Fahrenheit. Qual foi o valor, em graus Fahrenheit, encontrado por Julius para a variação de temperatura da água?
- Dois termômetros de mercúrio, idênticos, um deles graduado na escala Celsius e o outro na escala Fahrenheit, estão sendo usados para medir a temperatura do mesmo líquido. Ilustre na coluna de mercúrio que indica essa temperatura no termômetro Celsius é mais menor ou igual à altura correspondente no termômetro Fahrenheit? Justifique.
- A temperatura de uma massa de água foi avaliada com dois termômetros, um graduado em graus Celsius e o outro, em graus Fahrenheit. A leitura em Fahrenheit revelou em 8 unidades o triplo da leitura em Celsius. Qual foi o valor da temperatura da água em Celsius e em Fahrenheit?
- No gráfico a seguir, está representada a relação entre os valores de medidas de temperatura com dois termômetros, α e β , de escalas lineares diferentes. Qual é o valor que mais se aproxima do valor indicado por α quando β indica $42,5^{\circ}\text{F}$?
- Em um termômetro contendo um líquido, a grandeza termométrica é o comprimento l da coluna líquida. A seguir, represente-se experimentalmente a relação entre a temperatura t , na escala Celsius e o valor da altura l em centímetros.

a) Expresse matematicamente a relação que fornece a temperatura na escala Celsius em função da altura da coluna líquida.

b) Qual é o valor da temperatura na escala Celsius para a altura $l = 15\text{ cm}$?

7. Uma escala termométrica G, graduada em graus $^{\circ}\text{G}$, está relacionada à escala Fahrenheit, como representado no esquema a seguir. Quais são os valores dos pontos fixos da água na escala G?

8. (UERJ) No mapa abaixo, está representada a variação média da temperatura dos oceanos em um determinado mês do ano. Abaixo, encontra-se a escala, em graus Celsius, utilizada para a elaboração do mapa.

Adaptado de: *revista ciências*, 1998.

Trilhando o caminho das competências

Os aquecedores solares

O uso de aquecedores solares vem aumentando ano a ano no Brasil por razões econômicas, uma vez que ajudam a economizar energia elétrica, e práticas, pois facilitam a obtenção de água quente, visto que nossos índices de insolação são altos.

Apesar de sua instalação não ser barata, a relação custo-benefício, ao longo do tempo, torna os aquecedores solares bastante vantajosos. Veja a seguir como eles funcionam.

A radiação solar é fundamental para o bom funcionamento de um aquecedor solar tradicional. Nesses aparelhos, os coletores solares captam a radiação e transmitem o calor para a água contida na serpentina. Com o aumento da temperatura e do volume, a densidade da água diminui, isso faz com que a água suba para o reservatório, onde fica armazenada até ser consumida. Observe abaixo a representação esquemática de um aquecedor solar.

A serpentina que percorre a placa coletora deve ser metálica e todas as placas são feitas de material isolante e pintadas na cor preta.

- Observe na ilustração acima que a torneira que fornece água para a residência está ligada a um cano conectado à parte superior do reservatório. Como explicar esse fato com base nos princípios físicos estudados nesta unidade?
- Por que a serpentina é metálica e as placas coletoras são pintadas de preto?
- Seria possível utilizar esse tipo de coletor com o objetivo de fazer a água chegar ao reservatório com temperatura menor do que a que percorre a serpentina? Justifique.

Trilhando o caminho das competências

A seção traz uma abordagem diferenciada de alguns conteúdos e questões de interpretação e aplicação.

Investigar é preciso – atividade experimental

A seção apresenta experimentos que propõem a aplicação de conceitos da Física.

Investigar é preciso

Atividade experimental

Uma lente de água

O objetivo da atividade é produzir uma lente de aumento com grande capacidade de ampliação utilizando materiais fáceis de obter. Para isso, você precisará de um apontador laser, facilmente encontrado em bancas de jornal ou papeterias, e de uma seringa descartável.

Procedimento

- Encha a seringa com água da torneira. Quanto mais impurezas houver na água melhor, pois poderemos observar muitos microrganismos com a lente. Você pode acrescentar uma pequena quantidade de terra fina à água.
- Aperte vagarosamente o êmbolo da seringa para que comece a se formar uma gota na ponta da seringa, mas não a deixe cair.
- Agarre, posicionado em frente a uma parede branca, a seringa na borda de dois copos, pelas abas laterais (veja a figura). A parede branca servirá para projetar a imagem formada pela lente.

8. Aponte o apontador laser sobre uma mesa ou outro suporte em frente à imagem e direcione o feixe de luz para que passe através da gota. Você pode ajustar a altura do apontador usando livros ou cadernos. Desligue as luzes do ambiente e observe a imagem projetada na parede. Responda as questões a seguir.

Questões

- Qual é a natureza da imagem projetada pela gota? Ela funciona como uma lente convergente ou divergente? Justifique sua resposta.
- A imagem projetada na parede é direita ou invertida? Justifique sua resposta.

Para pesquisar em grupo

Será verdade mesmo que...

...ler no escuro faz mal à visão?

Você provavelmente já ouviu alguém dizer: "Não leia no escuro porque faz mal para a vista". Algumas pessoas acham que ler em um local mal iluminado prejudica a visão, provocando alguns dos problemas vistos nesta unidade. A opinião mais comum é que se adquira, prematuramente, a presbiopia. Talvez isso explique por que essa deficiência de visão seja conhecida popularmente como "vista cansada". Mas ler em um ambiente pouco iluminado faz realmente mal à visão?

Para descobrir se há algum fundo de verdade nessa convicção de algumas pessoas, convidamos você e seu grupo a responder às questões a seguir.



Questões para discussão em grupo

- 1 Pergunte a amigos e familiares se eles acham que ler um livro no escuro faz mal à vista e como justificam suas opiniões. Anote os diferentes pontos de vista.
- 2 Nesta unidade, vimos que a fovea e a pupila exercem a função de regular a entrada da luz em nossos olhos. A retina tem função de captar a luz. Pergunte com seu grupo como a retina é constituída e a função de cada uma de suas partes.
- 3 Pesquisar com seu grupo quais seriam os sintomas que a leitura no escuro poderia provocar.
- 4 Discuta com seu grupo se há relação entre pouca luz e doenças da visão.

Resolva

Você e seu grupo vão aplicar um teste em alguns amigos e familiares para verificar se alguns deles têm presbiopia. Seleccione cinco pessoas de cada faixa etária que ainda não usem óculos para ler e recorte uma notícia de revista ou jornal para testá-las. As referências para o teste são estas: um de seus colegas deve conseguir ler a notícia a, no máximo, 12 cm de distância dos olhos; uma pessoa na faixa de 30 anos deve ler a notícia b à distância de 20 cm; uma pessoa acima dos 40 anos, aproximadamente, 40 cm, se a pessoa tiver dificuldade, vá aumentando a distância até que ela consiga ler. À medida que você aplica o teste, anote o resultado em uma tabela. Depois, a distância de leitura. Ao finalizar o teste, construa um gráfico com os dados da tabela. Ambos serão utilizados para discussão em sala de aula.

Para pesquisar em grupo

Essa seção propõe atividades experimentais ou de pesquisa temática para você e seu grupo de trabalho.

Questões de integração

Essa seção traz questões de vários concursos com o objetivo de revisar os conteúdos abordados na unidade.

QUESTÕES DE INTEGRAÇÃO

Leitura: resolva as questões no caderno.

- 1 (Exerc) As miragens existem e podem induzir a percepção de que há água onde não existe. Isso só a manifestação de um fenômeno óptico que ocorre na atmosfera.

Esse fenômeno óptico é consequência da:

- a) refração da luz nas camadas de ar próximas do chão quente.
- b) reflexão da luz no incidir no solo quente.
- c) reflexão difusa da luz na superfície rugosa.
- d) dispersão da luz nas camadas de ar próximas do chão quente.
- e) difração da luz nas camadas de ar próximas do chão quente.

- 2 (UFSCar-SP) Durante o dia, uma pessoa dentro de casa olha através do vidro de uma janela e enxerga o que está do lado de fora. À noite, a pessoa olha através da mesma janela e enxerga sua imagem refletida pelo vidro, não enxergando o que está do lado de fora. A alternativa que melhor explica a situação descrita é:

- a) O índice de refração da luz no meio externo à janela é maior à noite do que durante o dia.
- b) O índice de refração da luz no meio externo à janela é menor à noite do que durante o dia.
- c) Durante o dia, a luz que atravessa o vidro da janela, proveniente dos objetos localizados no exterior da casa, é muito mais intensa que a luz refletida pelo vidro da janela, proveniente dos objetos no interior da casa.
- d) Durante a noite, a polarização da luz no vidro da janela é positiva e permite que se enxergue o lado de fora.
- e) Durante a noite, a polarização da luz no vidro da janela é negativa e não permite que se enxergue o lado de fora.

- 3 (Mackenzie-SP) Um raio de luz monocromático que se propaga no ar (índice de refração = 1) atinge a superfície de separação com um meio homogêneo e transparente, sob determinado ângulo de incidência, diferente de 90° . Considerando os meios da tabela abaixo, espere para o qual o raio luminoso tem o menor desvio e a luz:

- a) água.
- b) álcool etílico.
- c) diamante.
- d) glicerina.
- e) vidro comum.

- 4 (UFPA) O desvio angular sofrido por um raio de luz que incide segundo o ângulo de 60° com a normal à superfície de uma lâmina de faces paralelas, após atravessá-la é de:

- a) 0°
- b) 15°
- c) 30°
- d) 60°
- e) 135°

- 5 (PUC-PR) A figura mostra um arranjo experimental. No fundo da vaso, uma lâmina pontual emite um raio que se desloca na água e atinge a superfície dielétrica.



Considerando o ângulo α como ângulo limite, o raio emergente é o raio:

- a) IV
- b) V
- c) I
- d) II
- e) III

- 6 (UnB-DF) Um feixe de luz passa do meio 1 (ar) para um meio 2 e chega novamente ao meio 1, conforme a figura. A linha tracejada representa um prolongamento do feixe incidente. Sendo $\theta = 30^\circ$, $n_1 = 1$, $n_2 = 1,5$, o índice de refração do meio 2, é:

- a) 1,5
- b) 1,2
- c) 1,3
- d) 1,4
- e) 1,6

- 7 (PUC-SP) Alguns instrumentos de óptica utilizam "prismas de reflexão total" como espelhos, como no caso da figura.



O valor do índice de refração do vidro desse prisma deve ser maior que:

- a) 2,00
- b) 1,73
- c) 1,41
- d) 1,00
- e) 0,707

- 8 (PUC-SP) Na figura, a imagem de um livro é observada através de um instrumento óptico.



Então ela será:

- a) real, formada por uma lente divergente com o objeto (livro) colocado entre o foco objeto e a lente.
- b) virtual, formada por uma lente convergente, com o objeto (livro) colocado entre o foco objeto e a lente.
- c) virtual, formada por uma lente divergente, com o objeto (livro) colocado entre o foco objeto e a lente.
- d) real, formada por uma lente convergente, com o objeto (livro) colocado entre o foco objeto e o ponto antiprincipal objeto da lente.
- e) virtual, formada por uma lente convergente, com o objeto (livro) colocado entre o foco objeto e o ponto antiprincipal objeto da lente.

- 9 (UFMG) Na figura, está representado o perfil de três lentes de vidro. Rafael quer usar essas lentes para queimar uma folha de papel com a luz do sol. Para isso, ele pode usar apenas:

- a) a lente I.
- b) a lente II.
- c) as lentes II e III.
- d) as lentes I e III.
- e) as lentes I, II e III.

- 10 (Mackenzie-SP) A figura mostra o esquema, sem escala, de um pequeno objeto real P , situado sobre o eixo principal de uma lente delgada convergente com os respectivos focos principais, F e F' , e pontos antiprincipais, C e C' .



Para isso, ele pode usar apenas:

- a) com duas lentes convergentes.
- b) com duas lentes divergentes.
- c) com uma lente convergente e uma divergente.
- d) com uma lente divergente e uma convergente.
- e) com uma lente convergente e uma biconvexa.

- 11 (UFU-MG) A objetiva de uma máquina fotográfica tem distância focal 100 mm e possui um dispositivo que permite sua avanço ou retração. A máquina é utilizada para tirar duas fotos, uma de um objeto no infinito e outra de um objeto distante 30 cm da objetiva. O deslocamento da objetiva, de uma foto para outra, em mm, é de:

- a) 50
- b) 100
- c) 150
- d) 200
- e) 250

- 12 (UFU-MG) Uma lupa, quando produz uma imagem a 30 cm da lente, para fornecer um aumento linear transversal de 16 vezes, deve ter sua distância focal de:

- a) 2 cm
- b) 2,5 cm
- c) 3 cm
- d) 4 cm
- e) 5 cm

- 13 (Concurso-RJ) A vergência ou "grau" de uma lente de óculos, expressa em dioptrias (di), equivale ao inverso da distância focal (f), medida em metros. Uma pessoa com hipermetropia para ver com nitidez um objeto colocado a 25 cm de seus olhos, precisa usar óculos de lentes de "grau" 2 dioptrias. A distância mínima, em centímetros, para que essa pessoa, quando sem óculos, veja um objeto com nitidez é de:

- a) 30
- b) 40
- c) 50
- d) 60
- e) 70

- 14 (PUC-MG) Uma pessoa não consegue ver os objetos, pois a imagem está sendo formada entre o cristalino e a retina. Para ver a imagem nítida, ela precisa de uma lente de:

- a) com lentes divergentes.
- b) com lentes convergentes e divergentes, simultaneamente.
- c) com duas lentes convergentes.
- d) com duas lentes divergentes.
- e) com uma lente convergente e uma divergente.

- 15 (Unicamp-SP) Um sistema de lentes produz a imagem real e menor de um objeto conforme a figura a seguir. Focalize a lente na distância focal e observe dois raios de luz que identificam a imagem.





Sumário

UNIDADE 1 | CALOR E TEMPERATURA, 12

Capítulo 1 Temperatura, calor e sua propagação, 14

- 1 Introdução, 14
- 2 Temperatura, 15
- 3 Equilíbrio térmico, 16
Lei zero da Termodinâmica: uma lei sobre o equilíbrio térmico, 17
- 4 Calor, 17
 - Questões propostas, 19
- 5 Processos de propagação de calor, 19
Condução térmica, 20
Convecção térmica, 21
Radiação térmica, 23
 - Questões propostas, 25
- Trilhando o caminho das competências – Os aquecedores solares, 27

Capítulo 2 Termômetros: grandezas e equações de conversão, 28

- 1 Introdução, 28
- 2 Grandezas termométricas, 29
- 3 Calibração ou graduação de um termômetro, 29
- 4 Escalas termométricas Celsius e Fahrenheit: equação de conversão, 30
- 5 Escala Kelvin (K): escala absoluta, 32
- 6 Equações de conversão, 32
 - Questões propostas, 35

Capítulo 3 Dilatação dos sólidos, 37

- 1 Introdução, 37
- 2 Dilatações e contrações, 38
Dilatação linear dos sólidos, 38
 - Questões propostas, 41Dilatação superficial dos sólidos, 43
 - Questões propostas, 45Dilatação volumétrica dos sólidos, 46
 - Questões propostas, 49

Capítulo 4 Dilatação dos líquidos, 50

- 1 Introdução, 50
- 2 Comportamento de líquidos e recipientes durante a dilatação, 50
 - Questões propostas, 55

Capítulo 5 Calorimetria, 57

- 1 Introdução, 57
- 2 Fontes de calor, 58
- 3 Capacidade térmica, 59
- 4 Calor específico, 60
 - Questões propostas, 62
- 5 Equação fundamental da Calorimetria, 63
 - Questões propostas, 67
- 6 Fases da matéria, 69
- 7 Mudanças de fase e calor latente, 70
 - Questões propostas, 75
- 8 Trocas de calor em recipientes termicamente isolados, 79
- 9 Trocas de calor e equilíbrio térmico, 79
 - Questões propostas, 82Calorímetro e trocas de calor, 84
 - Questões propostas, 86
- Investigar é preciso – Atividade experimental – Observar a fusão do gelo, 87
- Questões de integração, 90

UNIDADE 2 | GASES E TERMODINÂMICA, 92

Capítulo 6 Estudo dos gases e a equação de um gás ideal, 94

- 1 Introdução, 94
- 2 O estado gasoso, 95
Gás ideal, 95
- 3 Transformações gasosas, 96
Transformação isotérmica, 97
Transformação isobárica, 98

O zero absoluto, 98

Transformação isovolumétrica, 99

■ Questões propostas, 101

4 Equação de Clapeyron ou equação de estado de um gás ideal, 102

5 Lei geral dos gases ideais (ou perfeitos), 103

■ Questões propostas, 104

Capítulo 7 1ª lei da Termodinâmica, 106

1 Introdução, 106

2 Trabalho em uma transformação gasosa, 107

■ Questões propostas, 109

3 Energia interna, 110

4 1ª lei da Termodinâmica, 111

5 Aplicações da 1ª lei da Termodinâmica às transformações gasosas, 113

Transformação isobárica, 113

Transformação isovolumétrica (isocórica), 113

Transformação isotérmica, 114

Transformação adiabática, 115

■ Questões propostas, 118

Capítulo 8 2ª lei da Termodinâmica, 120

1 Introdução, 120

2 Transformações cíclicas, 121

■ Questões propostas, 123

3 2ª lei da Termodinâmica, 124

4 Máquinas térmicas, 125

5 Ciclo de Carnot: rendimento máximo, 128

■ Questões propostas, 130

6 Máquinas frigoríficas: transformação de trabalho em calor, 131

7 Entropia, 131

■ Questões propostas, 133

■ Trilhando o caminho das competências – Geladeiras de ontem e de hoje, 134

■ Investigar é preciso – atividade experimental – A desordem dos feijões, 135

■ Questões de integração, 136

UNIDADE 3 | PRINCÍPIOS DA ÓPTICA GEOMÉTRICA E REFLEXÃO DA LUZ, 138

Capítulo 9 Princípios da propagação da luz, 140

1 Introdução, 140

2 Luz em um modelo geométrico, 141

3 Princípios da Óptica geométrica, 142

4 Meios de propagação da luz, 143

5 Sombra e penumbra, 144

■ Questões propostas, 146

6 Câmara escura de orifício, 147

7 Ângulo visual ou diâmetro aparente, 148

8 Ano-luz, 148

■ Questões propostas, 152

Capítulo 10 Reflexão da luz, 153

1 Introdução, 153

2 Reflexão da luz, 154

3 Leis da reflexão, 155

4 Espelhos planos, 155

Imagem virtual, 155

Simetria objeto-imagem, 156

Campo visual de um espelho plano, 157

■ Questões propostas, 160

■ Trilhando o caminho das competências – A oscilação da Lua, 162

Capítulo 11 Espelhos esféricos, 163

1 Introdução, 163

2 Espelhos esféricos, 164

3 Elementos dos espelhos esféricos, 164

Focos do espelho esférico, 165

4 Construção de imagens de objetos, 166

■ Questões propostas, 169

5 Imagens fornecidas por espelhos esféricos, 171

6 Equação dos pontos conjugados de Gauss, 171

- 7 Aumento ou ampliação, 172
 - Questões propostas, 175
- Investigar é preciso – atividade experimental – Determinando elementos de espelhos esféricos, 177
- Questões de integração, 178

UNIDADE 4 | REFRAÇÃO DA LUZ, 180

Capítulo 12 Refração luminosa, 182

- 1 Introdução, 182
- 2 Refração da luz, 183
- 3 Leis da refração, 184
- 4 Refração atmosférica, 185
 - Questões propostas, 186
- 5 Reflexão total, 187
- 6 Determinação do ângulo limite, 187
- 7 A reflexão total explica alguns fenômenos curiosos, 189
 - Por que o diamante brilha tanto?, 189
 - Por que o asfalto parece molhado em dias de calor?, 189
 - Questões propostas, 192
- Trilhando o caminho das competências — O salva-vidas e o menor tempo, 193

Capítulo 13 Sistemas refratores; dispersão da luz, 195

- 1 Introdução, 195
- 2 Sistemas refratores, 196
 - Dioptra plano, 196
 - Lâmina de faces paralelas, 197
 - Questões propostas, 200
- 3 Dispersão da luz, 201
- 4 Arco-íris, 201
 - Questões propostas, 203

Capítulo 14 Lentes esféricas: formação de imagens, 204

- 1 Introdução, 204
- 2 Lentes esféricas, 205
- 3 Elementos das lentes esféricas, 207

- 4 Formação das imagens conjugadas por lentes esféricas, 207
 - Questões propostas, 211

Capítulo 15 Lentes esféricas: estudo analítico, 212

- 1 Introdução, 212
- 2 Equação dos pontos conjugados de Gauss, 213
- 3 Aumento ou ampliação, 213
- 4 Vergência ou convergência (V), 214
- 5 Aberração cromática, 215
 - Questões propostas, 217

Capítulo 16 Instrumentos ópticos e óptica da visão, 219

- 1 Introdução, 219
- 2 Instrumentos ópticos, 220
 - Lupa ou microscópio simples, 220
 - Microscópio composto, 220
 - Luneta, 221
 - Telescópios, 222
 - Máquina fotográfica, 223
 - Questões propostas, 225
- 3 A visão e o olho humano, 226
 - Acomodação visual, 227
 - Defeitos da visão, 228
 - Questões propostas, 234
- Investigar é preciso – atividade experimental – Uma lente de água, 236
- Para pesquisar em grupo – Será verdade mesmo que ler no escuro faz mal à visão?, 237
- Questões de integração, 238

UNIDADE 5 | OSCILAÇÕES E ONDAS, 240

Capítulo 17 Fenômenos ondulatórios, 242

- 1 Introdução, 242
- 2 O oscilador massa-mola, 243
- 3 O pêndulo simples, 243
 - Questões propostas, 245
- 4 Onda em uma corda: ondas unidimensionais, 246
 - Propagação de um pulso, 246

Onda como uma sequência de pulsos, 247
Classificação das ondas, 248
Velocidade de propagação de uma onda, 248
Comprimento de onda e equação fundamental da Ondulatória, 249
Mudança de meio de propagação, 250
Interferência de pulsos em cordas, 251

5 Onda em superfícies de meios líquidos: ondas bidimensionais, 252

Reflexão de ondas em líquidos, 252
Refração de ondas em líquidos, 253
O fenômeno da difração, 257
Interferência de ondas bidimensionais, 258

6 Ondas sonoras: ondas tridimensionais, 259

Espectro sonoro, 260
A velocidade do som, 261
■ Questões propostas, 262

Capítulo 18 Fenômenos sonoros: a música e o efeito Doppler, 264

1 Introdução, 264

2 Qualidades fisiológicas do som, 265

Altura, 265
Timbre, 265
Intensidade sonora, 266
Nível de intensidade sonora, 267

3 Instrumentos de corda, 269

4 Instrumentos de sopro, 270

5 O efeito Doppler: fonte sonora em movimento, observador em repouso, 270

Fonte em aproximação, 271
Fonte em afastamento, 272

■ **Questões propostas, 274**

■ **Investigar é preciso – atividade experimental – Uma casa silenciosa!, 275**

■ **Questões de integração, 276**

Respostas, 278

Bibliografia, 285

Museus e centros de ciências, 287

UNIDADE

1

Calor e temperatura

Para começo de conversa

O que são "ilhas de calor" de uma região?

Ilhas de calor é o nome atribuído a um fenômeno típico das regiões centrais das grandes metrópoles. Nessas regiões, a temperatura medida em local de sombra pode atingir 3 °C acima da temperatura registrada nos bairros periféricos, por exemplo. Isso ocorre em razão do adensamento urbano, da grande extensão de solo coberto com asfalto ou outro tipo de calçamento e pela ausência de áreas verdes.



S1

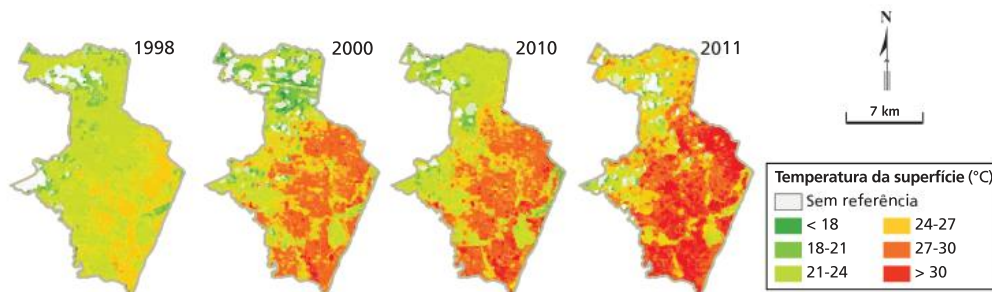
Professor, consulte o *Suplemento* para obter orientações sobre a questão introdutória, os objetivos desta unidade e a proposta de abordagem inicial dos conteúdos.

As Ilhas de calor são fenômenos climáticos que ocorrem principalmente nas cidades com elevado grau de adensamento urbano. Nessas cidades, a temperatura média costuma ser mais elevada nos bairros intensamente verticalizados e com poucas áreas verdes do que nos bairros mais afastados. Assim, uma cidade com grande concentração de ruas e avenidas asfaltadas, muitos edifícios de concreto e poucas áreas arborizadas concentra mais calor, fazendo com que a temperatura fique acima da média dos municípios da região. As ilhas de calor são negativas para o meio ambiente, pois favorecem a intensificação do fenômeno do aquecimento global. Muitas cidades brasileiras já apresentam esse fenômeno, em maior ou menor grau, como São Paulo, Manaus, Belém e Recife, cidade retratada nesta foto.

Capítulos

- 1 Temperatura, calor e sua propagação
- 2 Termômetros: grandezas e equações de conversão
- 3 Dilatação dos sólidos
- 4 Dilatação dos líquidos
- 5 Calorimetria

Ilhas de calor na cidade do Recife



Estudo revela ilhas de calor do Recife. Disponível em: <<https://goo.gl/P0oJea>>. Acesso em: 16 fev. 2016.

FERNANDO JOSÉ FERREIRA

Temperatura, calor e sua propagação

ou: Por que, habitualmente, chocolates e bombons são embrulhados em papel-alumínio?

Bombons e chocolates são usualmente embrulhados em papel-alumínio para serem protegidos da radiação externa, pois esse tipo de papel reflete o calor em forma de ondas eletromagnéticas que nele incidem. Com isso, os bombons podem conservar suas propriedades por mais tempo.

1 Introdução



No Suplemento, há orientações para o trabalho com a questão introdutória.

A temperatura do corpo humano é aproximadamente 37°C (trinta e sete graus Celsius). No entanto, sentimos que os dias estão quentes quando a temperatura ambiente é superior a 25°C .

Você já havia pensado nisso? Nos dias quentes, geralmente, vestimos roupas mais leves e claras. Nos dias frios, o habitual é optar por roupas escuras e de tecidos espessos.

O estudo do calor nos ajuda a entender por que escolhemos um ou outro tipo de roupa dependendo da temperatura do ambiente. Esse estudo também ajuda a compreender uma série de fenômenos naturais e de fatos do cotidiano, como o efeito estufa, o uso de iglus como moradias por algumas comunidades esquimós, o uso de espetos metálicos na preparação de um churrasco, a razão de sentir que o dia está quente apesar de a nossa temperatura corporal ser maior que a do ambiente ou até mesmo o fato de um planador voar sem necessidade de motor. Estudar os conceitos de temperatura e calor, bem como as formas de transmissão do calor, é o que faremos neste capítulo.



GERSON GERLOFFPULSAR IMAGENS



RUBENS CHAVESPULSAR IMAGENS

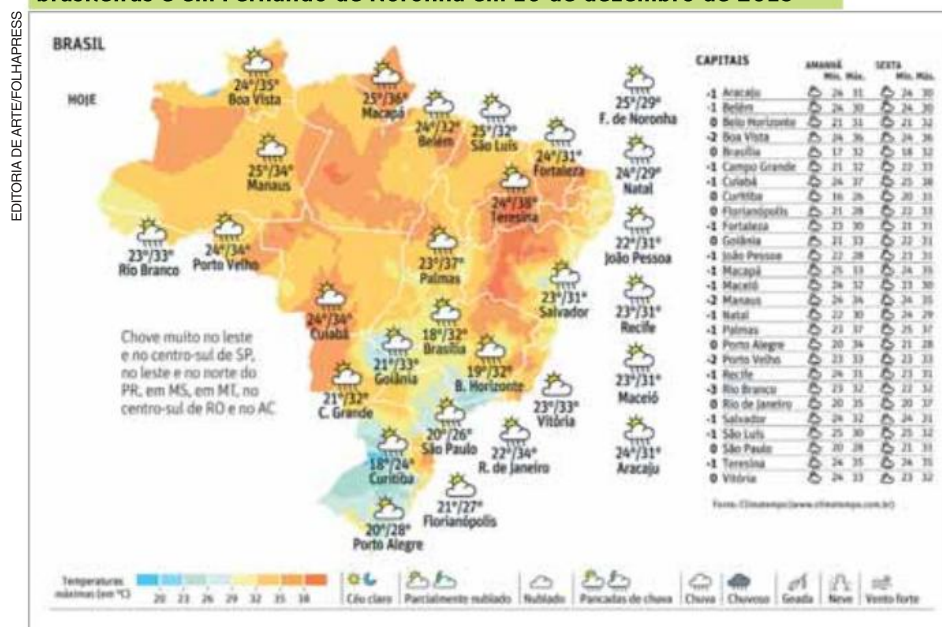
Figura 1 • Dependendo da temperatura ambiente, escolhemos diferentes tipos de roupa. (A) Em dias frios, geralmente escolhemos roupas escuras e espessas (São José dos Ausentes, RS, 2013); (B) em dias quentes usamos roupas claras e leves (Fortaleza, CE, 2013).

2 Temperatura

Por meio do tato, podemos verificar se a temperatura da água do banho está ou não agradável. Se uma criança afirma que não está se sentindo bem, a mãe pode avaliar sua temperatura tocando sua testa. No entanto, nossa sensação térmica, nesses casos, não informa de maneira precisa o valor da temperatura de um ambiente, um alimento ou uma pessoa.

A sensação térmica obtida pelo tato, nos exemplos anteriores, é apenas uma expressão qualitativa do estado térmico de um sistema. Para uma avaliação precisa, é necessário uma medida quantitativa, ou seja, devemos conhecer o valor da **temperatura** do sistema.

Previsão do tempo e das temperaturas máximas e mínimas nas capitais brasileiras e em Fernando de Noronha em 16 de dezembro de 2015



Fonte: Folha de S.Paulo, 16 dez. 2015.

Figura 3 • As previsões do tempo informam as temperaturas nos diversos lugares do planeta.

Mas o que é temperatura? De maneira macroscópica, estamos acostumados a associar a temperatura aos estados térmicos de um corpo: quente ou frio. Se um corpo está quente, relacionamos a ele uma temperatura elevada. Aos corpos mais frios, associamos temperaturas mais baixas.

E como seria a interpretação microscópica do conceito de temperatura? Para desenvolver essa interpretação, é preciso conhecer um pouco sobre a agitação das partículas que constituem um corpo. Quando um corpo é aquecido, a agitação média de suas partículas tende a aumentar, mas, quando ele é resfriado, o movimento de suas partículas tende a diminuir, ou seja, a agitação média das partículas do corpo se reduz.

As altas temperaturas nos dias de verão provocam aumento na *agitação térmica* das partículas, ou seja, com essa agitação, a energia total dos corpos tende a ser maior. Dessa maneira, dizemos que altas temperaturas estão associadas a níveis elevados de agitação térmica e, conseqüentemente, relacionadas à maior energia total média por partícula.



Figura 2 • A jovem coloca o pé na água da piscina para decidir se mergulha ou não. Se ela estiver por muito tempo exposta ao sol, provavelmente avaliará que a temperatura da água está baixa. O tato não nos fornece uma informação precisa da temperatura de um sistema.



Figura 4 • O aquecimento da água provoca aumento no movimento de translação das partículas do sistema.

Ao movimento das partículas de um corpo pode ser associada certa energia cinética. Essa energia está relacionada ao movimento de translação, de rotação e vibração das partículas. Denominamos **energia interna** de um corpo a união de todas as formas de energia que ele possui; entre elas a energia potencial associada a cada uma das partículas que o constituem e as energias cinéticas (de translação, rotação e vibração de suas partículas).

Ao aquecer uma massa qualquer de água, a agitação de cada uma das partículas componentes do sistema aumenta. Com isso, o movimento de translação dessas partículas se intensifica, aumentando a energia interna. Percebemos essa variação na energia interna porque a temperatura da massa de água aumenta.

Para um sistema determinado, a energia interna e a temperatura são grandezas diretamente proporcionais. Quanto maior a energia interna do sistema, maior será sua temperatura.

Assim, podemos estabelecer uma definição de temperatura:

Temperatura é a grandeza física macroscópica associada ao grau de agitação térmica média das partículas de um corpo ou de um sistema.

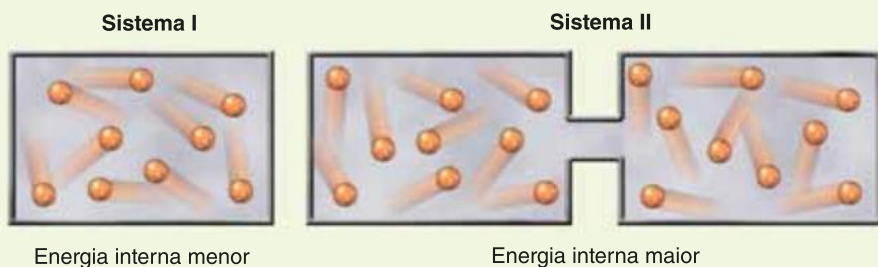
Como não é possível medir diretamente o grau de agitação das moléculas de um corpo, a medida de temperatura é feita indiretamente por meio de um instrumento denominado termômetro.

Geralmente, no Brasil, os termômetros medem a temperatura na unidade **graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$)**.

Você precisa saber!

Dois sistemas cujas partículas estão no mesmo nível de agitação possuem a mesma temperatura, mas não têm necessariamente a mesma energia interna. O sistema formado pelo maior número de partículas terá maior quantidade de energia interna, pois, na soma, consideramos as energias cinéticas de cada uma das partículas componentes do sistema.

Chame a atenção dos alunos para a proporcionalidade entre a temperatura e a energia interna de um sistema. Discuta com eles o conteúdo desta seção, esclarecendo que a energia interna não depende apenas da temperatura de um sistema.



Por causa disso, dois sistemas podem estar à mesma temperatura, mas possuírem energias internas diferentes.

3 Equilíbrio térmico

Ao misturar duas massas de água com temperaturas diferentes em um mesmo recipiente, vamos observar, após certo tempo, que a temperatura final da mistura será diferente das temperaturas iniciais dessas massas.

Quaisquer corpos colocados em um **recipiente termicamente isolado** tendem a um estado final em que suas partículas atingem o mesmo nível de agitação térmica, ou seja, em que suas temperaturas se igualam. Nesse estágio, os corpos alcançam o estado de **equilíbrio térmico**.

Recipiente termicamente isolado. Sistema fechado, no qual não ocorre absorção ou dissipação de energia em relação ao meio externo. Os corpos colocados no interior desse tipo de sistema trocam energia apenas entre si.

Lei zero da Termodinâmica: uma lei sobre o equilíbrio térmico

Considere três corpos, A , B e C , isolados termicamente e com temperaturas T_A , T_B e T_C , sendo $T_A = T_B$ e $T_A = T_C$.

Como a temperatura do corpo A é igual à temperatura do corpo B , os corpos A e B estão em equilíbrio térmico. Da mesma forma, os corpos A e C estão em equilíbrio térmico, pois $T_A = T_C$. Pela lei zero da Termodinâmica, os corpos B e C estarão à mesma temperatura e, portanto, em equilíbrio térmico. Assim:

Se dois corpos estão em equilíbrio térmico em relação a um terceiro, então eles estão em equilíbrio térmico entre si.

4 Calor

Dois corpos com temperaturas diferentes colocados em um recipiente isolado termicamente atingem o estado de equilíbrio térmico.

Ao longo do tempo, os cientistas procuraram entender como e por que os corpos colocados em contato tendem a atingir a mesma temperatura; pretendiam, assim, compreender a natureza do **calor**. As observações do engenheiro inglês Benjamim Thompson, conde de Rumford (1753-1814), contribuíram significativamente para decifrar a natureza do calor. No final do século XVIII, Thompson visitava a fabricação de canhões na Alemanha quando observou que as temperaturas das peças de metal se elevavam quando perfuradas por brocas. Essa constatação levou-o a associar a variação de temperatura à energia mecânica dissipada por atrito na perfuração.

Ao tomar conhecimento das observações de Thompson, alguns cientistas realizaram experimentos para comprovar a relação entre calor e energia. Um dos físicos que se destacaram nessa investigação foi o também inglês James Prescott Joule (1818-1889), que, por meio de experimentos, estabeleceu o equivalente entre energia mecânica e calor.

Em seu experimento (fig. 6), Joule acoplou um eixo a um conjunto de pás dentro de um recipiente com água. Associou ao eixo um sistema de pesos, que, ao cair de certa altura, faziam o eixo girar. Ao colocar o termômetro no recipiente, Joule verificou que a temperatura da água havia se elevado e associou essa variação ao movimento decorrente do atrito da água com as pás que a agitavam. Ele concluiu que parte da energia mecânica do sistema transformava-se em calor, comprovando, assim, que o calor é uma forma de energia.

Graças à contribuição de Joule, hoje explicamos os fenômenos térmicos com base em um modelo conceitual que define calor como uma forma de energia, que não é propriedade de um corpo. Desse modo:

Calor é energia em trânsito de um corpo para outro, devido unicamente à diferença de temperatura entre eles.

Considere dois corpos com diferentes temperaturas e que tenham quantidades diferentes de energia interna (fig. 7A, na próxima página). Ao colocá-los em um recipiente termicamente isolado, parte da energia interna do corpo que está com maior temperatura é transferida para o corpo que está com menor temperatura (fig. 7B). O processo de transferência de energia ocorre de maneira espontânea,



Figura 5 • Ao perfurar uma peça de metal, de madeira ou uma parede, podemos observar o aquecimento tanto da broca quanto da região na qual foi feito o furo. Essa variação de temperatura indica a possibilidade de associação entre a dissipação de energia mecânica e o calor.

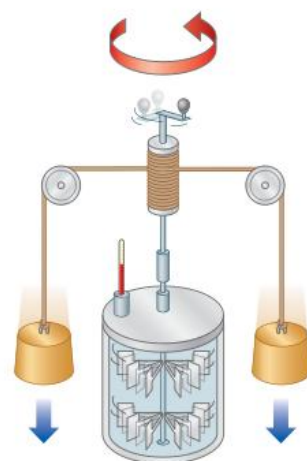


Figura 6 • Esquema do experimento de Joule que comprovou que o calor é uma forma de energia.

do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura. A energia em trânsito é denominada calor, e o processo de transferência de energia cessa quando os dois corpos igualam seus níveis de agitação térmica, ou seja, quando suas temperaturas se tornam iguais, atingindo, portanto, o equilíbrio térmico (fig. 7C).

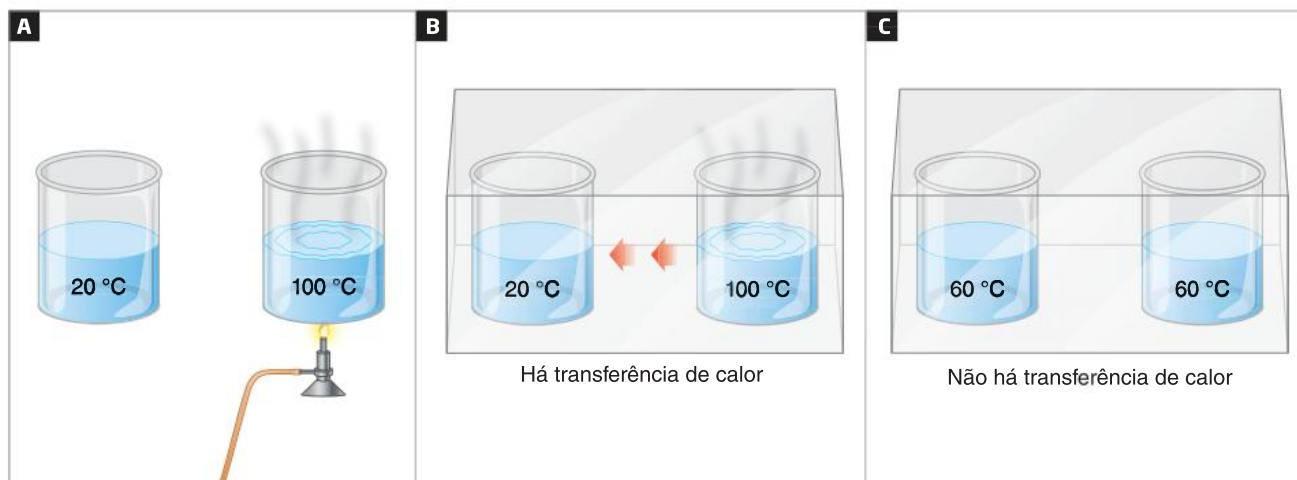


Figura 7 • O processo de transferência de energia entre dois corpos com diferentes temperaturas é interrompido quando os corpos atingem o equilíbrio térmico.

No Sistema Internacional (SI), a unidade de calor é o **joule** (J), pois é a unidade padrão para energia.

Outra unidade muito utilizada para calor é a **caloria** (cal).

Uma **caloria** é a quantidade de energia que, ao ser transferida para 1 grama de água, varia sua temperatura em 1 °C.

S3

No *Suplemento*, há uma questão sobre equilíbrio térmico para ser proposta aos alunos. Para resolvê-la, os alunos precisarão estabelecer a relação entre o conhecimento desse conceito e sua expressão matemática.

O tema de termorregulação corporal pode gerar atividades de pesquisa interdisciplinar com a área de Biologia. Informações podem ser obtidas em: <<http://www.uff.br/WebQuest/pdf/termo.htm>>; acesso em: 7 abr. 2016.

QUESTÕES RESOLVIDAS

R1 Em um laboratório de Física, o professor pede a seus alunos que preencham três recipientes, A, B e C, com:

A: água e gelo em equilíbrio térmico;

B: água retirada de um filtro à temperatura ambiente;

C: água morna obtida de torneira elétrica.



Feito isso, pede a cada aluno que mergulhe uma das mãos no recipiente A e a outra no recipiente C, mantendo-as ali por algum tempo. Em seguida, pede que retirem as mãos de A e C e, imediatamente, as coloquem em B.

Que sensação térmica os alunos terão ao colocar as mãos em B? O que se pode comprovar com esse experimento?

► Resolução

Ao mergulhar as mãos em B, o aluno terá duas sensações térmicas diferentes: a mão que estava em C perceberá a água de B mais fria que a mão que estava em A. Com base nesse experimento simples, ele pode concluir que a sensação térmica não é suficiente para definir o estado térmico de um sistema, pois é possível experimentar sensações térmicas diferentes em um mesmo sistema (no caso, água no recipiente B).

- **R2** Para se aquecer em um dia frio, uma pessoa toma uma xícara de chá. Sentindo ainda muito frio, raciocina que, se tivesse ingerido duas xícaras de chá bem quente em vez de uma, sua sensação de frio poderia ser ainda menor, pois seu corpo receberia maior quantidade de energia na forma de calor. Supondo que as duas xícaras contenham chá à mesma temperatura, analise do ponto de vista dos conceitos de calor e temperatura a solução proposta pela pessoa.

► **Resolução**

A solução não está correta. A sensação térmica de frio não será alterada se a pessoa tomar duas xícaras de chá em vez de uma, porque a temperatura do corpo humano não varia significativamente quando ingerimos grande quantidade de líquido quente. O ser humano é homeotérmico, isto é, possui a capacidade de manter a temperatura corporal dentro de uma faixa razoavelmente estreita

(em torno de $36,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; a temperatura da pele é, no entanto, cerca de dois a três graus mais baixa, em geral), apesar das variações térmicas do ambiente. O equilíbrio térmico é conseguido pelo balanço entre a perda e a produção ou aquisição de calor por meio de reações internas ao organismo. O fato de introduzir um líquido quente no corpo em um dia frio faz com que menos energia derivada de calor metabólico seja necessária para termorregular o corpo da pessoa, ao menos durante um curto intervalo de tempo. Isso pode suspender reações normais, como tremores, e diminuir a sensação subjetiva de frio, mesmo que, ao longo do processo, não haja variação significativa na temperatura global do corpo. Localmente (mãos, esôfago, estômago) haverá mudança de temperatura por alguns instantes. Assim, a ação de beber duas xícaras de chá terá o mesmo efeito — local e transitório — de ingerir apenas uma como alívio contra o frio.

QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

- 1 No café da manhã de Débora, são servidas duas jarras contendo massas iguais de leite, sendo uma de leite gelado e a outra de leite quente. Débora afirma que a jarra com leite gelado tem menos calor que a jarra com leite quente. Ela diz também que a jarra com leite quente tem maior energia interna que a jarra com leite gelado. As afirmações de Débora estão corretas? Justifique sua resposta.
- 2 Quando colocamos corpos em um mesmo recipiente termicamente isolado, ocorre transferência de energia entre eles até ser atingido o estado de equilíbrio térmico. Qual é a condição necessária para haver calor, ou seja, para ocorrer transferência de energia entre os corpos?
- 3 Três pequenos cubos, de diferentes substâncias e marcados respectivamente com letras que representam a inicial do material de que são feitos, *M* (madeira), *A* (acrílico) e *B* (borracha), são colocados em um ambiente termicamente isolado. Os cubos *M* e *A* estão encostados e à mesma temperatura do cubo *B*. Considerando essa situação, leia as afirmativas a seguir e classifique cada uma

em verdadeira ou falsa. Em seguida, justifique sua classificação.

- I. Os três cubos têm energia interna nula.
 - II. Os cubos *M* e *A* estão em equilíbrio térmico.
 - III. A diferença de temperatura entre os cubos *A* e *B* é diferente de zero.
 - IV. O calor contido em cada um dos três cubos é o mesmo.
- 4 A lei zero da Termodinâmica afirma: "Se dois corpos, *A* e *B*, estão em equilíbrio térmico com um terceiro corpo *C*, então eles estão em equilíbrio térmico entre si". Considere as temperaturas T_A , T_B e T_C para cada um dos corpos *A*, *B* e *C*, respectivamente. A expressão matemática entre essas temperaturas que corresponde à lei zero pode ser escrita da seguinte maneira: $T_A = T_B = T_C$. Considere um corpo *D* que não esteja em equilíbrio térmico com um corpo *E* e que *E*, por sua vez, não esteja em equilíbrio térmico com um corpo *F*. Represente, por meio de expressões matemáticas, as relações entre as temperaturas dos corpos *D*, *E* e *F*.

5 Processos de propagação de calor

O gelo que derrete quando imerso em um copo de água, o interior de um automóvel que se aquece em um dia ensolarado, o leite que derrama no fogão ao ser aquecido são exemplos de fenômenos relacionados aos processos de propagação ou transmissão de calor.

A propagação de calor ocorre, de maneira espontânea, de um corpo de maior temperatura para outro de menor temperatura. O processo de transferência de calor entre quaisquer corpos cessa quando os corpos envolvidos nas trocas de energia atingem a mesma temperatura, ou seja, quando o equilíbrio térmico é alcançado.

De maneira geral, podemos classificar os processos de propagação de calor em três tipos: **condução**, **convecção** e **radiação**.



Figura 8 • Ao acolher seu filho no colo, o pai troca calor com ele.



Figura 9 • A transmissão de calor ocorre, de maneira espontânea, da água para o gelo, pois a água está a uma temperatura maior que a do gelo.

Condução térmica

A sensação de frio que sentimos em dias de baixa temperatura é minimizada ao vestir roupas de lã. O fluxo de calor entre nosso corpo (quente) e o meio externo (frio) é reduzido pelo uso de roupas de determinados tecidos.



Figura 10 • (A) Nos dias frios, a falta de roupas adequadas gera desconforto. (B) Os agasalhos aquecem adequadamente e nos deixam confortáveis nos dias frios.

Materiais que reduzem o fluxo de calor entre os corpos são denominados **isolantes térmicos**, e materiais que transmitem facilmente o calor de um corpo para outro são chamados **bons condutores de calor**. Os metais são exemplos de bons condutores de calor, enquanto a madeira e a lã são consideradas isolantes térmicos.

Ao analisar a disposição dos átomos ou das moléculas que constituem os bons condutores de calor, verificamos que eles estão organizados em arranjos que têm a propriedade de transmitir a agitação térmica de um átomo ou de uma molécula para seu vizinho e dele para o seguinte, e assim sucessivamente.

A **condução térmica** é um processo de propagação de calor que ocorre pela transmissão da agitação térmica de partículas de uma região de maior temperatura para partículas de uma região vizinha de menor temperatura.

S4

No **Suplemento**, há uma questão problematizadora sobre os processos de propagação de calor. Essa questão pode ser utilizada como incentivo à pesquisa ou como discussão introdutória ao estudo dos processos de propagação de calor.



S5

No **Suplemento**, você encontra orientações para o trabalho com essa atividade.

Para haver propagação de calor por condução, é necessária a existência de partículas que transportem a energia, ou seja, deve existir um meio material por onde o calor possa se propagar. Desse modo, apesar de ocorrer sobretudo nos sólidos, a propagação de calor por condução também pode acontecer em líquidos e gases.

Imagine que você coloque uma das mãos na maçaneta de metal de uma porta de madeira e a outra diretamente em contato com a porta. Por que a maçaneta metálica vai parecer mais fria que a porta de madeira se ambas estão em um mesmo local e, portanto, em equilíbrio térmico? A sensação térmica depende da **condutibilidade térmica** do material que compõe o corpo. Como o metal tem maior condutibilidade, a transferência de calor de seu corpo para o metal é mais rápida, em um primeiro momento, do que a transferência para a madeira. Após longo período em contato com a maçaneta e com a madeira da porta, ambos parecerão ter a mesma temperatura.

Portanto, há materiais que são bons condutores de calor, por isso, em um forno elétrico os filamentos dos resistores geralmente são de metal.

No dia a dia, quando queremos nos proteger de temperaturas elevadas ou baixas, devemos procurar um material que seja um bom isolante térmico. Essa busca também está presente na natureza, como mostra a figura 12.

Condutibilidade térmica. Grandeza física que diferencia os materiais em relação à condução do calor.



Figura 11 • Átomos e moléculas da extremidade do espeto em contato com o fogo estão sujeitos a maior agitação térmica que a extremidade oposta. Parte dessa agitação térmica é transmitida para átomos e moléculas vizinhos, que, então, adquirem maior energia e, por sua vez, transmitem a agitação para seus vizinhos, e assim sucessivamente. A transmissão de calor só ocorre enquanto há diferença de temperatura entre os componentes do espeto.



Figura 12 • Nos dias frios, o pássaro erica suas penas para se manter aquecido. Essa ação instintiva conserva uma camada de ar, bom isolante térmico, entre seu corpo e o ambiente.

Convecção térmica

Invernos rigorosos exigem proteção contra as baixas temperaturas. Aquecedores de ambientes aquecem o ar das residências, aumentando o conforto nos dias frios.

Quando um aquecedor de ambientes está ligado, a propagação de calor se dá, sobretudo, devido ao que chamamos de **convecção térmica**.

A **convecção térmica** é um processo de propagação de calor que se caracteriza pelo transporte de matéria entre regiões de um sistema (corpo ou meio) e que acontece apenas em fluidos (líquidos e gases), pois o movimento de matéria se dá pela diferença de densidade.

Há aquecedores cuja fonte de calor é composta de resistores. Nesses aparelhos, o ar próximo à fonte de calor torna-se menos denso e, assim, tende a subir. O ar aquecido sobe, empurrando para baixo a porção de ar que está a menor temperatura, e, portanto, é mais denso que o ar aquecido. Formam-se, então, as **correntes de convecção**.

VOCÊ SE LEMBRA?

Densidade

A densidade de um corpo (d) é dada pela razão entre sua massa (m) e seu volume (V):

$$d = \frac{m}{V}$$

Ao ser aquecido, o corpo tende a dilatar-se. Quanto maior seu volume, menor será sua densidade. Por outro lado, ao ser resfriado, o volume do corpo tende a diminuir e, consequentemente, sua densidade aumenta.

Ao aquecer água em panelas transparentes, é possível observar a formação de correntes de convecção. A temperatura da porção de água mais próxima do fogo aumenta. Essa massa de água torna-se menos densa e sobe para a superfície, enquanto a porção de água a menor temperatura, e, portanto, mais densa, tende a descer. Esse processo contínuo de subida da água menos densa a maior temperatura e descida da água mais densa a menor temperatura constitui as correntes de convecção.



Figura 13 • Nas cidades onde o frio é intenso, usam-se sistemas de aquecimento para melhorar o conforto térmico das residências. No ambiente onde os aquecedores são utilizados, a temperatura do ar aumenta pelo processo de convecção térmica.



Figura 14 • Na água fervente também se formam correntes de convecção.

Para saber mais

Conexões com o cotidiano

Convecção térmica: aplicações

Para voar em asas-deltas e planadores, os pilotos utilizam de maneira muito eficaz as correntes de convecção presentes na atmosfera. Se o piloto deseja subir, utiliza correntes de convecção de ar quente, que, graças à baixa densidade, são ascendentes. Ao planar, os pilotos descem devido à ação da gravidade terrestre. Quando precisam descer ainda mais, eles aproveitam as correntes de convecção de ar frio, que, por sua maior densidade, são descendentes.



Praia de Ponta Negra, Natal, RN, 2011.



As brisas marítimas e terrestres são correntes de convecção. Durante o dia, a terra está a uma temperatura maior que a água. Assim, o ar acima da terra está também a uma temperatura maior que o ar acima do mar; portanto, o ar “terrestre” tende a subir. O ar “marinho” ocupa o espaço antes ocupado pelo ar “terrestre”. Temos, assim, durante o dia, uma brisa que vem do mar em direção à terra. Durante a noite, a situação se inverte: a água do mar está a uma temperatura maior que a

temperatura da terra. O ar “terrestre” ocupa o lugar do ar que antes estava acima da água do mar, que, por estar a uma temperatura maior, tende a subir porque é menos denso. Forma-se, então, a brisa terrestre.

AMPLIANDO SUA LEITURA

- 1 A instalação de um aparelho de ar-condicionado deve ser feita na parte superior ou inferior do ambiente?
- 2 De que maneira as correntes de convecção propagam o calor no forno de um fogão a gás residencial?

Radiação térmica

Há vácuo na maior parte do caminho percorrido pelos raios do Sol até atingirem a Terra. Portanto, a propagação do calor proveniente do Sol ao nosso planeta não ocorre por condução ou convecção, pois esses processos dependem de meios materiais para ocorrer.

A propagação do calor, que, como visto, pode acontecer tanto num meio material quanto no vácuo, é denominada **radiação térmica**. Esse processo é semelhante ao que ocorre com uma lâmpada incandescente acesa, a qual irradia calor ao ambiente que recebe sua luz.

Qualquer corpo aquecido emite radiação térmica por meio de ondas eletromagnéticas, ou seja, irradia energia de maneira contínua. Quando você se aproxima de um objeto de metal aquecido, de uma grelha para churrasco, de um ferro elétrico para passar roupas ou de uma placa de metal usada no alisamento de cabelos, possivelmente sente os efeitos de uma quantidade significativa de radiação térmica proveniente desse objeto metálico.



DAVID EWING/AGB PHOTO LIBRARY

Figura 15 • Ambientes iluminados por lâmpadas incandescentes ficam aquecidos por radiação térmica.



Figura 16 • Todos os corpos emitem radiação térmica. Nós também emitimos esse tipo de energia radiante. Existem máquinas fotográficas com sensibilidade à radiação térmica que possibilitam tirar fotos como esta. As cores apresentam um código no qual a cor vermelha representa as partes com temperaturas mais altas. A gradação de cores vermelho-laranja-verde-azul significa uma ordem decrescente de temperatura. Dessa maneira, sentimos maior radiação se nos aproximamos das partes do corpo representadas na foto pelas cores amarela, vermelha e laranja.

A **radiação térmica** é um processo de propagação de calor que se caracteriza pelo transporte de energia por meio de ondas eletromagnéticas (radiação infravermelha). Esse processo de transmissão de calor ocorre tanto no vácuo quanto em meios materiais.

Os corpos que idealmente absorvem toda a energia radiante que neles incide são denominados corpos negros. Automóveis de cores escuras não são corpos negros ideais, mas absorvem mais energia radiante que automóveis de cores claras. Isso ocorre porque os corpos claros ou espelhados refletem quase totalmente a radiação infravermelha incidente.

O efeito estufa na Terra

Uma estufa é um ambiente propício ao desenvolvimento das plantas, porque seu interior mantém uma temperatura superior à da área externa e concentra grande umidade. Isso acontece porque as paredes e o teto das estufas são feitos de vidro, o que permite a penetração de boa parte dos raios do Sol. O chão geralmente é escuro, o que facilita a absorção dos raios solares por ele. Nesse processo, a energia absorvida é reemitida pelo solo por radiação térmica.

No caso da estufa da figura A, ao lado, por ser opaco, o vidro bloqueia grande parte da radiação térmica, aprisionando-a dentro da estufa, o que provoca elevação da temperatura interna e torna o ambiente adequado ao desenvolvimento das plantas.

Esse mesmo fenômeno acontece no nosso planeta. A atmosfera terrestre é composta de uma série de gases, na maior parte nitrogênio e oxigênio. Mas há também outros gases, como dióxido de carbono, metano, óxido nítrico e ozônio, que representam cerca de 1% da atmosfera do planeta. No entanto, esses gases são capazes de reter a radiação térmica reemitida pela Terra, depois que ela recebe a radiação solar. Comparada com a estufa, a atmosfera tem o mesmo papel do vidro. Como consequência, temos uma elevação global da temperatura terrestre (fig. B). Isso significa que o efeito estufa é prejudicial à vida? Muito pelo contrário! Os cientistas calculam que, se não existisse esse efeito, a temperatura da atmosfera ficaria em torno de -30°C , o que, provavelmente, impediria a existência das formas de vida que conhecemos hoje.

AMPLIANDO SUA LEITURA

- Que comparação é possível fazer entre as paredes de vidro de uma estufa e a atmosfera terrestre?

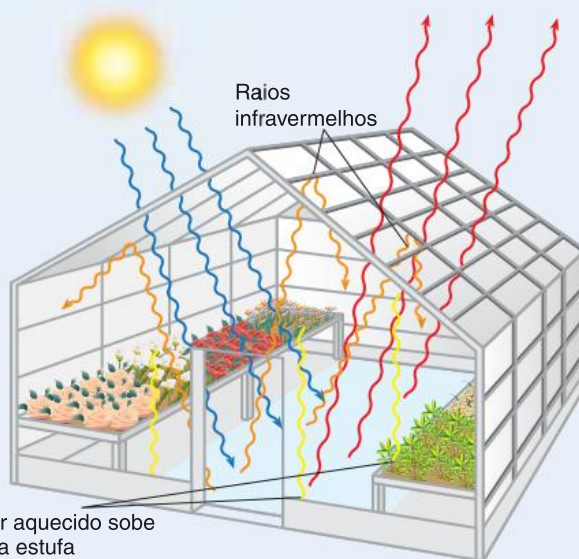


Figura A • Representação esquemática do funcionamento de uma estufa.

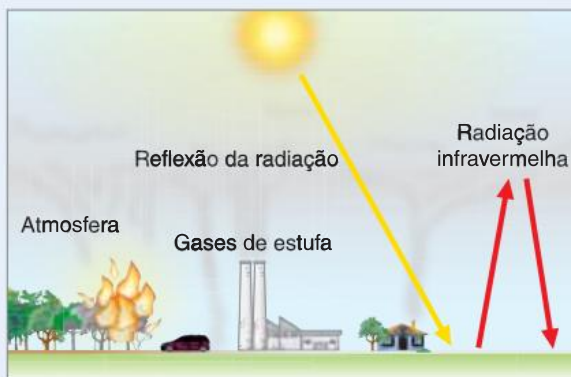


Figura B • Representação esquemática do efeito estufa na atmosfera terrestre.

ILUSTRAÇÕES: NELSON MATSUDA

Reprodução proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

S6

Já sabe responder?

Por que, habitualmente, chocolates e bombons são embrulhados em papel-alumínio?



EVGENIYA UVAROVA/SHUTTERSTOCK

QUESTÕES RESOLVIDAS

- R3** No deserto, viajantes usam roupas de lã tanto durante o dia quanto à noite. Os inuítes construíam iglus com blocos de neve compactada. Nas duas situações, como as pessoas alcançam maior conforto térmico?

► Resolução

Tanto a lã como a neve são bons isolantes térmicos (compostos de substâncias com baixa condutibilidade térmica), por isso são utilizadas nas situações descritas. No deserto, os viajantes vestem roupas de lã durante o dia para evitar aquecimento. Sem essa proteção, o viajante não suportaria a transmissão de calor do ambiente, que está a uma temperatura muito mais alta que a do corpo humano. Além disso, as noites no deserto costumam ser muito frias; assim, durante a noite, a roupa de lã tem a função de diminuir o fluxo de calor da pessoa para o ambiente.

Os inuítes construíam os iglus com blocos de neve compactada, que não é um bom condutor de calor. A neve mantém a temperatura interna do iglu mais elevada que a temperatura exterior, diminuindo a transmissão de calor do interior para o ambiente externo.

- R4** Há prateleiras de refrigeradores que não são feitas de placas inteiras, mas de grades. Para o bom funcionamento da geladeira também não é conveniente preencher totalmente os espaços disponíveis nas prateleiras. Por que o congelador da maior parte das geladeiras localiza-se na parte superior desses eletrodomésticos e qual é a relação existente entre a posição escolhida para o congelador e a forma de distribuir os alimentos dentro do refrigerador?

► Resolução

O funcionamento de uma geladeira comum com congelador na parte superior pode ser explicado a partir da propagação de calor por convecção. O ar, que, inicialmente, apresentava temperatura maior, entra em contato com o congelador, torna-se mais denso e tende a descer. Ao descer, empurra a porção de ar mais próxima à parte inferior da geladeira, que está a uma temperatura maior. Essa porção de ar tende a subir, pois é menos densa. Formam-se, então, correntes de convecção. Assim, as prateleiras devem ser modeladas como grades e não estar totalmente obstruídas para que as correntes de convecção circulem, mantendo constante a temperatura da parte interna da geladeira.



Família de inuítes.

WAYNE R. BLENDEKE/GETTY IMAGES

A questão R4 possibilita a discussão sobre a localização de aquecedores e de aparelhos de ar-condicionado nos ambientes.

QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

- 5** Para haver troca de calor entre dois sistemas, A e B, é necessário que A e B:
- I. tenham massas idênticas;
 - II. estejam à mesma temperatura;
 - III. sejam sólidos ou estejam em um meio líquido.
- Quais afirmativas são **incorretas**? Justifique sua escolha.
- 6** Nos dias quentes de verão, Ricardo dorme coberto somente por um lençol de tecido fino. No entanto, nos dias de frio intenso de inverno, ele se cobre

com dois cobertores de lã. Com base em seus conhecimentos sobre propagação de calor, explique a escolha do tipo de coberta feita por Ricardo para cada uma das estações.

- 7** Em um dia frio de inverno, Andrea vai da sala ao banheiro. Ela está descalça e, ao pisar no piso de ladrilhos do banheiro, sente nos pés um "frio" mais intenso do que sentiu ao pisar no chão de madeira da sala. Explique por que Andrea teve esse tipo de sensação, dado que todos os ambientes de sua casa estão à mesma temperatura.

8 A existência da vida em nosso planeta depende, entre outros fatores, da transferência de calor entre o Sol e a Terra. A energia térmica proveniente do Sol está relacionada às reações de fusão nuclear em seu interior, e sua propagação até a Terra se dá por meio de ondas eletromagnéticas. Colocando ao Sol uma jarra metálica contendo água, observa-se um aumento da temperatura tanto da água quanto da jarra, pois há trocas de calor entre água, jarra e ambiente externo aquecido pelo Sol.

- a) A transferência de calor do Sol para a Terra se dá por condução, convecção ou radiação térmica?
- b) As temperaturas da água e da jarra sobem continuamente enquanto elas absorvem a energia térmica proveniente do Sol, ou existe um limite para a temperatura do conjunto jarra-água? Justifique sua resposta.

9 Identifique o principal tipo de propagação de calor (condução, convecção ou radiação) que ocorre em cada uma das situações descritas a seguir.

- a) A extremidade de uma barra de metal é colocada em uma fogueira e, depois de pouco tempo, a barra toda esquenta.
- b) Objetos próximos de um forno aceso, mas não em contato com ele, se aquecem.
- c) Em localidades onde os invernos são rigorosos, as casas têm janelas com vidros mais espessos.
- d) Aparelhos de ar-condicionado são instalados na parte superior do ambiente.

10 (Unicamp-SP) Um isolamento térmico eficiente é um constante desafio a ser superado para que o homem possa viver em condições extremas de temperatura. Para isso, o entendimento completo dos mecanismos de troca de calor é imprescindível.

Em cada uma das situações descritas a seguir, você deve reconhecer o processo de troca de calor envolvido.

I. As prateleiras de uma geladeira doméstica são grades vazadas, para facilitar o fluxo de energia térmica até o congelador por _____.

II. O único processo de troca de calor que pode ocorrer no vácuo é por _____.

III. Em uma garrafa térmica, é mantido vácuo entre as paredes duplas de vidro para evitar que o calor saia ou entre por _____.

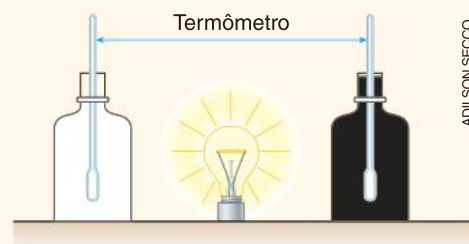
Na ordem, os processos de troca de calor utilizados para preencher as lacunas corretamente são:

- a) condução, convecção e radiação.
- b) condução, radiação e convecção.
- c) convecção, condução e radiação.
- d) convecção, radiação e condução.

11 (Enem) Em um experimento foram utilizadas duas garrafas PET, uma pintada de branco e a outra de preto, acopladas cada uma a um termômetro. No ponto médio da distância entre as garrafas, foi mantida acesa, durante alguns minutos, uma lâmpada incandescente. Em seguida, a lâmpada foi desligada. Durante o experimento, foram monitoradas as temperaturas das garrafas: (a) enquanto a lâmpada permaneceu acesa e (b) após a lâmpada ser desligada e atingirem equilíbrio térmico com o ambiente.

A taxa de variação da temperatura da garrafa preta, em comparação à da branca, durante todo experimento, foi:

- a) igual no aquecimento e igual no resfriamento.
- b) maior no aquecimento e igual no resfriamento.
- c) menor no aquecimento e igual no resfriamento.
- d) maior no aquecimento e menor no resfriamento.
- e) maior no aquecimento e maior no resfriamento.

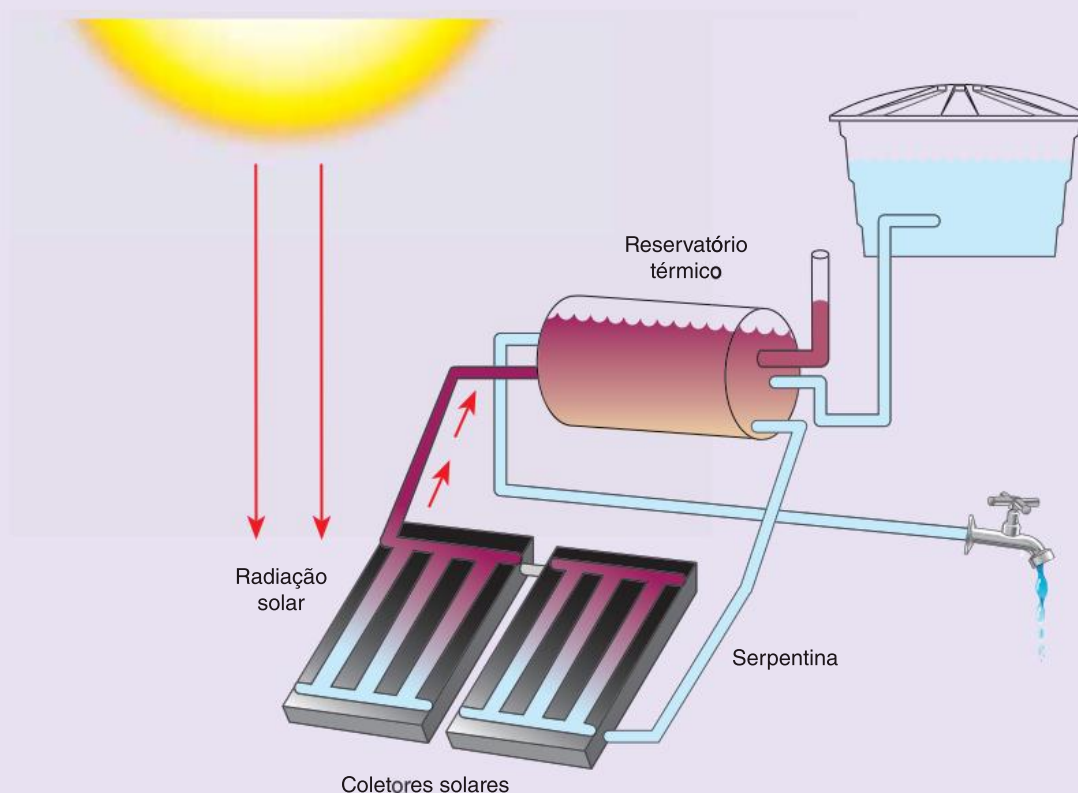


Os aquecedores solares

O uso de aquecedores solares vem aumentando ano a ano no Brasil por razões econômicas, uma vez que ajudam a economizar energia elétrica, e práticas, pois facilitam a obtenção de água quente, visto que nossos índices de insolação são altos.

Apesar de sua instalação não ser barata, a relação custo-benefício, ao longo do tempo, torna os aquecedores solares bastante vantajosos. Veja a seguir como eles funcionam.

A radiação solar é fundamental para o bom funcionamento de um aquecedor solar tradicional. Nesses aparelhos, os coletores solares captam a radiação e transmitem o calor para a água contida na serpentina. Com o aumento da temperatura e do volume, a densidade da água diminui. Isso faz com que a água suba para o reservatório, onde fica armazenada até ser consumida. Observe abaixo a representação esquemática de um aquecedor solar.



A serpentina que percorre a placa coletora deve ser metálica e todas as placas são feitas de material isolante e pintadas na cor preta.

- 1 Observe na ilustração acima que a torneira que fornece água para a residência está ligada a um cano conectado à parte superior do reservatório. Como explicar esse fato com base nos princípios físicos estudados nesta unidade?
- 2 Por que a serpentina é metálica e as placas coletoras são pintadas de preto?
- 3 Seria possível utilizar esse tipo de coletor com o objetivo de fazer a água chegar ao reservatório com temperatura menor do que a que percorre a serpentina? Justifique.

Termômetros: grandezas e equações de conversão

ou: Estar em um ambiente onde a temperatura esteja a 70 graus pode ser agradável?

 **S7**

No Suplemento, você encontra orientações para o trabalho com a questão introdutória.

1 Introdução

Em um dia de inverno, o Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) registrou a temperatura de $-1,2^{\circ}\text{C}$ em Campos Novos (SC). No mesmo dia, na região serrana do Rio Grande do Sul, a temperatura chegou perto de 0°C . O corpo humano saudável mantém-se a uma temperatura média de 37°C . O congelador de uma geladeira deve funcionar aproximadamente à temperatura de -10°C para conservar alimentos.

A temperatura dos corpos está associada à agitação das partículas que os constituem. Como não é possível medir diretamente o nível dessa agitação, essa medida é feita de forma indireta. Para isso, utilizam-se termômetros. O princípio de funcionamento desses aparelhos baseia-se na relação de proporcionalidade entre a agitação térmica e uma grandeza física que varia com a temperatura.

Por isso, ao colocar qualquer tipo de termômetro em contato com um corpo, é necessário aguardar um certo intervalo de tempo até que ocorra o estado de equilíbrio térmico entre o termômetro e o corpo.

Figura 1 • Atualmente, a tecnologia permite informar a temperatura de um sistema não só pela dilatação de uma coluna de determinado líquido. Neste termômetro, instalado em uma rua de Barcelona, na Espanha, a temperatura é registrada em um painel eletrônico no qual a altura das “lâmpadas” acesas indica a temperatura.

A temperatura de 70 graus, se medida na escala Fahrenheit, corresponde a, aproximadamente, 21°C , que é uma temperatura considerada agradável.

2 Grandezas termométricas

A grandeza física mais utilizada para medir temperaturas é o comprimento de uma coluna líquida. Ao entrar em contato com um corpo, o líquido pode se dilatar ou se contrair. Consequentemente, o comprimento da coluna vai aumentar ou diminuir. A essa variação é associado um número que indica a temperatura em uma escala. O comprimento de uma haste metálica, a resistência elétrica de um material, a voltagem em um fio, o volume de um gás ou a cor de um objeto também são grandezas cuja variação pode estar associada a uma mudança no estado térmico do corpo. Essas alterações podem ser representadas e quantificadas em uma escala de temperaturas.

As grandezas físicas que variam proporcionalmente com a temperatura são chamadas **grandezas termométricas**.



PAUL WHITEHILL/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

Figura 2 • A temperatura de uma pessoa pode ser obtida por meio de um termômetro de cristal líquido. A grandeza termométrica utilizada nesse tipo de aparelho é a cor, que se altera em função da variação da temperatura.

3 Calibração ou graduação de um termômetro

Para que um termômetro registre medidas de temperatura em determinada escala, ele deve estar calibrado ou graduado. A calibração de um termômetro consiste em atribuir valores arbitrários às temperaturas de dois fenômenos térmicos distintos e dividir a diferença entre esses valores em intervalos menores e iguais. Feita a graduação, estabelece-se uma escala termométrica.

O gelo em fusão e a ebulição da água são sistemas de fácil reprodução; por isso, geralmente são adotados como os estados térmicos de referência, cujas temperaturas ao nível do mar caracterizam os denominados **pontos fixos**.

Assim, por exemplo, para calibrar ou graduar um termômetro em que a grandeza termométrica é a altura da coluna de um líquido (geralmente mercúrio ou álcool), coloca-se o instrumento em contato com gelo em fusão e mede-se a altura atingida pelo líquido. Associa-se, então, um valor numérico a essa altura. O procedimento é o mesmo para a água em ebulição. Definidos esses dois valores, divide-se o intervalo entre eles em um número de partes menores e iguais. Na maioria das escalas, cada uma dessas partes é chamada de **grau**.

S8

No *Suplemento*, há uma proposta de atividade experimental simples para introduzir o estudo das escalas termométricas.

TOPIC PHOTOKEYSTONE BRASIL



Figura 3 • Primeiro ponto fixo: temperatura do gelo em fusão ao nível do mar.

PHOTORESEARCH/SHUTTERSTOCK



Figura 4 • Segundo ponto fixo: temperatura da água em ebulição ao nível do mar.

4 Escalas termométricas Celsius e Fahrenheit: equação de conversão

Ao longo do desenvolvimento dos estudos em **Termologia**, muitas escalas termométricas foram construídas, porque era fácil estabelecer valores arbitrários para a graduação dos termômetros. No início do século XVIII, havia cerca de 30 escalas em uso.

Atualmente, a maioria dos países adota a escala Celsius, uma **escala centígrada**, ou seja, em que a diferença entre os valores de referência, os pontos fixos, é dividida em 100 partes iguais. O zero da escala Celsius corresponde à temperatura de fusão do gelo, enquanto a centésima parte da escala, isto é, 100 °C, corresponde à temperatura de ebulição da água. Ambas as temperaturas são medidas em condições normais de temperatura e pressão.

Em 1714, o físico alemão Daniel Fahrenheit (1686-1736) construiu o primeiro termômetro de mercúrio que funcionou de modo satisfatório. Esse termômetro media temperaturas em uma escala não centígrada, denominada escala Fahrenheit. Na construção dessa escala, utilizou-se o valor 32 °F para a temperatura de fusão do gelo e 212 °F para a temperatura de ebulição da água. Essa escala é bastante utilizada em países de língua inglesa. O intervalo entre os dois pontos fixos na escala Fahrenheit é dividido em 180 partes, ou seja, um intervalo de 100 °C corresponde a 180 °F. Assim, uma variação de 1 °C corresponde à variação de 1,8 °F.

Para estabelecer a relação entre as escalas Celsius e Fahrenheit, verificamos a correspondência entre as medidas de suas temperaturas nos pontos fixos e entre as medidas das temperaturas de um determinado sistema, no qual os termômetros graduados nessas escalas são simultaneamente colocados em contato (fig. 5).

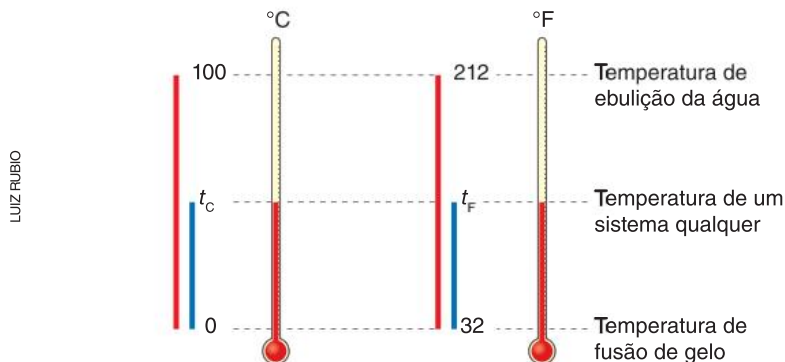


Figura 5 • Representação esquemática da temperatura de um sistema obtida simultaneamente por dois termômetros graduados nas escalas Celsius e Fahrenheit.

A relação entre as escalas Celsius e Fahrenheit, expressa por uma equação matemática, pode ser obtida por meio da relação de proporcionalidade entre os segmentos determinados pelas alturas da coluna do líquido nas duas escalas. Observando a representação dessas escalas na figura 5, podemos escrever a seguinte proporção:

$$\frac{t_C - 0}{100 - 0} = \frac{t_F - 32}{212 - 32}$$

Desenvolvendo um pouco essa expressão, obtemos esta relação matemática entre as duas escalas termométricas, Celsius e Fahrenheit:

$$\frac{t_C}{100} = \frac{t_F - 32}{180} \Rightarrow \frac{t_C}{5} = \frac{t_F - 32}{9}$$

Termologia. Parte da Física que estuda os fenômenos térmicos sob os pontos de vista macroscópico e microscópico. A Termologia engloba os estudos de termometria (temperatura e escalas termométricas), calorimetria (variação de temperatura e mudanças de estado) e dilatometria (dilatação dos corpos).



Figura 6 • Há termômetros graduados com as escalas Celsius e Fahrenheit, lado a lado, em um mesmo bulbo de vidro contendo álcool com corante.

CHAMELEONS EYESHUTTERSTOCK

Reprodução proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

S9

No **Suplemento**, indicamos o acesso a um artigo sobre o desenvolvimento histórico da escala Fahrenheit.

Do termoscópio de Galileu ao sensor elétrico: instrumentos que indicam ou medem temperatura

STEVE OHLSEN/ALAMY/GLOW IMAGES



E.A. JAMES/AGB PHOTO

DAVID LEES/CORBIS/LATINSTOCK



Nesse termômetro, a variação de temperatura altera a densidade do líquido contido no tubo. Essa alteração ocasiona a subida e a descida de bolinhas de vidro que contêm líquidos coloridos por corantes. Nas extremidades de cada bolinha, há placas nas quais está gravado o valor da temperatura.



DAVID J. GREEN/ALAMY/GLOW IMAGES

Existem ainda os **termômetros digitais** baseados em propriedades elétricas ou eletrônicas. Eles podem ser encontrados em relógios de pulso e em equipamentos eletrônicos como computadores. A medida da temperatura é feita por meio da variação de suas características elétricas. Os mais comuns utilizam um resistor, em um circuito elétrico, que aciona o indicador de temperatura de acordo com o valor da resistência.



ALFRED PASIEKA/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

O registro termográfico de um sistema realizado com uma câmara termográfica é apresentado por meio de um código de cores.



JENS MEYER/AP PHOTO/GLOW IMAGES

Termistor é um resistor cujo valor de resistência elétrica pode aumentar ou diminuir de acordo com a variação da temperatura. Dispositivos em que a resistência diminui são denominados termistores de coeficiente negativo e costumam ser utilizados na medição e controle de temperatura.

Um dos primeiros instrumentos que possibilitaram uma avaliação um pouco mais precisa que a simples observação da sensação térmica foi o termoscópio, inventado por Galileu. Por meio da variação do nível de um líquido, o termoscópio indicava a variação de temperatura.

ANDREW LAMBERT/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

AMPLIANDO SUA LEITURA

- 1 Identifique as grandezas termométricas de cada um dos termômetros citados no texto.
- 2 No termômetro que utiliza as bolinhas de vidro para indicar a temperatura, o que ocorre com o movimento delas em um dia de muito calor?

5 Escala Kelvin (K): escala absoluta

Existe limite máximo para o valor da temperatura de um corpo? E limite mínimo? Teoricamente não há um limite máximo para a temperatura. No entanto há um limite mínimo. Como o conceito de temperatura está associado à medida do grau de agitação molecular, o menor valor para a temperatura de um corpo deve representar total ausência de agitação térmica. Essa temperatura, denominada **zero absoluto**, corresponde a aproximadamente $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. O zero absoluto é um valor teórico e não é possível atingi-lo na prática. No entanto, valores próximos ao zero absoluto já foram obtidos em laboratório.

A escala Kelvin é uma escala absoluta, pois seu menor valor de temperatura é representado pelo número zero. Assim, todas as temperaturas medidas nessa escala são necessariamente positivas.

Considerando a temperatura de $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ como aproximadamente igual ao zero absoluto em kelvin, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ corresponderá a 273 K e, assim, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ será equivalente a 373 K . A temperatura em kelvin (T) equivale à temperatura (t_c) em graus Celsius acrescida de 273:

$$T = t_c + 273$$

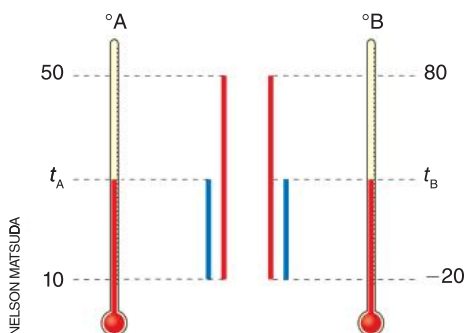
A unidade de temperatura no Sistema Internacional (SI) é o kelvin (K) e não se usa o símbolo grau ($^{\circ}$), como se faz nas escalas Celsius e Fahrenheit.

6 Equações de conversão

No dia a dia, é constante nosso contato com medidas de temperatura, seja para verificar se temos febre, seja para escolher a roupa mais adequada para vestir antes de sair de casa. Dependendo do tipo de medida de temperatura de que necessitamos, é possível consultar termômetros que utilizam outras grandezas termométricas, além da variação na altura da coluna de mercúrio (Hg).

Lembramos que, em qualquer termômetro, a medida da temperatura está associada ao equilíbrio térmico entre o instrumento que mede a temperatura e o corpo cuja temperatura se deseja conhecer. O que varia de um tipo para outro é a grandeza termométrica utilizada como indicador do estado térmico. Desse modo, é necessário padronizar a leitura da temperatura relacionando-a com a variação da grandeza termométrica. Essa relação é obtida por meio das chamadas **equações de conversão**.

Para converter uma temperatura de uma escala para outra, utilizamos as relações de proporcionalidade entre os segmentos determinados pelos pontos fixos e por uma temperatura genérica. Assim, supondo que em uma escala A os pontos fixos são $10\text{ }^{\circ}\text{A}$ e $50\text{ }^{\circ}\text{A}$ e em uma escala B são $-20\text{ }^{\circ}\text{B}$ e $80\text{ }^{\circ}\text{B}$, podemos estabelecer a equação de conversão entre A e B da seguinte maneira:



$$\frac{t_A - 10}{50 - 10} = \frac{t_B - (-20)}{80 - (-20)}, \text{ sendo } t_A \text{ e } t_B \text{ temperaturas genéricas.}$$

Então:

$$\frac{t_A - 10}{40} = \frac{t_B + 20}{100} \Rightarrow \frac{t_A - 10}{2} = \frac{t_B + 20}{5}$$

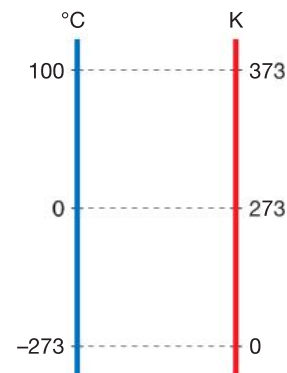


Figura 7 • Este esquema representa a equivalência entre temperaturas medidas nas escalas Celsius e Kelvin.



Figura 8 • Nos termômetros digitais, a grandeza termométrica utilizada é a resistência elétrica.

Já sabe responder?

Estar em um ambiente onde a temperatura esteja a 70 graus pode ser agradável?

DAVID J. GREEN/LAMY/GLOW IMAGES



QUESTÕES RESOLVIDAS

R1 Uma pessoa não se sentia bem e desconfiou que estava com febre. Ao solicitar um termômetro clínico de mercúrio em uma farmácia, o vendedor lhe ofereceu um termômetro digital argumentando que as leituras de temperatura, nesse tipo de termômetro, seriam obtidas instantaneamente, pois independiam do estabelecimento de equilíbrio térmico entre o corpo da pessoa e o instrumento de medida.

- Em relação aos termômetros clínicos de mercúrio, explique por que é preciso aguardar determinado tempo antes de efetuar a leitura do valor da temperatura de uma pessoa.
- Nos termômetros digitais, é necessário ou não esperar determinado tempo para efetuar a leitura da temperatura?

► Resolução

- Para medir a temperatura de uma pessoa com qualquer termômetro, deve-se esperar determinado tempo para que o equilíbrio térmico entre o corpo e o instrumento se estabeleça. O contato entre termômetro e corpo da pessoa durante alguns minutos é essencial para que esse equilíbrio ocorra.
- Da mesma forma que nas leituras realizadas com termômetros clínicos de mercúrio, deve-se esperar certo intervalo de tempo para efetuar a leitura da temperatura utilizando o termômetro digital. No entanto, esse tempo é menor que o necessário para as leituras realizadas com termômetros clínicos, pois termômetros digitais operam com termistores (compostos de semicondutores) que tornam mais rápidos os processos de leitura e conversão de informações.

R2 Durante uma viagem a um país de língua inglesa, uma moça diz a seu marido que não se sente bem e desconfia estar com febre. Ao medir a temperatura da esposa com um termômetro graduado na escala Fahrenheit, o marido lê o valor 100 °F.

- Considerando 37 °C como a temperatura normal média de um adulto, é possível afirmar que a moça está com febre?
- Qual é o valor da temperatura em graus Fahrenheit equivalente a 37 °C?

► Resolução

- A equivalência entre as temperaturas em graus Celsius e em graus Fahrenheit pode ser obtida por meio da expressão:

$$\frac{t_F - 32}{9} = \frac{t_C}{5}$$

Como $t_F = 100$ °F, temos:

$$\frac{100 - 32}{9} = \frac{t_C}{5} \Rightarrow \frac{68}{9} = \frac{t_C}{5} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow t_C = \frac{340}{9} \therefore t_C \approx 38$$

A moça está com febre, pois sua temperatura é maior que a temperatura média normal.

- Como $\frac{t_F - 32}{9} = \frac{t_C}{5}$ e $t_C = 37$ °C, temos:

$$\frac{t_F - 32}{9} = \frac{37}{5} \Rightarrow \frac{t_F - 32}{9} = 7,4 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow t_F - 32 = 66,6 \therefore t_F = 98,6$$

Observe que a diferença de 1°C não é equivalente à diferença de 1°F , pois um grau Fahrenheit resulta da divisão de um intervalo em 180 partes, enquanto um grau Celsius resulta da divisão de um intervalo em 100 partes. De modo geral, a relação entre dois intervalos de temperaturas nas escalas Celsius e Fahrenheit pode ser expressa matematicamente por $\frac{\Delta t_C}{100} = \frac{\Delta t_F}{180} \Rightarrow \Delta t_F = \frac{9}{5} \Delta t_C$, ou seja, uma variação de um grau Celsius equivale a 1,8 vezes a variação de um grau Fahrenheit.

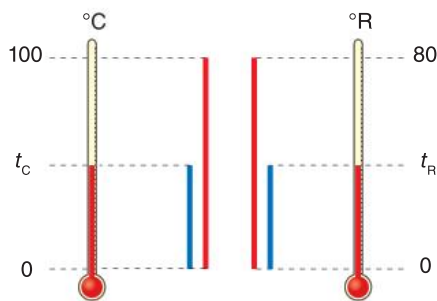
R3 O físico francês René de Reamur (1683-1757) provavelmente foi o primeiro a perceber que a fusão do gelo e a ebulição da água eram fenômenos de fácil reprodução e, portanto, adequados ao papel de pontos fixos. Em sua escala, Reamur adotou 0°R para o gelo fundente e 80°R para a temperatura da água em ebulição.

- Que equação estabelece uma relação entre as escalas termométricas Celsius e Reamur?
- Um corpo sofre uma variação de temperatura de 20°R . Qual é o valor dessa variação em graus Celsius?
- Qual é a temperatura, em graus Reamur, equivalente a 473 K ?

Resolução

- As duas escalas usam os mesmos pontos fixos: a fusão do gelo e a ebulição da água. Na escala Celsius, a variação de temperatura entre os pontos fixos foi dividida por 100, mas na escala Reamur essa mesma variação foi dividida por 80. Logo, a escala Celsius é centígrada, mas a Reamur, não.

Ao representar as duas escalas, temos:



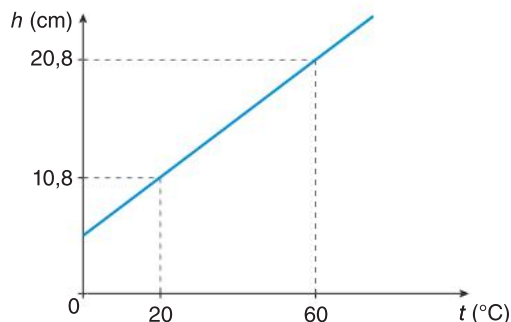
Como os segmentos estabelecidos são proporcionais, vem:

$$\frac{t_C}{100} = \frac{t_R}{80} \Rightarrow \frac{t_C}{5} = \frac{t_R}{4}$$

- A partir da equação de conversão, determinamos que a variação de 1°C corresponde a $0,8^\circ\text{R}$. Logo, a variação de 20°R corresponde a uma variação de 25°C na escala Celsius.
- A temperatura $T = 473\text{ K}$ corresponde a $t_C = 200^\circ\text{C}$, pois $T = t_C + 273$. Utilizando a equação que relaciona as escalas Reamur e Celsius, temos:

$$\frac{t_C}{5} = \frac{t_R}{4} \Rightarrow \frac{200}{5} = \frac{t_R}{4} \therefore t_R = 160^\circ\text{R}$$

R4 O gráfico a seguir representa a relação entre a escala Celsius e a altura da coluna de mercúrio, medida em centímetros.

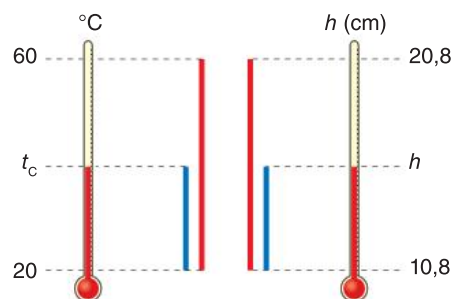


- Estabeleça uma equação de conversão entre a altura do líquido e a escala Celsius.
- Qual é a altura da coluna líquida equivalente à temperatura de 313 K ?

Resolução

- Para estabelecer a equação de conversão entre a altura da coluna do líquido e a escala Celsius, podemos ler no gráfico dois pares de valores correspondentes entre a temperatura em Celsius e a altura da coluna líquida, em centímetros. A partir dessa leitura, podemos estabelecer a equivalência entre o intervalo de valores de temperatura e a respectiva variação da altura da coluna do líquido.

Assim, podemos representar os segmentos proporcionais estabelecidos pelas medidas:



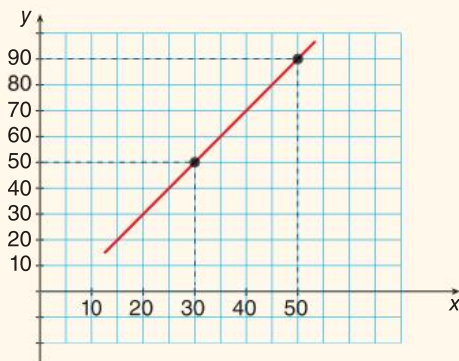
$$\frac{t_C - 20}{60 - 20} = \frac{h - 10,8}{20,8 - 10,8} \Rightarrow \frac{t_C - 20}{40} = \frac{h - 10,8}{10} \Rightarrow \frac{t_C - 20}{4} = h - 10,8 \therefore h = 0,25t_C + 5,8$$

- A temperatura de 313 K equivale à de 40°C , pois $T = t_C + 273$. Assim, a altura da coluna líquida equivalente à temperatura de 313 K é igual àquela equivalente a 40°C . Pela equação de conversão obtida no item a, temos:

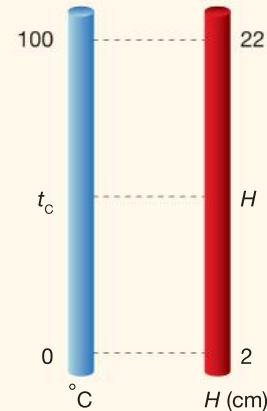
$$h = 0,25 \cdot t_C + 5,8 \Rightarrow h = 0,25 \cdot 40 + 5,8 \Rightarrow h = 10 + 5,8 \therefore h = 15,8\text{ cm}$$

QUESTÕES PROPOSTAS

- 1 Na parede de uma sala de aula de uma escola brasileira, são colocados dois termômetros graduados nas escalas Celsius e Fahrenheit. Numericamente, qual deles apresentará maior leitura? Justifique sua resposta.
- 2 Júlio, estudante de Física, realizava no laboratório um experimento no qual deveria aquecer certa massa de água inicialmente à temperatura de 25°C . Ao colocar sobre a mesa o termômetro utilizado para medir a temperatura inicial da água, o instrumento caiu e quebrou. Procurando outro termômetro, Júlio encontrou um graduado na escala Kelvin e utilizou-o para medir a temperatura ao final do aquecimento da água, encontrando o valor de 318 K . Em seu relatório, o estudante deveria empregar a variação de temperatura da água na escala Fahrenheit. Qual foi o valor, em graus Fahrenheit, encontrado por Júlio para a variação de temperatura da água?
- 3 Dois termômetros de mercúrio, idênticos, um deles graduado na escala Celsius e o outro na escala Fahrenheit, estão sendo usados para medir a temperatura do mesmo líquido. A altura da coluna de mercúrio que indica essa temperatura no termômetro Celsius é maior, menor ou igual à altura correspondente no termômetro Fahrenheit? Justifique.
- 4 A temperatura de uma massa de água foi avaliada com dois termômetros, um graduado em graus Celsius e o outro, em graus Fahrenheit. A leitura em Fahrenheit excede em 8 unidades o triplo da leitura em Celsius. Qual é o valor da temperatura da água em Celsius e em Fahrenheit?
- 5 No gráfico a seguir, está representada a relação entre os valores de medidas de temperaturas com dois termômetros, x e y , de escalas lineares diferentes. Qual é o valor que mais se aproxima do valor indicado por y quando x indica $42,5$?

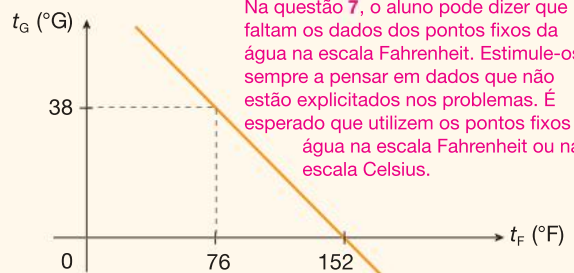


- 6 Em um termômetro contendo um líquido, a grandeza termométrica é o comprimento H da coluna líquida. A seguir, representa-se esquematicamente a relação entre a temperatura t_c na escala Celsius e o valor da altura H em centímetros.



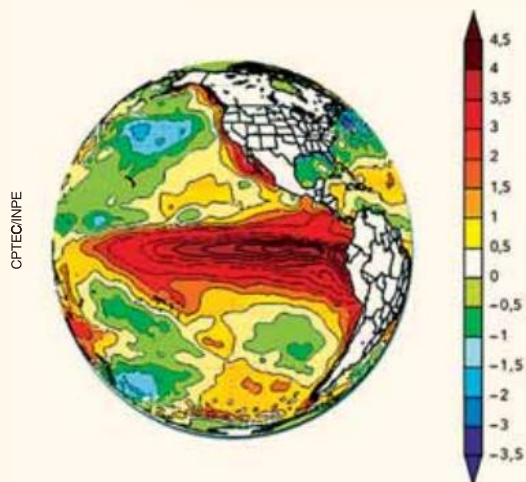
- a) Expresse matematicamente a relação que fornece a temperatura na escala Celsius em função da altura da coluna líquida.
- b) Qual é o valor da temperatura na escala Celsius para a altura $H = 15\text{ cm}$?

- 7 Uma escala termométrica G , graduada em graus G , está relacionada à escala Fahrenheit, como representado no esquema a seguir. Quais são os valores dos pontos fixos da água na escala G ?



Na questão 7, o aluno pode dizer que faltam os dados dos pontos fixos da água na escala Fahrenheit. Estimule-os sempre a pensar em dados que não estão explicitados nos problemas. É esperado que utilizem os pontos fixos da água na escala Fahrenheit ou na escala Celsius.

- 8 (Uerj) No mapa abaixo, está representada a variação média da temperatura dos oceanos em um determinado mês do ano. Abaixo, encontra-se a escala, em graus Celsius, utilizada para a elaboração do mapa.



Adaptado de enor.cptec.inpe.br.

(Imed-RS) Uma temperatura é tal que 18 (dezoito) vezes o seu valor na escala Celsius é igual

a) 8 °F d) 64 °F
b) 16 °F e) 128 °F
c) 32 °F

Diálogos com a Física Moderna

Para poder acelerar e direcionar os feixes de partículas que irão colidir no acelerador, o LHC possui enormes eletroímãs produtores de campos magnéticos

A large, complex, circular industrial structure, likely a particle accelerator component, with a central blue-lit area and a yellow lift in the foreground. The structure is composed of many metallic segments and is surrounded by a network of pipes and cables. The central area is brightly lit with blue light, while the surrounding areas are dimly lit. A yellow lift is visible in the foreground, and a person can be seen standing near it. The overall scene is a high-tech industrial environment.

TIPS IMAGES/PIOMEDIA



CERN PHOTO/ERÉDÉRIC PITCHAI/SYGMA/CORBIS/ ATINSTOCK

- 1 Faça uma relação das três temperaturas mais baixas a que você teve acesso. Estime seus valores, converta-as para a escala Kelvin e compare-as com a temperatura dos eletroímãs do LHC.
- 2 Pesquise por que os eletroímãs devem ser resfriados a temperaturas tão próximas do zero absoluto. Que propriedade eles adquirem nessa situação?

Dilatação dos sólidos

ou: Um avião pode ter o comprimento alterado enquanto está voando?

O atrito de um objeto com o ar provoca o aumento da temperatura nas superfícies do objeto. Isso pode fazer com que ocorra dilatação do material de que o objeto é feito. Assim, é possível que um avião em pleno voo tenha o seu comprimento aumentado. Aviões de grande porte, cuja velocidade de cruzeiro está acima dos 340 m/s (caso, por exemplo, do antigo Concorde), sofrem aquecimento por causa do atrito com o ar e têm sua temperatura bastante elevada, resultando em uma dilatação térmica significativa (no caso do Concorde, em torno de 20 cm).

1 Introdução

S10

No Suplemento, você encontra orientações para o trabalho com a questão introdutória.

A grande maioria dos corpos se expande ou se contrai em função do aumento ou da redução da temperatura. A substância da qual o corpo é feito influi na variação de volume sofrida por ele – os objetos metálicos variam seu volume mais facilmente que os objetos não metálicos, por exemplo.

Engenheiros, projetistas, escultores e joalheiros escolhem com cuidado seus materiais de trabalho levando em conta os efeitos da dilatação térmica.

As pontes devem ter vãos entre as placas de concreto (juntas de dilatação) para evitar rachaduras em suas estruturas. Os trilhos das ferrovias também têm espaçamentos entre si para que não sofram deformações e rupturas.

Ainda que a dilatação dos corpos cause problemas, o controle desse fenômeno natural proporciona aplicações práticas interessantes, como a fixação de chapas em navios, a fabricação de termômetros, a vedação eficiente de blocos de motores de automóveis, entre outras.

A identificação de situações cotidianas nas quais devemos levar em conta o fenômeno da dilatação é um dos objetos de estudo deste capítulo.

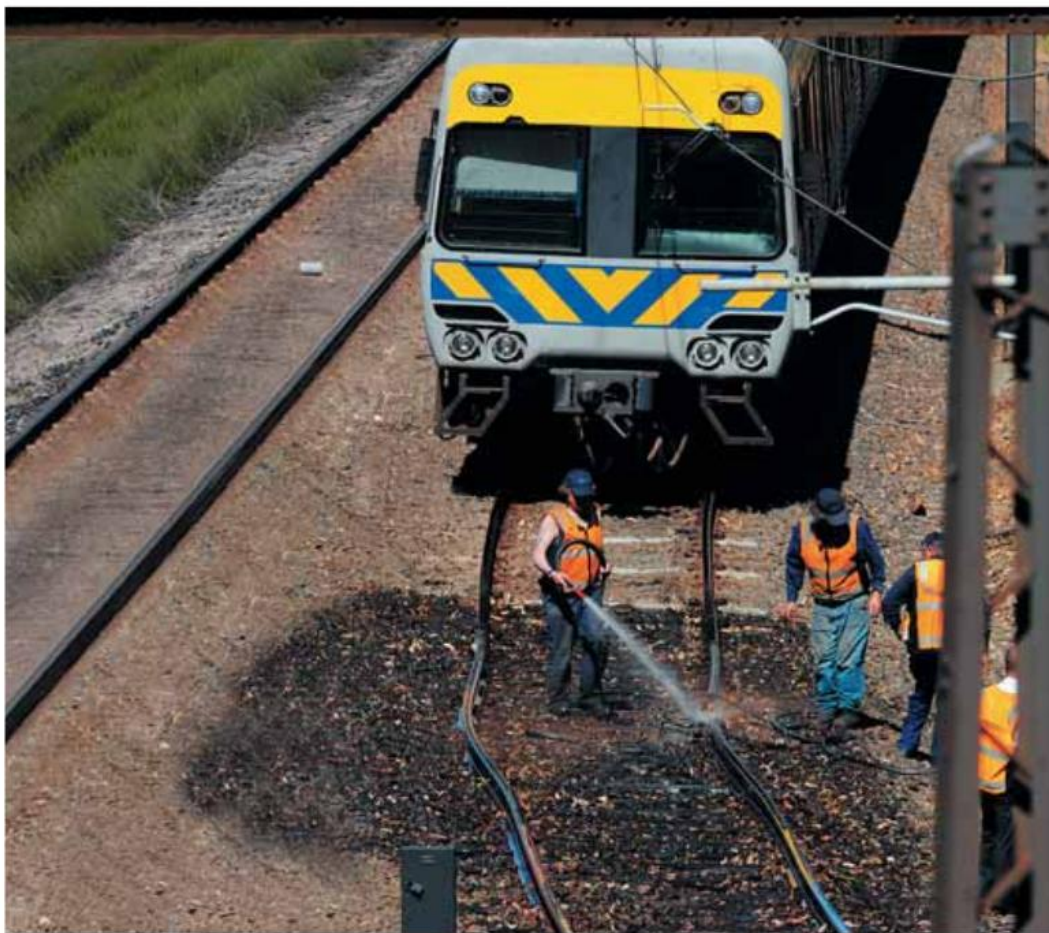


Figura 1 • A dilatação térmica provocada por uma onda de calor causou a deformação dos trilhos da estrada de ferro. Melbourne, Austrália, 2009.

JOE ARMAO/THE AGE/FAIRFAX MEDIA VIA GETTY IMAGES

2 Dilatações e contrações

Portas que emperram nos batentes em dias de temperaturas mais altas, rompimentos de garrafas de vidro no interior do *freezer*, rachaduras em revestimentos de parede colocados muito juntos são exemplos de eventos que podem ser relacionados à dilatação térmica. Nessas ocasiões, os efeitos das trocas de calor tornam-se evidentes.

Na construção civil, arquitetos e engenheiros dão preferência a materiais que sofrem menor impacto dos efeitos da dilatação e contração térmica. As denominadas juntas de dilatação são itens indispensáveis nos projetos das edificações. Por que esse tipo de junta deve ser prevista no projeto de uma construção?

As rochas, a água, o ar e também os corpos dos seres vivos estão sujeitos a expansões e contrações decorrentes de variações de temperatura. Assim, no uso de materiais na construção civil, na fabricação de peças para veículos ou até mesmo na simples compra de calçados, é preciso considerar os efeitos da variação de volume dos corpos em decorrência de alteração da temperatura.

A dilatação térmica é um dos principais efeitos das trocas de calor, mas esse fenômeno não ocorre da mesma forma em todos os corpos, pois depende das características das substâncias que os compõem, bem como do estado físico em que estão.

S11

No *Suplemento*, há uma questão que pode ser proposta aos alunos para discussão em grupo.



Figura 2 • Recipientes de vidro refratário podem ser levados diretamente ao fogo. Esse tipo de vidro tem menor capacidade de dilatação que o vidro comum e, assim, suporta maiores variações de temperatura sem alterar significativamente suas dimensões. No vidro comum, as áreas mais próximas à fonte de calor se dilatariam mais rapidamente que as demais e o material trincaria em pouco tempo.

Em diversas circunstâncias, podemos observar os efeitos de expansão e contração no comprimento, na área ou no volume de um corpo submetido à variação de temperatura. Embora todos os corpos sofram variação simultaneamente nas três dimensões – comprimento, largura, altura –, para fins de estudo, vamos analisar separadamente as dilatações e contrações lineares, superficiais e volumétricas dos corpos.

Dilatação linear dos sólidos

Como a variação de comprimento de um corpo sólido é diretamente proporcional à variação de temperatura e também ao comprimento inicial, temos:

$$\Delta L \propto \Delta T \text{ e } \Delta L \propto L_0 \Rightarrow \Delta L \propto L_0 \cdot \Delta T$$

Introduzindo uma constante de proporcionalidade α na sentença anterior, podemos escrever a equação que relaciona a variação do comprimento de um corpo em função de seu comprimento inicial e da variação de sua temperatura:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

A constante de proporcionalidade α é o **coeficiente de dilatação linear** da substância que compõe o corpo. Esse coeficiente é característico de cada substância. Não existem duas substâncias diferentes com coeficientes de dilatação iguais. Esse coeficiente é constante em determinados intervalos de temperatura, e sua unidade de medida mais utilizada é o $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

A tabela a seguir apresenta os coeficientes de dilatação linear de alguns materiais. Assim, por exemplo, se duas barras de mesmo comprimento inicial, uma de chumbo e outra de ouro, forem submetidas à mesma variação de temperatura, a variação de comprimento da primeira será aproximadamente duas vezes maior que a da segunda, pois o coeficiente de dilatação linear do chumbo ($29 \times 10^{-6} ^{\circ}\text{C}^{-1}$) é aproximadamente o dobro do coeficiente de dilatação linear do ouro ($14 \times 10^{-6} ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Material	Coeficiente de dilatação em $^{\circ}\text{C}^{-1}$
Aço	$1,1 \times 10^{-5}$
Alumínio	$2,4 \times 10^{-5}$
Chumbo	$2,9 \times 10^{-5}$
Cobre	$1,7 \times 10^{-5}$
Ferro	$1,2 \times 10^{-5}$
Latão	$2,0 \times 10^{-5}$
Ouro	$1,4 \times 10^{-5}$
Prata	$1,9 \times 10^{-5}$
Vidro comum	$0,9 \times 10^{-5}$
Vidro refratário	$0,3 \times 10^{-5}$

Fonte: AGUIAR, Carlos Eduardo; SOUZA, Luiz Fernando de. *Um experimento sobre a dilatação térmica e a lei de resfriamento*. In: Simpósio Nacional de Ensino de Física, Vitória-ES, 2009.

Geralmente, nos fenômenos de dilatação, a variação de comprimento é pequena, mesmo considerando barras de grande comprimento.

Generalizando, temos:

$$\Delta L = L - L_0 \text{ e } \Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Podemos, então, escrever:

$$L - L_0 = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \Rightarrow L = L_0 + L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Portanto:

$$L = L_0(1 + \alpha \Delta T)$$

Essa é a expressão geral da dilatação (ou contração) linear de um sólido.

Na prática, verifica-se que o coeficiente de dilatação térmica dos corpos não é fixo, mas varia ligeiramente de acordo com a temperatura. No entanto, para pequenos intervalos de temperatura, pode-se desprezar essa pequena variação e considerar o valor desse coeficiente como constante.

No cotidiano, um bom exemplo de aplicação do fenômeno da dilatação dos sólidos pode ser observado no funcionamento das chamadas lâminas bimetalicas, que são utilizadas como componentes de termostatos, por exemplo, em ferros elétricos automáticos. As lâminas bimetalicas são constituídas por duas lâminas, unidas entre si, de materiais de coeficientes de dilatação lineares diferentes. Se, por exemplo, a camada superior de uma lâmina dupla for de chumbo e a inferior de alumínio e ocorrer aumento de temperatura, a lâmina se curvará para baixo, pois a camada de chumbo sofrerá maior variação em suas dimensões lineares, aumentando de comprimento. Isso acontece porque o coeficiente de dilatação linear do chumbo é maior que o do alumínio.

S12

Incentive os alunos a observar como são baixos os valores dos coeficientes de dilatação linear dos materiais. O *Suplemento* apresenta um trecho de um artigo sobre magnitude e variação dos coeficientes de dilatação linear dos materiais em função da temperatura.

S13

No *Suplemento*, há uma proposta de demonstração a partir de arranjo experimental. Consulte-o.

Portanto, quando a temperatura do aparelho aumenta, as lâminas bimetálicas, que fazem parte do circuito elétrico, dilatam-se de forma diferente e, em conjunto, se curvam, interrompendo o contato elétrico. Assim, o aparelho desliga. Ao esfriar, as lâminas perdem o encurvamento, restabelecendo o contato com o circuito, e o aparelho volta a funcionar (fig. 3). O processo é contínuo e possibilita a manutenção da temperatura dentro de uma pequena faixa de variação.

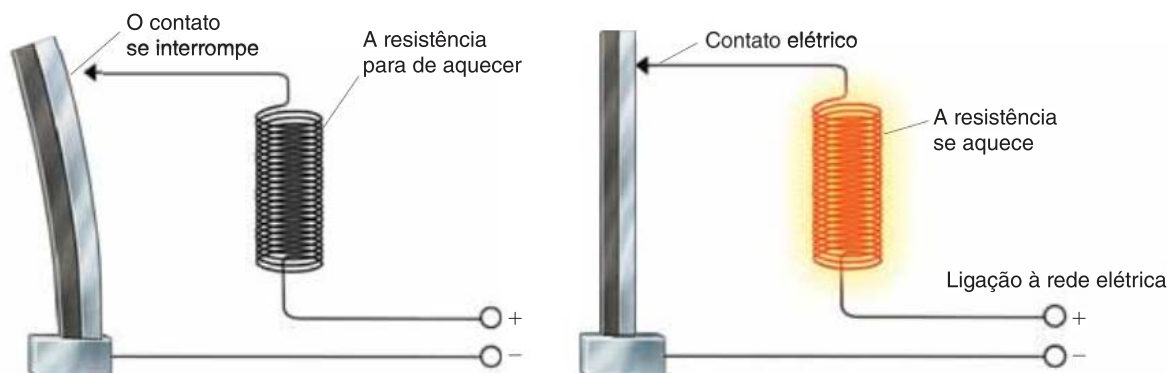


Figura 3 • O processo de resfriamento e aquecimento da lâmina bimetálica permite que ela se curve, interrompendo o contato com o circuito ou estabelecendo-o, desligando ou ligando o aparelho, respectivamente.

ILUSTRAÇÕES: LUIZ RUBIO

QUESTÕES RESOLVIDAS

Incentive os alunos a resolver a questão **R2** a partir da leitura do gráfico L em função de T , observando que a dependência do comprimento L é linear em relação à temperatura.

R1 Os trilhos de uma ferrovia são assentados com pequenos espaços entre si para evitar deformações e rompimentos caso a temperatura aumente. Qual é o coeficiente de dilatação linear do material que compõe um trilho de comprimento inicial de 1 m que, sob variação de 10°C , tem seu comprimento aumentado em $0,01\text{ cm}$?

► Resolução

Dispomos dos seguintes dados:

comprimento inicial do trilho: $L_0 = 1\text{ m} = 100\text{ cm}$

variação de temperatura: $\Delta T = 10^\circ\text{C}$

variação de comprimento do trilho: $\Delta L = 0,01\text{ cm}$

Pede-se o coeficiente de dilatação linear α do material que compõe o trilho.

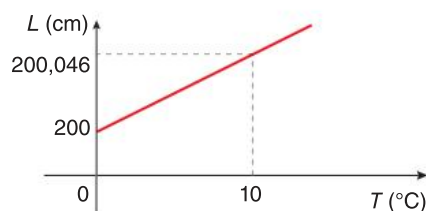
Sabemos que a variação do comprimento de um corpo em função da variação de sua temperatura é dada pela expressão $\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T$. Substituindo os dados nessa equação, temos:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \Rightarrow 0,01 = 100 \cdot \alpha \cdot 10 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 10^{-2} = 10^3 \cdot \alpha \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \alpha = \frac{10^{-2}}{10^3} \therefore \alpha = 1 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

R2 O gráfico abaixo apresenta parte dos dados colhidos em uma experiência realizada em laboratório com o objetivo de determinar o coeficiente de dilatação linear de uma barra de metal. Os dados foram colhidos a partir da temperatura de 0°C .



a) Calcule o coeficiente de dilatação linear desse metal.

b) Considere linear a variação de comprimento do corpo até que sua temperatura atinja 30°C . Qual é o comprimento da barra nessa temperatura?

► Resolução

a) Sabemos que $\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T$. Uma vez que $\Delta L = L - L_0$ e $\Delta T = T - T_0$, podemos escrever:

$$L - L_0 = L_0 \alpha (T - T_0)$$

Inserindo nessa expressão os dados do gráfico, temos:

$$200,046 - 200 = 200 \cdot \alpha (10 - 0) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 0,046 = 200 \cdot 10 \cdot \alpha \Rightarrow 4,6 \cdot 10^{-2} = 2 \cdot 10^3 \cdot \alpha$$

$$\therefore \alpha = 23 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

b) Utilizando o valor do coeficiente linear obtido no item anterior e a expressão

$$L - L_0 = \alpha L_0 (T - T_0), \text{ temos:}$$

$$L - L_0 = \alpha L_0 (T - T_0) \Rightarrow L - 200 =$$

$$= 200 \cdot 23 \cdot 10^{-6} \cdot (30 - 0) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow L - 200 = 2 \cdot 10^2 \cdot 23 \cdot 10^{-6} \cdot 30 \Rightarrow$$

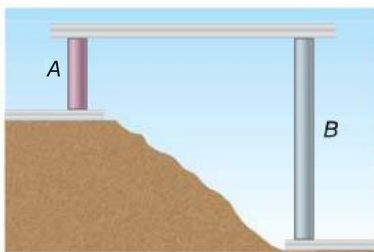
LUIZ RUBIO

$$\Rightarrow L - 200 = 138 \cdot 10^2 \cdot 10^{-6} \cdot 10^1 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow L - 200 = 138 \cdot 10^{-3} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow L = 200 + 0,138 \therefore L = 200,138 \text{ cm}$$

- R3** Duas colunas de comprimentos iniciais L_{0A} e L_{0B} sustentam uma plataforma que deve permanecer em posição horizontal, seja qual for a temperatura a que essa estrutura estiver submetida. Que relação deve existir entre os coeficientes α_A e α_B para que a plataforma permaneça horizontal, independentemente da temperatura?



Resolução

Para que a plataforma permaneça na posição horizontal sob qualquer temperatura, é necessário que as variações de comprimento das duas colunas sejam iguais para quaisquer intervalos de variação de temperatura (ΔT). Elas devem, portanto, obedecer a esta igualdade: $\Delta L_A = \Delta L_B$. Temos, então:

$$\Delta L_A = \Delta L_B \Rightarrow L_{0A} \cdot \alpha_A \cdot \Delta T = L_{0B} \cdot \alpha_B \cdot \Delta T \Rightarrow$$

$$\Rightarrow L_{0A} \cdot \alpha_A = L_{0B} \cdot \alpha_B \Rightarrow \frac{\alpha_A}{\alpha_B} = \frac{L_{0B}}{L_{0A}}$$

Assim, para que a plataforma permaneça horizontal, a relação entre os coeficientes de dilatação linear dos materiais das colunas A e B deve ser inversamente proporcional à relação entre os comprimentos iniciais das colunas A e B.

QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

- 1** Leia as afirmações a seguir a respeito da dilatação térmica dos sólidos e classifique-as em verdadeiras ou falsas. Em seguida, escreva um texto justificando sua escolha. Se houver afirmativas verdadeiras, utilize-as na elaboração de seu texto.

- Como o coeficiente de dilatação linear do alumínio é $2,3 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, uma barra de 1 m desse material sofre expansão de 23 cm ao ser aquecida a $100 \text{ }^\circ\text{C}$.
- O coeficiente de dilatação linear é uma característica de cada substância e é uma grandeza adimensional.
- Dois barras homogêneas de mesmo comprimento e compostas de uma mesma substância, ao sofrerem a mesma variação de temperatura, têm a mesma variação de comprimento.
- Uma vez que uma barra se expande, ela não retorna ao seu comprimento inicial.

- 2** O coeficiente de dilatação linear do latão é igual a $2,0 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, ou $0,00002/^\circ\text{C}$. Sabendo disso, analise as afirmações a seguir, classificando cada uma em verdadeira ou falsa.

- Para cada grau Celsius de aumento na temperatura, uma barra de latão de 1 m aumenta seu comprimento em $0,00002 \text{ m}$.
- Uma barra de latão de 1 m de comprimento dilatará e aumentará seu comprimento para 1,2 m quando for aquecida de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ para $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

- Dois barras de latão, de comprimentos diferentes, dilatarão a mesma quantidade se suas temperaturas forem aumentadas em valores iguais.
- Dois barras de latão de mesmo comprimento têm temperaturas bem diferentes. Aquecendo-as de modo que o aumento de temperatura seja o mesmo para as duas barras, as dilatações sofridas por elas serão iguais, ou seja, terão, depois de aquecidas, comprimentos iguais.

- 3** A figura a seguir representa uma lâmina bimetálica composta de latão e aço.



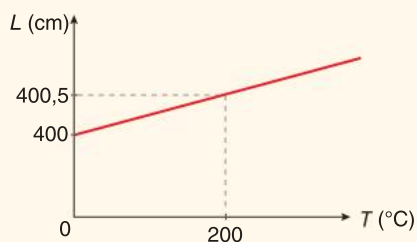
O coeficiente de dilatação linear do aço é menor que o coeficiente de dilatação linear do latão. À temperatura ambiente, a lâmina está na posição horizontal indicada na figura.

- Faça um desenho da lâmina bimetálica de latão e aço se ela sofrer um aumento de temperatura. Justifique seu desenho.
- Considere que a lâmina seja novamente colocada à temperatura ambiente. Faça um desenho da lâmina bimetálica se ela for submetida a uma diminuição de temperatura. Justifique seu desenho.

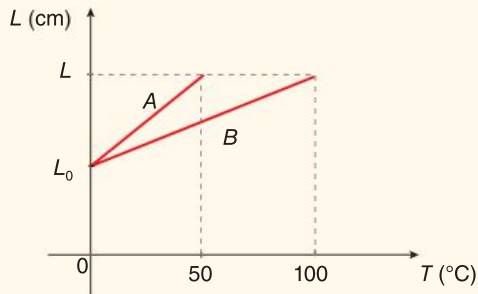
Chame a atenção dos alunos para o que se pede na questão 4. Pede-se o diâmetro da peça, e o dado inicial é o raio.

- 4 Um tubo cilíndrico de cobre (coeficiente de dilatação linear igual a $1,7 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) de 5 cm de raio está sobre uma bancada de uma indústria cuja temperatura ambiente é $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Levado para o resfriamento em uma câmara frigorífica, cuja temperatura é $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, o tubo sofre uma contração linear térmica. Calcule o diâmetro do tubo após entrar em equilíbrio térmico na câmara.

- 5 Na figura a seguir, representamos o comprimento de uma barra em função da temperatura. Calcule o coeficiente de dilatação linear do material de que é feita a barra.



- 6 Na realização de uma experiência, foram aquecidas duas barras metálicas, A e B, representadas no gráfico abaixo. Esse gráfico mostra a variação do comprimento L das barras em função da temperatura T .



Qual é a relação $\frac{\alpha_A}{\alpha_B}$ entre o coeficiente de dilatação linear do material da barra A e o coeficiente de dilatação linear do material da barra B?

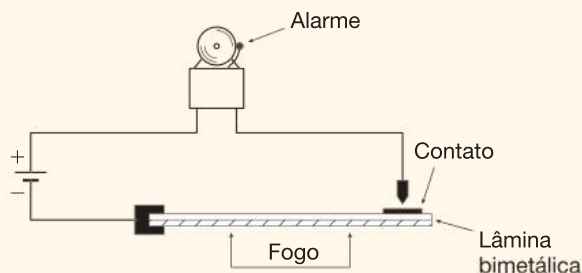
- 7 O avião supersônico Concorde, que deixou de operar em 2003, tinha 62,1 m de comprimento quando estava em repouso no solo em um dia cuja temperatura média fosse de $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Ele era feito basicamente de alumínio. Quando voava à velocidade igual ao dobro da velocidade do som, o atrito com o ar aquecia a parte externa do Concorde e gerava uma dilatação de 25 cm no comprimento do avião. O compartimento dos passageiros era apoiado em rolamentos, e o avião se expandia em torno dos passageiros. Qual era a temperatura da parte externa da aeronave durante o voo?

(Dado: $\alpha_{\text{alumínio}} = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)



EYE UBIQUITOUS/DIOMEDIA

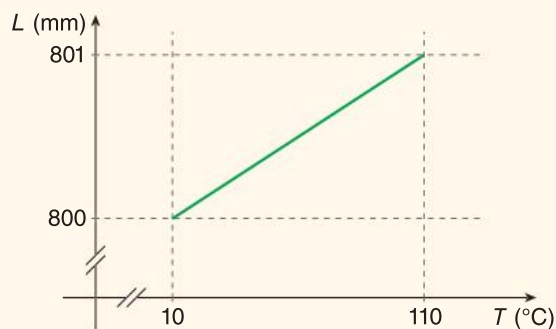
- 8 Um tipo de alarme de incêndio é construído com uma lâmina bimetálica, um circuito elétrico e uma campainha, conforme representado na figura a seguir.



NELSON MATSUDA

- a) Descreva de que maneira funciona esse tipo de alarme.
b) Qual dos metais que compõem a lâmina bimetálica tem o maior coeficiente de dilatação? Por quê?

- 9 (PUC-RS) Num laboratório, um grupo de alunos registrou o comprimento L de uma barra metálica, à medida que sua temperatura T aumentava, obtendo o gráfico a seguir:



ADILSON SECCO

Pela análise do gráfico, o valor do coeficiente de dilatação do metal é

- a) $1,05 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
b) $1,14 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
c) $1,18 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
d) $1,22 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
e) $1,25 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

Dilatação superficial dos sólidos

Paredes revestidas de azulejos podem apresentar trincas ou rachaduras. Muitas vezes esses problemas ocorrem porque uma regra básica de construção não foi seguida: entre azulejos vizinhos deve-se deixar um pequeno espaço para que cada peça possa se dilatar ou se contrair livremente. O rejunte, que é a massa aplicada para preencher esses espaços, proporciona um acabamento adequado por apresentar certa flexibilidade, amortecendo as forças de expansão e de contração dos azulejos vizinhos e impedindo que trinquem.

FOTOS: LUIZ RUIZ



FERNANDO FAVORETTO/CIAR IMAGEM

A dilatação de azulejos e ladrilhos, como a de qualquer corpo, afeta suas três dimensões, mas, nesses casos, é mais perceptível no comprimento e na largura (fig. 5).

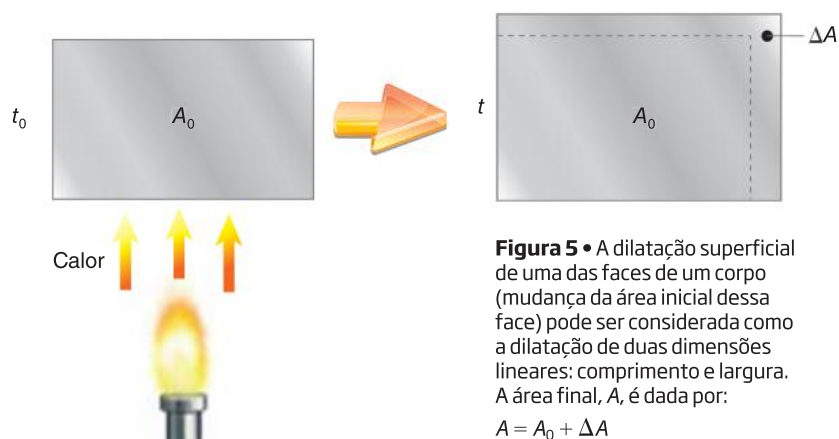


Figura 5 • A dilatação superficial de uma das faces de um corpo (mudança da área inicial dessa face) pode ser considerada como a dilatação de duas dimensões lineares: comprimento e largura. A área final, A , é dada por:

$$A = A_0 + \Delta A$$

Figura 4 • O pequeno espaço deixado entre peças de revestimento cerâmico permite que elas se dilatem sem se comprimir entre si. Pela mesma razão, em grandes construções de concreto, como pontes, viadutos, edifícios e grandes pisos de estacionamento, também são deixadas frestas (chamadas juntas de dilatação) entre os blocos de concreto.

S14

No *Suplemento*, há uma questão problematizadora sobre a dilatação superficial dos sólidos.

A dilatação superficial dos sólidos segue as mesmas leis que regem a dilatação linear. Experimentalmente, verifica-se que a variação de cada uma das dimensões lineares (ΔL) de um corpo é diretamente proporcional à variação de temperatura (ΔT) por ele sofrida. Da mesma forma, observa-se que a variação da superfície de um corpo (ΔA) também será diretamente proporcional à variação de temperatura (ΔT). Podemos representar essa dependência proporcional pela expressão:

$$\Delta A \propto \Delta T$$

Constatamos também que existe uma dependência diretamente proporcional entre a variação da área (ΔA) de uma das superfícies de um corpo e a área inicial dessa superfície (A_0). Assim, podemos escrever:

$$\Delta A \propto A_0$$

Como a variação da área é diretamente proporcional à variação de temperatura e à área inicial dessa superfície, podemos escrever:

$$\Delta A \propto \Delta T \text{ e } \Delta A \propto A_0 \Rightarrow \Delta A \propto A_0 \cdot \Delta T$$

Introduzindo uma constante de proporcionalidade β nessa última expressão, obtemos a equação que descreve a variação da área da superfície de um corpo em função da variação da temperatura a que ele é submetido:

$$\Delta A = A_0 \cdot \beta \cdot \Delta T$$

A constante de proporcionalidade β é o **coeficiente de dilatação superficial** da substância que compõe o corpo. O coeficiente de dilatação superficial de uma substância é igual ao dobro de seu coeficiente linear α , ou seja:

$$\beta = 2\alpha$$

Sabemos que a variação da área de uma superfície de um corpo pode ser calculada pela expressão $\Delta A = A - A_0$. Lembrando que $\Delta A = A_0 \cdot \beta \cdot \Delta T$, podemos então escrever:

$$\begin{aligned} A - A_0 &= A_0 \cdot \beta \cdot \Delta T \Rightarrow \\ \Rightarrow A &= A_0 + A_0 \cdot \beta \cdot \Delta T \Rightarrow \\ \Rightarrow A &= A_0(1 + \beta \Delta T) \end{aligned}$$

Essa última equação permite obter o valor da área (A) de um corpo que tenha sofrido dilatação em função de uma variação de temperatura (ΔT).

Uma questão interessante a considerar para o caso da dilatação superficial dos sólidos refere-se a um furo existente em uma placa quando esta é aquecida. O que ocorre com o furo? Ele aumenta ou diminui?

Na prática, verifica-se que, se houver diminuição de temperatura, o furo da placa terá seu perímetro diminuído, ou seja, o furo se fechará. Para ajudá-lo a entender o que ocorre, considere uma situação em que a placa não contivesse orifício algum. O que aconteceria com ela em caso de resfriamento? Ela iria se contrair, diminuindo sua superfície, certo? Agora, imagine um orifício nessa mesma placa. Com a diminuição de temperatura, o orifício se fecharia, acompanhando o que ocorre com a placa. E se a placa com o furo sofrer aumento de temperatura? Nesse caso, o perímetro do furo aumentará, assim como a área da superfície da placa, pois as partículas componentes da placa ficarão mais agitadas e tenderão a se afastar umas das outras, tanto na superfície como em todo quanto no perímetro do orifício. Essa característica pode ser usada para encaixar peças que têm tamanhos diferentes (fig. 6).

S15

No Suplemento, você encontra uma sugestão de trabalho que relaciona a fabricação de componentes industriais e a dilatação.

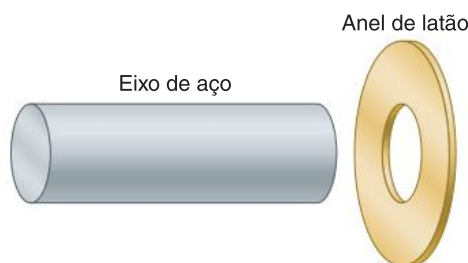
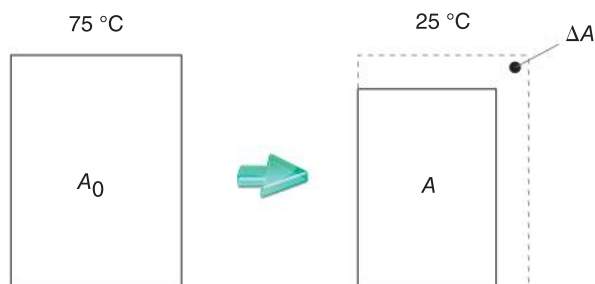


Figura 6 • A dilatação das peças permite que elas se encaixem.

QUESTÕES RESOLVIDAS

- R4** À temperatura de 75 °C, uma placa de ferro apresenta área de 1,024 m². Qual será a área dessa placa ao ser resfriada até 25 °C, sabendo que o coeficiente de dilatação linear do ferro é $12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$?



► Resolução

Dispomos dos seguintes dados:

- área conhecida da placa (área inicial):
 $A_0 = 1,024 \text{ m}^2$
- variação de temperatura:
 $\Delta T = 25 \text{ } ^\circ\text{C} - 75 \text{ } ^\circ\text{C} = -50 \text{ } ^\circ\text{C}$
- coeficiente de dilatação linear do ferro:
 $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Deseja-se calcular a área da placa à temperatura de 25 °C.

Sabemos que a área de uma face de um corpo responde à variação da temperatura segundo esta expressão:

$$A = A_0(1 + \beta \Delta T)$$

Substituindo os dados nessa equação, temos:

$$\begin{aligned} A &= 1,024[1 + 2 \cdot 12 \cdot 10^{-6} \cdot (-50)] = \\ &= 1,024(1 - 1.200 \times 10^{-6}) = 1,024(1 - 12 \times 10^{-4}) = \end{aligned}$$

$$= 1,024(10^4 \times 10^{-4} - 12 \times 10^{-4})$$

$$A = 1,024(9.988 \times 10^{-4}) = 10.227 \times 10^{-4}$$

$$\therefore A \approx 1,023 \text{ m}^2$$

A área da placa de ferro a 25 °C é, aproximadamente, 1,023 m², ou seja, em relação à temperatura inicial de 75 °C, ocorre uma contração térmica de 0,001 m², ou 10 cm².

- R5** Uma placa metálica troca calor com uma fonte e sua temperatura se torna 100 °C mais alta. Um dos efeitos dessa troca de calor é o aumento da superfície da placa de 0,06% em relação à área inicial. Qual é o valor do coeficiente de dilatação linear do material que compõe a placa?

► Resolução

O valor do coeficiente de dilatação superficial (β) pode ser obtido a partir da expressão:

$$\Delta A = A_0 \cdot \beta \cdot \Delta T$$

Inicialmente, vamos determinar a variação da área (ΔA) sofrida pela placa. Como o aumento foi de 0,06%, podemos escrever:

$$\Delta A = 0,06\% \cdot A_0 = \frac{0,06}{100} \cdot A_0$$

Como $\Delta T = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$, temos:

$$\frac{0,06}{100} \cdot A_0 = A_0 \cdot \beta \cdot 100 \Rightarrow \beta = \frac{0,06}{10.000}$$

$$\therefore \beta = 6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Como $\beta = 2\alpha$, então $\alpha = 3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

O coeficiente de dilatação linear do material que compõe a placa é, portanto, $3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

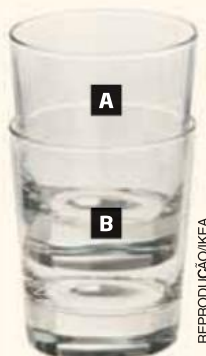
- 10** A tampa de alumínio (coeficiente de dilatação térmica linear igual a $2,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) de um frasco de vidro (coeficiente de dilatação térmica linear igual a $8,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) ficou presa na boca do frasco. Tendo disponível um caldeirão de água gelada e outro de água quente, descreva um procedimento para abrir o frasco.



- 11** Em uma placa de alumínio é feito um orifício circular para inserir um parafuso também composto de alumínio. À temperatura ambiente, o parafuso tem folga em relação ao orifício. O que acontecerá com a folga entre os dois corpos quando o conjunto for resfriado? E quando o conjunto for aquecido?

- 12** Uma chapa de zinco ($\alpha_{\text{zinco}} = 26 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) retangular tem 60 cm de comprimento e 40 cm de largura à temperatura de 20 °C. Supondo que a chapa foi aquecida até 120 °C, calcule a dilatação superficial por ela sofrida.

- 13** (Unesp) Dois copos de vidro iguais, em equilíbrio térmico com a temperatura ambiente, foram guardados, um dentro do outro, conforme mostra a figura. Uma pessoa, ao tentar desencaixá-los, não obteve sucesso. Para separá-los, resolveu colocar em prática seus conhecimentos da Física térmica.



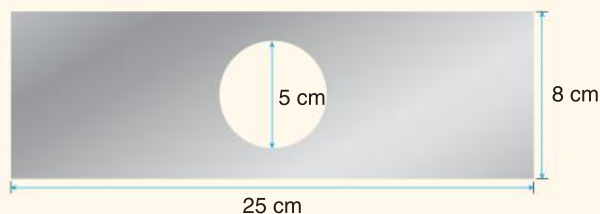
De acordo com a Física térmica, o único procedimento capaz de separá-los é:

- Mergulhar o copo *B* em água em equilíbrio térmico com cubos de gelo e encher o copo *A* com água à temperatura ambiente.
- Colocar água quente (superior à temperatura ambiente) no copo *A*.
- Mergulhar o copo *B* em água gelada (inferior à temperatura ambiente) e deixar o copo *A* sem líquido.
- Encher o copo *A* com água quente (superior à temperatura ambiente) e mergulhar o copo *B* em água gelada (inferior à temperatura ambiente).
- Encher o copo *A* com água gelada (inferior à temperatura ambiente) e mergulhar o copo *B* em água quente (superior à temperatura ambiente).

- 14** (UFPE) Em uma chapa metálica é feito um orifício circular do mesmo tamanho de uma moeda. O conjunto (chapa com a moeda no orifício), inicialmente a 25°C , é levado a um forno e aquecido até 225°C . Após o aquecimento, verifica-se que o orifício na chapa ficou maior do que a moeda. Dentre as afirmativas a seguir, indique a que está correta.
- O coeficiente de dilatação da moeda é maior do que o da chapa metálica.

- O coeficiente de dilatação da moeda é menor do que o da chapa metálica.
- O coeficiente de dilatação da moeda é igual ao da chapa metálica, mas o orifício se dilatou mais porque a chapa é maior que a moeda.
- O coeficiente de dilatação da moeda é igual ao da chapa metálica, mas o orifício se dilatou mais porque o seu interior é vazio.
- Nada se pode afirmar sobre os coeficientes de dilatação da moeda e da chapa, pois não é dado o tamanho inicial da chapa.

- 15** Uma chapa de ferro homogênea e de espessura desprezível, a 25°C , tem as seguintes dimensões: 25 cm por 8 cm e um orifício central de 5 cm de diâmetro. No mesmo ambiente estão duas bolinhas de diâmetro igual ao do furo da chapa: uma de zinco (coeficiente de dilatação térmica linear igual a $30 \times 10^{-5}^{\circ}\text{C}^{-1}$) e a outra de ferro (coeficiente de dilatação térmica linear igual a $1,2 \times 10^{-5}^{\circ}\text{C}^{-1}$). Leia as afirmações a seguir e classifique-as em verdadeiras ou falsas. Justifique sua escolha.



- Aquecendo a chapa e as bolinhas a 750°C , somente a esfera de ferro passa pelo orifício da chapa.
- Resfriando as esferas e a chapa até 0°C , as duas bolinhas passam pelo orifício.
- Ao ser aquecida a 75°C , a chapa de ferro sofre uma expansão superficial de $0,16\text{ cm}^2$.
- Ao aquecer a chapa, o orifício sofre uma contração de aproximadamente $0,09\text{ cm}^2$.

Dilatação volumétrica dos sólidos

Em algumas circunstâncias, a dilatação térmica pode ser uma fonte de problemas. Como precaução, engenheiros e projetistas utilizam procedimentos que permitem minimizar ou evitar efeitos indesejados. Na construção de pontes, por exemplo, a estrutura nem sempre é inteiriça. Em vez disso, costumam-se construir blocos de concreto ou de metal independentes, que são posicionados lado a lado sem, de fato, se tocarem diretamente. Entre eles são deixadas folgas de alguns centímetros, dependendo do tamanho da obra, para permitir que os blocos se dilatam e se contraíam individualmente. Tais espaços vazios, chamados de **juntas de dilatação**, são geralmente preenchidos com material elástico (como a borracha) ou recobertos com materiais rígidos (como perfis metálicos). Muitas vezes, os blocos nem mesmo são fixados ao solo, mas repousam sobre juntas móveis ou flexíveis.

Se os blocos dessas grandes estruturas fossem rigidamente presos uns aos outros, forças de grande magnitude surgiriam nas interligações durante a dilatação e a contração. Em condições normais, essas forças poderiam ser suficientemente intensas para causar ruptura, comprometendo a estrutura da construção.

O dimensionamento das juntas de dilatação é uma importante etapa do projeto, devendo-se levar em conta o material com que serão feitos os blocos, o volume de cada um deles e as variações de temperatura a que estarão submetidos, conforme o clima da região.

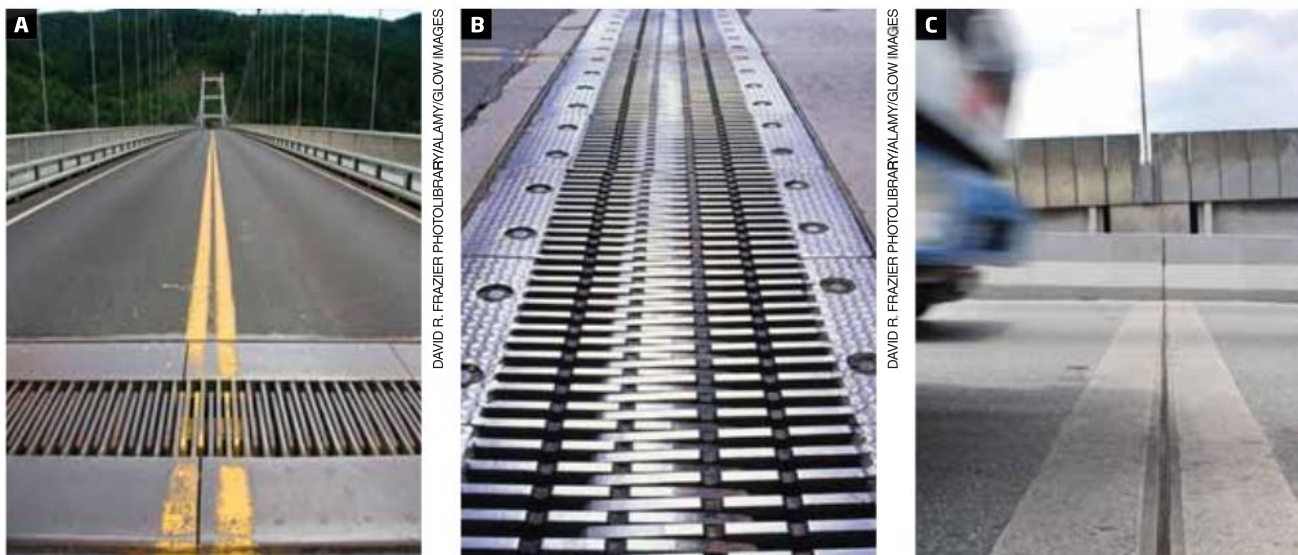


Figura 7 • (A) As juntas de dilatação evitam que estruturas como pontes e viadutos apresentem rupturas ou deformações perigosas ao se dilatar ou se contrair. (B) Juntas estreitas costumam ser preenchidas com materiais flexíveis; as de maior largura são recobertas com placas ou grelhas metálicas. (C) Geralmente, percebemos esses espaçamentos pelo ruído e pelo pequeno solavanco produzido no veículo que passa sobre eles.

A dilatação volumétrica de todos os corpos sólidos obedece às mesmas leis das dilatações lineares e superficiais, já estudadas. Experimentalmente, é possível observar que a variação de volume (ΔV) de um corpo é diretamente proporcional à variação de temperatura (ΔT) a que está submetido. Ela é também diretamente proporcional ao volume inicial do corpo (V_0). Podemos, então, escrever as seguintes relações:

$$\Delta V \propto \Delta T \text{ e } \Delta V \propto V_0 \Rightarrow \Delta V \propto V_0 \cdot \Delta T$$

Introduzindo uma constante de proporcionalidade (γ) nesta última expressão, obtemos a equação que relaciona a variação do volume de um corpo com a variação de temperatura a que ele é submetido:

$$\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T$$

A constante de proporcionalidade (γ) é o **coeficiente de dilatação volumétrica** da substância que compõe o corpo. O coeficiente de dilatação volumétrica de uma substância é o triplo de seu coeficiente linear α :

$$\gamma = 3\alpha$$

A variação de volume de um corpo sólido é a diferença entre seu volume final e seu volume inicial:

$$\Delta V = V - V_0$$

Como a variação de volume também pode ser calculada pela expressão $\Delta V = V_0 \gamma \Delta T$, temos:

$$V - V_0 = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T \Rightarrow V = V_0 + V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T \Rightarrow V = V_0(1 + \gamma \Delta T)$$

Essa última equação permite obter o valor do volume de um corpo sólido que tenha sofrido dilatação em função de uma variação de temperatura (ΔT).

Já sabe responder?

Um avião pode ter o comprimento alterado enquanto está voando?

RICHARD HAYWARD/ALAMY/GLOW IMAGES



QUESTÕES RESOLVIDAS

R6 Um paralelepípedo (prisma reto retângulo) possui uma face com 40 cm de comprimento e 15 cm de largura. A altura desse paralelepípedo é 20 cm. O sólido é maciço, homogêneo e feito de ferro, cujo coeficiente de dilatação linear é $12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Qual é a variação de volume desse sólido ao ser aquecido de 25 °C a 125 °C?

► Resolução

Dispomos dos seguintes dados:

- volume inicial do paralelepípedo:
 $V_0 = 40 \text{ cm} \cdot 15 \text{ cm} \cdot 20 \text{ cm} = 12.000 \text{ cm}^3$
- variação de temperatura:
 $\Delta T = 125 \text{ } ^\circ\text{C} - 25 \text{ } ^\circ\text{C} = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$
- coeficiente de dilatação linear do ferro:
 $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Devemos determinar a variação de volume do paralelepípedo quando a temperatura varia em 100 °C.

Sabemos que a variação de volume de um sólido em função da variação da temperatura pode ser calculada pela expressão: $\Delta V = V_0 \gamma \Delta T$ e que o coeficiente de dilatação volumétrica (γ) é igual ao triplo do coeficiente de dilatação linear (α). Assim, temos:

$$\begin{aligned}\Delta V &= V_0 \gamma \Delta T = 12.000 \cdot 3 \cdot 12 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = \\ &= 12 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 12 \cdot 10^{-6} \cdot 10^2 = \\ &= 432 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6} \cdot 10^2 = 432 \cdot 10^{-1}\end{aligned}$$

$$\therefore \Delta V = 43,2 \text{ cm}^3$$

R7 O anel de Gravesande, assim denominado em homenagem ao físico holandês Willem Jacob's Gravesande (1688-1742), é um dispositivo constituído de uma esfera metálica que passa com exatidão por um anel do mesmo material quando ambos

estão à temperatura ambiente. É muito utilizado para comprovar a dilatação dos sólidos. Para isso pode-se aquecer o conjunto ou somente um de seus componentes.

FOTOS: MARTYN F. CHILLMAID/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK



À temperatura ambiente, a esfera passa livremente pelo anel.



A passagem da esfera é impedida quando seu diâmetro está maior que o do anel.

- Na segunda imagem, a esfera não consegue passar pelo anel. Quais são as possibilidades de aquecimento ou de resfriamento que a esfera ou o anel podem sofrer para impedir a passagem da esfera?
- Suponha que à temperatura de 20 °C a esfera apresente volume inicial V_0 . Ao sofrer uma variação de 100 °C, sua variação de volume correspondente será de $0,0081V_0$. Qual é o valor do coeficiente de dilatação linear da substância que compõe essa esfera?

► Resolução

- As alterações de temperatura que podem provocar essa situação são:
 - A esfera foi aquecida isoladamente, sofrendo dilatação volumétrica, o que a impede de passar pelo anel.
 - O anel foi resfriado isoladamente, sofrendo contração volumétrica. A parte vazia se con-

traiu como se estivesse totalmente preenchida, e por isso a esfera não consegue passar por esse espaço.

III. Ambos os componentes foram aquecidos, mas a esfera foi mais aquecida que o anel (por exemplo, sendo exposta por mais tempo ao fogo ou mergulhada por mais tempo em água fervente).

IV. Ambos os componentes foram resfriados, mas o anel sofreu maior resfriamento que a esfera (por exemplo, sendo mergulhado por mais tempo em água gelada).

V. Aquecimento da esfera simultaneamente ao resfriamento do anel.

b) O valor do coeficiente de dilatação volumétrica (γ) pode ser obtido pela expressão: $\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T$, em que $\Delta V = 0,0081V_0$ e $\Delta T = 100^\circ\text{C}$. Assim, temos:

$$0,0081 \cdot V_0 = V_0 \cdot \gamma \cdot 100 \Rightarrow \gamma = \frac{0,0081}{100}$$

$$\therefore \gamma = 81 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Como $\gamma = 3\alpha$, então o coeficiente de dilatação linear da substância que compõe a esfera

será: $\alpha = 27 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

16 Leia as afirmações a seguir a respeito da dilatação dos sólidos e classifique-as em verdadeiras ou falsas. Em seguida, escreva um texto justificando sua escolha.

- Um parafuso está preso a uma placa fabricada com uma substância de coeficiente de dilatação térmica volumétrica de valor bem menor que o coeficiente de dilatação térmica volumétrica do parafuso. Um procedimento para soltar esse parafuso é aquecê-lo e resfriar a placa.
- Os termômetros de mercúrio têm funcionamento adequado, pois o coeficiente de dilatação volumétrica do mercúrio é muito menor que o coeficiente de dilatação volumétrica do vidro.
- A variação de volume de um corpo é inversamente proporcional ao produto de seu volume inicial pela variação da temperatura sofrida pelo corpo.
- A densidade de uma esfera aumenta quando ela sofre aquecimento.

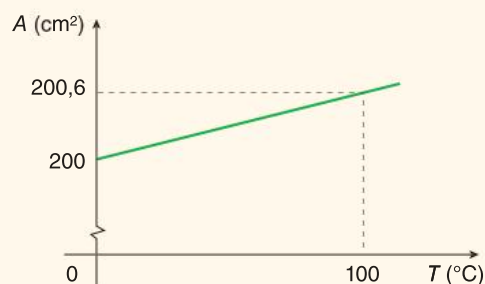
17 Um copo de vidro de volume interno 250 cm^3 apresenta, a 20°C , coeficiente de dilatação linear $12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Calcule o aumento do volume interno que esse copo sofre quando sua temperatura passa a 220°C .

18 Uma chapa com área de 1 m^2 aumenta $0,36 \text{ mm}^2$ ao sofrer certa elevação de temperatura. Para essa mesma elevação de temperatura, quanto aumentará o volume de um paralelepípedo de 1 m^3 feito do mesmo material?

19 Numa siderúrgica, um cubo de ferro é resfriado até que seu volume diminua $0,63\%$. Calcule a variação de temperatura ocorrida, supondo que o coeficiente de dilatação linear do ferro seja $12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

20 O gráfico mostra como varia a área de um disco metálico circular em função da temperatura.

Determine a variação de volume de um cubo de 20 cm de aresta feito com o mesmo material do disco ao ser aquecido de 0°C a 100°C .



21 (Enem) Durante uma ação de fiscalização em postos de combustíveis, foi encontrado um mecanismo inusitado para enganar o consumidor. Durante o inverno, o responsável por um posto de combustível compra álcool por R\$ 0,50/litro, a uma temperatura de 5°C . Para revender o líquido aos motoristas, instalou um mecanismo na bomba de combustível para aquecê-lo, para que atinja a temperatura de 35°C , sendo o litro de álcool revendido a R\$ 1,60. Diariamente o posto compra 20 mil litros de álcool a 5°C e os revende. Com relação à situação hipotética descrita no texto e dado que o coeficiente de dilatação volumétrica do álcool é de $1 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, desprezando-se o custo da energia gasta no aquecimento do combustível, o ganho financeiro que o dono do posto teria obtido devido ao aquecimento do álcool após uma semana de vendas estaria entre:

- R\$ 500,00 e R\$ 1.000,00
- R\$ 1.050,00 e R\$ 1.250,00
- R\$ 4.000,00 e R\$ 5.000,00
- R\$ 6.000,00 e R\$ 6.900,00
- R\$ 7.000,00 e R\$ 7.950,00

Dilatação dos líquidos

ou: Por que uma garrafa de vidro cheia de suco pode quebrar depois de ficar algumas horas no freezer?

S16

No Suplemento, você encontra orientações para o trabalho com a questão introdutória.

1 Introdução

Abaixo de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, a água presente na bebida se expande. Ao congelar, essa expansão é ainda maior por causa do tipo de estrutura cristalina da água, repleta de espaços vazios entre as moléculas. O volume da massa de água se torna, por isso, maior que o volume interno da garrafa, que, sendo de vidro, sofre menor dilatação. Consequentemente, a garrafa se rompe.

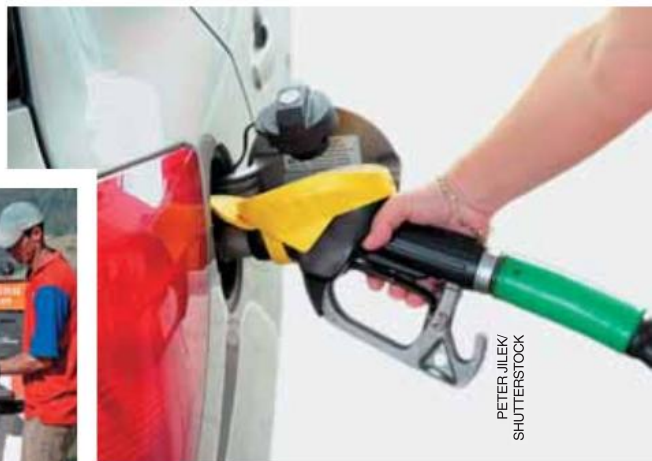
Em um dia quente de verão, um motorista entra em um posto de combustíveis e solicita ao frentista que encha o tanque de seu veículo. Por ser pouco experiente, o frentista preenche totalmente o tanque com gasolina. Após percorrer uma curta distância, o motorista começa a sentir um forte cheiro de gasolina. Ele para o carro e verifica que um pouco da gasolina está escapando pelo ladrão do tanque de combustível.

O caso ilustra uma situação a que devemos prestar bastante atenção: os líquidos, assim como os sólidos, estão sujeitos à dilatação térmica. No exemplo descrito, o derramamento de combustível ocorreu porque o líquido se expandiu ao trocar calor com o ambiente. A dilatação da gasolina contida no tanque é um dos efeitos do aquecimento resultante das trocas de calor: o grau de agitação das partículas constituintes do combustível aumentou, e essa variação de energia cinética ocasionou a expansão térmica do líquido. O recipiente que continha o combustível também se dilatou durante as trocas de calor com o ambiente. Dessa maneira, a porção de gasolina derramada não representa todo o volume de líquido que se expandiu.

Neste capítulo, vamos estudar a dilatação real e aparente dos líquidos. Também vamos conhecer um caso bastante particular: a dilatação anômala da água.

Neste capítulo, vamos estudar a dilatação real e aparente dos líquidos. Também vamos conhecer um caso bastante particular: a dilatação anômala da água.

RICARDO AZOURY/OLHAR IMAGEM



PETER JILEK/SHUTTERSTOCK

Figura 1 • O hábito de encher completamente o tanque de combustível pode ocasionar vazamentos por causa da maior dilatação do líquido em relação à do tanque.

2 Comportamento de líquidos e recipientes durante a dilatação

Uma das características que diferenciam uma substância no estado líquido de outra no estado sólido é que a primeira não tem forma própria: ela adquire a forma do recipiente que a contém. Isso acontece porque no estado líquido as ligações entre as moléculas são bem menos intensas que as existentes na rede cristalina de um sólido. Como resultado, as moléculas de um líquido têm maior liberdade de movimento.



Figura 2 • Diferentes recipientes alteram a forma de um mesmo volume de líquido.

ILUSTRAÇÕES: MANGA

Por essa razão, raramente há utilidade em calcular dilatações lineares ou superficiais de líquidos, mas é bastante útil o cálculo das suas dilatações volumétricas. Para determinar a variação de volume de um líquido quando aquecido, podemos aplicar a expressão matemática referente à dilatação volumétrica dos sólidos:

$$\Delta V_{\text{liq.}} = V_0 \cdot \gamma_{\text{liq.}} \cdot \Delta T$$

Essa mesma expressão pode ser utilizada para calcular o coeficiente de dilatação de um líquido, conhecendo seu volume inicial e as variações de seu volume e de sua temperatura.

Outra característica importante que distingue esses dois estados da matéria é que, em geral, os líquidos se dilatam mais que os sólidos. Compare os coeficientes de dilatação de alguns materiais no estado sólido e de outros no estado líquido:

Material sólido	Coeficiente de dilatação ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Material líquido	Coeficiente de dilatação ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
chumbo	$8,1 \times 10^{-5}$	éter	$1,6 \times 10^{-3}$
zinco	$7,8 \times 10^{-5}$	gasolina	$1,2 \times 10^{-3}$
vidro refratário (pirex)	$0,9 \times 10^{-5}$	glicerina	$5,3 \times 10^{-4}$
tungstênio	$1,3 \times 10^{-5}$	mercúrio	$1,8 \times 10^{-4}$

Chame a atenção dos alunos para os valores dos coeficientes de dilatação dos sólidos e dos líquidos. Convide-os a comparar a ordem de grandeza desses valores.

Fonte: LIDE, D. R. (Ed.). *Handbook of Chemistry and Physics*. 87. ed. Boca Raton: CRC, 2006; 2007.

Note que o coeficiente de dilatação dos líquidos é, em geral, duas ordens de grandeza maior que o coeficiente de dilatação dos sólidos.

Conhecendo essas propriedades, vamos analisar com mais detalhe esse tipo de dilatação. Para tanto, vamos considerar que uma massa líquida está contida em um recipiente cilíndrico (fig. 3).

Podemos pensar, já que há uma escala graduada no recipiente, que o líquido dilatou 1 cm^3 . Isso seria verdadeiro se o recipiente não se dilatasse. No entanto, todo material sofre expansão e por isso a capacidade volumétrica do frasco também aumentou. A consequência é que a variação de 1 cm^3 indicada na escala revela apenas parte da dilatação do líquido. A conclusão é que, na maioria das vezes, **a dilatação de um líquido não pode ser observada diretamente**.

Esse mesmo efeito acontece no experimento esquematizado a seguir. Imagine que temos um recipiente com volume inicial V_0 , a uma temperatura T_0 , completamente cheio com determinado líquido. Ao ser aquecido a uma temperatura T , o líquido transborda, uma vez que se dilata mais que o recipiente. O volume extravasado é recolhido em um frasco menor (fig. 4).

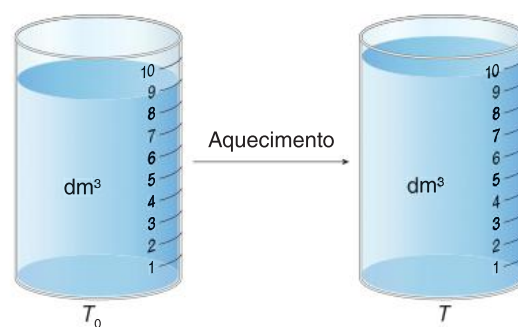


Figura 3 • A escala gravada no recipiente permitiria determinar diretamente a dilatação do líquido, se o recipiente não se dilatasse.

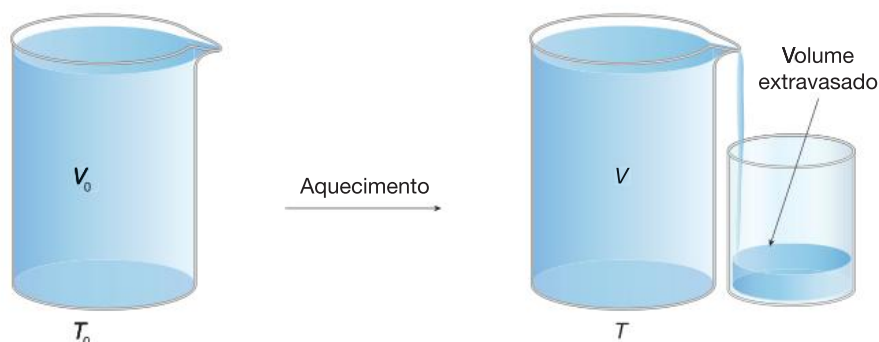


Figura 4 • O líquido contido em um recipiente inteiramente preenchido extravasa ao ser aquecido. O volume recolhido no frasco menor aparenta corresponder a toda a dilatação do líquido.

Se o recipiente original não se expandisse, a quantidade de líquido extravasado revelaria exatamente a variação de volume sofrida. Na prática, porém, parte do volume dilatado do líquido ocupou o espaço extra criado pela dilatação do próprio recipiente. Assim, o que extravasa não é a quantidade total de líquido dilatado, apesar de parecer que sim. Por essa razão, damos à quantidade de líquido extravasado o nome de **variação aparente do volume** (ΔV_{ap}).

Que parcela do volume de líquido dilatado terá permanecido no recipiente maior? Exatamente o volume dilatado desse recipiente (ΔV_{rec}). Assim, a **dilatação real de um líquido** ($\Delta V_{liq.}$) é a soma de sua variação aparente e da variação de volume do recipiente:

$$\Delta V_{liq.} = \Delta V_{ap} + \Delta V_{rec}$$

Em vista disso, como podemos avaliar a dilatação real de um líquido? Para isso, podemos aplicar a expressão da dilatação volumétrica dada por:

$$\Delta V_{ap} = V_0 \cdot \gamma_{ap} \cdot \Delta T$$

$$\Delta V_{rec} = V_0 \cdot \gamma_{rec} \cdot \Delta T$$

em que γ_{ap} é o coeficiente de dilatação aparente do líquido, ou seja, o coeficiente de dilatação que ele teria se o recipiente não se dilatasse.

Aplicando as expressões dessas duas parcelas à equação anterior e lembrando que $\Delta V_{liq.} = V_0 \cdot \gamma_{liq.} \cdot \Delta T$, temos:

$$\Delta V_{liq.} = \Delta V_{ap} + \Delta V_{rec} \Rightarrow V_0 \cdot \gamma_{liq.} \cdot \Delta T = V_0 \cdot \gamma_{ap} \cdot \Delta T + V_0 \cdot \gamma_{rec} \cdot \Delta T$$

Note que o volume inicial V_0 e a variação de temperatura ΔT constam em todas as parcelas da última equação. Simplificando-a, obtemos a relação entre os três coeficientes de dilatação:

$$\gamma_{liq.} = \gamma_{ap} + \gamma_{rec}$$

S17

A dilatação anômala da água é descrita no Suplemento de maneira detalhada.

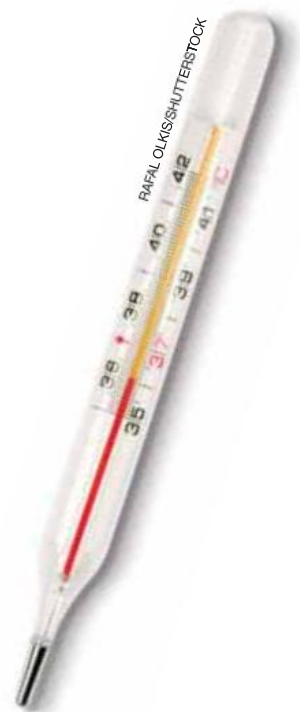


Figura 5 • Mesmo em instrumentos de medida como termômetros, o líquido interno se dilata ou se contrai ao mesmo tempo que o vidro sofre variação de volume. Por isso, a escala desses instrumentos é calibrada para compensar a variação de volume do vidro.

Você precisa saber!

Por que um lago congela apenas na superfície?

Em geral, as substâncias e os materiais tendem a se contrair ao serem resfriados. A água, no entanto, é uma exceção, pois entre 4 °C e 0 °C seu volume aumenta em vez de diminuir. A dilatação anômala da água tem consequências extremamente importantes para o meio ambiente. Ela impede que rios e lagos das regiões frias, e mesmo o mar, se congelem por completo, convertendo-se em blocos integralmente sólidos. À medida que a água se solidifica, forma-se uma camada de gelo na superfície, mas, por baixo dessa camada sólida, a água permanece no estado líquido, com temperatura em torno de 4 °C. Por que isso acontece?

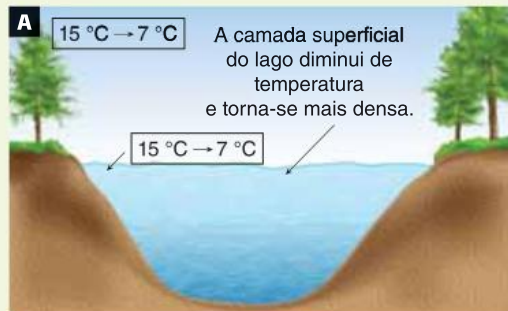
Nessas regiões, com a aproximação do inverno, a água superficial entra em equilíbrio térmico com o ar mais frio, contraindo-se e tornando-se mais densa que a água do restante do lago, que ainda não se resfriou. Por causa da maior densidade, a porção superior da água desce para o fundo do lago, fazendo com que porções mais quentes subam e, por sua vez, sejam resfriadas pelo contato com o ar. Assim, estabelecem-se as chamadas correntes de convecção, que uniformizam progressivamente a temperatura do lago. No entanto, quando a temperatura ambiente cai abaixo de 4 °C, a camada de água da superfície se expande em vez de se contrair, o que a torna menos densa. Isso faz com que essa camada permaneça na superfície, interrompendo as correntes de convecção.

ASCENT XMEDIA/GETTY IMAGES



A camada de gelo na superfície do lago, espessa e resistente, torna possível a patinação, mas, abaixo, a água continua em estado líquido.

Quando a temperatura ambiente chega a 0°C , a superfície do lago congela e o restante do lago permanece no estado líquido, com temperatura um pouco inferior a 4°C .



A camada superficial de água é a primeira a ter sua temperatura diminuída (pelo contato com o ar frio) e a tornar-se mais densa.



Por se tornar mais densa, a camada superficial desce para as partes mais profundas do lago, fazendo com que camadas que ainda estão mais quentes (e menos densas) subam e sejam resfriadas. Formam-se, assim, as correntes de convecção.



Quando a temperatura cai abaixo de 4°C , a camada superficial dilata-se, ficando menos densa. Isso a faz permanecer na parte superior do lago, e as correntes de convecção se interrompem.

Representações sem escala, cores-fantasia.



Quando a temperatura cai a 0°C ou menos, a camada superficial congela-se, isolando as partes mais profundas do lago, que permanecem no estado líquido. Isso garante a sobrevivência de animais e plantas.

Note que, sendo o gelo um isolante térmico, a camada sólida superficial mantém constante a temperatura da água que está abaixo dela. Dessa forma, a fauna e a flora dos corpos de água são preservadas, permitindo que os ecossistemas de rios, lagos e mares se mantenham vivos ao longo de todo o ciclo anual.

Já sabe responder?

Por que uma garrafa de vidro cheia de suco pode quebrar depois de ficar algumas horas no freezer?



RICARDO SIMIÃO

QUESTÕES RESOLVIDAS

R1 Quando um determinado recipiente de vidro de 100 cm^3 de capacidade é completamente preenchido com mercúrio e aquecido de 30°C até 150°C , há transbordamento de 2 cm^3 do metal. Qual é o coeficiente de dilatação linear desse tipo de vidro?

(Dado: coeficiente de dilatação do mercúrio = $18 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)

► Resolução

Queremos determinar o coeficiente de dilatação linear do material do recipiente. Para isso, devemos calcular o coeficiente de dilatação volumétrica do recipiente. Sabemos que 2 cm^3 de mercúrio transbordam. Esta é a dilatação aparente (ΔV_{ap}) do mercúrio:

$$\Delta V_{\text{ap}} = V_0 \gamma_{\text{ap}} \Delta T$$

Sendo $V_0 = 100 \text{ cm}^3$ e $\Delta T = 120^\circ\text{C}$, podemos calcular γ_{ap} :

$$\gamma_{\text{ap}} = \frac{2}{100 \cdot 120} = \frac{2}{1,2 \cdot 10^4} \approx 1,7 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

Da relação entre os coeficientes, podemos obter o coeficiente de dilatação volumétrica do recipiente:

$$\gamma_{\text{liq.}} = \gamma_{\text{ap}} + \gamma_{\text{rec}} \Rightarrow 18 \cdot 10^{-5} = 17 \cdot 10^{-5} + \gamma_{\text{rec}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \gamma_{\text{rec}} = 18 \cdot 10^{-5} - 17 \cdot 10^{-5}$$

$$\therefore \gamma_{\text{rec}} = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

Como o coeficiente de dilatação linear é um terço do coeficiente de dilatação volumétrica, podemos escrever:

$$\alpha_{\text{vidro}} = \frac{\gamma_{\text{rec}}}{3} = \frac{10 \cdot 10^{-6}}{3}$$

$$\therefore \alpha_{\text{vidro}} \approx 3,3 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

R2 Um recipiente de alumínio com capacidade de 90 cm^3 contém um líquido cujo coeficiente de dilatação é $1,3 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. A temperatura do sistema (recipiente + líquido) sofre uma variação de temperatura de 50°C . Determine o volume de líquido que deve ser colocado inicialmente para que a diferença entre esse volume e o volume do recipiente permaneça constante durante essa elevação de temperatura. (O coeficiente de dilatação volumétrica do alumínio é $6,6 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.)

► Resolução

Para que a diferença entre os volumes permaneça constante, é preciso que as dilatações do líquido e do recipiente tenham o mesmo valor:

$$\Delta V_{\text{liq.}} = \Delta V_{\text{rec}} \Rightarrow V_{0\text{liq.}} \gamma_{\text{liq.}} \Delta T = V_{0\text{rec}} \gamma_{\text{rec}} \Delta T \Rightarrow$$

$$V_{0\text{liq.}} = \frac{V_{0\text{rec}} \cdot \gamma_{\text{rec}}}{\gamma_{\text{liq.}}} = \frac{90 \cdot 6,6 \cdot 10^{-5}}{1,3 \cdot 10^{-4}}$$

$$\therefore V_{0\text{liq.}} \approx 45,7 \text{ cm}^3$$

R3 A densidade de determinado líquido a 20°C é $15,0 \text{ g/cm}^3$ e seu coeficiente de dilatação é $1,5 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Qual será a densidade desse líquido a 120°C ? Considere o coeficiente de dilatação do líquido constante nesse intervalo de temperatura.

► Resolução

Embora o volume e, consequentemente, a densidade do líquido se alterem com o aquecimento, sua massa permanece a mesma:

$$m_{20^\circ\text{C}} = m_{120^\circ\text{C}} \Rightarrow d_{20^\circ\text{C}} V_{20^\circ\text{C}} = d_{120^\circ\text{C}} V_{120^\circ\text{C}}$$

O volume do líquido a 120°C é obtido a partir da expressão da dilatação volumétrica:

$$\Delta V_{\text{liq.}} = V_{20^\circ\text{C}} \gamma_{\text{liq.}} \Delta T \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{120^\circ\text{C}} - V_{20^\circ\text{C}} = V_{20^\circ\text{C}} \gamma_{\text{liq.}} \Delta T \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{120^\circ\text{C}} = V_{20^\circ\text{C}} + V_{20^\circ\text{C}} \gamma_{\text{liq.}} \Delta T \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{120^\circ\text{C}} = V_{20^\circ\text{C}} (1 + \gamma_{\text{liq.}} \Delta T)$$

Substituindo a expressão acima na equação da igualdade das massas, temos:

$$d_{20^\circ\text{C}} \cdot V_{20^\circ\text{C}} = d_{120^\circ\text{C}} \cdot V_{120^\circ\text{C}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow d_{20^\circ\text{C}} \cdot V_{20^\circ\text{C}} = d_{120^\circ\text{C}} \cdot V_{20^\circ\text{C}} \cdot (1 + \gamma_{\text{liq.}} \cdot \Delta T)$$

O fator $V_{20^\circ\text{C}}$ consta em ambos os membros da igualdade, podendo, por isso, ser cancelado. Obtemos, então:

$$d_{120^\circ\text{C}} = \frac{d_{20^\circ\text{C}}}{1 + \gamma_{\text{liq.}} \cdot \Delta T} = \frac{15}{1 + 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot 100} =$$

$$= \frac{15}{1,015} \therefore d_{120^\circ\text{C}} \approx 14,8 \text{ g/cm}^3$$

QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

1 Leia as afirmações a seguir e classifique-as em verdadeiras ou falsas. Em seguida, escreva um texto justificando suas escolhas. Se houver afirmações verdadeiras, utilize-as na elaboração do seu texto.

- A densidade de um corpo é uma grandeza física que não se relaciona à temperatura desse corpo.
- A dilatação térmica dos líquidos é um efeito da transferência de calor entre corpos, e a alteração de volume de um líquido em um recipiente não depende da variação de volume do recipiente que o contém.
- Uma massa de água no estado líquido a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ é aquecida até atingir $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ao longo desse aquecimento, o volume de água aumenta.

2 O motorista de uma empresa recebeu a notícia de que precisaria viajar a trabalho. Encheu completamente de gasolina o tanque do veículo e deixou-o exposto ao sol. Quando retornou, após duas horas, o motorista observou que o combustível havia transbordado. Conversou com um colega que levantou as seguintes hipóteses para explicar o derramamento de combustível:

I. Como a temperatura aumentou ao longo do tempo em que o veículo ficou exposto ao sol, a gasolina sofreu maior expansão que a expansão sofrida pelo tanque.

II. A dilatação térmica do tanque é linear, mas a do combustível é volumétrica.

III. O volume de combustível derramado é correspondente à dilatação aparente sofrida pela gasolina.

- Quais são as hipóteses corretas?
- Elabore um texto em que você explique e corrija as hipóteses incorretas.

3 Em uma noite fria ($10\text{ }^{\circ}\text{C}$), Maria Helena preencheu totalmente com álcool o tanque de seu automóvel (capacidade 50 L) e logo em seguida guardou o veículo na garagem. Ao acordar na manhã seguinte, o dia estava mais quente ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Calcule o volume de álcool que havia vazado do tanque de combustível considerando o coeficiente de dilatação volumétrica do álcool etílico igual a $1,2 \times 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ e desprezando a dilatação volumétrica do tanque.

4 Coloca-se um líquido, inicialmente a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, de coeficiente de dilatação volumétrica $3 \times 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, em um recipiente de coeficiente de dilatação

volumétrica desconhecido. Sabe-se que o líquido preencheu totalmente o recipiente de 1 L de capacidade. O sistema líquido-recipiente é aquecido $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 20 cm^3 do líquido transbordam. A respeito dessa situação, são feitas as afirmações a seguir. Classifique-as em verdadeiras ou falsas, justificando-as.

- A expansão volumétrica do líquido foi menor que a expansão do recipiente que o contém.
- O recipiente sofreu expansão volumétrica de 4 cm^3 .
- A dilatação volumétrica real do líquido foi de 24 cm^3 .
- A contração volumétrica do frasco foi de 24 cm^3 .
- O coeficiente de dilatação volumétrica do recipiente é igual a $4 \times 10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

5 Um caminhão-tanque descarrega 15.000 L de gasolina ($\gamma = 1,1 \times 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ num posto de gasolina. Essa gasolina resfria no depósito subterrâneo do posto e sua temperatura cai para $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Calcule a contração de volume que a gasolina sofre.

6 Por que o gelo se forma de cima para baixo quando colocado em uma vasilha aberta em um congelador?

7 Um recipiente de vidro cujo coeficiente de dilatação volumétrica é $27 \times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ foi graduado em cm^3 a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dentro do recipiente colocamos um líquido a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ até atingir a marca de 600 cm^3 . Aquecendo o conjunto a $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, observa-se que o líquido atinge a marca de 612 cm^3 . Calcule o coeficiente de dilatação volumétrica real do líquido e seu volume final real a $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.



8 Um recipiente de vidro de volume interno 1.000 cm^3 contém 600 cm^3 de um líquido à temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. O coeficiente de dilatação volumétrica do vidro é $27 \times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ e o coeficiente de dilatação volumétrica do líquido é $8,1 \times 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. A que temperatura o líquido preencherá todo o espaço interno desse recipiente?

9 Um copo de vidro ($\alpha = 8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) está completamente cheio com 300 cm^3 de mercúrio a $20 \text{ } ^\circ\text{C}$. Aquecendo o conjunto até $120 \text{ } ^\circ\text{C}$, ocorre o transbordamento de $4,8 \text{ cm}^3$ de mercúrio. Calcule:

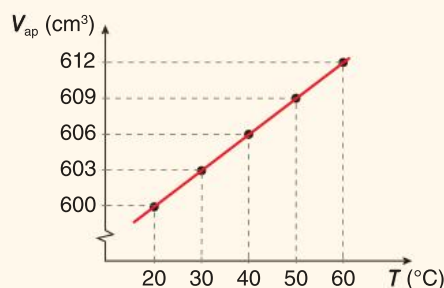
- o coeficiente de dilatação aparente (γ_{ap}) do mercúrio;
- o coeficiente de dilatação real (γ) do mercúrio.

10 Um recipiente de vidro cujo coeficiente de dilatação volumétrica é $27 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ está completamente cheio com 3.000 cm^3 de um líquido à temperatura de $20 \text{ } ^\circ\text{C}$. Aquecendo o conjunto à temperatura de $80 \text{ } ^\circ\text{C}$, observa-se o transbordamento de 6 cm^3 do líquido.

Determine:

- o coeficiente de dilatação aparente do líquido;
- o coeficiente de dilatação volumétrica real do líquido.

11 O gráfico a seguir representa o volume aparente em função da temperatura de um líquido colocado em um frasco de vidro, que foi graduado a $20 \text{ } ^\circ\text{C}$. Sabendo que o vidro de que é feito o frasco tem coeficiente de dilatação igual a $30 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, calcule o coeficiente de dilatação volumétrica real do líquido.



12 (Ufop-MG) Um recipiente, cujo volume é exatamente 1.000 cm^3 , à temperatura de $20 \text{ } ^\circ\text{C}$, está completamente cheio de glicerina a essa temperatura. Quando o conjunto é aquecido até $100 \text{ } ^\circ\text{C}$, são entornados $38,0 \text{ cm}^3$ de glicerina.

Dado: coeficiente de dilatação volumétrica da glicerina = $0,5 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Calcule:

- a dilatação real da glicerina;
- a dilatação do frasco;
- o valor do coeficiente de dilatação volumétrica do recipiente.

13 (UFPel-RS) Os postos de gasolina são normalmente abastecidos por um caminhão-tanque. Nessa ação cotidiana, muitas situações interessantes podem ser observadas.

Um caminhão-tanque, cuja capacidade é de 40.000 litros de gasolina, foi carregado completamente, num dia em que a temperatura ambiente era de $30 \text{ } ^\circ\text{C}$. No instante em que chegou para abastecer o posto de gasolina, a temperatura ambiente era de $10 \text{ } ^\circ\text{C}$, devido a uma frente fria, e o motorista observou que o tanque não estava completamente cheio. Sabendo que o coeficiente de dilatação da gasolina é $1,1 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e considerando desprezível a dilatação do tanque, é correto afirmar que o volume do ar, em litros, que o motorista encontrou no tanque do caminhão foi de:

- 40.880
- 8.800
- 31.200
- 4.088
- 880

Calorimetria

ou: Por que alimentos ainda quentes não devem ser levados à geladeira?

1 Introdução

Quando um alimento ainda quente é colocado na geladeira, o sistema de refrigeração funciona por mais tempo que o normal para que o ar em seu interior absorva a energia térmica do alimento e restabeleça o equilíbrio térmico que havia antes de o alimento ter sido guardado. Isso pode implicar mais consumo de energia.

S18

No *Suplemento*, você encontra orientações para o trabalho com a questão introdutória.

A temperatura está associada ao grau de agitação térmica das partículas da(s) substância(s) que compõem os corpos. Variações da temperatura de determinado corpo, para mais ou para menos, podem estar relacionadas com o fato de o corpo receber ou ceder calor e, nesse processo, sua energia interna pode aumentar ou diminuir. Assim, calor e variação de temperatura são conceitos relacionados, uma vez que trocas de calor podem gerar variações na temperatura dos corpos.

Para que ocorra troca de calor, um corpo funciona como fonte de calor para o outro. Nossa pele pode ser uma fonte de calor, assim como um forno elétrico. Mas quanta energia uma pessoa ou esse eletrodoméstico podem fornecer a um sistema?

Estudar a quantidade de calor que as fontes conseguem fornecer, bem como as grandezas físicas necessárias para calcular a grandeza Q (quantidade de calor), é o que faremos neste capítulo.

VILANEQUEVETTE/SHUTTERSTOCK

ZSSD/GETTY IMAGES

Figura 1 • Enquanto alimenta o filhote, o flamingo aquece seu corpo ainda sem plumagem, minimizando, assim, as trocas de calor com o ambiente.

2 Fontes de calor

Uma maneira de aumentar a temperatura de um corpo é fornecer-lhe energia por meio de uma fonte de calor. Há fontes de calor de diferentes tipos. A temperatura da pele aumenta quando nos expomos ao Sol; a água fria esquenta quando colocada em contato com a chama de um fogão; a temperatura no interior de uma casa pode aumentar quando se utiliza um aquecedor elétrico ou se acende uma lareira. O Sol, a lareira, a chama do fogão e o aquecedor elétrico são exemplos de fontes de calor (fig. 2).

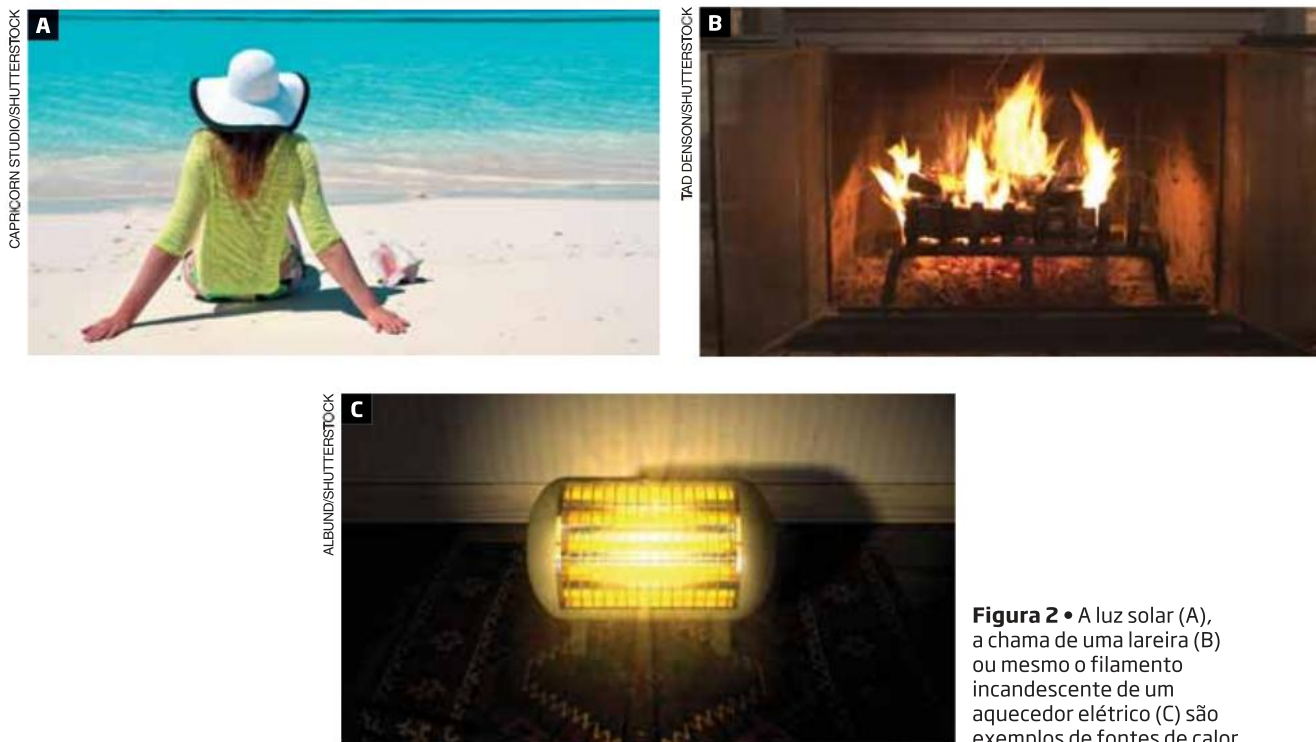


Figura 2 • A luz solar (A), a chama de uma lareira (B) ou mesmo o filamento incandescente de um aquecedor elétrico (C) são exemplos de fontes de calor.

Quando dois corpos de temperaturas diferentes entram em contato, ocorre troca de energia entre eles. Espontaneamente, o fluxo de energia se estabelece do corpo com maior temperatura para aquele com menor temperatura. O fluxo de calor permanece até que os dois corpos atinjam a mesma temperatura ou, em outras palavras, cheguem ao estado de **equilíbrio térmico**. Dessa maneira, podemos dizer que o corpo com maior temperatura faz o papel de fonte de calor para o corpo de menor temperatura. Por exemplo, se colocamos uma pedra de gelo em contato com nosso corpo, observamos que a temperatura do gelo aumenta, e ele começa a derreter. Nesse caso, nosso corpo pode ser considerado uma **fonte de calor**.

Assim, dizemos que **fonte de calor**, para determinado corpo que possui uma temperatura t , poderá ser qualquer outro corpo que esteja a uma temperatura maior que t .

A quantidade de energia que uma fonte cede a um corpo pode ser medida pela unidade **caloria** (cal).

Uma caloria (cal) é a quantidade de calor que deve ser fornecida a 1 grama de água sob pressão normal para que sua temperatura se eleve 1°C .

A medida da quantidade de energia por unidade de tempo que uma fonte de calor transmite a um corpo é a **potência** dessa fonte. A potência de uma fonte de calor pode ser expressa na unidade **caloria por segundo** (cal/s). A potência de um forno de micro-ondas, por exemplo, é da ordem de 250 cal/s, enquanto o queimador de um fogão a gás pode atingir 700 cal/s.

VOCÊ SE LEMBRA?

Unidade de potência no SI

De acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de potência é o watt (W). À potência de 1 W corresponde uma taxa de transferência de energia de 1 joule por segundo.

$$1\text{ W} = 1\text{ J/s}$$

Não julgamos necessário o excesso de rigor na definição da unidade caloria, ou seja, elevação de 1°C no intervalo $14,5^\circ\text{C}$ para $15,5^\circ\text{C}$. Procure enfatizar a importância do uso de unidades do SI. Pode-se, por exemplo, apresentar a unidade J (joule) como a adotada para quantidade de calor no SI.

3 Capacidade térmica

Quando fornecemos quantidades de calor (Q) iguais a dois corpos, é possível que a elevação da temperatura seja diferente em cada um deles. A temperatura de um dos corpos poderá, por exemplo, se elevar $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto a do outro, apenas $2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

 **S19**

No *Suplemento*, há um texto sobre o uso da unidade caloria em relação à quantidade de energia fornecida pelos alimentos.

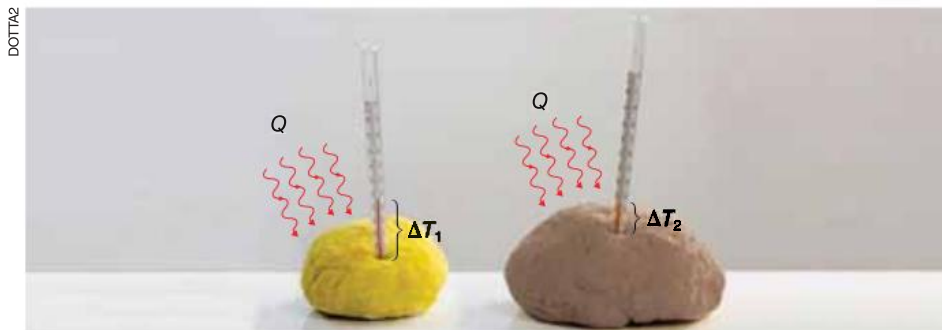


Figura 3 • Quantidades iguais de calor (Q) podem elevar de maneira diferente a temperatura de dois corpos ($\Delta T_1 \neq \Delta T_2$).

Capacidade térmica é a grandeza física utilizada para caracterizar a variação de temperatura dos corpos ao receber calor. Usando a letra C para designar a capacidade térmica de um corpo, definimos:

A capacidade térmica (C) de um corpo é o resultado da razão entre a quantidade de calor (Q) recebida pelo corpo e a variação de temperatura (ΔT) que ele sofre. Assim:

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

A capacidade térmica pode ser expressa em calorias por grau Celsius ($\text{cal}/^{\circ}\text{C}$). Se um corpo recebe, por exemplo, 500 cal e, em razão disso, sua temperatura é elevada em $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, sua capacidade térmica é:

$$C = \frac{500\text{ cal}}{10\text{ }^{\circ}\text{C}} = 50\text{ cal}/^{\circ}\text{C}$$

A capacidade térmica é uma característica do corpo, não do material que o constitui. Assim, dois corpos formados pelo mesmo material podem ter capacidades térmicas diferentes, caso suas massas não sejam iguais. Por exemplo, se aquecermos duas panelas com diferentes massas de água e quisermos que as duas massas elevem suas temperaturas em um mesmo valor, precisaremos fornecer maior quantidade de calor para a panela com mais água.

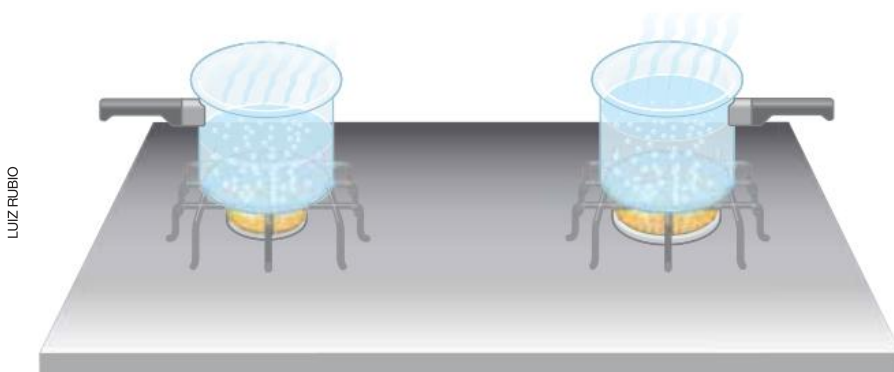


Figura 4 • A panela com maior massa de água precisa receber maior quantidade de calor, se quisermos obter a mesma variação de temperatura nas duas massas.

4 Calor específico

Nos dias de verão, muitas pessoas vão para a piscina para se refrescar. Ao mergulhar, a camada de ar que envolve nosso corpo é subitamente substituída por uma camada de água. Como a temperatura do ar é maior que a da água, sentimos um frescor repentino e prazeroso, pois diminuimos o fluxo de calor para o meio ambiente.

No entanto, a água da piscina parece fria pela manhã e aquecida à noite. Qual é a razão para isso?

Nas noites de verão, quando a temperatura do ar diminui um pouco em relação ao período diurno, a água da piscina nos parecerá aquecida (fig. 5).

S20

No Suplemento, sugerimos um site que apresenta uma demonstração experimental.

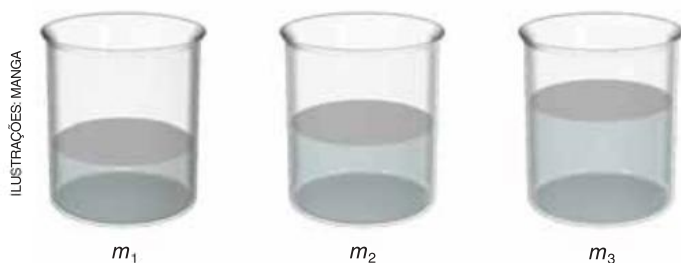


FOTOS: DOTTA2

A radiação solar fornece, a princípio, a mesma quantidade de calor para o ar e para a água da piscina. O ar, entretanto, se aquece mais rapidamente que a água durante o dia e esfria mais rapidamente à noite. Isso ocorre porque ar e água têm diferentes calores específicos.

Para um material determinado, a razão constante entre a capacidade térmica e a massa é denominada **calor específico** (fig. 6), representado por **c**. Assim:

$$c = \frac{C_1}{m_1} = \frac{C_2}{m_2} = \frac{C_3}{m_3} = \dots = \frac{C}{m}$$



$$\frac{C_1}{m_1} = \frac{C_2}{m_2} = \frac{C_3}{m_3}$$

Portanto:

Calor específico é uma característica de cada material, expresso geralmente em cal/(g · °C), e representa a quantidade de calor que deve ser fornecida ou retirada de cada 1 grama do material para que sua temperatura aumente ou diminua 1 °C, respectivamente.

O calor específico da água, igual a 1,0 cal/(g · °C), é maior que o calor específico da maioria das substâncias. Assim, quando se utilizam fontes de calor de igual potência para aquecer massas iguais de água e de outra substância em um mesmo intervalo de tempo, a água costuma ter uma elevação menor de temperatura. Por exemplo, o calor específico do óleo é 0,6 cal/(g · °C): isso significa que cada 1 g de

Figura 5 • A diferença entre as temperaturas do ar e da água é responsável pelas sensações de prazer que temos ao mergulhar em uma piscina durante um dia de sol (A) ou numa noite quente de verão (B).

Figura 6 • A relação entre a capacidade térmica e a massa de um mesmo material é constante.

Reprodução proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

óleo precisa de 0,6 cal para elevar 1 °C a temperatura. No caso da água, esse valor é 1 cal. Portanto, considerando massas iguais de óleo e água, percebemos que o óleo necessita de 60% do calor absorvido pela água para a mesma elevação de temperatura. Por causa da propriedade de possuir calor específico mais alto que o de outras substâncias, a água é utilizada para resfriar elementos aquecidos, já que necessita de mais calor para elevar consideravelmente sua temperatura.

A tabela 1, ao lado, apresenta o calor específico de algumas substâncias.

Observe que o calor específico da água no estado líquido e o do gelo são diferentes. De fato, o calor específico de uma substância varia conforme seu estado físico.

Além disso, o calor específico de uma substância depende da temperatura em que é feita sua medida experimental. Neste livro, vamos trabalhar com valores médios de calor específico das substâncias.

Outro importante aspecto relacionado ao calor específico pode ser observado comparando o ferro e o chumbo. O calor específico do ferro é aproximadamente 3,5 vezes maior que o calor correspondente ao chumbo, como podemos verificar pela operação:

$$0,11 : 0,031 \approx 3,548$$

Isso significa que, se fornecermos quantidades iguais de calor a duas massas iguais, uma de chumbo e outra de ferro, a elevação da temperatura do ferro será aproximadamente 3,5 vezes menor que a temperatura do chumbo.

Tabela 1 – Calor específico de algumas substâncias

Substância	c [cal/(g · °C)]
Água	1,0
Ferro	0,11
Cobre	0,093
Prata	0,056
Chumbo	0,031
Mercúrio	0,033
Gelo	0,55

Fonte: LIDE, D. R. (Ed.). *Handbook of Chemistry and Physics*. 84. ed. Boca Raton: CRC Press.

QUESTÕES RESOLVIDAS

R1 Dois pedaços de ferro, um de 1 kg e outro de 3 kg, receberão quantidades iguais de calor. Qual dos dois pedaços sofrerá a maior variação de temperatura? (Suponha que o estado físico do ferro não se altere.)

► Resolução

Os dois pedaços são de ferro, isto é, de um único material. Assim, o pedaço de maior massa tem maior capacidade térmica. Quanto maior for a capacidade térmica do corpo, menor será a variação de temperatura ao receber uma quantidade fixa de calor. Portanto, o corpo de 1 kg sofrerá maior variação de temperatura, uma vez que sua capacidade térmica é menor que a do outro pedaço.

R2 Dois corpos sólidos de mesma massa, sendo um formado por prata [$c_{\text{prata}} = 0,056 \text{ cal/(g · °C)}$] e o outro por chumbo [$c_{\text{chumbo}} = 0,031 \text{ cal/(g · °C)}$], inicialmente à mesma temperatura, recebem quantidades iguais de calor e não mudam de estado. Qual dos dois corpos tem, ao final, maior valor de temperatura?

► Resolução

Para saber qual dos corpos sofrerá maior elevação de temperatura, podemos comparar os valores de seu calor específico. Esses valores indicam que:

- é necessário 0,056 cal para que a temperatura de 1 g de prata varie 1 °C;
- é necessário 0,031 cal para que a temperatura de 1 g de chumbo varie 1 °C.

Portanto, para elevar a temperatura, cada 1 g de prata necessita de mais calorias que cada 1 g de chumbo. Isso significa que, para a mesma quantidade de calor, a temperatura do corpo formado por chumbo aumentará mais que a do corpo formado por prata.

R3 Uma massa de 200 g de cobre, inicialmente a 20 °C, foi aquecida e recebeu determinada quantidade de calor, tendo atingido a temperatura final de 35 °C. Quantas calorias recebeu a massa de cobre nesse processo? [Dado: calor específico do cobre = 0,093 cal/(g · °C)]

► Resolução

A massa de 200 g de cobre sofreu variação de 15 °C em sua temperatura. Por causa da proporcionalidade entre as grandezas envolvidas, podemos considerar que:

- é necessário 0,093 cal para elevar 1 °C a temperatura de 1 g de cobre;
- é necessário $100 \cdot 0,093 \text{ cal}$ para elevar 1 °C a temperatura de 100 g de cobre;
- é necessário $200 \cdot 0,093 \text{ cal}$ para elevar 1 °C a temperatura de 200 g de cobre;
- é necessário $15 \cdot 200 \cdot 0,093 \text{ cal}$ para elevar 15 °C a temperatura de 200 g de cobre.

Logo, a massa de cobre recebeu $15 \cdot 200 \cdot 0,093$ calorias, ou seja, 279 cal.

- 1 Duas panelas com água, uma com 0,8 L e a outra com 0,6 L, são colocadas sobre dois bicos acesos de um fogão. Supondo iguais as potências térmicas dos dois bicos, qual dos dois volumes de água sofrerá a maior variação de temperatura ao final de um mesmo intervalo de fornecimento de calor? Por quê? Considere que nenhum dos dois volumes de água mudou de estado.
- 2 O calor específico do alumínio é cerca de 7 vezes maior que o calor específico do ouro. Dois corpos de massas iguais, um de ouro e outro de alumínio, ambos à mesma temperatura, receberão quantidades determinadas de energia. Para que a temperatura final dos dois corpos seja a mesma e diferente da inicial, qual dos dois deve receber maior quantidade de calorias? Quanto a mais?
- 3 O cobre utilizado na fabricação de panelas tem calor específico bem menor que o da água. O vidro, também usado na fabricação de panelas, tem calor específico menor que o da água e maior que o do cobre. Explique como o material da panela, seja de vidro, seja de cobre, interfere no aquecimento de uma quantidade determinada de água.
- 4 Duas massas iguais, uma de água e outra de chumbo, recebem iguais quantidades de calor. Qual das duas massas sofrerá maior elevação de temperatura? Por quê?
- 5 O calor específico de determinada substância é igual a $0,8 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$. Quantas calorias devem ser fornecidas para que:
 - a) 1 g dessa substância tenha sua temperatura elevada 4°C ?
 - b) 5 g dessa substância tenham sua temperatura elevada 1°C ?
 - c) 5 g dessa substância tenham sua temperatura elevada 4°C ?
 - d) 10 g dessa substância tenham sua temperatura elevada 12°C ?
- 6 O mercúrio, metal líquido utilizado na fabricação de termômetros, tem calor específico 18 vezes menor que o do álcool, também utilizado na fabricação de um tipo de termômetro. Quando certa massa de mercúrio absorve 1.800 cal, sua temperatura se eleva 10°C . Se uma massa de álcool, igual à de mercúrio, absorve 200 cal, a elevação de sua temperatura será maior, menor que a da massa de mercúrio ou igual a ela? Por quê?
- 7 Um corpo formado por determinado material recebeu 2.000 cal e teve sua temperatura elevada 50°C . Qual é o valor da capacidade térmica desse corpo?
- 8 Uma massa de 500 g de determinado material foi aquecida, recebendo 4.000 cal e variando sua temperatura em 25°C . Qual é o valor:
 - a) da capacidade térmica desse corpo?
 - b) do calor específico do material que forma esse corpo?
- 9 Um pedaço de chumbo, inicialmente à temperatura de 25°C , foi colocado no forno durante 3 minutos e teve sua temperatura elevada a 90°C . Nesse processo, o pedaço de chumbo absorveu 1.300 cal.
 - a) Qual é a capacidade térmica desse pedaço de chumbo?
 - b) É possível que outro pedaço de chumbo, com valor de massa diferente e à mesma temperatura inicial do primeiro, quando colocado no mesmo forno durante 3 minutos, atinja também a temperatura final de 90°C ? Por quê?
- 10 A capacidade térmica de um bloco de certo material, com 2 kg de massa, é igual a $80 \text{ cal}/^\circ\text{C}$. A capacidade térmica de um bloco desse mesmo material, com 5 kg de massa, é maior, menor ou igual a $80 \text{ cal}/^\circ\text{C}$? Por quê?

5 Equação fundamental da Calorimetria

Já vimos que as variações de temperatura de corpos de mesma massa constituídos de materiais distintos são diferentes, ainda que recebam a mesma quantidade de calor.

Vimos também que a propriedade do material que quantifica a maneira como ele absorve ou cede calor é o **calor específico**, e não existem duas substâncias com valores iguais de calor específico.

Portanto, dois corpos formados por uma mesma substância e que têm a mesma massa sofrem variações de temperatura (ΔT) proporcionais às quantidades de calor (Q) absorvidas por eles. Assim, podemos concluir que, para um valor fixo de massa do corpo, o **calor absorvido** (Q) e a **variação de temperatura** (ΔT) são grandezas **diretamente proporcionais**.

$$Q \propto \Delta T$$

Mantendo fixa a quantidade de calor absorvido, o que ocorrerá com a variação de temperatura se dobrarmos a massa do corpo?

A variação de temperatura será dividida na metade.

Em um experimento, fixada a quantidade de calor absorvido, percebemos que a **variação de temperatura** (ΔT) e a **massa da substância** (m) são grandezas inversamente proporcionais.

$$\Delta T \propto \frac{1}{m}$$

No entanto, desejando manter fixa a variação de temperatura, se dobrarmos a massa, a quantidade de calor também deverá dobrar, para que a variação de temperatura se mantenha. Isto é, para uma mesma variação de temperatura, a **quantidade de calor** (Q) e a **massa da substância** (m) são grandezas diretamente proporcionais.

$$Q \propto m$$

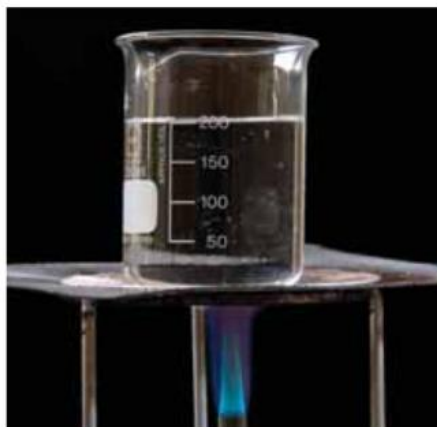


Figura 8 • Duas massas distintas de mesmo material que tenham recebido a mesma quantidade de calor têm suas temperaturas elevadas de modo distinto. A maior massa sofrerá menor variação de temperatura. Massa e variação de temperatura são, neste caso, grandezas inversamente proporcionais.

As relações de proporcionalidade comprovadas anteriormente permitem estabelecer a **equação fundamental da Calorimetria**.

A quantidade de calor (Q) que um corpo de massa (m) e calor específico (c) absorve ou libera, variando sua temperatura em um certo valor (ΔT), pode ser calculada pelo produto entre m , c e ΔT . Isto é:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$



Figura 7 • Duas massas iguais de corpos compostos de materiais distintos recebem igual quantidade de calor de uma fonte de potência constante. Observa-se que a variação de temperatura, nessas condições, será diferente para cada um deles.

S21

No Suplemento, discutimos brevemente o uso da proporcionalidade no estabelecimento dessa equação.

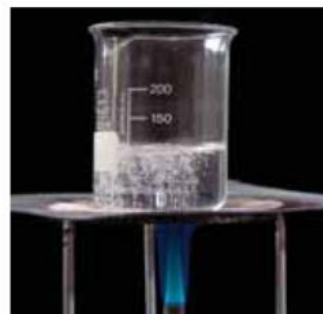


Figura 9 • Dobrando o valor da massa da substância e desejando manter a mesma variação de temperatura, será necessário dobrar também a quantidade de calor absorvida pelo corpo.

Calor e energia mecânica

Desde os experimentos de James P. Joule, no século XIX, sabe-se que o calor é uma forma de energia em trânsito. Em um desses experimentos, Joule conectou um peso, por meio de um fio vertical enrolado em um carretel, a pás que giravam imersas em uma cuba com água, conforme a figura ao lado, verificando que a água se aquecia, e associou a energia potencial gravitacional do peso em queda à elevação de temperatura da água agitada pelas pás.

Para entender melhor o objetivo de Joule com esse experimento, vamos relembrar algumas expressões:

1. A expressão que permite calcular a energia potencial gravitacional (E_{pg}) de um corpo de massa m a uma altura h em relação a um plano horizontal de referência é:

$$E_{pg} = m \cdot g \cdot h$$

2. A quantidade de calor (Q) recebida ou liberada por um corpo de massa (m) e calor específico (c), quando sua temperatura varia em certo valor (ΔT), é obtida por:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

3. A energia cinética (E_c) de um corpo de massa m , que se move a velocidade v , é calculada por:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

4. Quando um corpo desce em queda livre, sua energia mecânica (E_M) a cada instante da queda é a soma dos valores de sua energia potencial gravitacional (E_{pg}) e de sua energia cinética:

$$E_M = E_{pg} + E_c$$

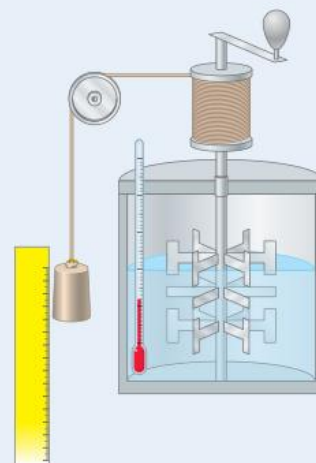
Em seu experimento, Joule fez o corpo amarrado ao fio descer com velocidade constante, de maneira que sua energia cinética também era constante durante toda a queda. Se a energia cinética (E_c) não variar e a energia potencial gravitacional (E_{pg}) for nula no final da queda, poderemos associar a energia potencial gravitacional ao aquecimento da água. Relacionando a energia potencial inicial com a quantidade de calor necessária para o aquecimento da água, Joule pôde determinar o valor do **equivalente mecânico do calor**, isto é, quanto de energia mecânica se converteu em variação de energia interna, obtendo o seguinte fator:

$$1 \text{ cal} \approx 4,18 \text{ J}$$

Dessa forma, desconsiderando perdas de calor para o meio ambiente, a energia mecânica de um corpo pode se converter em aumento de energia interna, ou vice-versa, de acordo com esse fator determinado por Joule.

AMPLIANDO SUA LEITURA

1. Em seu experimento, por que Joule fez o corpo amarrado ao fio cair com velocidade constante, em vez de deixá-lo cair livremente com a aceleração da gravidade?
2. As unidades caloria (cal) e joule (J) expressam medidas da grandeza física energia. Podemos utilizar qualquer uma delas para medir, por exemplo, o calor absorvido por um corpo colocado no forno aceso de um fogão doméstico?



Reprodução do mecanismo montado por Joule para determinar a conversão de calor em energia mecânica.

S22

No **Suplemento**, há uma sugestão de questão para retomar/induzir a relação entre calor e energia mecânica.

QUESTÕES RESOLVIDAS

- R4** Uma massa de 400 g de gelo é retirada de um freezer cuja temperatura interna é $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Que quantidade de calor o gelo precisará absorver para que sua temperatura atinja $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (sem mudar de estado)?

[Dado: $c_{\text{gelo}} = 0,55\text{ cal}/(\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C})$]

► Resolução

Temos:

$$m = 400\text{ g}; c = 0,55\text{ cal}/(\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C});$$

$$\Delta T = [0 - (-16)]\text{ }^{\circ}\text{C} = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Então:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T = 400 \cdot 0,55 \cdot 16$$

$$\therefore Q = 3.520\text{ cal} = 3,52 \cdot 10^3\text{ cal} = 3,52\text{ kcal}$$

Portanto, a massa de gelo precisará absorver 3,52 kcal para que sua temperatura suba de $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (sem mudar de estado).

- R5** Uma panela com 0,5 L de água à temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ é levada ao fogo, e a água entra em ebulição 4 minutos depois. Desprezando as perdas de calor para o ambiente e considerando a temperatura de ebulição da água igual a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, calcule a potência da chama do fogão, em cal/s, supondo que a quantidade de calor fornecida seja constante com o tempo.

[Dados: $c_{\text{água}} = 1,0\text{ cal}/(\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C})$; densidade da água = 1 kg/L]

► Resolução

Temos:

$$m = 0,5\text{ L} \cdot 1\text{ kg/L} = 0,5\text{ kg} = 500\text{ g};$$

$$c_{\text{água}} = 1,0\text{ cal}/(\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C}); \Delta T = 100\text{ }^{\circ}\text{C} - 25\text{ }^{\circ}\text{C} = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Então:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T = 500 \cdot 1 \cdot 75 \therefore Q = 37.500\text{ cal}$$

A potência é a medida da energia fornecida por unidade de tempo. Nesse caso, temos:

$$P = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{37.500\text{ cal}}{4\text{ min}} = \frac{37.500\text{ cal}}{240\text{ s}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P = 156,25\text{ cal/s}$$

Portanto, desprezando a perda de calor para o ambiente, a chama fornece para a água 156,25 calorias por segundo.

- R6** Uma amostra de 2 kg de certo material está à temperatura ambiente de $22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para determinar o valor do calor específico desse material, um estudante aquece a amostra durante 10 minutos em um bico de Bunsen de potência conhecida e igual a 100 cal/s . Ao final, o estudante detecta que a temperatura da amostra é $82\text{ }^{\circ}\text{C}$. Qual foi o

valor calculado por ele para o calor específico da substância constituinte da amostra?

► Resolução

Temos:

$$m = 2\text{ kg} = 2.000\text{ g}; \Delta T = 82\text{ }^{\circ}\text{C} - 22\text{ }^{\circ}\text{C} = 60\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$P = 100\text{ cal/s}$$

Inicialmente, vamos calcular a quantidade de calor absorvida pela amostra, conhecendo a potência e o tempo de aquecimento. Para tanto, lembrando que 10 minutos equivalem a 600 segundos, podemos escrever uma proporção:

$$P = \frac{Q}{\Delta t} \Rightarrow 100 = \frac{Q}{600} \Rightarrow Q = 100 \cdot 600$$

$$\therefore Q = 60.000\text{ cal}$$

Pela equação fundamental da Calorimetria, podemos obter o valor do calor específico.

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow 60.000 = 2.000 \cdot c \cdot 60$$

$$\therefore c = 0,5\text{ cal}/(\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C})$$

Portanto, a substância que constitui a amostra tem calor específico igual a $0,5\text{ cal}/(\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C})$.

- R7** Qual é o valor da energia mecânica correspondente à quantidade de calor necessária para elevar $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a temperatura de 1 litro de álcool?

[Dados: $1\text{ cal} = 4,2\text{ J}$; $c_{\text{álcool}} = 0,6\text{ cal}/(\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C})$; densidade do álcool = $0,8\text{ kg/L}$]

► Resolução

Do enunciado, temos:

$$\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}; \text{volume de álcool} = 1\text{ L}; \text{massa de álcool em 1 litro} = 0,8\text{ kg} = 800\text{ g}$$

Para aumentar sua temperatura em $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 litro de álcool deverá absorver a seguinte quantidade de calor:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$$Q = 800 \cdot 0,6 \cdot 5 \therefore Q = 2.400\text{ cal}$$

Lembrando que $1\text{ cal} = 4,2\text{ J}$, podemos obter a energia mecânica equivalente a essa quantidade de calorias fazendo:

$$E_M = 2.400 \cdot 4,2 \therefore E_M = 10.080\text{ J}$$

- R8** A potência de um aquecedor elétrico é igual a 2.000 watts. Isso significa que o aparelho realiza um trabalho de 2.000 joules em 1 segundo. Se o trabalho realizado por esse aquecedor for integralmente utilizado para elevar $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ a temperatura de 8 litros de água contidos em um balde, por quanto tempo ele deverá funcionar? Despreze as perdas de calor para o ambiente. [Dados: $c_{\text{água}} = 1\text{ cal}/(\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C})$; densidade da água = $1\text{ g/cm}^3 = 1\text{ kg/L}$; $1\text{ cal} = 4\text{ J}$]

► Resolução

Do enunciado, temos:

$$\Delta T = 12\text{ }^{\circ}\text{C}; V = 8\text{ L}; m = 8\text{ kg} = 8.000\text{ g}$$

Vamos calcular a quantidade de calorias necessárias para a tarefa descrita:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$$Q = 8.000 \cdot 1 \cdot 12 \therefore Q = 96.000\text{ cal}$$

O equivalente mecânico para essa tarefa, adotando $1\text{ cal} \approx 4\text{ J}$, é:

$$Q = 96.000 \cdot 4 = 384.000\text{ J}$$

Como o aquecedor realiza um trabalho de 2.000 J por segundo, realizará trabalho igual a 384.000 J em:

$$\frac{384.000\text{ J}}{2.000\text{ J/s}} = 192\text{ s ou } 3\text{ min } 12\text{ s}$$

- R9** Vários tijolos iguais, de massa 4 kg cada um, são soltos de uma altura de 80 m e atingem, no final da queda, uma poça com 200 L de água que, por causa do choque, tem sua temperatura elevada em $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Supondo que nesse processo toda a energia mecânica foi convertida em calor e que esse calor foi integralmente absorvido pela água da poça, calcule a quantidade de tijolos que atingiram a água. [Dados: $c_{\text{água}} = 1\text{ cal}/(\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C})$; $g = 10\text{ m/s}^2$; densidade da água $= 1\text{ kg/L}$; $1\text{ cal} \approx 4\text{ J}$]

► Resolução

Do enunciado, temos:

$$\Delta T = 2\text{ }^{\circ}\text{C}; m = 200\text{ kg} = 200.000\text{ g}$$

O calor necessário para a elevação da temperatura descrita é:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$$Q = 200.000 \cdot 1 \cdot 2 = 400.000 \therefore Q = 4 \cdot 10^5\text{ cal}$$

A energia mecânica equivalente a essa quantidade de calorias, adotando $1\text{ cal} \approx 4\text{ J}$, é:

$$E_M = 4 \cdot 10^5 \cdot 4 = 16 \cdot 10^5 \therefore E_M = 1,6 \cdot 10^6\text{ J}$$

Cada tijolo de 4 kg solto a 80 m de altura tem a seguinte energia potencial gravitacional:

$$E_{pg} = m \cdot g \cdot h = 4 \cdot 10 \cdot 80 \therefore E_{pg} = 3.200\text{ J}$$

Ao final da queda, toda a energia potencial gravitacional dos tijolos terá se convertido em energia cinética. Assim, cada tijolo fornecerá 3.200 J de energia à água no final da queda. Para descobrir a quantidade de tijolos necessária, fazemos:

$$\text{Quantidade de tijolos} = \frac{1,6 \cdot 10^6}{3.200} = \frac{1.600.000}{3.200} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \text{Quantidade de tijolos} = 500$$

Portanto, serão necessários 500 tijolos.

- R10** Um chuveiro elétrico tem potência de 6.000 W e vazão de 100 mL de água por segundo. Se a temperatura de entrada da água no chuveiro é igual a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, qual é a temperatura de saída? Despreze as perdas de calor, adote o calor específico da água igual a $4\text{ J}/(\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C})$ e a densidade da água igual a 1 g/cm^3 .

► Resolução

O enunciado fornece o calor específico da água em $\text{J}/(\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C})$, e não em $\text{cal}/(\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C})$, de maneira que já temos também o fator de conversão da energia mecânica para calor, nesse caso, igual a 4 .

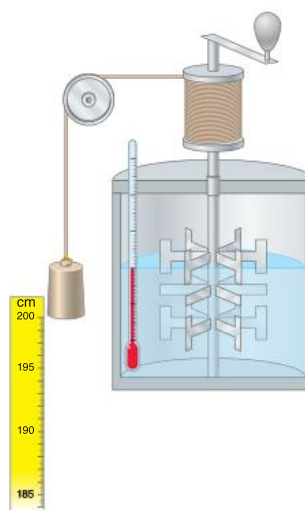
A potência do chuveiro, de 6.000 W , indica que o aparelho realiza trabalho de 6.000 J por segundo. Como passam pelo chuveiro 100 g de água por segundo, podemos calcular a quantidade de calor fornecida a essa massa de água.

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow 6.000 = 100 \cdot 4 \cdot \Delta T$$

$$\therefore \Delta T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Assim, se a água entra no chuveiro a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, sai a $35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- R11** Num experimento hipotético, semelhante ao realizado por Joule, um corpo de 10 kg é colocado a uma altura de $2,0\text{ m}$. Para que a quantidade de energia transformada, proveniente da queda do corpo, seja maior, o movimento deve ser repetido mais de uma vez. Vamos supor que o corpo tenha sido abandonado 40 vezes e que, em cada uma das quedas, sua energia potencial gravitacional tenha sido inteiramente convertida em energia de movimento das pás, provocando um aumento significativo da temperatura da água.



Admitindo que haja 200 g de água inicialmente a $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ no recipiente e que toda a energia envolvida no processo foi transformada em calor e absorvida pela água, qual será a temperatura final dessa massa de água?

► Resolução

Considerando $g = 10 \text{ m/s}^2$, a energia potencial gravitacional em cada queda será:

$$E_{\text{pg}} = m \cdot g \cdot h \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{\text{pg}} = 10 \cdot 10 \cdot 2 \therefore E_{\text{pg}} = 200 \text{ J}$$

Portanto, em 40 quedas, a energia total é igual a:

$$E_{\text{pg}} = 200 \cdot 40 \therefore E_{\text{pg}} = 8.000 \text{ J}$$

Para facilitar os cálculos, faremos uma aproximação: $1 \text{ cal} \approx 4 \text{ J}$. Então, a energia mecânica total de 8.000 J , se convertida em calor, equivaleria a:

$$\begin{array}{lcl} 1 \text{ cal} & \text{---} & 4 \text{ J} \\ x \text{ cal} & \text{---} & 8.000 \text{ J} \end{array} \Rightarrow x = 2.000 \text{ cal}$$

Lembrando que o calor específico da água é igual a $1,0 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$, a elevação da temperatura da água (ΔT) pode ser assim calculada:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 2.000 = 200 \cdot 1 \cdot \Delta T \therefore \Delta T = 10 ^\circ\text{C}$$

Como a água estava inicialmente a $12 ^\circ\text{C}$, sua temperatura se elevará $10 ^\circ\text{C}$, atingindo, portanto, $22 ^\circ\text{C}$.

QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

- 11** Em um experimento, verifica-se que é necessário fornecer 2.000 cal a uma massa de 250 g de determinado material para que sua temperatura varie de $20 ^\circ\text{C}$ para $60 ^\circ\text{C}$. Qual é o valor do calor específico do material?
- 12** O calor específico do zinco é aproximadamente igual a $0,1 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$. Determine:
- a quantidade de calor absorvida por uma massa de 1 g de zinco cuja temperatura se eleva em $2 ^\circ\text{C}$;
 - a quantidade de calor absorvida por uma massa de 100 g de zinco cuja temperatura se eleva em $1 ^\circ\text{C}$;
 - a quantidade de calor cedida ao meio ambiente por uma massa de 1.000 g de zinco se sua temperatura diminuir $4 ^\circ\text{C}$;
 - a quantidade de calor cedida ao meio ambiente por uma massa de 20 g de zinco se sua temperatura diminuir $10 ^\circ\text{C}$.
- 13** Quando um corpo de certa massa m , formado por determinado material, absorve 200 cal , sua temperatura é elevada em $2 ^\circ\text{C}$. Outro corpo, formado pelo mesmo material, tem massa $2m$. Se esse outro corpo absorver 400 cal , quanto sua temperatura se elevará?
- 14** O calor específico de determinado tipo de madeira é igual a $0,4 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$. Quantas calorias devem ser absorvidas por um pedaço de 100 g dessa madeira para que sua temperatura se eleve $3 ^\circ\text{C}$?
- 15** O valor do calor específico do ferro é aproximadamente igual à metade do valor do calor específico do alumínio, que, por sua vez, é igual a aproximadamente $\frac{1}{5}$ do valor do calor específico da água. Com base nisso, quais das seguintes afirmativas são verdadeiras?
- Se duas massas iguais, sendo uma de ferro e outra de alumínio, com temperaturas iniciais também iguais, forem aquecidas em uma mesma fonte de calor, durante intervalos iguais de tempo, a temperatura final da massa de ferro será maior que a temperatura final da massa de alumínio.
 - Um quilograma de água e um quilograma de alumínio, inicialmente à mesma temperatura, submetidos a uma mesma fonte de calor, por iguais períodos de tempo, podem apresentar, ao final do aquecimento, mesma temperatura.
 - Certa massa de ferro e certa massa de água, inicialmente à mesma temperatura, podem ser aquecidas em uma mesma fonte de calor, por intervalos de tempos iguais e, ao final, apresentarem temperaturas iguais.
 - Se duas massas iguais, uma de água e outra de ferro, apresentarem, inicialmente, temperaturas iguais, e se quisermos aquecê-las em uma única fonte de calor para que, ao final, atinjam temperaturas iguais, será preciso que o tempo de aquecimento da água seja cerca de 10 vezes maior que o tempo de aquecimento do ferro.
- 16** Que quantidade de calor é preciso fornecer a uma massa de 400 g de cobre para sua temperatura se elevar de $20 ^\circ\text{C}$ para $80 ^\circ\text{C}$?
[Dado: $c_{\text{cobre}} = 0,09 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$]
- 17** A água escorre de uma torneira elétrica à temperatura de $42 ^\circ\text{C}$. Coletando em uma bacia 4 litros da água que escorre dessa torneira, observa-se que, após determinado tempo de exposição, a água atinge a temperatura ambiente de $25 ^\circ\text{C}$. Nesse processo, qual foi a quantidade de calor cedida pela água ao meio ambiente? [Dados: $d_{\text{água}} = 1 \text{ g/cm}^3$; $c_{\text{água}} = 1 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$; despreze a quantidade de calor perdida para o ambiente enquanto se enche a bacia]

18 Um corpo de massa 0,5 kg é abandonado de uma altura de 10 m e, no final da queda, atinge uma vasilha com 5 litros de água. Supondo que toda a energia com que o corpo atinge a água seja convertida em calor, qual será, em °C, a elevação da temperatura da água?
[Dados: $g = 10 \text{ m/s}^2$; calor específico da água = $1 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; densidade da água = 1 kg/L ; $1 \text{ cal} \approx 4 \text{ J}$]

19 Um aquecedor funciona com um resistor elétrico que, quando imerso na água, fornece ao líquido uma potência de 1.500 W. Se esse aparelho for utilizado para aquecer 10 litros de água de 20 °C para 32 °C, quanto tempo precisará funcionar? [Despreze perdas de calor; dados: calor específico da água = $1 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; densidade da água = 1 kg/L ; $1 \text{ cal} \approx 4 \text{ J}$]

20 Uma fonte térmica de potência constante aquece um bloco de ferro de massa 400 g, elevando sua temperatura de 20 °C para 60 °C em 5 min. Conhecendo o calor específico do ferro, $0,1 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$, determine a potência dessa fonte térmica, em cal/s.

21 Um estudante de Física recebe de seu professor a tarefa de determinar, em laboratório, o valor do calor específico de certa substância, desconhecendo a potência térmica do bico de Bunsen. Para essa finalidade, ele decidiu utilizar a água como substância-padrão e tomou dois recipientes, colocando 250 g da substância desconhecida em um deles e 210 g de água no outro. Usando o bico de Bunsen de forma alternada, o estudante verificou que a substância do primeiro recipiente sofreu uma elevação de temperatura de 10 °C em 21 s, enquanto a água sofreu uma elevação de temperatura de 8 °C em 24 s.

Qual é a potência do bico de Bunsen e qual é o valor do calor específico que o estudante determinou? Esse valor corresponde, aproximadamente, ao calor específico de qual substância da tabela a seguir? Justifique suas respostas.

Substância	Calor específico em $\text{cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$	Substância	Calor específico em $\text{cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$
Alumínio	0,220	Gelo	0,550
Água	1,000	Mercúrio	0,033
Álcool	0,590	Ouro	0,031
Bronze (liga metálica)	0,090	Platina	0,032
Cobre	0,093	Prata	0,056
Chumbo	0,031	Vapor de água	0,480
Estanho	0,055	Vidro	0,118
Ferro	0,119	Zinco	0,093

Fonte: WILSON, Jerry D. et al. *College Physics*. New Jersey: Pearson, 2008.

22 O principal componente da matriz energética brasileira, como se sabe, são as usinas hidrelétricas. Aproximadamente 75% da eletricidade gerada no país é obtida pelo aproveitamento das quedas-d'água para a movimentação das turbinas. Entre as demais fontes de energia elétrica, embora ainda com pequena participação percentual, está a queima do bagaço de cana nas usinas termelétricas.

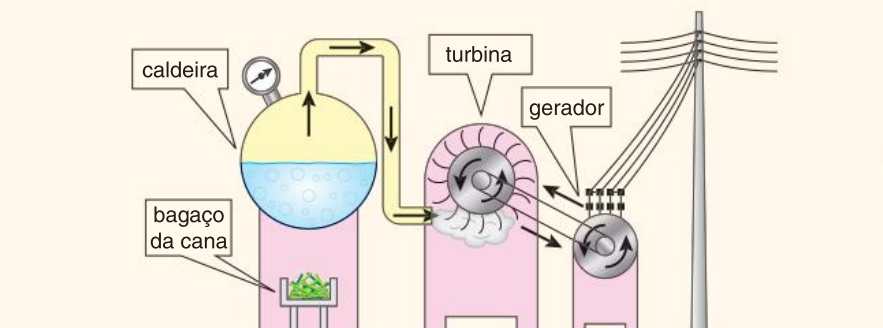


IMAGENTX/ALAMY/GLOW IMAGES



DOTTA2

Em algumas dessas usinas, a queima do bagaço de cana é utilizada para aquecer a água contida em uma caldeira. O vapor de água obtido no processo é lançado nas turbinas sob forte pressão. Às turbinas são acoplados eletroímãs, que, ao girarem dentro de intensos campos eletromagnéticos, geram a corrente elétrica que vai abastecer locais próximos às usinas.



NELSON MATSUDA

Segundo cálculos otimistas, o bagaço de cana tem poder calorífico de cerca de 2.000 kcal/kg quando queimado. Isso significa que algumas pequenas usinas de álcool conseguem ser autossuficientes na produção de energia elétrica.

Determine a massa de bagaço de cana que deverá ser queimada para que 200 litros de água, inicialmente a 10 °C, sejam aquecidos na caldeira até se transformarem em vapor. [Dados: densidade da água = 1,0 kg/L; calor específico da água = 1,0 cal/(g · °C)]

6 Fases da matéria

Em muitas situações cotidianas, observamos fenômenos térmicos em que ocorrem mudanças de estado físico; por exemplo, quando um corpo sólido se transforma em líquido, como o gelo que derrete ao ser colocado em um copo contendo líquido à temperatura ambiente em um dia de verão.

Em geral, as substâncias estão submetidas às condições do ambiente, que apresenta determinados valores de pressão e temperatura. A pressão do ar que nos envolve raramente excede o valor de 1 atm, enquanto as temperaturas oscilam bastante, dependendo da região do Brasil, embora, de modo geral, fiquem em torno do intervalo de 4 °C a 40 °C.

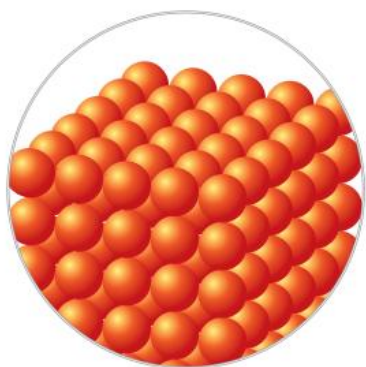
A fase de uma substância nas condições de temperatura e pressão do ambiente pode não ser a mesma em outras condições de temperatura e pressão. A água, por exemplo, pode se tornar sólida a temperaturas negativas, enquanto o alumínio pode se tornar líquido se aquecido além de determinado valor de temperatura.

Dependendo das condições de temperatura e pressão, todas as substâncias podem ser observadas em qualquer um dos três estados mencionados – sólido, líquido ou gasoso. As diferenças entre os três estados devem-se às características moleculares das substâncias.

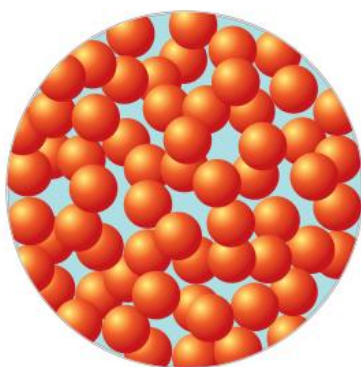
No estado sólido, os constituintes das substâncias, sejam átomos (no caso de substâncias simples), sejam moléculas (no caso de substâncias compostas), estão muito próximos uns dos outros, e forças elétricas de grande intensidade atuam entre eles, diferentemente do que ocorre nos estados líquido ou gasoso (fig. 10). Além disso, no estado sólido, os átomos da maior parte das substâncias estão distribuídos de maneira regular, em uma **estrutura cristalina**, na qual determinado padrão geométrico se repete, o que não ocorre com substâncias nos demais estados.

VOCÊ SE LEMBRA?

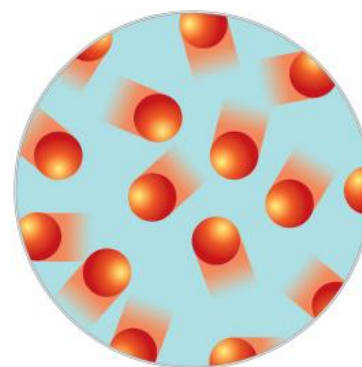
A pressão atmosférica ao nível do mar é igual a 1 atm. À medida que nos afastamos do nível do mar, atingindo maiores altitudes, a pressão atmosférica diminui por causa da rarefação do ar. Na cidade de São Paulo, por exemplo, que está a cerca de 760 m de altitude, a pressão atmosférica é, em média, igual a 0,9 atm.



Sólido



Líquido



Gasoso

ILUSTRAÇÕES: LUIZ RUBIO

Figura 10 • Representação esquemática da disposição dos átomos das substâncias nos três estados físicos da matéria.

Os átomos ou moléculas que constituem os líquidos, por apresentarem forças de ligação mais fracas que as das substâncias sólidas, e também por estarem mais separados uns dos outros, vibram mais livremente. Esse fato determina, por exemplo, que os líquidos podem modificar sua forma, escoando e se adaptando ao recipiente que os contém.

Nos gases, as forças de ligação entre os átomos são quase nulas, e seus constituintes ficam separados por distâncias muito maiores que nos sólidos ou nos líquidos. Isso explica por que os gases se expandem e ocupam todo o volume do recipiente onde são colocados, e também por que podemos comprimi-los com facilidade.

7 Mudanças de fase e calor latente

Quando um corpo absorve calor, em geral, sua temperatura se eleva. Mas se ele cede calor a outro corpo ou ao ambiente, é de esperar que sua temperatura diminua. Calor é energia em trânsito. A troca de calor somente se estabelece quando há diferença de temperatura entre os corpos envolvidos, ou seja, desde que as partículas de um corpo estejam em um grau de agitação diferente do grau de agitação das partículas do outro corpo. Dependendo da quantidade de calor absorvido ou cedido, o grau de agitação das moléculas do corpo pode se alterar a ponto de se formar um novo arranjo molecular, diferente do anterior. Nessa condição, a substância que compõe o corpo **muda de estado físico**, apesar de manter sua constituição química.

Um pedaço de cobre, por exemplo, que à temperatura ambiente e à pressão de 1 atm está no estado sólido, se for aquecido até 1.083 °C, se fundirá e passará ao estado líquido. O metal mercúrio, que, ao contrário do cobre, é encontrado no estado líquido em condições normais de temperatura e pressão, passa ao estado gasoso quando sua temperatura se eleva a 357 °C.

S23

No *Suplemento*, indicamos um vídeo com demonstração experimental para introduzir o estudo das mudanças de fase.



Figura 11 • A constituição química do gelo é a mesma da água no estado líquido e no estado de vapor, isto é, cada molécula é formada por dois átomos de hidrogênio e um de oxigênio (H_2O). O arranjo molecular é que difere de um caso para outro, caracterizando a diferença entre as propriedades físicas.

BOCHKAREV PHOTOGRAPHY/SHUTTERSTOCK

Reprodução proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

As mudanças de estado físico, ou mudanças de fase, de uma substância qualquer recebem nomes especiais, dependendo dos estados original e final, como podemos observar no diagrama da figura 12.

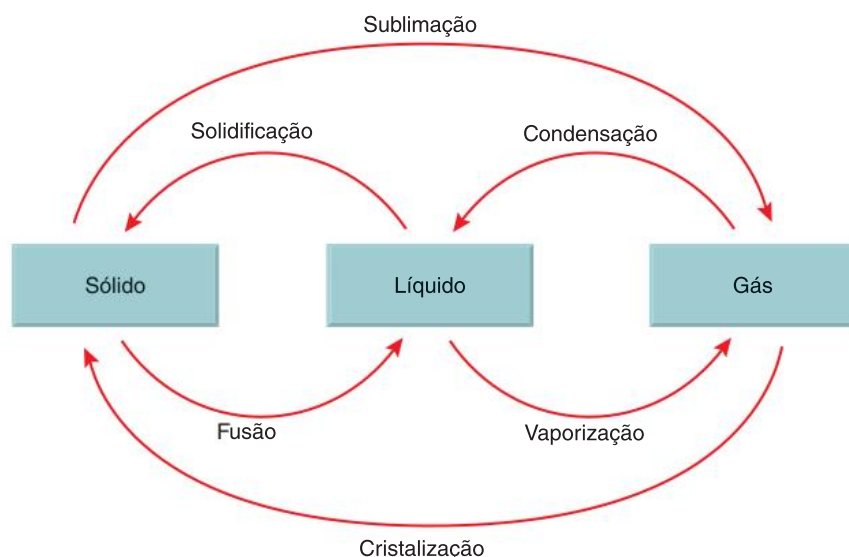


Figura 12 • O esquema mostra as mudanças de estado e seu caráter reversível.

Uma das maneiras de visualizar as características das mudanças de fase consiste em variar, experimentalmente, a temperatura de determinada massa de uma substância a partir dos valores em que ela é observada no estado sólido até aqueles em que é observada no estado gasoso.

Por meio desse procedimento, é possível analisar a evolução da temperatura do corpo com o tempo, detectando os **pontos fixos**, isto é, os valores de temperatura em que a substância pura muda de fase. O gráfico que representa os dados obtidos em um experimento desse tipo é chamado de **curva de aquecimento**.

Curvas de aquecimento de quase todas as substâncias puras apresentam “degraus”, isto é, intervalos durante os quais a temperatura permanece constante, apesar de a substância continuar a absorver calor, como pode ser visto na representação gráfica da curva de aquecimento de uma amostra de chumbo (fig. 13).

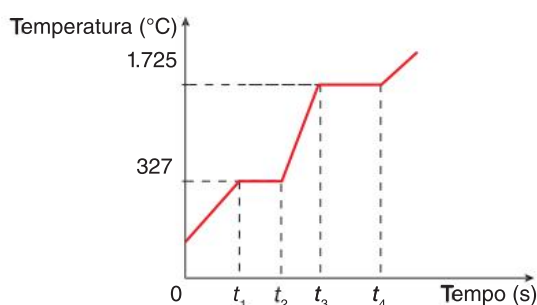


Figura 13 • Ao fornecer calor a uma amostra de chumbo, inicialmente sólida, verificamos que sua temperatura se mantém constante durante as transições de fase.

O primeiro degrau representado no gráfico mostra que, ao atingir a temperatura de 327 °C, o chumbo começa a fundir, passando do estado sólido para o estado líquido. Além disso, esse degrau mostra que a temperatura de 327 °C permanece constante durante certo tempo. Isso ocorre porque o calor fornecido para a amostra nesse estágio está sendo absorvido pelo chumbo para fundir toda a sua massa. Apenas quando toda a massa de chumbo tiver mudado de estado é que sua temperatura volta a subir, desde que, é claro, ele continue a ser aquecido.

O segundo degrau, de modo semelhante ao primeiro, representa a passagem do chumbo do estado líquido para o estado gasoso, que começa a ocorrer quando a temperatura atinge 1.725 °C. Continuando o fornecimento de calor, a temperatura da amostra só voltará a subir quando toda a massa líquida de chumbo houver mudado de estado.

VOCÊ SE LEMBRA?

A evaporação é a passagem lenta de um líquido para vapor, ou seja, uma vaporização lenta. Ela ocorre a diversas temperaturas, sempre retirando calor do ambiente. Alguns fatores, como a área da superfície do líquido ou a umidade do ar, podem influir na velocidade da evaporação. No ciclo da água, grande quantidade de água dos rios, dos mares e da transpiração das plantas evapora, isto é, passa para o estado de vapor ao ser aquecida pelo Sol e devido à ação dos ventos, formando as nuvens. A chuva, ao cair, traz a água de volta ao solo. Dando continuidade ao ciclo, a água pode passar por árvores, descer cachoeiras, correr rios e retornar para o mar. O ciclo da água está completo.

Discuta com seus alunos a razão da existência de patamares nas curvas de aquecimento das substâncias puras.

Experimentos dessa natureza, realizados com amostras de diferentes substâncias, permitem estabelecer três leis importantes sobre mudanças de fase de uma substância qualquer.

1ª lei – As mudanças de estado de uma substância pura ocorrem a temperaturas bem determinadas, de maneira que a cada substância pura corresponde uma temperatura específica. Dessa forma, assim como o calor específico, a temperatura de mudança de fase é uma característica da substância.

A tabela 2 apresenta valores de temperaturas de mudanças de fase de algumas substâncias, à pressão de 1 atm.

Tabela 2 – Temperaturas de mudanças de fase		
Substância	Sólido \longleftrightarrow Líquido (°C)	Líquido \longleftrightarrow Gasoso (°C)
Água	0	100
Álcool etílico	–114	78
Alumínio	660	2.450
Cobre	1.083	2.595
Ferro	1.537	3.000
Ouro	1.064	2.970
Tungstênio	3.380	5.930

Fonte: WILSON, Jerry D. et al. *College Physics*. New Jersey: Pearson, 2008.

2ª lei – Durante as mudanças de fase, a temperatura da substância pura permanece constante.

O calor absorvido pela substância nessa etapa é utilizado não mais para aumentar a agitação de suas moléculas, mas para rearranjá-las.

3ª lei – Para realizar uma mudança de estado, cada substância deve absorver (ou ceder) uma quantidade determinada de calor, correspondente a essa mudança de estado.

Considerando novamente o caso do chumbo, que passa do estado sólido para o estado líquido quando sua temperatura atinge 327 °C, verifica-se experimentalmente que, ao atingir essa temperatura, cada grama de chumbo absorve 5,8 cal ao alterar seu estado físico, passando para o estado líquido. Em outras palavras, o **calor latente de fusão** do chumbo é 5,8 cal/g. Caso o chumbo esteja no estado líquido, a 327 °C, cada grama de sua composição deverá ceder 5,8 cal para que ele retorne ao estado sólido. Em outros termos, o **calor latente de solidificação** do chumbo é igual a –5,8 cal/g.

Calor latente de uma mudança de estado físico é a quantidade de calor que cada unidade de massa da substância deve receber ou ceder a fim de efetuar a transição completa de um estado para outro, mantendo-se a temperatura constante.

Costuma-se indicar o calor latente pela letra **L**.

Observe na tabela 3 que, para o gelo, temos $L_{\text{fusão}} = 80 \text{ cal/g}$, isto é, cada grama de gelo, a 0°C em um ambiente a 1 atm, necessita absorver 80 cal a fim de efetuar a transição do estado sólido para o líquido.

Discuta com seus alunos o significado da grande diferença entre os valores de calor latente de ebulição e de fusão de uma mesma substância.

Tabela 3 – Calor latente de fusão e ebulição

Substância	Calor latente de fusão (cal/g)	Calor latente de ebulição (cal/g)
Água	80	540
Álcool etílico	25	204
Alumínio	96	2.597
Cobre	32	1.211
Ferro	59	1.495
Ouro	15	377
Tungstênio	46	1.071

Fonte: WILSON, Jerry D. et al. *College Physics*. New Jersey: Pearson, 2008.

A proporcionalidade expressa no calor latente (L) pode ser representada por uma fórmula matemática, empregada para calcular a quantidade de calor (Q) necessária para a realização da mudança de estado de uma massa (m), da seguinte maneira:

$$\begin{array}{lcl} L \text{ (cal)} & \text{——} & 1 \text{ g} \\ Q \text{ (cal)} & \text{——} & m \text{ (g)} \end{array} \Rightarrow Q = mL$$

Você precisa saber!

Embora muito utilizada para indicar valores de calor latente de mudança de estado, cal/g não é unidade do Sistema Internacional de Unidades, que adota J/kg (joule por quilograma). Lembrando que $1 \text{ cal} \approx 4,2 \text{ J}$, e que $1 \text{ kg} = 10^3 \text{ g}$, podemos estabelecer a seguinte conversão entre as duas unidades de calor latente de mudança de estado:

$$1 \text{ cal/g} \approx 4,2 \times 10^3 \text{ J/kg}$$

QUESTÕES RESOLVIDAS

R12 Uma massa de 500 g de gelo está à temperatura de -30°C . Indique a quantidade de calor que essa massa precisa absorver para que, após algum tempo, se obtenha:

(Os dados necessários podem ser obtidos nas tabelas deste capítulo.)

- 500 g de gelo a 0°C , considerando $c_{\text{gelo}} = 0,55 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$;
- 250 g de gelo a 0°C e 250 g de água a 0°C ;
- 500 g de água a 20°C .

► Resolução

- a) Podemos calcular a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura da massa de gelo de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, etapa em que não ocorrerá mudança de estado, da seguinte forma:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q = 500 \cdot 0,55 \cdot 30 \therefore Q = 8.250 \text{ cal}$$

Assim, serão necessárias 8.250 cal para que a massa de gelo tenha sua temperatura elevada da maneira desejada.

- b) Além das 8.250 cal calculadas no item anterior, será necessário fornecer ainda outra quantidade de calor, para que os 250 g de gelo se fundam. Como o calor latente de fusão do gelo é igual a 80 cal/g, teremos:

$$Q = mL \Rightarrow Q = 250 \cdot 80 \therefore Q = 20.000 \text{ cal}$$

Logo, em toda a etapa descrita serão necessárias $Q_{\text{total}} = 8.250 \text{ cal} + 20.000 \text{ cal} = 28.250 \text{ cal}$.

- c) Além de todo o gelo se fundir, o líquido originado deverá ter sua temperatura elevada de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Temos, com as condições iniciais, três etapas:

- 500 g de gelo:
de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($Q = 8.250 \text{ cal}$, calculado no item a)

- 500 g de gelo:
fundindo ($Q = 2 \cdot 20.000 = 40.000 \text{ cal}$, o dobro do valor obtido no item b)

- 500 g de água:
de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow [c_{\text{água}} = 1,0 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C})] \Rightarrow \\ \Rightarrow Q = 500 \cdot 1 \cdot 20 \therefore Q = 10.000 \text{ cal}$$

A soma das quantidades de calor das três etapas é a resposta procurada. Assim:

$$Q_{\text{total}} = 8.250 + 40.000 + 10.000$$

$$\therefore Q_{\text{total}} = 58.250 \text{ cal} \approx 58 \text{ kcal}$$

- R13** Uma fonte de potência constante e igual a 500 cal/s aquece uma massa de 100 g de ouro, cujo calor específico é igual a $0,032 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C})$ e cujo calor latente de fusão é igual a 15 cal/g. Se a massa estava inicialmente à temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, quanto tempo a fonte deverá aquecê-la para que todo o ouro se funda? (Dado: temperatura de fusão do ouro = $1.064\text{ }^{\circ}\text{C}$)

► Resolução

Vamos calcular a quantidade de calor que é necessário fornecer à massa de ouro. Para isso, temos duas etapas:

- elevar a temperatura de 100 g de ouro de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $1.064\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q = 100 \cdot 0,032 \cdot (1.064 - 25)$$

$$\therefore Q = 3.324,8 \text{ cal}$$

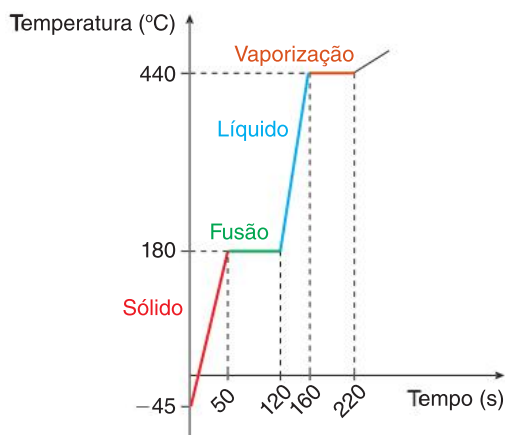
- fusão de 100 g de ouro:

$$Q = mL \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q = 100 \cdot 15 \therefore Q = 1.500 \text{ cal}$$

Portanto, a massa de ouro precisará absorver $3.324,8 \text{ cal} + 1.500 \text{ cal} = 4.824,8 \text{ cal}$ nas condições descritas. Como a fonte fornece 500 cal/s, e desconsiderando eventuais perdas para o meio ambiente, isto é, adotando eficiência de 100% na transmissão do calor, será necessário que a fonte permaneça aquecendo o ouro por aproximadamente $9,6 \text{ s}$, resultado da divisão $4.824,8 : 500$.

- R14** Um experimento foi realizado com o objetivo de determinar as características de certa substância. Para tanto, tomou-se uma amostra de 200 g da substância a $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Com a ajuda de uma fonte térmica de potência constante e igual a 1.200 W, e evitando qualquer perda de calor para o meio ambiente, esboçou-se a curva de aquecimento representada abaixo.



Considerando $1 \text{ cal} \approx 4 \text{ J}$, determine:

- o calor específico da substância no estado sólido;
- o calor latente de fusão da substância;
- o calor específico da substância no estado líquido, em $\text{cal}/(\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C})$;
- o calor latente de vaporização da substância, em cal/g.

► Resolução

- a) A substância está no estado sólido entre $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $180\text{ }^{\circ}\text{C}$. De $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $440\text{ }^{\circ}\text{C}$, a substância está no estado líquido e, acima de $440\text{ }^{\circ}\text{C}$, no estado de vapor.

A potência da fonte, 1.200 W, significa que a massa da substância absorve 1.200 J/s ou 300 cal/s.

De $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $180\text{ }^{\circ}\text{C}$, a substância absorveu $300 \cdot 50 = 15.000\text{ cal}$. Seu calor específico, nesse estado, pode ser assim obtido:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 15.000 = 200 \cdot c \cdot [180 - (-45)] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 15.000 = 200 \cdot c \cdot 225 \therefore c \approx 0,33\text{ cal/(g} \cdot ^{\circ}\text{C)}$$

Portanto, o calor específico da substância no estado sólido é aproximadamente $0,33\text{ cal/(g} \cdot ^{\circ}\text{C)}$.

- b) A substância foi aquecida durante 70 s pela fonte de potência 300 cal/s para que passe do estado sólido para o líquido. Assim, o calor absorvido durante a fusão foi de 21.000 cal. Como a massa fundida foi de 200 g, temos:

$$Q = mL \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 21.000 = 200L \therefore L = 105\text{ cal/g}$$

Portanto, o calor latente de fusão da substância é igual a 105 cal/g.

- c) De modo semelhante à resolução do item a, temos:

$$\Delta T = 440 - 180 = 260\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Q = 300 \cdot 40 = 12.000\text{ cal}$$

Portanto:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$$12.000 = 200 \cdot c \cdot 260 \therefore c \approx 0,23\text{ cal/(g} \cdot ^{\circ}\text{C)}$$

Logo, o calor específico da substância no estado líquido é aproximadamente $0,23\text{ cal/(g} \cdot ^{\circ}\text{C)}$.

- d) De modo semelhante à resolução do item b, temos:

$$\Delta t = 220 - 160 = 60\text{ s}$$

$$Q = 300 \cdot 60 = 18.000\text{ cal}$$

Portanto:

$$Q = mL \Rightarrow 18.000 = 200 \cdot L \therefore L = 90\text{ cal/g}$$

Assim, o calor latente de vaporização da substância é igual a 90 cal/g.

Procure analisar a curva de aquecimento da questão resolvida R14. Incentive seus alunos a resolver as questões propostas.

QUESTÕES PROPOSTAS

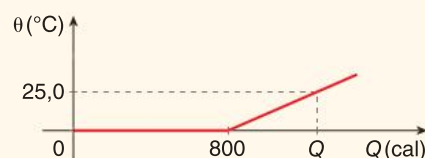
Lembre-se: resolva as questões no caderno.

- 23 O calor latente de fusão do ferro é aproximadamente igual a $\frac{1}{9}$ do calor latente de ebulição da água. Com base nisso, identifique as afirmativas verdadeiras.

- É preciso 9 vezes mais calor para derreter um quilograma de ferro que esteja à temperatura de fusão do que para transformar em vapor 1 quilograma de água que esteja à temperatura de ebulição.
- Se massas iguais de ferro e de água estiverem a temperaturas, respectivamente, de fusão e de ebulição, poderemos lhes fornecer calor indefinidamente sem que alterem sua temperatura.
- A temperatura de fusão do ferro é 9 vezes maior que a temperatura de ebulição da água.
- A quantidade de calor necessária para transformar em vapor 90 g de água que estejam à temperatura de ebulição é suficiente para fundir 10 g de ferro que estejam à temperatura de fusão.
- Para elevar $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a temperatura de duas massas iguais, uma de água e outra de ferro, sem que ocorra mudança de estado, será necessário fornecer à água, aproximadamente, 9 vezes mais calor que ao ferro.

- 24 Uma fonte de calor, ao nível do mar, funcionou durante 40 minutos, fornecendo a quantidade de calor necessária para que 500 g de água a $12\text{ }^{\circ}\text{C}$, contida em um recipiente, entrassem em ebulição e, além disso, 200 g da quantidade inicial se transformassem em vapor de água a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Desprezando a capacidade térmica do recipiente, determine a potência da fonte de calor, em cal/s. [Dados para a água: calor específico = $1,0\text{ cal/(g} \cdot ^{\circ}\text{C)}$; calor latente de vaporização = 540 cal/g]

- 25 (Mackenzie-SP) O gráfico abaixo mostra a variação da quantidade de calor (Q) com a temperatura (θ) de um cubo de gelo de massa m , inicialmente a $0,00\text{ }^{\circ}\text{C}$.



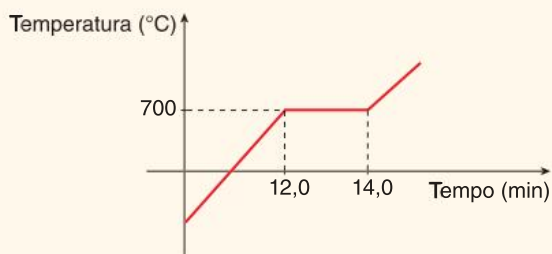
Considere: calor latente de fusão do gelo $L = 80,0\text{ cal/g}$ e calor específico da água $c = 1,00\text{ cal/(g} \cdot ^{\circ}\text{C)}$. A quantidade de calor (Q) em kcal necessária para que toda a massa m se transforme em água a $25,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ é:

- 1,05
- 1,15
- 1,25
- 1,35
- 1,45

26 Uma peixaria consome diariamente determinada massa de água para fabricar gelo a 0°C . A máquina utilizada para produzir gelo dissipa 86.400 J a cada minuto nessa tarefa. Considere 20°C como a temperatura ambiente no local onde a água é introduzida na máquina e que, em um dia de grande movimento, ela tenha sido utilizada durante 2 horas. Considerando $1\text{ cal} \approx 4\text{ J}$, responda:

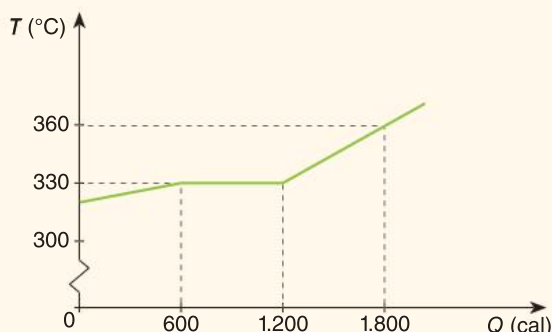
- Qual é a energia dissipada pela máquina durante o tempo em que foi utilizada?
- Supondo que toda a energia dissipada pela máquina seja utilizada para a obtenção de gelo, a 0°C , calcule a massa de gelo produzida durante 2 horas.

27 O gráfico representa a curva de aquecimento de uma massa de 200 g de uma substância, inicialmente no estado sólido, realizado por uma fonte de potência constante e igual a $5,0\text{ kcal/min}$. Determine o valor do calor latente de fusão dessa substância, em cal/g .



28 O gráfico apresenta o aquecimento de um corpo de 15 g de massa composto por uma substância pura. À temperatura de 320°C , o corpo estava no estado líquido. Sabendo que o corpo é aquecido por uma fonte de potência térmica constante e desprezando as perdas para o ambiente, responda: qual é o valor do calor específico do corpo no estado gasoso?

(Dado: calor latente de ebulição da substância que compõe o corpo: 40 cal/g)

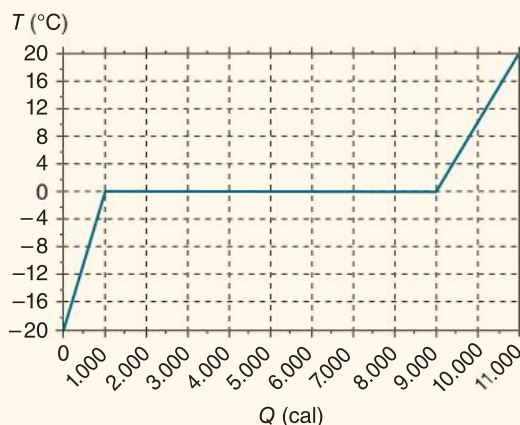


29 Um aquecedor elétrico cuja potência é de 1.200 J/s contém 800 g de água a 25°C . Considerando des-

prezíveis as perdas de energia e $1\text{ cal} \approx 4\text{ J}$, responda às seguintes questões:

- Qual é o intervalo de tempo necessário para que se inicie o processo de vaporização da massa de água?
- Qual é a massa de vapor de água formada depois de o aquecedor ter operado durante 10 min ?

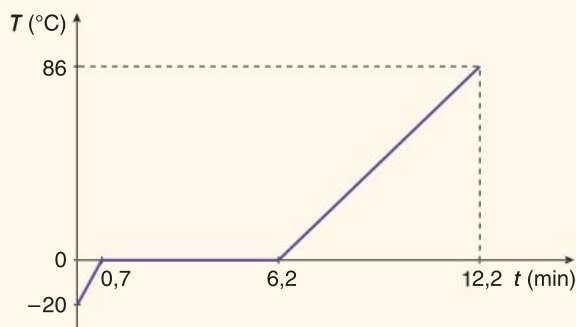
30 Em um procedimento experimental durante uma aula de laboratório de Física, Júlio e seus colegas construíram o gráfico da temperatura (em graus Celsius), em função da quantidade de calor (em calorias), recebida por uma massa de 100 g de gelo, sob pressão atmosférica de 1 atm .



Com base em seus conhecimentos e na leitura do gráfico:

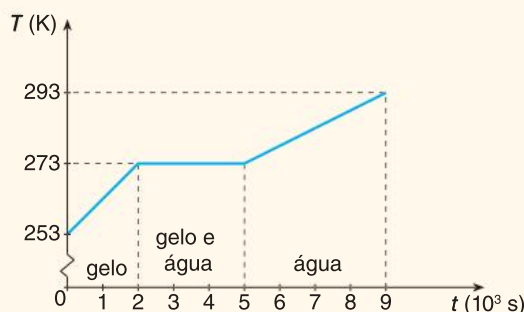
- obtenha os valores de calor específico e de calor latente de fusão do gelo a partir dos dados do gráfico $T \times Q$;
- determine a capacidade térmica da água no estado líquido.

31 O gráfico a seguir representa a variação da temperatura de um corpo de 1.500 g de massa em função do tempo. A fonte na qual o corpo foi colocado tem potência constante e igual a 1.500 W .



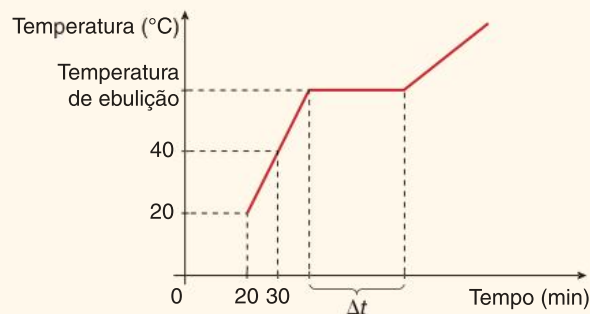
- Calcule o calor latente de fusão da substância que compõe o corpo.
- Qual é a quantidade de calor recebida pelo corpo durante os $12,2\text{ min}$ registrados no gráfico?

NELSON MATSUDA



- a) Entre os instantes 2.000 s e 5.000 s, a temperatura do corpo de massa m permanece constante em 273 K. O que ocorre nesse intervalo de tempo que faz a temperatura permanecer constante?
- b) A partir do gráfico, obtenha a relação entre os valores dos calores específicos da água e do gelo.
- 33** O gráfico representa um trecho da curva de aquecimento de 400 g de uma das substâncias apresentadas na tabela a seguir.
- No intervalo de tempo Δt indicado, a substância está em ebulição.

Substância	Calor específico no estado líquido [cal/(g · °C)]	Calor latente de ebulição (cal/g)
Água	1,0	540
Ácido acético	0,49	94
Álcool etílico	0,58	204
Benzeno	0,43	98



Considere que a substância foi aquecida em uma fonte térmica de potência constante e igual a 392 calorias por minuto.

- a) A qual das substâncias corresponde a curva de aquecimento representada no gráfico? Justifique sua resposta.
- b) Qual é o valor do intervalo de tempo, Δt , em minutos, necessário para vaporizar completamente a substância?
- 34** (Unicamp-SP) Na preparação caseira de um chá, aconselha-se aquecer a água até um ponto próximo da fervura, retirar o aquecimento e, em seguida, colocar as folhas da planta e tampar o recipiente. As folhas devem ficar em processo de infusão por alguns minutos. Caso o fogo seja mantido por mais tempo que o necessário, a água entrará em ebulição. Considere que a potência fornecida pelo fogão à água é igual a 300 W, e que o calor latente de vaporização da água vale $2,25 \times 10^3$ J/g. Mantendo-se o fogo com a água em ebulição e o recipiente aberto, qual é a massa de água que irá evaporar após 10 minutos?
- a) 18 g c) 80 g
b) 54 g d) 133 g

Plasma: o quarto estado da matéria

O plasma também é chamado de "quarto estado da matéria". Além dos estados sólido, líquido e gasoso, os plasmas são basicamente originados a partir de gases que, em condições particulares, sofrem ionização. Isso significa que os átomos de que são formados têm seus elétrons arrancados de suas respectivas órbitas. O resultado é uma massa disforme (daí o nome plasma) eletricamente neutra (pois a massa, como um todo, não perdeu nem ganhou elétrons), formada por núcleos e elétrons dissociados, num estado de desagregação além do estado gasoso, a temperaturas altíssimas. Depois de o gás passar pelo processo de ionização, esse estado se mantém por um dos três motivos que seguem:

1. A temperatura é muito alta, de modo que as colisões entre núcleos e elétrons são tão intensas que não permitem o restabelecimento da ligação.
2. A massa de plasma é muito pouco densa, ou seja, muito rarefeita, o que torna raras as colisões.
3. Incidência de fontes externas de energia, como campos elétricos intensos ou radiações capazes de arrancar os elétrons dos átomos.

A formação de plasma pode ser observada em diversas situações, naturais ou criadas pelo ser humano: com a fricção do ar contra as paredes das naves espaciais no momento da reentrada na atmosfera; ao redor de descargas elétricas intensas, como os raios; nas auroras polares; nos ventos solares; nos aceleradores de partículas. Como aplicação tecnológica, o plasma está presente em telas de televisão e no motor a propulsão iônica, utilizado em uma das etapas da viagem da nave espacial Deep Space.

Fonte: Laboratório Associado de Plasma (LAP). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Disponível em: <www.plasma.inpe.br/>. Acesso em: 18 jan. 2016.



Televisão com tela de plasma.

AMPLIANDO SUA LEITURA

- 1 Como se forma o plasma?
- 2 Para que o plasma se mantenha, são necessárias algumas condições. Quais são elas?

S24

No *Suplemento*, há sugestão de leitura complementar sobre o quarto estado da matéria e uma indicação de site sobre o fenômeno dos ventos solares. Apresentamos também um texto complementar a respeito do condensado de Bose-Einstein (quinto estado da matéria) e questões sobre o assunto.

8 Trocas de calor em recipientes termicamente isolados

Caixas térmicas podem ser utilizadas para armazenar bebidas e alimentos durante certo período, por exemplo, para ser consumidos na praia, em passeios ao campo etc. Nesses casos, sucos, água, sanduíches e sorvetes precisam ser conservados a temperaturas menores que a do meio ambiente, para não ter suas propriedades físicas e químicas alteradas pelo aquecimento. Com propósito semelhante, muitos habitantes da região Sul do Brasil, que têm por hábito tomar chimarrão, carregam consigo uma garrafa térmica contendo água bem quente.

Caixas e garrafas térmicas são utilizadas para manter constante a temperatura dos corpos nelas armazenados, e são exemplos de bons **isolantes térmicos**. Sabemos, entretanto, que não atingem plenamente seu objetivo, pois, com o tempo, a temperatura da água quente armazenada na garrafa térmica diminui, enquanto a temperatura do sorvete contido na caixa térmica aumenta. Numa situação ideal, quando um corpo é acondicionado em um perfeito isolante térmico, o valor de sua temperatura é mantido constante por tempo indefinido. Nessa condição, dizemos que esse corpo está contido em um **recipiente termicamente isolado**, onde não troca calor com o meio ambiente.

Equipamentos que, com objetivo semelhante ao das caixas e garrafas térmicas, evitam as trocas de calor entre o meio ambiente e os corpos colocados em seu interior recebem o nome de **calorímetros** (fig. 14). Um calorímetro ideal não permite trocas de calor entre seu conteúdo e o meio externo. Dizemos que seu interior pode ser considerado um recipiente termicamente isolado (fig. 15). Os calorímetros, em geral, são usados nas indústrias (fig. 16) e em laboratórios (fig. 17) para análise de diversas trocas de calor.



Figura 14 • Uma garrafa térmica pode ser considerada um calorímetro.

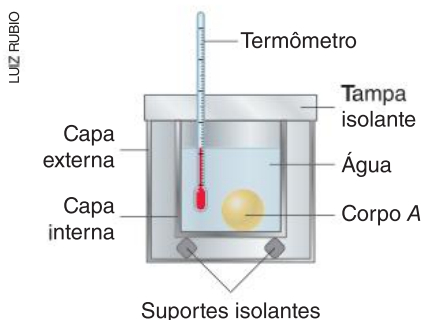


Figura 15 • Esquema básico de um calorímetro.



Figura 16 • Modelo de calorímetro utilizado em indústrias para a determinação de calores de combustão de substâncias.



Figura 17 • Modelo de calorímetro utilizado em laboratório de análises para medir o efeito térmico de seres vivos em meio de cultura.

9 Trocas de calor e equilíbrio térmico

A temperatura de uma peça de carne assada no forno começa a diminuir no momento em que é retirada de dentro dele; continua a diminuir no prato sobre a mesa, e diminui ainda mais quando levada à geladeira. Nesse processo, a carne **cede** calor, inicialmente, ao meio ambiente e, posteriormente, ao ar interno do refrigerador. Como as geladeiras comuns mantêm o ar interno à temperatura de aproximadamente 5 °C, a carne levada à geladeira atingirá essa temperatura depois de algum tempo.

Corpos em diferentes temperaturas, quando colocados em contato, tendem a igualar suas temperaturas após certo tempo, ou, em outras palavras, tendem a atingir a temperatura de **equilíbrio térmico**, como acontece no resfriamento da carne em contato com o ar interno do refrigerador.

Se, em um recipiente isolado termicamente, um corpo X , à temperatura T_X , é colocado em contato com outro corpo Y , à temperatura T_Y , e se T_X passa a diminuir, podemos afirmar que (fig. 18):

- o valor da temperatura inicial de X é maior que o valor da temperatura inicial de Y . Durante o contato entre os corpos, uma quantidade determinada de calor fluiu de X para Y ;
- a transferência de calor de X para Y é o fator responsável pela diminuição da temperatura de X e pelo aumento da temperatura de Y ;
- a transferência de calor se encerra quando as temperaturas dos dois corpos se igualam;
- a quantidade de calor cedida por X é integralmente absorvida por Y .

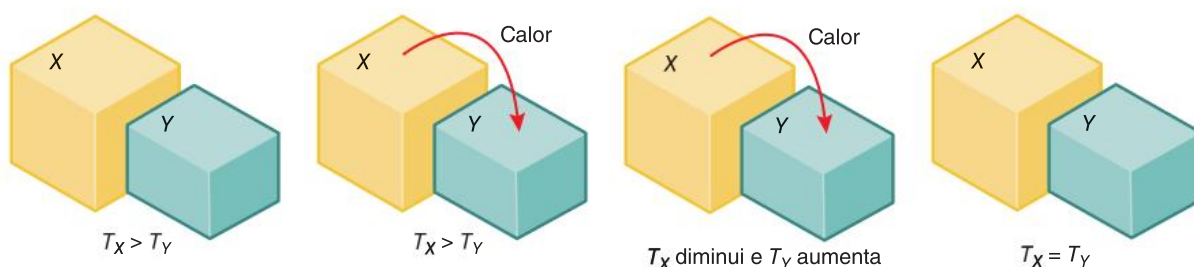


Figura 18

Nessa situação ideal, sendo Q_X a quantidade de calor liberada pelo corpo X , e Q_Y a quantidade de calor absorvida pelo corpo Y , temos, **em valores absolutos**, $Q_X = Q_Y$.

Considerando, no entanto, que não houve mudança nos estados físicos de X e de Y , então as quantidades de calor envolvidas nas trocas descritas podem ser calculadas pela equação fundamental da Calorimetria ($Q = m \cdot c \cdot \Delta T$). Desse modo, podemos avaliar que Q_X é negativo, enquanto Q_Y é positivo, pois a temperatura de X diminui enquanto a temperatura de Y aumenta, implicando que $\Delta T_X < 0$ e $\Delta T_Y > 0$. Assim, de acordo com os sinais dos resultados das quantidades de calor cedidas e absorvidas, temos:

$$Q_X + Q_Y = 0$$

De modo geral, podemos afirmar:

Quando dois corpos trocam calor entre si, ao ser atingido o equilíbrio térmico, a soma algébrica das quantidades de calor trocadas entre eles é nula, ou seja,

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n = 0$$

Dependendo das características dos corpos colocados em contato, pode ocorrer mudança de estado físico durante a transferência de calor. É o caso, por exemplo, de um cubo de gelo colocado na água com o objetivo de diminuir a temperatura desse líquido.

Durante o processo, a água cederá calor para o gelo, de maneira que a temperatura da água diminuirá e a do gelo aumentará.

S25

No *Suplemento*, há uma sugestão de procedimento experimental simples para introduzir o estudo das trocas de calor. Há também uma sugestão de vídeo com demonstração experimental, caso não seja possível realizar o procedimento em aula.

ILUSTRAÇÕES: LUIZ RUBIO

Para que ocorra a fusão completa do gelo colocado na água, ele precisará absorver calor suficiente para elevar sua temperatura inicial para 0°C e também para mudar de estado físico. Todavia, é comum observar casos em que apenas uma parte do gelo lançado na água se funde (fig. 19).



Figura 19 • Em algumas situações, gelo e água permanecem no copo mesmo após o equilíbrio térmico ser atingido.

Como explicar o fato de que gelo e água permanecem no copo ao ser atingido o equilíbrio térmico?

Quando o calor absorvido pelo gelo não é suficiente para fundi-lo completamente, ao ser atingido o equilíbrio térmico, observa-se uma mistura de água e gelo. Essa mistura, contida em recinto termicamente isolado, tem temperatura de 0°C (fig. 20).

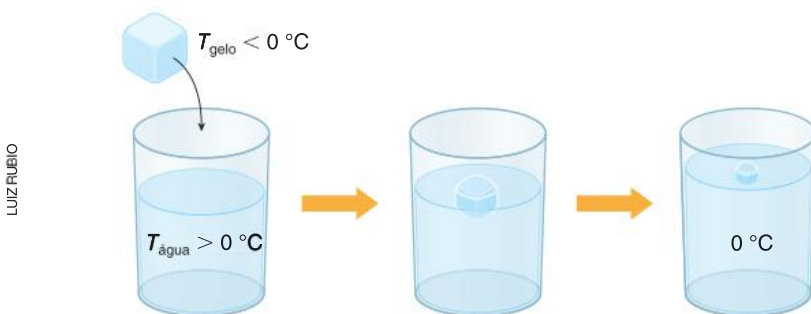


Figura 20

Nessa situação, o gelo absorveu da água a quantidade de calor suficiente para elevar sua temperatura de determinado valor negativo até zero, e também para fundir apenas uma parte de sua massa. Desse modo, o gelo que não fundiu tem temperatura de 0°C , assim como a mistura de água composta da parte do gelo que fundiu e da massa de água original.

S26

No *Suplemento*, há indicação de um objeto virtual de aprendizagem.

S27

No *Suplemento*, você encontra orientações para o trabalho com este “Explore”.

EXPLORE EM BIOLOGIA
Por que trememos quando estamos com muito frio?

QUESTÕES RESOLVIDAS

R15 Em um recipiente termicamente isolado, uma massa de 200 g de uma substância *A*, à temperatura de 30°C , é colocada em contato com uma massa de 100 g de outra substância *B*, que está à temperatura de 70°C . Se o calor específico da substância *B* é o dobro do valor do calor específico da substância *A*, qual será a temperatura das duas substâncias ao ser atingido o equilíbrio térmico, sabendo que não houve mudança de estado?

► Resolução

Dados:

- substância *A*: $m = 200\text{ g}$; $T_0 = 30^\circ\text{C}$; calor específico = c
- substância *B*: $m = 100\text{ g}$; $T_0 = 70^\circ\text{C}$; calor específico = $2c$

Temos:

$$Q_A + Q_B = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m_A \cdot c_A \cdot \Delta T_A + m_B \cdot c_B \cdot \Delta T_B = 0$$

Supondo que a temperatura da mistura, ao atingir o equilíbrio térmico, seja T_f , podemos reescrever a equação acima da seguinte forma:

$$200 \cdot c \cdot (T_f - 30) + 100 \cdot 2c \cdot (T_f - 70) = 0$$

Dividindo toda a expressão por 200c, obtemos:

$$T_f - 30 + T_f - 70 = 0 \therefore T_f = 50^\circ\text{C}$$

Portanto, a temperatura de equilíbrio térmico é igual a 50°C .

- R16** Que quantidade de massa se fundirá quando um pedaço de 500 g de gelo a -30°C for lançado em um recipiente termicamente isolado contendo 1 L de água a 30°C ?

[Dados: calor específico do gelo = $0,5 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; calor específico da água = $1,0 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g ; temperatura de fusão do gelo = 0°C ; densidade da água = 1 kg/L]

► Resolução

Inicialmente, vamos calcular a quantidade de calor que o gelo precisará absorver para elevar sua temperatura de -30°C até 0°C .

$$\begin{aligned} Q_{\text{gelo1}} &= m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow \\ \Rightarrow Q_{\text{gelo1}} &= 500 \cdot 0,5 \cdot [0 - (-30)] \\ \therefore Q_{\text{gelo1}} &= 7.500 \text{ cal} \end{aligned}$$

Em seguida, vamos calcular a quantidade de calor necessária para que todo o gelo, já a 0°C , mude para o estado líquido.

$$\begin{aligned} Q &= mL \Rightarrow Q_{\text{gelo2}} = 500 \cdot 80 \therefore Q_{\text{gelo2}} = 40.000 \text{ cal} \\ \text{O resultado indica que serão necessárias} \\ 7.500 \text{ cal} + 40.000 \text{ cal} &= 47.500 \text{ cal para que todo} \\ \text{o gelo mude para o estado líquido.} \end{aligned}$$

Se ocorrer equilíbrio térmico à temperatura de 0°C , o calor cedido pela água fará com que sua temperatura diminua 30°C . Nessa condição, o calor cedido pela massa de 1 kg, ou 1.000 g, de água pode ser calculado assim:

$$\begin{aligned} Q &= m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow Q_{\text{água}} = 1.000 \cdot 1 \cdot [0 - 30] \\ \therefore Q_{\text{água}} &= -30.000 \text{ cal} \end{aligned}$$

Como a quantidade de calor necessária à fusão de toda a massa de gelo é maior que aquela que a água é capaz de ceder, o gelo não passará integralmente do estado sólido para o estado líquido. Portanto, $Q_{\text{gelo1}} = 7.500 \text{ cal}$ e $Q_{\text{gelo2}} < 40.000 \text{ cal}$. Para calcular o valor efetivo de Q_{gelo2} e, consequentemente, a massa de gelo que se fundiu, podemos fazer:

$$\begin{aligned} Q_{\text{gelo1}} + Q_{\text{gelo2}} + Q_{\text{água}} &= 0 \\ 7.500 \text{ cal} + Q_{\text{gelo2}} - 30.000 \text{ cal} &= 0 \end{aligned}$$

$$\therefore Q_{\text{gelo2}} = 22.500 \text{ cal}$$

Assim:

$$Q_{\text{gelo2}} = mL \Rightarrow 22.500 = 80 \cdot m \therefore m = 281,25 \text{ g}$$

Dessa forma, a massa de gelo que se fundirá será igual a 281,25 g, e a massa de gelo que restará em equilíbrio térmico em água, a 0°C , será igual a 218,75 g, uma vez que $218,75 + 281,25 = 500$. Quanto à massa de água que estará no recipiente ao ser atingido o equilíbrio térmico, é correto afirmar que ela será igual ao resultado da adição entre a massa inicial de água e a massa de gelo que se fundiu, ou seja: $281,25 \text{ g} + 1.000 \text{ g} = 1.281,25 \text{ g}$

- R17** Uma grande quantidade de água no estado líquido está sendo mantida, sob pressão normal, a 100°C , em um recipiente termicamente isolado. Colocando nesse recipiente uma massa de 270 g de um metal de calor específico $0,6 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ e temperatura de 300°C , qual será a massa de vapor de água que se formará em razão da troca de calor entre a água e o metal?

[Dados: calor específico da água = $1,0 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; calor latente de vaporização da água = 540 cal/g ; temperatura de vaporização da água = 100°C]

► Resolução

Pelo enunciado, podemos concluir que a temperatura de equilíbrio é de 100°C , pois temos uma grande quantidade de água e apenas 270 g de metal, que não deve ter energia interna suficiente para vaporizar a água.

O metal introduzido no recipiente está a uma temperatura maior que a água. Por isso, ele cederá calor à água, que, por estar na temperatura de vaporização, utilizará todo o calor absorvido para mudar de estado. Assim, podemos escrever:

$$\begin{aligned} Q_{\text{metal}} + Q_{\text{água}} &= 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow m_{\text{metal}} \cdot c_{\text{metal}} \cdot \Delta T_{\text{metal}} + \\ + m_{\text{vapor de água}} \cdot L_{\text{vaporização de água}} &= 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow 270 \cdot 0,6 \cdot (100 - 300) + m_{\text{vapor de água}} \cdot 540 &= 0 \\ \therefore m_{\text{vapor de água}} &= 60 \text{ g} \end{aligned}$$

Portanto, a massa de vapor de água que surgirá em consequência da troca de calor com o metal será de 60 g.

QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

- 35** Colocando em contato duas massas de 400 g cada uma, sendo uma de ferro a 240°C e outra de chumbo a 140°C , qual será a temperatura de equilíbrio térmico? Considere apenas as trocas de calor entre as duas massas e os seguintes dados: calor específico do ferro = $0,11 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; calor específico do chumbo = $0,031 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$.

- 36** Uma peça de 50 g de ouro é aquecida até que sua temperatura atinja 1.000°C . Em seguida, essa peça é mergulhada em um tanque contendo 5 L de água a 25°C . Desprezando as trocas de calor com o ambiente, determine a elevação da temperatura da água até que seja estabelecido o equilíbrio térmico.

[Dados: calor específico do ouro = $0,032 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; calor específico da água = $1,0 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; densidade da água = 1 kg/L]

- 37** Calcule a massa que restará de gelo, ao ser atingido o equilíbrio térmico, quando um pedaço de $0,2 \text{ kg}$ de massa e temperatura -10°C for lançado em uma bacia contendo 4 litros de água a 20°C . Despreze as trocas de calor com o ambiente.

[Dados: $c_{\text{água}} = 1,0 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; $c_{\text{gelo}} = 0,5 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g ; densidade da água = 1 kg/L]

- 38** Um calorímetro isolado termicamente tem, inicialmente, $2,0 \text{ L}$ de água a uma temperatura de 55°C . Adicionamos, então, 1 kg de água a 25°C . Dado que o calor específico da água é $1,0 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$, que o calor latente de fusão é 80 cal/g e que sua densidade é $1,0 \text{ g/cm}^3$, calcule:

- a temperatura de equilíbrio da água;
- a energia (em calorias) que deve ser fornecida à água na situação do item **a** para que esta atinja a temperatura de ebulição de 100°C ;
- quanto calor deve ser retirado do calorímetro, no item **b**, para que toda a água fique congelada.

Para saber mais *Saber físico e tecnologia*

Água que resfria e que aquece

A imagem ao lado mostra a usina atômica de Three Mile Island, localizada no estado da Pensilvânia, Estados Unidos. Em março de 1979, as imagens das torres da usina ganharam o mundo por causa de um acidente em um dos reatores, que provocou o vazamento de radiação. Apesar do medo, esse acidente não teve grandes dimensões, sendo muito menos grave que o que ocorreu em Chernobyl, na Rússia, sete anos depois.

Torres semelhantes a essas, vistas em muitas outras usinas de geração de eletricidade a energia atômica, dão a enganosa impressão de que são o coração da usina, ou seja, são os reatores nucleares.

Na verdade, as torres são enormes trocadores de calor, chamadas de “torres de resfriamento”, e são amplamente utilizadas, por exemplo, na indústria química. Nelas, a água é vaporizada, carregando enormes quantidades de calor. Esse processo é necessário porque a usina, a fim de controlar a temperatura do reator nuclear, capta grande quantidade de água de rios ou mares próximos e a devolve a uma temperatura próxima à do ambiente, de maneira a minimizar impactos sobre ele.

Nossa pele, de certa maneira, é um grande trocador de calor e, em algumas ocasiões, funciona como uma torre de resfriamento: em situações extremas, quando a temperatura corporal sobe perigosamente, começamos a suar. A evaporação do suor, formado basicamente de água, é capaz de transferir para o ambiente, de forma rápida, grande quantidade de calor, garantindo a manutenção da temperatura do corpo em níveis aceitáveis.

Na indústria, a água é um dos principais meios de transferência de calor. Um dos serviços indispensáveis em algumas plantas industriais é a geração de vapor por meio de uma grande caldeira central que aquece a água. Quando determinada quantidade de energia é fornecida à água, ela muda de estado, passando para o estado gasoso. O vapor gerado nesse processo é, então, conduzido por tubulações apropriadas até o local onde será utilizado, como na imagem ao lado. Ao transferir calor para a substância que se quer aquecer, o vapor se condensa, retornando para a caldeira.

AMPLIANDO SUA LEITURA

- Qual é a função das torres das usinas atômicas?
- Em 2011, um forte terremoto ocorrido na costa do Japão provocou um tsunami que devastou cidades e causou danos e milhares de mortes. Em Fukushima, a usina nuclear sofreu uma pane porque a captação de água do mar pelas bombas ficou prejudicada. Qual é a função dessa água para o funcionamento adequado dos reatores?

W. CODY/CORBIS/ATN/STOCK



Usina nuclear de Three Mile Island, Pensilvânia, Estados Unidos.

STOCKFOLIO/ALAMY/GLOW IMAGES



Tubulações de indústria para vapor de água.

Calorímetro e trocas de calor

Quando colocamos café quente no interior de uma garrafa térmica, sua parede interna se aquece, pois certa quantidade de calor flui do café para a parede da garrafa. Em situações ideais, essa quantidade de calor é pequena e pode ser desprezada, mas não podemos adotar a mesma conduta em situações reais. A quantidade de calor absorvida pelo recipiente térmico será considerável ou não dependendo de sua capacidade térmica (C), isto é, dependendo da relação entre o calor absorvido pelo corpo (Q) e a elevação de temperatura que ele sofre (ΔT), que matematicamente é expressa por: $C = \frac{Q}{\Delta T}$

Vamos analisar a troca de calor entre dois corpos colocados em um calorímetro que absorve uma quantidade significativa de calor. Para tanto, vamos supor um corpo X à temperatura T_X , um corpo Y à temperatura T_Y , menor que T_X , e um calorímetro de capacidade térmica C , também à temperatura T_Y (fig. 21). Nessas condições, podemos afirmar que:

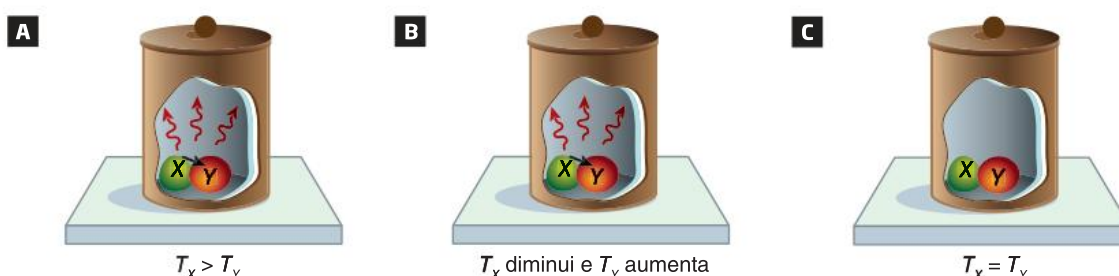


Figura 21 • (A) Há fluxo de calor do corpo X em direção ao corpo Y e em direção ao calorímetro; (B) a temperatura do corpo X diminuirá e a temperatura do corpo Y e do calorímetro aumentarão; (C) quando as temperaturas dos corpos X e Y e do calorímetro se tornarem iguais, o fluxo de calor cessará, pois foi atingido o equilíbrio térmico.

No equilíbrio térmico, uma parte do calor cedido por X (Q_X) é absorvida por Y (Q_Y), e a outra parte, pelo calorímetro (Q); assim, é possível escrever a equação:

$$Q_X + Q_Y + Q = 0$$

Já sabe responder?

Por que alimentos ainda quentes não devem ser levados à geladeira?



RICARDO SIWIEC

No interior de uma geladeira comum, o ar é mantido a uma temperatura que muda de um modelo para outro, mas não varia mais que 5 °C.

ILUSTRAÇÕES: LUIZ RUBIO

Reprodução proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

QUESTÕES RESOLVIDAS

R18 Um experimento realizado com o objetivo de avaliar a capacidade térmica de calorímetros detectou que determinado modelo absorve 75 cal quando sua temperatura interna é elevada a 25 °C. Qual é a capacidade térmica procurada?

► Resolução

A capacidade térmica é a razão do número de calorias absorvidas por grau Celsius de elevação de temperatura. Assim, se $C = \frac{Q}{\Delta T}$, temos:

$$C = \frac{75}{25} \therefore C = 3,0 \text{ cal/}^\circ\text{C}$$

Portanto, a capacidade térmica do calorímetro é igual a 3,0 cal/°C.

R19 O calorímetro da questão anterior estava à temperatura ambiente de 18 °C, quando foram colocados em seu interior 400 g de um líquido à temperatura de 60 °C. Passado algum tempo, ao ser atingido o equilíbrio térmico, verificou-se que a temperatura do líquido havia diminuído 2 °C. Qual é o valor do calor específico desse líquido?

► Resolução

Como a temperatura do líquido diminuiu, a temperatura do calorímetro deve ter aumentado, evidenciando a troca de calor entre eles. O equilíbrio térmico foi atingido em: 60 °C – 2 °C = 58 °C. Portanto, temos os seguintes dados:

Calorímetro: capacidade térmica (C) = 3,0 cal/°C

Variação de temperatura:

$$\Delta T_{\text{calorímetro}} = 58^\circ\text{C} - 18^\circ\text{C} = 40^\circ\text{C}$$

Líquido: massa (m) = 400 g

Variação de temperatura:

$$\Delta T_{\text{liq.}} = 58^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C} = -2^\circ\text{C}$$

Podemos equacionar as trocas de calor da seguinte forma:

$$Q_{\text{liq.}} + Q_{\text{calorímetro}} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m \cdot c \cdot \Delta T_{\text{liq.}} + C \cdot \Delta T_{\text{calorímetro}} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 400 \cdot c \cdot (-2) + 3,0 \cdot 40 = 0$$

$$\therefore c = 0,15 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$$

Portanto, o calor específico do líquido é de 0,15 cal/(g · °C).

R20 Uma massa de 250 g de água a 80 °C é colocada em um calorímetro de capacidade térmica conhecida e igual a 10 cal/°C, que estava à temperatura ambiente de 25 °C. Imediatamente

depois, um pedaço de gelo de 50 g à temperatura de –10 °C é colocado nesse calorímetro. Ao ser atingido o equilíbrio térmico, observa-se que o interior do calorímetro contém apenas água. Qual é a temperatura do equilíbrio térmico no interior do calorímetro?

[Dados: calor específico da água = 1,0 cal/(g · °C); calor específico do gelo = 0,5 cal/(g · °C); calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g]

► Resolução

Todo o gelo sofrerá fusão ao ser colocado na água com temperatura bem maior que a dele. Assim, podemos equacionar:

$$Q_{\text{água}} + Q_{\text{calorímetro}} + Q_{\text{gelo1}} + Q_{\text{gelo2}} + Q_{\text{gelo3}} = 0$$

Agora, vamos calcular separadamente cada parcela da soma acima.

- $Q_{\text{água}}$: quantidade de calor cedida pela água

$$Q_{\text{água}} = m \cdot c \cdot \Delta T = 250 \cdot 1 \cdot (T_f - 80)$$

- $Q_{\text{calorímetro}}$: quantidade de calor absorvida pelo calorímetro

$$Q_{\text{calorímetro}} = C \cdot \Delta T = 10 \cdot (T_f - 25)$$

- Q_{gelo1} : quantidade de calor absorvida a fim de elevar sua temperatura de –10 °C para 0 °C

$$Q_{\text{gelo1}} = m \cdot c \cdot \Delta T = 50 \cdot 0,5 \cdot [0 - (-10)]$$

- Q_{gelo2} : quantidade de calor absorvida durante a passagem do estado sólido ao líquido

$$Q_{\text{gelo2}} = m \cdot L = 50 \cdot 80$$

- Q_{gelo3} : quantidade de calor absorvida para elevar a temperatura da água que se formou com a fusão do gelo (50 g) de 0 °C até a temperatura (T_f) de equilíbrio térmico

$$Q_{\text{gelo3}} = m \cdot c \cdot \Delta T = 50 \cdot 1 \cdot (T_f - 0)$$

Usando o princípio geral das trocas de calor, temos:

$$Q_{\text{água}} + Q_{\text{calorímetro}} + Q_{\text{gelo1}} + Q_{\text{gelo2}} + Q_{\text{gelo3}} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 250 \cdot 1 \cdot (T_f - 80) + 10 \cdot (T_f - 25) +$$

$$+ 50 \cdot 0,5 \cdot [0 - (-10)] +$$

$$+ 50 \cdot 80 + 50 \cdot 1 \cdot (T_f - 0) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 250 T_f - 20.000 + 10 T_f - 250 + 250 +$$

$$+ 4.000 + 50 T_f = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 310 T_f = 16.000 \therefore T_f \approx 51,6^\circ\text{C}$$

Portanto, o equilíbrio térmico foi atingido à temperatura de aproximadamente 51,6 °C.

QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

- 39** Um calorímetro contém 200 mL de água, e o conjunto está à temperatura de 20 °C. Ao colocar no calorímetro uma liga metálica de 125 g a 130 °C, verificamos que, após o equilíbrio térmico, a temperatura final é de 30 °C.

[Dados: calor específico da liga = 0,20 cal/(g · °C); calor específico da água = 1 cal/(g · °C); densidade da água = 1.000 kg/m³]

Determine:

- a) a quantidade de água, em gramas, existente no calorímetro;
- b) a capacidade térmica do calorímetro.

- 40** Em um calorímetro de capacidade térmica conhecida e igual a 8 cal/°C é colocada uma massa de água a 50 °C. Se a temperatura inicial do interior do calorímetro era de 20 °C e, ao final, no equilíbrio térmico, sua temperatura era de 48 °C, qual é o valor da massa de água nele colocada?

[Dado: $c_{\text{água}} = 1,0 \text{ cal/(g} \cdot \text{°C)}$]

- 41** Uma massa de 200 g de um líquido de calor específico igual a 0,65 cal/(g · °C) é colocada em um calorímetro de capacidade térmica conhecida e igual a 10 cal/°C que tem, inicialmente, temperatura interna de 30 °C. Ao se estabelecer o equilíbrio térmico, verifica-se que a temperatura do líquido é igual a 45 °C. Qual era a temperatura do líquido no momento em que foi colocado no calorímetro?

- 42** Uma garrafa térmica tem capacidade de 600 mL e está aberta, de modo que sua temperatura interna é igual à do ambiente, 24 °C. Ao encher completamente essa garrafa com leite, de calor específico 0,6 cal/(g · °C) e temperatura 64 °C, verifica-se que depois de algum tempo, ao ser atingido o equilíbrio térmico, a temperatura do leite é igual a 60 °C. Qual é a capacidade térmica, em cal/°C, dessa garrafa?

[Dado: densidade do leite = 1,2 g/mL]

- 43** Inicialmente, 50 g de gelo a 0 °C são colocados em um calorímetro de alumínio, também a 0 °C. Em seguida, 80 g de água a 70 °C são despejados nesse recipiente. Calcule a temperatura final do conjunto.

[Dados: calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g; calor específico da água = 1,0 cal/(g · °C); capacidade térmica do calorímetro = 8 cal/°C]

- 44** (PUC-RJ) Uma barra metálica, que está sendo trabalhada por um ferreiro, tem uma massa $M = 2,0 \text{ kg}$ e está a uma temperatura T_i . O calor específico do metal é $c_M = 0,10 \text{ cal/(g} \cdot \text{°C)}$. Suponha que o ferreiro mergulhe a barra em um balde contendo 10 litros de água a 20 °C. A temperatura da água do balde sobe 10 °C com relação à sua temperatura inicial ao chegar ao equilíbrio.

Calcule a temperatura inicial T_i da barra metálica.

[Dado: $c_{\text{água}} = \text{cal/(g} \cdot \text{°C)}$ e $d_{\text{água}} = 1,0 \text{ g/cm}^3$]

- a) 500 °C
- b) 220 °C
- c) 200 °C
- d) 730 °C
- e) 530 °C

- 45** (Enem) Aquecedores solares usados em residências têm o objetivo de elevar a temperatura da água até 70°C. No entanto, a temperatura ideal da água para um banho é de 30 °C. Por isso, deve-se misturar a água aquecida com a água à temperatura ambiente de um outro reservatório, que se encontra a 25 °C.

Qual a razão entre a massa de água quente e a massa de água fria na mistura para um banho à temperatura ideal?

- a) 0,111
- b) 0,125
- c) 0,357
- d) 0,428
- e) 0,833

Observar a fusão do gelo

Nesta unidade, aprendemos que, geralmente, as substâncias são encontradas nos estados sólido, líquido ou gasoso. Isso acontece porque, quando os corpos atingem uma temperatura específica, há uma mudança na energia do sistema e as partículas passam por uma reorganização espacial.

A mudança de estado ocorre com frequência no cotidiano; por exemplo, ao ferver a água para fazer chá, percebemos a formação de bolhas de gás; ao deixar a manteiga fora da geladeira, observamos que ela amolece; ao esquecer uma garrafa de refrigerante no *freezer*, percebemos que a bebida congela; ou, ainda, quando percebemos que o refrigerante fica mais aguado depois que as pedras de gelo em seu interior derretem. O objetivo do experimento a seguir é observar o gelo em fusão, como no exemplo do refrigerante. Para isso, colocaremos pedras de gelo coloridas no óleo para observar o processo.

Materiais

- Uma garrafa PET descartável de 1,5 L ou mais
- Tesoura
- 1 L de óleo de cozinha
- 1 sachê de suco artificial em pó (de preferência, de cor escura, como sabor uva) ou corante culinário escuro
- Uma forma para gelo
- 200 mL de água

Montagem e procedimento

Junte o suco em pó ou o corante à água, mexa até a mistura ficar homogênea e coloque na forma para gelo. Leve ao *freezer* e espere congelar.

Enquanto isso, corte cuidadosamente com a tesoura o gargalo da garrafa PET e despeje dentro dela todo o óleo de cozinha.

Quando as pedras de gelo estiverem prontas, tire-as da forma e coloque algumas delicadamente dentro da garrafa PET com o óleo. Não mexa mais no recipiente e comece a observar.

Questões

- 1 As pedras de gelo afundaram? Justifique sua resposta.
- 2 O que aconteceu com o gelo? Explique sob o ponto de vista de trocas de calor entre os corpos.
- 3 O que houve com o gelo imediatamente após as pedras serem colocadas no óleo?
- 4 Ao se formar, as gotas de água vão para o fundo do recipiente. Por quê?
- 5 O gelo, quando derrete, forma gotas de água. Essas gotas, porém, não se misturam com o óleo. Com seus colegas, pesquise em livros de química ou na internet por que isso não acontece.



BETO CELLI

Chuva de gelo

O granizo se forma nos cúmulos-nimbos, nuvens geralmente escuras e carregadas, que atingem quilômetros de altura e contêm centenas de toneladas de gotas de água e cristais de gelo.

Um cúmulo-nimbo pode chegar ao limite da troposfera, camada que concentra a vida na Terra, com aproximadamente 10 km de altura.



Em média, de 5 km de altitude até o topo da troposfera, a temperatura varia de -20°C a -60°C . Nessa faixa, o cúmulo-nimbo é basicamente composto de cristais de gelo.



Em altitudes onde a temperatura varia de 0°C a -20°C , o cúmulo-nimbo contém água em estado líquido e sólido.



A base da nuvem, que é composta principalmente de gotículas em suspensão, se forma entre algumas centenas de metros do solo até **cerca** de 3 km de altura.

A massa de ar ascendente desloca o ar frio do **topo** da nuvem para a base.

Em dias muito quentes, essa corrente de ar convectiva pode se mover a aproximadamente 100 km/h.

Ao perder calor, o vapor da massa de ar ascendente se condensa, alimentando a nuvem.

O cúmulo-nimbo é formado pelo fluxo ascendente de ar quente e úmido.

Fontes: Estação Meteorológica do IAG/USP *Perguntas e respostas*. Disponível em: <www.estacao.iag.usp.br/didatico/index.php>. Acesso em: 19 jan. 2016. Universidade Federal de Santa Catarina; Ceped. *Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010*. Florianópolis: UFSC, 2012.

Região Sul é a mais atingida

Nas décadas de 1990 e 2000, houve 1.369 chuvas de granizo no Brasil que causaram grandes estragos. Segundo a Secretaria Nacional de Defesa Civil, quase 88% desses desastres ocorreram na região Sul, onde 37,7 mil pessoas ficaram desabrigadas, 1,7 mil feridas e 13 mortas. A região Sudeste foi a segunda mais atingida, com 11% das ocorrências. A maior parte das fortes chuvas de granizo ocorrem na primavera e no verão.



Desastres naturais causados por granizo – 1991/2000

Número de desastres por mesorregião



Um granizo começa como um pequeno cristal de gelo que despenca pela nuvem.

Ao ser apanhado por um fluxo de ar ascendente, o cristal de gelo volta às regiões geladas, e as gotículas de água, acumuladas na sua superfície, se solidificam.

Nesse sobe e desce nas correntes de convecção, o granizo vai acumulando massa até despençar em direção ao solo.

Ao atravessar regiões da nuvem que concentram grandes quantidades de gotículas, o gelo se choca com elas, que vão se acumulando na sua superfície.

ERIC NGUYEN/CORBIS/LATINSTOCK



Observe as camadas de gelo nesse granizo, que foi cortado ao meio para ser estudado. Para atingir esse tamanho, ele deve ter dado muitas voltas no interior do cúmulo-nimbo.

AMPLIANDO SUA LEITURA

- 1 Qual dos processos de propagação do calor é o principal responsável pela formação dos granizos no interior das nuvens?
- 2 Por que se formam anéis concêntricos de gelo no interior de um granizo?

1 (UFPR) Analise as seguintes afirmações sobre conceitos de Termologia:

I. Calor é uma forma de energia.

II. Calor é o mesmo que temperatura.

III. A grandeza que permite informar se dois corpos estão em equilíbrio térmico é a temperatura.

Está(ão) correta(s) apenas:

a) I

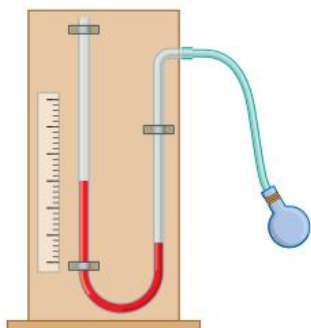
b) II

c) III

d) I e II

e) I e III

2 (Vunesp) Um termoscópio é um dispositivo experimental, como o mostrado na figura, capaz de indicar a temperatura a partir da variação da altura da coluna de um líquido que existe dentro dele. Um aluno verificou que, quando a temperatura na qual o termoscópio estava submetido era de 10°C , ele indicava uma altura de 5 mm. Percebeu ainda que, quando a altura havia aumentado para 25 mm, a temperatura era de 15°C .



Quando a temperatura for de 20°C , a altura da coluna de líquido, em mm, será de:

a) 25

b) 30

c) 35

d) 40

e) 45

3 (UFBA) A areia de uma praia sofre um aquecimento de 40°C . Se este aquecimento fosse acompanhado pela escala Fahrenheit qual seria a variação nesta escala?

4 (Enem) Uma garrafa de vidro e uma lata de alumínio, cada uma contendo 330 mL de refrigerante, são mantidas em um refrigerador pelo mesmo longo período de tempo. Ao retirá-las do refrige-

rador com as mãos desprotegidas, tem-se a sensação de que a lata está mais fria que a garrafa. É correto afirmar que:

a) a lata está realmente mais fria, pois a capacidade calorífica da garrafa é maior que a da lata.

b) a lata está de fato menos fria que a garrafa, pois o vidro possui condutividade menor que o alumínio.

c) a garrafa e a lata estão à mesma temperatura, possuem a mesma condutividade térmica, e a sensação deve-se à diferença nos calores específicos.

d) a garrafa e a lata estão à mesma temperatura, e a sensação é devida ao fato de a condutividade térmica do alumínio ser maior que a do vidro.

e) a garrafa e a lata estão à mesma temperatura, e a sensação é devida ao fato de a condutividade térmica do vidro ser maior que a do alumínio.

5 (OPF-SP) É muito comum acontecer de, quando copos iguais são empilhados, colocando-se um dentro do outro, dois deles ficarem emperrados, tornando-se difícil separá-los. Considerando o efeito da dilatação térmica, pode-se afirmar que é possível retirar um copo de dentro do outro se:

a) os copos emperrados forem mergulhados em água bem quente.

b) no copo interno for despejada água quente e o copo externo for mergulhado em água bem fria.

c) os copos emperrados forem mergulhados em água bem fria.

d) no copo interno for despejada água fria e o copo externo for mergulhado em água bem quente.

e) não é possível separar os dois copos emperrados considerando o efeito de dilatação térmica.

6 (UEL-PR) O coeficiente de dilatação linear do aço é $1,1 \cdot 10^{-5} ^\circ\text{C}^{-1}$. Os trilhos de uma via férrea têm 12 m cada um na temperatura de 0°C . Sabendo-se que a temperatura máxima na região onde se encontra a estrada é 40°C , o espaçamento mínimo entre dois trilhos consecutivos deve ser, aproximadamente, de:

a) 0,40 cm

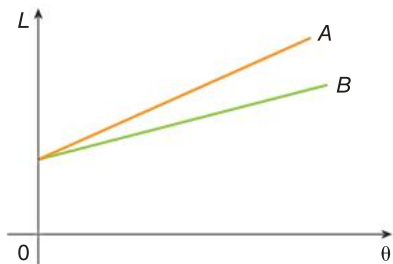
b) 0,44 cm

c) 0,46 cm

d) 0,48 cm

e) 0,53 cm

7 (UFU-MG) O gráfico a seguir representa o comprimento L , em função da temperatura θ , de dois fios metálicos finos, A e B.



Com base nessas informações, é correto afirmar que:

- os coeficientes de dilatação lineares dos fios A e B são iguais.
- o coeficiente de dilatação linear do fio B é maior que o do fio A.
- o coeficiente de dilatação linear do fio A é maior que o do fio B.
- os comprimentos dos dois fios em $\theta = 0$ são diferentes.

- 8** (Udesc) Um recipiente para líquidos com capacidade para 120 litros é completamente cheio a uma temperatura de 10°C . Esse recipiente é levado para um local onde a temperatura é de 30°C . Sendo o coeficiente de dilatação volumétrica do líquido igual a $1,2 \times 10^{-3} (\text{°C})^{-1}$, e considerando desprezível a variação de volume do recipiente, a quantidade de líquido derramado em litros é:

- 0,024
- 0,24
- 2,88
- 4,32
- 5,76

- 9** (UFRGS-RS) Um sistema consiste em um cubo de 10 g de gelo, inicialmente à temperatura de 0°C . Esse sistema passa a receber calor proveniente de uma fonte térmica e, ao fim de algum tempo, está transformado em uma massa de 10 g de água a 20°C . Qual foi a quantidade de energia transferida ao sistema durante a transformação?

[Dados: calor de fusão do gelo = $334,4 \text{ J/g}$; calor específico da água = $4,18 \text{ J/(g} \cdot \text{°C)}$]

- 418 J
- 836 J
- 4,18 kJ
- 6,77 kJ
- 8,36 kJ

- 10** (UEA-AM) O aquecimento solar de água para banho é uma solução energética ecológica e econômica. Sistemas como esses, em dias de baixa insolação, devem compensar a falta de insolação solar com o acionamento de resistores elétricos dentro dos *boilers*, recipientes dentro dos quais a água é mantida aquecida. Um desses *boilers*, de capacidade 100 L, reteve a água a 24°C e, por isso, um termostato teve que acionar o resistor elétrico para que a temperatura fosse elevada para 32°C . Sendo

o calor específico da água $1 \text{ cal/(g} \cdot \text{°C)}$, 1 cal igual a 4,2 J e a densidade da água igual a 10^3 g/L , a energia elétrica, em J, que teve de ser empregada para promover esse aquecimento foi, aproximadamente:

- 420.000
- 860.000
- 3.400.000
- 3.800.000
- 5.300.000

- 11** (UFPI) Um aquecedor tem potência útil constante de 500 W. Ele é usado para elevar de 10°C a temperatura de uma panela de alumínio, que contém 1 litro de água à temperatura ambiente. A panela tem massa de 1 kg. O tempo gasto para esse aquecimento é dado, aproximadamente, por:

[Dados: calor específico da água $c_{\text{água}} = 1 \text{ cal/(g} \cdot \text{°C)}$; calor específico do alumínio $c_{\text{al}} = 0,22 \text{ cal/(g} \cdot \text{°C)}$; densidade da água $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$; $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$]

- 0,7 min
- 1,7 min
- 2,7 min
- 3,7 min
- 4,7 min

- 12** (Fuvest-SP) Dispõe-se de água a 80°C e gelo a 0°C . Deseja-se obter 100 g de água a uma temperatura de 40°C (após o equilíbrio), misturando água e gelo em um recipiente isolante e com capacidade térmica desprezível. Sabe-se que o calor específico latente de fusão do gelo é 80 cal/g e o calor específico sensível da água é $1,0 \text{ cal/(g} \cdot \text{°C)}$. A massa de gelo a ser utilizada é:

- 5,0 g
- 12,5 g
- 25 g
- 33 g
- 50 g

- 13** (UFT-TO) Considere que os calores específicos do gelo e da água são constantes e valem $2,05 \cdot 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ e $4,18 \cdot 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, respectivamente. O calor latente de fusão e o calor latente de vaporização da água são $333,5 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$ e $2257 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$, respectivamente. Baseado nessas informações, pode-se dizer que o valor que melhor representa a quantidade mínima de calor necessária para transformar 10 g de gelo a 0°C , sujeito a uma pressão de 1 atm, em vapor, é de:

- $22,57 \cdot 10^3 \text{ J}$
- $52,07 \cdot 10^3 \text{ J}$
- $42,18 \cdot 10^3 \text{ J}$
- $30,09 \cdot 10^3 \text{ J}$
- $35,05 \cdot 10^3 \text{ J}$

- 14** (UPE) Qual massa de gelo a 0°C deve ser misturada com 100 g de água a 80°C , para que a temperatura de equilíbrio seja de 20°C , sabendo-se que o calor específico da água vale $1 \text{ cal/(g} \cdot \text{°C)}$ e que o calor latente de fusão da água vale 80 cal/g ?

- 30 g
- 60 g
- 72 g
- 120 g
- 180 g

UNIDADE

2

Gases e Termodinâmica

Para começo de conversa

Se a energia se conserva, por que precisamos economizá-la?



S1

Professor, consulte o *Suplemento* para obter orientações sobre a questão introdutória, os objetivos desta unidade e a proposta de abordagem inicial dos conteúdos.

A economia de energia e a conservação da energia são conceitos diferentes, porém muitas vezes se confundem. O ato de economizar energia está diretamente relacionado à capacidade de geração das usinas em determinados períodos e ao custo do fornecimento que, em muitos casos, tem peso significativo no orçamento das famílias ou das indústrias. A conservação de energia refere-se à transformação entre diferentes formas de energia, quando algum processo é realizado, seja mecânico, elétrico, seja acústico, para o qual sempre se deve considerar a impossibilidade de conversões com 100% de eficiência.

Locomotiva a vapor restaurada, utilizada em viagens turísticas. Inglaterra, 2014.

A revolução do vapor

Pode parecer exagero afirmar que a utilização da água foi um dos elementos mais importantes para a Revolução Industrial, ocorrida a partir do século XVIII na Europa. Mas o exagero desaparece quando lembramos que o principal fator das mudanças no modo de produção daquela época foi o aproveitamento do vapor de água no funcionamento das máquinas a vapor, aperfeiçoadas por James Watt, por volta de 1765. Nos motores movidos a vapor, a água é aquecida até mudar para o estado de vapor. Esse vapor é comprimido e, em seguida, expulso, de forma semelhante ao que ocorre com o ar armazenado em uma bexiga de borracha. A força do vapor expulso da região de alta pressão é utilizada para mover rodas, teares, marteletes e até turbinas de uma usina termelétrica.

S2

No *Suplemento*, há uma sugestão de atividade com o objetivo de simular o **modelo** da matéria gasosa como um **sistema** de partículas. Essa atividade pode servir de introdução ao estudo dos gases desenvolvido no **Capítulo 6**, a seguir.

Capítulos

- 6 Estudo dos gases e a equação de um gás ideal
- 7 1ª lei da Termodinâmica
- 8 2ª lei da Termodinâmica

Estudo dos gases e a equação de um gás ideal

ou: Por que não é aconselhável calibrar os pneus após percorrer grandes distâncias?

 S3

No *Suplemento*, você encontra orientações para o trabalho com a questão introdutória.

Após percorrer grandes distâncias, os pneus dos veículos ficam muito aquecidos devido às contínuas fricções sobre a superfície percorrida. Considerando desprezíveis as alterações em seus volumes, o aumento de temperatura nos pneus acarreta o aumento de sua pressão interna.

Se considerarmos o ar colocado dentro dos pneus como um gás ideal e como isométrica (isocórica) a transformação gasosa ocorrida, então as variáveis de estado, pressão e temperatura serão grandezas diretamente proporcionais, ou seja, se a temperatura aumenta, a pressão também aumenta. Dessa forma, ao calibrar um pneu muito aquecido, certa quantidade de ar tenderá a ser ejetada, pois, devido ao aquecimento, a pressão interna será maior que a do pneu frio. Assim, para calibrar os pneus adequadamente, eles não devem estar aquecidos.

1 Introdução

Em diversas situações, a matéria está no estado físico gasoso. O ar que respiramos ou o ar quente contido em balões estão no estado gasoso (fig. 1), assim como o vapor presente no interior de certas lâmpadas.

Diferentemente do que ocorre com a matéria no estado sólido ou no líquido, a maioria dos gases é incolor. Além disso, os sólidos e os gases apresentam outras diferenças. Os gases se expandem facilmente e ocupam todo o espaço do reservatório que os contém, o que não ocorre com os sólidos. Comprimir um corpo sólido é bastante difícil na maioria dos casos, mas é possível comprimir os gases com certa facilidade. Expansão, compressão, dureza são apenas algumas das propriedades que permitem diferenciar gases de materiais sólidos.

Neste capítulo, vamos estudar o comportamento dos gases, as alterações de suas grandezas físicas e as leis experimentais relacionadas às transformações gasosas.

Figura 1 • O ar quente, menos denso que o ar do ambiente, é o agente responsável pela flutuação dos grandes balões.



2 O estado gasoso

As moléculas que formam os gases estão distantes umas das outras, por isso apresentam forças de coesão pouco intensas, grande agitação e movimento aleatório devido aos constantes choques que ocorrem em inúmeras direções e velocidades. Por sua grande agitação (energia cinética), as moléculas de um gás tendem a se distanciar umas das outras, mantendo uma distância maior que a das moléculas dos líquidos e sólidos; conseqüentemente, sua força de atração molecular é fraca.

Podemos caracterizar um gás por meio de três grandezas: pressão (p), volume (V) e temperatura (T). Tais grandezas, a ele associadas em determinado instante, são denominadas **variáveis de estado**. Vamos verificar o que acontece, por exemplo, com determinada massa de gás contida em um cilindro acoplado a um êmbolo que se movimenta livremente.

À medida que o êmbolo é empurrado para baixo (fig. 2A), o volume ocupado pela massa de gás diminui e a pressão aumenta. Porém, quando o êmbolo é puxado para cima (fig. 2B), o volume da massa gasosa aumenta e a pressão por ela exercida diminui. Nesses casos, se o sistema for isolado e não houver vazamento de moléculas para o meio externo, nem tempo para haver trocas de calor com o meio exterior, a temperatura interna do sistema poderá sofrer alteração.

Quando determinada massa de gás sofre, de alguma maneira, modificação em uma de suas três variáveis de estado (pressão, volume e temperatura), dizemos que o gás passa por uma **transformação gasosa**. Ocorre transformação gasosa, por exemplo, quando uma massa de hidrogênio é comprimida, de modo a aumentar sua pressão, ou quando sua temperatura é diminuída por um agente externo.

Gás ideal

A busca pela explicação das propriedades e leis dos gases com base nas leis de Newton é o objetivo da **teoria cinética dos gases**. Essa teoria, que possibilitou a obtenção de expressões matemáticas relacionando grandezas físicas como pressão, volume e temperatura, se baseia nas seguintes suposições:

- Os gases são constituídos por um número extremamente grande de partículas (átomos e moléculas).
- As distâncias médias entre as moléculas componentes de um gás são muito maiores do que as dimensões de qualquer uma dessas moléculas.
- As moléculas de um gás se movimentam constantemente, em um movimento aleatório. Elas se movimentam em qualquer direção e com velocidades diferentes, ocupando todo o espaço disponível. Assim, o volume ocupado pelo gás será equivalente ao volume do recipiente onde estiver contido.
- As interações entre as moléculas de um gás só ocorrem quando essas partículas colidem entre si.
- As colisões entre as moléculas de um gás ou entre as moléculas do gás e as paredes do recipiente que o contém são choques perfeitamente elásticos. Dessa maneira, não há perda de energia cinética total do sistema, ou seja, há conservação da energia cinética total do sistema.

O conjunto dessas hipóteses estabelecidas pelos cientistas tornou possível a estruturação de um modelo de gás, denominado **gás ideal**, no qual as moléculas são tratadas como partículas (fig. 3). Esse modelo se fundamenta na ideia de que as leis que regem o comportamento dos gases ideais podem ser obtidas por meio da aplicação das leis da mecânica newtoniana ao movimento dessas partículas.

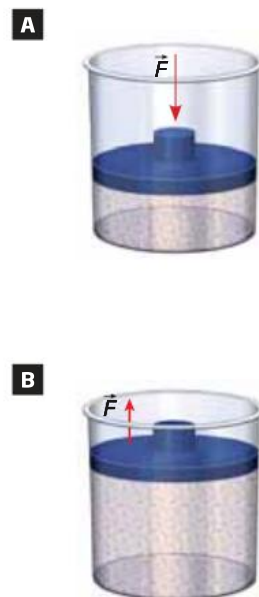


Figura 2 • A força aplicada ao êmbolo para baixo (A) ou para cima (B) altera as variáveis de estado do gás.

ILUSTRAÇÕES: SELMA CAPARROZ

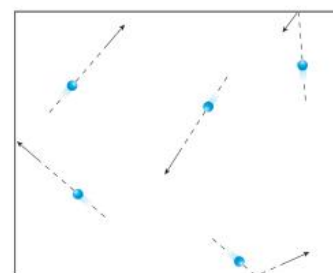


Figura 3 • As partículas de um gás ideal apresentam movimentação perfeitamente livre, ocupando todo o espaço disponível e interagindo apenas durante as colisões.

LUÍZ RÚBIO

IAN HOOTON/SCIENCE
PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

Durante procedimentos cirúrgicos, podem ser utilizadas substâncias anestésicas na forma de gás.

ROBERT BROOKS/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK



O gás liquefeito de petróleo (GLP) é um combustível que pode ser armazenado de forma segura em instalações adequadas. Empregado tanto em residências (em fogões) quanto em indústrias, o GLP é uma mistura de propano, butano e isobutano, gases derivados do petróleo que se liquefazem sob pressão moderada.

O gás carbônico, ou dióxido de carbono (CO_2), é produzido pela respiração celular tanto de organismos animais quanto vegetais. Todas as formas de combustão, naturais (como os incêndios florestais) ou não (como certos processos industriais), também produzem esse gás poluente, um dos responsáveis pelo efeito estufa.



DENIS CLARLET/AFP

RUSSEL CROMAIN/SCIENCE PHOTO LIBRARY/
LATINSTOCK

As nebulosas são constituídas de poeira e gases, geralmente hidrogênio (H_2) misturado a hélio (He).

AMPLIANDO SUA LEITURA

- Um vento forte é capaz de levantar uma "nuvem" de poeira. Nesse caso, podemos afirmar que o material que compõe essa "nuvem" está no estado gasoso?

3 Transformações gasosas

As transformações gasosas acontecem quando ocorre a alteração de uma ou mais das variáveis de estado (pressão, volume ou temperatura) de um sistema que contenha um gás. Desde o século XVII, estudos experimentais identificaram leis matemáticas que descrevem as relações de dependência entre as variáveis de estado nas transformações envolvendo gases. Vamos estudar três dessas transformações: a isotérmica, a isobárica e a isovolumétrica.

- Na transformação **isotérmica**, a temperatura do sistema gasoso permanece constante.
- Na transformação **isobárica**, a pressão é mantida constante.
- Se o volume permanecer constante durante a transformação ocorrida com o gás, a transformação será denominada **isovolumétrica**, **isométrica** ou **isocórica**.

S4

No **Suplemento**, há uma sugestão de trabalho com o uso de objetos virtuais de aprendizagem.

Transformação isotérmica

Convém mostrar aos alunos a importância do uso do método experimental para o estabelecimento das leis dos gases.

As transformações em que a temperatura de um gás permanece constante são denominadas **isotérmicas**. Como a temperatura (T) é a variável de estado que permanece constante, vamos analisar o que acontece durante a transformação com as outras duas variáveis: volume (V) e pressão (p).

No final do século XVII, o químico irlandês Robert Boyle (1627-1691) realizou uma série de experiências utilizando um tubo em U fechado apenas em uma das extremidades (fig. 4). Ele preencheu esse dispositivo com mercúrio, a fim de aprisionar determinado volume de ar no ramo fechado.

Pelo ramo aberto do tubo, Boyle alterava a quantidade de mercúrio no sistema, o que lhe permitiu observar variações no volume do ar retido no ramo fechado e medir os valores da pressão dessa mistura gasosa por meio do desnível entre as duas colunas de mercúrio.

A tabela 1 mostra alguns pares de valores de pressão e de volume de uma massa de ar obtidos em um dos experimentos de Boyle.

Nesses dados, podemos observar que o produto $p \times V$ é aproximadamente constante. Isso indica que, nas transformações isotérmicas, se o volume V do gás for reduzido à metade (de 48 para 24 unidades, por exemplo), a pressão por ele exercida será duplicada (de 29 para 58 polegadas de mercúrio). Se o volume do gás for reduzido a um terço (de 48 para 16 unidades), a pressão por ele exercida terá seu valor triplicado (de 29 para 87 polegadas de mercúrio).

Em seus vários experimentos, Boyle observou que a relação de dependência entre pressão e volume se mantinha sempre que a temperatura não sofria variação. Assim, ele concluiu que, nas transformações isotérmicas, pressão e volume, variáveis de estado, são inversamente proporcionais. Esse resultado, conhecido como **lei de Boyle** (ou de **Boyle-Mariotte**), pode ser assim enunciado:

Nas transformações isotérmicas (em temperatura constante), a pressão exercida por um gás ideal é inversamente proporcional ao seu volume. Nessa condição, a equação matemática que relaciona p e V é:

$$p \cdot V = k$$

em que k é uma constante dependente da temperatura na qual a transformação isotérmica ocorre.

Considerando dois estados, A e B , de uma amostra qualquer de gás ideal sofrendo uma transformação isotérmica, é possível concluir que:

$$p_A \cdot V_A = p_B \cdot V_B$$

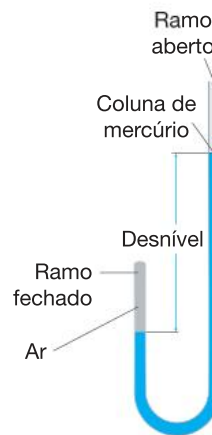


Figura 4 • Esquema do dispositivo experimental utilizado por Boyle para estudar a dependência entre o volume e a pressão do ar em uma transformação a temperatura constante.

Tabela 1

Volume (unidade arbitrária)	Pressão (polegadas de mercúrio)	$p \times V$
48	$29 \frac{2}{16}$	1.398
40	$35 \frac{5}{16}$	1.413
32	$44 \frac{3}{16}$	1.414
24	$58 \frac{13}{16}$	1.412
16	$87 \frac{14}{16}$	1.406
12	$117 \frac{9}{16}$	1.411

(Dado: 1 pol de Hg \approx 5,25 Pa)

ILUSTRAÇÕES: SELMA CAPARROZ

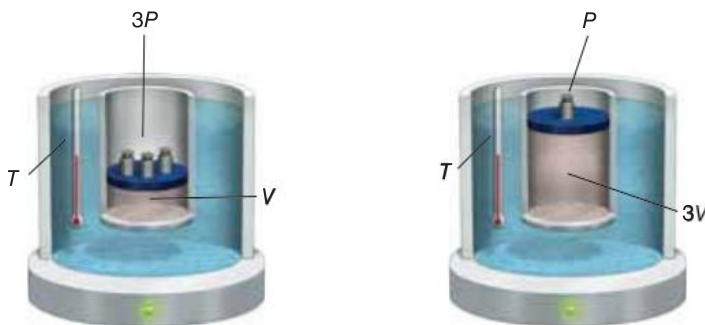


Figura 5 • Nas transformações isotérmicas, se o volume do gás aumenta, a pressão diminui. O experimento esquematizado é realizado em um cilindro acoplado a um êmbolo sobre o qual podem ser colocados pesos conhecidos. O cilindro fica mergulhado em água continuamente renovada de tal modo que sua temperatura se mantenha intencionalmente constante. Considere que experimentos como esse são realizados em sistemas onde não ocorre vazamento de moléculas para o meio externo.

LUÍZ RUBIO

A representação geométrica em um plano $p \times V$ (pressão no eixo das ordenadas e volume no das abscissas) de uma transformação isotérmica é uma hipérbole. Quanto maior o produto $p \cdot V$ de uma transformação gasosa em temperatura constante, mais afastada dos eixos estará a hipérbole que representa geometricamente a transformação (fig. 6). As hipérboles construídas no plano $p \times V$ recebem o nome de **isotermas**.

Transformação isobárica

Uma transformação em que a pressão exercida pelo gás se mantém constante é denominada **isobárica**. O físico francês Jacques Charles (1746-1823) formulou a lei que sintetiza a relação de dependência entre volume e temperatura, variáveis de estado, nas transformações isobáricas. A confirmação experimental da lei formulada por Charles foi realizada pelo físico e químico francês Joseph-Louis Gay-Lussac (1778-1850), no início do século XIX.

Charles e Gay-Lussac constataram que, se a temperatura (em kelvin) a que o gás estiver submetido duplicar, o volume ocupado pelo gás também duplicará. Se a temperatura triplicar, o volume da massa de gás também será o triplo da inicial. Eles puderam então concluir que, nas transformações gasosas sob pressão constante, o volume ocupado pelo gás é diretamente proporcional à sua temperatura (em kelvin). Em um plano $V \times T$ (volume por temperatura absoluta), a relação entre essas duas grandezas é representada por uma reta que está alinhada com a origem, embora não passe por ela (fig. 7).

A **lei de Charles** (também conhecida como **lei de Charles e Gay-Lussac**) pode ser assim enunciada:

Nas transformações isobáricas (sob pressão constante), o volume ocupado por um gás é diretamente proporcional à sua temperatura absoluta (em kelvin). Nessas condições, a expressão matemática que relaciona V e T é:

$$V = k \cdot T$$

em que k é uma constante dependente da pressão na qual a transformação isobárica ocorre.

Considerando dois estados, A e B , de uma amostra qualquer de gás ideal sofrendo uma transformação à pressão constante, é possível concluir que:

$$\frac{V_A}{T_A} = \frac{V_B}{T_B}$$

O zero absoluto

A partir dos resultados obtidos nos experimentos de Charles e Gay-Lussac para transformações isobáricas, também podemos construir um gráfico representando a variação do volume pela temperatura em graus Celsius.

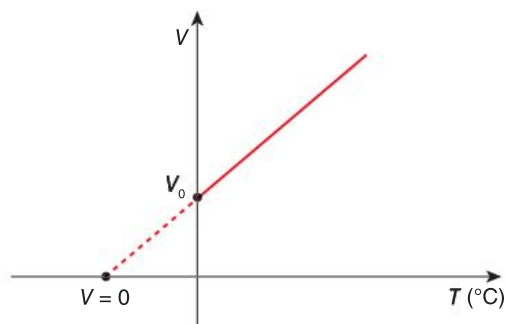


Figura 8 • Sob pressão constante, a variação do volume de determinada massa gasosa é linear em função da temperatura.

Analise cuidadosamente com os alunos o significado das curvas isotermas no plano $p \times V$. Esse tipo de representação é pouco conhecido por eles.

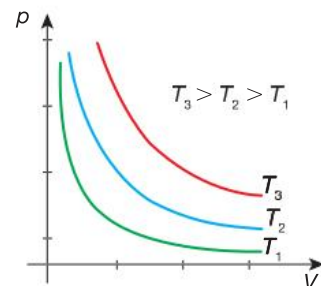


Figura 6 • Gráfico da pressão \times volume para uma transformação isotérmica.

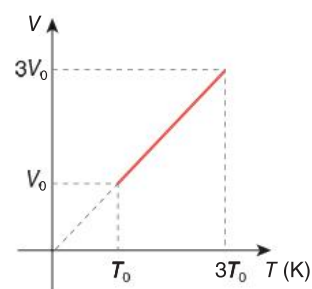


Figura 7 • Gráfico do volume \times temperatura para uma transformação isobárica.

Observe, nesse gráfico, que, sob pressão constante, a variação do volume de determinada massa gasosa é linear em função da temperatura. Veja ainda que, a 0 °C, essa massa ocupa um volume V_0 . Analisando o gráfico, podemos realizar a seguinte extrapolação: qual seria o valor da temperatura equivalente a um volume nulo da massa gasosa? Prolongando a reta que representa a variação $V \times T$ (°C) no gráfico, obtemos o valor $T = -273,15$ °C, que corresponde à temperatura considerada o **zero absoluto** na escala Kelvin, com isso, podemos interpretar que no zero absoluto não haveria nenhuma agitação molecular, pois o volume do gás seria nulo.

Transformação isovolumétrica

Mantendo constante o volume de determinada massa gasosa e aumentando sua temperatura, é possível observar que a pressão do gás aumenta de modo diretamente proporcional à temperatura. Transformações desse tipo são denominadas **isovolumétricas, isométricas** ou **isocóricas**.

O gráfico da figura 9, a seguir, mostra a relação de proporcionalidade direta entre as grandezas p e T nas transformações gasosas que ocorrem sob volume constante.

A relação de proporcionalidade direta entre as grandezas p e T nas transformações isovolumétricas é conhecida por **lei de Charles para transformações a volume constante** e pode ser assim enunciada:

Nas transformações isovolumétricas (a volume constante), a pressão do gás é diretamente proporcional à sua temperatura absoluta. Nessa condição, a equação matemática que relaciona p e T é:

$$p = k \cdot T$$

em que k é uma constante dependente do volume de gás utilizado na transformação gasosa.

Considerando dois estados, A e B , de uma amostra qualquer de gás ideal sofrendo uma transformação à pressão constante, é possível concluir que:

$$\frac{p_A}{T_A} = \frac{p_B}{T_B}$$

Considere um recipiente que contenha uma massa gasosa com um êmbolo fixo em uma mesma posição. Se aumentarmos a temperatura dessa massa gasosa, aumentaremos o grau de agitação das moléculas constituintes do gás. Como o volume do recipiente permanece constante, as colisões das moléculas entre si e das moléculas com as paredes do recipiente aumentam, o que resulta em um aumento da pressão do gás.

Se ocorresse uma diminuição da temperatura, haveria uma diminuição do grau de agitação molecular. Mantido o volume do recipiente, as colisões entre as partículas componentes da massa gasosa diminuem e, assim, diminui a pressão do gás.

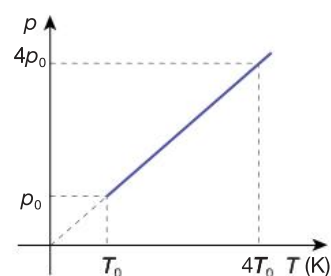


Figura 9 • Gráfico da pressão \times temperatura para uma transformação isocórica.

QUESTÕES RESOLVIDAS

R1 Entre as atividades físicas que pratica em uma academia de ginástica, uma moça faz exercícios sobre uma bola calibrada inicialmente com pressão de 2×10^5 N/m² e à temperatura ambiente de 27 °C. Ao finalizar os exercícios, observa-se que a

variação de volume da bola foi desprezível, mas que sua temperatura aumentou 3 °C. Considere o ar contido na bola como um gás ideal.

a) A pressão interna final da bola é maior, menor ou igual à sua pressão inicial?

- b) Qual é o valor da pressão interna final da bola?
- c) Esboce o gráfico $p \times T$, que representa a transformação ocorrida com a mistura gasosa do interior da bola.

Resolução

a) Considerando constante o volume do ar contido na bola, o aumento de temperatura implica o aumento de pressão, de acordo com a lei de Charles para transformações a volume constante.

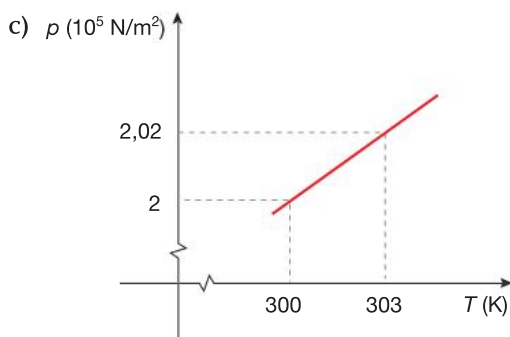
b) Dados: $p_A = 2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $T_A = 27^\circ\text{C} = 300 \text{ K}$; $T_B = 30^\circ\text{C} = 303 \text{ K}$, temos:

$$\frac{p_A}{T_A} = \frac{p_B}{T_B} \Rightarrow \frac{2 \times 10^5}{300} = \frac{p_B}{303} \Rightarrow$$

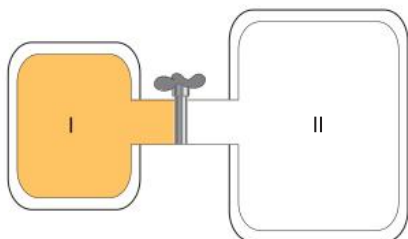
$$\Rightarrow p_B = \frac{303 \times 2 \times 10^5}{300}$$

$$\therefore p_B = 2,02 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

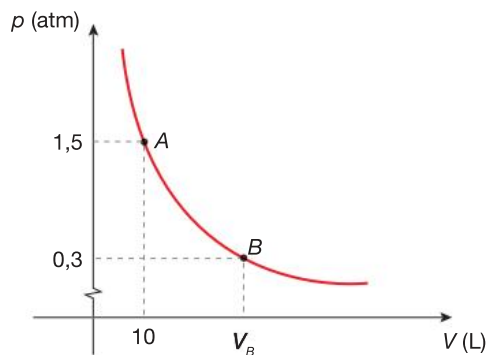
Constata-se, portanto, que o aumento de 3 K em relação aos 300 K iniciais corresponde a 1%, o que implica aumento de mesma ordem na pressão inicial, que passa de $2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ para $2,02 \times 10^5 \text{ N/m}^2$.



R2 Determinada massa gasosa está contida inicialmente em um recipiente I, rígido, de 10 L de capacidade, sob pressão de 1,5 atm. Um tubo de volume desprezível, rígido e com uma torneira, liga o recipiente I a outro, II, também rígido e de volume desconhecido.



Inicialmente vazio, o recipiente II fica totalmente preenchido pela massa gasosa após a abertura da torneira do tubo que une os recipientes. O gráfico a seguir representa a pressão e o volume da massa gasosa do estado inicial A até o estado final B, quando o recipiente II fica plenamente preenchido.



- a) Qual é o tipo de transformação gasosa expressa nesse gráfico?
- b) Qual é o volume do recipiente II?
- c) Qual seria o valor da pressão exercida pela massa gasosa nesse conjunto de recipientes se o volume disponível para a massa fosse diminuído à metade do volume total do conjunto?

Resolução

a) A forma hiperbólica da curva do gráfico $p \times V$ revela uma transformação isotérmica, na qual pressão e volume do gás são grandezas inversamente proporcionais.

b) Na condição representada no gráfico, temos:

$$p_A \cdot V_A = p_B \cdot V_B \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 1,5 \cdot 10 = 0,3 \cdot V_B \therefore V_B = 50 \text{ L}$$

O volume do gás no estado B é o volume total dos recipientes I e II. Assim, o volume do recipiente II é, portanto:

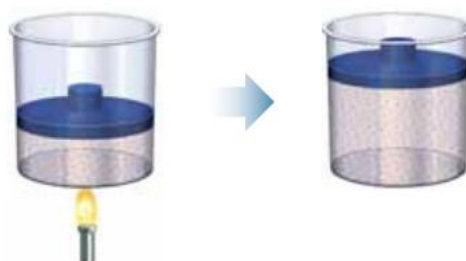
$$V_{II} = 50 - 10 \therefore V_{II} = 40 \text{ L}$$

c) Se o volume disponível fosse a metade do volume total, o novo volume seria 25 L. Na condição apresentada no gráfico, temos:

$$p_A \cdot V_A = p_C \cdot V_C \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 1,5 \cdot 10 = p_C \cdot 25 \therefore p_C = 0,6 \text{ atm}$$

R3 Um equipamento formado por um cilindro reto contém determinada massa de gás a 27°C . Perfeitamente encaixado ao cilindro, há um êmbolo de massa não desprezível que desliza livremente, sem atrito. Aumenta-se a temperatura do gás para 77°C e observa-se uma elevação do êmbolo.



- a) Qual é o tipo da provável transformação gasosa ocorrida?
- b) Qual é a porcentagem de aumento do volume de gás contido nesse equipamento?

Resolução

- a) De acordo com o enunciado, à medida que a temperatura da massa gasosa se eleva, o volume dessa massa também aumenta. Como o êmbolo se movimenta sem atrito, pode-se inferir que a pressão do gás permanece constante, caracterizando uma transformação isobárica.

- b) A temperatura inicial do gás, de 300 K, aumentou para 350 K, variando, portanto, 16,7%, conforme o cálculo:

Temperatura (K)	Percentual	
300	—	100%
350	—	$x\% \Rightarrow x \approx 116,7\%$

A variação percentual do volume do gás também será igual a 16,7%, pois, em uma transformação isobárica, o volume se mantém diretamente proporcional à temperatura absoluta.

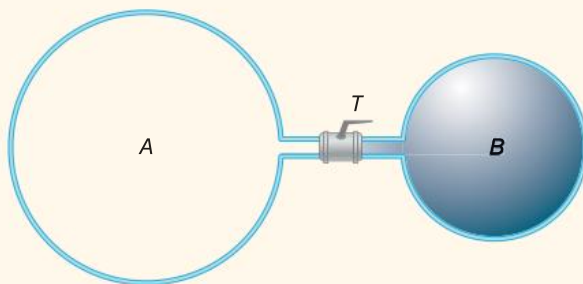
QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

- Em um dia muito quente, Júlio usou um desodorante líquido contido em uma embalagem plástica. Observou que o conteúdo estava quase terminando e, depois de fechar o tubo, guardou-o no armário. Após alguns dias, o rapaz procurou o desodorante e também uma blusa para se agasalhar, pois o dia estava muito frio. Ficou surpreso ao observar que a embalagem havia murchado. Com base em seus conhecimentos a respeito das transformações gasosas, escreva um pequeno texto explicando o que ocorreu com o tubo de desodorante.
- Para fazer um gostoso doce de leite, uma cozinheira coloca uma lata fechada de leite condensado dentro de uma panela de pressão com água e leva ao fogo. Depois de certo tempo, o fogo é desligado, a pressão da panela é diminuída e o doce está pronto. A cozinheira sabe que não deve abrir a lata enquanto o doce estiver quente e, por isso, coloca a lata sob a água corrente fria. Quais são os conhecimentos físicos que justificam todo o procedimento da cozinheira na obtenção do doce, desde cozinhá-lo na panela de pressão até colocá-lo sob a água fria?
- Um gás ideal contido em um cilindro de êmbolo móvel sob pressão de 1 atm possui volume de 150 litros à temperatura de 27 °C.
 - Qual é o valor da pressão desse gás ao ser comprimido isotermicamente até atingir o volume de 100 litros?
 - Em seguida, o gás é aquecido isometricamente até atingir a temperatura de 527 °C. Qual é o valor da pressão do gás a essa temperatura?
 - Desenhe um diagrama de pressão por volume e esboce o gráfico das transformações gasosas desse gás.
- Um menino infla rapidamente com ar um dos pneus de sua bicicleta até a pressão atingir o valor de 3,0 atm. Considere que a temperatura final do ar no interior do pneu chegou a 47,0 °C, enquanto a temperatura ambiente é de 17,0 °C. Qual é a pres-

são do ar no interior do pneu quando ele atinge a temperatura ambiente? Em seus cálculos, considere que o ar contido no pneu é um gás ideal cujo volume permanece constante depois de o pneu ter sido rapidamente inflado.

- Para secar os cabelos, Priscila usa um secador. Ao passar por dentro desse aparelho, o ar, que está à temperatura ambiente, é aquecido e sai dele a uma temperatura mais elevada. Assim, o secador funciona como um aquecedor de ar. Considere que a massa de ar, ao sair do secador, tem um aumento de volume de 10% e também que a transformação sofrida por ele ocorre sob pressão constante. Se Priscila usar o secador em um dia cuja temperatura ambiente seja de 27 °C, o ar chegará a seus cabelos com qual temperatura?
- Dois balões de vidro, A e B, com capacidades de 6 L e 2 L, respectivamente, são ligados entre si por um tubo de volume desprezível. Nesse tubo, existe uma torneira, inicialmente fechada, indicada por T, como no esquema representado a seguir. O balão B contém hidrogênio à pressão de $1,2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ enquanto o balão A está totalmente vazio. Qual é o valor da pressão, em atmosferas, a que o hidrogênio fica submetido quando os balões se interligam, após a abertura da torneira T? Considere que a temperatura do sistema foi mantida constante durante o processo descrito. Adote $1 \text{ atm} = 10^5 \text{ N/m}^2$.



4 Equação de Clapeyron ou equação de estado de um gás ideal

Uma transformação gasosa, isotérmica, isobárica ou isovolumétrica, caracteriza-se pelo fato de que uma das variáveis de estado do gás se mantém inalterada. No entanto, é comum ocorrerem transformações na massa gasosa nas quais as três grandezas (pressão, volume e temperatura) variam simultaneamente. Nesses casos, que relação pode ser estabelecida entre a pressão p , a temperatura T e o volume V da massa de gás?

S5

O Suplemento traz uma questão que pode ser proposta aos alunos.

Para a retomada dos conceitos de mol, massa molar ou molecular, número de mols e número de Avogadro, será muito útil o trabalho integrado com o professor de Química.

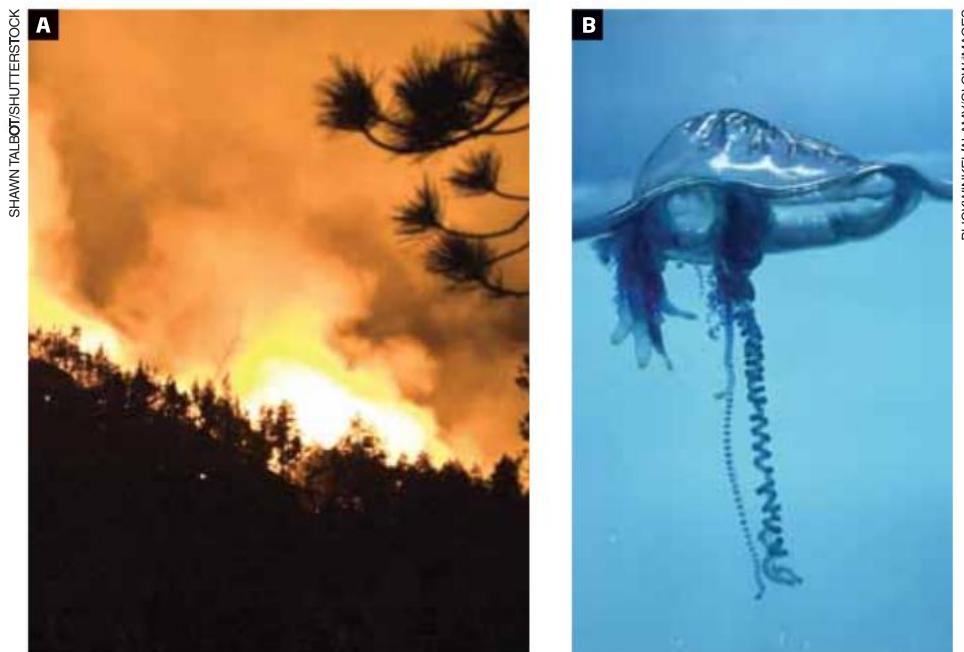


Figura 10 • Em muitas transformações gasosas naturais, as três variáveis de estado se alteram simultaneamente. (A) Em incêndios florestais, substâncias voláteis presentes na vegetação se expandem violentamente, aumentando o alcance do fogo. (B) A caravela-portuguesa (*Physalia physalis*) é um organismo marinho que regula sua flutuação por meio de uma bolsa onde acumula ar e monóxido de carbono.

O físico e engenheiro francês Benoît Paul-Émile Clapeyron (1799-1864), que trabalhou como projetista e construtor de estradas de ferro e máquinas a vapor, conseguiu identificar uma relação matemática entre as variáveis de estado de um gás ideal. Essa relação, também chamada de **equação de Clapeyron**, descreve a dependência entre as variáveis p , V e T em determinado estado de um gás, possibilitando a dedução de uma lei geral, conhecida como lei dos gases ideais (ou perfeitos).

As variáveis de estado, pressão (p), volume (V) e temperatura (T), de uma massa de gás ideal contendo n mols de gás estão relacionadas pela equação de estado dos gases perfeitos (ou ideais):

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

A constante de proporcionalidade R , denominada **constante universal dos gases**, foi obtida empiricamente. Em diversos experimentos com diferentes gases, a grandeza PV/nT se aproximava de um mesmo valor, independentemente do gás utilizado na experiência. Seu valor depende das unidades adotadas para medir as variáveis de estado, p , V e T . É mais comum expressá-la em um dos seguintes modos:

$$R = 8,31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) = 0,082 \text{ atm} \cdot \text{L}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

Mol. Quantidade de matéria que contém o número constante de $6,023 \times 10^{23}$ partículas (átomos, moléculas, elétrons etc.). Portanto, 1 mol de qualquer gás contém $6,023 \times 10^{23}$ moléculas.

Observe que a equação de Clapeyron define o estado da massa de um gás, pois, como o produto $n \cdot R$ se mantém constante, ao fixar de maneira arbitrária duas das variáveis de estado do gás (p , V ou T), a terceira estará automaticamente definida. Por exemplo, se fixarmos o volume que o gás ocupará em determinado recipiente e a pressão a que estará submetido, consequentemente sua temperatura estará definida.

5 Lei geral dos gases ideais (ou perfeitos)

Considere determinada massa gasosa contendo n mols de um gás qualquer. Inicialmente ela está sob pressão p_0 , volume V_0 e temperatura T_0 . Experimentalmente, provoca-se a transformação gasosa desse estado inicial para um estágio final em que o gás esteja submetido à pressão p_f , ao volume V_f e à temperatura T_f (fig. 11).

Aplicando a equação de Clapeyron a cada um desses estados do gás, temos:

$$p_0 \cdot V_0 = n \cdot R \cdot T_0 \Rightarrow n \cdot R = \frac{p_0 \cdot V_0}{T_0} \quad (\text{I})$$

$$p_f \cdot V_f = n \cdot R \cdot T_f \Rightarrow n \cdot R = \frac{p_f \cdot V_f}{T_f} \quad (\text{II})$$

Considerando a igualdade das equações I e II, podemos escrever:

$$\frac{p_0 \cdot V_0}{T_0} = \frac{p_f \cdot V_f}{T_f}$$

Essa expressão relaciona dois estados distintos da mesma massa gasosa e é denominada **lei geral dos gases ideais** (ou **perfeitos**).

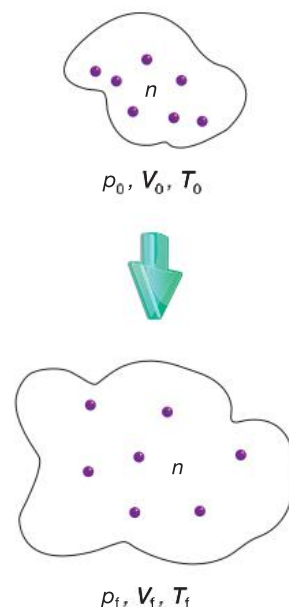


Figura 11

Já sabe responder?

Por que não é aconselhável calibrar os pneus após percorrer grandes distâncias?



QUESTÕES RESOLVIDAS

R4 Em um laboratório de Física, realizando experimentos com gases, um físico precisa determinar o volume do recipiente que deve ser utilizado para armazenar certa massa de gás à temperatura de 127°C . Inicialmente, o gás está à temperatura de 27°C e ocupa um reservatório de $30,75\text{ L}$. Considere que o experimento seja realizado à pressão constante de $1,2\text{ atm}$ e a constante universal dos gases $R = 0,082\text{ atm} \cdot \text{L}/(\text{mol} \cdot \text{K})$.

- Qual deve ser o volume do recipiente para conter a massa de gás a 127°C ?
- Qual é o número de mols dessa massa de gás?

► Resolução

- Considerando os dois estados, inicial e final, do gás, temos os seguintes dados:

$$T_0 = 273 + 27 \therefore T_0 = 300\text{ K}$$

$$T_f = 273 + 127$$

$$\therefore T_f = 400\text{ K}$$

$$V_0 = 30,75\text{ L}$$

Como a transformação é isobárica, podemos escrever:

$$\frac{V_0}{T_0} = \frac{V_f}{T_f} \Rightarrow \frac{30,75}{300} = \frac{V_f}{400} \therefore V_f = 41\text{ L}$$

- Aplicando a equação de Clapeyron para o gás no estado inicial, temos:

$$pV = nRT \Rightarrow 1,2 \cdot 30,75 = n \cdot 0,082 \cdot 300$$

$$\therefore n = 1,5\text{ mol}$$

R5 Um jovem abre a porta do congelador de sua geladeira, retira alguns cubos de gelo e apro-

veita para regular a temperatura do compartimento para -10°C . Fecha a porta e, após algum tempo, retorna para buscar mais gelo, mas não consegue abrir a porta com facilidade. Considere 27°C a temperatura do ambiente onde a geladeira está e a pressão atmosférica no local igual a 1 atm .

- Que tipo de transformação gasosa o ar contido no congelador sofre quando a porta do compartimento é fechada?
- Por que o jovem não consegue abrir a porta com facilidade?

► Resolução

- Podemos considerar a transformação como isovolumétrica, pois o ar ocupa o volume disponível nesse compartimento. Ao abrir a porta, ocorre uma troca entre o ar que está contido no congelador e o ar que está fora da geladeira.

- Considerando que a massa de ar que entra no congelador esteja à temperatura absoluta de 300 K ($27 + 273$) e à pressão de 1 atm e que sua temperatura diminua para 263 K ($-10 + 273$) ao entrar no congelador, temos:

$$\frac{p_0}{T_0} = \frac{p_f}{T_f} \Rightarrow \frac{1}{300} = \frac{p_f}{263} \therefore p_f \approx 0,88\text{ atm}$$

Como a pressão no interior do compartimento se tornou menor que a pressão externa, há dificuldade momentânea para abrir a porta.

QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

7 A pressão que um líquido exerce sobre um corpo que nele esteja imerso varia em função da profundidade; quanto maior a profundidade, maior a pressão. Considere um balão de borracha cheio de um gás considerado ideal que é levado por um mergulhador a 10 m de profundidade no mar. Nessa profundidade, circula uma corrente de água quente com temperatura substancialmente maior que a da água que circula acima desse limite. Nessa condição, descreva e justifique a variação de volume observada no balão:

- à medida que ele é conduzido da superfície até os 10 m de profundidade;
- quando ele penetra na região da corrente marinha de temperatura mais alta.



- 8** Um mol de gás ideal está contido em uma caixa cúbica de 10 cm de aresta sob pressão de 16,6 atm. Considere a constante universal dos gases $R = 8,3 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ e $1 \text{ atm} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$.
- Em que temperatura está essa massa de gás ideal? Expresse esse valor em kelvin e em graus Celsius.
 - Qual é o valor da força que o gás exerce sobre as paredes da caixa?
- 9** Um recipiente rígido contém n mols de um gás ideal sob pressão de 3 atm. Retiram-se 4 mols do gás desse recipiente sem que se varie a temperatura do sistema. Ao final desse processo, observa-se que a pressão do gás se reduziu a 1 atm. Qual é o número de mols que havia inicialmente no recipiente?
- 10** O engenheiro responsável pela construção de um escritório projetou salas com as seguintes dimensões: 10 m de comprimento, 6 m de largura e 4 m de altura. Ele planeja instalar um aparelho de ar-condicionado em cada uma dessas salas. Considere a constante universal dos gases $R = 8 \text{ J/mol}$ e o calor específico do ar, $c = 30 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$.
- Se o ar de uma sala estiver à temperatura de 27°C e à pressão de 1 atm, quantos mols de gás estarão nela contidos?
 - Qual é a quantidade de calor que o ar-condicionado deve transferir da massa de ar contida na sala para o meio externo para que a temperatura do ambiente seja reduzida a 17°C ?
- 11** Em uma panela de pressão de 3 L de capacidade, a válvula de segurança veio ajustada para suportar a pressão interna máxima de 4,1 atm. Coloca-se 1 L de água no interior dessa panela, que, em seguida, é levada à chama de um fogão. Ao atingir o equilíbrio térmico, a quantidade de vapor de água que preenche o restante da capacidade da panela é 0,2 mol. Despreze o volume de água que se transformou em vapor de água e considere-o um gás perfeito. Nessas condições, qual é a temperatura atingida pela água na panela?
- 12** (Fuvest-SP) Uma garrafa tem um cilindro afixado em sua boca, no qual um êmbolo pode se movimentar sem atrito, mantendo constante a massa de ar dentro da garrafa, como ilustra a figura.
- Inicialmente, o sistema está em equilíbrio à temperatura de 27°C , o volume de ar na garrafa é igual a 600 cm^3 e o êmbolo tem uma área transversal igual a 3 cm^2 . Na condição de equilíbrio, com a pressão atmosférica constante, para cada 1°C de aumento da temperatura do sistema, o êmbolo subirá aproximadamente:
- Note e adote: $0^\circ\text{C} = 273 \text{ K}$; considere o ar da garrafa como um gás ideal.
- 0,7 cm
 - 1,4 cm
 - 2,1 cm
 - 3,0 cm
 - 6,0 cm
- 13** (Enem) Uma pessoa abre sua geladeira, verifica o que há dentro e depois fecha a porta dessa geladeira. Em seguida, ela tenta abrir a geladeira novamente, mas só consegue fazer isso depois de exercer uma força mais intensa do que a habitual.
- A dificuldade extra para reabrir a geladeira ocorre porque o(a):
- volume de ar dentro da geladeira diminuiu.
 - motor da geladeira está funcionando com potência máxima.
 - força exercida pelo ímã fixado na porta da geladeira aumenta.
 - pressão no interior da geladeira está abaixo da pressão externa.
 - temperatura no interior da geladeira é inferior ao valor existente antes de ela ser aberta.



1ª lei da Termodinâmica

ou: Por que o desodorante aerossol parece frio em contato com a pele?

 S6

No Suplemento, você encontra orientações para o trabalho com a questão introdutória.

Ao apertar a válvula do desodorante aerossol, uma massa gasosa expande-se rapidamente. Essa transformação é aproximadamente adiabática, não trocando calor com o meio. Nesse tipo de expansão, ocorre diminuição da pressão do gás, bem como da temperatura da massa gasosa. Com a expansão do gás contido no frasco, é possível notar que o desodorante fica mais frio que o ambiente.

1 Introdução

Os pneus desempenham importante papel nas competições automobilísticas, como Fórmula 1, Indy, Nascar e outras. Equipes e pilotos que conseguem fazer uma escolha adequada dos pneus, assim como um bom uso deles, geralmente têm vantagem sobre os demais competidores.

O atrito dos pneus com o chão faz com que eles se aqueçam, e, por condução térmica, o ar neles contido também sofre aumento de temperatura. Nesse caso, ocorre a transformação da energia mecânica em calor.

A 1ª lei da Termodinâmica, estudada neste capítulo, trata da conservação de energia. É por meio dela que o trabalho mecânico, o calor e a energia interna de um sistema se conservam.

Figura 1 • Em competições automobilísticas, a troca de pneus é essencial para um bom desempenho na prova.



2 Trabalho em uma transformação gasosa

Considere um gás contido em um reservatório fechado por um êmbolo (ou pistão) móvel que desliza sem atrito e está perfeitamente ajustado às paredes desse recipiente. Os constantes choques das moléculas de um gás sobre a parede do recipiente fazem com que ele exerça uma pressão p contra as paredes do reservatório e também contra a superfície do êmbolo, de área A (fig. 2). Suponha que o gás sofra aquecimento isobárico. Ao receber calor, ocorre maior número de choques entre suas moléculas, provocando a expansão do gás. No entanto, a pressão interna no recipiente permanece constante, uma vez que o êmbolo pode se deslocar livremente, e porque não há alteração da pressão externa. O deslocamento do êmbolo se dá pela ação de uma força resultante \vec{F} proveniente das interações entre as moléculas do gás e as paredes do recipiente que o contém.

Sabemos que o trabalho (\mathcal{C}) de uma força constante (\vec{F}) pode ser calculado por meio da expressão:

$$\mathcal{C} = F \cdot \Delta s \cdot \cos \alpha$$

na qual Δs corresponde ao módulo do deslocamento realizado pelo corpo e α é o ângulo entre a direção da força aplicada e o deslocamento considerado.

Essa expressão pode ser escrita nos termos das grandezas pressão e volume, que estão associadas às transformações gasosas. A pressão p é obtida pela razão entre o módulo da força \vec{F} e a área A , ou seja:

$$p = \frac{F}{A}$$

e o módulo da força (\vec{F}) pode ser obtido pelo produto da pressão p pela área A :

$$F = p \cdot A$$

Considerando que $\alpha = 0^\circ$, uma vez que a força e o deslocamento têm a mesma direção e o mesmo sentido, e que o produto $A \cdot \Delta s$ é equivalente a ΔV , temos:

$$\mathcal{C} = F \cdot \Delta s \cdot \cos \alpha \Rightarrow \mathcal{C} = p \cdot A \cdot \Delta s \cdot \cos 0^\circ \Rightarrow \mathcal{C} = p \cdot \Delta V$$

A expressão:

$$\mathcal{C} = p \cdot \Delta V = p \cdot (V_f - V_0)$$

permite calcular o trabalho realizado em transformações gasosas em que a pressão do gás é mantida constante. A análise dessa expressão possibilita observar que:

- Havendo aumento do volume do gás, como em uma expansão isobárica, então $\Delta V > 0$ e, consequentemente, o trabalho será motor ($\mathcal{C} > 0$), isto é, **realizado pelo gás** sobre o pistão e sobre o meio externo.
- Havendo redução no volume ocupado pelo gás no recipiente, como em uma compressão isobárica, então $\Delta V < 0$ e, assim, o trabalho será resistente ($\mathcal{C} < 0$), isto é, **realizado sobre o gás**, ou seja, o meio externo realizará trabalho sobre o gás.

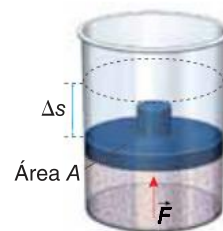
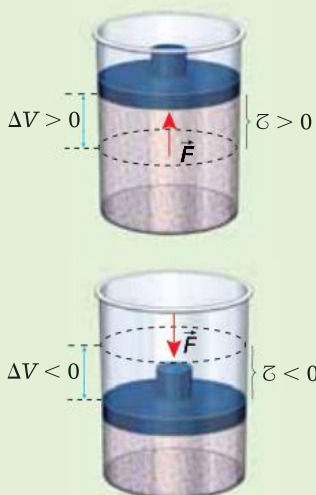


Figura 2 • Um gás contido em um recipiente fechado, quando aquecido à pressão constante, torna-se capaz de aplicar uma força \vec{F} que provoca o deslocamento do êmbolo.

Ajude o aluno a associar o trabalho realizado pelo gás a uma energia que é transferida do gás para o meio externo e, portanto, é perdida por ele. No caso do trabalho realizado sobre o gás, há uma entrada de energia no sistema proveniente do meio externo.

A expressão $\bar{c} = p \cdot \Delta V = p \cdot (V_f - V_0)$ só pode ser aplicada se a pressão p for constante. No caso de pressões variáveis, o trabalho realizado na transformação gasosa pode ser obtido calculando a área sob a curva no gráfico da pressão p em função do volume V em um plano p em função de V . Caso ocorra uma compressão, é preciso lembrar que o trabalho será negativo ($\bar{c} < 0$).

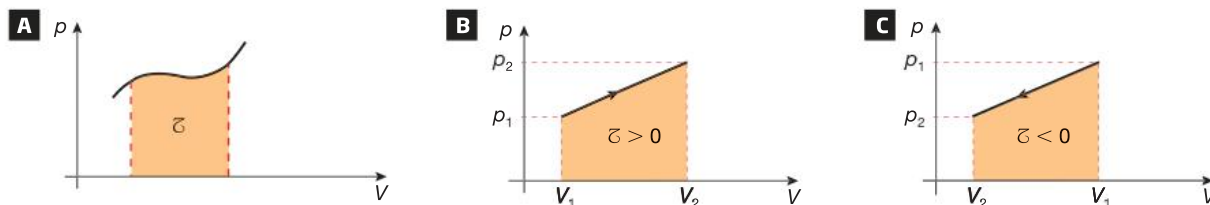


Figura 3 • (A) Nas transformações em que a pressão é variável, o trabalho pode ser calculado por meio da área sob a curva de um gráfico $p \times V$. (B) O trabalho é realizado pelo gás sobre o meio externo ($\bar{c} > 0$). (C) O trabalho é realizado pelo meio externo sobre o gás ($\bar{c} < 0$).

Nas transformações gasosas, são muitas as possibilidades de um gás passar de um estado inicial I para um estado final II. Por isso, dizemos que o trabalho realizado em uma transformação gasosa depende do **caminho entre os estados inicial e final** do gás. Na figura 4, estão representados dois estados, I e II, da mesma massa gasosa e quatro possíveis sequências intermediárias (caminhos) entre esses estados.

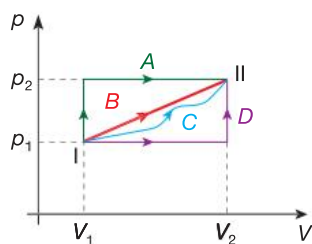


Figura 4 • O trabalho realizado em uma transformação gasosa depende dos estágios percorridos entre o estado inicial (I) e o final (II), diferentemente do que acontece com o trabalho realizado por forças conservativas de módulo constante.

No percurso A, por exemplo, o gás parte do estado I, realiza uma transformação isovolumétrica na qual sua pressão varia de p_1 a p_2 e, em seguida, realiza uma transformação isobárica em que a pressão se mantém constante (p_2), ao mesmo tempo que seu volume aumenta de V_1 para V_2 , até atingir o estado final II.

Note que o gás pode atingir os mesmos valores finais de pressão p_2 e volume V_2 , passando por outras sequências de transformações, entre elas as representadas pelas curvas B, C e D (além de outras não indicadas nesses gráficos). O estado final será o mesmo em todas elas.

Em todos os casos, o valor numérico do trabalho realizado pode ser obtido calculando a área situada sob a curva no gráfico $p \times V$ (fig. 5).

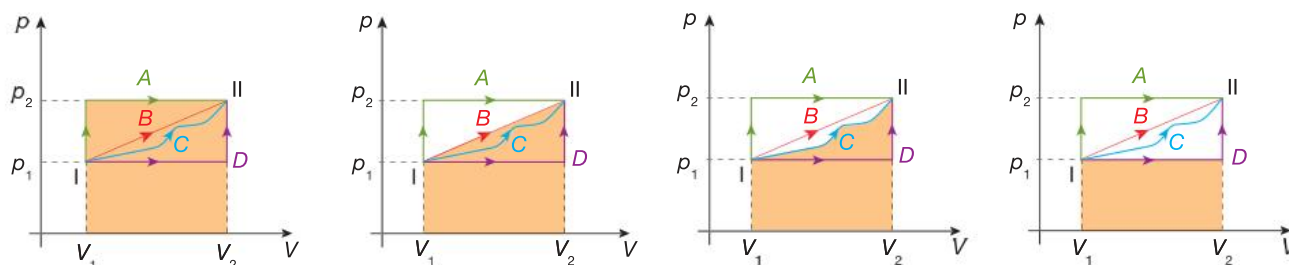


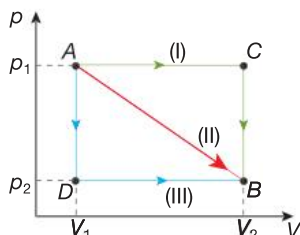
Figura 5 • As áreas situadas sob cada curva do gráfico $p \times V$ mostram que o valor do trabalho realizado depende dos estágios intermediários.

Observe que, entre os estados inicial (I) e final (II), o maior valor de trabalho é atingido na sequência representada por A, enquanto o menor de todos os valores de trabalho corresponde ao percurso D. Ordenando do maior para o menor os valores de trabalho em função das áreas, temos:

$$\text{área}_A > \text{área}_B > \text{área}_C > \text{área}_D \therefore \bar{c}_A > \bar{c}_B > \bar{c}_C > \bar{c}_D$$

QUESTÕES RESOLVIDAS

R1 A massa de um gás ideal pode sofrer transformações termodinâmicas entre os estados inicial, A , e final, B , seguindo três sequências distintas, conforme representado no diagrama: de A para B passando pelo estado C (sequência I), de A para B passando pelo estado D (III) ou de A diretamente para B (II).



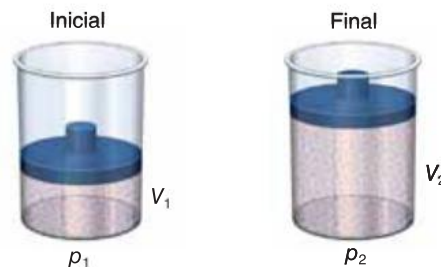
LUÍZ RUBIO

- O trabalho, nas sequências I, II e III, é realizado pelo gás sobre o meio ou pelo meio sobre o gás?
- Em que sequência o módulo do trabalho é maior e qual é a expressão desse trabalho em função das grandezas p_1 , p_2 , V_1 e V_2 ?
- Considere $p_1 = 1 \text{ atm}$; $p_2 = 2 \text{ atm}$; $V_1 = 2 \text{ L}$ e $V_2 = 6 \text{ L}$ e calcule o módulo do trabalho na transformação II de A para B .

► Resolução

- Nas três transformações termodinâmicas, o gás tem aumento de volume, ou seja, sofre expansão. Assim, nas três sequências, o trabalho é realizado pelo gás (o volume inicial é menor que o volume final).

Utilizando um modelo do gás contido em um recipiente munido de êmbolo móvel, podemos representar a transformação da seguinte forma:



ILUSTRAÇÕES: SELMA CAPARROZ

Nessa situação, o trabalho é realizado pelo gás sobre o meio, uma vez que $\Delta V > 0$ e, portanto, $\tau > 0$.

- O módulo do trabalho é maior na transformação I, pois essa transformação apresenta maior área sob o gráfico no plano $p \times V$.

Como o trabalho realizado na transformação gasosa é numericamente igual à área sob o gráfico, temos:

$\tau \stackrel{N}{=} \text{área sob o gráfico } p \times V \Rightarrow \tau \stackrel{N}{=} \text{área de um retângulo}$

Assim, temos:

$$\tau = p_1(V_2 - V_1)$$

- $\tau \stackrel{N}{=} \text{área no gráfico } p \times V \Rightarrow \tau = \text{área de um trapézio}$

Nessa transformação, essa área será:

$$\tau = \frac{(p_1 + p_2) \cdot (V_2 - V_1)}{2} = \frac{(2 + 1) \cdot (6 - 2)}{2}$$

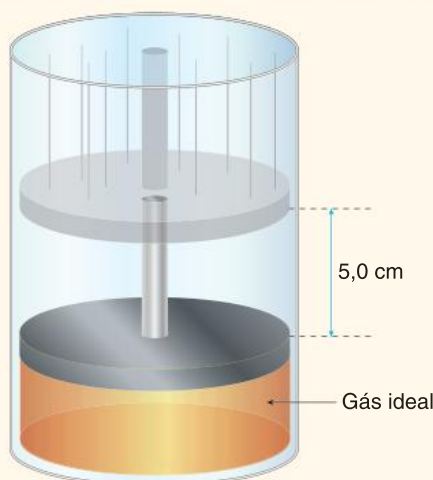
$$\therefore \tau = 6 \text{ atm} \cdot \text{L} = 6 \text{ J}$$

QUESTÕES PROPOSTAS

1 O gás considerado ideal contido no interior do cilindro esquematizado na figura a seguir sofre uma compressão isobárica sob pressão atmosférica ($p_{\text{atm}} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$). A posição do êmbolo de 10 cm^2 de área sofre a variação indicada na figura.

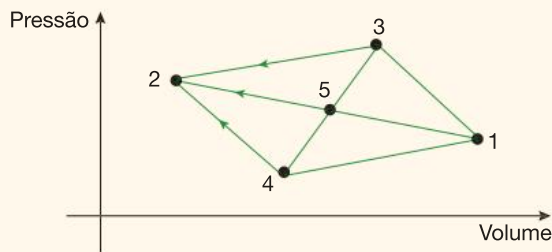
- O que ocorre com a pressão, o volume e a temperatura do gás durante a compressão?
- O trabalho é realizado pelo gás ou sobre o gás? Qual é o valor desse trabalho, em joules?

Lembre-se: resolva as questões no caderno.



LUÍZ RUBIO

- 2 Um sistema pode seguir por diferentes caminhos durante a transformação gasosa de um estado 1 a um estado 2. Na figura, estão representados, em um diagrama de pressão por volume, alguns desses trajetos para determinada massa gasosa.



Em qual dos seguintes trajetos:

- $1 \rightarrow 3 \rightarrow 2$
- $1 \rightarrow 5 \rightarrow 2$
- $1 \rightarrow 4 \rightarrow 2$
- $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 2$
- $1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 2$

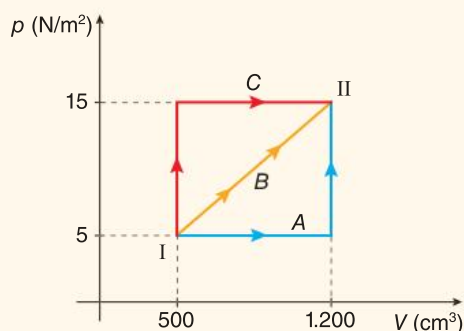
o trabalho realizado sobre o gás:

- a) é máximo?
- b) é mínimo? Por quê?

- 3 Uma bola de futebol, murcha, de volume interno desprezível, será cheia de ar em uma região ao nível do mar, em que a pressão atmosférica é de 10^5 N/m^2 . Qual é o valor do trabalho realizado pelo ar para encher a bola, à temperatura ambiente, a fim de que ela atinja volume de $6,0 \times 10^3 \text{ cm}^3$?

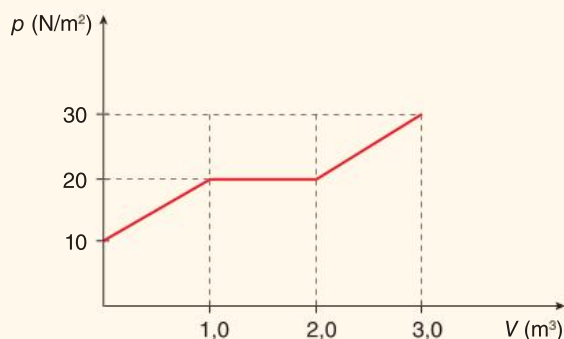
- 4 Três volumes de gás iguais de 500 cm^3 sofreram expansões e passaram a ocupar, cada um, volumes finais de 1.200 cm^3 . As transformações

sofridas pelos gases estão representadas no gráfico pelos percursos A, B e C.



- a) Descreva o tipo de transformação sofrida pelo gás no percurso A e no percurso C.
- b) Nos três casos, o trabalho foi realizado pelos gases sobre o meio ou pelo meio sobre os gases? Justifique sua resposta.
- c) Calcule o trabalho realizado em cada caso.

- 5 O gráfico representa as transformações sofridas por um gás ideal. Qual foi o trabalho mecânico realizado pelo gás enquanto seu volume variou de 0 a $3,0 \text{ m}^3$?



3 Energia interna

Quando corremos, principalmente em um terreno acidentado, a velocidade que desenvolvemos passa por uma grande variação. Quando subimos correndo alguns lances de escada ou saltamos em uma cama elástica, também ocorre uma significativa variação de energia potencial gravitacional ou elástica. Esses fenômenos são chamados de variações de **energia externa** do corpo, pois estão relacionados ao meio externo.

No entanto, nessas situações, também ocorre o que chamamos de variação de **energia interna**. Esse tipo de variação está relacionado à alteração das condições internas de um corpo ou de um sistema. Se fizemos uma corrida intensa, é provável que nossa temperatura corporal sofra alteração. A rigor, haverá uma tendência à alteração da temperatura corporal, normalmente mantida constante pela eliminação de suor. A pele “rouba” energia térmica do corpo para evaporar o suor, o que provoca a diminuição da temperatura, que tende a subir devido ao esforço físico.

No caso dos sistemas gasosos, a variação de temperatura é a grandeza determinante na variação da energia interna de um gás.

Nos gases, a energia interna é resultante da soma de várias energias, entre elas, as energias de translação, de rotação e de vibração de suas moléculas (fig. 6). Outra parcela da energia interna é a energia potencial associada às forças internas conservativas.

Nas transformações gasosas, as variações de energia interna dependem apenas das variações de temperatura do gás. Assim, as variações de energia interna estão associadas às alterações da energia cinética das partículas. Isso ocorre porque nessas transformações, em geral, não se consideram as variações nas outras formas de energia, como química, atômica etc.

Segundo a **teoria cinética dos gases**, todos os gases possuem a mesma energia cinética média por molécula desde que estejam a mesma temperatura. A energia cinética do gás é a soma das energias cinéticas de suas moléculas e é dada por:

$$E_c = \frac{3nRT}{2}$$

em que n é o número de mols do sistema gasoso, R é a constante universal dos gases e T é a temperatura absoluta do sistema.

Assim, para os gases monoatômicos, podemos determinar a **variação da energia interna (ΔU)** em uma transformação gasosa calculando a diferença entre as energias cinéticas médias de seus estados final e inicial. Temos, então:

$$\Delta U = E_{c_f} - E_{c_i} = \frac{3nRT_f}{2} - \frac{3nRT_i}{2} = \frac{3nR\Delta T}{2}$$

De acordo com a teoria cinética dos gases, **a variação da energia interna de determinada massa gasosa é função única e exclusiva de sua temperatura absoluta**. Assim, temos as seguintes situações possíveis em uma transformação gasosa:

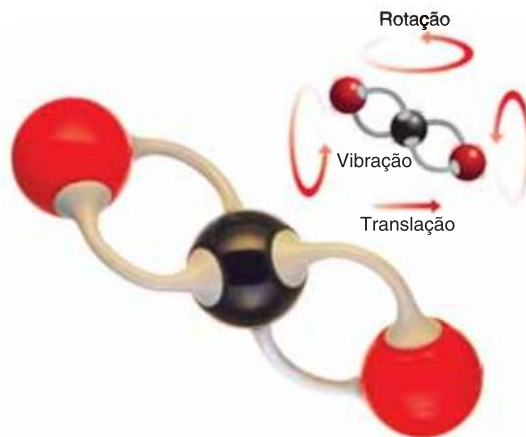
- Se a temperatura absoluta (Kelvin) aumentar, então $\Delta U > 0$.
- Se a temperatura absoluta (Kelvin) diminuir, então $\Delta U < 0$.
- Se não houver variação da temperatura, então $\Delta U = 0$, ou seja, não ocorrerá variação da energia interna em uma transformação gasosa.

4 1ª lei da Termodinâmica

Uma das leis fundamentais da Física é a **lei da conservação da energia**, que pode ser assim enunciada:

A energia não pode ser criada nem destruída; pode apenas ser transformada de uma forma em outra, e sua quantidade total permanece constante.

Segundo esse princípio de conservação da energia, se dois sistemas estiverem em contato entre si e isolados de outros sistemas, uma forma de energia poderá ser transformada em outra e, se a energia de um diminuir, a do outro terá de aumentar. Nos processos considerados reversíveis, a energia final pode ser convertida na energia inicial do processo. No entanto, a maior parte ou a totalidade dos processos espontâneos são irreversíveis. Nesses processos, ocorre a transformação de uma forma de energia em outra que não pode mais ser reconvertida à forma inicial. Por exemplo, quando um carro dissipa calor para o ambiente externo evid o ao atirar todos os pneus com o solo, esse calor não pode ser reaproveitado nem pelo automóvel nem pelo ambiente externo para ser reconvertido em energia cinética ou em outra forma de energia.



ADAM HARTDAVIS/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

Figura 6 • Os modelos, sem escala, representam a molécula do gás dióxido de carbono (CO_2). As moléculas dos gases têm energia interna associada às suas translações, rotações e também às oscilações (vibrações).

S7

Consulte o **Suplemento** para obter orientações sobre esse conteúdo.

A **1ª lei da Termodinâmica** é uma lei que expressa o princípio de conservação de energia de um sistema considerando três formas diferentes de energia: o trabalho mecânico, a variação da energia interna e o calor.

Considere, por exemplo, uma panela de pressão com água e feijões sendo aquecida no fogão da cozinha de sua casa. A chama do fogão troca calor com a panela. Por condução, a panela aquece a água e, por convecção, a camada de água mais próxima do fundo da panela aquece o restante de água contida no recipiente e assim os feijões são aquecidos. A temperatura no interior da panela aumenta e, desse modo, ocorre variação da energia interna de seu conteúdo. A água entra em ebulição, e o vapor de água formado nesse aquecimento sob pressão escapa pela válvula da tampa. No deslocamento vertical do pino, ocorre trabalho mecânico. Observe que, após esse deslocamento vertical, a dissipação de energia se dá em forma de calor levado pelo vapor para o meio externo.

Como se dá a conservação da energia na situação descrita? Podemos resumir o balanço energético desse fenômeno da seguinte maneira: o sistema (panela + água + feijões) troca calor com o meio externo (fig. 7). Em consequência ocorre a variação da energia interna do sistema e a realização de trabalho. A variação de energia interna pode ser observada pelo aumento da temperatura do recipiente e de seu conteúdo, e a realização de trabalho é verificada pelo deslocamento do pino da válvula. Ou seja, há uma relação entre o trabalho realizado, a troca de calor com o meio externo e a variação da energia interna do conteúdo da panela.

Essa relação é a base da 1ª lei da Termodinâmica, que pode ser enunciada como segue:



Figura 7 • As trocas de calor entre a fonte (uma chama em fogões a gás ou uma placa de aquecimento em fogões elétricos) e o sistema (panela aquecida de seu conteúdo) provocam aumento da temperatura do conteúdo da panela e produzem movimento no pino da válvula.

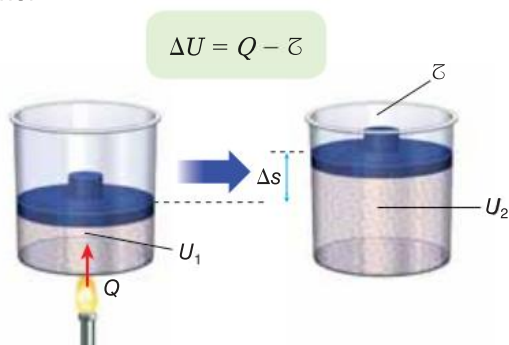
MARTYN F. CHILLMAID/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

Reprodução proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

A variação da energia interna (ΔU) de um sistema é resultante da diferença entre a quantidade de calor (Q) trocada com o meio externo e o trabalho (\mathcal{C}) realizado no processo termodinâmico, ou seja:

$$\Delta U = Q - \mathcal{C}$$

A 1ª lei da Termodinâmica é aplicada a muitos processos termodinâmicos e não somente àqueles que envolvem exclusivamente sistemas gasosos. Trata-se de um caso especial do princípio de conservação da energia. Por exemplo, em uma transformação gasosa, como representado na figura 8, na qual o sistema contendo gás recebe uma quantidade de calor Q do meio externo e realiza um trabalho \mathcal{C} sobre o meio exterior, a variação da energia interna ΔU do sistema é dada pela diferença entre a quantidade de calor recebida e o trabalho realizado pelo sistema sobre o meio externo.



SELMA CAPARROZ

Figura 8 • Representação esquemática de uma transformação gasosa.

5 Aplicações da 1ª lei da Termodinâmica às transformações gasosas

A 1ª lei da Termodinâmica é de aplicação geral a sistemas que envolvam trocas de energia de diferentes formas: calor, trabalho mecânico e energia interna. Com base na 1ª lei, vamos analisar o que acontece com as formas de energia em algumas transformações gasosas.

Transformação isobárica

Em uma expansão isobárica, além de ocorrer aumento do volume do gás mantido em um recipiente sob pressão constante, observa-se experimentalmente um aumento da temperatura desse gás. No plano $p \times V$, podemos representar essa transformação como indicado na figura 9.

Como há aumento do volume do gás ($V_2 > V_1$), podemos concluir que essa massa gasosa realiza trabalho sobre o meio. Assim, podemos escrever:

$$\Delta V > 0 \Rightarrow \tau > 0$$

Note que o aumento da temperatura é indicado no gráfico pela mudança de isoterma: T_1 pertence a uma isoterma mais próxima da origem dos eixos p e V , o que indica menor temperatura absoluta. Como vimos, a variação da energia interna de um gás é função exclusiva de sua temperatura absoluta, assim, um aumento de temperatura implica a variação da energia interna positiva. Podemos escrever, então:

$$\Delta T > 0 \Rightarrow \Delta U > 0$$

Para que o gás possa simultaneamente aumentar sua energia interna e realizar trabalho sobre o meio, é necessário que receba energia de uma fonte. Portanto, o gás deve receber uma quantidade de calor (Q) suficiente para haver transformação em trabalho mecânico e em variação de energia interna. Como $\Delta U = Q - \tau$, então:

$$\Delta U = Q - \tau \Rightarrow Q = \Delta U + \tau$$

e, com $\Delta U > 0$ e $\tau > 0$, teremos:

$$Q > 0$$

Nas expansões isobáricas, temos:

- $\Delta V > 0 \Rightarrow \tau > 0$, ou seja, o gás se expande, realizando trabalho sobre o meio;
- $\Delta T > 0 \Rightarrow \Delta U > 0$, ou seja, há aumento da energia interna do gás;
- $\Delta U = Q - \tau \Rightarrow Q = \Delta U + \tau$.

Como $\Delta U > 0$ e $\tau > 0$, temos $\Rightarrow Q > 0$, ou seja, o gás recebe calor do meio externo.

O mesmo tipo de análise que aqui fizemos para a **expansão** isobárica de um gás pode ser feito para a **compressão** isobárica.

Nas compressões isobáricas, temos:

- $\Delta V < 0 \Rightarrow \tau < 0$, ou seja, o gás é comprimido ao se realizar trabalho sobre ele;
- $\Delta T < 0 \Rightarrow \Delta U < 0$, ou seja, há diminuição da temperatura absoluta do gás. Portanto, a energia interna do sistema diminui;
- $\Delta U = Q - \tau \Rightarrow Q = \Delta U + \tau$.

Como $\Delta U < 0$, temos $\tau < 0 \Rightarrow Q < 0$, ou seja, há liberação de calor para o meio externo.

Transformação isovolumétrica (isocórica)

Nas transformações gasosas em que o volume é mantido constante ($\Delta V = 0$), o gás ideal não realiza trabalho e tampouco é realizado trabalho sobre ele (ou seja, $\tau = 0$). Vamos considerar uma transformação isovolumétrica em que ocorra aumento de pressão, como a representada no gráfico $p \times V$ ao lado (fig. 10).

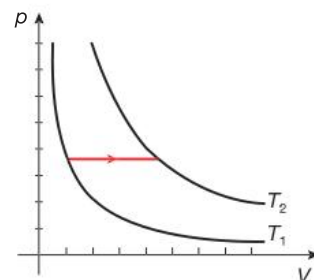


Figura 9 • Gráfico $p \times V$ de uma expansão isobárica.

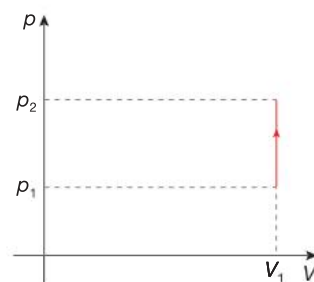


Figura 10 • Gráfico $p \times V$ de uma transformação isovolumétrica em que ocorre aumento da pressão do gás.

No gráfico da figura 10, observamos que a pressão aumenta no decorrer da transformação. Como o volume disponível para o gás é mantido constante, o aumento de pressão tem como consequência o aumento da agitação das partículas do gás e, assim, observa-se experimentalmente o aumento de sua temperatura. O gráfico da figura 11 representa uma transformação isovolumétrica em um plano $p \times T$, evidenciando uma correlação entre o aumento de temperatura e o aumento de pressão.

O que acontece com ΔU , Q e \mathcal{C} nas transformações isovolumétricas em que a pressão aumenta? O trabalho é nulo, pois não há variação de volume. Como há aumento da temperatura, a energia interna do gás aumenta. Para que ocorra variação positiva da energia interna do gás ($\Delta U > 0$), o sistema precisa receber energia na forma de calor ($Q > 0$).

Logo, nas transformações isovolumétricas, quando há aumento de pressão, temos:

- $\Delta V = 0 \Rightarrow \mathcal{C} = 0$. O trabalho é nulo, pois não há variação de volume;
- $\Delta T > 0 \Rightarrow \Delta U > 0$, a energia interna do sistema aumentou;
- $\Delta U = Q - \mathcal{C} \Rightarrow Q = \Delta U + \mathcal{C}$.

Como $\Delta U > 0$ e $\mathcal{C} = 0$, temos $Q > 0$, ou seja, há recebimento de calor do meio externo.

Os gráficos a seguir descrevem uma transformação a volume constante com diminuição de pressão.

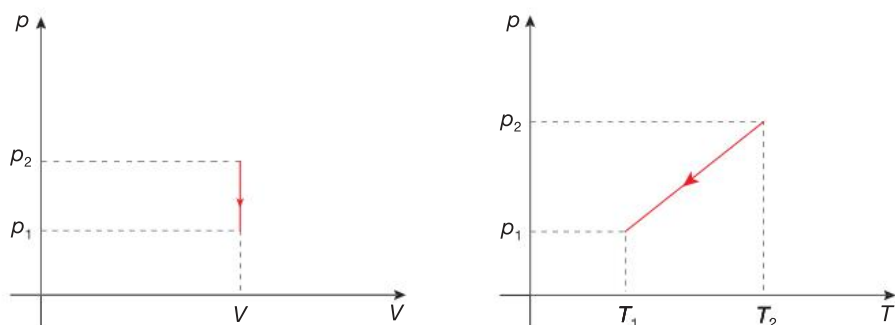


Figura 12 • Gráficos $p \times V$ e $p \times T$ da compressão de um gás sob volume constante.

Nesse caso, temos:

- $\Delta V = 0 \Rightarrow \mathcal{C} = 0$. O trabalho é nulo, pois não há variação de volume;
- $\Delta T < 0 \Rightarrow \Delta U < 0$, ou seja, há diminuição da temperatura absoluta do gás. Portanto, a energia interna do sistema diminui;
- $\Delta U = Q - \mathcal{C} \Rightarrow Q = \Delta U + \mathcal{C}$.

Como $\Delta U < 0$ e $\mathcal{C} = 0$, temos $Q < 0$, ou seja, há liberação de calor para o meio externo, pois ocorre diminuição da energia interna do gás.

Transformação isotérmica

Nas transformações gasosas em que não há variação de temperatura ($\Delta T = 0$), a energia interna das partículas do gás se mantém constante ($\Delta U = 0$), pois a variação da energia interna de um gás ideal é função apenas da temperatura desse gás. Pela 1ª lei da Termodinâmica, $\Delta U = Q - \mathcal{C}$; e, com $\Delta U = 0$, temos $Q = \mathcal{C}$. O que representa essa igualdade entre a quantidade de calor trocado e o trabalho realizado?

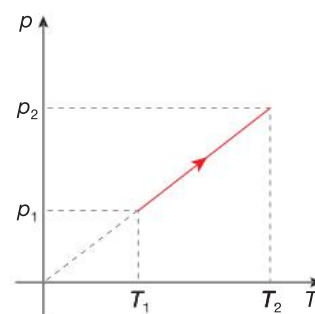


Figura 11 • Gráfico $p \times T$ de uma transformação isovolumétrica em que ocorre aumento da pressão do gás.

Nas expansões isotérmicas, o gás realiza trabalho ao expandir seu volume ($\Delta V > 0$). Para que isso ocorra, é necessário que receba calor de uma fonte ($Q > 0$). Geralmente, transformações isotérmicas são lentas. Assim, ocorre troca de calor com o meio sem que haja variação de energia interna. A quantidade de calor fornecida pelo meio é integralmente transformada em trabalho.

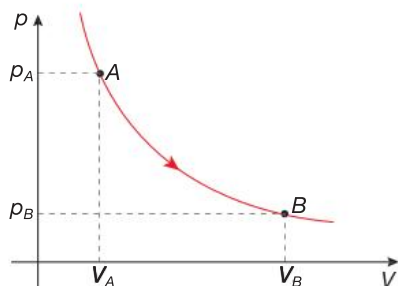


Figura 13 • Gráfico $p \times V$ de uma expansão isotérmica. Observe que a pressão sobre o gás diminui à medida que seu volume aumenta. Todos os pontos da curva correspondem à mesma temperatura (a curva é uma isoterma).

Por sua vez, nas compressões isotérmicas, o **gás ideal**, ao ser comprimido ($\Delta V < 0$), libera calor para o meio externo ($Q < 0$), ou seja, o meio externo realiza trabalho sobre o gás. Esse trabalho é integralmente cedido ao meio na forma de calor.

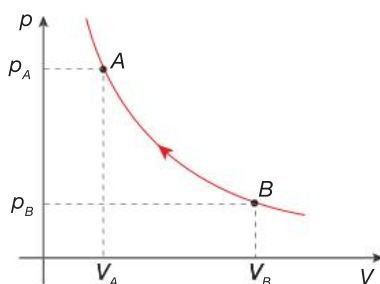


Figura 14 • Gráfico $p \times V$ de uma compressão isotérmica. Note que, à medida que o volume diminui, a pressão aumenta. A temperatura permanece constante (a curva é uma isoterma).

Transformação adiabática

Ao encher uma bola (fig. 15) ou um pneu de bicicleta com uma bomba de ar manual, em que um êmbolo é empurrado várias vezes, fazemos o ar contido no cilindro da bomba realizar uma transformação aproximadamente adiabática (dizemos “aproximadamente” porque as compressões sofridas pelo ar durante o preenchimento da bola são suficientemente rápidas para que as trocas de calor entre o ar contido na bomba e o meio externo sejam desprezíveis).

Na transformação adiabática em um sistema gasoso, não ocorrem trocas de calor entre o sistema e o meio externo ($Q = 0$).

Em uma transformação adiabática, a pressão, o volume e a temperatura do gás se alteram, ou seja, comparando os estágios inicial e final de uma transformação desse tipo, observa-se que $p_i \neq p_f$, $V_i \neq V_f$ e $T_i \neq T_f$.

No plano $p \times V$, as transformações adiabáticas são representadas por curvas que partem de uma isoterma e chegam a outra (pois há alteração de temperatura). Ocorrem mudanças de volume e de pressão.

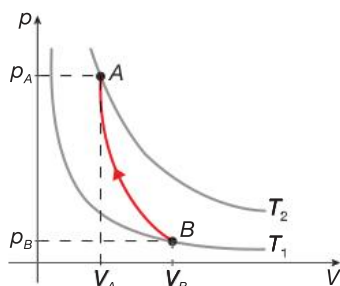


Figura 16 • Gráfico $p \times V$ de uma compressão adiabática. Veja que, à medida que o volume diminui, a pressão aumenta, assim como a temperatura.



Figura 15 • Quando alguém enche uma bola com uma bomba de ar manual, realiza um processo que pode ser considerado adiabático ao comprimir o ar contido no cilindro da bomba. Em geral, essa compressão é rápida e praticamente não ocorre troca de calor entre o ambiente e o sistema.

Pela 1ª lei da Termodinâmica aplicada às compressões adiabáticas, temos $\Delta U = Q - \mathcal{C}$. Mas, como $Q = 0$, obtemos:

$$\Delta U = -\mathcal{C}$$

O que representa a oposição de sinais entre as grandezas ΔU e \mathcal{C} nessa igualdade? Nas compressões adiabáticas, realiza-se trabalho sobre o gás, diminuindo seu volume. Em outras palavras, ao comprimir o gás ($\mathcal{C} < 0$), o meio externo acrescenta-lhe certa quantidade de energia, sem lhe fornecer calor.

O sistema “aproveita” a energia transferida, aumentando sua energia interna e, consequentemente, sua temperatura. No caso da bomba de ar manual, o movimento de vaivém do pistão, por meio de uma ação externa proveniente da pessoa, é responsável pelo aumento de energia interna do ar comprimido no interior da bomba.

Se o volume inicial é maior que o final, a variação de volume é negativa, assim:

$$\Delta V < 0 \Rightarrow \mathcal{C} < 0$$

Mas, como $\Delta U = -\mathcal{C}$, temos:

$$\Delta U > 0$$

ou seja, há aumento da energia interna do gás e consequente aumento da temperatura nesse tipo de compressão.

Na prática, ao encher um pneu ou uma bola com bomba manual, esse aumento de temperatura pode, após certo número de compressões, ser percebido pelo tato com o aquecimento da bomba, já que o material de que é feita não é um bom isolante térmico.



Consulte o *Suplemento* para obter mais informações sobre as transformações gasosas presentes nas embalagens dos aerossóis.

Já sabe responder?

Por que o desodorante aerossol parece frio em contato com a pele?

BLEND IMAGES/GETTY IMAGES

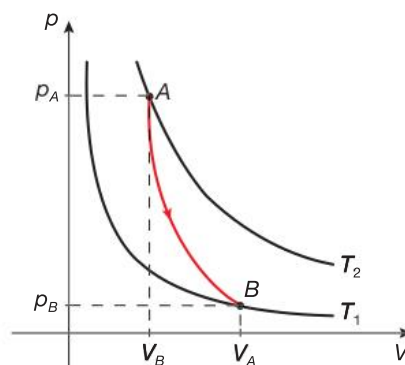


Figura 17 • Gráfico de uma expansão gasosa adiabática. Observe que, à medida que o volume aumenta, a pressão e a temperatura diminuem.

Reprodução proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

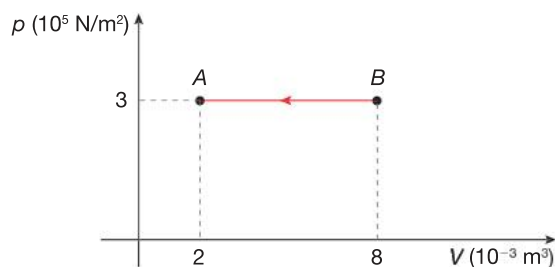
ILUSTRAÇÕES: LUIZ RUBIO

QUESTÕES RESOLVIDAS

R2 Um sistema contendo uma amostra de gás ideal passa por uma compressão isobárica entre o estado inicial *B* e o estado final *A*, aqui representada no plano $p \times V$:

Sabe-se que o sistema cede 500 cal ao meio externo durante a transformação *BA*. Considere 1 cal = 4,18 J.

- Qual é o trabalho, em joules, realizado sobre o gás durante a transformação *BA*?
- Qual é a variação da energia interna, em joules, da amostra de gás ao final da transformação *BA*?



► Resolução

- a) Como a transformação é uma compressão isobárica, o trabalho realizado durante a transformação será dado por:

$$\bar{c} = p \cdot \Delta V \Rightarrow \Delta V = 3 \cdot 10^5 \cdot (2 - 8) \cdot 10^{-3}$$

$$\therefore \Delta V = -1.800 \text{ J}$$

- b) Como o sistema cedeu 500 cal de calor, temos:

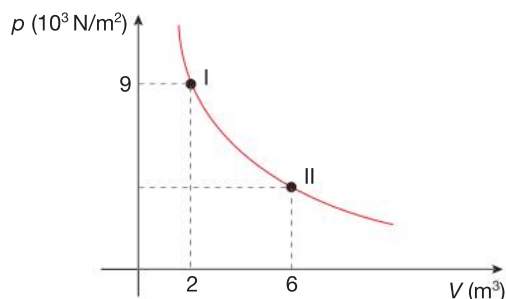
$$Q = -500 \cdot 4,18 \therefore Q = -2.090 \text{ J}$$

Pela 1ª lei da Termodinâmica:

$$\Delta U = Q - \bar{c} \Rightarrow \Delta U = -2.090 - (-1.800)$$

$$\therefore \Delta U = -290 \text{ J}$$

- R3** Este gráfico, construído no plano $p \times V$, representa uma transformação isotérmica sofrida pela massa de n mols de um gás perfeito entre os estados inicial I e final II à temperatura de 327°C .



Entre os estados I e II, o gás troca calor com uma fonte, recebendo 8.000 J. Considere a constante universal dos gases ideais $R \approx 8 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ e calcule:

- o número de mols da massa de gás;
- a pressão do gás no estado II;
- o trabalho realizado pela massa de gás na expansão entre os estados I e II.

► Resolução

- a) Transformando a temperatura de Celsius para kelvin:

$$T = 327 + 273 \therefore T = 600 \text{ K}$$

Pela equação de Clapeyron, temos:

$$pV = nRT \Rightarrow 9 \cdot 10^3 \cdot 2 = n \cdot 8 \cdot 600 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 18 \cdot 10^3 = n \cdot 8 \cdot 600 \Rightarrow 3 \cdot 10^1 = n \cdot 8 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow n = \frac{30}{8} \therefore n = 3,75 \text{ mol}$$

- b) Pela lei dos gases ideais, temos:

$$p_i V_i = p_f V_f \Rightarrow 9 \cdot 10^3 \cdot 2 = p_f \cdot 6 \Rightarrow$$

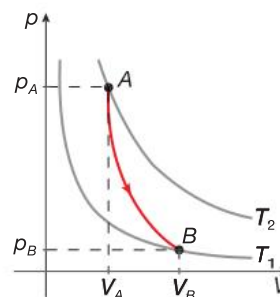
$$\Rightarrow 3 \cdot 10^3 = p_f \Rightarrow$$

$$\Rightarrow p_f = 3.000 \therefore p_f = 3.000 \text{ N/m}^2$$

- c) Como a transformação é isotérmica, a variação de energia interna é nula. Assim, a quantidade de calor que o sistema recebe é totalmente utilizada para realizar trabalho. Portanto:

$$\bar{c} = Q \therefore \bar{c} = 8.000 \text{ J}$$

- R4** Em uma transformação adiabática sofrida por uma amostra de gás perfeito entre o estado inicial A e o estado final B, a pressão, o volume e a temperatura absoluta variam, como indica o gráfico abaixo.



- O que ocorre com as variáveis de estado durante a transformação AB representada? E com as energias Q , ΔU e \bar{c} ?
- Considerando que nessa transformação o gás realiza 300 J de trabalho, qual é o módulo da variação da energia interna da transformação?

► Resolução

- a) Durante uma transformação adiabática, não há trocas de calor com o meio e, portanto, $Q = 0$.

O gráfico revela que, durante a transformação AB, a pressão diminui, a temperatura absoluta diminui e o volume aumenta (uma expansão adiabática). Por se tratar de uma expansão, o trabalho é realizado pelo gás, sendo considerado positivo, pois a variação de volume é positiva.

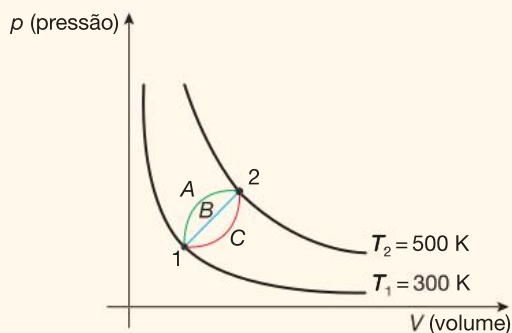
Como a variação de temperatura é negativa (pois a temperatura final é menor que a inicial), a variação de energia interna é negativa.

- b) Nas transformações adiabáticas, não há trocas de calor com o meio externo e, assim, o trabalho realizado pelo gás é, em módulo, igual à variação de energia interna do gás, que, nesse caso, será de 300 J.

QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

- 6 Um sistema constituído de um gás ideal passa do estado termodinâmico inicial 1 para o estado final 2 por meio de três processos distintos, A, B e C, como representado no diagrama $p \times V$ a seguir.

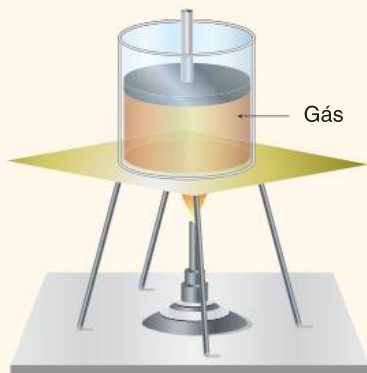


A respeito dos três processos, A, B e C, representados, afirma-se:

- A energia trocada na forma de energia interna é a mesma nos três processos entre os estados 1 e 2.
- A energia trocada na forma de trabalho é a mesma nos três processos entre os estados 1 e 2.
- A energia trocada na forma de calor é a mesma nos três processos entre os estados 1 e 2.

Classifique cada afirmativa em verdadeira ou falsa e redija um pequeno texto corrigindo a(s) que julgar incorreta(s).

- 7 Um gás perfeito está contido em um recipiente cilíndrico fechado por um êmbolo móvel, como representado na figura.



Ao ser aquecido por uma fonte, o gás empurra o êmbolo para cima de forma lenta e com velocidade constante.

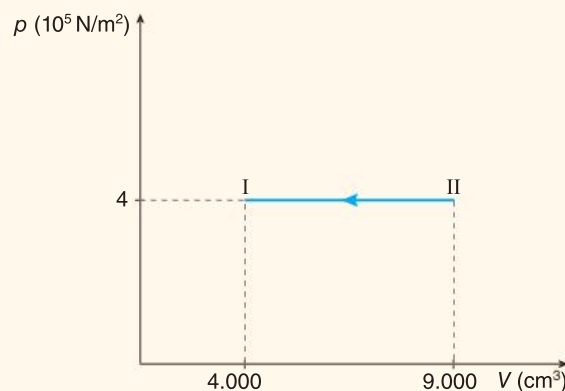
Leia a seguir o que se afirma sobre a situação descrita. Identifique os erros e escreva um texto corrigindo-os.

“Desprezando as perdas de calor que ocorrem pelas paredes do recipiente, todo o calor absorvido pelo gás é transformado em trabalho realizado para deslocar a tampa. O trabalho realizado pela força peso do êmbolo é maior que o trabalho realizado pelo gás em sua expansão.”

- 8 Uma massa de gás, inicialmente ocupando 4.000 cm^3 e à pressão de $0,2 \text{ Pa}$, é comprimida passando a ocupar 1.000 cm^3 . Calcule a pressão final do gás, no caso em que:

- a temperatura tenha sido mantida constante durante a transformação;
- a temperatura do gás elevou-se de 320 K para 360 K .

- 9 O diagrama $p \times V$ representa uma transformação durante a qual o sistema cedeu 1.000 cal ao meio externo.



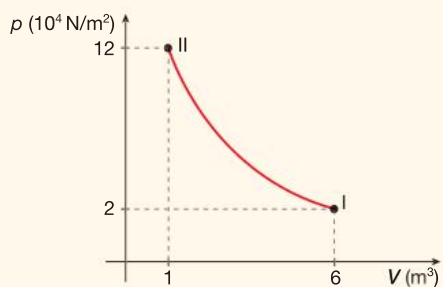
- Qual foi o tipo de transformação ocorrida?
 - Qual foi o trabalho realizado, em joules, durante a transformação de II a I?
 - Qual foi a variação de energia interna do sistema, em joules, durante a transformação?
- (Adote: $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$)

- 10 Numa transformação isotérmica, realizada a 600 K , certa massa de gás recebe 10.000 J de uma fonte de calor, passando de um estado I, com pressão de 10^6 N/m^2 e volume de 2 m^3 , para um estado II, com volume de 7 m^3 .

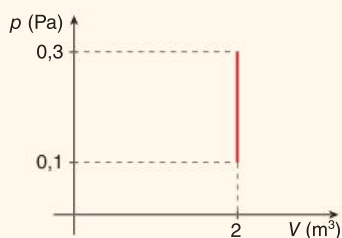
(Adote: constante universal dos gases ideais $R = 8 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$)

- Faça um esboço do diagrama $p \times V$ da transformação ocorrida.
- Calcule o número de mols da massa gasosa.
- Calcule o trabalho realizado pela massa do gás na transformação entre os estados I e II.

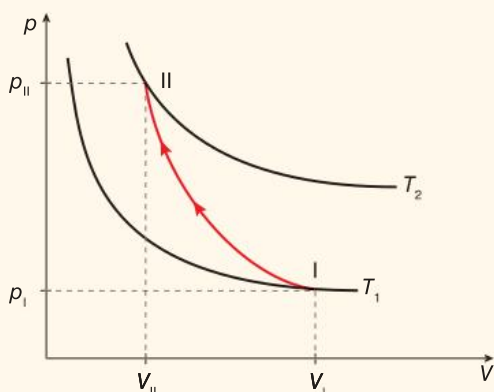
- 11** O diagrama $p \times V$ representa a transformação sofrida por uma massa de gás entre os estados I e II.



- Descreva a transformação ocorrida.
 - Qual foi a variação da energia interna do gás durante a transformação?
- 12** Observe o diagrama $p \times V$ a seguir, que representa a transformação sofrida por um volume de 2 m^3 de um gás ideal, que aumentou o valor de sua pressão de $0,1 \text{ Pa}$ para $0,3 \text{ Pa}$.



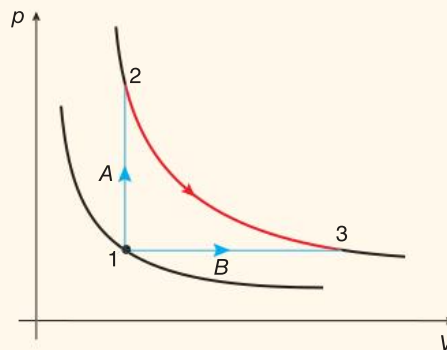
- Descreva a transformação ocorrida com o gás.
 - Qual foi o trabalho realizado pelo gás?
 - Durante a transformação, a temperatura da massa de gás aumentou ou diminuiu? Por quê?
 - A energia interna do gás, durante a transformação, aumentou ou diminuiu? Justifique.
- 13** Uma amostra de gás ideal sofre a transformação descrita no diagrama $p \times V$, passando de um estado I a um estado II.



Se a transformação foi adiabática, e a energia interna do gás variou em 500 J , responda:

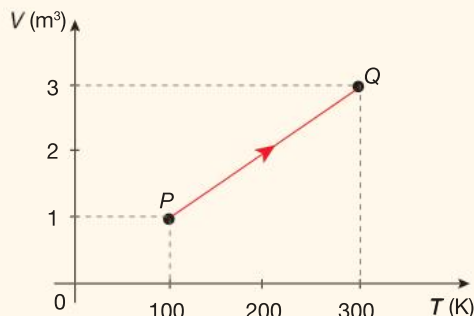
- A energia interna do gás aumentou ou diminuiu? Por quê?
- Durante a transformação, o trabalho foi realizado pelo gás sobre o meio ou pelo meio sobre o gás? Justifique.
- Qual é o módulo do trabalho realizado?

- 14** Um gás ideal de n mol está no estado 1 representado no diagrama $p \times V$, podendo passar para um dos dois estados, 2 ou 3, pelos percursos A e B, absorvendo do meio externo, respectivamente, 2.000 cal ou 2.800 cal . O diagrama apresenta também uma possível expansão isotérmica do gás, ao longo de uma curva, abaixo da qual a área corresponde a 2.200 cal .



Calcule os valores da variação da energia (E) interna, do trabalho realizado (\mathcal{C}) e da quantidade de calor trocado (Q), na transformação:

- isovolumétrica;
 - isobárica;
 - isotérmica.
- 15** Uma quantidade de calor correspondente a 250 cal é transferida a um sistema. Nesse processo, verifica-se que o sistema se expande, realizando um trabalho de 300 J e aumentando sua energia interna. Calcule a variação da energia interna do sistema, adotando $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$.
- 16** Durante a transformação representada no diagrama, uma massa de gás manteve pressão constante de 80 N/m^2 , tendo recebido 400 J do meio externo. Qual foi, nesse processo, a variação da energia interna da massa de gás?



2ª lei da Termodinâmica

ou: Por que as geladeiras transmitem calor para o ambiente?



No Suplemento, há orientações para o trabalho com a questão introdutória.

1 Introdução

As geladeiras transmitem calor para o ambiente, pois são dispositivos que transferem calor de uma fonte fria para uma fonte quente, necessitando, porém, de trabalho externo que possibilite essa transferência não espontânea.

A 1ª lei da Termodinâmica pode ser entendida como um caso especial da lei de conservação de energia e aplicada a uma série de fenômenos. Por exemplo, se uma bola de vidro cair no chão e se quebrar, a 1ª lei será satisfeita, pois a energia do sistema bola-chão se conservará após a queda. Boa parte dessa energia não poderá ser reaproveitada, mas mesmo assim continuará existindo e se dispersando pelo Universo na forma de calor. E se quisermos reconstruir a bola que se quebrou?

Como sabemos, um objeto que se quebra não vai retornar sozinho à condição original. Objetos quebrados só serão consertados com a intervenção de um agente externo. Ou seja, existem fenômenos que claramente não são reversíveis. A rigor, todo e qualquer fenômeno é irreversível, embora nossa avaliação não seja precisa o suficiente para perceber isso em certos casos. Um exemplo disso é o retorno de um elástico a seu comprimento inicial após a aplicação de forças de baixa intensidade.

Consideramos reversíveis aqueles processos em que o sistema pode retornar à condição inicial sem que seja necessária a ação de elementos externos ou aqueles que não causam variações definitivas nos elementos externos ao sistema. Um exemplo que se aproxima de um processo reversível é a oscilação de uma massa em um sistema massa-mola em que seja possível considerar desprezíveis o atrito e outras possíveis perdas de energia. Nesse caso, uma massa pode oscilar sem causar deformação definitiva na mola e ter algumas primeiras oscilações de amplitude praticamente constantes. Observe que é muito difícil encontrar processos absolutamente reversíveis. Processos irreversíveis são aqueles em que o retorno à condição inicial do sistema só é possível se houver a interação com corpos externos ao sistema.

Neste capítulo, vamos estudar leis que descrevem limites para as transformações e a reversibilidade de fenômenos. Veremos ainda o funcionamento das máquinas térmicas.

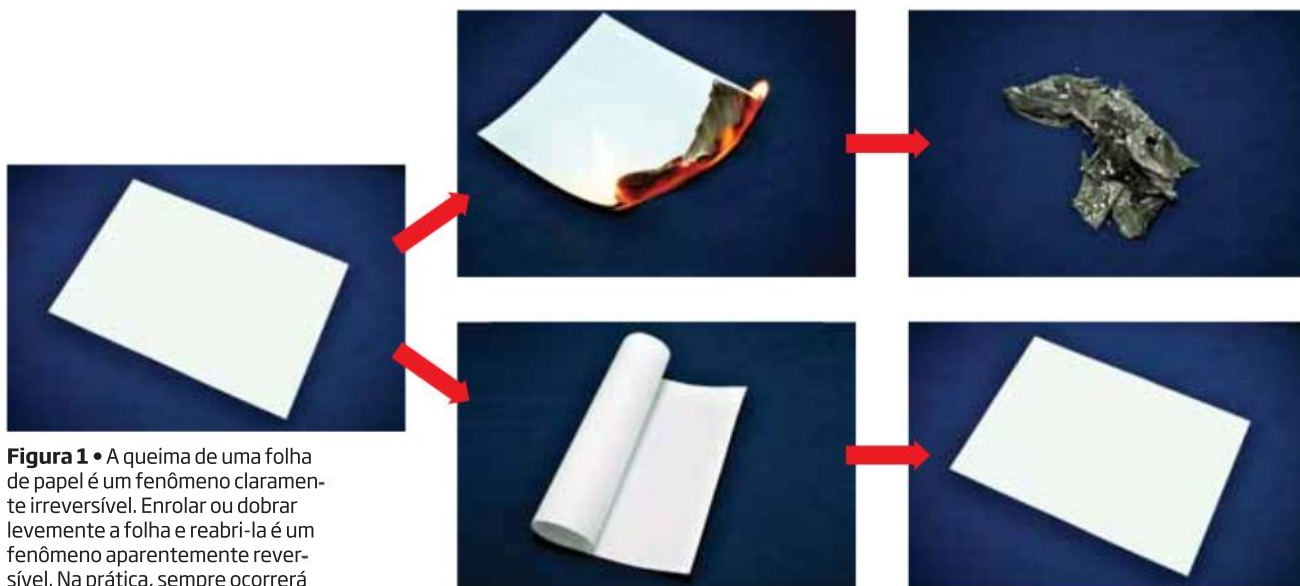


Figura 1 • A queima de uma folha de papel é um fenômeno claramente irreversível. Enrolar ou dobrar levemente a folha e reabri-la é um fenômeno aparentemente reversível. Na prática, sempre ocorrerá alguma alteração na estrutura interna do papel, mesmo que imperceptível aos nossos sentidos ou aos aparelhos de medida insuficientemente precisos.

Vamos estudar também o funcionamento das máquinas refrigeradoras, pois é um bom exemplo para compreender que um fenômeno não espontâneo só poderá ocorrer se houver uma ação externa, com recebimento de energia de outro sistema.

2 Transformações cíclicas

Das locomotivas a vapor aos motores de explosão dos veículos, as máquinas térmicas projetadas e construídas ao longo da história operam em ciclos nos quais o calor é transformado em trabalho mecânico, como vamos ver ao longo deste capítulo. Nesses ciclos, um gás parte de um estado inicial e, após uma sequência de estágios de transformação, atinge um estado final, no qual as variáveis do estado inicial (p_i , V_i , T_i) coincidem com as do estado final (p_f , V_f , T_f).

O diagrama $p \times V$ (fig. 2) descreve a transformação cíclica de uma massa gasosa. Vamos analisar como a energia interna, o calor e o trabalho variam ao longo desse ciclo.

Na transformação representada nesse gráfico, uma massa gasosa em um estado inicial A (p_A , V_A , T_A) retorna, ao final, a esse mesmo estado. Assim, a variação total da energia interna do gás é nula, pois é função da variação de temperatura do gás, que, no caso, não se alterou. Portanto:

Em qualquer transformação cíclica, $\Delta T = 0$ e, portanto, $\Delta U = 0$.

Retornando ao diagrama, podemos comparar o trabalho da massa gasosa em cada uma das transformações que compõem o ciclo, lembrando que, em diagramas $p \times V$, o trabalho em uma transformação gasosa é numericamente igual à área situada sob a curva do gráfico.

A área do gráfico sob o trecho AB (fig. 3A) é maior que a área sob o trecho BC (fig. 3B). Assim, o módulo do trabalho realizado pelo gás na etapa AB é maior que o módulo do trabalho realizado sobre o gás na etapa BC , lembrando que na etapa BC o trabalho é negativo, pois ocorre uma diminuição do volume do gás. Por sua vez, o trabalho realizado de C a A é nulo, uma vez que nessa etapa a transformação é isovolumétrica. (Note que a área sob esse trecho também é nula.)

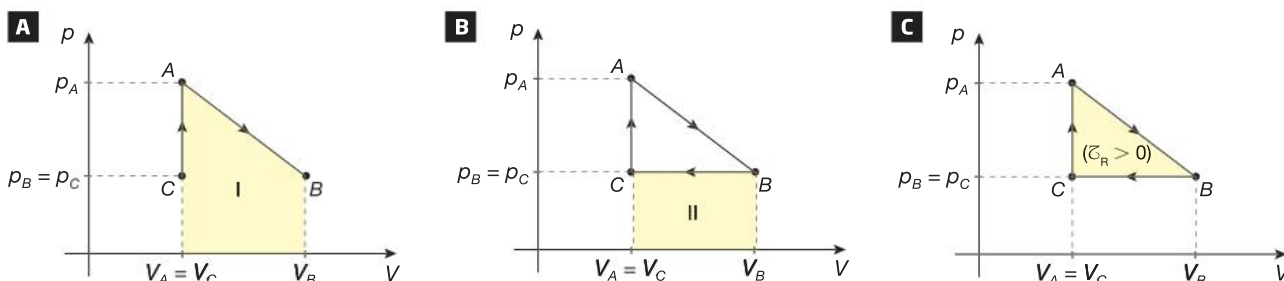


Figura 3 • (A) A área sob o gráfico é numericamente igual ao trabalho realizado por um gás na transformação de um estado A para um estado B ($\mathcal{C}_{AB} > 0$). (B) A área sob o gráfico é numericamente igual ao trabalho realizado sobre o gás na transformação de um estado B para um estado C ($\mathcal{C}_{BC} < 0$). (C) A área do triângulo é o trabalho resultante realizado no ciclo ABC ($\mathcal{C}_R > 0$).

Como o trabalho total realizado no ciclo $ABCA$ é resultante da soma do trabalho em cada uma das etapas, concluímos que o trabalho total realizado pelo gás é positivo. Para que isso seja possível, isto é, para que o gás tenha realizado trabalho, é necessário que tenha recebido calor do meio externo, pois, no ciclo completo, a variação da energia interna é nula ($\Delta U = 0$).

Nas máquinas térmicas, há conversão de calor em trabalho mecânico. Um motor de explosão consiste em um dispositivo em que o pistão se desloca por ação da pressão de um gás. O trabalho é realizado pelo gás ($\mathcal{C} > 0$), e não ocorre variação de energia interna, pois se trata de uma transformação em que o gás sai de um estado e a ele retorna. Para realizar esse trabalho, o gás necessita de energia (calor). Como o gás recebe calor do meio, então $Q > 0$.

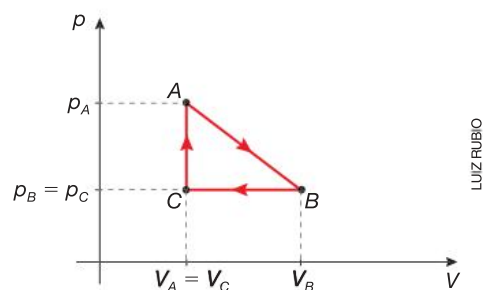


Figura 2 • O diagrama representa a transformação cíclica (no sentido horário) de uma massa gasosa.

E se a transformação cíclica ocorrer em sentido anti-horário, como representado no gráfico da figura 4?

Nesse caso, o ciclo não é constituído pelas mesmas transformações que o ciclo anterior. O trabalho realizado sobre o gás na etapa BA tem módulo maior que o trabalho realizado pelo gás na etapa CB , uma vez que a área sob a curva no trecho BA é maior que a área sob a curva no trecho CB . Nesse caso, o trabalho realizado na etapa CB é positivo (ocorre expansão) e o realizado na etapa BA é negativo (ocorre compressão). Como o trabalho total realizado no ciclo é resultante da soma dos trabalhos em cada uma das etapas, concluímos que o trabalho total é realizado **sobre** o gás e, portanto, é negativo ($\zeta < 0$). Nessa situação, o sistema cede calor ao meio, como ocorre, por exemplo, com as geladeiras e *freezers*.

De acordo com a 1ª lei da Termodinâmica: $\Delta U = Q - \zeta$

Uma vez que, nos ciclos, $\Delta U = 0$, temos:

$$Q - \zeta = 0 \Rightarrow Q = \zeta$$

As transformações gasosas cíclicas têm as seguintes características:

- Se durante o ciclo o gás realiza trabalho, este deve receber calor de uma fonte. Nesse tipo de ciclo, representado em um diagrama $p \times V$ por uma curva fechada orientada em sentido horário (fig. 5A), ocorre transformação de calor em trabalho mecânico, caso, por exemplo, das máquinas térmicas (máquinas a vapor e motores de combustão).
- Se durante o ciclo for realizado trabalho sobre o gás, este cede calor ao meio. Nesse tipo de transformação cíclica, representada em um diagrama $p \times V$ por uma curva fechada orientada em sentido anti-horário (fig. 5B), ocorre transformação de trabalho mecânico em calor, como nos refrigeradores e aparelhos de ar-condicionado.

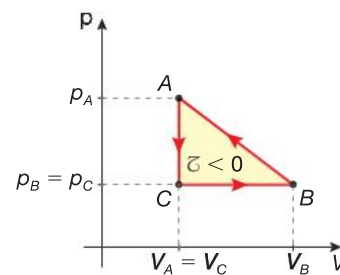


Figura 4 • O diagrama representa a transformação cíclica (no sentido anti-horário) de uma massa gasosa.

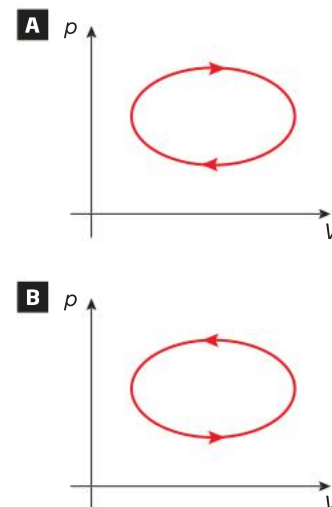
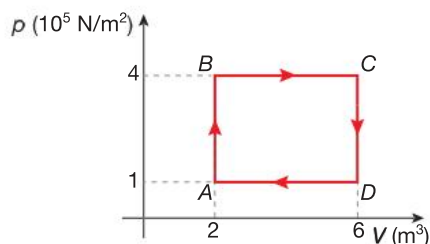


Figura 5 • Representação no diagrama $p \times V$ de transformações cíclicas.

QUESTÕES RESOLVIDAS

R1 Determinada massa de gás ideal realiza uma sequência de transformações gasosas em um ciclo $ABCD$, representadas ao lado no plano $p \times V$.



- Em quais trechos da transformação o gás realiza trabalho? Qual é o valor do trabalho, em joules, realizado pelo gás em um ciclo?
- Qual é a quantidade de calor trocada nesse ciclo?

► Resolução

- O gás realiza trabalho na expansão isobárica da etapa BC . Nas etapas AB e CD não há

realização de trabalho, pois não há variação de volume. Na etapa DA , é realizado trabalho sobre o gás, pois ocorre compressão.

O trabalho realizado (pelo gás ou sobre o gás), em um ciclo, é numericamente igual à área compreendida pela curva fechada que representa o ciclo em planos $p \times V$. No gráfico, o valor do trabalho pode ser obtido calculando a área do retângulo $ABCD$, ou seja, $4 \times 3 \times 10^5$. Assim, o trabalho realizado pelo gás nesse ciclo será de $1,2 \times 10^6$ J.

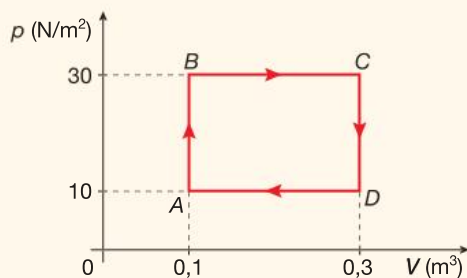
- Nas transformações cíclicas, não ocorre variação da energia interna. Assim, a quantidade de calor equivale ao trabalho realizado pelo gás ou sobre o gás. Como nesse ciclo o gás realiza trabalho e recebe calor da fonte, temos:

$$Q = 1,2 \times 10^6 \text{ J}$$

QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

- 1 O diagrama pressão (p) por volume (V) representa uma transformação cíclica de um gás perfeito.

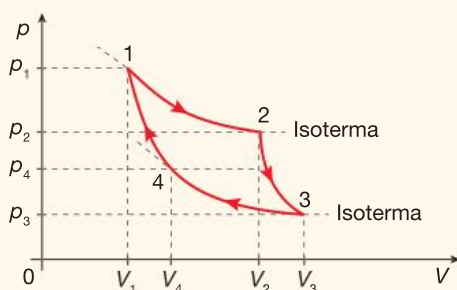


A respeito da transformação gasosa representada no diagrama são feitas as seguintes afirmações:

- A transformação gasosa AB é isotérmica, enquanto a transformação BC é isobárica.
- Na transformação AB, o trabalho é realizado pelo gás sobre o meio externo, enquanto, na transformação CD, o trabalho é realizado do meio externo sobre o gás.
- Ao completar o ciclo, a energia interna da massa gasosa diminui.
- O trabalho realizado pelo gás no ciclo é igual a 4 J.

Avalie as afirmativas e classifique-as em verdadeiras ou falsas. Justifique suas classificações.

- 2 Um gás ideal sofre as transformações gasosas esquematizadas a seguir em um diagrama pressão (p) por volume (V).

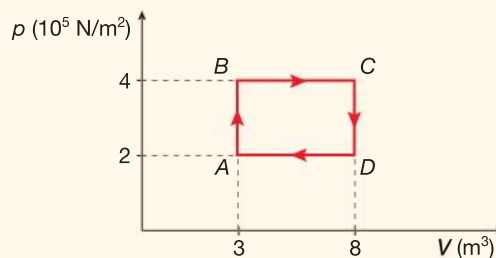


A respeito das transformações gasosas representadas no diagrama são feitas as seguintes afirmações:

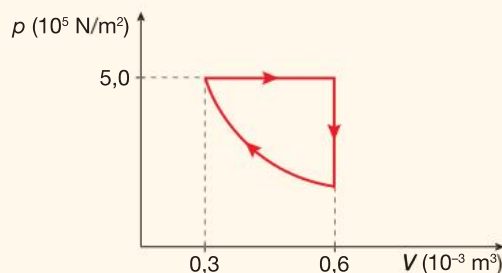
- O trabalho realizado pelo gás no ciclo é zero.
- A maior temperatura atingida pelo gás no ciclo ocorre na transformação 3 → 4.
- Ao longo do ciclo não há variação da temperatura e consequentemente não há variação da energia interna do gás.
- No ciclo representado, o gás realiza trabalho sobre o meio.

Avalie as afirmativas e classifique-as em verdadeiras ou falsas. Justifique suas classificações.

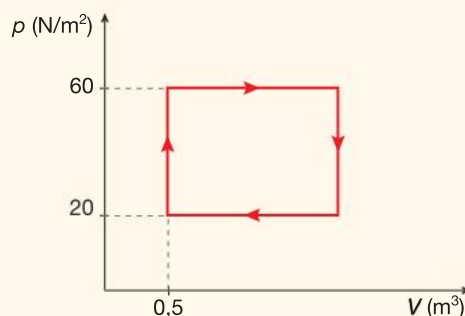
- 3 Uma massa de gás ideal realiza as transformações representadas no diagrama.



- Caracterize o tipo de transformação ocorrida em cada etapa.
 - Em quais etapas o trabalho é negativo, em quais é nulo e em quais é positivo?
 - Calcule o trabalho realizado durante todo o ciclo.
 - Qual foi a quantidade de calor trocada entre o gás e o meio externo nesse ciclo?
- 4 O ciclo das transformações sofridas por um gás, representado no diagrama, é formado por três etapas. Se o trabalho realizado sobre o gás na compressão adiabática é igual a -100 J, determine a quantidade total de calor absorvido pelo gás durante o ciclo.



- 5 Uma amostra de gás ideal sofre as transformações representadas no diagrama. Se, ao completar o ciclo, o trabalho que o gás exerce sobre as paredes do recipiente que o contém tem módulo 8 J, determine o volume máximo que atingiu no processo.



3 2ª Lei da Termodinâmica

Com base em nossa experiência cotidiana, sabemos que, se um objeto de vidro cair no chão, seus pedaços jamais se reagruparão sozinhos, reconstituindo o objeto original. De maneira espontânea, ou seja, sem intervenção externa, pedaços quebrados de vidro não se reagrupam.



Figura 6 • Misturar líquidos miscíveis ou quebrar objetos são exemplos de fenômenos irreversíveis. Nesse tipo de fenômeno, somente uma sequência de acontecimentos é possível. Imagem de preparação de tintas em indústria gráfica.

Da mesma forma, se misturarmos porções de sucos diferentes na mesma jarra, sabemos que será impossível eles retornarem à condição inicial sem a ação de algum agente externo que realize um procedimento para separá-los.

A 2ª lei da Termodinâmica descreve aquilo que não pode ocorrer de forma espontânea. Em outras palavras, é uma lei limitante. Enquanto a 1ª lei da Termodinâmica é regida pelo princípio da conservação de energia e pode ser aplicada a processos reversíveis ou não, em qualquer um dos sentidos desses processos, a 2ª lei restringe as ocorrências, apontando os limites da natureza. Vejamos algumas maneiras de enunciar essa lei.

Rudolf Clausius (1822-1888), professor e físico alemão, enunciou assim a 2ª lei da Termodinâmica:

O calor não passa de forma espontânea de um corpo de menor temperatura para outro que esteja em temperatura mais alta.

O fluxo de calor entre um corpo que está em temperatura menor e outro que está em temperatura maior não ocorre de forma espontânea, assim como os pedaços de um copo de vidro quebrado não se reúnem espontaneamente ou os componentes misturados nos sucos não se separam sem a intervenção de um agente externo.

William Thomson, mais conhecido como lorde Kelvin (1824-1907), e Max Planck (1848-1947) propuseram outro enunciado para a 2ª lei:

É impossível construir uma máquina térmica que, ao operar em ciclos, transforme integralmente em trabalho todo o calor que recebe.

Máquinas térmicas, como as locomotivas a carvão e os motores de automóveis, são dispositivos que transformam calor em trabalho mecânico por meio de **ciclos**. De acordo com a 2ª lei da Termodinâmica, não é possível construir máquinas térmicas cujo rendimento seja 100%.



S10

Consulte no *Suplemento* sugestão de trabalho com locomotivas a vapor.

4 Máquinas térmicas

As máquinas térmicas são dispositivos que transformam a energia na forma de calor em trabalho mecânico. No século I d.C., o grego Herão de Alexandria construiu um dos primeiros aparelhos que pode ser considerado uma máquina térmica (fig. 7). Seu funcionamento baseava-se no aquecimento de uma esfera de metal presa à parte superior do aparelho por dois tubos ocos. O vapor resultante do aquecimento da água contida na parte inferior do aparelho, ao sair pelos dois orifícios da esfera, provocava sua rotação. No entanto, esse dispositivo não foi criado com o objetivo prático de obter grande quantidade de trabalho mecânico. As máquinas térmicas inventadas com esse intuito foram criadas somente a partir do século XVIII.

Uma das primeiras máquinas térmicas visando uma aplicação prática foi construída pelo inglês Thomas Newcomen (1664-1729). A função dessa máquina era bombear água para retirá-la das minas de carvão. Outra aplicação desse mecanismo era a elevação de cargas nas minas (fig. 8A). Apesar de facilitar o trabalho, a máquina a vapor criada por Newcomen apresentava rendimento reduzido.



NELSON MATSUDA

Figura 7 • A eolípila, de Herão de Alexandria (século I), foi um dos primeiros modelos de máquinas térmicas. Nesse dispositivo, o vapor produzido pelo aquecimento da água na parte inferior alcança a esfera metálica e, ao escapar em jatos pelas duas saídas, faz a esfera girar. Em qualquer máquina térmica, da mais antiga à mais recente, a transformação de calor em trabalho mecânico nunca é integral. A 2ª lei da Termodinâmica trata desse tipo de regularidade: o limite. Uma máquina térmica nunca poderá atingir rendimento de 100%.

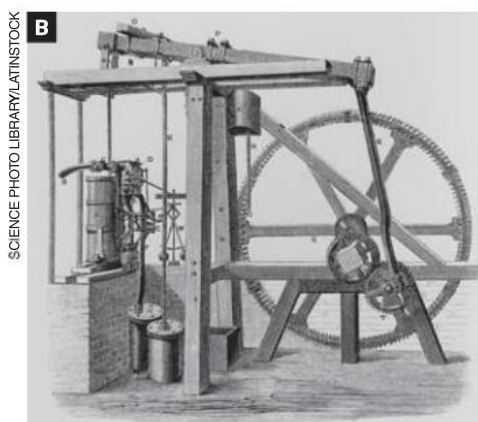
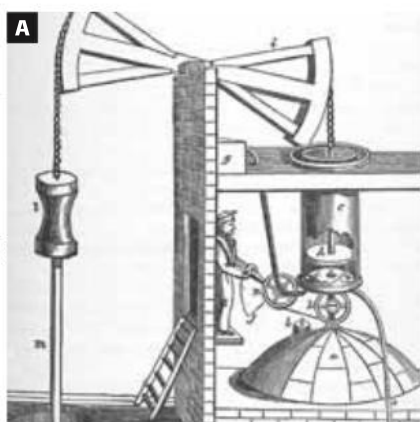


Figura 8 • (A) Thomas Newcomen (1664-1729) criou uma das primeiras máquinas térmicas de aplicação prática: bombear água das minas de carvão. (B) James Watt (1736-1819) aperfeiçoou a máquina de Newcomen criando um modelo que utilizava diferenças de pressão. (C) As máquinas mais modernas, como as turbinas a vapor, embora muito mais eficientes que suas predecessoras, não podem, por princípio, alcançar rendimento de 100%.

Ao ser chamado para consertar uma máquina térmica do tipo criada por Newcomen, o engenheiro escocês James Watt projetou um dispositivo para aperfeiçoá-la (fig. 8B). Watt introduziu um condensador, isto é, um compartimento que resfriava o vapor, mas não diminuía a temperatura do recipiente onde a água era aquecida. Essa invenção fez com que a potência da máquina térmica aperfeiçoada por Watt aumentasse significativamente em relação às das máquinas a vapor produzidas anteriormente.

Toda e qualquer máquina térmica necessita de uma substância para funcionar. Nas máquinas a vapor, como a de Watt ou de Newcomen, a água é a substância essencial para a transformação de calor em energia mecânica. Nos motores dos carros, misturas de substâncias como gasolina e ar ou de álcool e ar são necessárias para o funcionamento dos motores.

EXPLORE EM HISTÓRIA

Como a criação e a utilização de máquinas nas indústrias influenciaram a transformação das relações sociais a partir do final do século XVIII, durante a Revolução Industrial?



S11

No Suplemento, você encontra orientações para o trabalho com esse “Explore”.

Para a transformação contínua de calor em trabalho mecânico, as máquinas térmicas operam em ciclos. Retiram uma quantidade de calor (Q_1) de uma fonte quente e, de acordo com a 2ª lei da Termodinâmica, convertem parcialmente essa energia em trabalho mecânico (\mathcal{C}), rejeitando outra parte e transferindo-a na forma de quantidade de calor (Q_2) para uma fonte fria (fig. 9).

Já que é impossível construir uma máquina térmica que, ao operar em ciclos, transforme integralmente em trabalho todo o calor que recebe, podemos associar a cada máquina térmica uma grandeza para medir seu grau de eficiência.

Essa grandeza, denominada **rendimento** (η), consiste na razão entre o trabalho mecânico realizado pela máquina e a quantidade de calor fornecida pela fonte:

$$\eta = \frac{\mathcal{C}}{Q_1}$$

Quanto maior o valor de η , mais eficiente é a máquina térmica e, portanto, menor é a quantidade de calor dissipado para o ambiente.

Devemos lembrar que a 1ª lei da Termodinâmica, $\Delta U = Q - \mathcal{C}$, é universal e, portanto, válida para qualquer fenômeno. No caso da máquina térmica que realiza trabalho mecânico a partir da diferença nas quantidades de calor entre a fonte quente e a fria, temos:

$$Q_1 = \mathcal{C} + Q_2 \quad \text{ou} \quad \mathcal{C} = Q_1 - Q_2$$

Comparando essa expressão com aquela que descreve o rendimento de uma máquina térmica (em concordância com a 2ª lei da Termodinâmica), temos:

$$\eta = \frac{\mathcal{C}}{Q_1} \Rightarrow \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

A última expressão indica que o rendimento de uma máquina térmica é sempre menor que 1, ou seja, é sempre menor que 100%. Mas qual seria o rendimento máximo de uma máquina térmica? Como seria a sequência de transformações para que esse rendimento pudesse ser atingido? Essas questões nos levam ao estudo do ciclo de Carnot.

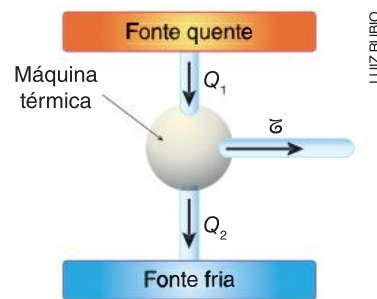


Figura 9 • Esquema de máquina térmica: Q_1 é a quantidade de calor fornecida pela fonte quente; \mathcal{C} é o trabalho mecânico realizado pela máquina; Q_2 é a quantidade de calor transferida para a fonte fria.

Para saber mais

Saber físico e tecnologia

Motor de explosão

Quando ouvimos a expressão *máquinas térmicas*, é comum associá-la a máquinas a vapor. De fato, os barcos a vapor, certas locomotivas e as panelas de pressão são máquinas térmicas. Mas você sabia que os carros também são máquinas térmicas? Mais precisamente, os motores de explosão, ou de combustão interna, que utilizam álcool, *diesel* ou gasolina, são máquinas térmicas desenvolvidas ao longo do século XX, bem recentes na história da humanidade.

Vamos descrever sucintamente o que ocorre num motor de quatro tempos, que funciona em ciclos. A maior parte dos carros em circulação utiliza esse tipo de motor.

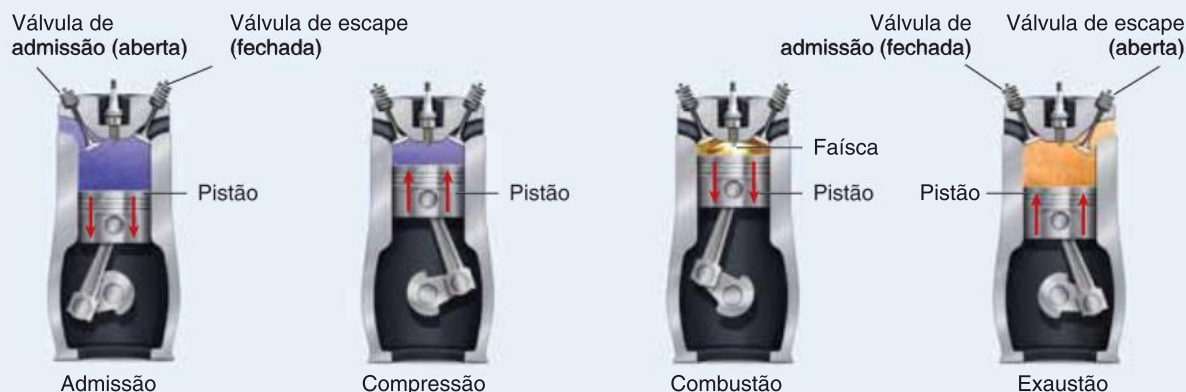
Na parte superior do motor, há um sistema de injeção eletrônica, responsável por dosar a quantidade e a composição de uma mistura de vapor de combustível e ar. Essa massa gasosa é então injetada em um pequeno cilindro, onde é comprimida e inflamada por meio de uma faísca elétrica. Assim, essa mistura de gases sofre uma combustão explosiva, gera grande quantidade de calor e

S12

No *Suplemento*, há indicação de simulação e de filme do ciclo de Otto dos motores de quatro tempos.

simultaneamente eleva a pressão do sistema gasoso. Essa pressão é transmitida ao pistão, que, ao ser impelido, provoca a rotação do eixo do motor, por meio de um sistema de alavancas e engrenagens.

Os quatro tempos



Fonte: Motores de quatro tempos: etapas de funcionamento. Disponível em: <http://www.ifufrgs.br/~dschulz/web/motores4t_etapas.htm>. Acesso em: 15 fev. 2016.

1º tempo: **admissão**. A válvula de admissão se abre, permitindo que a mistura gasosa entre no cilindro enquanto o pistão desce. Nessa fase, ocorre uma expansão isobárica sob pressão atmosférica (etapa OA do gráfico ao lado).

2º tempo: **compressão**. O pistão sobe e a massa gasosa sofre compressão na câmara. As válvulas de admissão e de escape permanecem fechadas, e a temperatura do gás se eleva. Agora, ocorre uma compressão adiabática (etapa AB).

3º tempo: **combustão**, ou **explosão**. Nessa etapa, a vela de ignição gera uma faísca elétrica que causa a combustão explosiva da mistura gasosa. O sistema gasoso sofre expansão e produz trabalho mecânico efetivo, pois força intensamente o pistão a descer. Essa força sobre o pistão provoca o movimento de rotação do eixo do motor, que está acoplado ao pistão. Nesse estágio, ocorre uma transformação isovolumétrica durante a explosão e a absorção de calor, seguida de uma expansão adiabática durante a realização de trabalho pelo gás (etapas BC e CD , respectivamente).

4º tempo: **exaustão**, ou **escapamento**. A válvula de escape se abre, permitindo a saída dos gases, e o pistão volta a subir. Ocorre transformação isovolumétrica seguida de compressão isobárica (etapas DA e AO , respectivamente).

O ciclo então se reinicia com o fechamento da válvula de escape, nova descida do pistão e reabertura da válvula de admissão.

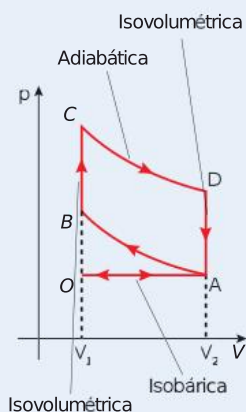


Gráfico $p \times V$ do ciclo de transformações gasosas que ocorrem em um motor de combustão.

AMPLIANDO SUA LEITURA

- 1 Quais transformações gasosas ocorrem durante o funcionamento do motor de um automóvel?
- 2 O motor pode estar funcionando com o automóvel parado ou em movimento. Nesses casos, as quatro etapas de funcionamento do motor estão sendo cumpridas. Por que, então, o consumo de combustível é maior quando o automóvel está em movimento?

5 Ciclo de Carnot: rendimento máximo

Idealizar uma sequência de ciclos que possibilitasse o rendimento máximo de uma máquina térmica: esse foi o desafio do engenheiro francês Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832). Em 1824, Carnot demonstrou teoricamente que o ciclo que possibilita rendimento máximo é reversível, ou seja, pode ser realizado tanto em um sentido quanto em outro (“da frente para trás” ou “de trás para a frente”). Carnot desenvolveu um ciclo especial (fig. 10) que lhe permitiu calcular o rendimento máximo que uma máquina térmica poderia atingir.

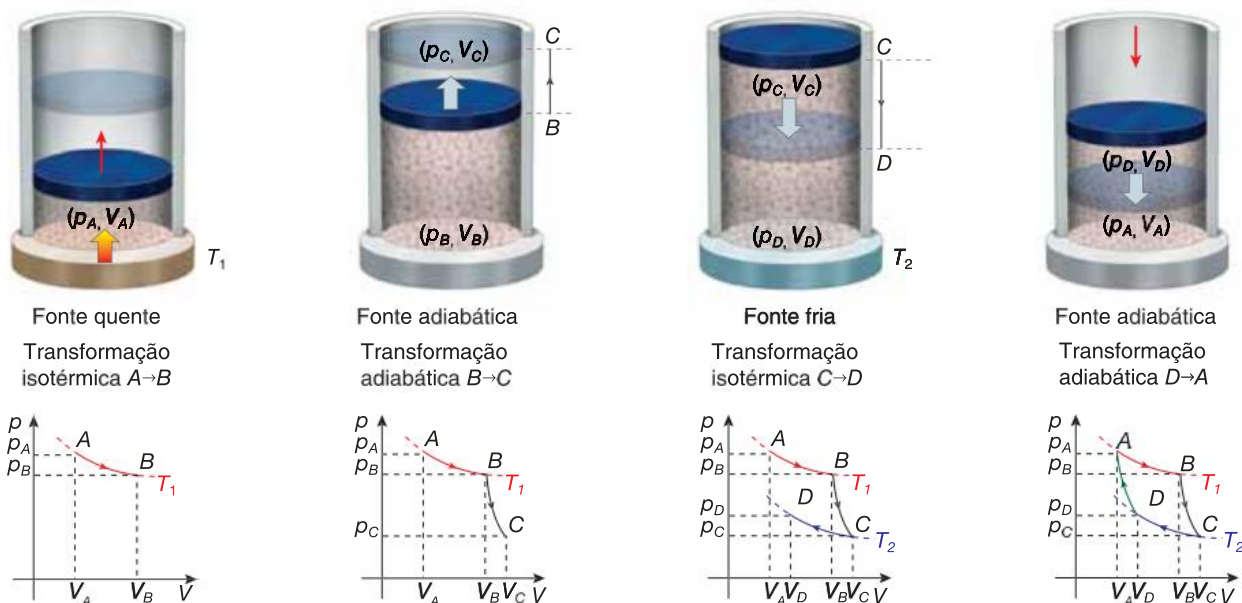


Figura 10 • Sequência de transformações em um ciclo de Carnot e suas representações gráficas. O ciclo reversível de Carnot é composto de duas transformações isotérmicas (a expansão AB e a compressão CD) intercaladas com duas adiabáticas (a expansão BC e a compressão DA). Note que as etapas AB e CD estão situadas ao longo de curvas isotérmicas.

Carnot demonstrou que o rendimento máximo de qualquer máquina térmica que opere entre as temperaturas absolutas (em kelvin) T_1 (da fonte quente) e T_2 (da fonte fria) será máximo se for reversível. Mostrou também que existe uma relação de proporcionalidade entre as quantidades de calor da fonte fria (Q_2) e da fonte quente (Q_1) e as temperaturas dessas duas fontes, da seguinte maneira:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

Sabemos que o rendimento de uma máquina térmica pode ser calculado pela expressão $\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$. Assim, o rendimento de uma máquina térmica que opere com ciclos de Carnot pode ser obtido por meio da expressão:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Observe que o ciclo de Carnot leva a conclusões importantes sobre o rendimento das máquinas térmicas:

- Nenhuma máquina térmica que opere entre as mesmas temperaturas absolutas, T_1 e T_2 , terá rendimento maior que a respectiva máquina térmica que opere com o ciclo idealizado por Carnot.
- Todas as máquinas térmicas que operem com o ciclo idealizado por Carnot, entre as temperaturas absolutas T_1 e T_2 , terão o mesmo rendimento. O rendimento de uma máquina de Carnot depende das temperaturas das fontes quente e fria.
- Apesar de máximo, o rendimento do ciclo de Carnot jamais será 100%, confirmando mais uma vez a 2ª lei da Termodinâmica. Para que uma máquina de Carnot trabalhasse obtendo rendimento 100%, sua fonte fria deveria estar à temperatura de 0 K, o que, como sabemos, é impossível.

S13

No Suplemento, há indicação de um site que disponibiliza uma animação relacionada ao ciclo de Carnot.

Carros com motores 1.0, 1.4, 1.6, 2.0: afinal, que diferença isso faz?

Já sabemos que um motor de automóvel é composto de vários cilindros e que, no interior de cada um, desloca-se um êmbolo móvel, também chamado de pistão.

Para responder à pergunta inicial deste texto, precisamos compreender o processo de realização de trabalho nos cilindros.

Tudo começa quando a mistura combustível-ar entra no cilindro pela chamada válvula de admissão. Pressionada pelo movimento do pistão e comprimida em um pequeno espaço, a mistura explode devido a uma faísca produzida pela vela. Com o aumento de pressão provocado pela expansão dos gases, o pistão é violentamente empurrado. Em outras palavras, o gás resultante da combustão da mistura ar-combustível aplica uma força sobre o pistão – equivalente em média a $15 \cdot 10^4$ N a cada explosão –, deslocando-o e, portanto, realizando trabalho. Como os pistões estão ligados a um eixo de manivelas (o virabrequim), o trabalho é convertido em movimento de rotação das rodas por meio do eixo de tração do automóvel. Dessa maneira, a energia térmica é transformada em energia mecânica, o que caracteriza o carro como uma máquina térmica.

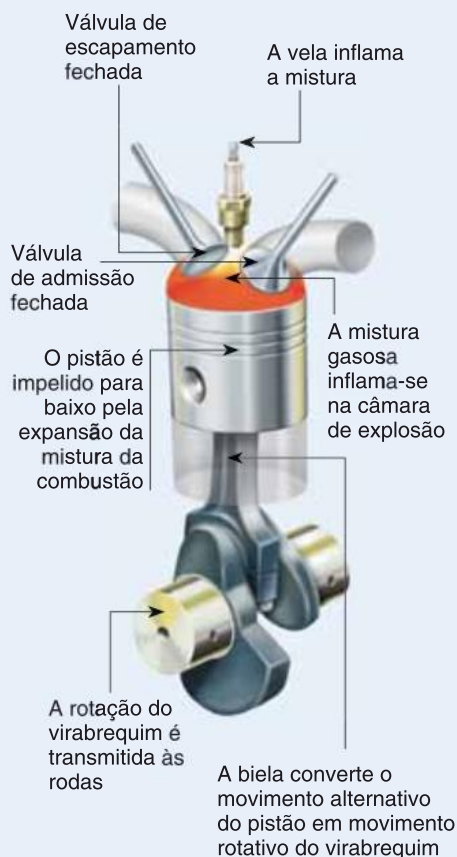
Os números 1.0, 1.4, 1.6 etc. referem-se ao deslocamento volumétrico do pistão ao percorrer o cilindro. Isso significa que o gás resultante da explosão realiza trabalho cujo valor é calculado pela expressão: $\zeta = p \cdot \Delta V$. Quanto maior o deslocamento do pistão, maior será o volume ΔV “varrido” por ele e, assim, maior será o trabalho realizado a cada explosão, determinando maior potência associada a esse motor (lembre-se de que a potência mecânica é dada pela razão entre ζ e Δt).

O deslocamento volumétrico do pistão a cada explosão é também chamado de **cilindrada**. Suponhamos que, em determinado motor de quatro pistões, cada pistão “varre” um volume de 250 cm^3 . Teremos um $\Delta V = 250 \cdot 4 \Rightarrow \Delta V = 1.000 \text{ cm}^3$. Lembrando que esse valor corresponde a 1,0 litro, isso resulta em um motor 1.0 ou de 1.000 cilindradas. Quanto maior o deslocamento volumétrico de cada pistão, mais potente será o motor do carro, pois em cada ciclo será produzida maior quantidade de trabalho. Em um automóvel 2.0, mais potente que os modelos 1.0, cada um dos quatro pistões “varre” um volume $\Delta V = 500 \text{ cm}^3 = 0,5$ litro, o que, multiplicado por quatro, resulta em $\Delta V = 2$ litros: o dobro do deslocamento volumétrico do modelo 1.0, o que significa uma quantidade de energia transformada duas vezes maior.

AMPLIANDO SUA LEITURA

- 1 A massa de determinado modelo de automóvel 1.0 é cerca de 900 kg, ou seja, seu peso é aproximadamente $9,0 \times 10^3$ N. Compare o peso desse automóvel com a força média aplicada nos pistões do motor e responda: quantas vezes o peso do automóvel é menor que a força aplicada nos quatro pistões?
- 2 Alguns automóveis mais potentes têm motor de 6 ou 8 cilindros. Uma montadora fabrica um dos seus modelos de 6 cilindros com motor 4.0.
 - a) O que significa dizer que o motor é 4.0?
 - b) Qual é, aproximadamente, o volume “varrido” por pistão nesse motor?

Como se produz a força motriz do motor



LUIZ RUBIO

QUESTÕES RESOLVIDAS

R2 Uma máquina térmica opera em ciclos de Carnot entre duas fontes, cujas temperaturas são 27°C (fonte fria) e 127°C (fonte quente). Em cada ciclo, a máquina térmica cede 450 cal para a fonte fria.

- Qual é o rendimento dessa máquina térmica?
- Qual é a quantidade de calor, em cal, que a máquina recebe da fonte quente a cada ciclo?

Resolução

a) Os dados de que dispomos são:

$$T_1 = 127 + 273 \therefore T_1 = 400\text{ K}$$

$$T_2 = 27 + 273 \therefore T_2 = 300\text{ K}$$

$$Q_2 = 450\text{ cal}$$

O rendimento da máquina de Carnot pode ser assim calculado:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{300}{400} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \eta = 1 - 0,75 \Rightarrow \eta = 0,25$$

ou seja, o rendimento dessa máquina é de 25%. (Em geral, o rendimento das máquinas térmicas é baixo, em torno de 30%.)

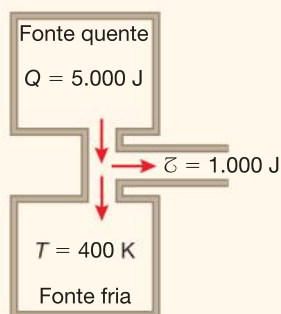
b) Nos ciclos de Carnot, a razão entre as quantidades de calor da fonte quente e da fonte fria é proporcional à razão entre as temperaturas dessas fontes. Podemos, então, escrever:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \frac{450}{Q_1} = \frac{300}{400} \therefore Q_1 = 600\text{ cal}$$

QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

6 Observe, abaixo, a representação das trocas de calor realizadas por uma máquina térmica em um ciclo. Se a máquina opera segundo um ciclo de Carnot, qual é, em kelvin, a temperatura da fonte quente?



7 Considere uma máquina de Carnot com rendimento de 40%, operando com temperaturas T_1 e T_2 das fontes fria e quente, respectivamente. O que ocorrerá com o rendimento da máquina caso o valor da temperatura T_2 seja dobrado?

8 Determinada máquina térmica opera segundo os ciclos de Carnot, entre duas fontes com temperaturas iguais a 227°C e 327°C , rejeitando, em cada ciclo, 200 cal para a fonte fria. Calcule:

- o rendimento dessa máquina;
- a quantidade de calor que ela recebe da fonte quente a cada ciclo.

9 As fontes fria e quente de uma máquina térmica de Carnot operam com temperaturas de 400 K e

500 K . Se a cada ciclo a máquina rejeita à fonte fria 1.000 cal , qual é a quantidade de calor que recebe da fonte quente?

10 Uma máquina opera segundo o ciclo de Carnot com rendimento de 75%. Se a temperatura da fonte quente é de 450 K e, a cada ciclo, a máquina rejeita 500 cal para a fonte fria, qual é:

- a temperatura da fonte fria?
- a quantidade de calor recebida da fonte quente?

11 Operando entre duas fontes com temperaturas 100°C e 0°C , uma máquina térmica recebe da fonte quente, por ciclo, 800 cal . Admitindo que essa máquina opera segundo o ciclo de Carnot, calcule:



- seu rendimento térmico;
- o trabalho, em joules, que realiza por ciclo;
- a quantidade de calor, em calorias, que rejeita para a fonte fria.

6 Máquinas frigoríficas: transformação de trabalho em calor

As máquinas frigoríficas são dispositivos que convertem trabalho em calor. Uma geladeira doméstica, por exemplo, é uma máquina que transfere calor de uma fonte fria, que está a uma temperatura mais baixa (os compartimentos internos onde estão os alimentos), para uma fonte quente, que está a uma temperatura mais alta (o ambiente externo).

Trata-se então de um dispositivo que contraria a 2ª lei da Termodinâmica? Não, pois essa transferência de calor de uma fonte fria para outra quente só é possível graças ao trabalho realizado por um agente externo. Nas geladeiras e *freezers*, um compressor realiza o trabalho e, para isso, é necessário o uso de energia elétrica para que ocorra a transferência de calor de uma fonte para outra.

Basicamente, um refrigerador funciona cumprindo um ciclo em que o compressor comprime um gás até que este atinja o estado líquido. Isso acontece na serpentina externa (também chamada condensador). Na condensação do gás, há liberação de calor, que é transferido para o ambiente. Na etapa seguinte do ciclo, o líquido assim formado absorve calor ao passar pela serpentina interna (ou evaporador), retornando ao estado gasoso.

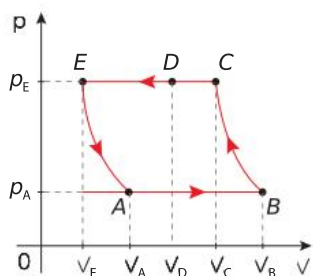


Figura 12 • Etapas do ciclo de transformações de uma substância, ora no estado líquido (ABC), ora no estado gasoso (CDE), em um refrigerador. As hipérbolas representam transformações adiabáticas.

A eficiência (e) de uma máquina frigorífica é obtida por meio da razão entre a quantidade de calor retirada da fonte fria (Q_2) e o trabalho externo (\mathcal{C}) realizado ao se transferir calor da fonte fria para a fonte quente.

$$\text{Eficiência de uma máquina frigorífica: } e = \frac{Q_2}{\mathcal{C}}$$

Eficiência máxima de uma máquina frigorífica:

$$e = \frac{Q_2}{\mathcal{C}} \Rightarrow e = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} \Rightarrow e = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

7 Entropia

Ao misturar em um único recipiente dois copos de água, um com gelo e outro a temperatura ambiente (25 °C, por exemplo), o sistema tende espontaneamente a alcançar equilíbrio térmico. Não há necessidade de um agente externo ou de gasto energético para esse equilíbrio térmico ser atingido.

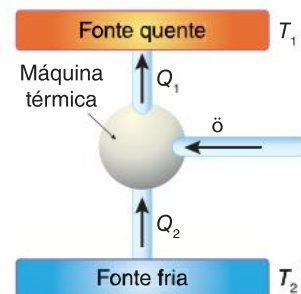
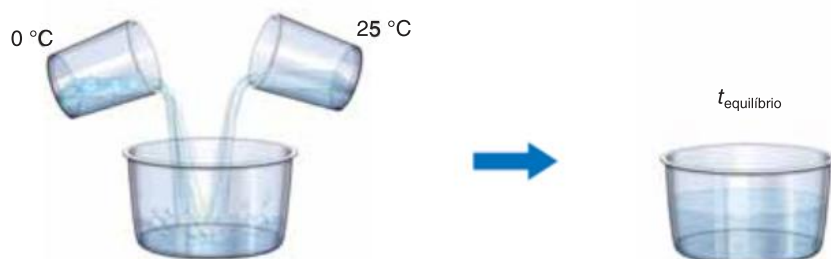


Figura 11 • Aparelhagens de ar-condicionado e de produção de gelo máquinas frigoríficas. Todas funcionam com base no balanço energético representado no diagrama: a quantidade de calor cedida à fonte quente (Q_1) equivale à quantidade de calor retirada da fonte fria (Q_2) adicionada ao trabalho realizado na transferência de calor entre essas fontes (B).



Figura 13 • Compressor, condensador (ou serpentina externa), válvula de expansão e evaporador (ou serpentina interna) são os componentes fundamentais de um refrigerador.

Figura 14 • Após algum tempo, a mistura dos dois líquidos com diferentes temperaturas atinge o equilíbrio térmico.

Essa mistura pode ser classificada como um processo irreversível, pois não é possível, sem a ação de um agente externo ou sem gasto energético, que as porções originais se separem e retornem às temperaturas iniciais. Além disso, ao efetuar essa mistura, removemos desse sistema sua capacidade de realizar trabalho.

Mas dois copos de água a temperaturas diferentes podem realizar trabalho? Sim, pois constituem duas fontes com temperaturas distintas, ou seja, uma fonte quente e uma fonte fria. No entanto, ao misturar as massas de água, obtemos uma única fonte (porção de água) em equilíbrio térmico e a capacidade anterior de realizar trabalho será perdida.

Podemos dizer que todos os fenômenos da natureza são irreversíveis, pois neles a energia útil disponível para a realização de trabalho tende sempre a diminuir, ou seja, processos ou fenômenos reversíveis são idealizações que não ocorrem na natureza, nem de maneira espontânea. A energia total de um sistema e de sua vizinhança, porém, sempre se conserva, como garante o princípio da conservação de energia, expresso na 1ª lei da Termodinâmica.

No entanto, há uma tendência de transformação da energia total em uma forma de energia que não pode ser reutilizada: a energia térmica. Dizemos que as energias mecânica, elétrica, nuclear etc. se degradam, pois se transformam em energia térmica.

A 2ª lei da Termodinâmica expressa esse princípio de degradação da energia, pois afirma claramente a impossibilidade da transformação integral de calor em trabalho. Assim, em qualquer sistema ou fenômeno sempre há perda de energia útil. A energia total se conserva (1ª lei), mas se degrada (2ª lei).

1ª lei da Termodinâmica
A energia total se conserva (quantitativamente)...

2ª lei da Termodinâmica
... mas se degrada (qualitativamente).

Ainda analisando a mistura dos dois copos de água, verifica-se uma diminuição do **grau de ordenação** do sistema antes e depois da mistura. Antes de serem colocadas em contato, as moléculas de água menos agitadas (as do copo com gelo) estavam separadas das moléculas mais agitadas (as que estavam no copo à temperatura ambiente) (fig. 15). Quando as moléculas entram em contato e se estabelece o equilíbrio térmico, torna-se impossível distingui-las. Podemos dizer que o grau de ordenação do sistema diminuiu ou que a desordem (falta de ordenação) aumentou.

Em uma expansão livre de um gás, também ocorre aumento da desordem, como no exemplo anterior. Imagine um recipiente **A** que contém um gás ideal e um **B** vazio (vácuo). Esses recipientes se comunicam por um tubo e uma válvula inicialmente fechada (fig. 16). Ao abrir a torneira, o gás passa a ocupar o volume total dos dois recipientes. Nessa transformação, o grau de desordem aumenta, pois as moléculas de gás passam a se movimentar por um espaço maior que na situação inicial.

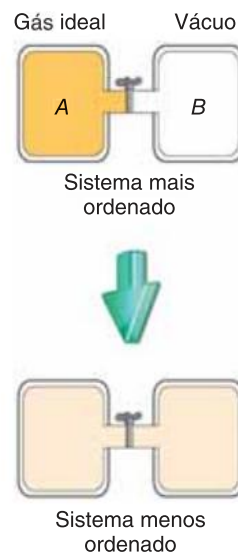
Se você se perguntar se é possível que todas as moléculas do gás voltem a ocupar apenas o recipiente **A**, provavelmente sua resposta será não. A interpretação do enunciado da 2ª lei da Termodinâmica está relacionada a esta proposição: é impossível que o sistema volte espontaneamente a ocupar a configuração inicial ordenada (todas as moléculas no recipiente **A**) a partir da configuração menos ordenada (moléculas ocupando também o recipiente **B**). Em algum instante, o número de moléculas no recipiente **A** pode ser bem maior que no recipiente **B**, mas ele nunca estará vazio como na configuração inicial.

Clausius, no início da segunda metade do século XIX, desenvolveu uma relação matemática que expressa o aumento da desordem e a degradação de energia, alterações conhecidas como **variação da entropia**. A **entropia** (S), característica intrínseca de todo e qualquer sistema, aumenta à medida que a desordem dos fenômenos aumenta. Uma vez que em todos os fenômenos naturais há tendência a alcançar um estado de menor grau de ordenação, dizemos que existe uma tendência ao aumento da entropia do Universo.



ILUSTRAÇÕES: SELMA CAPARROZ

Figura 15 • A mistura dos dois copos de água com temperaturas diferentes gera um sistema menos ordenado.



ILUSTRAÇÕES: LUIZ RUBIO

Figura 16 • A expansão livre de um gás também gera um sistema menos ordenado.

Já sabe responder?

Por que as geladeiras transmitem calor para o ambiente?



FOTOS: VOLKAN SENGOR/GETTY IMAGES

QUESTÕES RESOLVIDAS

- R3** Um refrigerador retira 40 cal do congelador em cada ciclo do gás que utiliza. Nesse processo, o local onde o refrigerador está instalado recebe 200 J a cada ciclo. Considere 1 cal = 4 J. Qual é a eficiência dessa máquina térmica?

► Resolução

A quantidade de calor que o meio externo recebe por ciclo é:

$$Q_1 = 200 \text{ J}$$

E a quantidade de calor que o refrigerador retira do congelador é dada por:

$$Q_2 = 40 \text{ cal} \cdot 4 = 160 \text{ J}$$

Dessa maneira, a diferença entre esses dois valores equivale ao trabalho realizado pelo compressor do refrigerador para retirar calor de um sistema de menor temperatura para outro de maior temperatura, ou seja:

$$\mathcal{C} = Q_1 - Q_2 = 40 \text{ J}$$

Para calcular a eficiência dessa máquina, devemos calcular a relação entre Q_1 e o trabalho (\mathcal{C}) realizado pelo compressor. Assim:

$$\text{eficiência } e = \frac{Q_2}{\mathcal{C}} \Rightarrow e = \frac{200}{40} \Rightarrow e = 5$$

QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

- 12** Uma máquina frigorífica retira 60 cal por ciclo de um congelador e rejeita para o ambiente 80 cal durante esse processo. Considere 1 cal = 4,2 J e calcule:
- o trabalho da máquina em cada ciclo;
 - a eficiência dessa máquina frigorífica.
- 13** Em um refrigerador, observa-se a transferência de calor de um corpo frio para um corpo mais quente. Pela 2ª lei da Termodinâmica, enunciada por Clausius, temos: “O calor não passa espontaneamente de um corpo frio para um corpo mais quente”. Escreva um texto explicando por que o funcionamento de um refrigerador não contraria o enunciado da 2ª lei proposto por Clausius.
- 14** Em um dia de verão, um aparelho de ar-condicionado consome cerca de 1.800 calorias de energia elétrica para retirar determinada quantidade de energia do local fechado que está sendo climatizado. Simultaneamente, esse aparelho rejeita 2.600 calorias para o exterior. Qual é a eficiência desse aparelho?

Geladeiras de ontem e de hoje

As primeiras geladeiras domésticas eram abastecidas com blocos de gelo adquiridos em fábricas. O gelo era colocado na parte inferior, para manter o ar interno refrigerado. Quando o gelo acabava, era necessário colocar outro bloco.

Somente no início do século XX, com a instalação das redes de energia elétrica, as geladeiras passaram a ser eficientes para conservar os alimentos por mais tempo.

Atualmente, há vários modelos de geladeira. Alguns têm o congelador na parte interna, outros, na parte externa, com porta independente do módulo de refrigeração. O congelador conserva os alimentos em temperaturas inferiores a 0°C . Nesse compartimento, são armazenados, por exemplo, carnes e outros produtos para serem congelados. De acordo com os fabricantes, verduras e legumes devem ser acondicionados nas gavetas inferiores do refrigerador, pois são alimentos que não necessitam de temperaturas muito próximas de 0°C .

Já estão disponíveis no mercado brasileiro geladeiras verticais, com os módulos invertidos, ou seja, o *freezer* na parte inferior. Os fabricantes apostam na capacidade de venda do produto alegando que, nesse modelo, o acesso aos alimentos que usamos com mais frequência fica facilitado. De qualquer modo, o preço de venda desses refrigeradores é maior do que o dos tradicionais, pois esses modelos devem contar com sistema de ventilação forçada, equipamento dispensável nos demais.



Geladeira modelo Monitor-Top, de 1927, a primeira a ter sucesso mundial. Nesse modelo, o compressor ficava sobre a geladeira.



Modelo de refrigerador com congelador na parte inferior.

- 1 Por que os refrigeradores verticais com os módulos invertidos devem ter um sistema forçado de ventilação?
- 2 Supondo que as temperaturas máxima e mínima de uma geladeira com módulos invertidos sejam as mesmas dos modelos tradicionais, o que ocorrerá com o valor de sua eficiência máxima?
- 3 Se a geladeira com módulos invertidos retirar 80 cal por ciclo de seu congelador e, durante esse processo, rejeitar para o ambiente 120 cal, qual será a eficiência desse refrigerador, considerando $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$?

A desordem dos feijões

Nesta unidade, vimos que, em um sistema fechado, a organização diminui com o tempo. A grandeza física que mede esse grau de organização é chamada de entropia. No Universo, a entropia sempre aumenta, porque a desorganização dos sistemas está em constante crescimento.

No experimento proposto, vamos avaliar o comportamento de um sistema em relação à sua entropia.

Material

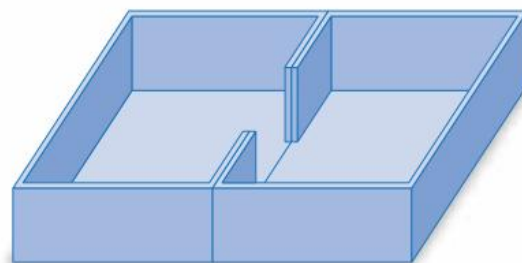
- Duas caixas de fósforos vazias, completas; cola branca; 20 grãos de feijão de dois tipos diferentes, por exemplo, 10 de feijão-preto e 10 de feijão-branco.

Montagem

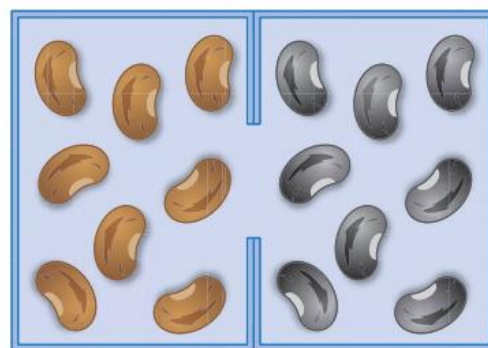
Cole as duas caixas, sem a tampa, unindo-as por uma das laterais maiores. Faça uma abertura no meio das duas caixas (figura ao lado), de modo a permitir a passagem dos feijões.

Procedimento

- 1 Em cada uma das caixas, coloque 10 grãos de feijão iguais entre si (figura abaixo).
- 2 Depois, feche as caixas de fósforos com as tampas previamente desmontadas e unidas com fita adesiva e agite o conjunto. Ao realizar a atividade, é importante que a caixa esteja sobre uma mesa, para que não se incline e altere a simetria do sistema.
- 3 Em seguida, abra as caixas de fósforos e anote em seu caderno o número de grãos de feijão de cada tipo em cada lado das caixas.
- 4 Repita esse procedimento três vezes, sempre com os grãos separados por tipo em cada lado das caixas.
- 5 Em seguida, coloque mais 20 grãos de cada tipo em cada lado das caixas e repita os procedimentos anteriores.



Compartimentos colados e abertos na divisória central.



Grãos de feijão organizados nas caixas.

Questões

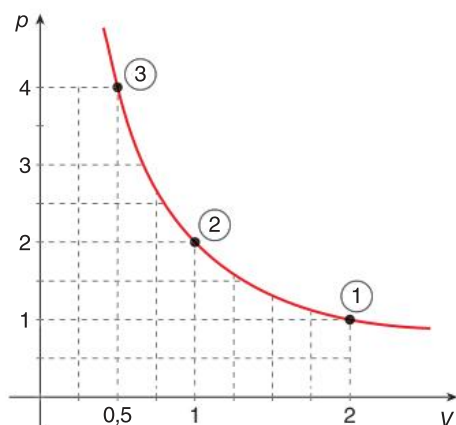
- 1 O que é possível afirmar sobre o nível de organização dentro das caixas logo após os grãos de feijão terem sido colocados? E sobre o nível de organização depois da agitação? Qual estado é mais organizado?
- 2 Após a agitação, o número de grãos de um tipo ficou próximo da quantidade dos feijões do outro tipo em cada lado ou houve uma tendência a ficarem separados?
- 3 Explique os resultados obtidos do ponto de vista da 2ª lei da Termodinâmica.
- 4 Após a nova agitação, provavelmente ficou mais evidente a dificuldade de conseguir que o sistema voltasse à situação inicial. Para retornar ao estado inicial, ou seja, antes da agitação, possivelmente você teria de reorganizar os feijões um a um. Identifique a relação que essa constatação tem com a 2ª lei da Termodinâmica. Quanto mais feijões há na caixa, mais difícil é para o sistema voltar ao estado inicial. Por quê?

- 1 (Enem) A refrigeração e o congelamento de alimentos são responsáveis por uma parte significativa do consumo de energia elétrica numa residência típica. Para diminuir as perdas térmicas de uma geladeira, podem ser tomados alguns cuidados operacionais:

- I. Distribuir os alimentos nas prateleiras deixando espaços vazios entre eles, para que ocorra a circulação do ar frio para baixo e do quente para cima.
- II. Manter as paredes do congelador com camada bem espessa de gelo, para que o aumento da massa de gelo aumente a troca de calor no congelador.
- III. Limpar o radiador ("grade" na parte de trás) periodicamente, para que a gordura e a poeira que nele se depositam não reduzam a transferência de calor para o ambiente.

Para uma geladeira tradicional é correto indicar, apenas:

- a) a operação I.
 - b) a operação II.
 - c) as operações I e II.
 - d) as operações I e III.
 - e) as operações II e III.
- 2 (UFV-MG) As grandezas que definem completamente o estado de um gás são:
- a) somente pressão e volume.
 - b) apenas o volume e a temperatura.
 - c) massa e volume.
 - d) temperatura, volume e pressão.
 - e) massa, pressão, volume e temperatura.
- 3 (Ufac) Considere o gráfico a seguir:



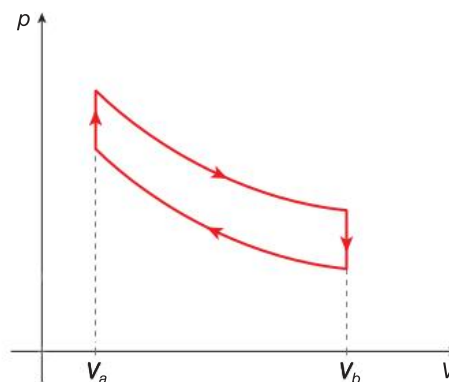
O gráfico acima representa um comportamento típico de um gás submetido à lei de Boyle-Mariotte ($P \cdot V = k$). Com relação à curva pode-se afirmar que:

- a) é uma isocórica e o valor de k é igual a 2,0.
- b) é uma isoterma e o valor de k é igual a 12,0.
- c) é uma isocórica e o valor de k é igual a 12,0.
- d) é uma isoterma e o valor de k é igual a 2,0.
- e) é uma isobárica e o valor de k é igual a 2,0.

- 4 (UFPB) Antes de iniciar uma viagem, um motorista cuidadoso calibra os pneus de seu carro, que estão à temperatura ambiente de 27°C , com uma pressão de 30 lb/pol^2 . Ao final da viagem, para determinar a temperatura dos pneus, o motorista mede a pressão dos mesmos e descobre que esta aumentou para 32 lb/pol^2 . Se o volume dos pneus permanece inalterado e se o gás no interior é ideal, o motorista determinou a temperatura dos pneus como sendo:

- a) 17°C
- b) 27°C
- c) 37°C
- d) 47°C
- e) 57°C

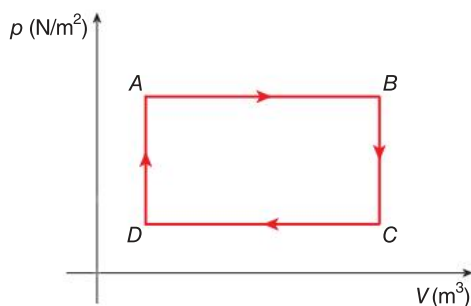
- 5 (UCS-RS) Os motores a combustão, como o dos automóveis movidos a gasolina ou a álcool, são classificados como máquinas térmicas que, operando em ciclos, entre fontes de calor quentes e frias, e recebendo e liberando fluídos operantes, produzem trabalho. Suponha um motor a combustão hipotético que possua um gás ideal como fluido operante e que nunca o troque. As transformações de estado desse gás ideal, durante um ciclo de operação do motor, estão representadas no gráfico pressão \times volume abaixo.



Conclui-se que o gás ideal:

- a) tem, durante todo o ciclo, a mesma temperatura.
- b) tem, durante todo o ciclo, o mesmo volume.
- c) gera quantidade de calor liberado mais trabalho executado maior do que a quantidade de calor recebido.
- d) tem, durante todo o ciclo, sua pressão variando.
- e) mantém o produto da sua pressão pelo seu volume constante durante todo o ciclo, de modo que sua temperatura sempre varie.

- 6 (IFG-GO) As máquinas térmicas são dispositivos que operam sempre em ciclos, isto é, retornam periodicamente às condições iniciais. Uma maneira de estudá-las é por meio de transformações que ocorrem dentro destes ciclos, representados por um gráfico do comportamento da pressão de um gás de trabalho em função do volume por ele ocupado. O gráfico a seguir representa um ciclo de uma máquina térmica realizado por um sistema gasoso:

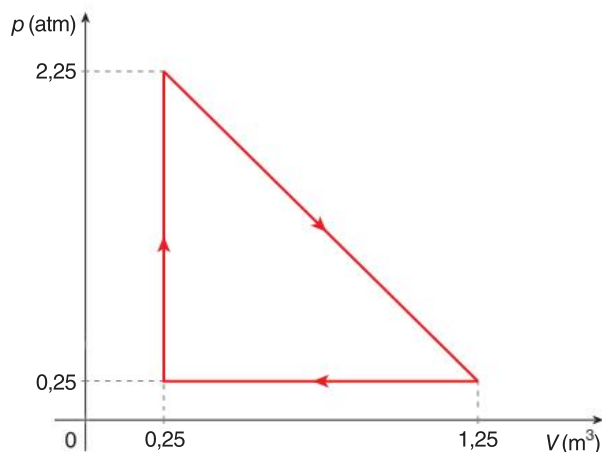


Analise as afirmativas.

- I. De A para B, ocorre uma expansão isobárica.
- II. De B para C, o trabalho é motor, ou seja, realizado pelo sistema.
- III. A variação de energia interna no ciclo ABCDA é positiva.
- IV. No ciclo fechado, ABCDA, não há variação de energia interna e o trabalho total é nulo.

Está(ão) correta(s):

- a) Apenas a afirmativa I.
 - b) Apenas as afirmativas I e II.
 - c) Apenas as afirmativas I e IV.
 - d) Apenas as afirmativas I, II e III.
 - e) Apenas as afirmativas I, II e IV.
- 7 (Udesc) A figura 2 apresenta um ciclo termodinâmico descrito por um gás. A alternativa que apresenta, para este ciclo, a variação de energia interna do gás e o trabalho por ele realizado, respectivamente, é:



- a) 0,0 J e $1,5 \times 10^5$ J
- b) 1,0 J e $2,0 \times 10^5$ J
- c) 0,0 J e $0,0 \times 10^5$ J
- d) 0,0 J e $1,0 \times 10^5$ J
- e) 0,5 J e $0,5 \times 10^5$ J

- 8 (Ufla-MG) Nos manuais de automóveis, na seção que trata da calibragem dos pneus, junto à pressão recomendada, encontramos a seguinte instrução: "Os pneus devem ser calibrados enquanto frios". Qual o motivo da recomendação?

- a) Se calibrarmos os pneus quentes com a pressão recomendada, ao esfriarem, a pressão cairá a valores mais baixos que o recomendado.
- b) Se calibrarmos os pneus quentes com ar à temperatura ambiente, podemos provocar rachaduras nas rodas.
- c) Se calibrarmos os pneus ainda quentes, podemos levar a vazamentos de ar, porque a borracha estará dilatada.
- d) Se calibrarmos os pneus quentes com a pressão recomendada, quando os pneus esfriarem a pressão ficará muito acima da recomendada, por causa da contração da borracha.
- e) Se calibrarmos os pneus a frio, gastaremos menos ar para enchê-los.

- 9 (Cefet-PR) O 2º princípio da Termodinâmica pode ser enunciado da seguinte forma: "É impossível construir uma máquina térmica operando em ciclos, cujo único efeito seja retirar calor de uma fonte e convertê-lo integralmente em trabalho". Por extensão, esse princípio nos leva a concluir que:

- a) sempre se pode construir máquinas térmicas cujo rendimento seja 100%;
- b) qualquer máquina térmica necessita apenas de uma fonte quente;
- c) calor e trabalho não são grandezas homogêneas;
- d) qualquer máquina térmica retira calor de uma fonte quente e rejeita parte desse calor para uma fonte fria;
- e) somente com uma fonte fria, mantida sempre a 0 K, seria possível a uma certa máquina térmica converter integralmente calor em trabalho.

- 10 (UPF-RS) Um ciclo de Carnot trabalha entre duas fontes térmicas: uma quente em temperatura de 227°C e uma fria em temperatura -73°C . O rendimento desta máquina, em percentual, é de:

- a) 10
- b) 25
- c) 35
- d) 50
- e) 60

UNIDADE

3

Princípios da Óptica geométrica e reflexão da luz

Para começo de conversa

Por que é mais difícil localizar um objeto em uma sala escura?

É habitual os alunos recorrerem ao senso comum para justificar, equivocadamente, que os raios saem dos olhos em direção ao objeto para que possamos enxergá-lo. No entanto, em um quarto escuro, ou em outro lugar escuro, não enxergamos porque não há uma fonte luminosa emitindo luz para o objeto refletir.

S1

Professor, consulte o *Suplemento* para obter orientações sobre a questão introdutória, os objetivos desta unidade e a proposta de abordagem inicial dos conteúdos.

Estação de Metrô em Tóquio, 2012.

JEREMY SUTTON-HIBBERT/GETTY IMAGES



Luz e imagens refletidas

Por que os objetos parecem menores à medida que nos distanciamos deles? Por que, ao observar um cubo de certo ângulo, algumas de suas arestas parecem convergir para um ponto, apesar de serem paralelas? Por que algumas imagens projetadas em uma parede aparecem invertidas? Por que a superfície da água consegue reproduzir com fidelidade o reflexo de um rosto? Como reduzir, ampliar ou multiplicar imagens utilizando um jogo de espelhos? A busca de respostas para essas e outras perguntas inspirou a ciência do Renascimento (séculos XVI-XVII). Entretanto, os cientistas não foram os únicos a contribuir para o desenvolvimento do estudo da luz e das imagens fornecidas por reflexão. Os pintores, principalmente os italianos, como Michelangelo, Leonardo da Vinci e Rafael, lançaram mão do pensamento racional, do rigor matemático, das proporções e da perspectiva para reproduzir cenas e pessoas da maneira mais fidedigna possível em seus quadros. Nesta unidade, vamos discutir as questões relacionadas ao comportamento e à reflexão da luz. Esses temas, que tanto intrigaram os pensadores do passado, conduzem a uma área da Física denominada Óptica, que estuda os fenômenos associados à luz e suas aplicações.

Capítulos

- 9 Princípios da propagação da luz
- 10 Reflexão da luz
- 11 Espelhos esféricos

Princípios da propagação da luz

ou: É possível uma pessoa parecer mais alta que a Torre Eiffel?



No Suplemento, há orientações para o trabalho com a questão introdutória.

1 Introdução

Sim, pois, dependendo do ângulo com que se avista a torre, seu tamanho poderá parecer reduzido, apresentando ser menor que uma pessoa.

Quem já tentou se locomover de olhos vendados sabe quanto somos dependentes da visão. Associamos a ela nossa capacidade de observar a natureza e especialmente a habilidade de construir diferentes representações do mundo. Como sabemos, para que seja possível enxergar, é necessário haver luz. A luz que nos permite ver provém de fontes como as lâmpadas ou o Sol.

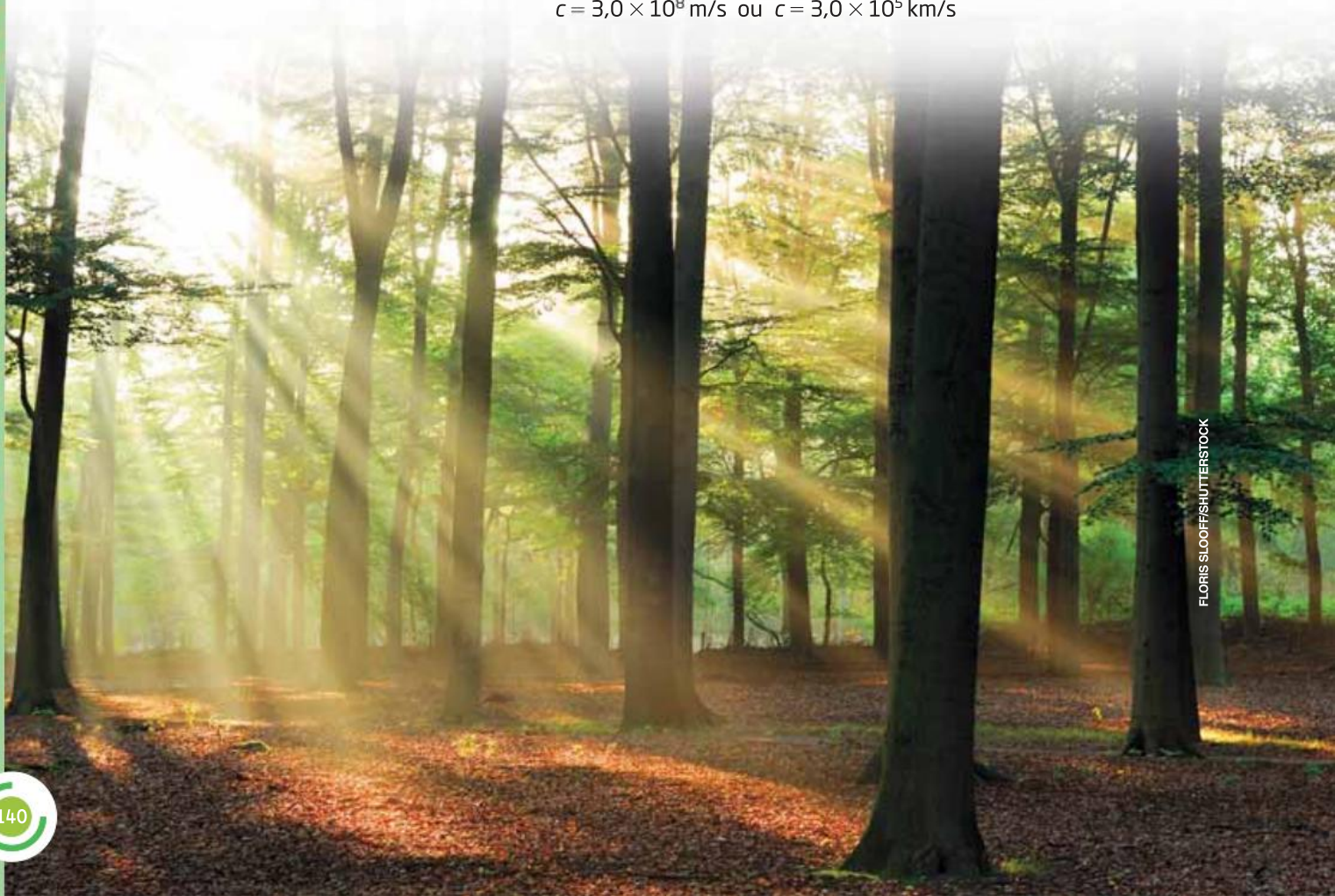
A luz e seu comportamento são estudados há muito tempo. Uma das teorias aceitas na Grécia antiga (por volta do século V a.C.) descrevia a luz como uma formação de pequenas partículas emitidas pelo olho em direção ao objeto observado, que se iluminava ao ser atingido por elas. Posteriormente, o filósofo grego Aristóteles (384-322 a.C.) propôs uma natureza ondulatória para a luz, considerando-a uma espécie de fluido imaterial que chegava aos nossos olhos, vindo dos objetos visíveis.

Sabemos hoje que muitos fenômenos que envolvem a luz também podem ser explicados por um modelo corpuscular da luz. Nesse modelo, a luz é considerada um feixe de partículas emitidas por uma fonte que atinge os olhos, estimulando a visão.

Vamos considerar que no vácuo a luz se propaga com velocidade constante, representada por c (do latim *celere* = rápido), de valor aproximadamente igual a:

$$c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s} \text{ ou } c = 3,0 \times 10^5 \text{ km/s}$$

Figura 1 • Imagem de raios solares em uma área arborizada. Nessa foto, é possível observar a trajetória retilínea da luz.



2 Luz em um modelo geométrico

A luz e os fenômenos associados à sua propagação são estudados na **Óptica geométrica** a partir do conceito de raio de luz.

Raios de luz são retas orientadas que representam a direção e o sentido de propagação da luz.



ILUSTRAÇÕES: LUIZ RUIBO

Os raios de luz são emitidos por fontes que podem produzir a luz que emanam (o Sol, a chama de uma vela, uma lâmpada acesa) e, por isso, são denominadas **fontes primárias** de luz. Entretanto, há aquelas que refletem a luz recebida de outras fontes (a Lua, uma lâmpada apagada, um livro) e, por isso, são classificadas como **fontes secundárias** de luz.

As fontes de luz podem ter ou não dimensões relevantes em relação à distância que estão dos objetos que iluminam. De acordo com essa relação, elas são classificadas em **fontes extensas** (uma lâmpada próxima de um objeto) ou **fontes pontuais**, também chamadas puntiformes (uma lâmpada muito afastada de um objeto).

Um conjunto de raios de luz forma um **feixe de luz**. Uma fonte pontual emite luz em todas as direções; por causa disso, emana dessa fonte um feixe **divergente** de raios de luz. No entanto, em uma lanterna, apesar de a lâmpada enviar luz em todas as direções, uma série de modificações faz com que o feixe emergente seja composto de raios praticamente **paralelos**. Quando a luz do sol passa através de uma lupa, a luz emergente converge para um ponto e compõe um feixe **convergente**.

Para resumir, observe a figura a seguir.



PAULO MANZI

Figura 2 • Representação artística dos feixes de luz estudados na Óptica geométrica. Cada tipo de feixe tem diferentes formas e organizações.

Óptica geométrica. Podemos estudar os fenômenos luminosos agrupando-os em dois grandes blocos: a Óptica geométrica e a Óptica física. Na Óptica geométrica, partimos do modelo de raio luminoso e, com base num conjunto de princípios, analisamos os fenômenos relativos à luz utilizando um modelo geométrico para explicá-los, sem nos ater à natureza da luz e a seu caráter ondulatório. Na Óptica física, tratamos dos fenômenos cuja compreensão depende de princípios e teorias referentes à natureza da luz.

3 Princípios da Óptica geométrica

O modelo geométrico adotado pela Óptica para explicar os fenômenos luminosos baseia-se em três princípios que condizem com nossa observação diária.

O primeiro, denominado **princípio da propagação retilínea da luz**, permite explicar por que, quando estamos atrás de uma porta de material opaco, não conseguimos enxergar através dela ou por que projetamos uma sombra ao andar sob o Sol. Para a Óptica geométrica, a luz não faz curvas, ou seja:

Propagando-se em um meio homogêneo e transparente, a trajetória da luz será uma linha reta.



Figura 3 • A luz do sol que incide no avião propaga-se em linha reta, ou seja, não faz curva e é barrada por ele. No solo está projetada uma região não iluminada de mesmo formato que o avião.

O segundo princípio afirma que, quando dois feixes de luz se cruzam (por exemplo, provenientes de duas lanternas ou de dois holofotes, ou mesmo de objetos em uma sala), um não interfere na trajetória do outro. É o chamado **princípio da independência dos raios luminosos**, que pode ser assim enunciado:

Os raios de luz são independentes; ao se interceptarem, cada um deles mantém sua trajetória como se os demais não existissem.



Figura 4 • O encontro de dois ou mais feixes de luz em nada altera sua direção de propagação. Cada um permanece em sua trajetória como se o outro não existisse.

O terceiro princípio revela como os raios de luz descrevem seus caminhos em relação à inversão de sentido. Em outras palavras, explica por que uma imagem refletida no espelho pode ser vista por muitas pessoas ao mesmo tempo. É o chamado **princípio da reversibilidade dos raios luminosos**, que afirma o seguinte:

A trajetória seguida pela luz independe do sentido de seu percurso.



FOTOS: FABIO YOSHIHITO MATSUURA

Figura 5 • O motorista vê o passageiro pelo espelho retrovisor e vice-versa, porque os raios de luz seguem a mesma trajetória em um sentido e no sentido oposto.

4 Meios de propagação da luz

O meio de propagação é o espaço onde a luz se propaga. São três os principais meios de propagação luminosa:

- **transparente** – aquele onde a luz se propaga segundo trajetórias regulares e bem definidas, propiciando uma visão nítida do objeto visado. Exemplos: ar, vácuo, água parada em pequenas camadas, vidro de faces paralelas e de pouca espessura (fig. 6).

RYAN MCVAY/GETTY IMAGES

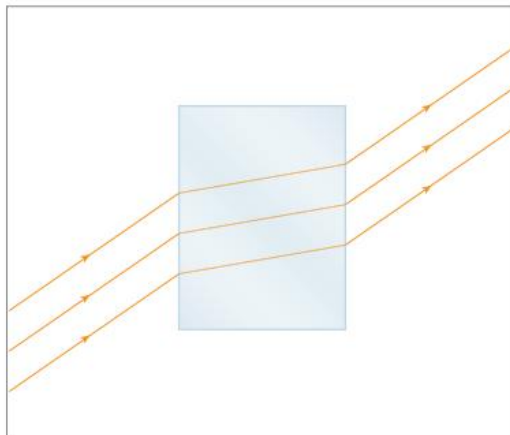


Figura 6

- **translúcido** – aquele onde as trajetórias de propagação são irregulares. O observador não consegue ver com nitidez o objeto visado. Exemplos: vidro fosco, meio com fumaça ou neblina, papel vegetal (fig. 7).

GUICCIARDINISCIENCE
PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

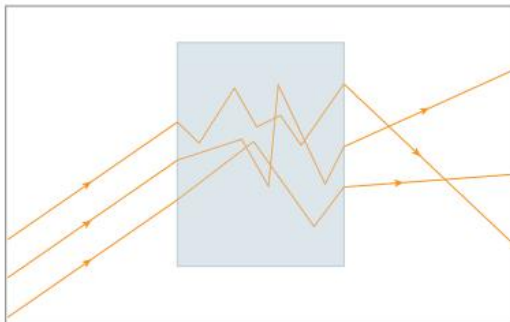


Figura 7

- **opaco** – aquele onde a luz praticamente não penetra (madeira, cartolina, tecido grosso, concreto). O meio impede a chegada da luz aos olhos do observador, que não vê o objeto visado (fig. 8).

COLIN HAWKINS/GETTY IMAGES

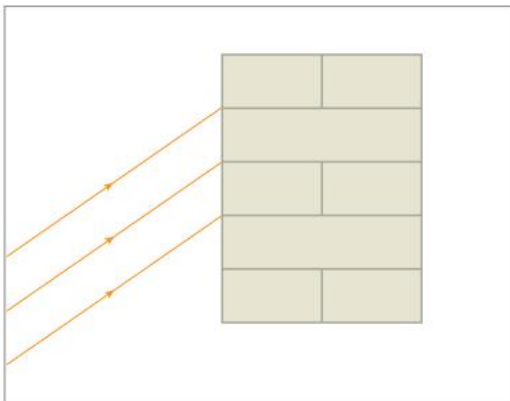


Figura 8

5 Sombra e penumbra

Um objeto opaco próximo de uma fonte pontual receberá uma parcela da luz proveniente da fonte. No entanto, haverá uma região, oposta à fonte, que não receberá luz e ficará escura. Essa região que não recebe os raios luminosos é denominada **sombra**. A projeção dessa sombra em um anteparo, uma parede, por exemplo, terá contornos bem delimitados e semelhantes aos do objeto que a originou e é denominada **sombra projetada** do objeto.

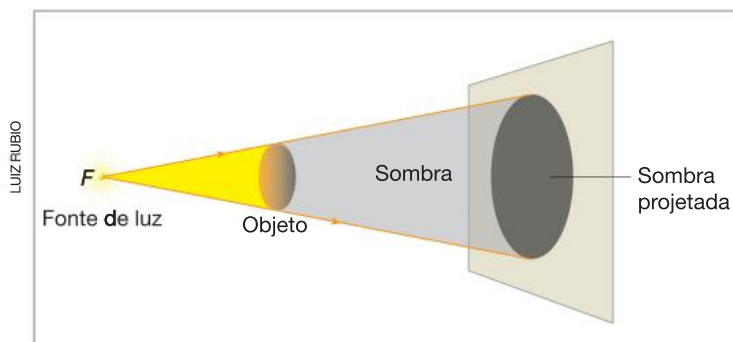


Figura 9 • O corpo do menino impede os raios de sol de prosseguirem até a areia. A bola, por sua vez, impede que os raios solares atinjam a camisa do garoto. A areia funciona como anteparo para a projeção da sombra do garoto, assim como sua camisa é o anteparo para a projeção da sombra da bola.

Se em vez de uma fonte pontual utilizarmos uma fonte extensa de luz para iluminar o objeto, notaremos que, no contorno externo da região da sombra projetada, vai surgir uma região parcialmente iluminada. Essa região, onde a iluminação é apenas parcial, recebe o nome de **penumbra projetada**.

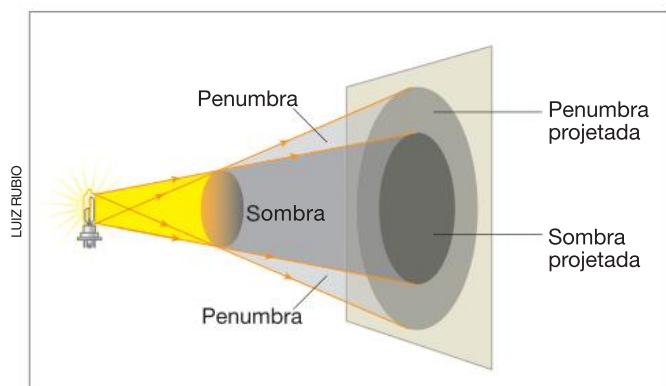


Figura 10 • Na foto, observa-se a delimitação de uma região onde não há luz (sombra projetada) e outra na qual alguns raios conseguem iluminar fracamente o anteparo (penumbra), contornando a região da sombra.

Já sabemos que o Sol é uma fonte primária e extensa de luz e que a Terra e a Lua são corpos opacos. Essa constatação, associada ao princípio de propagação retilínea da luz, permite entender como se formam os eclipses, fenômenos que ocorrem em consequência da passagem de um corpo celeste pela região de sombra ou de penumbra do outro. Um **eclipse solar** acontece quando a Lua, ao se colocar entre o Sol e a Terra, projeta sua sombra sobre a Terra. Um **eclipse lunar** ocorre quando a Terra impede a Lua de receber total ou parcialmente a luz do Sol, interpondo-se entre os dois astros.



S3

No *Suplemento*, você encontra orientações para o trabalho com este “Explore”.

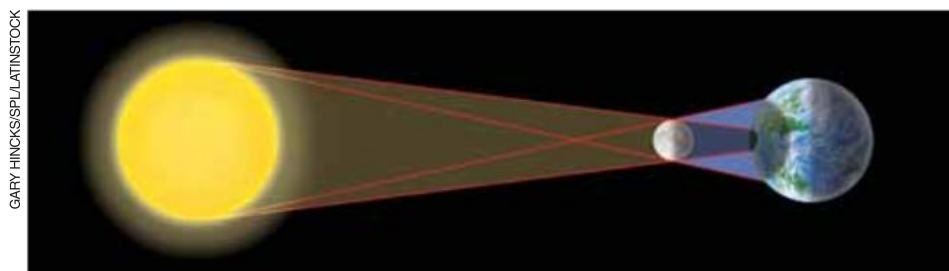


Figura 11 • A região da Terra onde a sombra da Lua está projetada sofre eclipse total do Sol. No entorno, ou seja, na região de penumbra, o eclipse é parcial. Representação sem escala, cores-fantasia.

EXPLORE EM HISTÓRIA

As civilizações antigas acreditavam que eclipses eram fenômenos com algum significado mitológico. Pesquise alguns desses significados.

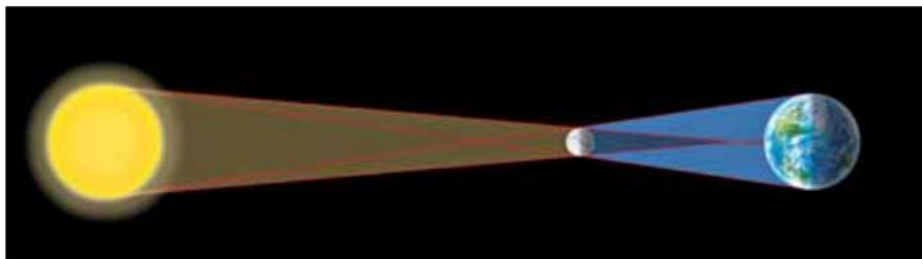


Figura 12 • Quando a sombra da Lua não consegue se projetar na Terra, ocorre o chamado eclipse anular. Um observador na Terra situado na região de penumbra enxerga o Sol sob a forma de um anel luminoso.

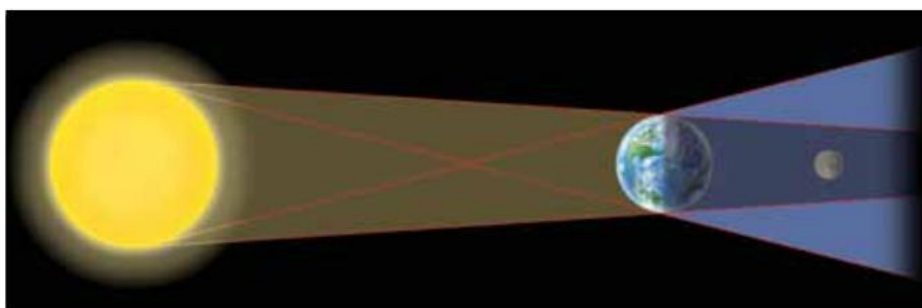


Figura 13 • A Lua, na região de sombra da Terra, caracteriza o eclipse lunar. Observe que a Lua entra primeiro no cone de penumbra da Terra e, depois, na região de sombra.

Representações sem escala, cores-fantasia.

QUESTÕES RESOLVIDAS

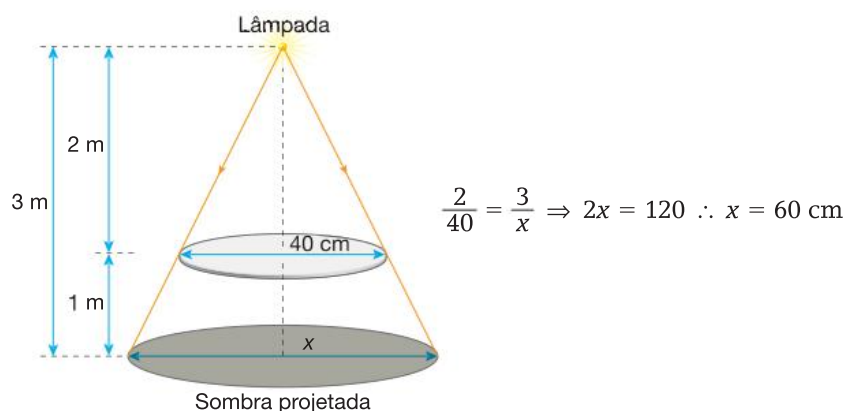
- R1** Uma lâmpada de dimensões desprezíveis está presa ao forro de uma sala e distante 3 m do chão. Um disco opaco de 40 cm de diâmetro é colocado horizontalmente entre a lâmpada e o solo, de tal maneira que o centro do disco e a lâmpada estejam na mesma vertical que passa pelo chão. Se a distância do disco ao chão é de 1,0 m, qual é a área de sua sombra projetada no solo?

► Resolução

O esquema da situação pode ajudar muito na resolução dos problemas relacionados à Óptica geométrica.

Para determinar a área da sombra projetada, devemos primeiro calcular seu diâmetro. Para isso, vamos utilizar a semelhança entre os triângulos determinados pela fonte de luz e as extremidades do disco e pela fonte e as extremidades da sombra projetada.

Chame a atenção dos alunos para o fato de que não há um triângulo de altura 1 m. Há uma clássica dificuldade em perceber que a semelhança de triângulos se dá entre o maior, de altura 3 m, e o menor, de altura 2 m. Sugira que os alunos representem graficamente a situação sempre que possível.



Se o diâmetro da sombra mede 60 cm, o raio tem medida 30 cm ou 0,3 m. Logo, lembrando que a área de um círculo é dada por $A = \pi R^2$, temos:

$$A = \pi(0,3)^2$$

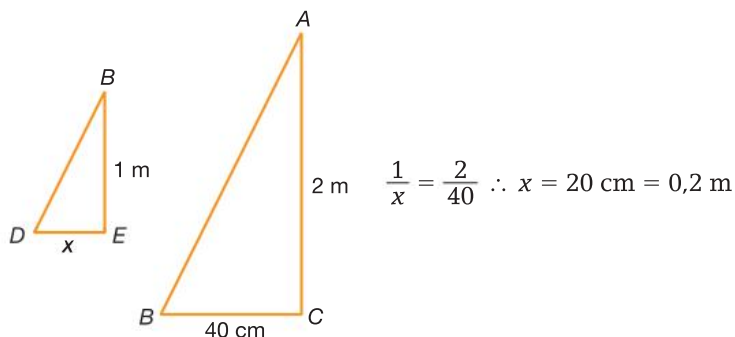
Para $\pi \approx 3$, temos: $A = 0,27 \text{ m}^2$

Portanto, a área da sombra projetada no solo é de $0,27 \text{ m}^2$.

- **R2** Suponha que a fonte citada no exercício anterior passe a ser extensa, de mesmo formato e dimensões do disco opaco. No chão, há agora uma região totalmente escura e uma de penumbra, também circular, que circunda a região da sombra. Determine os diâmetros das regiões da sombra e da penumbra projetada.

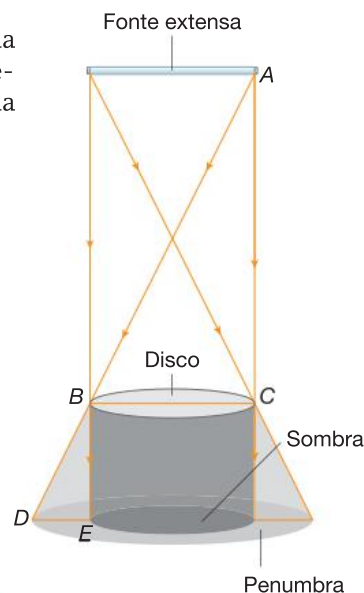
► **Resolução**

O esquema nos mostra que a região da sombra tem o mesmo diâmetro da fonte, ou seja, $D_{\text{sombra}} = 40 \text{ cm} = 0,4 \text{ m}$. A região da penumbra tem diâmetro interno de 40 cm , e o diâmetro externo pode ser calculado por meio da semelhança entre os triângulos ABC e BDE . Temos, então:



Então, o diâmetro total da região da penumbra será:

$$D_{\text{penumbra}} = x + x + D_{\text{sombra}} \therefore D_{\text{penumbra}} = 0,2 \text{ m} + 0,2 \text{ m} + 0,4 \text{ m} = 0,8 \text{ m}$$



ILUSTRAÇÕES: LUIZ RUBIO

Reprodução proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

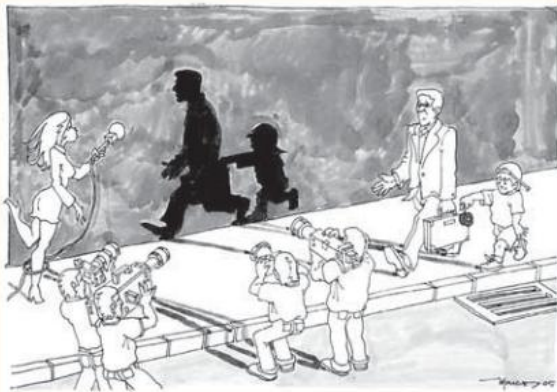
Como exposto no *Suplemento*, alguns alunos têm dificuldade em estabelecer o conceito de raio de luz e em determinar como se dá a visão dos objetos. A questão 1 trabalha mais uma vez essa ideia. Não deixe de consultar, no *Suplemento*, a parte referente à introdução da unidade.

QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

- Para que você leia o que está escrito neste livro, a luz precisou percorrer um caminho. De onde provém a luz que torna o livro visível para você? Descreva uma trajetória da luz que torna possível que você enxergue o livro e identifique nos objetos presentes nesse caminho as fontes primárias e secundárias de luz. Represente a situação graficamente utilizando a representação geométrica do raio de luz.
- Um holofote emite um feixe de luz verde que é interceptado por um feixe de luz vermelha. Ao seguir sua trajetória, o feixe verde encontra uma porta onde está fixado um espelho no qual incide e, ao ser refletido, retorna pelo mesmo caminho. Cite os princípios de propagação que tornam possível a situação descrita e identifique em cada parte do trajeto sua aplicação.
- Um muro de 2 m de altura produz uma sombra de 60 cm . No mesmo instante, um prédio produz uma sombra de 15 m . Determine a altura do prédio. Faça um esquema das trajetórias dos raios de luz representando a situação.
- À noite, um homem de $1,60 \text{ m}$ de altura está de pé, parado a $2,5 \text{ m}$ de distância de um poste que tem uma lâmpada acesa no alto. A sombra do homem projetada no chão tem 1 m de comprimento. Faça uma figura mostrando a formação da sombra e responda:
 - Qual é a distância da lâmpada ao chão?
 - Se a distância do homem ao poste se tornar duas vezes maior, o que ocorrerá com o comprimento da sua sombra?
- Supondo retilínea a trajetória da luz, um eclipse lunar pode ser explicado pela participação de três corpos alinhados: um anteparo, uma fonte e um obstáculo. Faça um esquema que represente esse eclipse e responda ao que se pede a seguir.
 - Quais são os três corpos do Sistema Solar envolvidos nesse tipo de eclipse?
 - Desses três corpos, qual deles faz o papel de anteparo? E de fonte? E de obstáculo?

6



MARCOS ANTONIO BICALHO

Fonte: BICALHO, Marcos Antonio. In: 32º Salão Internacional de Humor de Piracicaba, Brasil.

Charges fornecem momentos de muita descontração. Algumas nos fazem rir, já outras... Na charge, a luz incide nos objetos e nas pessoas. Verifica-se que, na parede, não há a sombra do ioiô com o qual o menino brinca, pois:

- I. ela está sendo projetada na sombra da pasta que o homem carrega.

II. a pasta funciona como um anteparo opaco, impedindo a passagem da luz.

III. a luz, que caminha em linha reta, não sofre desvios que permitam a projeção da sombra do ioiô na parede.

Está correto o contido em:

- a) I, apenas
b) III, apenas
c) I e II, apenas
d) I e III, apenas
e) II e III, apenas

7. (Uema) O edifício Monumental, localizado em um *shopping* de São Luís, MA, iluminado pelos raios solares, projeta uma sombra de comprimento $L = 80$ m. Simultaneamente, um homem de 1,80 m de altura, que está próximo ao edifício, projeta uma sombra de $I = 3,20$ m.

O valor correspondente, em metros, à altura do prédio é igual a:

- a) 50,00
b) 47,50
c) 45,00
d) 42,50
e) 40,00

6 Câmara escura de orifício

O funcionamento de uma máquina fotográfica baseia-se no princípio da propagação retilínea da luz. O objetivo da pessoa que fotografa é obter o registro da imagem de um objeto em uma superfície que deve ser sensível à luz.

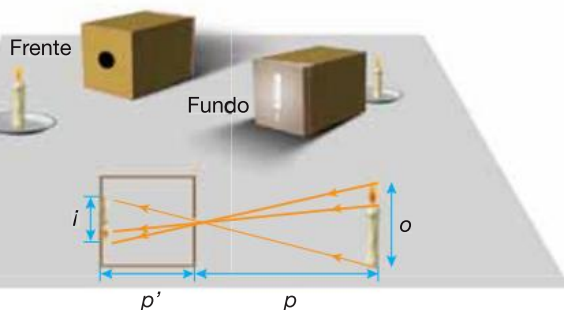
Pode-se construir um modelo simplificado de câmara com uma caixa fechada revestindo uma de suas faces com papel transparente e fazendo, na face diametralmente oposta, um pequeno orifício. Colocando uma fonte de luz – uma vela, por exemplo – diante da face que tem o orifício, observa-se que os raios luminosos provenientes da vela penetram na caixa pela abertura e atingem a parede oposta àquela onde está o papel, dando origem a uma região iluminada com forma semelhante à da vela, porém de orientação invertida. Quanto menor for o orifício da câmara, maior será a nitidez da imagem, porém menor luminosidade ela apresentará.

As relações entre as dimensões do objeto o e da imagem i podem ser obtidas por meio da semelhança de triângulos, como mostra a figura 14.

S4

A construção de uma câmara escura de orifício pode ser útil para a compreensão dos princípios de propagação da luz. Consulte no *Suplemento* uma atividade que tem como objetivo obter e analisar imagens conjugadas por uma câmara confeccionada pelos próprios alunos.

Esquema de máquina fotográfica



LUÍZ RUIBO

Figura 14 • Em uma câmara escura de orifício, a imagem projetada é invertida porque a luz se propaga em linha reta.

Pela semelhança entre os triângulos formados, temos:

$$\frac{i}{o} = \frac{p'}{p}$$

sendo p a distância do objeto e p' a distância da imagem até a câmara.

7 Ângulo visual ou diâmetro aparente

Imagine que você está viajando e vê uma árvore, na beira da estrada, a uma grande distância. É provável que, se colocar a mão em frente aos olhos, você conseguirá cobrir toda a imagem da árvore. Nessa situação, dizemos que o tamanho aparente da árvore é do comprimento da mão do observador. No entanto, à medida que a árvore vai se aproximando, seu tamanho aparente vai aumentando, até que, ao passar ao lado dela, você mal consegue avaliar sua altura. O que ocorreu com o tamanho aparente da árvore está relacionado à diminuição da distância entre o observador e o objeto, ou seja, houve alteração do que denominamos **ângulo visual** (fig. 15).

O ângulo α definido entre os raios de luz que partem das extremidades dos objetos e o ponto de incidência em nosso globo ocular é chamado de **ângulo visual**.

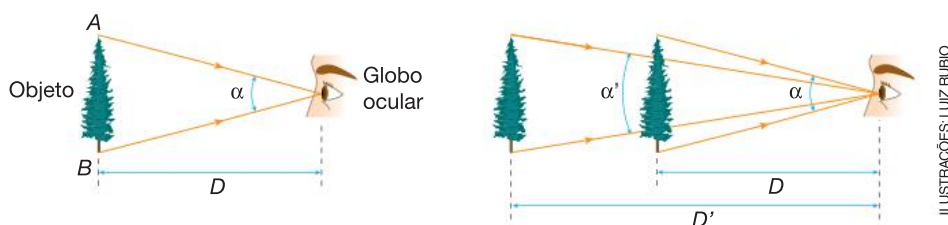


Figura 15 • Quanto mais afastado estiver o objeto, menor será o ângulo visual.

O ângulo visual depende das dimensões do objeto e da distância dele ao observador. Quanto maior for essa distância, menor será o ângulo visual e menor o tamanho aparente percebido pelo observador ao visualizar o objeto. Existe um valor médio mínimo do ângulo visual que permite ao observador distinguir diferentes pontos do objeto. Esse valor, denominado **limite de acuidade visual**, vale aproximadamente $1 \text{ minuto} \left(\frac{1}{60} \right)^\circ$.

8 Ano-luz

Uma medida de comprimento bastante utilizada em Astronomia é o ano-luz. Apesar do nome, trata-se de uma unidade relacionada à distância, e não ao tempo.

Um ano-luz é a distância percorrida pela luz no vácuo durante um ano.

Assim, uma estrela localizada a cerca de 30 anos-luz da Terra está a uma distância equivalente à percorrida pela luz durante 30 anos. Podemos calcular essa distância adotando o valor da velocidade da luz no vácuo, que é $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$, e o tempo em segundos. Para calcular a quantidade de segundos em 30 anos, vamos calcular esse valor para 1 ano:

$$\begin{aligned} 1 \text{ ano} &= 1 \text{ ano} \cdot \frac{365 \text{ dias}}{1 \text{ ano}} \cdot \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ dia}} \cdot \frac{60 \text{ minutos}}{1 \text{ hora}} \cdot \frac{60 \text{ segundos}}{1 \text{ minuto}} = \\ &= 31.536.000 \text{ segundos} \approx 3,15 \times 10^7 \text{ s} \end{aligned}$$

S5

Sugira que os alunos pensem na seguinte questão:
Por que o diâmetro do Sol ou da Lua aparenta ser maior quando esses astros são vistos próximo ao horizonte?
No *Suplemento*, discutimos a resposta.



Figura 16 • Os postes de luz têm o mesmo tamanho, no entanto são vistos com dimensões diferentes. O que varia não é a altura dos postes, mas o ângulo com que foram vistos pelo observador.

ROGÉRIO REISPULSAR IMAGENS

Reprodução proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

Logo, lembrando que $s = v \cdot t$, temos:

$$1 \text{ ano-luz} = 3 \times 10^8 \cdot 3,15 \times 10^7 \therefore 1 \text{ ano-luz} \approx 9,5 \times 10^{15} \text{ m}$$

Então, a distância dessa estrela à Terra corresponde a 30 vezes a distância equivalente a 1 ano-luz, que é aproximadamente $2,8 \times 10^{17} \text{ m}$ ou $2,8 \times 10^{14} \text{ km}$.

Para saber mais

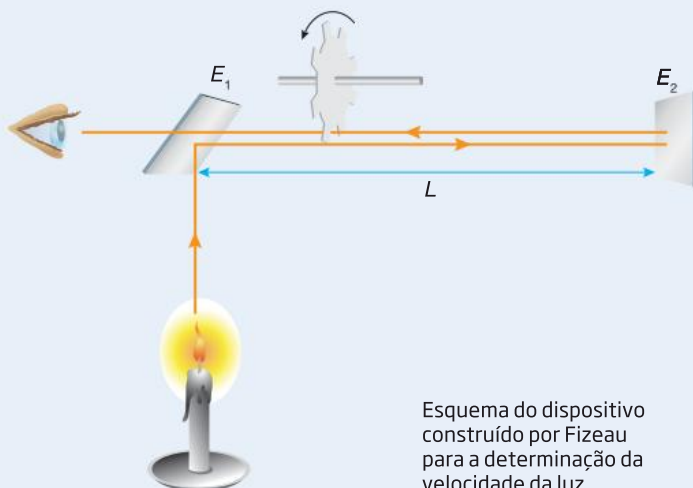
Sempre foi assim?

300.000 km/s: três procedimentos experimentais realizados para medir o valor da velocidade da luz

Galileu Galilei foi um dos primeiros cientistas a tentar medir a velocidade da luz. O procedimento utilizado por ele baseava-se na contagem do tempo que a luz proveniente de uma fonte levava para sair e retornar a um observador muito próximo a essa fonte. Para isso, uma pessoa descobria a fonte luminosa e disparava um marcador de tempo. Um segundo observador descobria outra fonte de luz, ao ver a luminosidade proveniente da primeira. Ao enxergar a luz emitida pela segunda fonte, o primeiro observador interrompia a contagem do tempo. A ideia de Galileu era dividir a distância percorrida pela luz, que media duas vezes a distância entre os observadores, pelo intervalo de tempo medido. Esse método era similar ao que ele havia utilizado com sucesso para medir a velocidade do som (340 m/s, no ar). No entanto, no caso da luz, como sua propagação se dá com rapidez muito maior ($3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$), o experimento idealizado por Galileu não atingiu o objetivo. Mas seu mérito foi mostrar que, para medir a velocidade da luz, era necessário fazer com que ela percorresse uma distância maior em um intervalo de tempo mensurável.

Em 1676, o astrônomo Olaf Roemer propôs um método para medir a velocidade da luz com base nos eclipses de Io, uma das luas de Júpiter. Em suas observações, Roemer percebeu que os satélites desse planeta sofriam eclipse uma vez a cada órbita. Notou ainda que os intervalos de tempo dos eclipses de Io variavam de acordo com a posição relativa entre Júpiter e a Terra, uma vez que os eclipses ocorriam em intervalos de tempo maiores, caso a medição fosse realizada enquanto a Terra se afastava de Júpiter, e em intervalos de tempo menores, quando os planetas estavam mais próximos. Como os intervalos de tempo eram diferentes de acordo com a posição relativa Terra/Júpiter, Roemer concluiu que a luz proveniente de Io não alcançava nosso planeta de maneira instantânea, o que comprovava que a velocidade da luz tinha um valor finito.

A primeira determinação do valor da velocidade da luz feita na própria Terra, ou seja, sem utilizar distâncias astronômicas, foi realizada por Hippolyte Fizeau, durante o século XIX. O cientista francês idealizou um dispositivo capaz de cronometrar, com precisão, pequenos intervalos de tempo e utilizou-o para medir a velocidade da luz.



Esquema do dispositivo construído por Fizeau para a determinação da velocidade da luz.



MUSEU MAPA MO MAC ONAL LONDRES

Retrato de Galileu Galilei (1564-1642), obra do artista Justus Sustermans, 1636.



STEFANO B. ANCHETTI CORBIS SYGMA

Retrato de Hippolyte Fizeau (1819-1896), *Album de la Science, Savants Illustres, Grandes Découvertes*, 1896.

Uma fonte emite um feixe de luz que incide sobre uma superfície E_1 , semiespecular; metade da superfície é espelhada, enquanto a outra é transparente. Parte da luz se reflete em direção ao espelho plano E_2 , enquanto outra parte passa sem desvio pela região transparente da superfície semiespecular.

No trajeto para E_2 , o feixe de luz refletido em E_1 passa por um dos vãos de uma roda dentada que gira em velocidade constante. Esse feixe percorre uma distância L (no caso, 8,63 km) até o espelho E_2 e retorna após ser refletido. Ao retornar, a luz pode passar novamente por um vão da roda dentada, atingindo os olhos do observador. Se a velocidade da roda for ajustada de forma conveniente, o observador deixa de ver esse feixe de luz proveniente de E_2 . Essa situação ocorre se o intervalo de tempo t , que a luz leva para se propagar da roda dentada até o espelho E_2 e retornar até a roda, for igual ao tempo que a roda demora para girar e um de seus dentes se colocar como anteparo ao feixe de luz.

O valor da velocidade da luz será obtido por meio da razão entre a distância $2L$ e o intervalo de tempo t que a luz demora para ir da roda giratória até E_2 e retornar à roda. Também é possível estabelecer uma relação entre esse intervalo de tempo t , o número de dentes da roda e o número de voltas que ela dá por segundo.

Em seu experimento, Fizeau utilizou uma roda com 720 dentes e frequência de 12,5 voltas por segundo. Por meio desse procedimento experimental, Fizeau obteve o valor de 315.000 km/s para a velocidade da luz.

Para ilustrar o assunto, indicamos o texto "Como Fizeau mediu a velocidade da luz", disponível em: <<http://www.seara.ufc.br/especiais/fisica/veluz/veluz2.htm>>; acesso em: 22 fev. 2016.

AMPLIANDO SUA LEITURA

- 1 Por que Galileu não conseguiu medir a velocidade da luz com seu experimento?
- 2 De acordo com as medidas adotadas por Fizeau e os dados obtidos, qual foi, aproximadamente, o tempo que ele mediu para o percurso descrito do feixe de luz?

Já sabe responder?

É possível uma pessoa parecer mais alta que a Torre Eiffel?

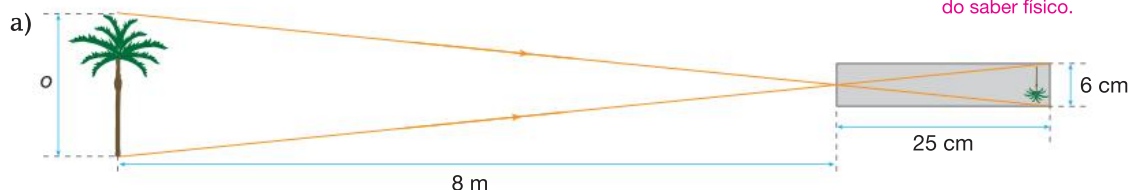


QUESTÕES RESOLVIDAS

R3 Uma câmara escura tem um orifício de 25 cm de profundidade. Deseja-se obter a imagem de uma árvore distante 8 m da câmara. Observa-se no fundo da caixa que a projeção da imagem da árvore tem 6 cm de altura.

- Represente em um esquema a imagem vista pelo observador no fundo da caixa.
- Calcule a altura da árvore.

Resolução



b) Considerando:

o = tamanho do objeto = x

i = tamanho da imagem = 6 cm

p = distância do objeto à câmara = 8 m

p' = distância da imagem ao orifício da câmara = 25 cm

Pela semelhança entre os triângulos formados, temos:

$$\frac{i}{o} = \frac{p'}{p} \Rightarrow \frac{6}{o} = \frac{25}{8} \therefore o = 1,92 \text{ m}$$

Logo, a altura da árvore é 1,92 m.

Na questão **R4**, um objeto muito alto projeta na parede da câmara uma imagem de pequena altura. Discuta essa situação com os alunos, que já devem ter refletido sobre ela ao resolver uma das questões que abrem a unidade. Verifique se o conhecimento prévio dos alunos sobre o fenômeno foi desestabilizado ou se a maioria já tinha uma ideia mais próxima do saber físico.

R4 Leia a notícia abaixo.

Telescópio vê surgimento de estrela supermagnética

Um grupo de astrônomos americanos anunciou na semana passada ter conseguido observar um fenômeno totalmente inesperado pela Física. Enquanto monitoravam uma estrela de nêutrons — estrela “queimada”, que explodiu após queimar todo seu combustível nuclear —, cientistas a flagraram se transformando em um “magnetar”, o tipo de objeto cósmico com o campo magnético mais forte que se conhece. A estrela de nêutrons na qual o RXTE (telescópio espacial Rossi) detectou o estranho comportamento, a 20 mil anos-luz da Terra, ainda não foi batizada. (*Folha de S.Paulo*, 25 fev. 2008.)

- A notícia descreve que a estrela descoberta pelo telescópio Rossi está situada a 20 mil anos-luz da Terra. Quantos anos a luz dessa estrela demora para chegar até um observador na Terra?
- Qual é, em quilômetros, a distância dessa estrela à Terra?

Resolução

- A luz da estrela viajou 20 mil anos-luz até atingir o telescópio espacial que, apesar de estar em órbita, está a uma altura desprezível da superfície da Terra quando comparada à distância entre a estrela e o nosso planeta.
- Já sabemos que a medida da distância de 1 ano-luz é aproximadamente igual a $9,5 \times 10^{15}$ m, ou seja, $9,5 \times 10^{12}$ km. Assim, 20 mil anos-luz serão equivalentes a:

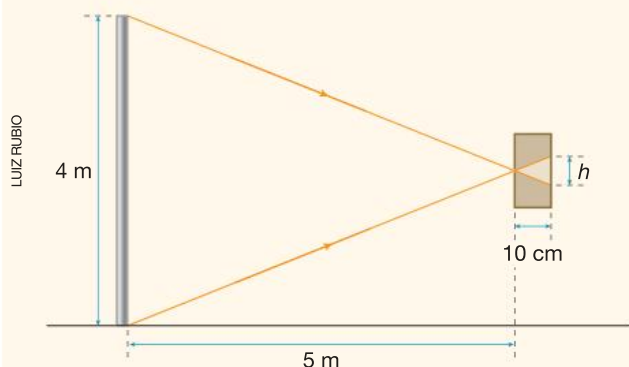
$$d = 20.000 \cdot 9,5 \times 10^{12} \text{ km} \Rightarrow d = 2 \times 10^4 \cdot 9,5 \times 10^{12} \text{ km} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow d = 1,9 \times 10^{17} \text{ km}$$

QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

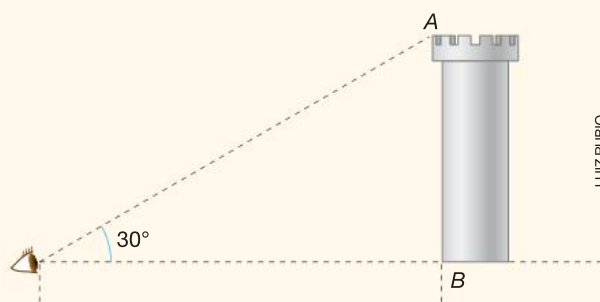
- 8** Aproveitando materiais recicláveis, como latas de alumínio de refrigerantes e caixas de sapatos, pode-se construir uma máquina fotográfica utilizando uma técnica chamada *pinhole* (do termo em inglês que significa “furo de agulha”), que, no lugar de lentes, usa um único furo de agulha para captar a imagem num filme fotográfico. As máquinas fotográficas *pinhole* registram imagens com um olhar diferente. Um poste com 4 m de altura é fotografado numa máquina *pinhole*. No filme, qual é a altura da imagem do poste?



- 9** Quando observamos uma estrela que está a 5 anos-luz da Terra, estamos vendo como a estrela era ou como ela é? Explique.
- 10** Uma estrela emite radiação luminosa que percorre a distância de 1.000 anos-luz até chegar à Terra e ser captada por um telescópio. Pode-se, então, dizer que:
- a) a estrela está a 1.000 km da Terra;
 - b) daqui a 1.000 anos a radiação da estrela não será mais observada na Terra;
 - c) a radiação recebida hoje na Terra foi emitida pela estrela há 1.000 anos;
 - d) hoje, a estrela está a 1.000 anos-luz da Terra.

- 11** Um observador, ao contemplar um objeto extenso, AB , está recebendo de cada ponto do objeto um feixe de luz. Considere apenas os raios que partem da extremidade de AB e atingem o olho do observador. O ângulo visual, segundo o qual o observador vê a torre da figura, é de 30° . Sabendo que a torre está a 45 m de distância do observador, determine sua altura.

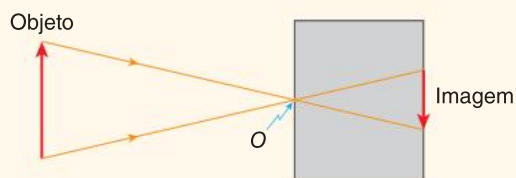
$$\left(\text{Dados: } \sin 30^\circ = 0,5; \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}; \operatorname{tg} 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{3} \right)$$



- 12** Em um filme de ficção científica, uma nave espacial viaja à velocidade da luz ($3,0 \cdot 10^8$ m/s). Em certa sexta-feira, o comandante diz à tripulação que todos passarão um fim de semana em um planeta distante 5 anos-luz da Terra e que na segunda-feira seguinte estarão de volta à base terrestre.

Adotando $1 \text{ ano} = 3,2 \cdot 10^7$ s, pergunta-se:

- A viagem de ida e volta proposta poderia ser feita no tempo prometido pelo comandante? Por quê?
 - Quantos anos terão se passado na Terra enquanto ocorrer a viagem de ida e volta da nave?
 - Qual é a distância, em metros, do planeta à Terra?
- 13** (UFRGS-RS) Uma câmera fotográfica caseira pode ser construída a partir de uma caixa escura com um minúsculo orifício (O , na figura) em um dos lados e uma folha de papel fotográfico no lado interno oposto ao orifício. A imagem de um objeto é formada segundo o diagrama abaixo.



O fenômeno ilustrado ocorre porque:

- a) a luz apresenta ângulos de incidência e de reflexão iguais.
- b) a direção da luz é variada quando passa através de uma pequena abertura.
- c) a luz produz uma imagem virtual.
- d) a luz viaja em linha reta.
- e) a luz contorna obstáculos.

Reflexão da luz

ou: Como podemos ver uma vela acesa dentro de um copo cheio de água?

 S6

No *Suplemento*, você encontra orientações para abordar a questão introdutória.

Esse experimento pode ser reproduzido em sala de aula ou no laboratório da escola, desde que o ambiente esteja escuro; pode-se também usar uma caixa grande com uma pequena abertura em um dos lados, que permita observar o copo e a vela acesa. Para que o experimento funcione, o copo deve ser de vidro transparente. Na sala escura, ou na caixa, coloca-se o copo cheio de água próximo à vela acesa. Parte da luz incidente no vidro é refletida e o observador tem a impressão de que a vela está acesa dentro do copo.

1 Introdução

Vamos acompanhar o caminho percorrido pela luz quando você vê seu reflexo ao passar por uma vitrine ou por uma janela de vidro em um dia ensolarado. Ao incidir no vidro, parte do feixe de luz é absorvida pelo vidro, parte o atravessa (desse modo, podemos ver o que está atrás do vidro) e parte é refletida, formando uma imagem. Em outras palavras, ocorrem ao mesmo tempo **absorção** da luz pelo vidro, **refração** da luz ao atravessar o vidro e **reflexão** da luz ao retornar ao ar. Isso se dá sempre que a luz incide sobre uma superfície de separação entre dois meios. Na prática, quando acontece mais de um desses fenômenos, aquele que prevalece sobre os outros torna-se objeto de observação e análise no estudo da Óptica.



VICTORIA LIPOV/SHUTTERSTOCK

Figura 1 • Do feixe de luz que incide perpendicularmente sobre uma superfície de vidro claro, em média apenas 4% é refletido. Parte ainda menor é absorvida. A maior parte da luz atravessa o vidro, sofrendo refração.

2 Reflexão da luz

Enxergamos porque a luz atinge nossas retinas, estimulando-as. A luz que emana de um livro, quando o vemos, atravessou o ar antes de chegar aos nossos olhos. O livro, por sua vez, não produziu a luz emitida, que pode ter vindo de uma lâmpada próxima ou mesmo de outras fontes.

Nesse processo, podemos reconhecer o que chamamos na Física de **reflexão da luz**. Por ser um meio opaco, o livro não permite a passagem da luz que recebe, ao contrário do vidro ou da água. Ele absorve parte dessa luz e reflete a outra parte em todas as direções.

É a **reflexão difusa** da luz que nos permite ver o livro. Por mais lisa que pareça, a superfície do livro tem irregularidades e rugosidades. Quando a luz se reflete em cada porção irregular da superfície do livro, ela é refletida de maneira desordenada, em todas as direções. Nosso cérebro interpreta os feixes desordenados que atingem nossos olhos como as características visuais do livro, sua textura, forma, cor etc.

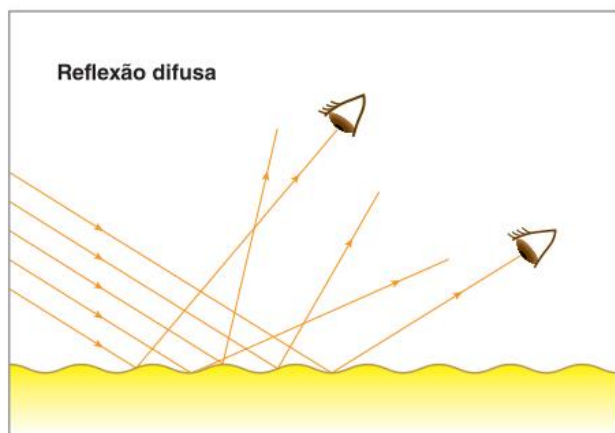
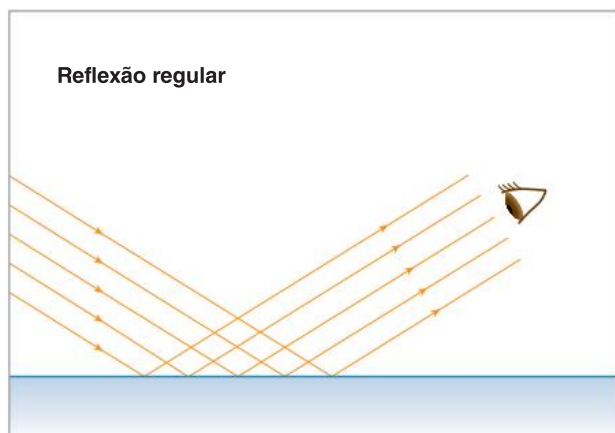


Figura 2 • As pessoas enxergam o livro porque ele tem superfície irregular e difunde a luz que vem do abajur.



DMYTRO VIETROV/SHUTTERSTOCK

Quando dirigimos nosso olhar para uma superfície refletora plana e polida, como um pedaço de metal ou um espelho, vemos não mais o objeto, mas, sim, uma imagem refletida. Isso acontece porque a luz que retorna ao ar depois de incidir no espelho ou no metal sofre uma mudança de direção; no entanto, ainda assim se mantém ordenada, propagando-se com direção bem definida. O fenômeno que ocorre quando vemos nossa imagem refletida em um espelho, na superfície da água ou no vidro é chamado de **reflexão especular** ou **regular** da luz.



JAMI TARRIS/CORBIS/LATINSTOCK

Figura 3 • A luz refletida pela água segue uma trajetória ordenada em direções bem definidas. Na foto, podemos perceber a imagem do animal na água porque a reflexão é especular.

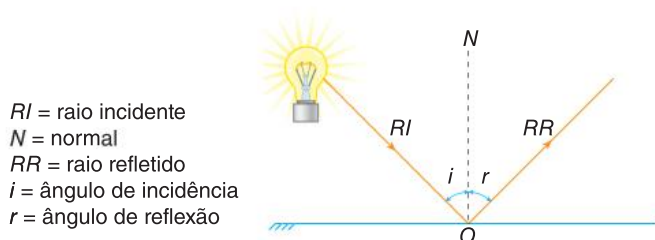
3 Leis da reflexão

Considere um raio de luz, proveniente de uma fonte, que incide no ponto O de uma superfície polida e refletora. Podemos traçar uma reta perpendicular a essa superfície passando pelo ponto O , à qual daremos o nome de **normal**, representada por **N** . Como o raio será refletido pela superfície, teremos o traçado da trajetória da luz esquematizado na figura 4 abaixo. Sobre isso a **1ª lei da reflexão** estabelece:

O raio incidente, a reta normal que passa pelo ponto de incidência e o raio refletido estão contidos em um mesmo plano.

Denominando i o ângulo que o raio incidente faz com a reta normal e r o ângulo que o raio refletido forma com a normal, a **2ª lei da reflexão** estabelece:

A medida do ângulo de incidência é igual à medida do ângulo de reflexão.



LUÍZ RUBIO

Figura 4 • A superfície de separação dos meios reflete a luz. O feixe refletido segue as leis da reflexão.



S7

No *Suplemento*, há uma atividade de demonstração da reflexão da luz.

4 Espelhos planos

Imagem virtual

[...] Escute. Vou contar as minhas ideias a respeito da Casa do Espelho. Antes de mais nada, porém, note que a sala que se vê no espelho é esta mesma sala, mas ao contrário. [...] E os livros? São iguais aos livros comuns, mas com as letras ao contrário. Já fiz a experiência. Você queria, Kitty, viver na Casa do Espelho? Não sei se encontraria pires de leite lá. Talvez leite de espelho, que é leite ao contrário, não o sirva para beber. Mas deve ser lindo viver na Casa do Espelho! Vamos experimentar. Faça de conta que já conseguimos penetrar lá dentro [...]

CARROLL, Lewis. *Alice no país do espelho*. Trad. Monteiro Lobato. São Paulo: Nacional, 2005.

Na literatura e no cinema, essa fantasia de Alice, de “entrar em um espelho”, esteve quase sempre associada ao encontro de um possível universo paralelo, mundos mágicos existentes dentro do espelho. Quando nos colocamos diante de um espelho, vemos, de fato, nossa imagem, que parece estar lá dentro, a certa distância de nós mesmos. Como se explica a formação dessas imagens?

Suponha que uma pequena fonte que emite luz em todas as direções esteja em frente de um espelho plano. De maneira geral, quando construímos geometricamente a representação de imagens fornecidas por espelhos, bastam dois raios de luz, dos inúmeros emitidos pela fonte, para determinar a posição da imagem. Quando esses raios encontram o espelho, são refletidos obedecendo às leis da reflexão, ou seja, os ângulos de incidência e de reflexão têm a mesma medida.

SATTU



Figura 5

Assim, temos:

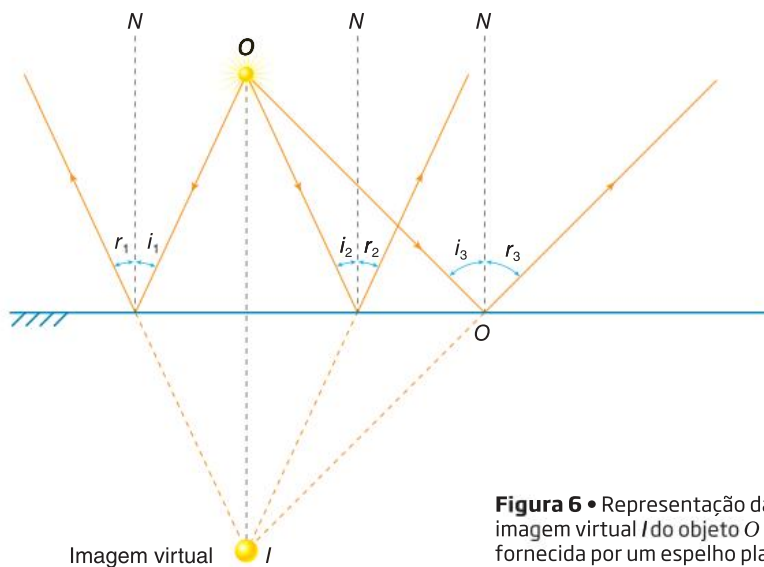


Figura 6 • Representação da imagem virtual I do objeto O fornecida por um espelho plano.

Note que não há intersecção dos raios refletidos na frente do espelho, pois os raios divergem a partir dele. Entretanto, se prolongarmos os raios refletidos, haverá um ponto de intersecção virtual, ou seja, “atrás” do espelho (fig. 6). O observador terá a impressão de que, nesse ponto, há um objeto, no caso, a pequena fonte, emanando luz na direção dele. E por que temos essa impressão? Só enxergamos os objetos em nosso mundo porque a luz que deles provém atinge os nossos olhos. Nosso cérebro não é capaz de identificar a diferença entre a luz que foi refletida no espelho e aquela que veio diretamente do objeto. É por isso que, quando vemos a imagem de um objeto conjugada por um espelho plano, temos a mesma sensação de quando vemos o objeto diretamente. Uma imagem desse tipo, fornecida pelo espelho plano, ao contrário daquelas formadas em câmaras escuras, não pode ser projetada em um anteparo. Dizemos que é uma **imagem virtual**.

Simetria objeto-imagem

[...] Mas o que mais me intrigava era a única diferença entre nós dois. Sim, porque um dia eu descobri, com pasmo, que enquanto eu levantava a perna esquerda, ele levantava a direita; enquanto eu coçava a orelha direita, ele coçava a esquerda. [...] O escudo da escola, por exemplo, que eu trazia colado no bolsinho esquerdo do uniforme, na blusa dele era no direito. [...]

SABINO, Fernando. *O menino no espelho*. 79. ed. Rio de Janeiro: Record, 2008.

Num espelho plano, nossa imagem aparece idêntica ao que somos. Temos a impressão de que uma pessoa igual a nós está no espelho, a uma distância idêntica à que estamos desse objeto. Isso se dá porque a distância p entre um objeto e um espelho plano é sempre igual à distância p' entre a imagem e esse espelho. Além disso, objeto e imagem têm as mesmas dimensões.

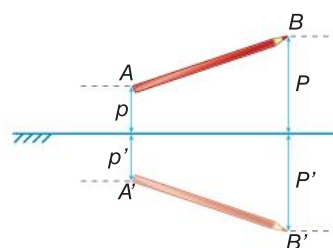
Devemos nos lembrar de que um objeto pode ser representado por um conjunto de pontos que, ligados, definem seu formato. Se traçarmos algumas perpendiculares ao espelho partindo de alguns pontos do objeto e marcarmos distâncias iguais em relação ao espelho entre objeto e imagem, notaremos que, na maioria das vezes, a imagem não pode ser superposta ao objeto.

A imagem, em um espelho plano, estabelece com o objeto uma relação de simetria ponto a ponto em relação ao plano do espelho, configurando uma imagem de mesma dimensão e natureza contrária (fig. 8 e 9).

Figura 8 • A imagem do objeto $A'B'$ não pode ser superposta ao objeto AB , isto é, a imagem formada tem mesma dimensão e natureza contrária.



Figura 7



Será muito interessante trabalhar trechos do livro *O menino no espelho* com o professor de Literatura. Trata-se de uma obra com uma história envolvente e cativante.



Figura 9 • (A) A relação de simetria entre a atriz que maquia o olho esquerdo e sua imagem no espelho dá a impressão de que o olho direito é que está sendo maquiado. (B) Da mesma forma, um observador vê a imagem de uma palavra escrita ao contrário no papel.

EXPLORE EM MATEMÁTICA

Identifique alguns exemplos de simetria em formas geométricas, na natureza, nas artes etc.

S8

No *Suplemento*, você encontra orientações para o trabalho com esse "Explore".

Campo visual de um espelho plano

Considere um espelho plano na parede de sua sala de aula. Suponha que ele tenha o tamanho da porta de entrada da sala. Apesar do tamanho considerável, você não conseguirá ver toda a sala refletida, mas apenas uma região limitada. Dependendo da posição em que você esteja em relação ao espelho e ao tamanho dele, os limites desse setor visível da sala serão diferentes. Essa região do espaço que pode ser vista por um observador, por meio de um espelho, por reflexão, determina o que denominamos **campo visual do espelho**.

Para determinar o campo visual de um espelho em relação a uma posição do olho O do observador, localiza-se O' , a imagem simétrica de O , e une-se essa imagem às bordas do espelho (fig. 10).

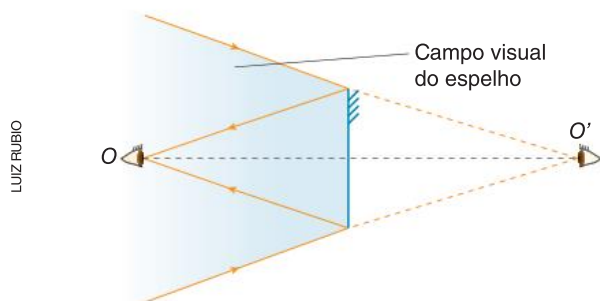


Figura 10 • Todos os pontos que pertencem à região do campo visual do espelho, ao emitirem luz, apresentam raios que, por reflexão no espelho, atingem o observador.

Pergunte aos alunos se já observaram que veículos de bombeiros e ambulâncias trazem a identificação escrita ao contrário. Peça-lhes que expliquem por quê.

Já sabe responder?

Como podemos ver uma vela acesa dentro de um copo cheio de água?



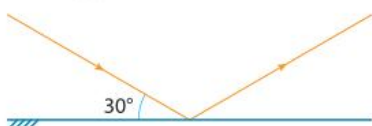
QUESTÕES RESOLVIDAS

R1 Nas figuras estão representados alguns raios de luz que incidem em espelhos. Quais são os ângulos de incidência e de reflexão?

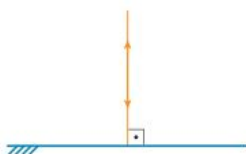
a)



b)



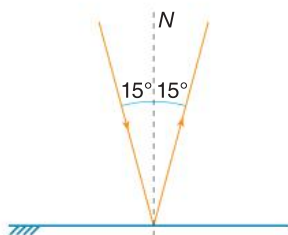
c)



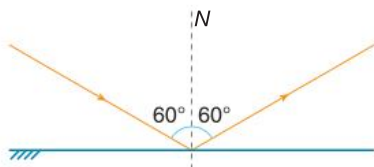
► Resolução

a) Primeiro, devemos traçar a reta normal que passa pelo ponto de incidência, lembrando que i é o ângulo que o raio incidente forma com a normal e r o ângulo que o raio refletido forma com a normal. Esses ângulos têm a mesma medida. Assim, temos:

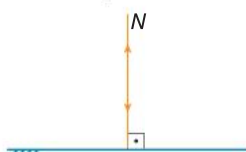
$$i = 15^\circ \quad r = 15^\circ$$



b) Traçando a reta normal, percebemos que o ângulo de incidência, por ser o ângulo com a normal, é o complementar do ângulo de 30° . Assim, como se trata de ângulos congruentes, determinamos $i = 60^\circ$ e $r = 60^\circ$.



c) A direção da reta normal coincide com a direção do raio incidente e, consequentemente, com a direção do raio refletido. Observamos, então, que $i = 0^\circ$ e $r = 0^\circ$.

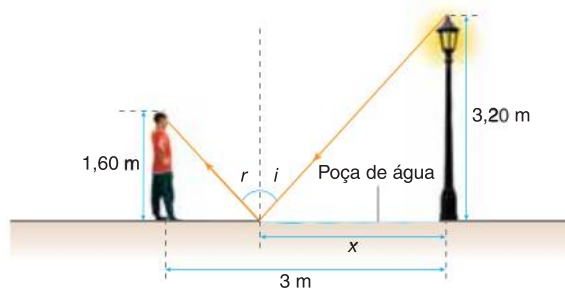


R2 Na figura, um garoto de 1,60 m olha a imagem de um poste de altura 3,2 m refletido em uma poça de água, que se comporta como um espelho plano, como mostra a figura abaixo. Qual é o menor comprimento da poça, sabendo que é o menor possível para que o garoto, distante 3,0 m do poste, observe a imagem completa refletida na água?



► Resolução

Como o comprimento da poça deve ser o menor possível de modo que permita ao garoto ver a imagem completa do poste, devemos traçar um raio de luz que seja emitido do ponto mais alto do poste e incida em uma das extremidades da poça de água, sendo refletido por ela e atingindo os olhos do garoto, como mostra a figura a seguir.



Podemos reconhecer na figura dois triângulos retângulos semelhantes. Assim:

$$\frac{3,2}{x} = \frac{1,60}{3,0 - x} \Rightarrow 3,2(3,0 - x) = 1,60x \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 9,6 - 3,2x = 1,60x \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 4,8x = 9,6 \therefore x = 2,0 \text{ m}$$

R3 Construa a imagem fornecida por um espelho plano de cada um dos objetos mostrados nas figuras.

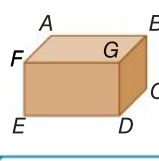
a)



b)

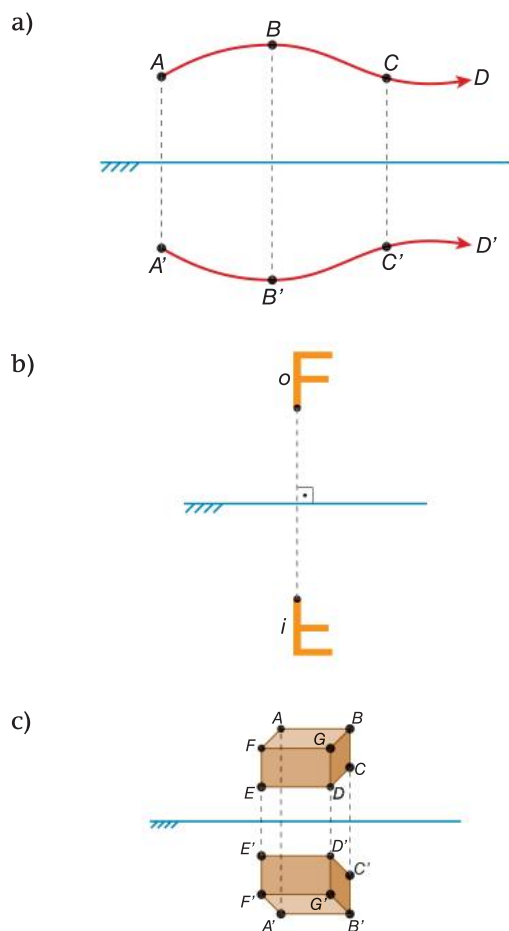


c)

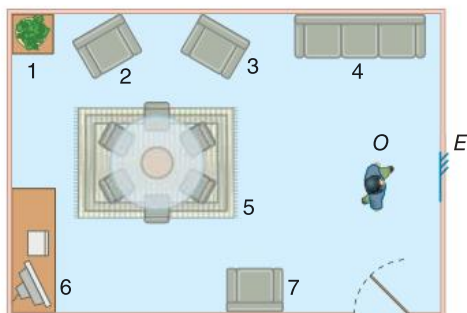


► Resolução

Para construir as imagens, traçamos retas perpendiculares ao espelho passando por alguns pontos do objeto e mantemos distâncias iguais em relação ao espelho.



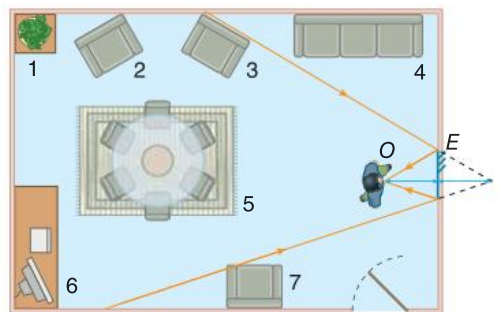
- R4** Um observador O está olhando para o espelho plano E da figura. Quais dos objetos representados ele poderá ver por reflexão no espelho?



► Resolução

Para determinar o campo visual do espelho para a posição do olho em O , devemos:

- I. determinar o ponto i simétrico do olho em relação ao plano do espelho;
- II. unir o ponto i aos extremos do espelho.



O observador em O só poderá ver, por reflexão, o vaso (1), as poltronas (2 e 3), a mesa (5) e o aparador (6). A poltrona ao lado da porta (7) e o sofá (4) ficam fora do campo visual do espelho e não serão vistos.

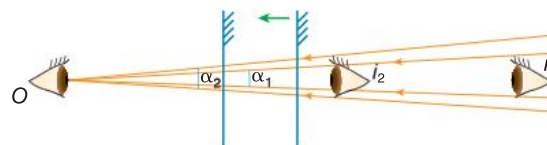
- R5** Maria olha-se em um espelho e, desejando aumentar a região refletida de seu rosto, estende o braço afastando o espelho.



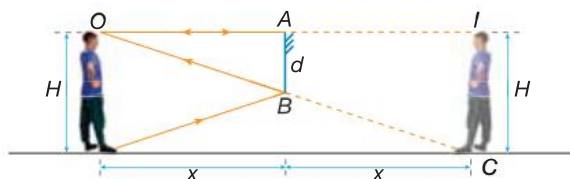
- a) Analise a situação do ponto de vista da Óptica e explique se Maria conseguirá o que pretende.
- b) Por que, ao nos aproximarmos do espelho plano, temos a sensação de que a altura da imagem aumenta?

► Resolução

- a) Em um espelho plano, as imagens fornecidas são simétricas e, portanto, têm a mesma altura, independentemente de quanto aproximamos ou afastamos o objeto do espelho. Logo, a distância do observador ao espelho não interfere no tamanho da imagem, e a moça não conseguirá o que pretende.
- b) Isso ocorre porque há um aumento do ângulo visual com que o observador percebe a imagem. Na figura, i_1 é a imagem do observador O para a primeira posição do espelho. Essa imagem é vista pelo ângulo visual α_1 . A imagem i_2 aparece quando o observador se aproxima do espelho e sua imagem passa a ser vista sob um ângulo $\alpha_2 > \alpha_1$. Como o ângulo visual aumenta, o observador tem a impressão de que o tamanho da imagem aumentou.



- **R6** Qual deve ser a altura mínima de um espelho plano para que um homem de altura H tenha uma visão completa de si mesmo no espelho? O tamanho encontrado depende da distância da pessoa ao espelho? Despreze a distância entre os olhos do homem e sua cabeça.



► **Resolução**

Na figura, os triângulos retângulos AOB e IOC são semelhantes. Note que o tamanho mínimo d do espelho deve ser tal que um raio de luz emitido pelo pé do observador tangencie a extremidade inferior do espelho.

Assim, temos:

$$\frac{H}{d} = \frac{2x}{x} \Rightarrow 2d = H \Rightarrow d = \frac{H}{2}$$

Note que o menor tamanho de um espelho para uma pessoa conseguir se ver por inteiro deve ter metade da altura dela e esse valor independente da distância da pessoa ao espelho.

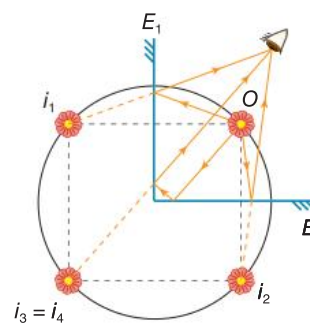
R7 Responda às questões.

- Quantas imagens de um objeto são fornecidas por dois espelhos que formam entre si um ângulo de 90° ?
- O que ocorre com esse número quando diminuimos o ângulo entre os espelhos?

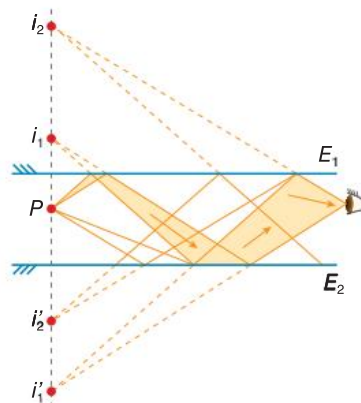
► **Resolução**

- O observador vê três imagens do objeto. As imagens i_1 e i_2 , fornecidas pelos espelhos E_1 e E_2 , são percebidas como objetos pelos espelhos

E_2 e E_1 (nessa ordem) e produzem as imagens i_3 e i_4 , que são coincidentes, correspondendo à terceira imagem vista pelo observador.



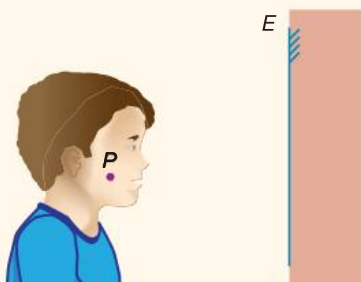
- Ao diminuir o ângulo entre os espelhos, o número de imagens formadas aumenta, atingindo seu limite quando os espelhos são colocados paralelamente um ao outro. Nesse caso, forma-se um número infinito de imagens. Na prática, mesmo com os espelhos dispostos paralelamente, o observador vê um número finito de imagens, pois há uma progressiva diminuição de luminosidade das imagens à medida que as reflexões se sucedem.



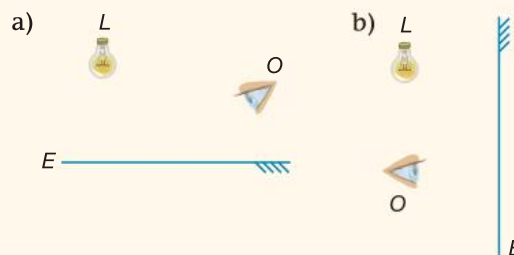
QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

- 1** Um menino se coloca diante de um espelho plano E , como mostra a figura. Represente graficamente em seu caderno como o garoto vê a imagem de uma pequena mancha P em seu rosto.

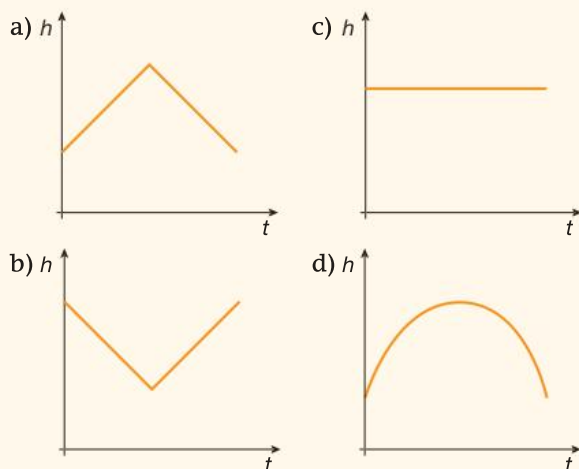


- 2** Nas figuras abaixo, o espelho plano E conjuga uma imagem de uma pequena lâmpada L , que deve ser vista pelo observador O . Reproduza em seu caderno os esquemas ilustrados e represente graficamente a trajetória da luz que possibilita a visão do observador. Localize a imagem I da lâmpada.

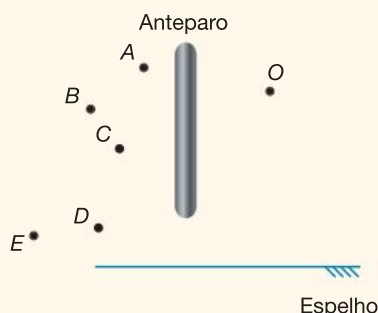


- 3 Enquanto se veste para ir a uma festa, uma jovem se aproxima e se afasta sucessivas vezes de um espelho plano para verificar se está bem-vestida.

Considerando que o tamanho real de sua imagem quando se encontra no ponto mais afastado do espelho é h , o gráfico que melhor representa o tamanho real de sua imagem, i , em função do tempo, t , à medida que ela se aproxima e se afasta uma vez do espelho, é:



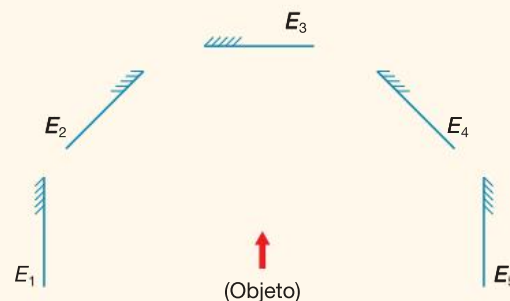
- 4 Uma vela está em frente a um espelho plano e distante dele 25 cm. Se a vela for afastada 50 cm da posição inicial, qual será, nessa situação, a distância entre ela e sua imagem conjugada pelo espelho?
- 5 Quais dos objetos, A , B , C , D e E , são vistos pelo observador O ao olhar para o espelho plano esquematizado abaixo?



- 6 Um raio de luz de uma lanterna acesa em A ilumina o ponto B ao ser refletido por um espelho horizontal sobre a semirreta DE da figura, estando todos os pontos num mesmo plano vertical. Determine a distância entre a imagem virtual da lanterna A e o ponto B . Considere $AD = 2$ m, $BE = 3$ m e $DE = 5$ m.



- 7 A figura representa um objeto e cinco espelhos planos, E_1 , E_2 , E_3 , E_4 e E_5 . Indique a sequência que representa corretamente as imagens do objeto conjugadas nesses espelhos.



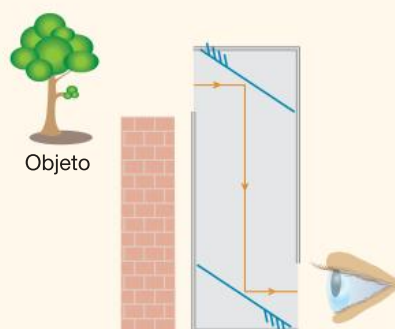
- | | | | | |
|----------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| a) $E_1: \uparrow$ | $E_2: \rightarrow$ | $E_3: \downarrow$ | $E_4: \leftarrow$ | $E_5: \uparrow$ |
| b) $E_1: \uparrow$ | $E_2: \nearrow$ | $E_3: \downarrow$ | $E_4: \nwarrow$ | $E_5: \uparrow$ |
| c) $E_1: \uparrow$ | $E_2: \nearrow$ | $E_3: \uparrow$ | $E_4: \nwarrow$ | $E_5: \uparrow$ |
| d) $E_1: \uparrow$ | $E_2: \nwarrow$ | $E_3: \downarrow$ | $E_4: \nearrow$ | $E_5: \uparrow$ |
| e) $E_1: \downarrow$ | $E_2: \rightarrow$ | $E_3: \uparrow$ | $E_4: \rightarrow$ | $E_5: \downarrow$ |

- 8 Leia o texto a seguir e responda ao que se pede.

Periscópios são instrumentos ópticos utilizados para observar o que se passa fora do campo visual onde está o observador. O periscópio básico emprega dois espelhos paralelos, a certa distância um do outro.

Os raios luminosos atingem o primeiro espelho, que os reflete para o segundo; daí são novamente refletidos para o visor onde está o olho do observador.

A trajetória completa da luz tem a forma aproximada de um "Z", no qual, por uma das extremidades, entra a luz refletida pelos corpos a serem observados e, pela outra, a luz atinge os olhos do observador, possibilitando que ele veja o que, a princípio, estaria fora do seu alcance de visão.



Suponha que você resolva construir um periscópio. Qual deve ser o ângulo em relação à horizontal em que os espelhos devem estar posicionados? Por quê?

9 (CFTMG) Analise o esquema abaixo referente a um espelho plano.

A imagem do objeto que será vista pelo observador localiza-se no ponto:



a) 1

c) 3

b) 2

d) 4

10 (Uern) Na noite do *réveillon* de 2013, Lucas estava usando uma camisa com o ano estampado. Ao visualizá-la através da imagem refletida em um espelho plano, o número do ano em questão observado por Lucas se apresentava da seguinte forma:

a) 3105

b) 5105

c) 5013

d) 3105

Trilhando o caminho das competências

A oscilação da Lua

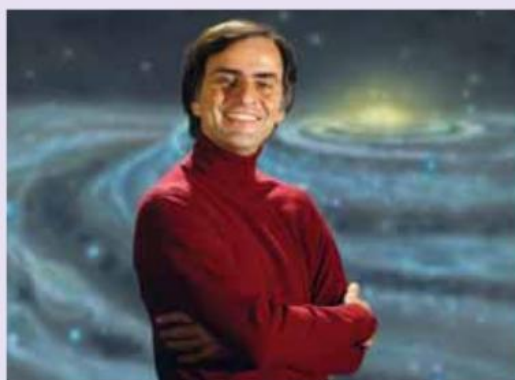
Em um dos vídeos da série *Cosmos* (episódio 4, “Céu e inferno”), o cientista e apresentador do programa, Carl Sagan, relata um episódio ocorrido no ano de 1178 e observado por monges do convento de Canterbury, na Inglaterra. Segundo Sagan, o escrivo do convento, monge Gervásio, registrou assim o fenômeno observado:

Agora havia uma brilhante lua nova, e, como é usual nessa fase, suas pontas apontavam para o leste. Subitamente a ponta de cima dividiu-se em duas. No meio dessa divisão, uma tocha de chamas surgiu, lançando a uma distância considerável fogo, carvão incendiado e centelhas. Depois dessas transformações a Lua, de ponta a ponta, em todo seu comprimento, ficou enegrecida.

De um centro astronômico no Texas, com frequência são emitidos raios *laser* em direção a espelhos fixados na Lua. Os raios refletidos servem, entre outras coisas, para avaliar os movimentos realizados pela Lua. Com isso, foi possível concluir que a Lua oscila suavemente, tal qual um sino, como se tivesse sido atingida por um asteroide em algum momento dos mil anos anteriores. Será que esse asteroide em colisão com a Lua não foi a causa do relato dos monges do século XII? Sagan, entre outros cientistas, achava que sim.

1 Por que Carl Sagan avaliou que a leve oscilação da Lua poderia ter sido provocada pela queda de um asteroide sobre a superfície lunar?

2 A velocidade de rotação de um ponto do Equador terrestre é de, aproximadamente, 1.674 km/h, por causa da rotação da Terra em torno de seu eixo. A distância da Lua à Terra é de 380 mil km. Se um raio *laser* for refletido em um dos espelhos colocados na Lua e retornar à Terra em 2,5 s, o equipamento que lançou o raio terá se deslocado certa distância em razão da rotação da Terra. Qual é a medida dessa distância?



Carl Sagan (1934-1996), físico e astrônomo, escreveu *Cosmos*, *Pálido ponto azul*, entre outros livros de divulgação científica.



TONY KORODY/SYGMA/CORBIS/LATINSTOCK

ALEXANDER CHELMODEEV/SHUTTERSTOCK

Espelhos esféricos

ou: É possível encolher olhando-se no espelho?

Tanto o espelho côncavo quanto o convexo fornecem imagens reduzidas dos objetos. No convexo, isso sempre ocorre e as imagens são direitas; no côncavo, a imagem é reduzida e invertida quando o objeto é colocado a uma distância do vértice maior que o raio de curvatura.

1 Introdução

 **S10**

No Suplemento, você encontra orientações para trabalhar a questão introdutória.

Espelhos convexos são muito utilizados em lojas e prédios, principalmente na saída de garagens, para aumentar a segurança, uma vez que ampliam o campo de visão.

Você já deve ter visto esses espelhos em portas de garagens, em prédios ou em lojas; eles podem facilitar a visualização de outros veículos e, especialmente, de pedestres. Ao olhar por um desses espelhos, contudo, devemos ter cuidado com a real distância a que estamos do objeto, pois ela fica alterada pela imagem reduzida. A diminuição do tamanho da imagem amplia o campo visual do espelho, confundindo nossa percepção de “perto” e “longe”, como vamos ver neste capítulo.

Os espelhos côncavos têm vários usos, sendo empregados em telescópios, em lanternas e como auxiliares para a pessoa se barbear ou se maquiar. Aprender de que maneira as imagens se formam nesses dispositivos é um dos objetivos deste capítulo.

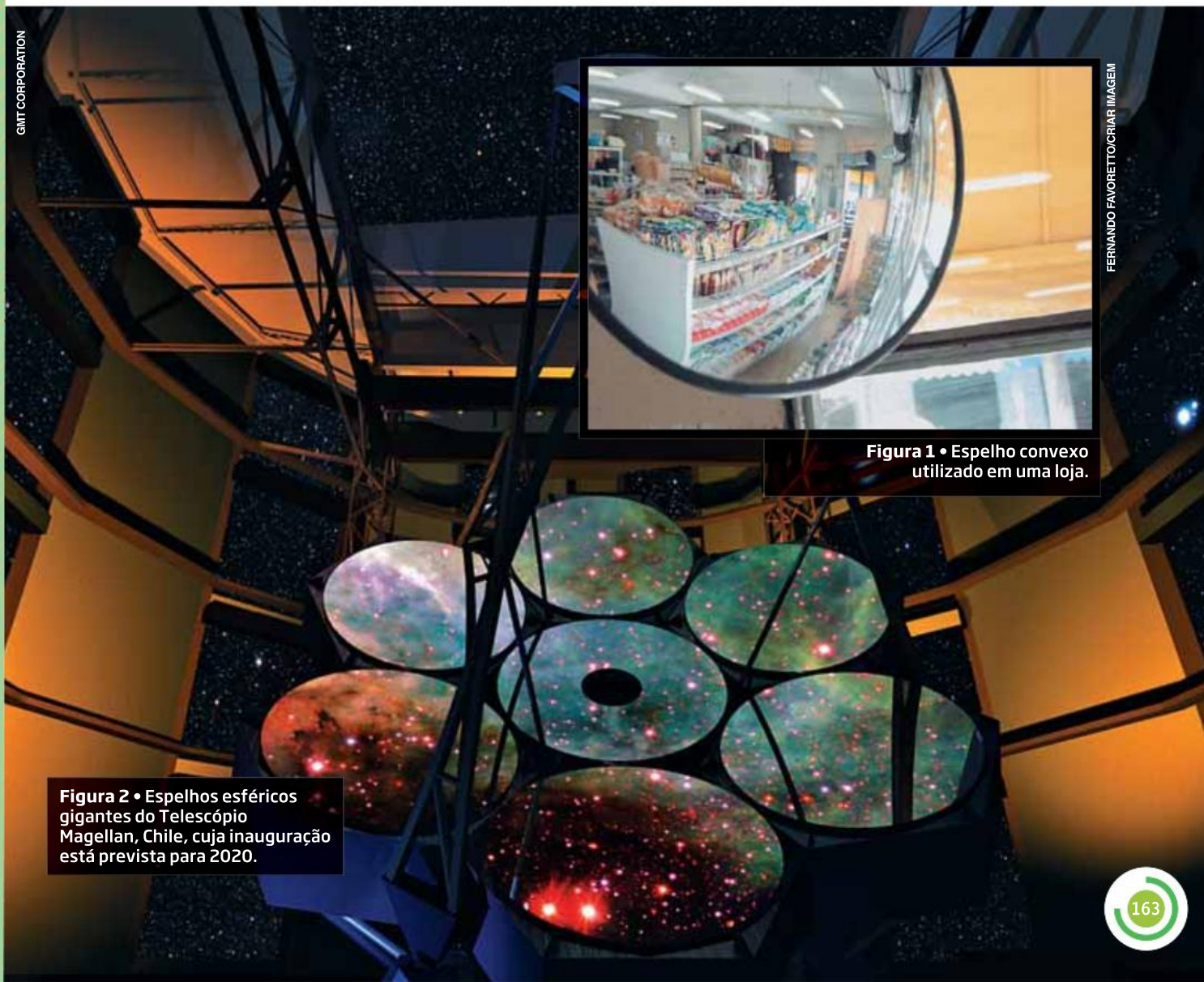


Figura 1 • Espelho convexo utilizado em uma loja.

Figura 2 • Espelhos esféricos gigantes do Telescópio Magellan, Chile, cuja inauguração está prevista para 2020.

2 Espelhos esféricos

Suponha que da superfície esférica espelhada da figura 3 possamos retirar uma secção reta. Essa fatia determina o que chamamos de calota esférica (fig. 4). Um espelho esférico pode ser definido como uma calota esférica que reflete especularmente a luz. Se a superfície externa da calota é a refletora, dizemos que o espelho é **convexo**. Se é a face interna que reflete a luz, o espelho é **côncavo**.

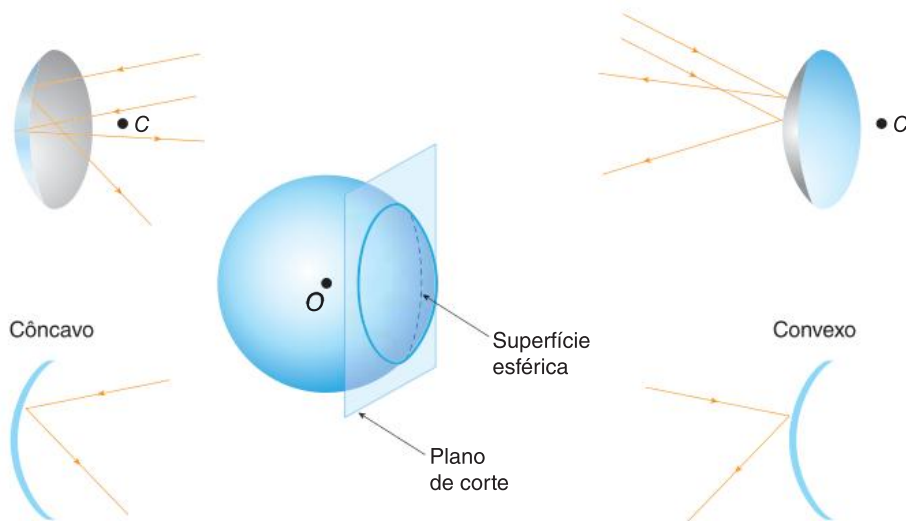


Figura 4 • A geometria dos espelhos esféricos determina o comportamento da luz ao sofrer reflexão. Apesar de espelhos côncavos e convexos poderem ser originários da mesma calota esférica, eles produzem efeitos luminosos distintos em relação à natureza e à formação das imagens.

3 Elementos dos espelhos esféricos

Alguns elementos de um espelho esférico provêm da superfície esférica que lhes deu origem (fig. 5).

O **centro da curvatura** **C** do espelho coincide com o centro da esfera que originou a calota e, conseqüentemente, o **raio R** do espelho é o próprio raio da superfície esférica à qual pertence a calota. Chamamos de **vértice** **V** do espelho o ponto que corresponde ao polo da calota. A reta que passa por **C** e por **V** é chamada de **eixo principal** do espelho. Qualquer outra reta que passe pelo centro de curvatura do espelho é denominada **eixo secundário**. Todo espelho esférico tem o que chamamos de **ângulo de abertura** α , que é dado pela medida do ângulo ACB , sendo **A** e **B** pontos opostos na base da calota. Conhecer os principais elementos dos espelhos esféricos é importante para a construção gráfica das imagens fornecidas por eles.

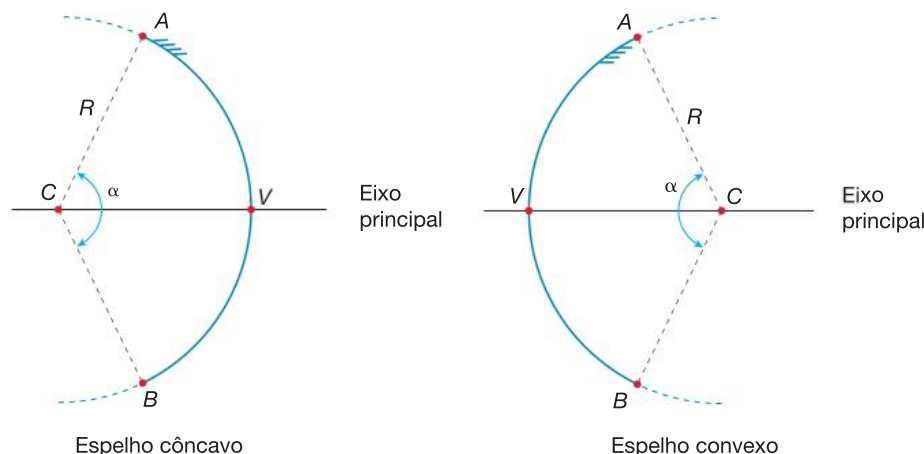


Figura 5 • Elementos do espelho esférico.

ANTONIO JORGE NUNES/SHUTTERSTOCK

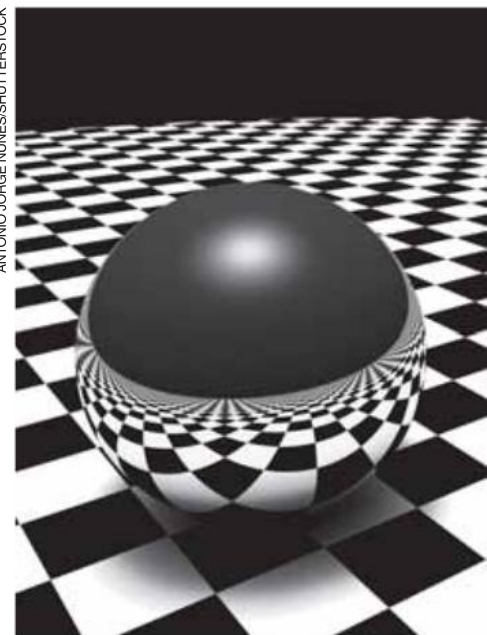


Figura 3 • Uma superfície esférica refletora pode determinar espelhos côncavos e convexos dependendo do lado onde está a face espelhada.

Reprodução proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

Espelhos esféricos costumam fornecer imagens distorcidas dos objetos. Esse fenômeno – denominado **aberração esférica** do espelho – é bastante reduzido quando são obedecidas as **condições de Gauss**, que podem ser assim enunciadas:

1. Os espelhos esféricos devem ter ângulos de abertura pequenos ($\alpha < 10^\circ$).
2. Os raios de luz incidentes devem estar próximos do eixo principal e pouco inclinados em relação a ele.

Quando um par de raios de luz proveniente de um objeto pontual O incide em um espelho esférico côncavo, obedecendo as condições de Gauss e as leis da reflexão, podemos traçar a trajetória dos raios refletidos (fig. 6).

A reta normal que passa pelo ponto de incidência terá direção radial, ou seja, passará pelo centro de curvatura do espelho. A imagem do ponto O se forma no ponto I , intersecção dos raios refletidos. Observe que não é preciso prolongar os raios refletidos para a parte de trás do espelho a fim de determinar o ponto de encontro. A imagem, no caso, é formada na frente do espelho, caracterizando o que denominamos **imagem real**.

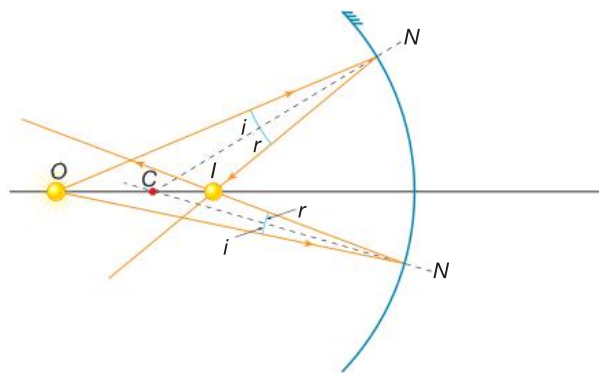


Figura 6 • Uma imagem real I é conjugada na intersecção efetiva dos raios refletidos.

Focos do espelho esférico

Em espelhos esféricos que obedecem às condições de Gauss, observamos que, ao incidir na face refletora do espelho, um feixe de luz **paralelo ao eixo principal** apresenta algumas singularidades, descritas a seguir.

- Em **espelhos côncavos**, os raios refletidos convergem para um mesmo ponto F , situado no eixo principal e denominado **foco** do espelho. Por causa dessa característica, os espelhos côncavos também são chamados de **espelhos convergentes**. O ponto F está no ponto médio do segmento \overline{CV} . O segmento $\overline{FV} = \frac{\overline{CV}}{2} = \frac{R}{2}$ é denominado distância focal f .

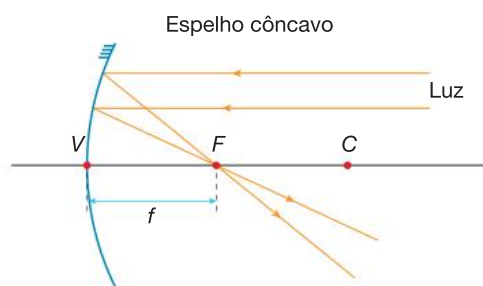


Figura 7 • Notamos que os raios paralelos que incidem no espelho côncavo têm um comportamento convergente quando refletidos.

- Em **espelhos convexos**, os raios refletidos parecem divergir de um mesmo ponto F , denominado **foco** do espelho, situado na intersecção dos prolongamentos dos raios refletidos. Por causa dessa característica, os espelhos convexos podem ser chamados de **espelhos divergentes**. O ponto F está no ponto médio do segmento \overline{CV} . O segmento $\overline{FV} = \frac{\overline{CV}}{2} = \frac{R}{2}$ é denominado distância focal f .

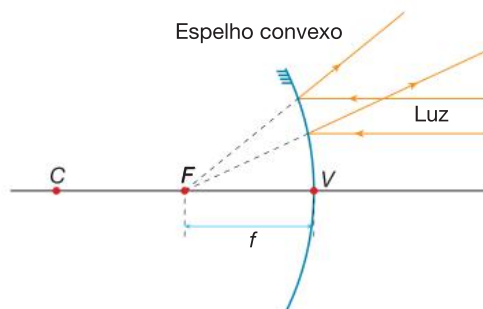


Figura 8 • Notamos que os raios paralelos que incidem no espelho convexo têm comportamento divergente quando refletidos.

4 Construção de imagens de objetos

Ainda que sejam muitos os raios que contribuem para a formação das imagens de objetos fornecidas por espelhos esféricos, vamos utilizar apenas os chamados **raios principais**. Como a imagem é geometricamente localizada no encontro dos raios refletidos, escolhemos pelo menos dois dos quatro raios principais que partam de um ponto do objeto e incidam no espelho. As características dos raios principais são descritas a seguir.

- Raios que incidem na direção do centro de curvatura refletem sobre si mesmos, ou seja, refletem na mesma direção.

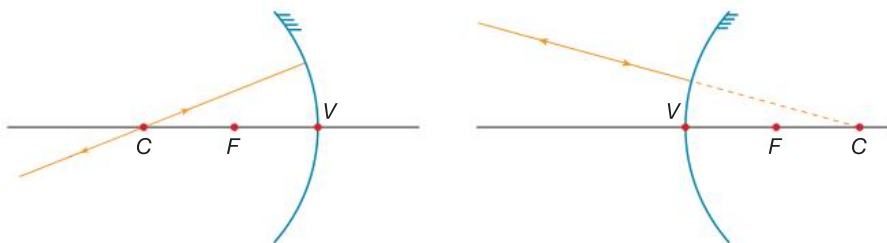


Figura 9 • No espelho esférico, a direção do centro de curvatura coincide com a direção da normal que passa pelo ponto de incidência. Assim, o ângulo de incidência é de 0° ; logo, o ângulo de reflexão também será de 0° .

- Raios que incidem paralelamente ao eixo principal refletem na direção do foco.

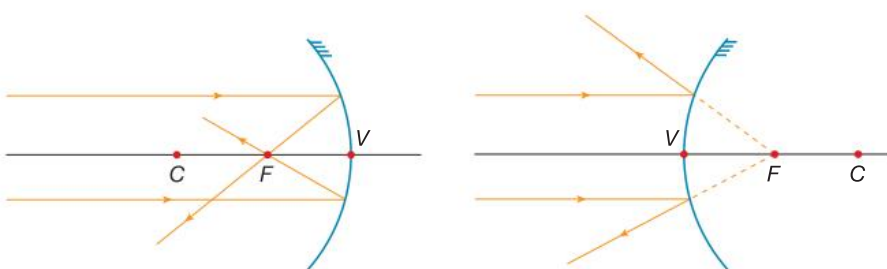


Figura 10 • Tanto nos espelhos côncavos como nos convexos, os focos se encontram no eixo principal a meia distância entre o vértice e o centro de curvatura.

- Raios que incidem na direção do foco refletem paralelamente ao eixo principal.

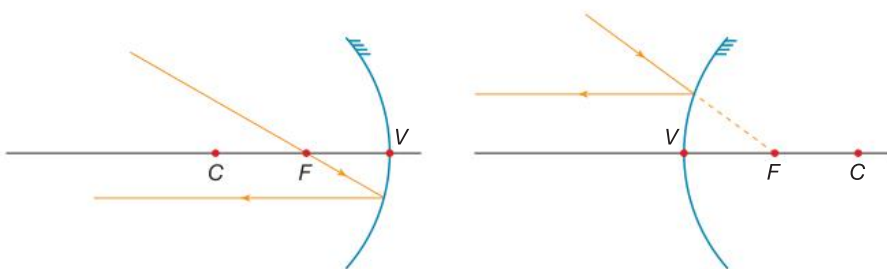


Figura 11 • O princípio da reversibilidade dos raios luminosos ajuda a compreender o comportamento dos raios incidentes que passam pelo foco.

- Raios que incidem na direção do vértice refletem simetricamente em relação ao eixo principal.

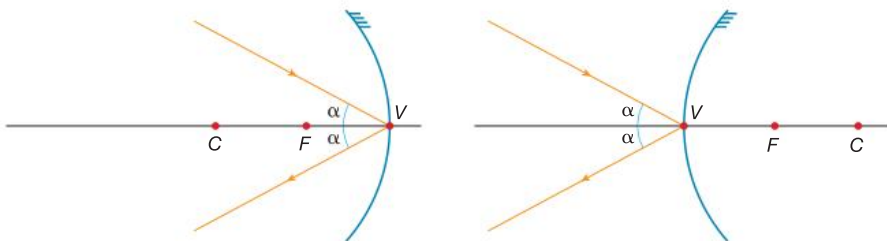


Figura 12 • O comportamento dos raios incidentes no vértice é explicado pela lei da reflexão, que diz que o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão têm mesmo valor, lembrando que a normal passa necessariamente pelo centro de curvatura.

Para exemplificar, podemos construir a imagem de um objeto extenso AB , colocando-o perpendicularmente ao eixo dos espelhos, como nas figuras a seguir. Inicialmente, determinamos a imagem A' , da extremidade A do objeto que não está sobre o eixo do espelho. Para isso, escolhemos pelo menos dois raios principais emitidos a partir de A e representamos os raios refletidos. O encontro desses raios determina a imagem A' da extremidade A . A imagem B' da extremidade B é obtida simplesmente traçando uma perpendicular ao eixo do espelho passando por A' .

S11

No *Suplemento*, sugerimos um objeto virtual de aprendizagem que pode ajudar os alunos a visualizar as construções de imagens por meio de intervenções nas posições do objeto diante do espelho.

Podemos classificar o tipo de imagem obtida analisando a intersecção dos raios refletidos.

- Se a intersecção dos raios refletidos ocorre efetivamente, dizemos que a natureza da imagem é **real** (imagem na frente do espelho).

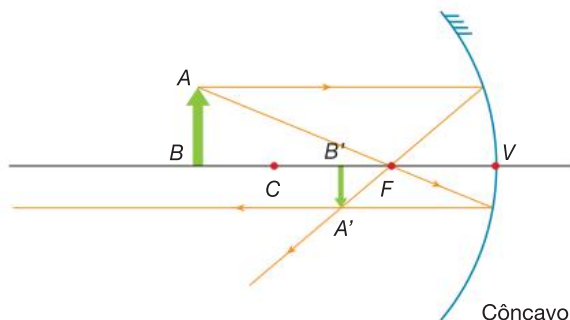


Figura 13 • Formação de uma imagem real em um espelho côncavo.

- Se a intersecção dos raios refletidos é obtida pelo encontro entre os prolongamentos dos raios refletidos, dizemos que a natureza da imagem é **virtual** (imagem atrás do espelho).

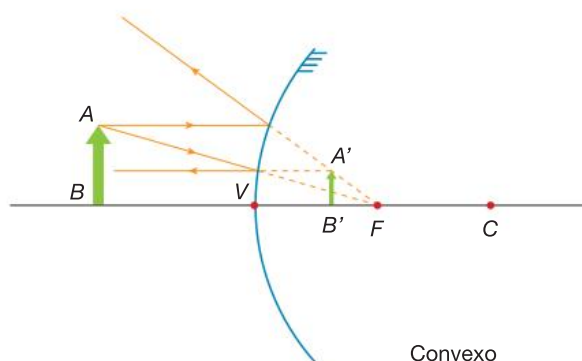


Figura 14 • Formação de uma imagem virtual em um espelho convexo.

- Se os raios refletidos não se interceptam, dizemos que a natureza da imagem é imprópria (ou seja, é apenas um borrão).

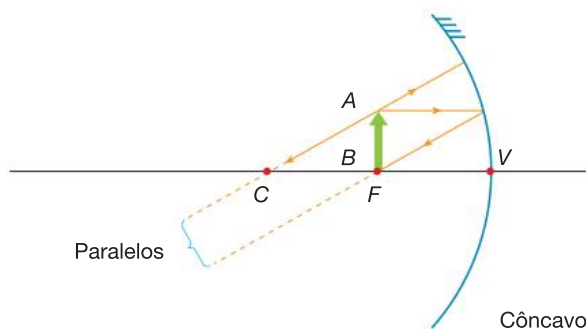


Figura 15 • Formação de uma imagem imprópria em um espelho côncavo.

Para saber mais

Saber físico e tecnologia

Espelhos parabólicos

Espelhos esféricos podem eventualmente apresentar o que se denomina “aberração da esfericidade”, isto é, a indefinição do foco quando um feixe de raios luminosos paralelos incide sobre o espelho. Nessas ocasiões, esse “defeito” é corrigido diminuindo a abertura do espelho de tal maneira que a superfície refletora passa a ter o formato de uma parábola. Desse modo, esses espelhos passam a ser rigorosamente **estigmáticos** em relação ao seu foco principal.

Estigmático. Sistema óptico em que a um ponto objeto corresponde um único ponto imagem, como no espelho plano.

Isso quer dizer que todos os raios incidentes paralelos convergirão para o foco. Espelhos desse tipo são denominados **parabólicos**, e seu formato permite um grande número de aplicações.

O emprego de espelhos parabólicos na construção de um forno solar garante que os raios de Sol, ao incidirem no espelho, serão refletidos concentradamente em seu foco, derivando daí seu alto poder calorífico.

O uso de fornos solares tem sido divulgado como alternativa para cozinhar alimentos. As vantagens são várias: não são poluentes, não liberam carbono na atmosfera, pois não queimam combustível, e têm baixíssimo custo de construção, manutenção e operação. São vistos como opção viável para populações carentes que vivem em regiões ensolaradas.

Os espelhos parabólicos são o coração dos modernos telescópios. Quanto mais longe uma estrela estiver da Terra, mais fraca é sua luz ao nos atingir. Desse modo, deve-se utilizar algum recurso para “recolher” os poucos raios de luz que vencem as enormes distâncias estelares. Os raios refletidos pelo espelho são recolhidos em uma chapa fotográfica altamente sensível, exposta à luz durante um longo tempo e na qual fica registrada a imagem do astro.

Alguns tipos de usinas de geração de energia elétrica também usam intensamente espelhos parabólicos. Construídos em torno de tubos, eles concentram os raios solares sobre canos, que funcionam como captadores de energia. Um óleo sintético que flui pelos canos é aquecido a temperaturas que podem chegar a 400 °C. O óleo aquecido é usado para produzir vapor de água, que, por sua vez, movimenta turbinas e geradores de eletricidade.

DAVID PARKER/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK



As características geométricas dos espelhos parabólicos permitem a captação de imagens por meio de outras formas de ondas, como nos radiotelescópios.



CORDELA MOLLOY/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

Os raios do Sol incidem no espelho na forma de um feixe paralelo que, ao ser refletido, converge para um ponto, o foco do espelho, onde está posicionada a panela.



ROGER FLESSMEYER/CORBIS/LATINSTOCK

Campo de captação de energia solar em uma usina no estado da Califórnia, Estados Unidos. Observe a quantidade de espelhos parabólicos alinhados em sequência.

AMPLIANDO SUA LEITURA

- 1 Algumas vezes, os espelhos parabólicos são mais eficientes do que os esféricos para captar a energia solar quando o objetivo é gerar energia elétrica ou construir um forno solar. Explique.
- 2 Construa um esquema da formação de imagem de uma estrela muito distante cuja luz foi captada pelo espelho parabólico gigante de um telescópio.

QUESTÕES RESOLVIDAS

- R1** Deseja-se utilizar um espelho esférico côncavo de raio de curvatura 20 cm como forno solar para aquecer uma chaleira de água. Em que posição deve ser colocada a chaleira para que a água seja aquecida?

► Resolução

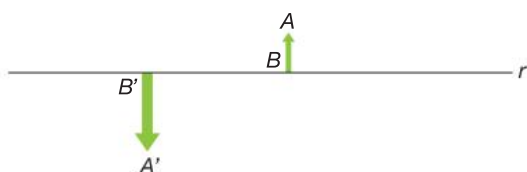
Os raios solares atingem o espelho na forma de um feixe paralelo de luz. Assim, ao serem refletidos pelo espelho, comporão um feixe de luz convergente cuja intersecção se dará no foco do espelho, situado a 10 cm do espelho, pois $f = \frac{R}{2}$.

- R2** Para projetar em um anteparo a imagem de uma vela fornecida por um espelho esférico, dispõe-se de espelhos côncavos e convexas. Qual deles deve ser escolhido?

► Resolução

Imagens projetadas em anteparos são reais. Somente espelhos côncavos fornecem imagens reais de objetos.

- R3** Na figura estão representados um objeto AB e sua imagem $A'B'$ conjugada por um espelho esférico. A reta r representa o eixo principal do espelho.



- a) Qual é a natureza do espelho?
b) Localize o espelho e assinale seus elementos (foco, vértice, centro de curvatura).

► Resolução

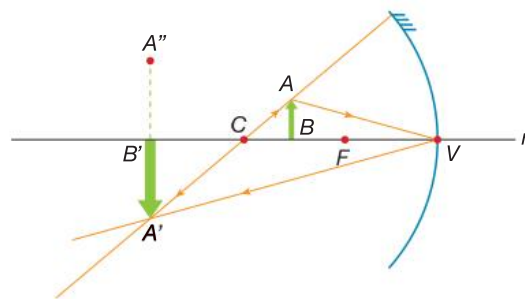
- a) O espelho é côncavo porque a imagem é invertida e maior que o objeto, por isso é também uma imagem real. Somente imagens reais são invertidas em espelhos esféricos.

- b) Para localizar o espelho, deve-se, primeiro, ligar a extremidade A do objeto à extremidade A' da imagem. Ao fazer isso, utilizamos o raio principal que passa pelo centro de curvatura e se reflete sobre si mesmo.

Determinamos, assim, a posição do centro de curvatura.

Posteriormente, marcamos A'' , simétrico de A' em relação ao eixo principal. Quando ligamos A'' com A determinamos o vértice V , pois utilizamos o 4º raio principal.

Para marcar F , basta dividir a distância CV por 2.



ILUSTRAÇÕES: LUIZ RUIBIO

QUESTÕES PROPOSTAS

- 1** Coloque um objeto AB na frente de um espelho côncavo. Faça um esquema e classifique a imagem $A'B'$ conjugada (em real/virtual; direita/invertida; ampliada/reduzida) para cada uma das seguintes posições do objeto:

- antes do centro de curvatura;
- no centro de curvatura;
- entre o centro e o foco;
- no foco;
- entre o foco e o vértice.

- 2** Espelhos convexas fornecem imagens sempre virtuais, direitas e reduzidas do objeto, independentemente da distância em que este se encontra

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

do espelho. Comprove isso fazendo um esquema que represente um objeto em frente de um espelho convexo em duas posições diferentes.



WALTER GIORANI/WORKBOOK STOCK/GETTY IMAGES

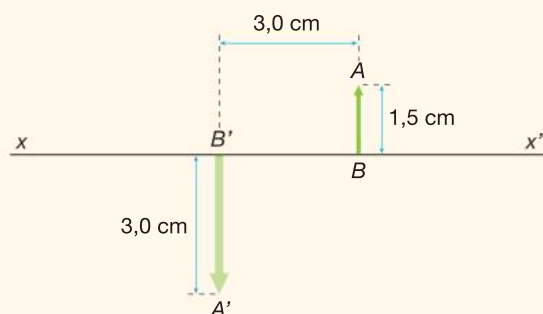
- 3 Uma pessoa deseja utilizar um espelho esférico côncavo de raio de curvatura de 50 cm como espelho de aumento. Qual deve ser a localização de seu rosto para que a imagem fornecida seja virtual, direita e maior?



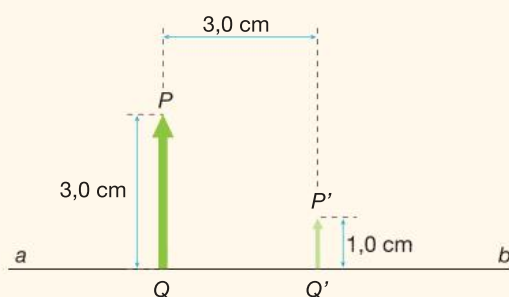
BEN WELSH/ZEFA/CORBIS/LATINSTOCK

A pessoa vê seu rosto aumentado, na posição direita, e a imagem tem profundidade, sendo, portanto, virtual.

- 4 No esquema, xx' é o eixo principal de um espelho esférico que conjuga a imagem $A'B'$ do objeto real AB . Qual é a natureza do espelho? Justifique. Reproduza o desenho e obtenha **graficamente** o vértice V , o foco F e o centro de curvatura do espelho.



- 5 No esquema a seguir, ab é o eixo principal de um espelho esférico, PQ é um objeto luminoso contido num plano frontal e $P'Q'$ é a imagem que o espelho conjuga do objeto considerado. Diga qual é a natureza do espelho e justifique. Reproduza o esquema e determine a posição do espelho, seu foco e seu centro de curvatura.



- 6 Renata, uma aplicada estudante de Física, foi visitar a Casa dos Espelhos de um parque de diversões. Ao entrar e se defrontar com o primeiro espelho, observou que seu pescoço e sua cabeça apresentavam uma imagem direita e reduzida, enquanto a imagem do resto do seu corpo também estava direita, porém ampliada. Qual é a natureza dos espelhos que formam a imagem de Renata? Justifique sua resposta. Construa duas representações gráficas para cada tipo de espelho (o que forma a imagem da cabeça e o que forma a imagem do tronco), mostrando as características das imagens da situação descrita. Você pode representar tanto a cabeça como o tronco por setas diante do espelho.

5 Imagens fornecidas por espelhos esféricos

As imagens de objetos conjugadas por espelhos esféricos são caracterizadas por sua construção geométrica. Podemos identificar as seguintes propriedades acerca da construção de imagens de objetos colocados diante do espelho:

- Sempre que a imagem conjugada é real, sua orientação é invertida; sempre que é virtual, é direita.
- Espelhos convexos conjugam apenas imagens virtuais, direitas e menores que o objeto.
- Espelhos côncavos conjugam imagens de natureza real, virtual e imprópria.
- Somente imagens reais podem ser projetadas em anteparos como telas, paredes etc.

A construção gráfica é um dos recursos de que dispomos para determinar a natureza, a posição e o tamanho da imagem de um objeto fornecida por um espelho esférico. Nem sempre, no entanto, essa solução é a mais prática ou abrange todos os aspectos que desejamos analisar.

6 Equação dos pontos conjugados de Gauss

A natureza e as características das imagens também podem ser obtidas pela interpretação do resultado de duas equações. Para obtê-las, vamos estabelecer um sistema de coordenadas no qual a origem está no vértice do espelho, sendo o sentido positivo contrário ao da luz incidente. Esse sistema de coordenadas é denominado **referencial gaussiano** e pode ser representado pelos esquemas a seguir.

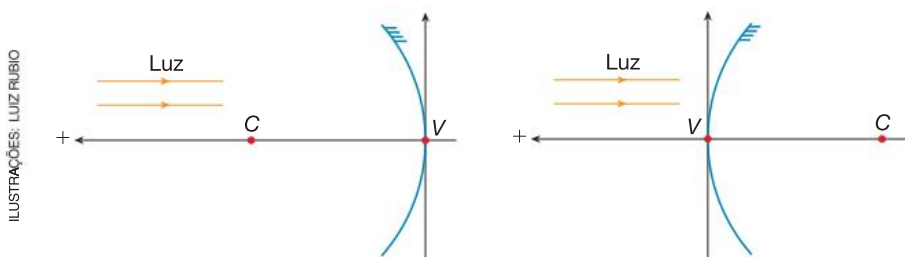


Figura 18 • É importante estabelecer o sistema de coordenadas, conforme mostram os esquemas, para que as convenções de sinais fiquem coerentes.

Notação para identificar as abscissas e ordenadas no referencial gaussiano:

- p = distância do objeto ao espelho (abscissa do objeto);
- p' = distância da imagem ao espelho (abscissa da imagem);
- f = distância focal do espelho (abscissa do foco);
- o = tamanho do objeto (ordenada da extremidade do objeto);
- i = tamanho da imagem (ordenada da extremidade da imagem).

A partir do referencial de Gauss, se temos a distância focal e a posição do objeto, poderemos determinar, analiticamente, a posição da imagem. Sendo f , p e p' as respectivas abscissas, podemos mostrar que a relação entre essas três grandezas é:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

Equação de Gauss



Figura 16 • Espelho convexo: imagem virtual, direita e menor.



Figura 17 • Imagem real e invertida de uma pessoa em uma colher.

S12

No Suplemento, você encontra a dedução da equação de Gauss.

Portanto, uma vez conhecidas duas abscissas, a terceira fica inteiramente determinada.

Seguindo o referencial de Gauss, vamos utilizar na equação:

- $f > 0$, para espelho côncavo;
- $f < 0$, para espelho convexo;
- $p' > 0$, para imagens reais;
- $p' < 0$, para imagens virtuais.

7 Aumento ou ampliação

A altura da imagem conjugada por um espelho esférico poderá ser maior, menor ou igual à altura do objeto. A relação entre o tamanho da imagem i e o tamanho do objeto o , chamada de **aumento linear transversal** (A) ou **ampliação**, é dada por:

$$A = \frac{i}{o}$$

Note que:

- a grandeza aumento é adimensional, isto é, não tem unidade;
- se $|A| > 1$, o tamanho da imagem é maior que o tamanho do objeto;
- se $|A| < 1$, o tamanho da imagem é menor que o tamanho do objeto;
- se $|A| = 1$, o tamanho do objeto e o da imagem são iguais.

Por meio das construções geométricas anteriores, percebemos que o valor do aumento depende da posição em que objeto e imagem estão em relação ao espelho. Assim, é possível determinar uma equação que relaciona p e p' ao aumento A . Para isso, suponha um objeto AB diante de um espelho esférico côncavo (fig. 19). A imagem $A'B'$ conjugada pelo espelho determina, com o vértice V , o triângulo $A'B'V$, semelhante ao triângulo ABV , o que permite escrever:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{B'V}{BV}$$

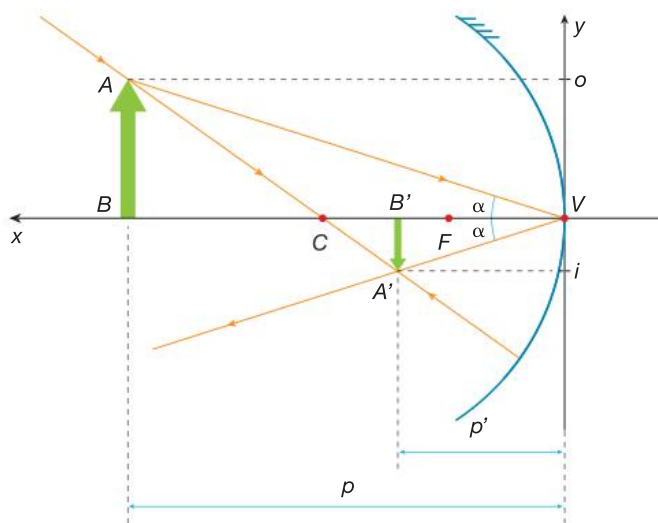


Figura 19 • A semelhança entre os triângulos ABV e $A'B'V$ permite calcular de forma genérica a ampliação produzida pelos espelhos esféricos.

Lembrando que $\overline{B'V} = p'$; $\overline{BV} = p$; $\overline{AB} = o$ e $\overline{A'B'} = i$, temos:

$$\frac{i}{o} = -\frac{p'}{p} = A$$

Note que:

- se $A > 0$, i e o têm o mesmo sinal, o que representa uma imagem direita, ou seja, virtual.

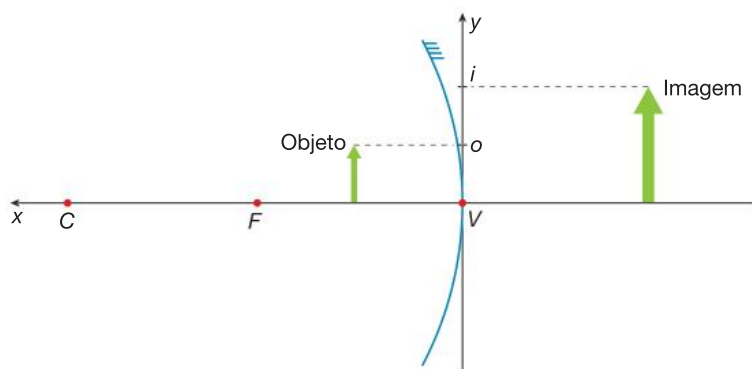


Figura 20 • O sinal da grandeza A (aumento linear) determina o sentido da imagem em relação ao sentido do objeto. Se $A > 0$, imagem e objeto têm a mesma orientação; se $A < 0$, objeto e imagem têm orientações opostas.

- se $A < 0$, i e o têm sinais opostos, o que representa uma imagem invertida, ou seja, real.

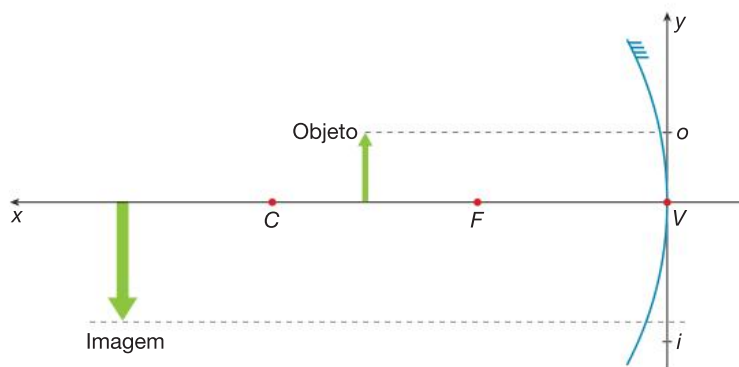


Figura 21 • Como nos espelhos esféricos as imagens reais são necessariamente invertidas, podemos identificar a existência ou não da inversão por meio do sinal de A .

Já sabe responder?

É possível encolher olhando-se no espelho?



Escultura *Cloud Gate*, de Anish Kapoor, Millennium Park, Chicago, EUA.

QUESTÕES RESOLVIDAS

R4 Num anteparo situado a 30 cm de um espelho esférico, forma-se a imagem nítida de um objeto situado a 10 cm do espelho. Determine:

- a natureza do espelho;
- a distância focal e o raio de curvatura do espelho;
- o aumento linear transversal e seu significado;
- a construção geométrica que representa a situação descrita.

Resolução

a) Trata-se de um espelho côncavo, pois a imagem projetada é real, e somente espelhos côncavos conjugam imagens reais.

b) O objeto está a $p = 10$ cm do espelho. A imagem é real; portanto, sua abscissa é positiva; logo, $p' = +30$ cm. Aplicando a equação de Gauss, temos:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{10} + \frac{1}{30} \Rightarrow$$

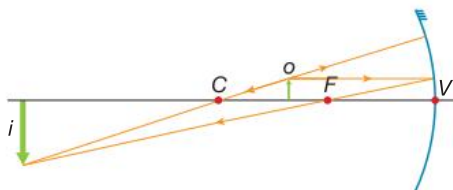
$$\Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{3+1}{30} \Rightarrow f = \frac{30}{4} \therefore f = 7,5 \text{ cm}$$

Como o raio de curvatura é $R = 2f$, temos: $R = 15$ cm

c) Sabemos que $A = -\frac{p'}{p}$. Então: $A = -\frac{30}{10} \Rightarrow A = -3$

Esse resultado indica que a imagem tem o triplo do tamanho do objeto e é invertida, pois $A < 0$.

d)



R5 Um espelho côncavo tem raio de curvatura igual a 80 cm. Deseja-se utilizá-lo para projetar sobre um muro a imagem de um pequeno objeto, de modo que essa imagem seja vinte vezes maior que o objeto. A que distância será preciso colocar o espelho em relação ao muro?

Resolução

Trata-se de uma imagem real, pois há projeção da imagem em um muro. Assim, ela será invertida, o que configura $A < 0$.

$$\text{Temos: } A = -\frac{p'}{p} \Rightarrow -20 = -\frac{p'}{p} \Rightarrow p' = 20p$$

Além disso, sabemos que, se $R = 80$ cm, então: $f = +40$ cm

Substituindo na equação de Gauss, temos:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{40} = \frac{1}{p} + \frac{1}{20p} \Rightarrow \frac{1}{40} = \frac{20+1}{20p} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 20p = 40 \cdot 21 \therefore p = 42 \text{ cm}$$

A questão pede a distância entre o espelho e o muro onde está projetada a imagem, ou seja, a abscissa p' .

Como $p' = 20p$, temos: $p' = 20 \cdot 42 \therefore p' = 840$ cm ou 8,40 m

R6 Um espelho retrovisor de uma motocicleta fornece uma imagem direita e cinco vezes menor de um objeto que está a 1 m dele. Determine:

- a natureza do espelho;
- a distância focal do espelho.

Resolução

a) Trata-se de um espelho convexo, pois a imagem é direita e menor; portanto, virtual.

b) Como a imagem é direita, $A > 0$. Então: $A = +\frac{1}{5}$. Note que, como o tamanho da imagem é menor que o do objeto, $A < 1$. Então: $+\frac{1}{5} = -\frac{p'}{p} \Rightarrow p' = -\frac{p}{5}$

Como $p = 1$ m, temos: $p' = -0,2$ m

Substituindo na equação de Gauss:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{1} - \frac{1}{0,2} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{0,2-1}{0,2} \Rightarrow$$

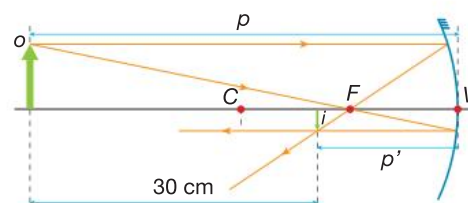
$$\Rightarrow \frac{1}{f} = -\frac{0,8}{0,2} \therefore f = -0,25 \text{ m}$$

Observe que a distância focal é menor que zero. Isso indica que, como esperávamos, o espelho é convexo.

R7 Um espelho esférico côncavo conjuga, de um objeto real, uma imagem invertida situada a 30 cm do objeto e com $\frac{1}{3}$ de seu tamanho. Calcule a distância focal do espelho.

Resolução

Vamos fazer um esquema para representar a situação descrita:



Como a imagem é invertida, temos: $A < 0$

$$A = -\frac{1}{3} = -\frac{p'}{p} \Rightarrow p = 3p'$$

Além disso, a distância entre o objeto e a imagem é de 30 cm, ou seja:

$$p - p' = 30 \Rightarrow 3p' - p' = 30 \Rightarrow 2p' = 30 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow p' = +15 \text{ cm e } p = 3 \cdot 15 \therefore p = 45 \text{ cm}$$

Substituindo na equação de Gauss:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{45} + \frac{1}{15} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1+3}{45}$$

$$\therefore f = 11,25 \text{ cm}$$

7 Bel adora se maquiar. Entretanto, não está satisfeita com o espelho plano que há em seu quarto, pois gostaria de ver seu rosto bem maior. Com essa ideia, ela procurou você, que é um fabricante de espelhos, e encomendou um espelho em que pudesse se ver com o dobro do tamanho da imagem conjugada pelo espelho plano.

Para as finalidades pretendidas pela jovem:

- determine se o espelho deve ser côncavo ou convexo, bem como onde Bel deve se posicionar em relação ao vértice (V), ao foco (f) e ao centro (C) do espelho. Faça um diagrama representando a formação da imagem, conforme o desejo de Bel;
- calcule o raio de curvatura do espelho, considerando a informação de que Bel costuma ficar a 30 cm dele.

8 Com o objetivo de obter mais visibilidade da área interna do supermercado, facilitando o controle da movimentação de pessoas, são utilizados espelhos esféricos cuja distância focal em módulo é igual a 30 cm. Um cliente de 1,8 m de altura está a 1,5 m de distância do vértice de um dos espelhos.

- Indique o tipo de espelho utilizado e a natureza da imagem por ele oferecida.
- Calcule a altura da imagem do cliente.

9 Um dentista, para observar com detalhes os dentes dos pacientes, utiliza certo tipo de espelho. Normalmente, o espelho é colocado a uma distância de aproximadamente 4,0 mm do dente, de forma que seja obtida uma imagem direita com ampliação duas vezes maior. Identifique o tipo de espelho utilizado pelo dentista e calcule sua distância focal.

10 Uma superfície esférica (calota esférica) é espolhada em ambos os lados podendo, portanto, ser usada como um espelho côncavo ou convexo. Ao afastar um objeto real, inicialmente muito próximo da face côncava, percebe-se que a imagem conjugada pelo espelho “desaparece” quando o objeto está a 15 cm da superfície esférica. Responda:

- Qual é o valor do raio de curvatura da superfície esférica?
- Estando o objeto defronte da superfície côncava e distante dela 45 cm, qual será o aumento linear da imagem conjugada?

11 Os espelhos retrovisores usados em motos são convexos.

- Quais são as características da imagem que eles formam?
- Qual é a vantagem de usar esses espelhos?
- O motociclista vê a imagem de um carro localizado 9 m atrás da moto. Sabendo que o módulo da distância focal do espelho é de 3 m, determine a posição e o aumento dessa imagem.

12 Um espelho esférico projeta sobre uma parede uma imagem três vezes maior que uma vela colocada diante dele. Sabendo que o vértice do espelho está a 1,5 m da parede, responda às seguintes perguntas:

- O espelho é côncavo ou convexo? Por quê?
- Quanto mede o raio de curvatura do espelho?

13 Na entrada de uma garagem há um espelho convexo. Uma menina de 1,2 m de altura vê sua imagem refletida quando está a 1,6 m do vértice do espelho. A relação entre os tamanhos da menina e de sua imagem é igual a 4.

Calcule a distância focal do espelho da entrada da garagem.

14 (Mackenzie-SP) Uma garota encontra-se diante de um espelho esférico côncavo e observa que a imagem direita de seu rosto é ampliada duas vezes. O rosto da garota só pode estar:

- entre o centro de curvatura e o foco do espelho côncavo.
- sobre o centro de curvatura do espelho côncavo.
- entre o foco e o vértice do espelho côncavo.
- sobre o foco do espelho côncavo.
- antes do centro de curvatura do espelho côncavo.

15 (UPE) Um objeto foi colocado sobre o eixo principal de um espelho côncavo de raio de curvatura igual a 6,0 cm. A partir disso, é possível observar que uma imagem real foi formada a 12,0 cm de distância do vértice do espelho. Dessa forma, é **CORRETO** afirmar que o objeto encontra-se a uma distância do vértice do espelho igual a:

- 2,0 cm
- 4,0 cm
- 5,0 cm
- 6,0 cm
- 8,0 cm

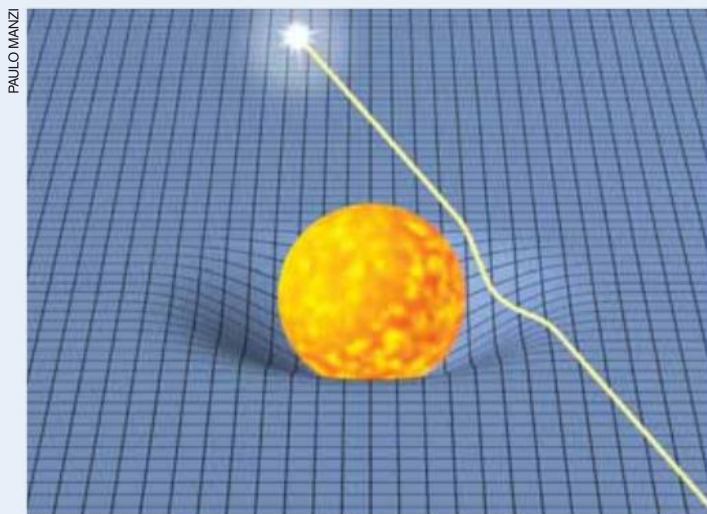
A luz se propaga sempre em linha reta?

Nesta unidade, vimos que a luz pode ser representada por um elemento geométrico, um segmento de reta orientado, que denominamos raio de luz. Essa representação é adequada, pois, a partir da análise de diversos fenômenos envolvendo a luz (formação de sombras, eclipses etc.), podemos verificar que sua propagação ocorre em linha reta.

No entanto, a luz pode se curvar! Campos gravitacionais muito intensos são capazes de afetar a propagação da luz. Para introduzir o conceito de espaço-tempo, vamos utilizar o exemplo de um lençol esticado com uma bola de boliche sobre ele, para ilustrar a origem da força gravitacional: a deformação do espaço-tempo (lençol) por um objeto de grande massa (a bola de boliche). Em nosso exemplo, a luz se propaga sobre o tecido do lençol. Como ele é deformado pela bola de boliche (uma estrela como o Sol, por exemplo), a trajetória da luz é encurvada por essa deformação (ver figura a seguir).

Albert Einstein previu o desvio da luz de uma estrela pela ação da gravidade de um corpo de grande massa. Esse desvio foi observado em um eclipse em 1919, na cidade de Sobral, no Ceará, comprovando a validade da teoria geral da relatividade, proposta por Einstein em 1916.

Para verificar o desvio da luz causado por um campo gravitacional, era preciso obter duas fotografias: uma em que a luz proveniente das estrelas não tivesse sofrido influência do campo gravitacional do Sol, e outra em que a luz tivesse sofrido influência desse campo. Comparando duas fotografias, os observadores perceberam que a luz das estrelas havia sido desviada pelo Sol. As condições ideais para obter tais fotografias ocorreram durante o eclipse total do Sol na cidade de Sobral.



Representação esquemática da deformação espaço-tempo por causa de uma estrela.

AMPLIANDO SUA LEITURA

- 1 O texto descreve, de maneira simplificada, um importante conceito introduzido pela Física Moderna, fundamental para compreender a propagação curvilínea da luz. Que conceito é esse e como ele se relaciona com a propagação da luz?
- 2 Como seria a propagação da luz quando é emitida de um ponto distante de objetos astronômicos de grande massa? Considere o exemplo do lençol para responder a essa questão.

S13

No *Suplemento*, há sugestão de acesso a um artigo sobre os 90 anos da observação da curvatura da luz em Sobral, no estado do Ceará. A perspectiva histórica apresentada no texto pode enriquecer ainda mais a discussão sobre esse tema.

S14

No *Suplemento*, indicamos sites que contêm textos sobre as noções de espaço-tempo.

Determinando elementos de espelhos esféricos

O objetivo da atividade é construir dois espelhos esféricos: um côncavo e um convexo. Em seguida, você vai observar o comportamento da luz ao incidir nos espelhos.

Materiais

- Uma garrafa PET de refrigerante de 2 L; uma embalagem de café que seja espelhada internamente e flexível; um pente para cabelos; uma lanterna; cola branca; régua.

Procedimento

- 1 Corte a garrafa PET transversalmente para formar um anel de uns 6 cm de altura, conforme indicado na figura abaixo. Corte o anel ao meio formando duas tiras.



- 2 Cole um pedaço da embalagem espelhada na face côncava de uma das metades do anel circular que foi cortado da garrafa, cobrindo toda a superfície. A face refletora da embalagem deve ficar voltada para fora, compondo um espelho côncavo.
- 3 Coloque o pente na posição indicada na figura a seguir. Direcione o feixe de luz da lanterna de

modo que a luz incida perpendicularmente no pente; se for preciso, use um apoio. Afaste a lanterna para que os raios de luz passem através do pente e fiquem o mais paralelos possível entre si, como mostra a figura.

- 4 A luz gerada pela lanterna foi dividida em pequenos feixes, que são refletidos pelo espelho côncavo. Observe o comportamento dos raios refletidos pelo espelho.

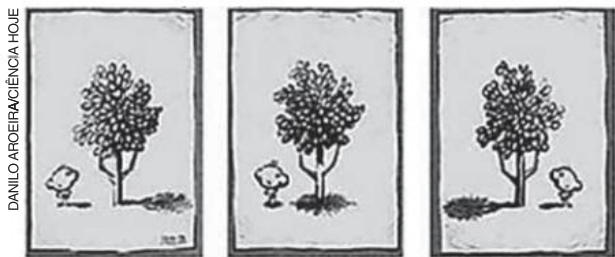


- 5 Repita a montagem a partir do item 2, utilizando a outra tira do anel cortado da garrafa para construir o espelho convexo. Lembre-se de que a parte espelhada da embalagem deve estar na face externa da tira, ao contrário do espelho côncavo. A seguir, responda às questões.

Questões

- 1 Determine a distância do espelho côncavo ao ponto de cruzamento dos raios refletidos. O que esse ponto representa?
- 2 Se você dobrar a distância identificada na questão anterior, que elemento do espelho côncavo você determinará?
- 3 Meça o diâmetro interno da garrafa PET. Qual é a relação entre a medida obtida na questão 2 e o valor do diâmetro da garrafa?
- 4 Dirija um feixe de luz paralelamente à tira utilizada como espelho convexo e determine seu foco. Qual é a diferença entre o comportamento do feixe de luz refletido no espelho côncavo e no espelho convexo?
- 5 Qual é a diferença entre as posições relativas dos focos dos espelhos côncavos e convexas? Qual deles é real e qual é virtual?

1 (Enem)



Os quadrinhos mostram, por meio da projeção da sombra da árvore e do menino, a sequência de períodos do dia: matutino, meio-dia e vespertino, que é determinada:

- pela posição vertical da árvore e do menino.
- pela posição do menino em relação à árvore.
- pelo movimento aparente do Sol em torno da Terra.
- pelo fuso horário específico de cada ponto da superfície da Terra.
- pela estação do ano, sendo que no inverno os dias são mais curtos que no verão.

2 (ITA-SP) Dos objetos citados a seguir, assinale aquele que seria visível em uma sala perfeitamente escura.

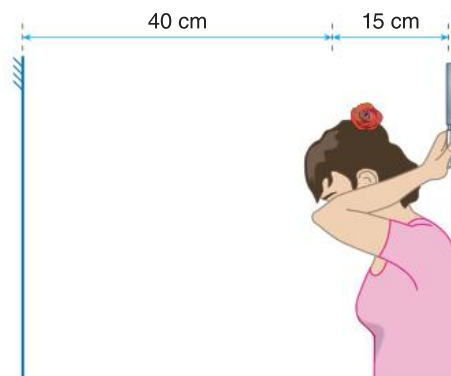
- um espelho.
- qualquer superfície clara.
- um fio aquecido ao rubro.
- uma lâmpada desligada.
- um gato preto.

3 (UFTM-MG) Para medir distâncias utilizando-se das propriedades geométricas da luz, um estudante providencia uma caixa cúbica, de aresta 16 cm. Após pintar o interior com tinta preta, faz um orifício no centro de uma das faces e substitui a face oposta ao orifício por uma folha de papel vegetal. Feito isso, aponta o orifício para uma porta iluminada, obtendo dela uma imagem nítida, invertida e reduzida, projetada sobre a folha de papel vegetal. Sabendo-se que a altura da imagem observada da porta é 14 cm e que a altura da porta é 2,15 m, conclui-se que a distância aproximada, em metros, entre o orifício da caixa e a porta é:

- 0,9
- 1,8
- 2,5
- 3,5
- 4,8

4 (Uerj) Uma garota, para observar seu penteado, coloca-se em frente a um espelho plano de parede, situado a 40 cm de uma flor presa na parte de trás dos seus cabelos. Buscando uma visão melhor do arranjo da flor no cabelo, ela segura, com uma das mãos, um pequeno espelho plano atrás da cabeça,

a 15 cm da flor. A menor distância entre a flor e sua imagem, vista pela garota no espelho de parede, está próxima de:



- 55 cm
- 70 cm
- 95 cm
- 110 cm
- 125 cm

5 (UEL-PR) Leia o texto e analise as figuras a seguir.

Texto

“Apesar dos efeitos que embaralharam o Universo durante a grande oscilação, os físicos podem fazer algumas suposições razoáveis sobre o que havia antes. [...] Para visualizar este efeito imagine uma bexiga que, ao esvaziar, em vez de chegar a um estado de repouso na forma de um objeto amorfo de borracha, preserve sua energia e impulso. [...] Portanto, assim que o balão atinge o seu tamanho mínimo, ele vira pelo avesso e começa a crescer novamente. O que era antes o exterior da bexiga torna-se seu interior e vice-versa. [...]”

(BOJOWALD, M. Relato de um Universo oscilante. *Scientific American Brasil*, p. 35, nov. 2008.)

Considerando o contexto apresentado no artigo, a alternativa que indica como deverá aparecer escrita a palavra UNIVERSO no interior da bexiga IV é:

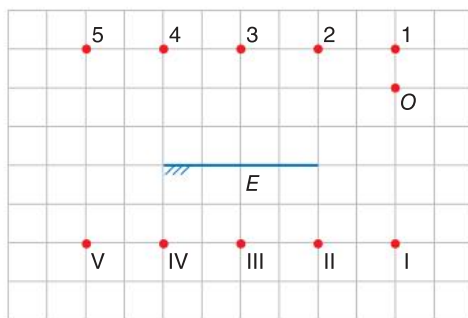


- UNIVERSO
- UNIVERSO
- UNIVERSO
- UNIVERSO
- UNIVERSO

Texto para as próximas duas questões.

Na figura a seguir, *E* representa um espelho plano que corta perpendicularmente a página, e *O* representa um pequeno objeto colocado no plano da página. Na figura, também estão representadas duas sequências

de pontos. A sequência I, II, III, IV e V está localizada atrás do espelho, região de formação da imagem do objeto O pelo espelho E . A sequência 1, 2, 3, 4 e 5 indica as posições de cinco observadores. Considere que todos os pontos estão no plano da página.



6 (UFRGS-RS) Qual é o ponto que melhor representa a posição da imagem do objeto O formada pelo espelho plano E ?

- a) I c) III e) V
b) II d) IV

7 (UFRGS-RS) Quais observadores podem ver a imagem do objeto O formada pelo espelho plano E ?

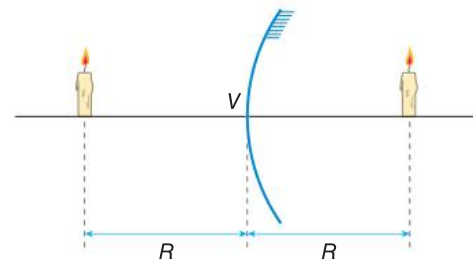
- a) Apenas 1. d) Apenas 4 e 5.
b) Apenas 4. e) Apenas 2, 3 e 4.
c) Apenas 1 e 2.

8 (Uece) Um pequeno objeto é colocado perpendicularmente sobre o eixo principal e a 12 cm do vértice de um espelho esférico côncavo, cujo raio de curvatura é 36 cm. A imagem conjugada pelo espelho é:

- a) real, invertida e maior que o objeto.
b) virtual, direita e maior que o objeto.

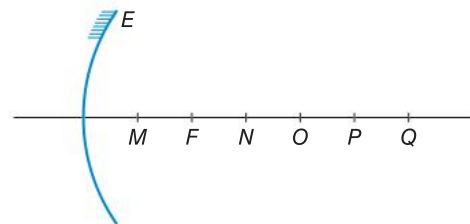
- c) virtual, direita e menor que o objeto.
d) real, invertida e menor que o objeto.

9 (PUC-MG) A figura desta questão mostra parte de uma esfera, de raio R , espelhada por dentro e por fora, formando dois espelhos esféricos. Dois objetos luminosos são dispostos diante desses espelhos conforme indicado. A distância entre as imagens produzidas é igual a:



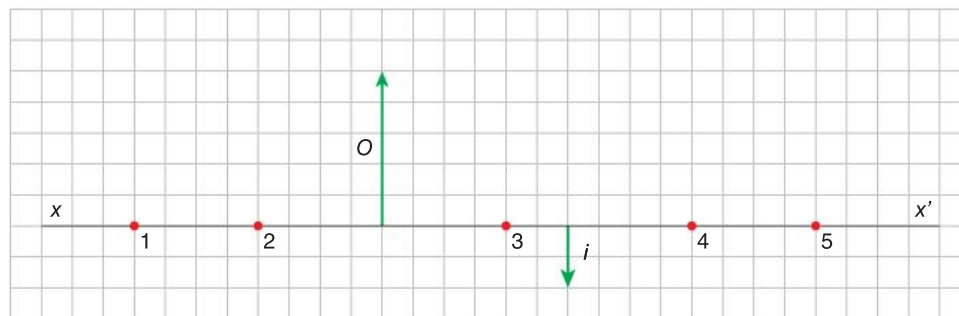
- a) $2R$ b) $\frac{4R}{3}$ c) $\frac{R}{2}$ d) $\frac{3R}{5}$ e) $\frac{2R}{3}$

10 (Uece) A figura a seguir ilustra um espelho esférico côncavo E . Sobre o eixo principal estão indicados pontos equidistantes, entre os quais se encontram o foco F e o centro da curvatura O . Se um objeto real é colocado no ponto N , a imagem conjugada pelo espelho se formará no ponto:



- a) M b) Q c) O d) P

11 (UEL-PR) Na figura a seguir, estão representados um objeto O e sua imagem i conjugada por um espelho esférico côncavo, cujo eixo principal é xx' .



De acordo com a figura, o vértice do espelho está localizado no ponto:

- a) 1 b) 2 c) 3 d) 4 e) 5

12 (UFBA) A propriedade óptica que afirma que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão é válida somente para os espelhos planos?

13 (UnB-DF) Um espelho plano fornece uma imagem de um objeto situado a uma distância de 10 cm do espelho. Afastando-se o espelho 20 cm em uma direção normal ao seu plano, que distância separará a antiga imagem da nova imagem?

UNIDADE

4

Refração da luz

Para começo de conversa

A luz pode fazer curvas?



S1

Professor, consulte o *Suplemento* para obter orientações sobre a questão introdutória, os objetivos desta unidade e a proposta de abordagem inicial dos conteúdos.

Dependendo dos meios em que um raio de luz se propague, é possível ocorrer uma “curvatura” da luz. Em um meio homogêneo e transparente, a luz se propaga retilineamente. No entanto, ao mudar de meio, o raio de luz parece “quebrar-se”. A “ideia de a luz se curvar” nos leva ao funcionamento da fibra óptica.

Na foto de uma prova de natação de atletas paraolímpicos, é possível ver a luz emitida pelo corpo do nadador da direita sofrendo reflexão total. Observe que a luz proveniente do nadador da esquerda está dentro dos limites que permitem que ela seja refratada, por isso, enxergamos a imagem do ambiente externo à água.

Ilusão? A Óptica explica!

Muitos acontecimentos intrigantes relacionados ao comportamento da luz são explicados com base no conceito e nas leis da refração luminosa. Da miragem ao arco-íris, da fibra óptica ao brilho do diamante, a luz que provoca esses fenômenos e é captada pelos olhos, além de nos fascinar, pode se tornar uma ferramenta tecnológica prodigiosa. Foi a partir do conhecimento das leis da refração que, por exemplo, surgiu a possibilidade de transmitir velozmente uma quantidade espantosa de informações que trafegam em condutores tão finos quanto um fio de cabelo, como as fibras ópticas. Quando estudamos refração, podemos entender por que, ao mergulhar em uma piscina, tanto é possível ver parte do ambiente externo quanto nosso reflexo na superfície interna da piscina.

Capítulos

- 12 Refração luminosa
- 13 Sistemas refratores; dispersão da luz
- 14 Lentes esféricas: formação de imagens
- 15 Lentes esféricas: estudo analítico
- 16 Instrumentos ópticos e óptica da visão

Refração luminosa

ou: Por que as estrelas parecem piscar no céu?

As estrelas parecem "piscar" ou "cintilar" no céu devido à existência de correntes móveis de ar quente e ar frio na atmosfera terrestre. Essa turbulência atmosférica altera a direção dos raios de luz provenientes das estrelas dando a impressão de que estão cintilando.

1 Introdução



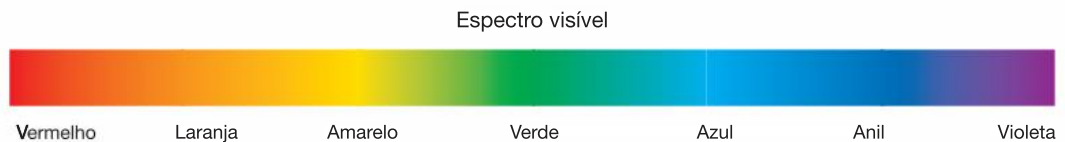
S2

No *Suplemento*, você encontra orientações para o trabalho com a questão introdutória.

A luz do Sol é enviada à Terra na forma de radiações eletromagnéticas que se propagam pelo espaço com velocidade aproximada de $3,0 \times 10^8$ m/s. Essas radiações são compostas pela luz visível e por uma série de outras radiações não visíveis, como a radiação infravermelha, a radiação ultravioleta, os raios X etc.

Nossos olhos conseguem perceber uma pequena faixa desse conjunto: a radiação denominada luz visível, que está contida no chamado espectro da luz branca. As cores são uma das **manifestações visíveis desse espectro**. Dizemos, **por isso**, que a luz branca é **polícromática**, constituída por uma infinidade de radiações monocromáticas.

Figura 1 • Podemos distinguir sete cores no espectro da luz branca.



LUÍZ RUBIO

Figura 2 • Fenômeno da refração visto no Poço Encantado (Chapada Diamantina, BA).

RENATA MELLOTYBA

2 Refração da luz

Quando colocamos um canudinho em um copo com água, ele aparenta estar partido na superfície de separação entre o ar e a água (fig. 3). Nossas pernas parecem ficar mais curtas quando estamos dentro de uma piscina. Essas percepções estão ligadas à **refração da luz**, fenômeno caracterizado pela alteração da velocidade de propagação da luz ao passar de um meio para outro.

Se a luz incidir obliquamente sobre a superfície de separação entre os dois meios, a mudança de velocidade implicará uma alteração na direção de propagação.

A mudança na velocidade de propagação da luz depende de que fatores? No vácuo, a luz se propaga com velocidade de aproximadamente $3,0 \times 10^8$ m/s, valor que indicamos pela letra c . Os cientistas perceberam que apenas no vácuo a luz atinge essa velocidade. Em qualquer outro meio, a velocidade de propagação da luz, que indicamos pela letra v , é menor que c . Assim, podemos escrever que $c > v$ e definir um número $n > 1$ tal que $c = nv$; ou, de outra maneira: $n = \frac{c}{v}$

O número n é denominado índice de refração absoluto do meio e é uma grandeza adimensional, isto é, não tem unidade, uma vez que se trata da razão entre duas quantidades de uma mesma grandeza (a velocidade).

O índice de refração absoluto n de um meio para determinada luz monocromática é a razão entre a velocidade da luz no vácuo c e a velocidade da luz no meio considerado v :

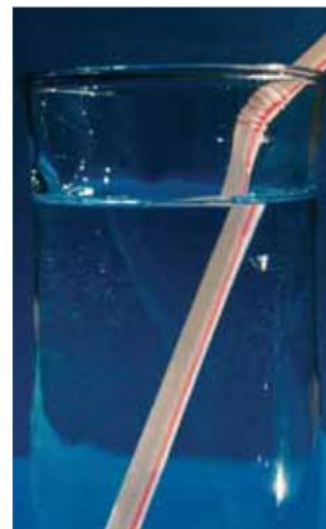
$$n = \frac{c}{v}$$

Na tabela 1, apresentamos alguns valores de índices de refração absolutos para alguns meios materiais e para a mesma radiação monocromática incidente.

- Observe que adotamos $n_{\text{ar}} = 1$, porque o valor da velocidade da luz no ar é muito próximo daquele no vácuo.
- O índice de refração é inversamente proporcional à velocidade de propagação da luz, ou seja, quanto maior for o índice de refração de um meio, menor será a velocidade de propagação da luz nesse meio.
- Dizemos que o meio que tem maior índice de refração tem maior **refringência**. Portanto, quanto mais refringente é o meio, menor a velocidade de propagação da luz nesse meio.

Dependendo da radiação monocromática incidente na superfície de separação, teremos diferentes valores para os índices de refração absolutos para um mesmo meio (tabela 2).

Por essa tabela, verificamos que a luz violeta é a que tem menor velocidade de propagação no vidro.



SYLVIA CORDAY/PHOTO LIBRARY/ALAMY/LOW IMAGES

Figura 3 • Por causa da refração da luz, temos a impressão de que o canudo está "quebrado".

Tabela 1 – Valores de índices de refração de alguns meios materiais

Meio material	Índice de refração (n)
Ar	1,00
Água	1,33
Vidro	1,4 a 1,7
Glicerina	1,47
Álcool etílico	1,36
Diamante	2,42
Acrílico	1,49

Fonte: LIDE, D. R. (Ed.). *Handbook of Chemistry and Physics*. 87. ed. Boca Raton: CRC, 2006-2007.

Tabela 2 – Valores de índices de refração de um bloco de vidro para diferentes luzes monocromáticas

Luz monocromática	Índice de refração (n) de um bloco de vidro
Violeta	1,532
Azul	1,528
Verde	1,519
Amarela	1,517
Alaranjada	1,514
Vermelha	1,513

Fonte: LIDE, D. R. (Ed.). *Handbook of Chemistry and Physics*. 87. ed. Boca Raton: CRC, 2006-2007.

3 Leis da refração

O fenômeno da refração luminosa caracteriza-se pelo fato de a luz passar, através da superfície de separação, do meio de incidência para outro meio, propagando-se nesse outro meio com velocidade constante, porém diferente da velocidade com que se propaga no meio de incidência. A análise do comportamento do raio luminoso ao sofrer refração conduz ao estudo das chamadas **leis da refração**.

Suponha que um feixe de luz que se propaga num meio 1 encontre uma superfície que separa o meio 1 de um meio 2 e parte desse feixe atravesse a superfície, penetrando no meio 2. Pelo ponto de incidência, podemos traçar a reta normal à superfície de separação e em relação a ela medir o ângulo de incidência i e o ângulo de refração r (fig. 4).

A 1ª lei da refração estabelece:

O raio incidente (RI), a reta normal à superfície de separação (N) e o raio refratado (RR) estão em um mesmo plano.

A 2ª lei da refração, mais conhecida como lei de Snell-Descartes, estabelece:

Considerando dois meios transparentes e uma radiação monocromática, podemos afirmar que a razão entre o seno do ângulo de incidência (i) e o seno do ângulo de refração (r) depende apenas dos meios nos quais a luz se propaga, o que resulta algebricamente em:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} = \text{constante} \Rightarrow n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

A razão constante $\frac{n_2}{n_1}$ é conhecida como **índice de refração relativo** do meio 2 em relação ao meio 1.

Uma das consequências mais importantes da lei de Snell-Descartes, ou simplesmente lei de Snell, é o fato de que, quando a luz passa de um meio menos refringente para um meio mais refringente, o raio refratado se aproxima da normal (fig. 5A), ou seja, $i > r$. Mas quando a luz passa para um meio menos refringente, o raio refratado se afasta da normal, ou seja, $i < r$ (fig. 5B). Se a incidência não for oblíqua, ou seja, se $i = 0^\circ$, teremos $r = 0^\circ$, nesse caso, o raio não muda a direção de sua trajetória ao sofrer refração (fig. 5C).

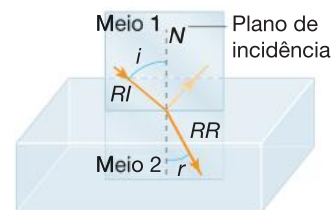


Figura 4 • Representação da 1ª lei da refração luminosa.



S3

No *Suplemento*, há uma sugestão de atividade experimental que permite demonstrar a lei de Snell-Descartes.

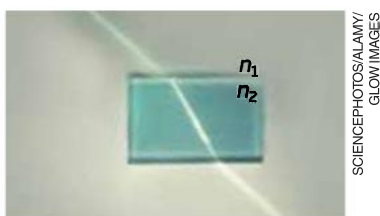
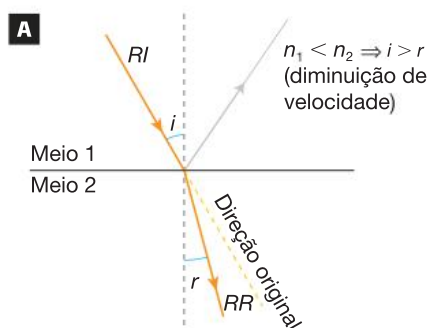


Figura 5A • A luz vinda do ar incide obliquamente no vidro, sofrendo desvio. O raio refratado aproxima-se da normal.

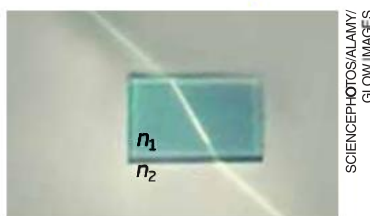
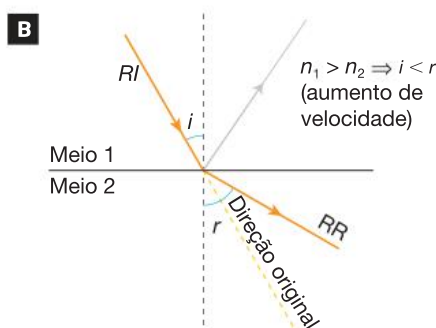


Figura 5B • A luz vinda do vidro passa para o ar, aumentando sua velocidade. O raio refratado afasta-se da normal.

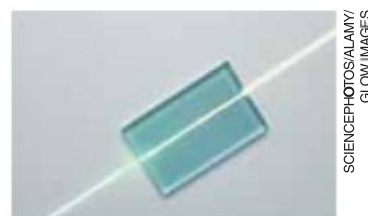
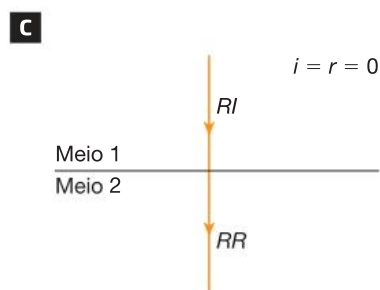


Figura 5C • A luz vinda do ar incide perpendicularmente no vidro. O feixe de luz não sofre desvio ($i = r = 0^\circ$).

4 Refração atmosférica

Ao olhar para o céu estrelado, pensamos que estamos visualizando a real localização dos corpos celestes. Entretanto, os astros não estão nas posições em que os vemos. Os índices de refração da atmosfera variam à medida que a altitude diminui, ou seja, quanto mais perto da Terra, mais ar e, portanto, menor é a velocidade de propagação da luz. A luz proveniente das estrelas aproxima-se da normal ao se propagar em camadas de ar cada vez mais densas, descrevendo uma trajetória praticamente curva. Dizemos que as estrelas ocupam uma posição aparente diferente da real.

S4

O Suplemento oferece mais informações sobre a distância percorrida pela luz ao refratar. O princípio do menor tempo de Fermat ajudará a explicar com mais propriedade a constatação de que, depois de refratada, a luz percorre sua trajetória no menor tempo possível.

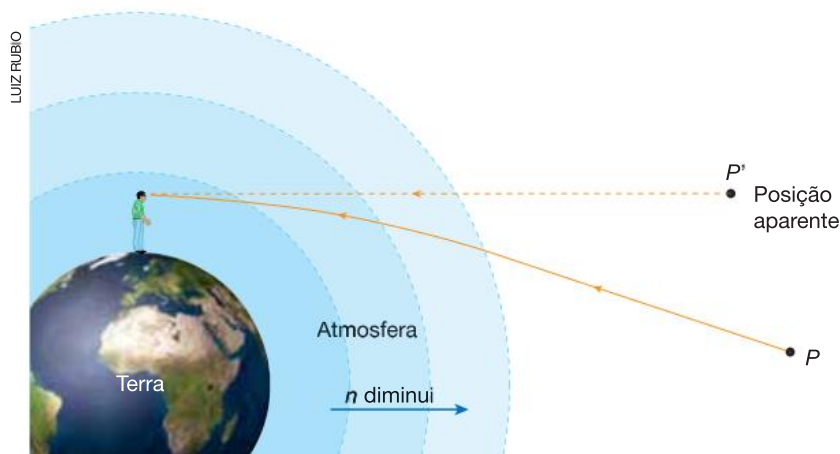


Figura 6 • A mudança na densidade do ar das camadas atmosféricas produz um desvio acentuado nos raios de luz provenientes de um objeto exterior à Terra. (Figura fora de escala, com cores-fantasia.)

QUESTÕES RESOLVIDAS

R1 A tabela apresenta alguns índices de refração absolutos de certos meios para certa radiação monocromática.

Substância	Índice de refração absoluto
Ar	1,00
Gelo	1,31
Água	1,33
Glicerina	1,47
Vidro	1,4 a 1,7
Diamante	2,42
Quartzo cristalino	1,54
Álcool etílico	1,36

Fonte: LIDE, D. R. (Ed.). *Handbook of Chemistry and Physics*. 87. ed. Boca Raton: CRC, 2006-2007.

- Qual dos meios é mais refringente?
- Para qual dos meios a luz proveniente do vácuo apresentará maior desvio em relação à direção original?
- Suponha um objeto feito inteiramente de vidro que tenha índice de refração de 1,47, imerso em glicerina contida em um recipiente

também de vidro. Como o objeto é visto por um observador situado no ar?

► Resolução

- O meio mais refringente é aquele com maior índice de refração. Entre os meios apresentados na tabela, o mais refringente é o diamante.
- A luz será mais desviada no meio em que ela se mover com menor velocidade. Entre os meios apresentados na tabela, o diamante é o de maior índice de refração e, portanto, onde a luz se move com menor velocidade.
- Como os índices de refração desse objeto de vidro e da glicerina são os mesmos, a luz não sofre mudança de velocidade ao passar da glicerina para o vidro. Isso significa que não será possível identificar o objeto de vidro no interior da glicerina. Ele parecerá invisível.



DOTA2

► **R2** O índice de refração absoluto do zircônio é aproximadamente 2,0.

- Desenhe um esquema que represente um raio de luz proveniente do ar e que incida obliquamente na superfície de separação sofrendo refração. O raio aproxima-se ou afasta-se da normal?
- Determine a velocidade da luz no zircônio.
- Para um ângulo de incidência de 45° , determine o ângulo de refração.

► **Resolução**

- Como o índice de refração do zircônio é maior que 1, o raio de luz aproxima-se da normal, uma vez que passa de um meio menos denso para um mais denso, ou seja, a luz passa a se mover em um meio mais refringente.

- Sabemos que o índice de refração absoluto é dado por:

$$n = \frac{c}{v}. \text{ No caso, temos: } 2,0 = \frac{3 \times 10^8}{v} \therefore v = 1,5 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Logo, a velocidade da luz no zircônio é: $1,5 \times 10^8 \text{ m/s}$

- Pela lei de Snell, sabemos que:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}, \text{ que também pode ser escrita como:}$$

$$n_1 \cdot \sin i = n_2 \cdot \sin r$$

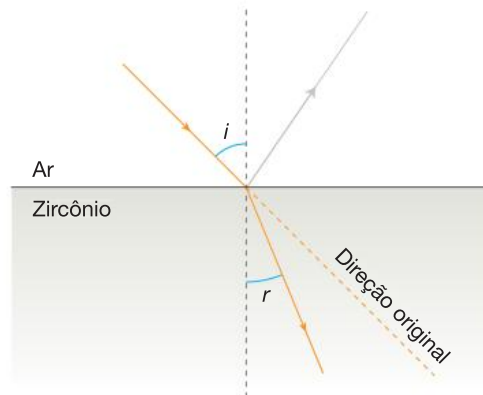
Na situação do problema, temos: $n_1 = n_{\text{ar}} = 1,0$; $n_2 = n_{\text{zircônio}} = 2,0$; $i = 45^\circ$.

Logo, substituindo na lei de Snell, temos:

$$1,0 \cdot \sin 45^\circ = 2,0 \cdot \sin r$$

Considerando $\sin 45^\circ = 0,7$, a equação resulta em $\sin r = 0,35$. Em uma tabela de funções trigonométricas,

encontramos: $r \approx 20^\circ$



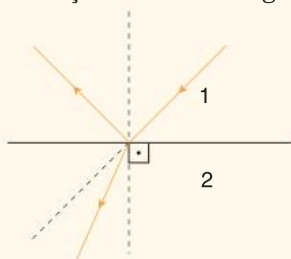
QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

- A velocidade da luz em certo óleo vale $\frac{2}{3}$ da velocidade da luz no vácuo.

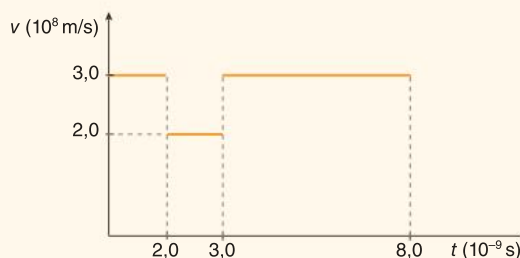
- Represente graficamente um raio de luz proveniente do óleo e que incida obliquamente na superfície de separação com o ar sofrendo refração. O raio aproxima-se ou afasta-se da normal?
- Considerando a velocidade da luz no ar como $3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$, determine o índice de refração absoluto do óleo.

- Um raio luminoso monocromático incide em uma superfície de separação entre os meios 1 e 2, sofrendo reflexão e refração conforme a figura a seguir.



Verifique se cada uma das afirmativas a seguir é verdadeira ou falsa e justifique sua escolha.

- O índice de refração do meio 1 é menor que o do meio 2.
 - A velocidade de propagação da luz no meio 1 é maior que no meio 2.
- Um raio de luz monocromática propagando-se no vácuo (índice de refração igual a 1) incide perpendicularmente em uma placa de vidro atravessando-a e retornando ao vácuo. O gráfico abaixo representa a variação da velocidade da luz em função do tempo para a situação descrita.



Determine a espessura da placa de vidro, em metros, e o índice de refração absoluto do vidro.

5 Reflexão total

A figura 7 representa uma pequena lâmpada embaixo de um aquário de paredes de vidro, cheio de água. Como a luz se move no ar com maior velocidade que na água, a maior parte da luz proveniente da lâmpada sofre refração, afastando-se da normal. Note que, entre os pontos A e D, grande parte da luz emerge da água e somente uma pequena parcela sofre reflexão.

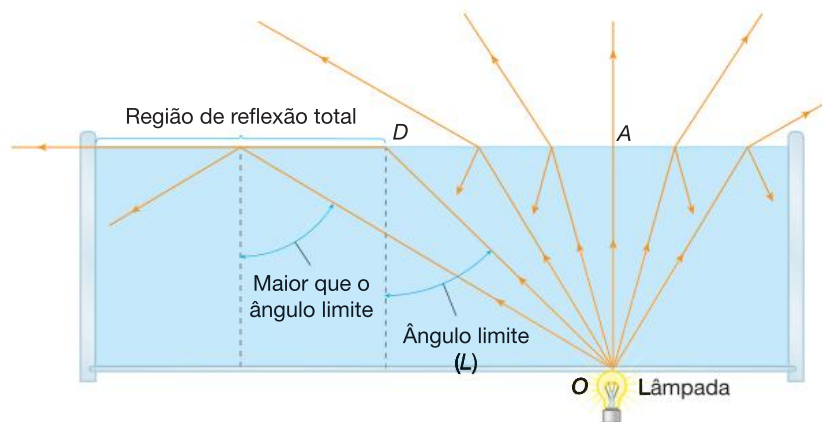


Figura 7 • A luz que incide na superfície de separação além de D é totalmente refletida.

Entretanto, ao incidir segundo certo ângulo L no ponto D da superfície de separação, a luz refrata em uma direção rasante a essa superfície, ou seja, o ângulo de refração é $r = 90^\circ$. Se o ângulo de incidência for maior que L , a luz não conseguirá emergir da água e retornará integralmente ao meio de incidência, sofrendo o que denominamos **reflexão total**. Nesse caso, o ângulo de incidência da luz é chamado de ângulo limite (L).

Observe:

- A reflexão total só ocorre em situações nas quais a luz passa de um meio mais refringente para um menos refringente, afastando-se da normal ao refratar.
- O ângulo L , também denominado ângulo crítico, é o ângulo limite entre a luz totalmente refletida e a luz majoritariamente refratada.
- É possível determinar um cone cujo vértice é o ponto ocupado pela lâmpada O e cujo ângulo de abertura depende do valor do ângulo limite. Seu eixo é a reta perpendicular à superfície de separação baixada a partir de O . Se bloquearmos convenientemente esses raios, um observador que estiver no ar não poderá ver a lâmpada, pois os raios externos ao cone sofrerão reflexão total e, assim, não passarão para o ar (fig. 8).

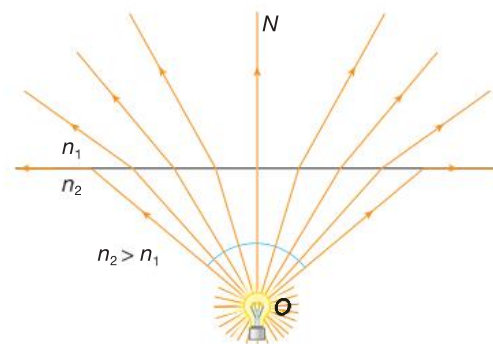


Figura 8

6 Determinação do ângulo limite

Suponha que um feixe de luz monocromática, proveniente de um meio 1, sofra refração ao passar para um meio 2, menos refringente que 1, ou seja, $n_1 > n_2$. Vamos que, se a incidência é perpendicular à superfície de separação, a luz se refrata sem sofrer desvio (fig. 9A). Para incidências oblíquas, ou seja, para $i > 0^\circ$, o raio de luz se refrata, afastando-se da normal (fig. 9B). Aumentando gradativamente o ângulo de incidência, a luz refratada se afasta cada vez mais da normal até que, para $i = L$, temos uma emergência rasante (fig. 9C). Para todos os valores de i acima de L , ocorre reflexão total (fig. 9D).

S5

No *Suplemento*, há uma demonstração experimental que pode introduzir os conceitos relacionados à reflexão total.

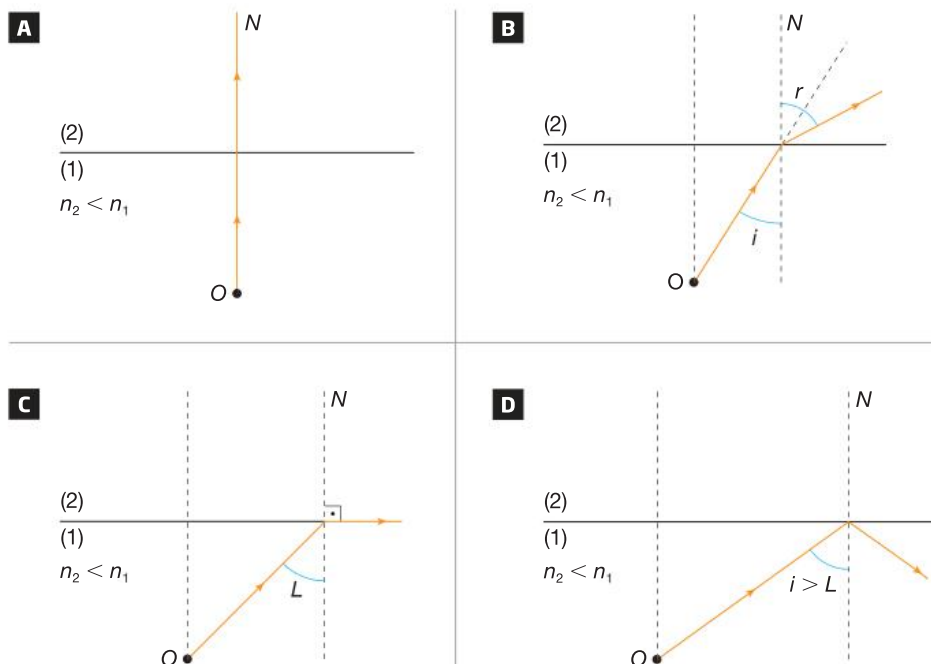


Figura 9 • Ao passar de um meio mais refringente para outro menos refringente, acima de um determinado ângulo L , a luz sofre reflexão total.

Podemos calcular o valor do ângulo limite L com base na lei de Snell-Descartes, aplicada na situação da figura 9C, com $i = L$ e $r = 90^\circ$.

Temos, então: $n_1 \cdot \sin L = n_2 \cdot \sin 90^\circ$

Como $\sin 90^\circ = 1$, temos: $\sin L = \frac{n_2}{n_1}$, sendo $n_2 < n_1$. Logo, podemos escrever:

$$\sin L = \frac{n_{\text{menor}}}{n_{\text{maior}}}$$

Também podemos, por exemplo, calcular o valor do ângulo limite L para um raio que se propaga da água para o ar. Assim, supondo $n_{\text{água}} = 1,33$ e $n_{\text{ar}} = 1$, temos:

$$\sin L = \frac{n_{\text{menor}}}{n_{\text{maior}}} \Rightarrow \sin L = \frac{n_{\text{ar}}}{n_{\text{água}}} \Rightarrow \sin L = \frac{1}{1,33} \approx 0,75$$

Em uma tabela de funções trigonométricas, encontramos: $L \approx 48^\circ$

Toda a luz proveniente da água que incidir em um ângulo maior que 48° na superfície de separação não conseguirá emergir para o ar e será integralmente refletida.

Portanto, pelo princípio da reversibilidade da luz, um observador totalmente dentro da água e em repouso vê a região externa – no ar – através de um cone de luz com vértice em seus olhos. O ângulo de abertura desse cone é igual ao dobro do ângulo limite. Nosso campo de visão geralmente é de 180° , indo de um horizonte a outro, mas, para o observador na água, o campo visual estará restrito a 96° (fig. 10).

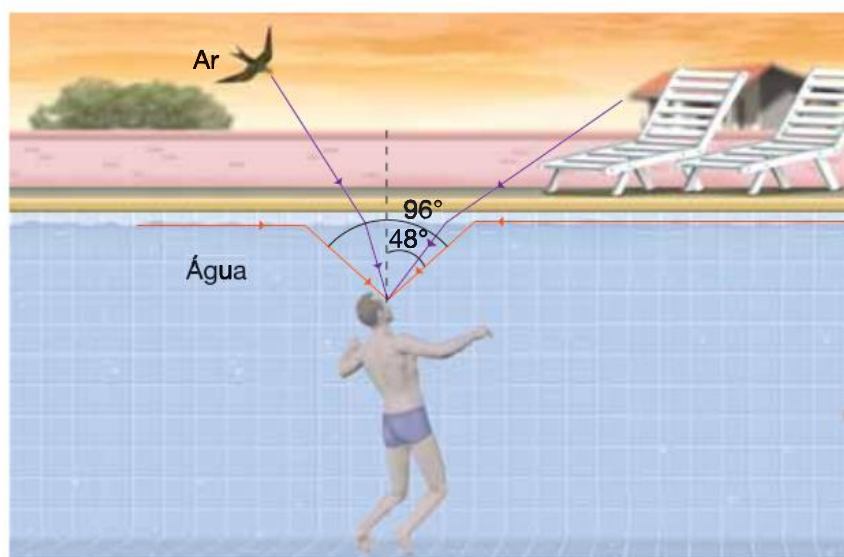
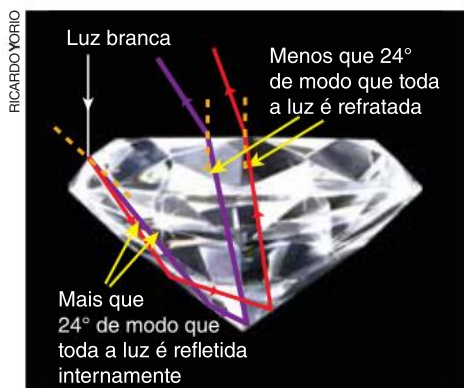


Figura 10 • Uma pessoa totalmente imersa na água percebe o exterior em um campo de visão de 96° de abertura.

7 A reflexão total explica alguns fenômenos curiosos

Por que o diamante brilha tanto?

Um anel de diamante é considerado valioso quando a pedra é pura e brilha muito. Interpretamos o brilho do diamante como a luz aprisionada em seu interior, o que faz com que a pedra pareça uma lâmpada pequenina. Mas a que se deve essa capacidade de manter a luz presa? Por que um anel de vidro, também transparente, não provoca o mesmo efeito? Se calcularmos o ângulo limite para o vidro comum, obteremos valores próximos de 42° . Para o diamante, esse valor cai para 24° . Grande parte da luz que entra no diamante, ao tentar voltar para o ar, através de ângulos de incidência maiores que 24° , sofre reflexões sucessivas nas faces da pedra, provocando o efeito brilhante. Ainda que no vidro isso também ocorra, o fato de o ângulo limite ser maior explica por que a maior parte da luz no interior do vidro consegue retornar para o ar sem dificuldade.



S6

No Suplemento, há orientações para trabalhar este "Explore".

EXPLORE EM QUÍMICA

Um diamante pode ser produzido industrialmente? Como e para quê?

Figura 11 • O diamante é um composto de carbono naturalmente cristalizado a alta pressão. Pode ser lapidado, como na figura, com o objetivo de refletir e espalhar a luz. O diamante é o mineral mais duro da natureza.

Por que o asfalto parece molhado em dias de calor?

Quando avistamos um veículo ao longe em uma estrada, num dia de sol, muitas vezes temos a impressão de que ele está se movendo sobre a pista molhada. Um viajante no deserto pode enxergar um lago à frente, no meio da areia quente. Os fenômenos descritos são conhecidos como **miragens** e podem ser explicados por meio da refração. Pense no caminho percorrido pela luz emitida, por exemplo, por uma nuvem no céu, até atingir o asfalto quente. A luz percorre camadas de ar cada vez mais aquecidas, por isso menos densas e com índices de refração cada vez menores. Assim, a luz emitida pela nuvem sofre sucessivas refrações, afastando-se cada vez mais da normal, até que o ângulo de incidência supere o ângulo limite, ocorrendo então a reflexão total da luz.

Após a reflexão total, a luz passa a se propagar para as camadas superiores do ar, aproximando-se da normal. No entanto, o cérebro interpreta esse fato como se a luz estivesse percorrendo um caminho retilíneo; daí, o que vemos, na verdade, é a imagem da paisagem, que pode ser, por exemplo, uma palmeira invertida, como se estivesse refletida. Como o ar não está completamente parado, a imagem parece trêmula, simulando a aparência de água (fig. 12).

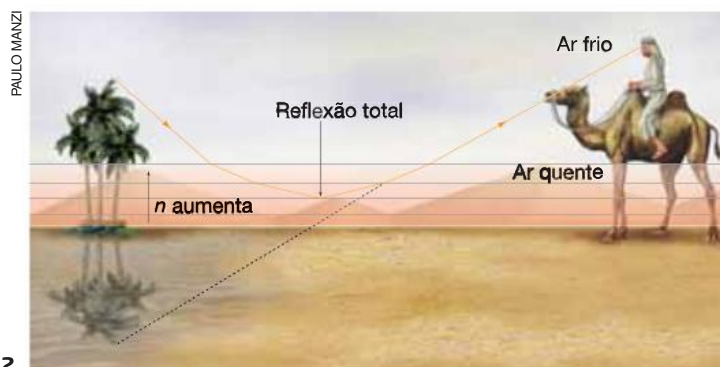


Figura 12



Figura 13 • (A) Em dias quentes, uma rodovia parece molhada. (B) Nas areias do Parque Nacional de Amboseli, Quênia, África, parece haver um lago. Esses fenômenos, conhecidos como miragens, estão relacionados à refração da luz.

Já sabe responder?

Por que as estrelas parecem piscar no céu?

BABAK TAFFRESH/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK



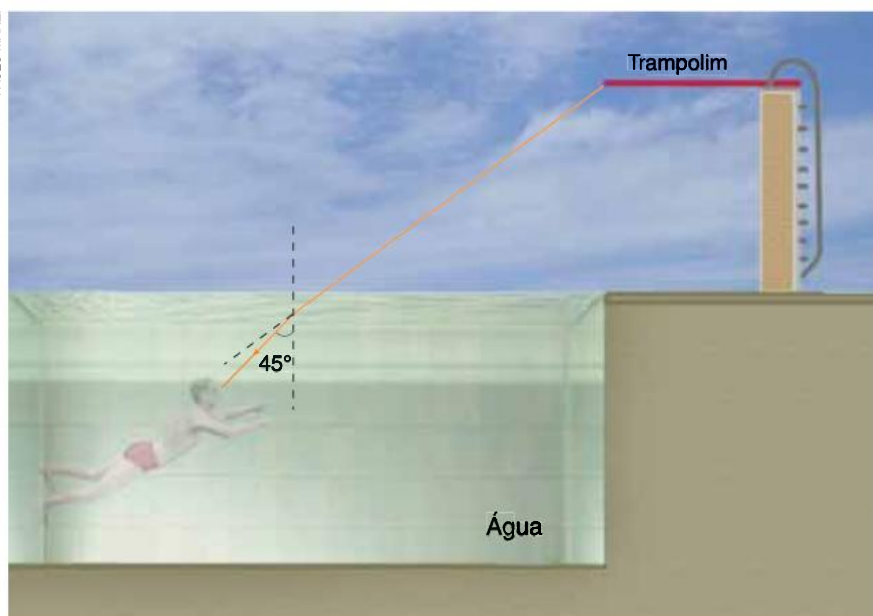
QUESTÕES RESOLVIDAS

R3 Um observador totalmente imerso na água de uma piscina olha em direção a um trampolim situado na borda a um ângulo de 45° . Ele consegue enxergar o trampolim ou vê apenas a superfície da água refletindo o fundo da piscina? Considere o ângulo limite da água igual a 48° .

► Resolução

Pelo princípio de reversibilidade dos raios luminosos, é possível inverter o sentido do percurso dos raios de luz, pois, se o ângulo limite é 48° , para atingir os olhos do observador com ângulo de 45° , a luz emitida pelo trampolim deve incidir na superfície de separação num ângulo, com a normal, menor que 90° . Assim, não haverá reflexão total, e o observador verá o trampolim.

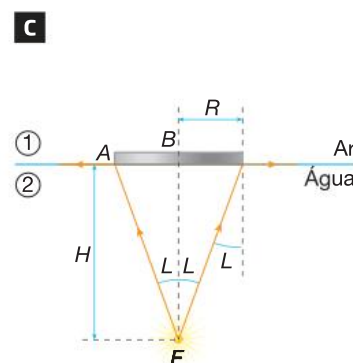
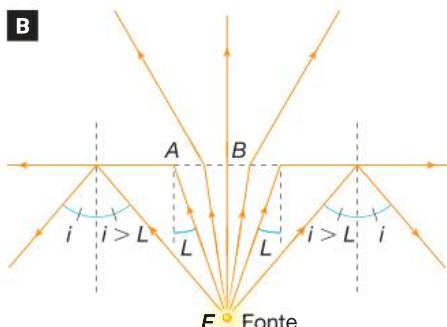
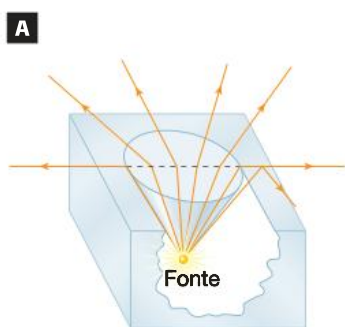
PAULO MANZI



- **R4** Uma pequena lâmpada está a 1 m abaixo da superfície livre da água contida num tanque exposto ao ar. O índice de refração da água para a luz emitida pela lâmpada é $\sqrt{2}$. Qual é o diâmetro mínimo de um disco opaco, colocado junto à superfície da água, capaz de impossibilitar a visão da fonte de luz?

► **Resolução**

Para interceptar a luz proveniente da fonte, o diâmetro do disco tem de compreender a região que contém os raios de luz que emergem sofrendo refração, aqueles que incidem na superfície de separação com um ângulo inferior ao ângulo limite (fig. A). Nas bordas da base do cone cujo vértice é o ponto onde está a lâmpada, devem incidir os raios cujo ângulo de incidência é L (fig. B). Além das bordas, o ângulo de incidência será maior que L , e nenhum raio emergirá para o ar, pois eles sofrerão reflexão total.



Para calcular o diâmetro do disco ($D = 2R$), vamos considerar, na figura C, o triângulo ABF .

Nesse triângulo, temos: $\operatorname{tg} L = \frac{R}{H}$. Sabemos que: $\operatorname{sen} L = \frac{n_{\text{menor}}}{n_{\text{maior}}}$

Neste problema, $n_{\text{menor}} = n_{\text{ar}} = 1$ e $n_{\text{maior}} = n_{\text{água}} = \sqrt{2}$. Então:

$$\operatorname{sen} L = \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow \operatorname{sen} L = \frac{\sqrt{2}}{2}. \text{ Logo, } L = 45^\circ, \text{ assim: } \operatorname{tg} 45^\circ = 1$$

$$\text{Substituindo esse valor, temos: } 1 = \frac{R}{H} \Rightarrow R = H$$

Como $H = 1$ m, temos $R = H = 1$ m, e o diâmetro do disco será: $D = 2R = 2$ m

- R5** Um raio de luz monocromática passa de um meio 1 para um meio 2, ambos homogêneos e transparentes, sendo a superfície de separação plana. O ângulo de incidência é 30° , e o raio emerge do meio 2 formando um ângulo de 60° com a normal.

- Como se comporta o mesmo raio de luz proveniente do meio 1 ao incidir com um ângulo de 60° na superfície de separação com o meio 2?
- Descreva o comportamento do mesmo raio de luz ao se propagar do meio 2 para o meio 1 incidindo na superfície de separação com um ângulo de 30° .

► **Resolução**

- A situação descrita permite supor que a luz no meio 2 se propaga com maior velocidade que no meio 1, uma vez que o raio de luz, ao refratar, passa do meio 1 para o 2 afastando-se da normal. Assim, conclui-se que $n_2 < n_1$. Pela lei de Snell, podemos calcular o índice de refração do meio 2 em relação ao meio 1, que resulta em:

$$n_1 \cdot \operatorname{sen} 30^\circ = n_2 \cdot \operatorname{sen} 60^\circ \Rightarrow$$

$$n_1 \cdot \frac{1}{2} = n_2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \Rightarrow \frac{n_2}{n_1} \approx 0,58$$

Sabemos, porém, que o ângulo limite L pode ser

$$\text{calculado por: } \operatorname{sen} L = \frac{n_{\text{menor}}}{n_{\text{maior}}}$$

Como $n_{\text{menor}} = n_2$ e $n_{\text{maior}} = n_1$, temos:

$$\operatorname{sen} L = \frac{n_2}{n_1} = 0,58. \text{ Em uma tabela trigonométrica encontramos: } L \approx 35^\circ$$

Assim, ao incidir formando um ângulo $i > L$ ($60^\circ > 35^\circ$), o raio de luz sofrerá reflexão total, com o ângulo de reflexão também igual a 60° .

- O raio de luz passará de um meio onde a luz se propaga com maior velocidade para um meio de menor velocidade. Desse modo, não haverá reflexão total. O raio de luz sofrerá refração e terá sua direção alterada, aproximando-se da normal.

QUESTÕES PROPOSTAS

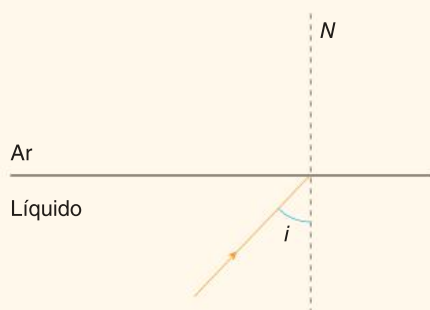
Lembre-se: resolva as questões no caderno.

4 Analise a tabela e responda aos itens a seguir.

Substância	Índice de refração em relação ao ar
Água	1,33
Álcool etílico	1,36
Glicerina	1,47
Quartzo cristalino	1,54
Vidro comum	1,50

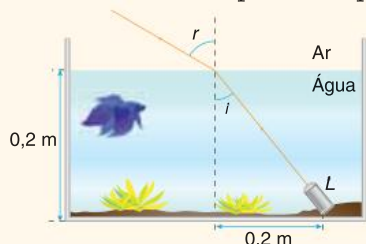
Fonte: LIDE, D. R. (Ed.). *Handbook of Chemistry and Physics*. 87. ed. Boca Raton: CRC, 2006-2007.

- a) É possível observar reflexão total quando a luz incide do quartzo para o vidro comum? E quando incide da glicerina para o álcool? Explique.
- b) Para um mesmo ângulo de incidência diferente de zero, em qual dos meios ocorrerá o maior desvio na direção de um raio de luz que se propaga no ar? Justifique.
- c) Calcule o ângulo limite entre a água e o ar.
- 5 A figura a seguir representa um raio de luz azul emitido de uma lâmpada imersa em um líquido de índice de refração igual a 2.



Determine:

- a) o comportamento do raio azul ao incidir com um ângulo de 30° na superfície de separação entre o líquido e o ar. Justifique sua resposta e faça o esquema no seu caderno.
- b) o comportamento do raio azul ao incidir na superfície de separação entre o líquido e o ar por um ângulo de 45° . Justifique sua resposta.
- 6 A figura a seguir mostra uma pequena fonte de luz L , colocada no fundo de um aquário, e um raio luminoso que parte dela para o ar. Considere o índice de refração da água igual a $\frac{4}{3}$ e a velocidade da luz no ar igual a $3,0 \times 10^8$ m/s. Responda ao que se pede.



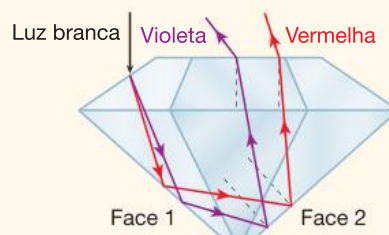
- a) Qual é o valor do ângulo de refração r ?
- b) Qual é a velocidade do raio de luz dentro da água?
- c) Acima de qual valor do ângulo de incidência i o peixe enxergará a imagem da lâmpada L refletida na superfície de separação?

- 7 Um feixe luminoso proveniente de uma nuvem atravessa uma região da atmosfera, sofrendo o desvio mostrado na figura:



Responda:

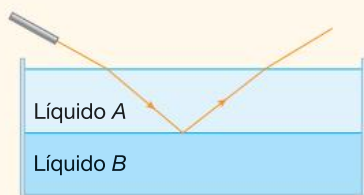
- a) O que ocorre com o índice de refração do ar no trecho AB? Justifique.
- b) Que fenômeno ocorre em B? Justifique.
- c) Um observador em C verá a nuvem acima, abaixo ou na mesma posição em que a nuvem está? Justifique.
- 8 No fundo de uma piscina há uma lanterna acesa. Deseja-se cobrir parcialmente a piscina com um material opaco, de tal forma que a luz emitida pela lanterna não saia da água. Para isso, coloca-se um disco de plástico na superfície da água, centrado bem em cima da lanterna. Sabendo que a profundidade da piscina é 3 m e que o índice de refração absoluto da água é $\frac{4}{3}$, calcule o raio mínimo do disco.
- 9 A figura mostra a trajetória de um feixe de luz branca que incide e penetra no interior de um diamante.



Sobre a situação, leia as afirmações a seguir:

- I. A luz branca, ao penetrar no diamante, sofre refração e se dispersa nas cores que a compõem.
- II. Nas faces 1 e 2, a luz incide num ângulo superior ao ângulo limite (ou crítico) e, por isso, sofre reflexão total.
- III. Se o índice de refração absoluto do diamante, para a luz vermelha, é 2,4 e o do ar é 1, o ângulo limite nesse par de meios será menor que 30° para a luz vermelha.
- Avalie qual(is) afirmativa(s) é(são) correta(s). Justifique.

- 10** Deseja-se realizar uma experiência de reflexão total na interface de dois líquidos imiscíveis, usando um feixe de luz monocromática que incide de cima para baixo, como ilustrado na figura a seguir.



Dispõe-se dos seguintes líquidos, conforme os dados da tabela abaixo.

Líquido	Índice de refração (n)	Densidade d (g/cm^3)
1	1,33	1,00
2	1,50	0,87
3	1,40	1,25
4	1,45	0,80

Qual dos líquidos apresentados na tabela representa o líquido A? E o líquido B? Explique.

- 11** Fibra óptica é uma estrutura cilíndrica feita de vidro, constituída basicamente de dois materiais diferentes, que compõem o núcleo e a casca, como indica a figura.



Sua propriedade de propagação dos feixes de luz baseia-se no mecanismo da reflexão interna total da luz que ocorre na interface núcleo-casca. Designando por $n_{\text{núcleo}}$ e n_{casca} os índices de refração do núcleo e da casca, respectivamente, analise as afirmações a seguir, que discutem as condições para que ocorra a reflexão interna total da luz.

Verifique se essas afirmativas são verdadeiras ou falsas e justifique sua escolha.

I. $n_{\text{núcleo}} > n_{\text{casca}}$

II. Existe um ângulo limite L , de incidência na interface núcleo-casca, tal que: $\sin L = \frac{n_{\text{casca}}}{n_{\text{núcleo}}}$

III. Raios de luz com ângulos de incidência $i > L$ sofrerão reflexão interna total, ficando presos dentro do núcleo da fibra.

Trilhando o caminho das competências

Reveja o comentário **S4** ao trabalhar com este conteúdo.

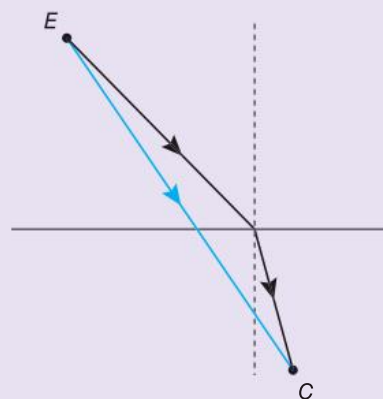
O salva-vidas e o menor tempo

Quando observamos um raio de luz passando do ar para o vidro, verificamos que o desvio sofrido na direção de propagação provoca um aumento na distância percorrida pela luz. Ou seja, a luz faz um percurso mais longo para se deslocar entre o ponto de emissão E e o ponto de chegada C do que se percorresse uma única linha reta.

O francês Pierre de Fermat provou, no século XVII, que a trajetória do raio sofrendo refração requer menor tempo para ser percorrida do que o trajeto em linha reta.

Essa constatação recebeu o nome de “princípio do menor tempo de Fermat”, que podemos explicar por meio de uma analogia: o salvamento de uma pessoa que está se afogando.

Um salva-vidas vê, da areia, em A , uma pessoa se afogando a certa distância, em M . Para salvá-la, ele deve correr e nadar, para percorrer a distância que o separa da pessoa no menor tempo possível. Qual é, nesse caso, o melhor percurso? Pensemos em três possibilidades.



Desvio na trajetória de um raio de luz.

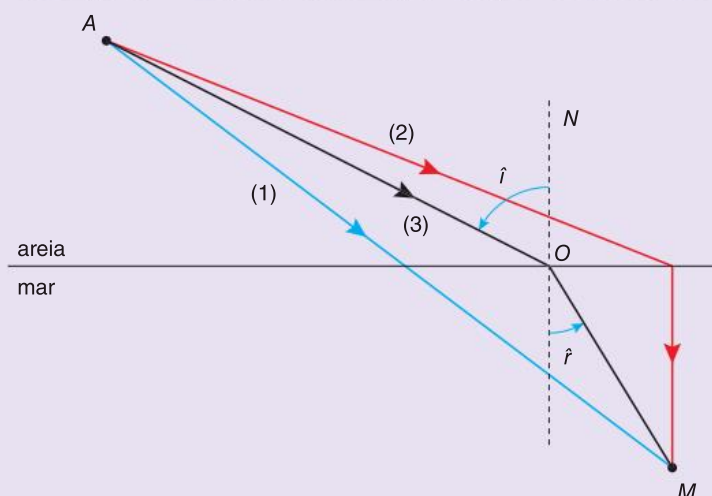


LEV KROPOTOV/SHUTTERSTOCK

- Ele vai em linha reta de A a M , em direção à pessoa, primeiro correndo pela areia e depois nadando (percurso 1).
- Ele corre pela areia até uma posição exatamente em frente à pessoa e depois nada até ela (percurso 2).
- Ele corre pela areia, muda a direção e nada até a pessoa (percurso 3) e, nesse caso, percorre a trajetória no menor tempo.

Responda às questões a seguir com base no exemplo do salva-vidas.

- 1 Quando a velocidade do movimento do salva-vidas é provavelmente maior: ao correr ou ao nadar?
- 2 Comparando o percurso do salva-vidas ao de um raio luminoso que passa de um meio para outro, como podemos relacionar as velocidades v_{correr} , v_{andar} aos ângulos \hat{i} e \hat{r} representados no gráfico? (Lembre-se da lei de Snell.)



Três possíveis percursos para o salva-vidas chegar até a pessoa.

NELSON MATSUDA

Reprodução proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

Sistemas refratores; dispersão da luz

ou: É possível ver um arco-íris
num dia sem chuva?

 S7

No Suplemento, há orientações para o trabalho com a questão introdutória.

Sim, é possível. Pode-se, por exemplo, utilizar uma mangueira de jardim em um dia de sol, desde que não seja ao meio-dia. Colocando o dedo na extremidade da mangueira, cria-se um fino jato de água, semelhante a um chuveiro. Posicionando-se de costas para o Sol, a pessoa perceberá que, ao passar pelo jato de água, a luz sofrerá dispersão, gerando cores, da mesma maneira que um arco-íris.

1 Introdução

O brilho intenso de cristais e diamantes e a aparente emissão de luzes coloridas por eles intrigam as pessoas há muito tempo. Uma antiga explicação sugeria que a luz emanada por esses sólidos era produzida em seu interior, sendo característica de alguns cristais. Assim se pensava até que, no final do século XVII, o físico inglês Isaac Newton (1642-1727) fez passar pela janela de seu gabinete um estreito feixe de luz do Sol na frente do qual posicionou um prisma de vidro. Para sua surpresa, observou que o feixe de luz emergente se dispersava em uma série de luzes coloridas que podiam ser projetadas sobre uma parede.

Ao repetir o experimento muitas vezes, Newton constatou que a luz branca incidente, ao sofrer refração no prisma, decompunha-se, preservando sempre a mesma ordem das cores: vermelho, alaranjado, amarelo, verde, azul, anil e violeta. Assim, identificou sete cores no espectro da luz branca, as mesmas do arco-íris (fig. 1). Pensou, então, que o caminho inverso deveria resultar em luz branca, ou seja, deveria haver uma recombinação das luzes coloridas quando elas passassem por outro prisma, em posição invertida, de tal maneira que “cancelasse” a dispersão ocorrida no primeiro (fig. 2). E foi o que ocorreu. A partir dessa descoberta, o feixe de luzes coloridas emanadas de cristais e diamantes passou a ser reconhecido como um fenômeno relacionado à refração e dispersão da luz.

Por que isso ocorre? O que causa a dispersão da luz branca?

O que torna o prisma um sistema refrator semelhante ao vidro de uma janela ou à água de uma piscina?



Figura 1 • Ilustração artística do experimento de Newton com o qual ele verificou a decomposição da luz branca nas cores de seu espectro.

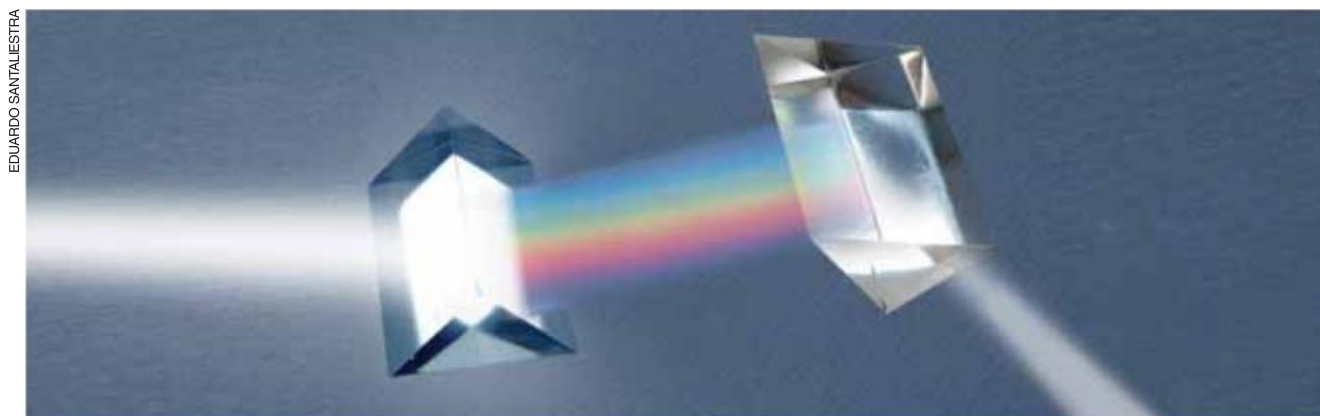


Figura 2 • O segundo prisma combina as cores de modo que a luz branca retorne.

2 Sistemas refratores



Confira no *Suplemento* uma maneira de demonstrar as imagens em dióptros planos.

Dióptro plano

A superfície de um lago ou de uma piscina separa dois meios de propagação – a água do ar. Em Óptica, o conjunto constituído por dois meios transparentes e homogêneos, separados por uma superfície plana, é chamado de **dióptro plano**.

Quando estamos em um dos meios que compõem o dióptro plano, nossa visualização dos objetos que estão do outro lado da superfície de separação é afetada pela refração da luz que emerge desses objetos. Por exemplo, se nosso meio é o ar e vemos um lápis mergulhado na água, a luz que dele emana aumentará sua velocidade ao atravessar a superfície de separação água-ar, mudando sua direção de propagação e afastando-se da normal. Teremos impressão de que uma parte do lápis está mais próxima da superfície e que ele está quebrado (fig. 3). Na verdade, o que vemos é a imagem virtual que o dióptro conjuga do objeto lápis. Note que o objeto e a imagem estão no mesmo meio, que é o da luz incidente na superfície de separação, ou seja, o meio de onde vem a luz (fig. 4).

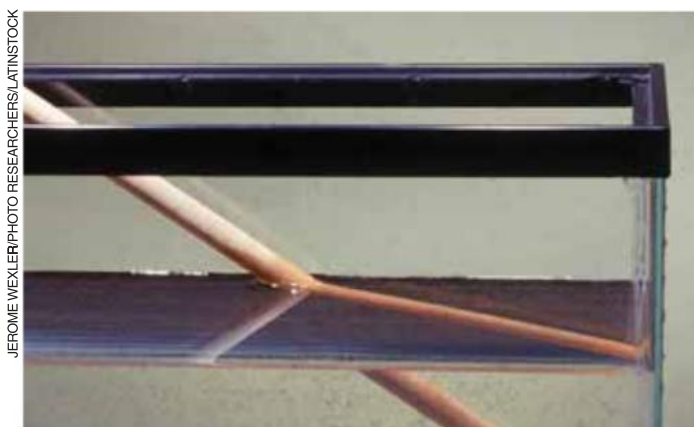


Figura 3 • Um observador no ar vê a imagem do lápis acima de sua posição real; por isso ele parece quebrado.

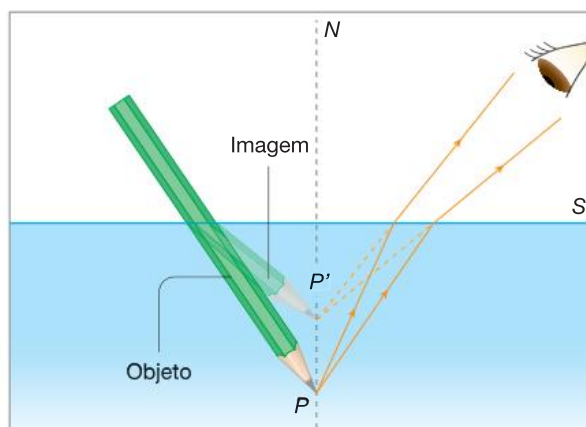


Figura 4 • Como os raios de luz vindos da água, ao refratarem, afastam-se da normal, a imagem virtual P' da ponta do lápis forma-se acima da posição do ponto-objeto P .

É possível estabelecer uma relação entre as distâncias do objeto e de sua imagem até a superfície de separação e os índices de refração dos meios envolvidos. Nas figuras 5 e 6 estão esquematizadas duas situações nas quais, dependendo do meio onde o observador está, pode ocorrer variação na posição da imagem de um objeto. Chamamos de n_{vai} o índice de refração do meio do qual a luz sai da superfície de separação, e de n_{vem} o índice de refração do meio no qual a luz incide na superfície de separação.

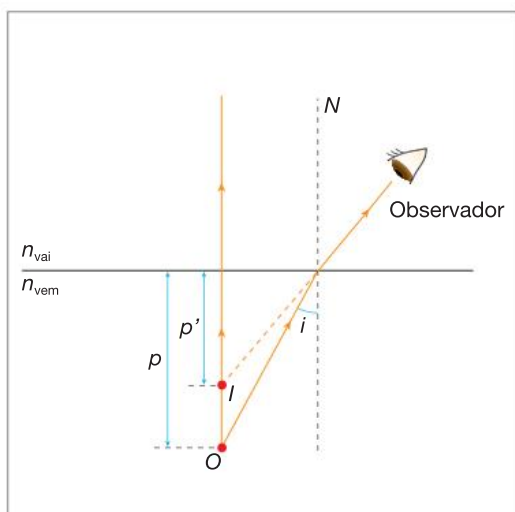


Figura 5 • O observador está no meio menos refringente. A imagem I do objeto O é virtual (na intersecção dos raios refratados) e está mais próxima da superfície de separação.

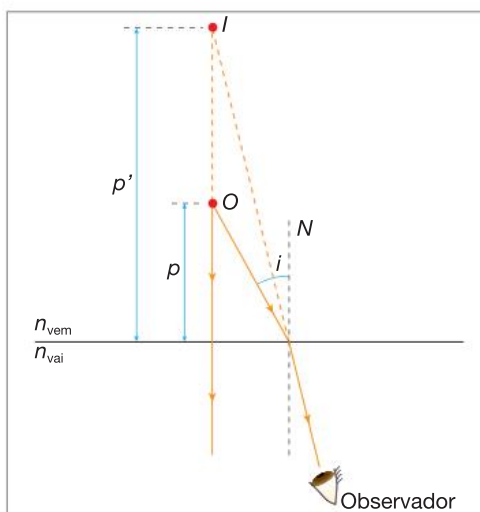


Figura 6 • O observador está no meio mais refringente. A imagem I do objeto O é virtual e está mais afastada da superfície de separação.

Em ambos os casos, verificamos que, quando os raios que determinam a imagem são pouco afastados da normal, tais que $\sin i \approx \tan i$, é possível estabelecer a seguinte relação:

$$\frac{n_{\text{vai}}}{n_{\text{vem}}} = \frac{p'}{p}$$

Nessa expressão, os índices de refração são sempre relativos à emissão da luz do objeto visando o observador.

A luz *vem* do objeto e *vai* para o observador.

Lâmina de faces paralelas

Um sólido, transparente à luz, que tem duas faces opostas em direções paralelas, pode ser considerado uma lâmina de faces paralelas. As superfícies planas de uma lâmina de faces paralelas separam meios externos a elas que podem ter ou não o mesmo índice de refração. Na figura 7, uma lâmina de vidro está imersa no ar. Nesse caso, os meios externos ao vidro são os mesmos e, por isso, um feixe de luz, ao atravessar a lâmina, emergirá dela em uma direção paralela àquela do feixe incidente, desviando-se apenas lateralmente de sua direção original.

Isso ocorre porque o feixe luminoso, ao atravessar uma lâmina de faces paralelas, sofre dupla refração. Vamos acompanhar, na figura 8, a trajetória de um raio de luz monocromática, proveniente do ar, que incide obliquamente com ângulo i_1 no ponto O da lâmina de vidro. Por causa da refração, ao passar para o vidro, o raio se aproximará da normal e fará com ela um ângulo r_1 . O raio refratado continuará sua trajetória pelo vidro, até incidir, com o ângulo i_2 , na superfície de separação vidro-ar. Ao ser refratado pela segunda vez, o raio de luz emergirá para o ar afastando-se da normal, fazendo com ela um ângulo r_2 , de mesma medida que i_1 , como podemos comprovar ao aplicar a lei de Snell à situação descrita.

1ª refração: ar \rightarrow vidro

Pela lei de Snell, temos:

$$n_{\text{ar}} \cdot \sin i_1 = n_{\text{vidro}} \cdot \sin r_1$$

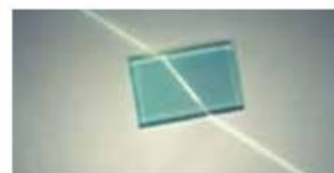
2ª refração: vidro \rightarrow ar

Pela lei de Snell, temos:

$$n_{\text{vidro}} \cdot \sin i_2 = n_{\text{ar}} \cdot \sin r_2$$

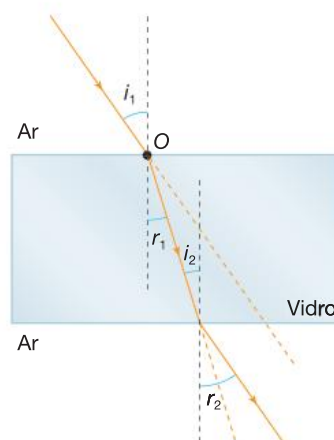
Mas os ângulos r_1 e i_2 são alternos internos; portanto, têm mesma medida. Assim:

$$n_{\text{ar}} \cdot \sin i_1 = n_{\text{ar}} \cdot \sin r_2 \Rightarrow \sin i_1 = \sin r_2 \Rightarrow i_1 = r_2$$



SCIENCEPHOTOS/ALAMY/
GLOW IMAGES

Figura 7 • O feixe de luz, ao atravessar a lâmina de vidro, sofre dupla refração. A primeira, quando passa do ar para o vidro, aproximando-se da normal, e a segunda, ao voltar para o ar, afastando-se da normal.



LUÍZ RÚBIO

Figura 8 • Esquema da trajetória de um raio de luz incidindo em uma lâmina de faces paralelas.

Para saber mais

Saber físico e tecnologia

O manto da invisibilidade de Harry Potter

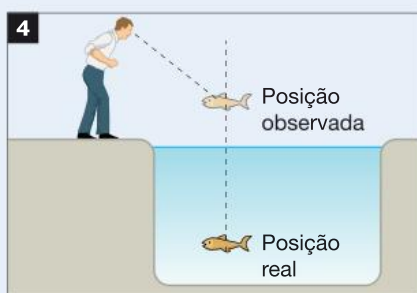
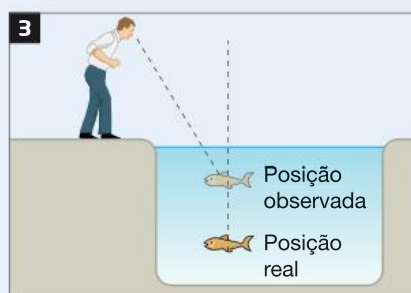
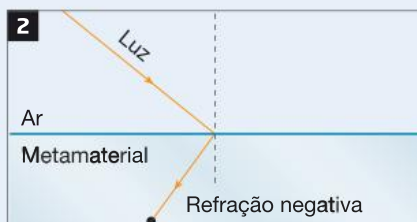
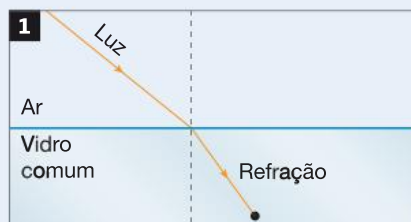
Em um artigo científico de 2006, o físico inglês John Pendry divulgou um estudo demonstrando o potencial de determinados materiais de gerar um "manto de invisibilidade", como o do bruxo Harry Potter. Ele calculou que esse tipo de material faria os raios de luz contornarem um objeto, voltando depois à trajetória original. Mais recentemente, um grupo de pesquisadores da Universidade da Califórnia, EUA, liderados pelo físico chinês Xiang Zhang obteve, pela primeira vez, um objeto capaz de dobrar a luminosidade para trás, ou, em outras palavras, os físicos projetaram um



No Suplemento, há mais informações sobre este assunto.

material capaz de desviar os raios de luz de uma forma inusitada denominada *refração negativa*. Essa propriedade não é verificada em nenhum material comum, e para criar algo assim foi preciso construir uma rede de liga metálica com estrutura ínfima, da ordem de nanômetros (10^{-9} m). O novo material é caro, trabalhoso, frágil e, até o momento, seria impraticável sua produção em grande escala. Além disso, até agora funciona só para a luz vermelha. Isso tudo, no entanto, não desanima os físicos do grupo de Zhang, que acreditam em rápidos avanços tecnológicos que tornariam possível a geração desse material.

O que é a refração da luz e o que significa ser negativa



- 1 A refração óptica é a que ocorre quando a luz muda de velocidade ao passar de um meio comum – o ar, por exemplo – para outro, como o vidro.
- 2 Na refração negativa, que só pode ser atingida com metamateriais – estruturas de construção especial –, a luz sofre um desvio que a faz recuar.
- 3 A água tem refração positiva. Por isso, quando vemos um peixe em um lago, temos a impressão de que ele está mais próximo da superfície.
- 4 Se a água fosse um metamaterial, teríamos a impressão de que o peixe estaria fora da água.

AMPLIANDO SUA LEITURA

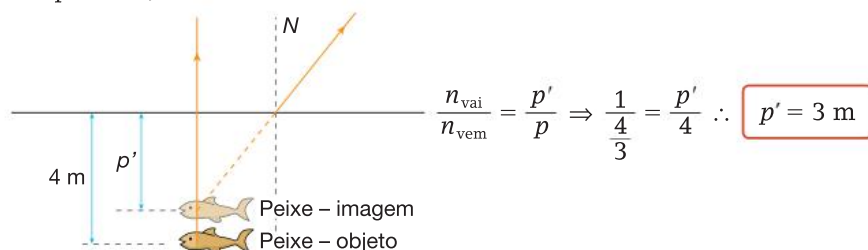
- 1 O que é refração negativa?
- 2 Quais características dos metamateriais permitem gerar refração negativa?

QUESTÕES RESOLVIDAS

R1 Um peixe está imerso em um lago, a uma profundidade de 4 m. Sabendo que o índice de refração da água do lago é $\frac{4}{3}$, determine a que distância da superfície um observador situado na beira do lago vê o peixe. Considere o observador no ar ($n_{\text{ar}} = 1$).

► Resolução

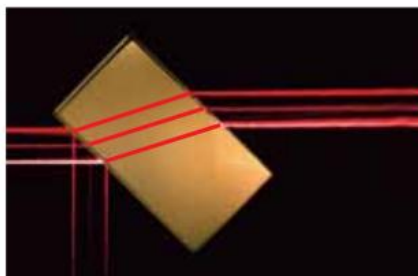
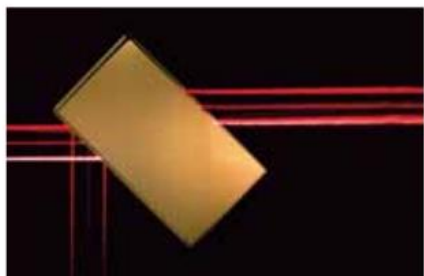
A figura representa a situação na qual a luz vem do peixe que está na água e, portanto, $n_{\text{vem}} = n_{\text{água}} = \frac{4}{3}$ e vai para o ar, $n_{\text{vai}} = n_{\text{ar}} = 1$. Como o peixe está em $p = 4$ m, temos:



O observador vê o peixe 1 m acima de sua posição real e a 3 m da superfície.

- **R2** O sistema óptico da foto abaixo é uma lâmina de faces paralelas coberta com um anteparo do mesmo formato da lâmina e que esconde a trajetória dos raios luminosos em seu interior.

Desenhe a trajetória dos raios no interior da lâmina.



FOTOS: DAVID PARKER/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

► Resolução

Para que os raios sofram dupla refração, emergindo conforme mostra a figura, é necessário que o meio do qual é feita a lâmina seja mais refringente do que aquele onde ela está imersa. Assim, teremos as trajetórias dos raios de luz esquematizadas ao lado.

- R3** Um helicóptero está 100 m acima do nível do mar, e seus ocupantes enxergam um submarino a uma profundidade aparente de 300 m, conforme a figura a seguir.

Determine:

- a distância vertical real do submarino ao helicóptero, admitindo que o índice de refração da água do mar seja igual a $\frac{3}{2}$. Considere $n_{\text{ar}} = 1$;
- a altura aparente do helicóptero, em relação à superfície da água, para uma pessoa que o observa de dentro do submarino.

► Resolução

- Pela figura, podemos perceber que os raios luminosos que chegam aos ocupantes do helicóptero provêm da água e passam para o ar. Assim, temos:

$$n_{\text{vai}} = n_{\text{ar}} = 1, n_{\text{vem}} = n_{\text{água}} = \frac{3}{2} \text{ e } p' = 300 \text{ m}$$

$$\text{Portanto: } \frac{n_{\text{vai}}}{n_{\text{vem}}} = \frac{p'}{p} \Rightarrow \frac{1}{\frac{3}{2}} = \frac{300}{p}$$

$$\therefore p = 450 \text{ m}$$

Logo, o submarino está à distância vertical de: $450 + 100 = 550 \text{ m}$ do helicóptero

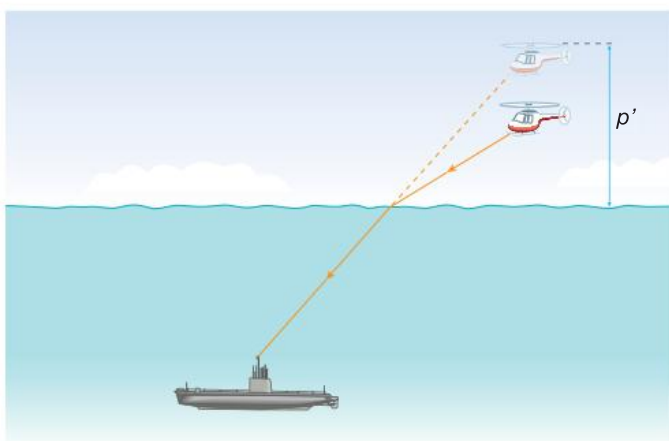
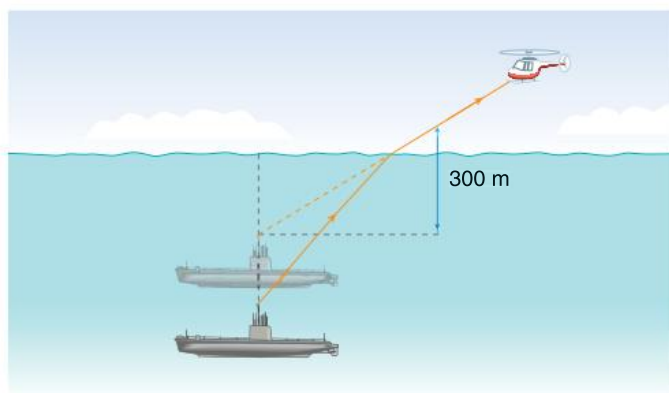
- A luz nesse caso, como mostra a figura abaixo, provém do helicóptero, ou seja, atravessa o ar e passa para a água, onde está o observador.

Assim, temos:

$$n_{\text{vem}} = n_{\text{ar}} = 1, n_{\text{vai}} = n_{\text{água}} = \frac{3}{2}; p = 100 \text{ m}$$

$$\text{Logo, } \frac{n_{\text{vai}}}{n_{\text{vem}}} = \frac{p'}{p} \Rightarrow \frac{\frac{3}{2}}{1} = \frac{p'}{100} \therefore p' = 150 \text{ m}$$

O observador no submarino verá o helicóptero 50 m acima de sua posição real.

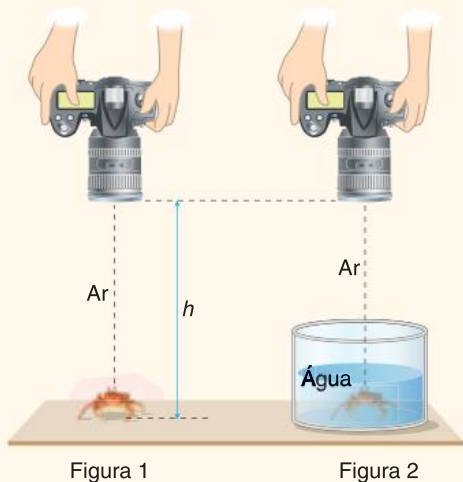


ILUSTRAÇÕES: LUIZ RÚBIO

QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

- 1 Suponha que a água representada na figura 2 seja cristalina e transparente o suficiente para que a imagem do caranguejo apareça com nitidez para o observador. Se quisermos examinar o caranguejo com mais detalhes, por meio de uma foto, temos de fotografá-lo na situação da figura 1 ou na da figura 2? Justifique sua escolha.



- 2 A figura a seguir mostra um lápis de comprimento AB , parcialmente imerso na água e sendo observado por um estudante. Sobre a situação descrita, verifique se cada uma das seguintes afirmações é verdadeira ou falsa, justificando sua opção.



- O estudante vê o lápis "quebrado" na interface ar-água, porque o índice de refração da água é maior que o do ar.
- O feixe luminoso proveniente do ponto B , ao passar da água para o ar, se afasta da normal, sofrendo desvio.
- O ponto B' , visto pelo observador, é uma imagem real.

- 3 Numa tarde de primavera, uma pessoa está de pé, na beira de um lago de águas tranquilas ($n_{\text{água}} = 1,4$). Verifique se, relativamente a essa situação, cada uma das seguintes afirmações é verdadeira ou falsa, justificando sua opção.



- Considerando $n_{\text{ar}} = 1$, se a pessoa percebe a imagem de um peixe através de raios luminosos que, no ar, formam 45° em relação à superfície da água, então, dentro da água, esses raios formam 30° com a normal.
 - A luz proveniente de um peixe dentro do lago sofre refração, fazendo com que a pessoa o veja em uma posição aparente mais abaixo da localização real.
 - Se o observador estiver em uma posição fora da região que contém os raios de luz que emergem sofrendo refração, ele não conseguirá visualizar o peixe, pois a luz emitida pelo peixe estará sofrendo reflexão total.
- 4 Vimos que, quando estamos no ar, próximos da beirada de uma piscina repleta de água, e olhamos para o fundo, nossa percepção de profundidade é afetada pela refração da luz. O piso da piscina, nessas circunstâncias, parece estar a uma distância da superfície que não é a real. Suponha que uma pessoa olhe para uma moeda, depositada no fundo da piscina, vista em uma profundidade de 3 m abaixo da sua superfície livre.
- Represente graficamente a situação descrita, localizando a moeda imersa na água, sua imagem e a posição do observador no ar.
 - Determine a profundidade real da piscina sabendo que o índice de refração absoluto da água vale $\frac{4}{3}$.

3 Dispersão da luz

Nesta unidade, vimos que a luz se propaga com uma velocidade menor que c em meios materiais como o vidro, o diamante e a água. Ao incidir em um prisma óptico de vidro, a luz branca sofre dupla refração: a primeira ao passar do ar para o vidro, abrindo-se em um leque colorido, e a segunda ao emergir para o ar novamente. A dispersão é acentuada devido à geometria do prisma (fig. 9).

Um prisma óptico consiste num meio transparente limitado por duas superfícies planas, não paralelas, denominadas faces. As faces do prisma interceptam-se estabelecendo um segmento de reta chamado de aresta. Uma secção reta do prisma, definida por um plano perpendicular à aresta, determina o espaço onde, daqui por diante, admitiremos que a luz incidirá. Além disso, vamos considerar que as faces do prisma são envolvidas pelo mesmo meio, geralmente o ar (fig. 10).

As radiações de diferentes cores que compõem a luz branca e que no vácuo se propagam com a mesma velocidade passam a ter, no vidro, velocidades diferentes; a radiação vermelha é a mais rápida, portanto a que sofre menor desvio, e a violeta, a mais lenta. Ainda que a diferença nos valores das velocidades seja somente de cerca de 1%, os ângulos de refração das cores do espectro são distintos, sobretudo quando se comparam os ângulos relativos às cores vermelha e violeta. A luz violeta é a que mais se aproxima da normal ao penetrar no prisma, e a vermelha é a que mais se afasta da normal ao voltar para o ar.



MATTHIAS KULKA/CORBIS/LATINSTOCK

Figura 9 • A radiação vermelha é menos desviada que a violeta; logo, é a que se propaga com maior velocidade.

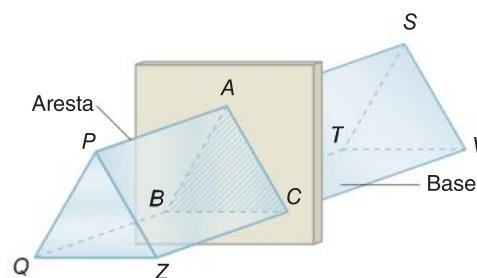


Figura 10 • Representação geométrica de um prisma óptico.

S10

No *Suplemento*, há explicações para a curvatura do arco-íris. Esse tema pode ser trabalhado com os alunos.

4 Arco-íris

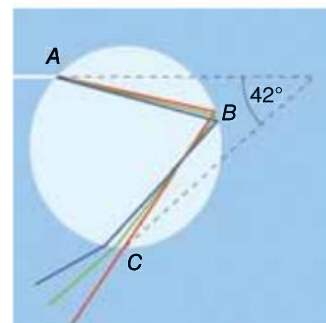
Os arcos-íris sempre chamam a atenção pela sua admirável beleza; além disso, esse fenômeno é uma das mais expressivas demonstrações da dispersão da luz. Para que um arco-íris surja no céu, é preciso algumas condições. É necessário que o Sol esteja brilhando e deve estar chovendo ou ter chovido pouco tempo antes de sua aparição; o Sol e as nuvens carregadas de chuva devem ocupar posições opostas no céu; e, finalmente, para vê-lo, temos de estar de costas para o Sol.



BOGDAN IONESCU/SHUTTERSTOCK

Figura 11 • Dispersão da luz em um arco-íris.

Os arcos-íris aparecem porque a luz no interior das gotas de água em suspensão na atmosfera, assim como no interior de um prisma, sofre dispersão. Um raio de luz solar, ao penetrar numa gota, sofre refração em *A* (fig. 12), que resulta em dispersão, de modo que os raios de luz violeta são mais desviados que os da cor vermelha. A luz refratada, já tendo sofrido uma primeira dispersão, incide na região de *B* e parte dela sofre reflexão total (ângulo limite da água $\approx 42^\circ$), sendo novamente refratada na região de *C*, de maneira que os raios vermelhos, amarelos, verdes etc. se propagam em direções diferentes. Cada gota de água produz um espectro de todas as cores. No entanto, apenas uma pequena parte do espectro atinge nossos olhos. Se os olhos receberem um raio de luz verde de uma gota de chuva particular, as outras cores não serão detectadas. Assim, uma faixa de milhares de gotas de chuva transmite para nossos olhos a luz verde, enquanto outra faixa de milhares de gotas de chuva transmite a luz vermelha, outra faixa, a luz azul, e assim por diante. Como as gotas que transmitem determinada cor estão sempre à mesma distância, vemos o formato de um arco.



ILUSTRAÇÕES: LUIZ RUBIO

Figura 12 • Representação da trajetória da luz solar ao sofrer dispersão em uma gotícula de água da chuva.

S11

No *Suplemento*, há material sobre demonstrações envolvendo cores.

Já sabe responder?

É possível ver um arco-íris num dia sem chuva?



POLY LISS/SHUTTERSTOCK

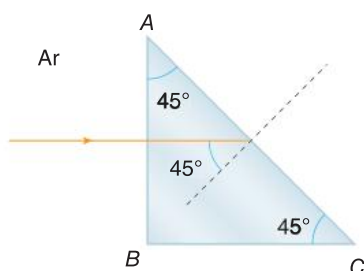
Tabela 1 – Valores de índices de refração de um bloco de vidro para diferentes luzes monocromáticas

Luz monocromática	Índice de refração (<i>n</i>) de um bloco de vidro
Violeta	1,532
Azul	1,528
Verde	1,519
Amarela	1,517
Alaranjada	1,514
Vermelha	1,513

Fonte: LIDE, D. R. (Ed.). *Handbook of Chemistry and Physics*. 87. ed. Boca Raton: CRC, 2006-2007.

QUESTÕES RESOLVIDAS

R4 Um prisma de material desconhecido tem o formato indicado na figura a seguir. Um raio incide perpendicularmente na face *AB*, atravessando o prisma em direção à face *AC*. Determine para quais valores do índice de refração do material que constitui o prisma o raio luminoso sofre reflexão total em *AC*. Considere $n_{\text{ar}} = 1$.



Resolução

Para que o raio de luz sofra reflexão total, ele deve incidir na face *AC* com ângulo maior do que o ângulo limite. Como ele incide com $i = 45^\circ$, o ângulo limite terá de ser $L < 45^\circ$ e, assim: $\sin L < \sin 45^\circ$

Logo, como $\sin L = \frac{n_{\text{menor}}}{n_{\text{maior}}}$ e, no caso, $n_{\text{menor}} = n_{\text{ar}} = 1$, vem: $\sin L = \frac{1}{n_{\text{prisma}}}$

Então, temos: $\frac{1}{n_{\text{prisma}}} < \sin 45^\circ$

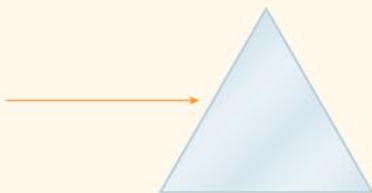
Como $\sin 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2} \Rightarrow n_{\text{prisma}} \cdot \sqrt{2} > 2 \Rightarrow$

$\Rightarrow n_{\text{prisma}} > \frac{2}{\sqrt{2}} \Rightarrow n_{\text{prisma}} > \sqrt{2}$

QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

- 5 Considere um feixe de luz branca que incide em uma das faces de um prisma, como representado na figura a seguir. Esse prisma está totalmente envolvido por ar ($n = 1$), como esquematizado na figura a seguir.



A tabela apresenta os valores de índices de refração desse prisma para três das luzes componentes do feixe incidente sobre o prisma.

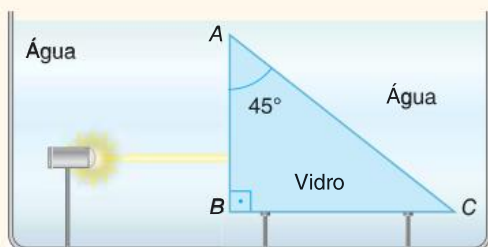
Luz monocromática	Índice de refração de um prisma de vidro
Violeta	1,532
Verde	1,519
Vermelha	1,513

Avalie cada uma das afirmações a seguir, classificando-as como verdadeiras ou falsas. Justifique suas escolhas.

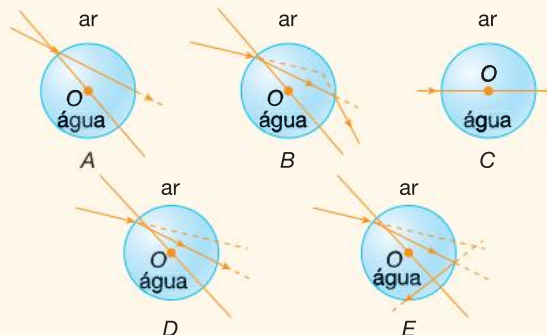
- Não há reflexão da luz na face em que ocorre a incidência do feixe.
- Ao entrar no prisma, o feixe de luz branca se dispersa e a luz violeta sofre maior desvio.
- Comparando as velocidades de cada uma das luzes no interior do prisma, a luz vermelha tem velocidade maior que a luz verde.

- 6 Um prisma de vidro imerso em água, com a face AB perpendicular à face BC , e a face AC com inclinação de 45° em relação a AB , é utilizado para desviar um feixe de luz monocromática. O feixe penetra perpendicularmente na face AB , incidindo na face AC com ângulo de incidência de 45° . O ângulo limite para a ocorrência de reflexão total na face AC é 60° .

Considerando que o índice de refração do vidro é maior que o da água, desenhe no caderno a trajetória do raio de luz que atravessa o prisma.



- 7 Com o intuito de explicar o fenômeno do arco-íris, um aluno desenhou as possibilidades de caminhos ópticos de um feixe de luz monocromática em uma gota de água, de forma esférica e de centro geométrico O , representados nas figuras A, B, C, D e E .



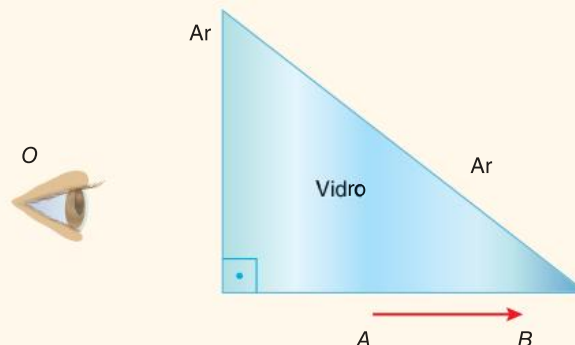
Admita que o índice de refração do ar (n_{ar}) seja menor que o índice de refração da água ($n_{\text{água}}$) e avalie cada uma das seguintes afirmativas, julgando-a verdadeira ou falsa.

- A velocidade da luz na água é menor que no ar.
- Os caminhos ópticos B e E são aceitáveis.
- O caminho óptico A não é aceitável e o C é aceitável.
- O caminho óptico D não é aceitável.

Identifique no caderno as figuras que apresentem a trajetória correta da luz.

- 8 Na figura, o prisma retangular isósceles é feito de vidro, cujo índice de refração é 1,5. Um objeto AB é colocado defronte à base do prisma. O observador O vê a imagem $A'B'$ do objeto.

Reproduza graficamente o esquema a seguir e represente as trajetórias de alguns dos raios de luz emitidos pelo objeto AB . Determine como é a imagem $A'B'$ vista pelo observador. (Adote: $n_{\text{ar}} = 1$)



Lentes esféricas: formação de imagens

ou: É possível obter fogo usando gelo?

 **S12**

No Suplemento, há orientações para o trabalho com a questão introdutória.

Pode-se fazer uma lente plano-convexa de gelo utilizando uma forma que se assemelhe a uma calota. Nesse caso, o gelo precisa ser transparente para funcionar como uma lente convergente. Exposta ao Sol, essa lente concentrará os raios de luz em seu foco, permitindo pôr fogo em papel, por exemplo.

1 Introdução

Todos conhecemos alguém que precisa usar óculos para enxergar melhor; talvez você mesmo use. Os primeiros óculos de que se tem notícia destinavam-se a pessoas que não conseguiam ver bem os objetos próximos dos olhos. Na Grécia antiga, filósofos usavam vidros côncavos para ler melhor. No século XVI, a luneta de Galileu ajudou a revolucionar nossa concepção de Universo. Uma lupa aumenta muitas vezes os objetos que vemos através dela (fig. 1). Óculos, lupas e lunetas são apenas alguns dos instrumentos criados com base no conhecimento das propriedades das **lentes esféricas**.



Figura 1 • Lupas são instrumentos ópticos constituídos por lentes esféricas.

2 Lentes esféricas

Uma lente esférica é um conjunto de três meios homogêneos e transparentes, separados por duas superfícies esféricas, ou por uma superfície esférica e outra plana, como mostra a figura 2.

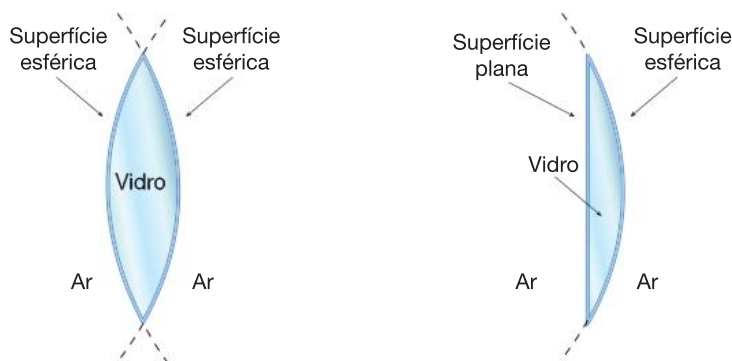


Figura 2 • Uma lente de vidro imersa no ar é o exemplo mais comum de lente esférica.

Na maioria das lentes, os meios internos são o vidro ou algum tipo de plástico. Mas uma gota de água rodeada de ar ou uma bolha de ar imersa na água também podem se comportar como lentes.

O comportamento óptico das lentes fundamenta-se nos princípios da refração. A luz, ao incidir na superfície de separação entre o meio externo à lente e o material que a constitui, sofre uma primeira refração. Ao retornar para o meio de origem, refrata novamente.

As lentes esféricas que têm as duas faces convexas são chamadas de **biconvexas**; se têm as duas faces côncavas, são denominadas **bicôncavas**. Além dessas, existem ainda as lentes plano-convexas, plano-côncavas, côncavo-convexas e convexo-côncavas (fig. 3).

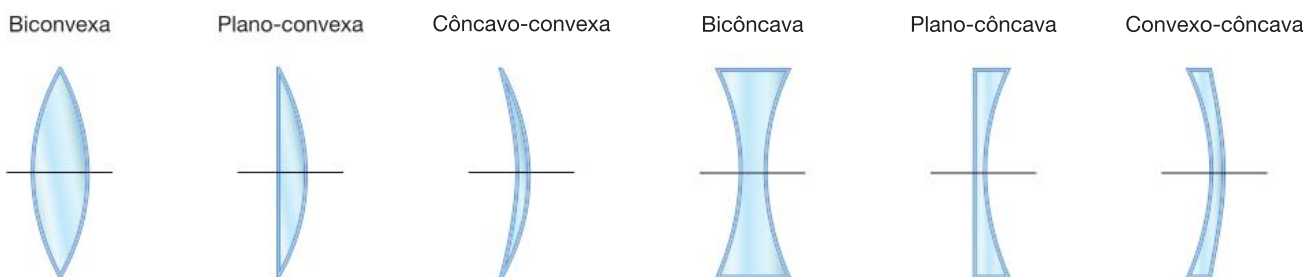
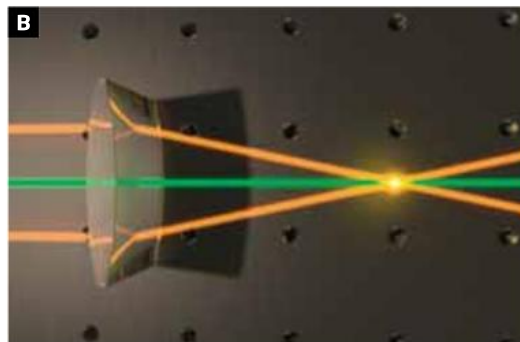
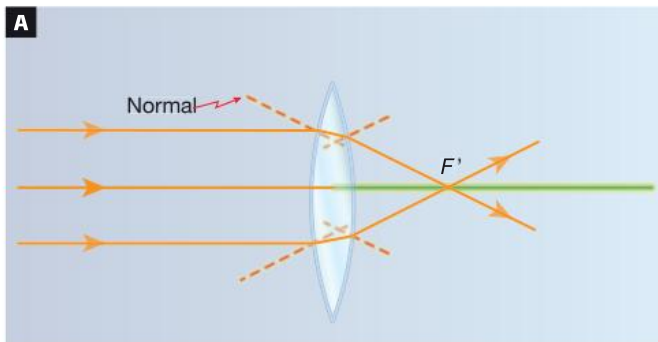


Figura 3 • A figura apresenta a classificação dos tipos de lente quanto à geometria de suas faces. As lentes de bordos finos têm as extremidades mais finas que a parte central, ao contrário das lentes de bordos grossos.

As figuras da próxima página representam o comportamento da luz nas lentes mais comuns, aquelas nas quais o índice de refração do material que as constitui (por exemplo, vidro, acrílico ou plástico) é maior que o índice de refração do meio externo (por exemplo, ar).

Um feixe formado por raios de luz paralelos, quando incide na direção do eixo de uma lente de acrílico biconvexa, se refrata aproximando-se da normal. Ao emergir da lente, volta a se refratar, afastando-se da normal na segunda face (fig. 4A).

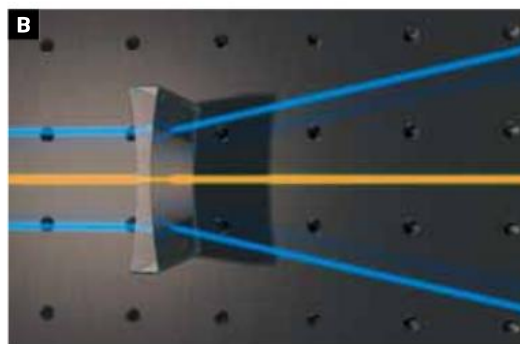
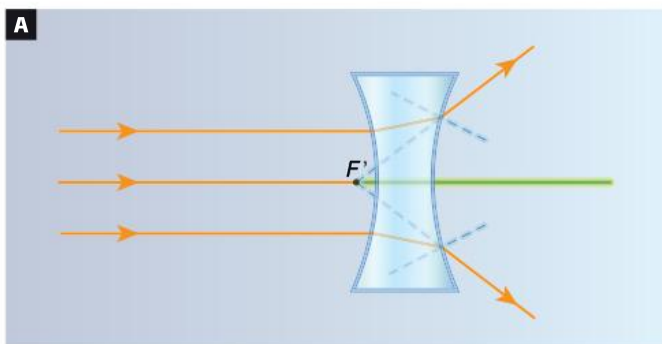
Observe que os raios que emergem da lente na figura 4B convergem para um mesmo ponto. Por essa razão, esse tipo de lente é chamado de convergente e o **foco imagem F'** é denominado ponto de convergência dos raios refratados (fig 4A).



DAVID PARKER/SCIENCE PHOTO
LIBRARY/LATINSTOCK

Figura 4 • Lente convergente: os raios de luz incidem na lente de acrílico imersa no ar e, após sofrerem dupla refração, convergem para um ponto.

De modo análogo, os raios de um feixe paralelo que incidem na lente bicôncava, representada na figura 5A, depois de sofrerem dupla refração, emergem da lente parecendo divergir de um mesmo ponto. Por isso, essa lente é denominada **divergente**. O ponto onde os prolongamentos dos raios de luz que emergem da lente se interceptam é chamado de **foco imagem F'** da lente divergente.



DAVID PARKER/SCIENCE PHOTO
LIBRARY/LATINSTOCK

Figura 5 • Lente divergente: o feixe de luz paralelo, ao incidir na lente de acrílico imersa no ar, sofre dupla refração. O feixe emergente parece divergir de um mesmo ponto.

A luz pode incidir na lente tanto por uma face como por outra. Isso significa que é possível determinar dois focos simétricos em relação à lente. Repare, na figura 4, que, na lente convergente, esses focos são reais porque são determinados pelo encontro efetivo dos raios que emergem da lente. Na lente divergente, porém, os focos são virtuais porque são determinados pelo encontro dos prolongamentos dos raios refratados (fig. 5).

Uma lente que habitualmente classificamos como convergente pode se tornar divergente e vice-versa. Para que isso ocorra, o meio no qual a lente está imersa precisa ter índice de refração maior que o do material que a constitui. As figuras 6 e 7 representam a trajetória da luz em cada um dos casos. Observe que a trajetória da luz é determinada pela aproximação ou pelo afastamento do raio refratado em relação à normal da superfície da lente.

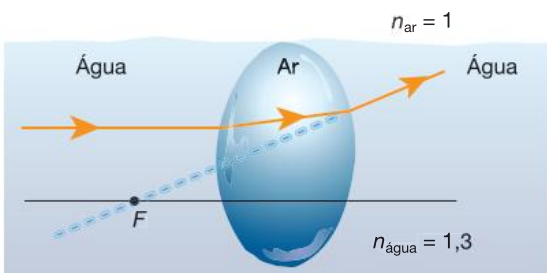


Figura 6 • A bolha de ar, apesar do formato biconvexo, comporta-se como lente divergente quando imersa em água.

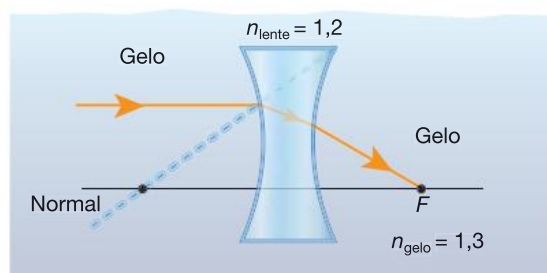


Figura 7 • Uma lente bicôncava ($n = 1,2$) é divergente quando imersa no ar. Mas, rodeada de gelo ($n = 1,3$), passa a ser convergente.

S13

No *Suplemento*, indicamos uma demonstração da variação da natureza de uma lente esférica a partir da mudança dos valores relativos dos índices de refração do meio e da lente.

ILUSTRAÇÕES: LUIZ RUBIO

3 Elementos das lentes esféricas

As lentes podem ser caracterizadas por seus elementos geométricos. Pela figura 8, vamos considerar:

- C_1 e C_2 : centros de curvatura das faces esféricas;
- R_1 e R_2 : raios de curvatura das faces esféricas;
- t : eixo principal da lente;
- V_1 e V_2 : pontos de intersecção entre as faces esféricas e o eixo principal;
- e : espessura da lente.

Se a lente tem espessura desprezível em comparação ao tamanho dos raios de suas faces, é chamada de **lente delgada**. Nesse caso, os vértices V_1 e V_2 ocupam aproximadamente o mesmo lugar no eixo principal, que passa a ser denominado **centro óptico** O da lente. A representação das lentes convergentes e divergentes obedece à convenção representada nos esquemas da figura 9, em que F e F' são as posições do foco objeto e do foco imagem da lente, equidistantes do centro óptico O . Chamamos de **distância focal** f a medida $FO = F'O$. Na distância equivalente a $2f$, localizamos os pontos A e A' , denominados **pontos antiprincipais**.

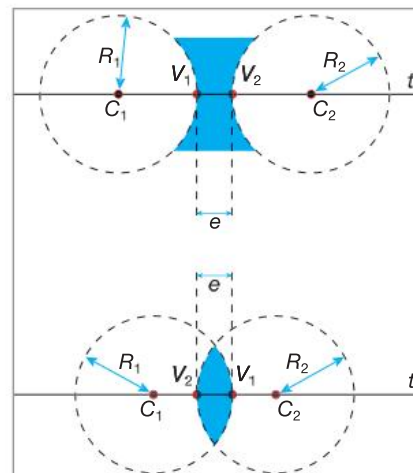


Figura 8 • Elementos geométricos de uma lente bicôncava e de uma lente biconvexa.

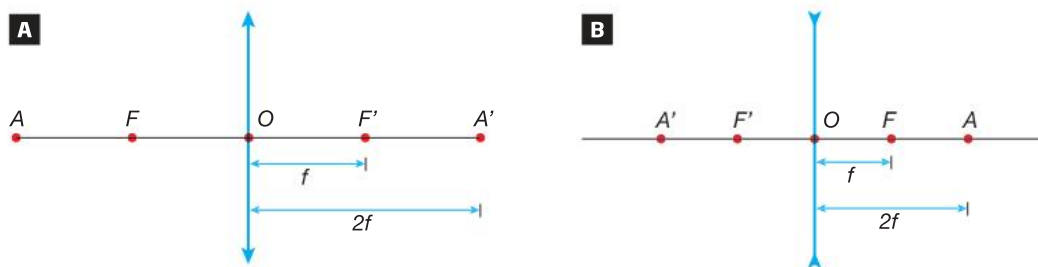


Figura 9 • Representação das lentes esféricas delgadas. (A) Lente delgada convergente. (B) Lente delgada divergente. Em ambas, F é o ponto denominado foco objeto e F' o foco imagem, enquanto A é conhecido como ponto antiprincipal objeto e A' , o ponto antiprincipal imagem.

4 Formação das imagens conjugadas por lentes esféricas

Para representar a imagem de um objeto conjugada por uma lente esférica, é suficiente acompanhar a trajetória de dois raios de luz entre todos os que partem do objeto e são refratados. Os **raios principais** caracterizam algumas propriedades do comportamento da luz ao atravessar as lentes e devem ser utilizados como suportes na construção de imagens dos objetos. São eles:

- Um raio de luz que incide paralelamente ao eixo principal refrata-se na direção do foco imagem F' (fig. 10).



Figura 10

- Um raio de luz que incide pelo foco objeto F refrata-se paralelamente ao eixo principal (fig. 11).

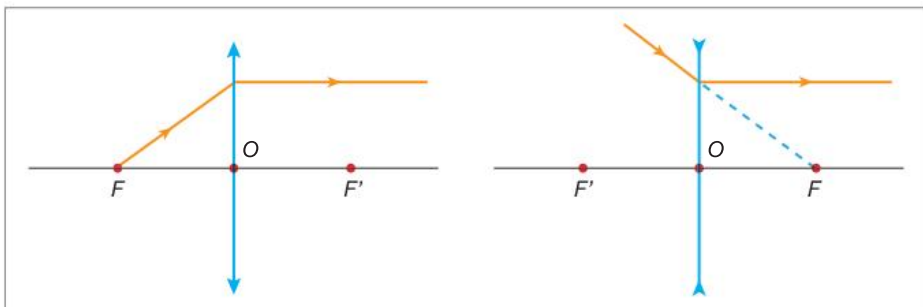


Figura 11

- Um raio de luz que incide pelo centro óptico O da lente refrata-se sem sofrer nenhum desvio (fig. 12).

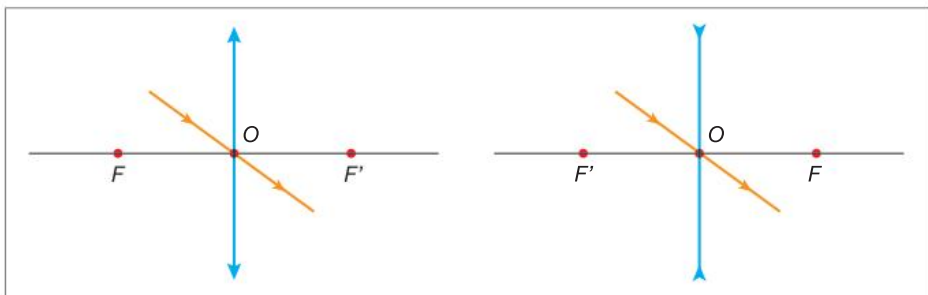


Figura 12

Para exemplificar, podemos construir a imagem de um objeto extenso AB , posicionado perpendicularmente ao eixo principal das lentes, como nas figuras 13, 14 e 15. Inicialmente, determinamos a imagem A' da extremidade A do objeto que não está sobre o eixo da lente. Para isso, escolhemos pelo menos dois dos infinitos raios emitidos a partir de A e representamos os raios refratados. O encontro desses raios determina a imagem A' da extremidade A . Para obter a imagem B' da extremidade B , traçamos uma reta perpendicular ao eixo da lente que passa por A' .

A partir da análise da intersecção dos raios refletidos, podemos classificar o tipo de imagem obtida.

- Se a intersecção dos raios refratados efetivamente ocorre, dizemos que a natureza da imagem é real.

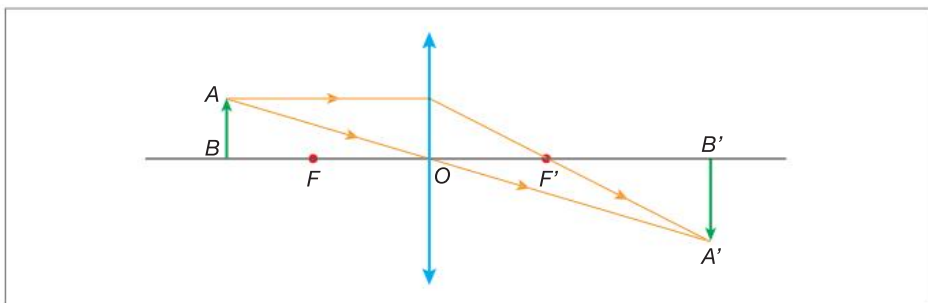


Figura 13 • Imagem real, ampliada e invertida.

- Se a intersecção dos raios refratados é obtida por meio do encontro entre os prolongamentos desses raios, dizemos que a natureza da imagem é **virtual**.

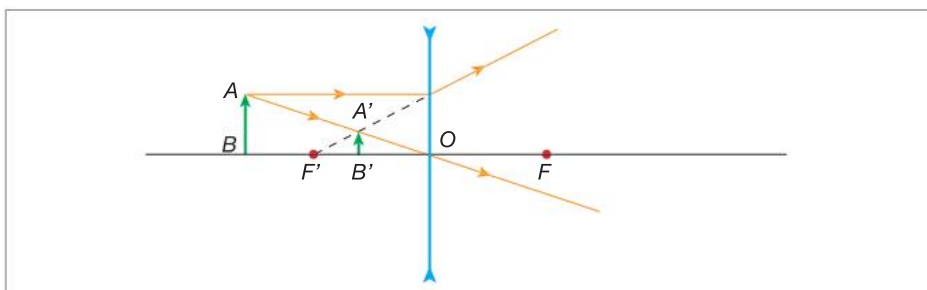


Figura 14 • Imagem virtual, reduzida e direita.

- Se os raios refratados não se interceptam, dizemos que a natureza da imagem é **imprópria**.

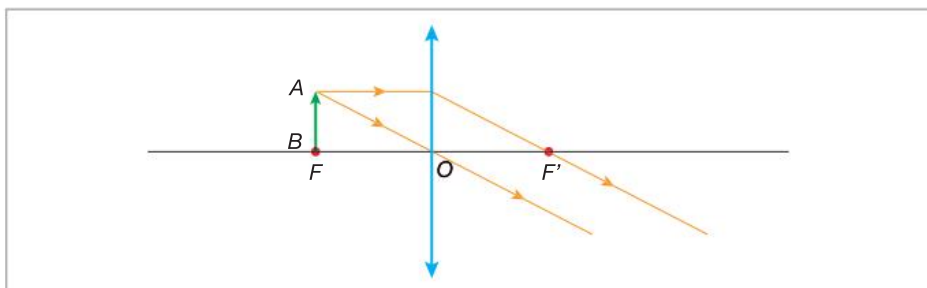


Figura 15 • Imagem imprópria.

Já sabe responder?

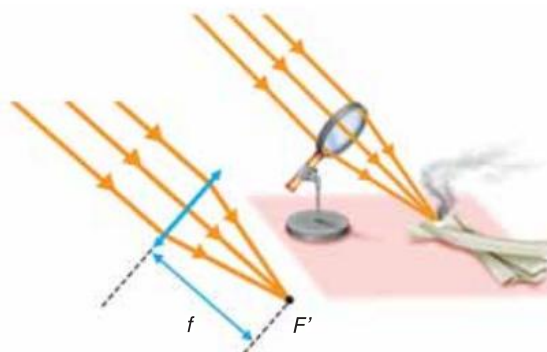
É possível obter fogo usando gelo?



EDUARDO SANTALUSTRÁ

QUESTÕES RESOLVIDAS

- R1** É possível utilizar uma lente convergente de distância focal igual a 25 cm para concentrar a luz do Sol e queimar uma folha de papel? Nesse caso, a que distância da lente deve estar a folha de papel para que isso ocorra?



ILUSTRAÇÕES: LUIZ RUBIO

► Resolução

Sim, os raios solares atingem a lente com um feixe de luz paralelo. Depois de atravessarem a lente, os raios convergem para o foco imagem F' . Assim, a folha de papel deve estar posicionada a 25 cm do centro óptico da lente, sobre o seu eixo principal.

R2 Na figura, estão representados um objeto BC e sua imagem $B'C'$ fornecida por uma lente esférica. A reta r representa o eixo principal da lente.

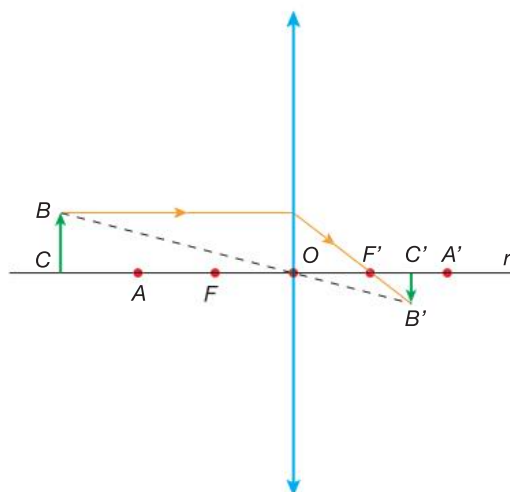


- Qual é a natureza da lente?
- Localize a lente e assinale seus elementos (focos, centro óptico, pontos antiprincipais).

► Resolução

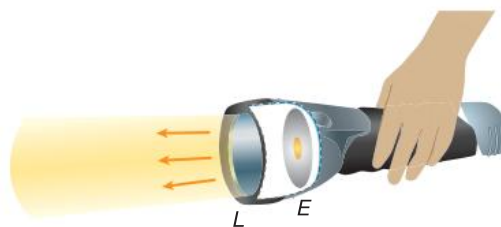
- A lente é convergente, pois apenas esse tipo de lente fornece imagens invertidas dos objetos.
- Para localizar a lente, devemos ligar a extremidade B do objeto à extremidade B' da imagem. Ao fazer isso, estamos empregando a propriedade que descreve que o raio de luz que passa pelo centro óptico não sofre desvio. Determinamos, assim, a posição do centro óptico da lente.

Para marcar o foco é só incidir um raio que, partindo de B , paralelamente a r , atravessa a lente e converge para o foco imagem F' . Seu simétrico, em relação à lente, será o foco objeto F . Para determinar os pontos antiprincipais A e A' , marcamos uma distância do centro óptico igual a duas vezes a distância focal.



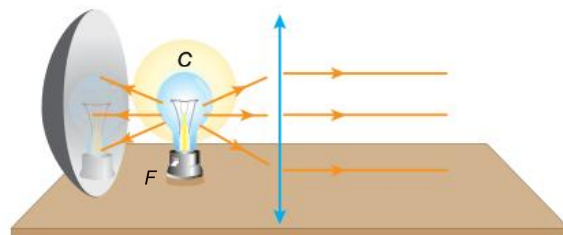
R3 Uma lanterna é construída com um espelho esférico E e uma lente convergente L (figura a seguir). A lâmpada, de filamento incandescente

muito pequeno, deve emitir um feixe paralelo. Para que isso ocorra, em que posição ela deve ser colocada em relação ao espelho e à lente?



► Resolução

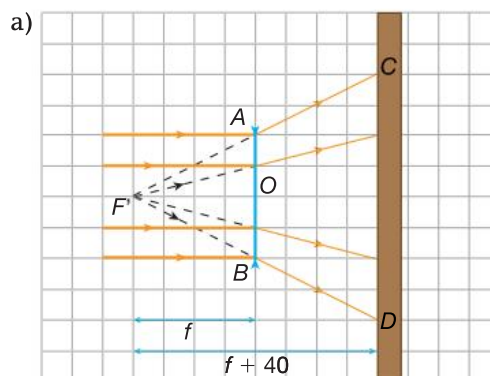
Sabemos que a lâmpada pode ser considerada, neste caso, uma fonte de luz pontual que emite luz em todas as direções. Para que a luz emitida por ela se torne um feixe paralelo, deve ocupar o foco objeto da lente. Em relação ao espelho, a lâmpada deverá estar em seu centro de curvatura, pois os raios que incidem pelo centro do espelho refletem sobre si mesmos. A função do espelho é fazer com que toda a luminosidade da lâmpada seja aproveitada e diminuir a abertura do feixe emitido pela lanterna (figura a seguir).



R4 Para medir a distância focal de uma lente divergente de 15 cm de diâmetro, uma pessoa posicionou-a de modo que a luz do Sol incidisse paralelamente ao seu eixo principal. Em seguida, um anteparo plano foi colocado paralelamente à lente, a 40 cm de distância. Com isso, formou-se, sobre o anteparo, um círculo iluminado de 30 cm de diâmetro.

- Represente a situação em um esquema, mostrando a lente, o anteparo e alguns raios de luz.
- Determine a distância do foco à lente.

► Resolução



- b) Na figura do item anterior, podemos reconhecer dois triângulos semelhantes de vértices ABF' e CDF' . Assim, os lados dos triângulos são proporcionais, e podemos estabelecer para a distância focal $OF' = f$ a seguinte relação:

$$\frac{f}{AB} = \frac{f+40}{CD} \Rightarrow \frac{f}{15} = \frac{f+40}{30} \Rightarrow 30f = 15(f+40) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 30f = 15f + 600 \therefore f = 40 \text{ cm}$$

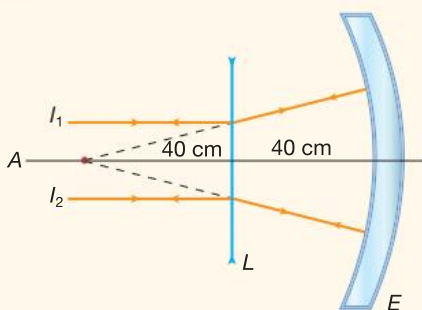
QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

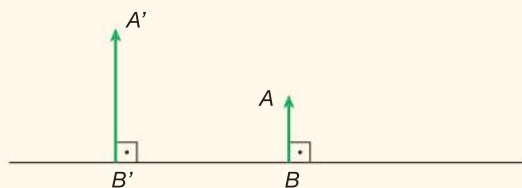
- 1 Um feixe de raios paralelos, representado por I_1 e I_2 , incide em uma lente bicôncava (L) para, em seguida, incidir em um espelho côncavo (E), conforme ilustra a figura.

Na reflexão, os raios retornam sobre si mesmos, convergindo para um ponto A , situado sobre o eixo principal comum.

Com base nessas informações, calcule as distâncias focais de L e E .

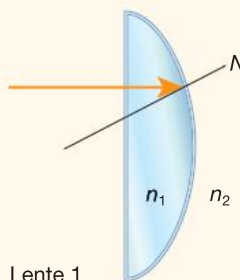


- 2 Reproduza a figura e determine graficamente o centro óptico e o foco imagem da lente que conjuga, do objeto AB , a imagem $A'B'$.



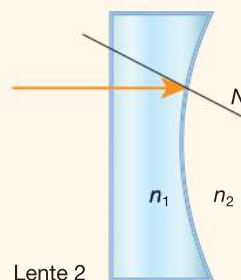
- 3 Vimos que, quando um raio de luz monocromática passa obliquamente pela superfície de separação de um meio para outro mais refringente, o raio aproxima-se da normal à superfície. Por essa razão, uma lente pode ser convergente ou divergente, dependendo do índice de refração do meio onde ela está. As figuras 1 e 2 representam lentes com índice de refração n_1 imersas em meios de índice de refração n_2 , sendo N a normal à superfície curva das lentes.

Figura 1



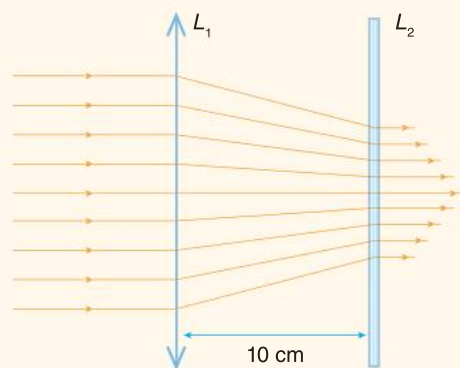
Lente 1

Figura 2



Lente 2

- a) Supondo $n_1 > n_2$, classifique as lentes 1 e 2. Qual delas é convergente? Qual é divergente? Explique.
- b) Supondo que as duas lentes se comportem como lentes divergentes, qual delas é feita de um material com índice de refração maior que o do meio onde elas estão imersas? Justifique.
- 4 Duas lentes delgadas L_1 e L_2 , de eixos principais coincidentes, estão separadas por uma distância de 10 cm. A lente L_1 é convergente e tem distância focal igual a 30 cm. O sistema formado pelas duas lentes é tal que raios paralelos ao eixo principal incidentes em L_1 continuam nessa mesma direção ao emergir de L_2 , como mostra a figura.



- a) Qual é a natureza de L_2 ? Justifique.
- b) Qual é sua distância focal?

ADILSON SECCO

ILUSTRAÇÕES: LUIZ RUBIO

Lentes esféricas: estudo analítico

ou: Uma lente de aumento pode reduzir o tamanho da imagem?

 S14

No Suplemento, há orientações para o trabalho com a questão introdutória.

1 Introdução

As imagens de objetos conjugadas por lentes esféricas delgadas podem ser caracterizadas por sua construção geométrica. Podemos identificar algumas propriedades relacionadas a essas imagens. São elas:

- Imagens reais têm orientação invertida; imagens virtuais são direitas.
- Lentes divergentes fornecem apenas imagens virtuais, direitas e menores que o objeto, seja qual for a posição relativa do objeto.
- Lentes convergentes conjugam imagens reais, virtuais ou impróprias, dependendo da posição relativa do objeto.
- Apenas imagens reais podem ser projetadas em anteparos, como telas e paredes, entre outros.

Figura 1 • A imagem fornecida por uma lente convergente, como uma lupa ou uma lente de aumento, é virtual, direita e maior do que o objeto. Observe que o objeto (verbetes em uma página de dicionário) e a imagem do trecho destacado estão no mesmo lado em relação à posição da lente.

GABOR NEMESKINO

... usada nos
Lunícola. [Do lat. luna + -i- + -cola.] Adj. 2 g. e s. 2
g. Selenita (1).
Luniforme. [Do lat. luna + -i- + -forme.] Adj. 2 g. Que
tem forma de meia-lua; luniforme.
Lunissolar. [Do lat. luna + -i- + -solar.] Adj. 2 g. Que
Lua e do Sol.
Lunula. [Do lat. luna + -i- + -ula.] Adj. 2 g. ou
dos planetas.
ma de meia-lua.
nar na boca.
4. Rel. B.
ao osteo.
Lunulado.
Lunular.
Que tem
Lupa¹. S. f. Ópt. Lente simples, ou
como instrumento óptico de
ampliação.
Lupa². S. f. Lupa.
Lupa³. S. f. Lupa.
Lupada. S. f. Lupa.
Cada um
ala interm.
Lupantar. [Do lat. lupare + -anda¹.] S. f. Marinh.
bebido em
panhia de ladrões.
(Camilo Castelo Branco, 75).
Lupanga. S. f. Espada pequena, usada pelos caíres.
Lupercalis. [Do lat. Lupercalia.] S. f. Al. Festas anuais

2 Equação dos pontos conjugados de Gauss

De maneira análoga aos espelhos esféricos, a natureza e as características das imagens fornecidas por lentes esféricas também podem ser obtidas pela interpretação dos resultados de duas equações. Para aplicar essas equações, vamos estabelecer um sistema de coordenadas cuja origem esteja no centro óptico da lente, e a luz incidente sempre se propague da esquerda para a direita. Esse referencial de coordenadas é denominado **referencial gaussiano** ou **referencial de Gauss** e pode ser representado como mostra a figura 2.

Vamos utilizar a seguinte notação para identificar as abscissas e as ordenadas nesse referencial:

- p = distância do objeto à lente (abscissa do objeto);
- p' = distância da imagem à lente (abscissa da imagem);
- f = distância focal da lente (abscissa do foco);
- o = tamanho do objeto (ordenada da extremidade do objeto);
- i = tamanho da imagem (ordenada da extremidade da imagem).

A partir do referencial de Gauss, se são dadas a distância focal f e a posição p do objeto, é possível determinar, analiticamente, a posição p' da imagem. Podemos demonstrar que a relação entre essas três grandezas é:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

Portanto, uma vez conhecidas duas abscissas, a terceira também ficará determinada. A equação acima é conhecida como **equação de Gauss** e é fundamental no estudo das lentes esféricas.

De acordo com o referencial de Gauss, vamos utilizar na equação:

- $f > 0$, para lentes convergentes;
- $f < 0$, para lentes divergentes;
- $p' > 0$, para imagens reais;
- $p' < 0$, para imagens virtuais.

3 Aumento ou ampliação

A altura da imagem conjugada por uma lente esférica poderá ser maior, menor ou igual à altura do objeto. A relação entre o tamanho i da imagem e o tamanho o do objeto é chamada de **aumento linear transversal A** , ou **ampliação**, e é dada por:

$$A = \frac{i}{o}$$

Note que:

- a grandeza A é adimensional, isto é, não tem unidade de medida;
- se $|A| > 1$, o tamanho da imagem é maior que o tamanho do objeto;
- se $|A| < 1$, o tamanho da imagem é menor que o tamanho do objeto;
- se $|A| = 1$, o tamanho do objeto e o da imagem são iguais.

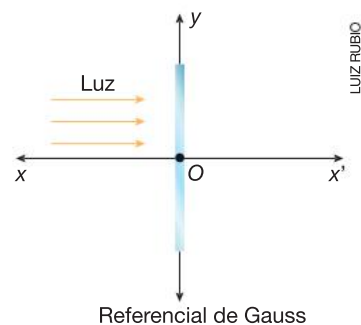


Figura 2 • No estudo das lentes, o eixo das abscissas, em relação à imagem e ao objeto, tem orientações distintas. No referencial de Gauss, para a luz incidindo da esquerda para a direita (objeto à esquerda de O), a imagem terá abscissa positiva se estiver do lado oposto ao do objeto, ou seja, do lado direito em relação à lente.

S15

No *Suplemento*, há uma sugestão de experimento para determinar a distância focal de uma lente.

Pelas construções geométricas anteriores, percebemos que o valor do aumento depende da posição em que o objeto e a imagem estão em relação à lente. Desse modo, podemos determinar uma equação que relaciona p e p' ao aumento A . Assim, é possível demonstrar que:

$$\frac{i}{o} = \frac{-p'}{p} = A$$

Observe que:

- se $A > 0$, i e o têm o mesmo sinal, o que representa uma imagem direita, ou seja, virtual.

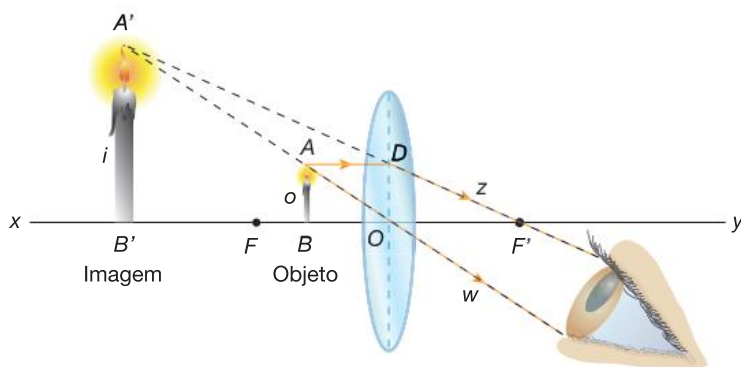


Figura 3 • A lente conjuga uma imagem virtual e direita do objeto. O aumento é positivo ($A > 0$).

- se $A < 0$, i e o têm sinais opostos, o que representa uma imagem invertida, ou seja, real.

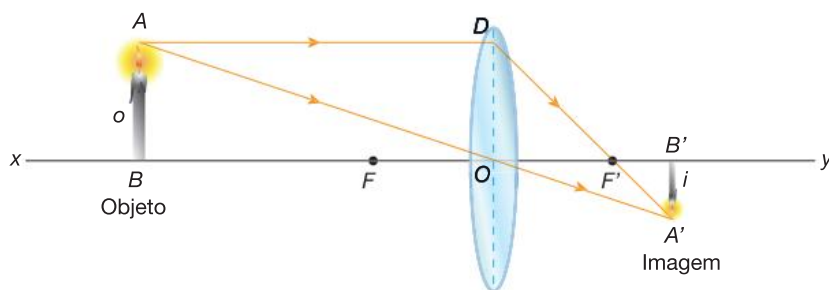
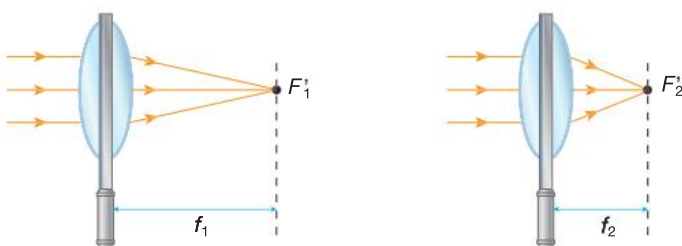


Figura 4 • A lente conjuga uma imagem real e invertida do objeto. O aumento é negativo ($A < 0$).

4 Vergência ou convergência (V)

Imagine que temos duas lentes e devemos determinar qual delas tem maior poder de convergência, ou seja, em qual delas o ponto de convergência está mais próximo do centro óptico. Pela figura 5, podemos notar que, quanto menor o valor da distância focal, mais próximo da lente estará o ponto de convergência. Constatamos que a mesma conclusão se aplica à lente divergente: quanto menor a distância focal, mais próximo da lente estará o ponto de divergência.



S16

Os avanços no diagnóstico médico por imagens aumentam as chances de detecção de inúmeras doenças. No *Suplemento*, há orientações para a abordagem do tema.

Figura 5 • A lente mais convergente é a que apresenta menor distância focal.

Definimos **vergência** como a grandeza que mede o maior ou menor poder de convergência ou de divergência de uma lente. Essa grandeza pode ser obtida pelo inverso da distância focal ou, algebricamente, pela expressão:

$$V = \frac{1}{f}$$

Para distâncias focais medidas em metros, a unidade de medida da vergência é o m^{-1} , denominada dioptria (di), unidade mais conhecida como “grau” da lente.

Considere uma lente convergente de distância focal igual a +25 cm, ou seja, +0,25 m. Sua vergência será dada por:

$$V = \frac{1}{f} \Rightarrow V = \frac{1}{0,25} \therefore V = +4 \text{ di}$$

Se a lente for divergente, de mesma distância focal, teremos $V = -4 \text{ di}$, pois a distância focal é negativa para esse tipo de lente.

5 Aberração cromática

A luz branca é composta de todas as cores. Em seu espectro, é possível reconhecer as cores do arco-íris, do vermelho até o violeta. Analisando a luz, por exemplo, das cores vermelha, verde e azul, verificamos que elas se propagam com velocidades diferentes nos meios materiais. A luz vermelha é a de maior velocidade, seguida pela luz verde. Entre as três, a luz azul é a de menor velocidade. Devido a essa diferença, ao atravessar uma lente esférica de vidro, cada cor sofrerá certo desvio, semelhante ao que ocorre em um prisma, pois o índice de refração do vidro para cada uma delas não é o mesmo. Observa-se que a luz vermelha converge em um ponto mais afastado do centro óptico da lente que a luz verde, cujo ponto de convergência ocupa uma posição intermediária entre a luz vermelha e a luz azul. Das três cores, a cor azul é aquela que convergirá em um ponto mais próximo da lente, assim, a lente apresentará focos distintos. Essas diferenças provocam o fenômeno da **aberração cromática**, que afeta a nitidez das imagens fornecidas por uma lente, gerando contornos com cores alteradas.

A figura 6 ilustra o fenômeno da aberração cromática em uma lente convergente esférica:

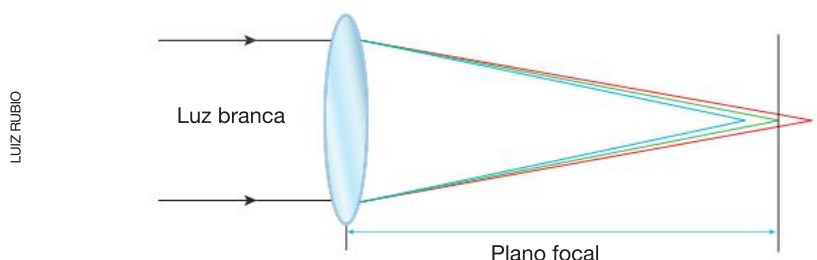


Figura 6 • O fenômeno da dispersão luminosa na lente provoca a decomposição da luz branca em suas cores. Cada uma emergirá para o ar com um ângulo de refração.

Com essa diferença de comportamento para cada cor, a imagem é quase sempre conjugada em planos diferentes e apresenta imperfeições (fig. 7).

Um modo de corrigir esse problema é utilizar um sistema que combina duas lentes, uma convergente e outra divergente, com vidros de diferentes índices de refração. Assim, o feixe luminoso que sofre dispersão na primeira lente pode ser recombinado pela segunda. A figura 8 a seguir mostra um par de lentes justapostas “coladas”, em que a curvatura de uma face da lente convergente coincide com a curvatura de uma das faces da lente divergente corretora. Essas lentes recebem o nome de acromáticas.



Figura 7 • A aberração cromática gera efeitos indesejáveis na imagem fornecida pela lente.

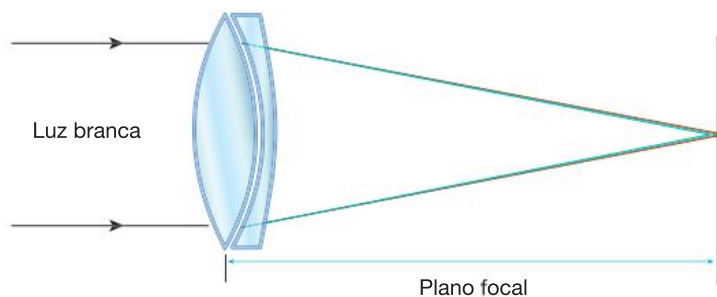


Figura 8 • As lentes justapostas podem ser usadas para corrigir o efeito da aberração cromática.

Com lentes acromáticas, é possível conseguir pelo menos duas cores focalizadas no mesmo plano; apenas o verde ficará ligeiramente deslocado, eliminando grande parte da incômoda aberração cromática e melhorando a qualidade da imagem.

É possível calcular a vergência V_{eq} da lente equivalente de uma associação de duas ou mais lentes justapostas que corresponde à soma algébrica das convergências das lentes que constituem a associação:

$$V_{eq} = \sum_{i=1}^n V_i = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

S17

No *Suplemento*, apresentamos a equação dos fabricantes de lentes, bem como um problema de aplicação dessa expressão.

Já sabe responder?

Uma lente de aumento pode reduzir o tamanho da imagem?



BRIAN BUCKLEY/ALAMY/GLOW IMAGES

QUESTÕES RESOLVIDAS

R1 Num anteparo situado a 40 cm de uma lente esférica de vidro, forma-se a imagem nítida de um objeto situado a 10 cm do centro óptico da lente. Determine:

- a natureza da lente;
- a distância focal da lente;
- o aumento linear transversal e seu significado;
- a construção geométrica que representa a situação descrita.

► Resolução

- Trata-se de uma lente convergente, pois a imagem projetada é real e somente lentes convergentes conjugam imagens reais.
- O objeto está a $p = 10$ cm da lente. A imagem é real; portanto, sua abscissa é positiva; logo, $p' = +40$ cm. Aplicando a equação de Gauss, temos:

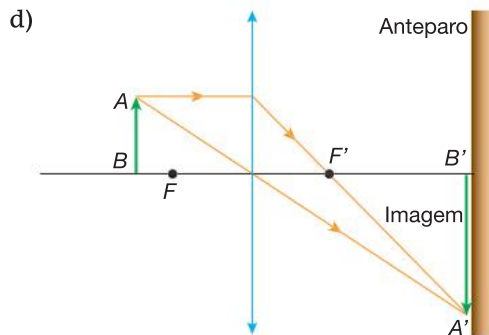
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{10} + \frac{1}{40} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{4+1}{40}$$

$$\therefore f = 8 \text{ cm}$$

c) Sabemos que: $A = -\frac{p'}{p}$. Então, no caso:

$$A = -\frac{40}{10} \Rightarrow A = -4$$

Isso significa que a imagem tem o quádruplo do tamanho do objeto e é invertida, pois $A < 0$.



Representação sem escala.

R2 Uma lente convergente tem vergência igual a +5 di. Ela será utilizada para projetar sobre um muro a imagem de um pequeno objeto, de modo que essa imagem seja 10 vezes maior que o objeto. A que distância do muro a lente deverá ser colocada?

Resolução

Sabemos que: $V = \frac{1}{f}$

Então: $f = \frac{1}{5} \therefore f = 0,2 \text{ m} = 20 \text{ cm}$

Trata-se de uma imagem real, pois há projeção da imagem em um muro. Portanto, ela será invertida, o que configura: $A < 0$

Temos: $A = -\frac{p'}{p} \Rightarrow -10 = -\frac{p'}{p} \Rightarrow p' = 10p$

Substituindo, na equação de Gauss, para $f = +20 \text{ cm}$, vem:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{20} = \frac{1}{p} + \frac{1}{10p} \Rightarrow \frac{1}{20} = \frac{10+1}{10p}$$

$\therefore p = 22 \text{ cm}$

O problema pede a distância entre a lente e o muro onde está projetada a imagem, ou seja, a abscissa p' .

Como $p' = 10p$, temos:

$$p' = 10 \cdot 22 \therefore p' = 220 \text{ cm} = 2,20 \text{ m}$$

R3 Um objeto luminoso de 10 cm de altura está em frente de uma lente esférica divergente de 20 cm de distância focal. Determine as características da imagem conjugada, sabendo que o objeto está a 80 cm da lente. Faça um esquema gráfico representando a situação.

Resolução

Se a lente é divergente, sua distância focal é $f = -20 \text{ cm}$. Então, para $p = 80 \text{ cm}$, temos:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{-20} = \frac{1}{80} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{p'} = \frac{-4-1}{80}$$

$$\therefore p' = -16 \text{ cm}$$

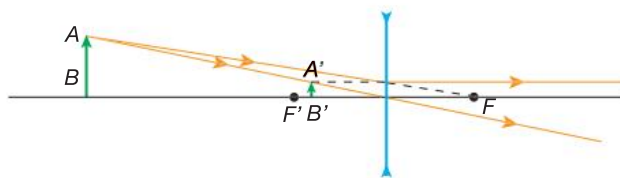
Como $p' < 0$, a imagem, como esperado em lentes divergentes, é virtual.

Para determinar o tamanho da imagem, sabemos que o objeto mede $o = 10 \text{ cm}$; então:

$$\frac{i}{o} = -\frac{p'}{p} \Rightarrow \frac{i}{10} = -\frac{-16}{80} \Rightarrow i = 2 \text{ cm}$$

Isso significa que a imagem mede cinco vezes menos que o objeto.

Portanto, as características da imagem são: natureza: virtual; distância ao centro óptico da lente: -16 cm (objeto e imagem estão do mesmo lado da lente); tamanho: 2 cm.



ILUSTRAÇÕES: LUIZ RUIBO

QUESTÕES PROPOSTAS

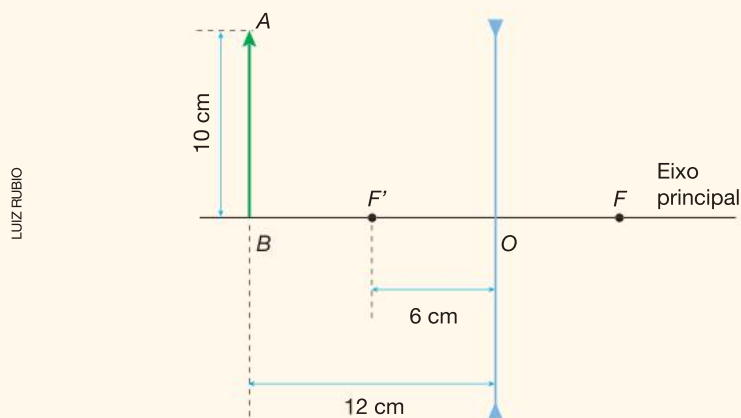
Lembre-se: resolva as questões no caderno.

1 O chamado olho mágico é um dispositivo colocado na porta das residências que possibilita ao morador ver o visitante antes de abrir a porta. O olho mágico utiliza uma lente esférica capaz de conjugar uma imagem menor e direita do visitante. Suponha que um desses dispositivos forneça ao

observador que está no interior da residência uma imagem quatro vezes menor de uma pessoa que esteja a 60 cm da porta.

- Qual deve ser a natureza da lente utilizada no olho mágico? Justifique.
- Calcule a distância focal da lente.

2 Um objeto AB está diante de uma lente divergente, como mostra a figura:



- Construa graficamente a imagem do objeto e determine sua distância da lente.
 - Determine o aumento linear transversal e o tamanho da imagem conjugada.
- 3 Um garoto quer observar uma formiga que está a 10 cm de distância de uma lente convergente. A lente tem vergência $+20$ di e a formiga tem comprimento 0,4 cm. Quantas vezes maior será a imagem da formiga vista pelo menino? Qual será o comprimento da formiga observada através da lente?
- 4 Para examinar um rubi, um joalheiro usou uma lente cuja distância focal vale, em módulo, 2,2 cm. A imagem virtual conjugada é onze vezes maior que o rubi objeto.
- Qual é o tipo de lente utilizado? Por quê?
 - Determine a distância entre o rubi e a lente.
- 5 Uma lente delgada convergente, quando utilizada para observar uma estrela distante, conjuga uma imagem que se forma a 10 cm de seu vértice. Quando um objeto é colocado a uma distância menor que a distância focal da lente, a imagem conjugada se forma a 15 cm da lente.
- Qual é a distância focal da lente?
 - Qual é a distância do objeto para a lente?
- 6 Coloca-se um objeto luminoso a 40 cm de distância de uma lente delgada divergente. A imagem conjugada tem metade do tamanho do objeto. Determine a vergência da lente, em dioptrias.
- 7 Três lentes esféricas delgadas são associadas por justaposição, tendo eixos principais coincidentes. Duas delas são convergentes e apresentam distâncias focais iguais a 10 cm e 30 cm, respectivamente, e a outra é divergente com distância focal 15 cm. Calcule a vergência equivalente da associação.
- 8 (Imed-RS) Ao posicionar um objeto diante de uma lente esférica de características desconhecidas, é conjugada uma imagem real, invertida e com as mesmas dimensões do objeto. Tanto o objeto quanto sua imagem estão a 40 cm do plano da lente. Com relação a essa lente, podemos afirmar que:
- trata-se de uma lente divergente com distância focal igual a 10 cm.
 - trata-se de uma lente biconcava com distância focal superior a 25 cm.
 - trata-se de uma lente convergente com distância focal inferior a 10 cm.
 - trata-se de uma lente divergente com distância focal superior a 30 cm.
 - trata-se de uma lente convergente com distância focal igual a 20 cm.

Instrumentos ópticos e óptica da visão

ou: Por que os telescópios terrestres modernos são construídos em locais muito elevados?

 **S18**

No Suplemento, há orientações para o trabalho com a questão introdutória.

1 Introdução

Os telescópios terrestres modernos são construídos em locais muito elevados porque a ausência de homogeneidade da atmosfera, provocada pela poluição, as flutuações de densidade do ar, entre outras condições, geram distorções nas imagens observadas.

Você já deve ter visto ou até utilizado alguns instrumentos ópticos, mesmo sem saber que eles são chamados assim. Câmaras fotográficas, lunetas, microscópios, telescópios são instrumentos ópticos construídos por associações de espelhos, lentes ou prismas, elementos ópticos já estudados. De maneira geral, um instrumento óptico permite uma visão mais ampla daquilo que desejamos ver, aproximando, ampliando ou registrando imagens. Neste capítulo, vamos ver como o microscópio torna visíveis objetos minúsculos e como o telescópio consegue ampliar a imagem de objetos muito distantes. Além disso, vamos conhecer parte do processo fisiológico que possibilita nossa visão. Perceberemos que as imagens dos objetos se formam em nossos olhos de maneira análoga às conjugadas por uma lente de máquina fotográfica.

HUBBLE SM4 ERO TEAM/ESA/NASA



Figura 1 • Nebulosa da Borboleta. Foto obtida pelo telescópio Hubble. Imagem tratada com cores-fantasia.

2 Instrumentos ópticos

Lupa ou microscópio simples

A lupa é um instrumento óptico constituído de uma única lente esférica convergente. Também denominada microscópio simples, a lupa é um instrumento de observação usado para obter uma imagem ampliada, direita e virtual do objeto. De maneira geral, posicionamos a lupa próximo do objeto. Por isso, a distância focal da lente da lupa deve ser pequena, pois o objeto deverá ser colocado entre o foco e o centro óptico da lente, como se vê na figura 2. Quanto menor a distância focal da lupa, maior será seu poder de ampliação. O uso de lupas como lentes de aumento popularizou-se por toda a Europa a partir do século XIII, facilitando a vida das pessoas que não conseguiam enxergar objetos próximos.

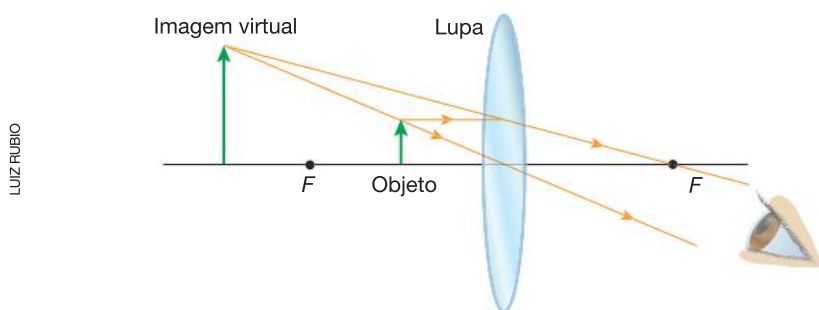


Figura 2 • A lupa conjuga uma imagem virtual, direita e ampliada do objeto posicionado entre o foco objeto e a lente.



Figura 3 • As lupas, em geral, são usadas para obter uma imagem ampliada do objeto, o que possibilita visualizar mais detalhes.

Microscópio composto

Ainda que as lupas forneçam ampliações consideráveis dos objetos, a observação mais apurada de pequenos elementos, como células ou bactérias, requer instrumentos ópticos mais potentes, que ampliem as imagens ainda mais, como um microscópio composto. Para tanto, associam-se duas ou mais lentes convergentes de modo que se obtenha maior ampliação.

Microscópios compostos são constituídos basicamente de uma lente convergente de distância focal muito pequena (da ordem de milímetros), denominada **objetiva**, associada a uma segunda lente, também convergente, chamada **ocular**. As duas lentes são dispostas nos extremos de um tubo cilíndrico de paredes opacas, de tal maneira que seus eixos ópticos coincidam e que a objetiva esteja mais próxima do objeto e a ocular mais próxima do olho. A distância entre as lentes é invariável, e é preciso posicionar o objeto de modo que a abscissa de sua posição seja maior que a distância focal da lente objetiva. Assim, a imagem I' fornecida por essa lente será real e maior que o objeto. No esquema da figura 4A, na página seguinte, percebe-se que a imagem I' se forma em uma posição dentro da distância focal da lente ocular. A imagem I' passa a servir como objeto para a lente ocular, que se comporta como uma lupa, formando a imagem virtual final ampliada e invertida em relação ao objeto inicial O . O aumento total A , fornecido pelo microscópio, pode ser obtido pelo produto dos aumentos lineares transversais da objetiva e da ocular ou:

$$A = A_{\text{obj.}} \cdot A_{\text{ocular}}$$

Nesse tipo de microscópio, as ampliações chegam a 2.000 vezes o tamanho do objeto; na maior parte deles, pode-se intercambiar as lentes objetivas, possibilitando escolher entre algumas ampliações (fig. 4B).

Para obter imagens ainda mais ampliadas, podemos recorrer aos chamados **microscópios eletrônicos**, que utilizam feixes de elétrons em vez de luz e bobinas eletromagnéticas em vez de lentes de cristal, produzindo ampliações superiores a 100.000 vezes.

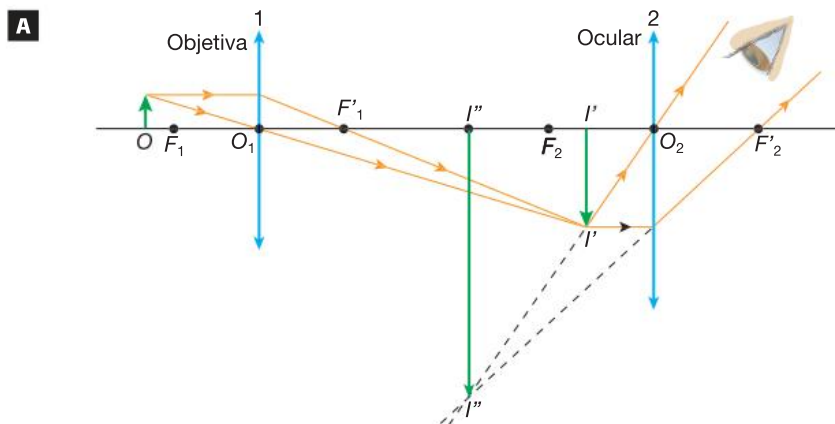


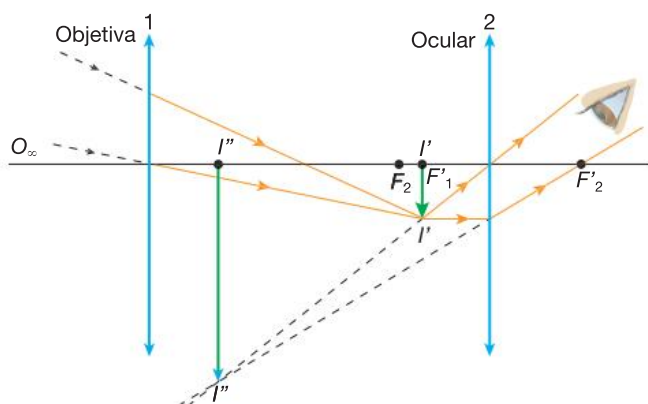
Figura 4 • A imagem final conjugada pelo microscópio é invertida em relação ao objeto. (A) Em um microscópio composto, as imagens são ampliadas por uma associação de lentes convergentes. (B) A objetiva pode ser escolhida de acordo com o número de vezes que se deseja ampliar o objeto. No caso do aparelho da foto, são três opções.



PHOTOFUSION PICTURE LIBRARY/ALAMYGLOW IMAGES

Luneta

Assim como a lupa e o microscópio, a luneta é utilizada para observação. Trata-se de um instrumento óptico cuja função é aproximar objetos distantes, especialmente astros e estrelas (luneta astronômica). Seu uso é possível também na navegação, para observação de objetos muito afastados (luneta terrestre). Assim como ocorre no microscópio composto, o princípio de funcionamento das lunetas baseia-se na associação de duas lentes convergentes: a objetiva, de distância focal da ordem de decímetros, às vezes até de metros, e a ocular, de distância focal da ordem de alguns centímetros. A objetiva recebe luz de um objeto muito afastado O_∞ (o que, na prática, pode ser pensado como uma distância infinita). Por esse motivo, o feixe de luz que incide na lente é praticamente paralelo, de modo que a imagem I' do objeto, conjugada pela objetiva, se forma necessariamente no foco da lente (fig. 5).



S19

No **Suplemento**, indicamos como obter instruções para construir uma luneta.

Figura 5 • A imagem I' conjugada pela objetiva passa a ser objeto para a ocular, que conjuga, então, a imagem I'' final.

A imagem I' comporta-se como objeto para a lente ocular, que conjuga uma imagem final I'' virtual, aumentada e direita em relação a I' , porém invertida em relação a O . Desse modo, o comprimento do tubo da luneta corresponde aproximadamente à soma das distâncias focais das lentes. Aumentando o comprimento do tubo, é possível melhorar a imagem obtida pela luneta simplesmente aumentando as distâncias focais das lentes. Ainda que teoricamente isso se verifique, percebemos que, acima de determinado tamanho de tubo, a observação final se torna insatisfatória, por causa das aberrações cromáticas das lentes.

As lunetas terrestres não possibilitam um grande aumento do objeto observado, como as lunetas astronômicas, por isso são construídas em tamanho menor. Para serem práticas, as lunetas terrestres não devem fornecer imagens invertidas; por essa razão, esses instrumentos recebem adaptações para que a imagem final seja direita. Na luneta conhecida como de Galileu, essa inversão é obtida utilizando como ocular uma lente divergente e mantendo a convergência da objetiva (fig. 6B).

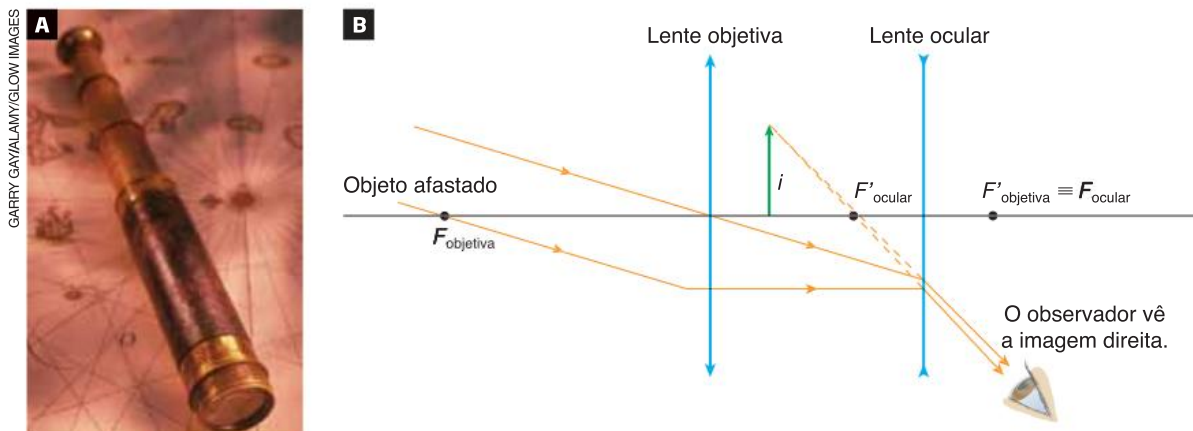


Figura 6 • (A) Luneta terrestre composta de apenas duas lentes esféricas. (B) Formação da imagem em uma luneta de Galileu. Note que o foco imagem da objetiva coincide com o foco objeto da ocular.

Telescópios

Os telescópios são instrumentos ópticos que funcionam com o mesmo princípio das lunetas astronômicas. A observação de objetos muito distantes é feita pelos denominados **telescópios refletores**, de maneira semelhante às lunetas. De modo geral, na sua construção, se usa uma lente convergente para a ocular; mas, na lente da objetiva, usa-se um espelho parabólico côncavo. A imagem fornecida pelo espelho serve como objeto para a ocular, que conjuga uma imagem final maior. A vantagem desses aparelhos está sobretudo na praticidade e na redução das aberrações cromáticas das lentes. Espelhos, mesmo gigantes, podem ser apoiados, enquanto as lentes objetivas, mesmo as de grandes dimensões, devem ser presas pelas bordas. Como a função da objetiva está relacionada à captação de luz do objeto, um telescópio com espelho de grandes dimensões representa maior quantidade de luz capturada de uma estrela, o que significa maior quantidade de informações para análise.

S20

No **Suplemento**, indicamos um objeto virtual de aprendizagem que simula um telescópio.



Figura 7 • Telescópio com câmera digital reflexa.



Figura 8 • Telescópio refletor parabólico (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov - Magic), La Palma, Ilhas Canárias, Espanha. A luz refletida pelo espelho parabólico incide em um espelho plano inclinado que dirige o feixe para a ocular.

Nos chamados telescópios de refração, a diferença está na distância focal da lente objetiva, que, neste caso, será muito grande. Além disso, eles podem trabalhar com diversas oculares, de diferentes distâncias focais, e ser ajustados para vários aumentos.

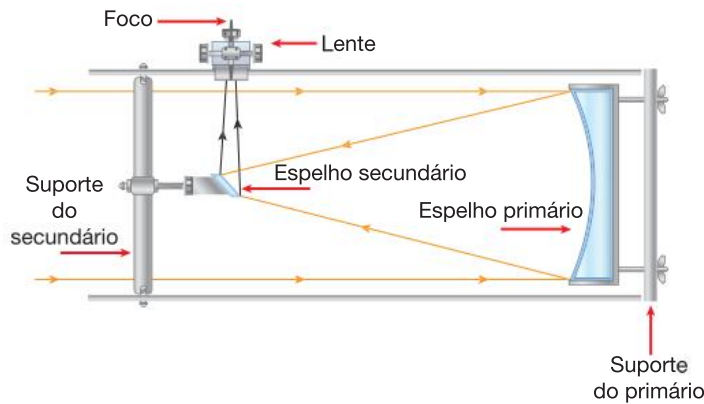


Figura 9 • Telescópio refletor. Observe a diferença entre as dimensões da lente ocular e as do espelho parabólico.

Máquina fotográfica

As máquinas fotográficas construídas no século XIX eram aparelhos muito simples, semelhantes às câmaras escuras de orifício que estudamos anteriormente, e registravam as imagens em um material sensível à luz, o filme fotográfico. Nessas máquinas, havia uma única lente convergente, denominada objetiva, cuja função era conjugar uma imagem real e menor do objeto para ser projetada no filme.

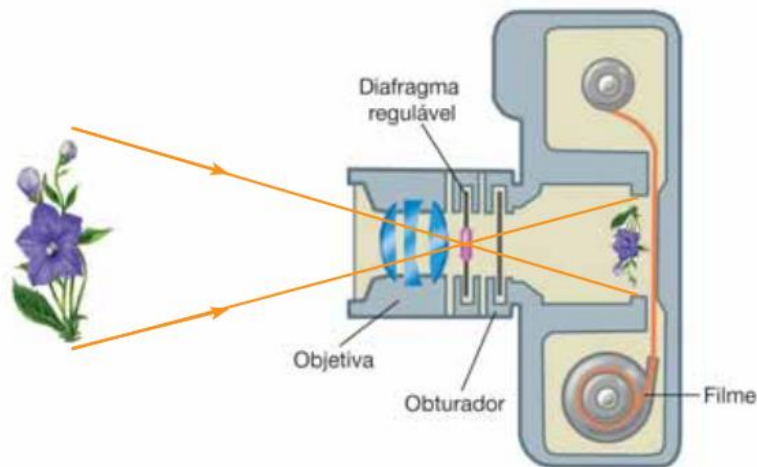


Figura 10 • Esquema de uma máquina fotográfica. Nesse tipo de máquina, uma associação de lentes tem a função da objetiva; o diafragma controla a quantidade de luz que provoca a impressão da imagem no filme; o obturador regula o tempo de abertura para a entrada da luz.

Os filmes fotográficos foram se aperfeiçoando e, no século XX, eram constituídos por um rolo de celulose coberto com uma camada de sais de prata sensíveis à luz, finamente espalhados. As máquinas, que funcionam como câmaras escuras, expõem rapidamente o filme à luz incidente em seu interior, captada por um conjunto de lentes convergentes. Dessa forma, a imagem real projetada no fundo da câmara sensibiliza o filme. Posteriormente, por meio de reações químicas apropriadas, a imagem do objeto é fixada no chamado negativo, porém invertida. Depois disso, por meio de equipamentos ópticos, é novamente invertida, ampliada e fixada sobre um papel sensível à luz. O produto final é a foto impressa. Nos filmes coloridos, o processo é o mesmo, com uma única diferença: eles têm três camadas diferentes de sais de prata, sensíveis separadamente à luz das cores azul, verde e vermelha.



CHAMILLE WHITESHUTTERSTOCK



V-SHUTTERSTOCK



STUDIOSMART/SHUTTERSTOCK

Figura 11 • (A) Máquina fotográfica do início do século XX. A objetiva era composta de apenas uma lente convergente. (B) Máquina fotográfica com objetiva constituída por um conjunto de lentes convergentes. (C) Máquina fotográfica digital: placa fotossensora em lugar de filme.

Atualmente, nas **máquinas fotográficas digitais**, o processo de captação da imagem é idêntico: a luz emitida pelo objeto a ser fotografado passa por lentes que conjugam uma imagem real projetada no fundo da câmara. A diferença está no suporte que registra a imagem: uma placa coberta de circuitos eletrônicos em vez do filme fotográfico. A luz é projetada sobre essa placa coberta por milhares desses circuitos, com milhões de fotossensores dispostos lado a lado, cuja função é transformar luz em eletricidade. Em outras palavras, a luz é gravada eletronicamente para que, posteriormente, um *chip* embutido na câmara decomponha as informações eletrônicas, transformando-as em dados digitais. Cada um desses circuitos forma o **pixel**. Cada *pixel* tem capacidade de registro proporcional à intensidade da luz que incidiu sobre ele. Juntos, eles formam a imagem do objeto fotografado. Quanto maior o número de *pixels* sobre a superfície de captura, maior a definição da imagem, ou seja, maior a riqueza de detalhes do registro fotográfico.

Transformada em sinais elétricos, a imagem é vista no chamado formato digital. Nesse formato, pode ser projetada em um monitor de computador, tratada digitalmente, ou seja, ampliada e melhorada quanto a aspectos como brilho, nitidez, intensidade das cores e contraste, e pode até ser impressa.



Figura 12 • A mesma imagem obtida com resoluções diferentes.

QUESTÕES RESOLVIDAS

R1 Um garoto construiu uma máquina fotográfica utilizando uma lente convergente como objetiva e decidiu experimentá-la tirando uma foto de seu cão. Supondo que a imagem seja projetada em um filme fotográfico situado na parede oposta à lente, quais serão as características da imagem na foto?

► Resolução

A imagem do cão projetada no filme será real, invertida e reduzida.

R2 Uma lupa é utilizada para produzir a imagem aumentada de um objeto. Além de maior, a

imagem deve ser direita. Considerando esses fatores, o que representa, em relação à funcionalidade e à praticidade, uma lupa cuja lente tem pequena distância focal?

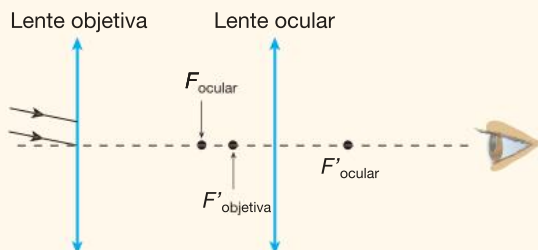
► Resolução

Uma lupa é uma lente convergente. Para que a imagem produzida por esse tipo de lente seja direita e ampliada, o objeto deve estar posicionado entre o foco e o centro óptico da lente. Assim, uma lupa com pequena distância focal não é eficiente, uma vez que os objetos a serem observados só poderão ser vistos ampliados se posicionados a uma distância muito pequena da lupa.

QUESTÕES PROPOSTAS

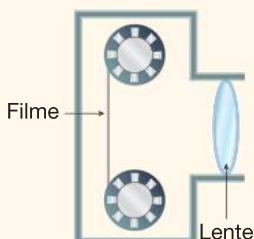
Lembre-se: resolva as questões no caderno.

- 1 A utilização da luneta astronômica de Galileu ampliou a visão do Universo. Esse instrumento óptico, composto de duas lentes — objetiva e ocular —, está representado no esquema a seguir.



Considere a observação de um objeto no infinito por meio da luneta astronômica de Galileu. Classifique em reais, virtuais ou impróprias as imagens do objeto fornecidas pelas lentes objetiva e ocular. Quais delas são direitas? Quais delas são invertidas?

- 2 Um estudante vai construir uma câmara fotográfica simples, usando uma lente convergente de distância focal 40 mm como objetiva e colocando-a numa caixa fechada de modo que, para obter uma boa foto, a imagem se forme exatamente sobre o filme e seu tamanho não exceda a área sensível do filme. Suponha, para a situação descrita, que a distância da lente ao filme seja 42 mm.



- a) Calcule a posição em que o objeto deve ficar em relação à lente.
b) Sabendo que a altura máxima da imagem não pode exceder 50 mm, determine a altura máxima do objeto para que ele seja fotografado em toda a sua extensão.

- 3 Uma garota usa uma lupa para acender uma fogueira, concentrando os raios solares num único ponto a 30 cm da lupa. Utilizando a mesma lupa, ela observa os detalhes da asa de uma borboleta ampliada 3 vezes.



- a) Qual é a distância focal da lente? Justifique sua resposta.
b) Calcule a que distância da asa da borboleta a garota está posicionando a lupa.

- 4 Usando um projetor cinematográfico, deseja-se obter imagens ampliadas que possam ser projetadas em uma tela. Como somente lentes convergentes fornecem imagens reais, pode-se dizer, de maneira simplificada, que os projetores são constituídos por uma lente convergente (ou uma associação delas) denominada objetiva e por uma fonte de luz intensa cuja função é iluminar o objeto a ser projetado, que, no caso de um projetor de cinema, é o filme (figura).



Projetor cinematográfico super 8 mm.

Suponha que um projetor de cinema tenha uma objetiva cuja distância focal é 10 cm. Para que seja possível obter na tela uma imagem ampliada 300 vezes, qual deve ser o comprimento aproximado da sala de projeção?

3 A visão e o olho humano

O sentido da visão, entre os cinco de que dispomos para perceber o mundo, é o responsável pela maior parte das informações sobre as coisas que nos cercam. A visão se dá por um processo que envolve a estimulação desse sentido pela luz proveniente dos objetos. Essa luz incide e penetra em nossos olhos formando a imagem. Para que enxerguemos algo, nosso cérebro precisa processar as informações visuais do objeto, interpretá-las e memorizá-las.

Para entender a estrutura do olho humano do ponto de vista biológico, vamos considerá-lo quase esférico e com diâmetro aproximado de 2,5 cm em um adulto. O olho humano pode ser analisado como um conjunto de meios transparentes, separados uns dos outros por superfícies aproximadamente esféricas. Assim como na máquina fotográfica, o sistema óptico do olho é constituído de um sistema de lentes, cuja função é focalizar a luz que nele incide. A luz penetra no olho através da **córnea**, que é transparente, acentuadamente convexa e refrata grande parte da luz incidente.

A **íris** é a membrana que dá a coloração ao globo ocular. Em seu centro, há uma abertura de diâmetro variável, a **pupila**, que controla automaticamente a quantidade de luz que penetra no globo ocular, a fim de evitar ofuscamento. Apesar de muito rápido, o funcionamento da pupila não é instantâneo; ela demora cerca de 5 segundos para se fechar ao máximo e em torno de 300 segundos para se abrir totalmente (fig. 13).

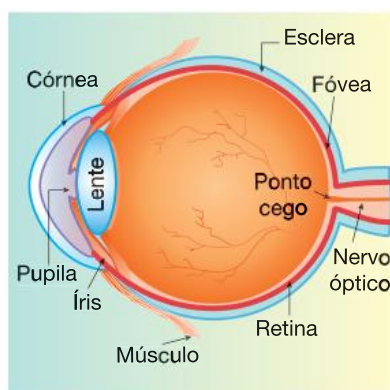


Figura 13 • O esquema, sem escala e com cores-fantasia, mostra o globo ocular e os elementos que o constituem.

A **lente do olho**, anteriormente denominada cristalino, comporta-se como uma lente biconvexa elástica cuja distância focal é variável. A luz que atinge o globo ocular é projetada pela lente do olho sobre a **retina**, que exerce a função de anteparo sobre o qual se formam as imagens dos objetos observados.

A retina é fotossensível e seu grau de sensibilidade é variável. A **fóvea**, região da retina de máxima sensibilidade à luz, é o local onde a imagem se forma com maior nitidez. Quando olhamos diretamente para uma árvore, a lente do olho projeta sobre a retina a imagem invertida e reduzida da árvore, tão diminuta que seu tamanho não é maior que a cabeça de um alfinete. Essa imagem forma-se sobre a fóvea porque os terminais nervosos são mais numerosos nessa região. Nas outras partes da retina, menos sensíveis que a fóvea, temos a formação da visão periférica, que é menos nítida, porém mais sensível a alterações de luminosidade e, portanto, mais apta a distinguir os movimentos dos objetos.

A focagem fina, ou **acomodação** do olho, é a função principal da lente. Esse processo se estabelece quando a lente do olho altera sua forma e, portanto, sua distância focal, ajustando a imagem sobre a retina para que se vejam com nitidez tanto objetos distantes quanto próximos.

S21

Antes de iniciar o estudo do processo de visão, consulte sugestões de abordagem desse "Explore" no Suplemento.

EXPLORE EM BIOLOGIA

Por que não vemos "o mundo" em posição invertida?

Finalmente, por meio do **nervo óptico**, as células nervosas enviam as informações visuais ao cérebro, convertendo luz em impulsos elétricos. Estes serão decodificados pelo sistema nervoso, permitindo a visualização dos objetos.

Para a Óptica geométrica, um sistema complexo como o olho humano pode ser estudado com a adoção de um modelo denominado **olho reduzido**.

Nesse modelo, uma lente convergente representa simultaneamente a lente do olho e a córnea. Um anteparo situado a uma distância de 15 mm da lente convergente desempenha o papel da retina, onde são formadas as imagens dos objetos. A luz incide na lente e atravessa uma abertura, que representa a pupila, situada a 5 mm da lente, limitando a largura e a inclinação do feixe incidente no olho (fig. 14).

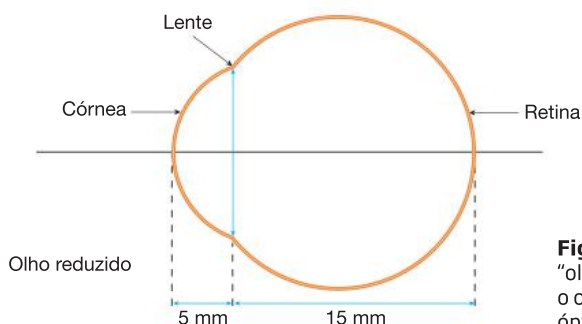


Figura 14 • O modelo do “olho reduzido” considera o olho como sistema óptico.

Acomodação visual

O olho humano pode ser considerado um sistema óptico semelhante à máquina fotográfica, com duas lentes espessas, a córnea e a lente, um diafragma, que é a íris, e um anteparo, a retina.

No olho humano normal, as imagens se formam sempre na retina. Logo, tal qual na máquina fotográfica, percebemos que a distância p' da imagem à lente é constante. Assim, se a lente do olho tivesse distância focal invariável, certamente seriam vistos com nitidez apenas alguns objetos colocados a determinada distância do olho. No entanto, a lente do olho tem a capacidade de variar sua distância focal por meio da ação dos músculos ciliares. Assim, quando observamos um objeto muito distante, como um navio no horizonte, sem “forçar a vista” para distinguir detalhes, os músculos ciliares estão totalmente relaxados. Mas quando observamos um objeto muito próximo e ainda obtemos uma imagem nítida dele, os músculos ciliares estão em sua compressão máxima. Esse ajuste da imagem na retina que permite uma visão nítida em diversas distâncias é denominado **acomodação visual**.

Pela experiência, sabemos que a acomodação da lente do olho normal se estabelece entre dois extremos:

- a posição de máximo afastamento, na qual o objeto se situa muito longe do olho (objeto no infinito) e, portanto, a incidência de luz se dá por meio de um feixe paralelo. Nesse caso, o foco imagem da lente coincide com a retina. A curvatura da lente do olho é menos acentuada, ou seja, a imagem é obtida com a musculatura ciliar relaxada. Na prática, considera-se que objetos distantes mais de 6 m do olho estejam no infinito. Essa posição é denominada **ponto remoto**;

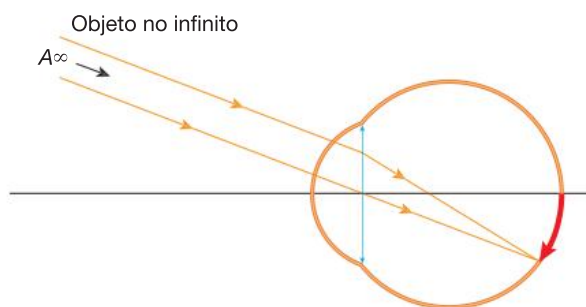


Figura 16 • Objetos no infinito enviam luz por um feixe paralelo. A imagem se forma no foco, ou seja, na retina, sem requerer deformação da lente.

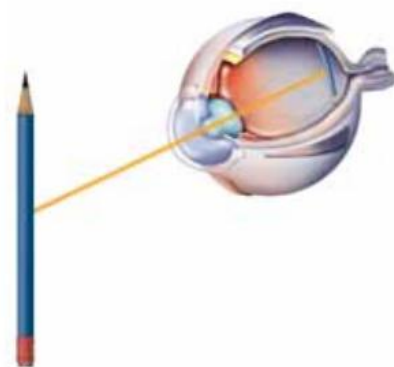


Figura 15 • Analogamente a uma máquina fotográfica, o olho normal (lente e córnea) conjuga uma imagem real dos objetos projetada na retina, reduzida e invertida. (Representação esquemática, sem escala, com cores-fantasia.)

- a posição de máxima aproximação é aquela a partir da qual o objeto não é mais visto com nitidez, ou seja, a acomodação não é mais possível, pois a lente do olho está no seu máximo esforço. A máxima curvatura da lente se dá quando o objeto está no ponto mais próximo do olho e ainda assim é focalizado. Essa posição é denominada **ponto próximo** e situa-se a 25 cm do olho de um adulto sadio. Devido à perda de flexibilidade da lente do olho, o ponto próximo aumenta com a idade.

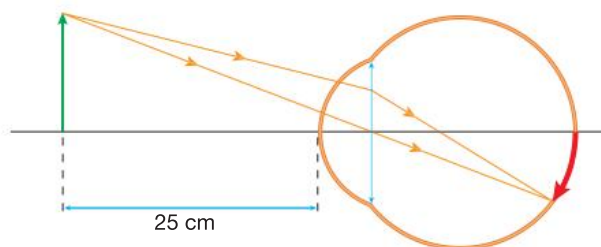


Figura 17 • O ponto próximo varia com a idade do indivíduo. Para um adulto de visão sadia, localiza-se a 25 cm do olho.

Defeitos da visão

Em um olho normal, a imagem dos objetos sempre é projetada na retina. Quando isso não ocorre, essa imagem deixa de ser nítida. Para corrigir esse efeito indesejável, utilizam-se lentes corretoras, de acordo com os distúrbios visuais apresentados. Os principais distúrbios visuais serão vistos a seguir.

Miopia

Em um olho míope sem acomodação visual, os objetos distantes, emitindo luz na forma de um feixe paralelo, terão suas imagens conjugadas pela córnea e pela lente do olho antes da retina, ou seja, a associação de lentes apresenta uma convergência maior que a necessária. Nesse caso, o ponto remoto não se localiza no infinito, mas, sim, mais próximo do olho, tornando pouco nítidas as imagens de objetos distantes. Sua causa, em geral, está associada a um alongamento do globo ocular (fig. 18).

Para corrigir esse defeito, é necessário utilizar lentes corretivas divergentes, que retardam a convergência do feixe de luz (fig. 19).

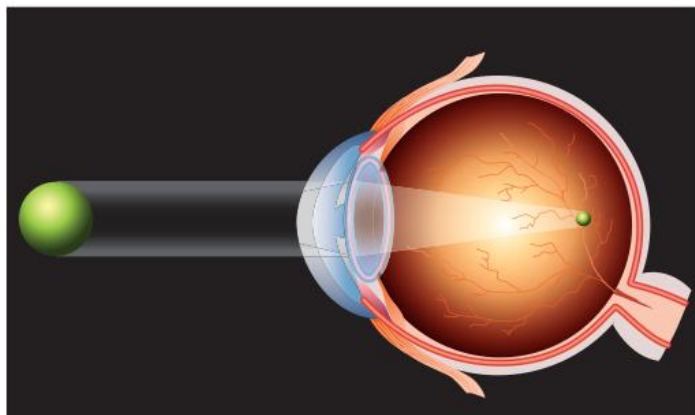


Figura 18 • No olho míope, a imagem do objeto (bola) forma-se na frente da retina. O observador tem uma imagem borrada da bola.

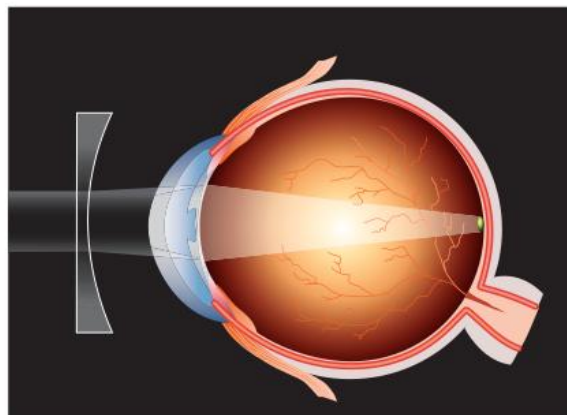


Figura 19 • Atualmente empregam-se diversas técnicas para a correção da miopia, como lentes divergentes externas ou internas e cirurgia. Na figura, representa-se a correção com uma lente divergente de óculos.

Representações esquemáticas sem escala, com cores-fantasia.

Hipermetropia

Em um olho hipermetrope, os objetos distantes, emitindo luz na forma de um feixe paralelo, terão suas imagens conjugadas na retina devido a um esforço de acomodação. Sem esse esforço, a imagem conjugada pela córnea e pela lente do olho estaria atrás da retina, ou seja, a associação de lentes apresenta convergência menor que a necessária. Como o hipermetrope já realiza esforço para ver no infinito, esgota antes sua capacidade de acomodação. Assim, ocorre um afastamento do ponto próximo, que passa a se situar a uma distância superior a 25 cm.

Em geral, a causa da hipermetropia está associada a um encurtamento do globo ocular ou a uma anomalia no índice de refração dos meios transparentes do olho (fig. 20). A correção da hipermetropia se dá com a utilização de lentes corretivas convergentes ou cirurgia (fig. 21).

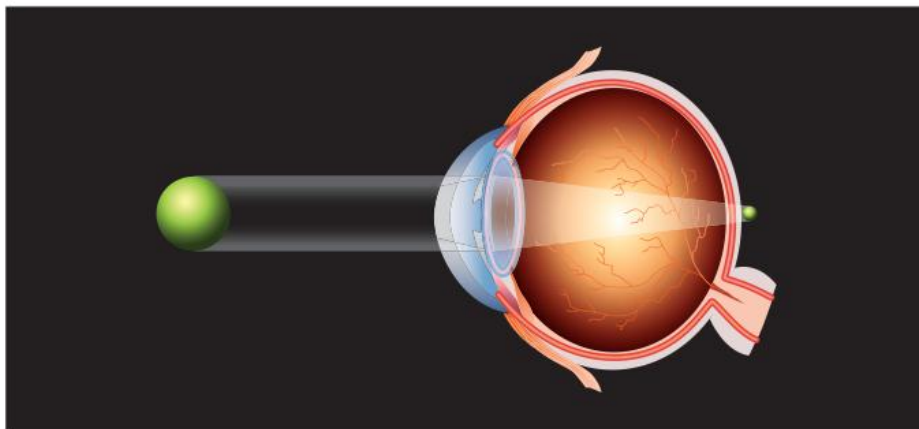


Figura 20 • A imagem da bola captada pelo olho hipermetrope se forma atrás da retina, causando uma visão pouco nítida dos objetos próximos.

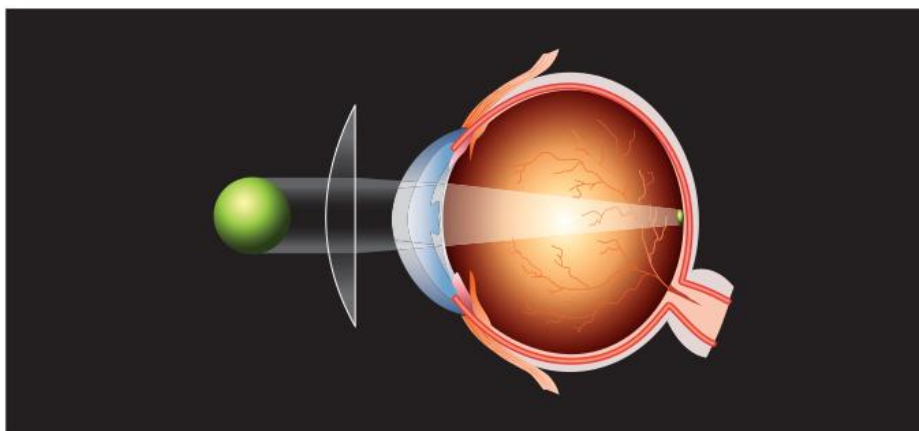


Figura 21 • Atualmente são diversas as técnicas utilizadas para a correção da hipermetropia. Em todas elas, no entanto, utilizam-se lentes convergentes. Na figura, representa-se a correção com uma lente convergente de óculos.

Representações esquemáticas sem escala, com cores-fantasia.

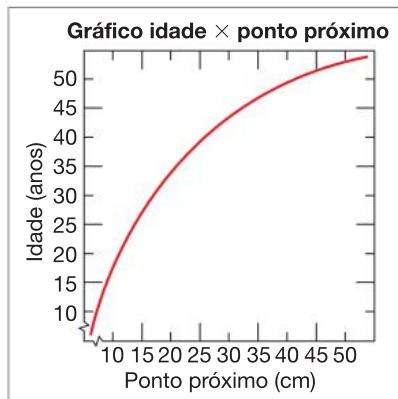
Presbiopia ou vista cansada

À medida que os indivíduos envelhecem, os músculos ciliares perdem a flexibilidade e a lente do olho vai enrijecendo progressivamente, tornando-se menos capaz de ajustar o foco para a visão de objetos a curta distância do olho. Isso acarreta um progressivo afastamento do ponto próximo (fig. 20). A perda da capacidade de acomodação visual decorrente da idade chama-se presbiopia. Para muitos, ela não deve ser considerada um distúrbio da visão, pois ocorre em todas as pessoas, uma vez que todos envelhecemos. De maneira geral, começa a ser percebida por volta dos 40 anos, quando surge, por exemplo, a necessidade de afastar um jornal para a leitura (ver tabela e gráfico na próxima página). A partir de então, o uso de lentes corretivas para a visão de objetos próximos é inevitável.

As lentes corretivas adequadas para a correção da presbiopia são convergentes, com a mesma função das lentes para hipermetropia.

Tabela 2 – Variação do ponto próximo com a idade do indivíduo	
Idade	Ponto próximo (em cm)
Criança	7
Jovem	12
Adulto	25–40
Idoso (> 60 anos)	> 100

Fonte: SCHACHAR, R. A. et al. The mechanism of accommodation and presbyopia in the primate. *Ann Ophthalmol*, 1995.



S22

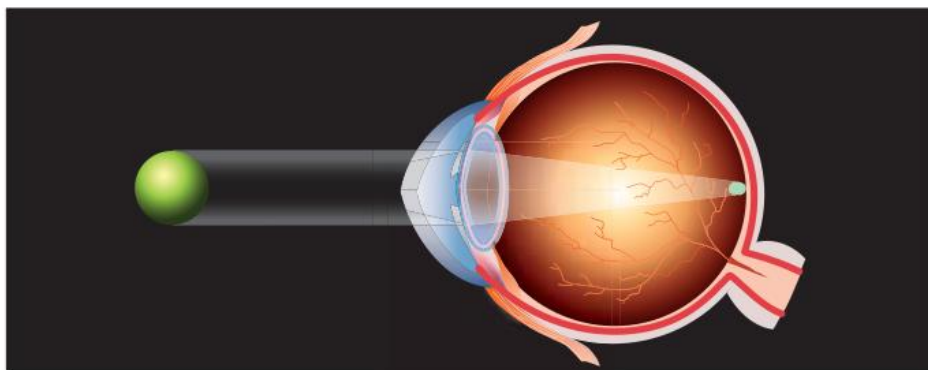
O Suplemento traz sugestão de atividade de simulação para encontrar receitas adequadas para óculos.

ILUSTRAÇÕES: LUIZ RUBIO

Figura 22 • Relação entre idade e distância do ponto próximo.

Astigmatismo

O indivíduo com astigmatismo vê os objetos, tanto próximos quanto distantes, de maneira distorcida, borrada, sem nitidez. Esse distúrbio é causado pelo formato irregular da córnea ou da lente do olho. A imagem é gerada em vários focos que se encontram em eixos distintos (fig. 23). Muitos consideram o astigmatismo hereditário e o mais frequente distúrbio da visão humana. Pode ser corrigido com o uso de lentes corretivas cilíndricas.



Representação esquemática sem escala, com cores-fantasia.

Figura 23 • No olho astigmático, o globo ocular não é absolutamente simétrico em relação ao eixo óptico. A imagem dos objetos aparece borrada.

Reprodução proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

Para saber mais

Conexões com o cotidiano

Correção da catarata

Recentemente, técnicas cirúrgicas inovadoras surgiram para tentar corrigir ou minimizar os chamados problemas refrativos da visão: miopia, hipermetropia e astigmatismo. Eles são considerados refrativos por estarem relacionados ao fato de a córnea, a parte do olho que funciona como uma lente, não produzir o foco exatamente na retina ou distorcer a imagem no seu trajeto até ela.

Várias técnicas foram usadas para corrigir esse tipo de problema (óculos, lentes de contato), mas a manipulação direta da córnea só foi possível a partir do desenvolvimento de ferramentas avançadas.

Com bisturis de diamante ultrafinos e, mais recentemente, dispositivos a *laser*, os médicos podem executar cortes extremamente precisos.

As técnicas são basicamente duas: cortes radiais (na direção do raio) na córnea ou retirada de material da sua superfície. Em ambos os casos, a reconfiguração da superfície da córnea altera seus elementos de refração, como a distância focal.

O avanço das técnicas cirúrgicas também foi essencial para resolver problemas de visão gerados, por exemplo, pelo embaçamento provocado pela catarata.

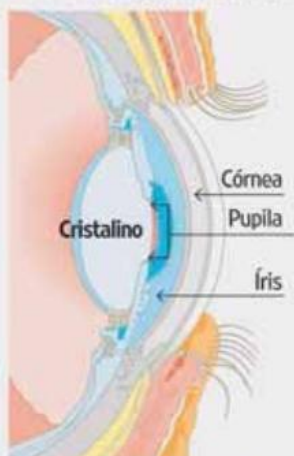
S23

No Suplemento, há outras informações sobre as lentes para catarata.

EDITORIA DE ARTE/FOLHA IMAGEM

A CIRURGIA DE CATARATA

Procedimento remove a lesão e coloca no seu lugar uma lente permanente



O que é

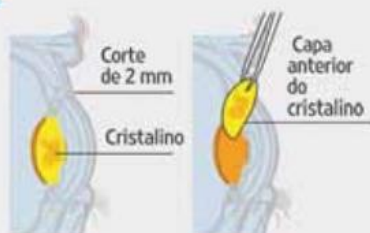
- >> Embaçamento do cristalino (lente localizada atrás da pupila)
- >> A opacidade aumenta gradualmente, tomando a visão cada vez menos nítida. É a maior causa de cegueira curável no Brasil

Sintomas

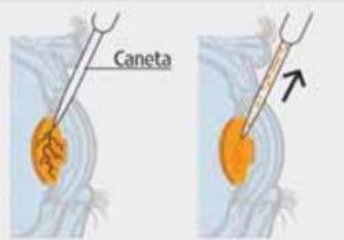
- >> Necessidade de luz cada vez mais forte para ler, perda da visão noturna e da nitidez
- >> As cores ficam pálidas e amareladas
- >> Quem usa óculos tem que trocar de graduação mais rapidamente

COMO É A CIRURGIA

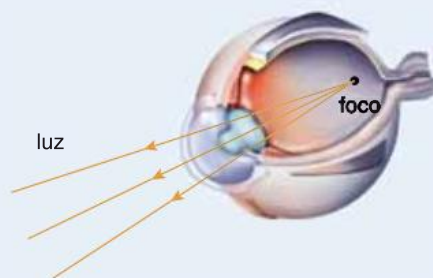
- 1** >> Um corte de 2 mm é feito no olho; com uma pinça, o médico retira a capa anterior do cristalino, que protege a lente



- 2** >> É introduzida a "caneta", cuja vibração quebra a parte interna do cristalino, atingida pela catarata. O aparelho suga esse material comprometido pela doença

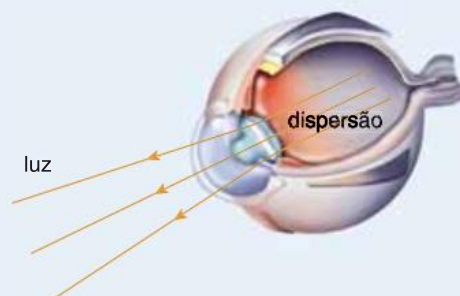


- 3** >> Uma nova lente (um cristalino artificial) é colocada no lugar da que foi retirada. Ela é introduzida dobrada ao meio e é aberta já dentro do olho



Olho normal

A lente é clara e transparente, permitindo que a luz passe com facilidade.



Olho com catarata

A lente se torna opaca, impedindo que a luz passe com facilidade. A visão fica borrada.

Representações esquemáticas, sem escala, cores-fantasia.

ILUSTRAÇÕES: LUIZ RUBIO

Fonte: Instituto de Visão da Unifesp. In: *Folha de S.Paulo*, 25 jun. 2009.

AMPLIANDO SUA LEITURA

- 1 Caracterize a catarata e descreva seus sintomas.
- 2 Existe a possibilidade de melhorar a visão prejudicada por causa de catarata com lentes corretoras, como ocorre com a miopia ou o astigmatismo?

Já sabe responder?

Por que os telescópios terrestres modernos são construídos em locais muito elevados?

JOERN SACKERMAN/BILDERBERG/LATINSTOCK



O espelho do Grande Telescópio Canárias (GTC), que fica na ilha de La Palma (Espanha) a 2.400 m de altitude, tem 10,4 m de diâmetro, o que representa aproximadamente o tamanho do círculo central de um campo de futebol. Sua construção foi um processo delicado e de grande exatidão, o que permite localizar precisamente seu foco.

QUESTÕES RESOLVIDAS

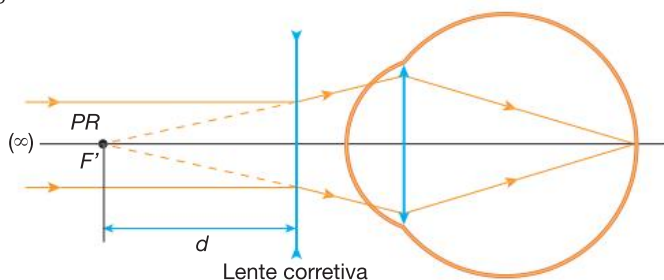
R3 Costureiras focalizam durante muito tempo sua visão em pontos muito próximos dos olhos quando estão costurando. Para que descansem, sugere-se que levantem o rosto da costura e olhem ao longe, visando o infinito. Sob o ponto de vista da óptica da visão, esse procedimento está correto? Explique.

► Resolução

Quando estão trabalhando, as costureiras necessitam do tecido e da agulha próximos dos olhos. Desse modo, a lente do olho é contraída e se encurva pela ação dos músculos ciliares, mantendo a imagem focalizada na retina. Isso pode "cansar" os olhos porque os músculos estarão sob tensão. Ao mirarem o infinito, a imagem se formará na retina, com pouca ou nenhuma tensão do músculo ciliar. A curvatura da lente do olho nessa situação é menos acentuada, ou seja, apresenta uma forma mais plana, propiciando maior relaxamento.

R4 Um indivíduo míope tem seu ponto remoto situado a 80 cm do olho. Quais devem ser as características da lente corretiva adequada para ele? Qual é sua vergência?

LUIZ RUBIO



► Resolução

O indivíduo míope tem seu ponto remoto deslocado do infinito para a distância de 80 cm. Isso significa que a lente corretiva deve deslocar a imagem que se forma na frente da retina para uma posição que coincida com o ponto remoto do olho, devendo por isso ser divergente. Como objetos no infinito têm imagens formadas no foco imagem das lentes divergentes, a imagem

será virtual. Podemos concluir que a lente de correção deve ter distância focal igual, em módulo, à distância do ponto remoto do olho, ou seja:

$$|f| = 80 \text{ cm} \Rightarrow f = -80 \text{ cm}$$

A vergência é dada por:

$$V = \frac{1}{f} \Rightarrow V = \frac{1}{0,8} \therefore V = -1,25 \text{ di}$$

Em linguagem usual, diríamos que a lente deveria ser de $-1,25$ grau.

R5 Garfield

Jim Davis



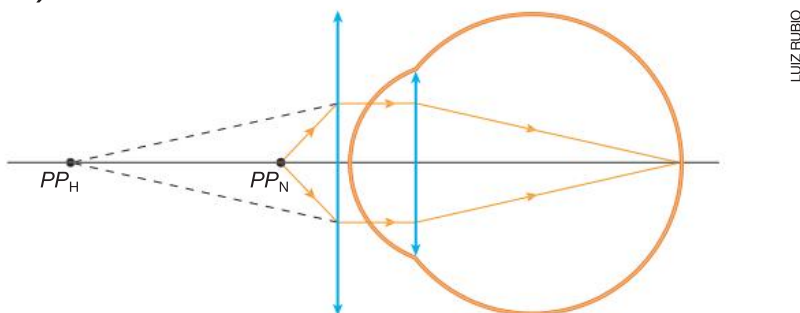
Suponha que a lente de Jon, o dono de Garfield, tenha sido receitada pelo médico para ter $+2,5$ graus. Qual é o seu problema de visão? Por quê?

Resolução

Trata-se de uma lente convergente, pois a vergência é positiva, o que significa $f > 0$. São duas as possibilidades: Jon pode ter hipermetropia ou presbiopia. Em ambos os casos, o ponto próximo de seus olhos se dá a uma distância maior que 25 cm .

- R6** Uma pessoa com hipermetropia não consegue enxergar com nitidez objetos situados a uma distância de seus olhos menor do que 50 cm . Encontre as características da lente corretiva que permite à pessoa ler um livro que está a 25 cm de seus olhos.

Resolução



A lente deve aumentar a vergência do sistema ocular, pois no olho hipermetrope a imagem é formada atrás da retina. Assim, a lente deve diminuir a distância focal do sistema óptico do olho de tal maneira que um objeto posicionado a 25 cm da lente corretiva forneça uma imagem virtual posicionada no ponto próximo da pessoa, ou seja, à distância de 50 cm da lente. Algebricamente, temos:

$$p = 25 \text{ cm}; p' = -50 \text{ cm}$$

Pela equação de Gauss:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{25} + \frac{1}{-50} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{2-1}{50} \therefore f = +50 \text{ cm}$$

que resulta em uma vergência igual a:

$$V = \frac{1}{f} \Rightarrow V = \frac{1}{0,5} \therefore V = +2,0 \text{ di}$$

O sinal $+$ indica uma lente convergente.

QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

5 Isa é míope, usa óculos, mas esqueceu qual é o tipo de lente que corrige seu problema de visão. Colocando as lentes dos óculos para visualizar o que está escrito em um livro, percebe que as letras são reduzidas e não invertidas. Qual é a lente utilizada nos óculos de Isa? Por quê?

6 Em uma receita preenchida por um médico oftalmologista, consta:

$$\text{Para perto} \begin{cases} \text{O. D.} +1,25 \\ \text{O. E.} +2,25 \end{cases}$$

Considere O. D., olho direito e O. E., olho esquerdo. Os olhos dessa pessoa podem apresentar miopia? Por quê? E presbiopia? Por quê?

7 O olho humano é um sofisticado sistema óptico que pode sofrer pequenas variações na sua estrutura, ocasionando os defeitos da visão.

Com base em seus conhecimentos, analise as afirmativas a seguir.

- I. No olho míope, a imagem nítida se forma atrás da retina, e esse defeito da visão é corrigido usando uma lente divergente.
- II. No olho com hipermetropia, a imagem nítida se forma atrás da retina, e esse defeito da visão é corrigido usando uma lente convergente.
- III. No olho com astigmatismo, que consiste na perda da focalização em determinadas direções, a sua correção é feita com lentes cilíndricas.
- IV. No olho com presbiopia, ocorre uma dificuldade de acomodação do cristalino, e esse defeito da visão é corrigido com o uso de uma lente divergente.

Quais delas são verdadeiras? Justifique sua escolha.

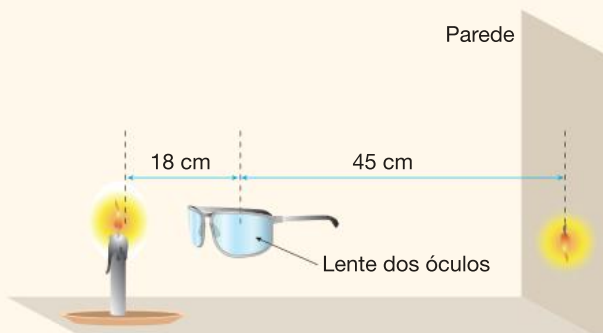
8 Ao analisar as lentes dos óculos de várias pessoas, um estudante anotou as seguintes conclusões:

- I. Observando os óculos de uma pessoa, verificamos que eles produziam o efeito de aumentar os olhos e a face dela; portanto, suas lentes são convergentes.
- II. Sempre que olhávamos objetos através das lentes de determinados óculos, para qualquer distância entre os objetos e as lentes, os objetos nos pareciam diminuídos; portanto, suas lentes são usadas para corrigir o defeito da miopia.

III. Certos óculos podiam ser usados para concentrar os raios do Sol e queimar uma folha de papel; portanto, suas lentes são usadas para corrigir o defeito da hipermetropia.

Quais delas são verdadeiras? Justifique.

9 Tina é uma jovem de 15 anos. Certo dia observa que, com uma das duas lentes iguais de seus óculos, consegue projetar sobre uma parede a imagem da chama de uma vela localizada a 18 cm da lente. Sabe-se que a distância da lente à parede é de 45 cm.



- a) Qual é a distância focal dessa lente?
- b) Qual é o provável problema de visão de Tina? Justifique.

10 O ponto próximo de uma pessoa idosa está a 1 m de seus olhos. Qual deve ser a vergência, em dioptrias, da lente de correção que essa pessoa deve usar para que possa ler um livro a 25 cm de distância?

11 O ponto remoto corresponde à maior distância em que pode ser visto um objeto com nitidez, ou seja, tendo sua imagem focalizada na retina. Para um olho míope, o ponto remoto, que normalmente está no infinito, fica bem próximo dos olhos.

- a) Que tipo de lente o míope deve usar para corrigir esse problema?
- b) Qual é a distância focal de uma lente para corrigir a miopia de uma pessoa cujo ponto remoto está a 30 cm do olho? A quantos "graus" esse valor equivale?

12 (Uerj) Um jovem com visão perfeita observa um inseto pousado sobre uma parede na altura de seus olhos. A distância entre os olhos e o inseto é de 3 metros. Considere que o inseto tenha 3 mm de tamanho e que a distância entre a córnea e a retina, onde se forma a imagem, é igual a 20 mm. Determine o tamanho da imagem do inseto.

O efeito Cherenkov

Até agora dissemos que nenhum objeto ou informação pode se deslocar com velocidade superior à da luz no vácuo. Essa é uma consequência de um postulado da teoria da relatividade especial de Einstein.

Nesta unidade, aprendemos que, quando a luz muda seu meio de propagação, sua velocidade se altera, fenômeno que associamos à refração da luz.

Então, podemos fazer a seguinte pergunta: pode haver algum objeto que se mova em determinado meio com velocidade superior à da luz naquele meio? A resposta é sim! Um elétron rápido, isto é, muito energético, é capaz de superar 224.900 quilômetros por segundo, exatamente a velocidade da luz na água. Um elétron, ao atravessar um depósito cheio de água, pode apresentar uma velocidade maior que a da luz nesse meio e produzir uma emissão de luz azulada. Esse efeito ficou conhecido como **efeito Cherenkov**, em homenagem ao físico russo Pavel Alexeievich Cherenkov, que o descobriu em 1933.

A luz produzida nesse fenômeno é facilmente observada em tanques de reatores nucleares e é largamente utilizada como forma de detectar partículas muito energéticas. Tanques de água com células fotoelétricas registram a passagem dessas partículas vindas do espaço exterior. É o que acontece no observatório de detecção de raios cósmicos, localizado em um deserto na Argentina: o observatório Auger, construído por um consórcio de 19 países, incluindo o Brasil. Ele é composto de uma rede de 1.600 tanques de luz Cherenkov. O projeto e a construção desses tanques ficaram a cargo de cientistas e empresas brasileiras que participaram do consórcio.

AMPLIANDO SUA LEITURA

- 1 O texto aborda basicamente duas ideias: nenhum objeto ou informação pode se deslocar com velocidade superior à da luz no vácuo e elétrons muito energéticos podem atingir velocidades superiores à da luz. As duas afirmações são contraditórias? Justifique sua resposta.
- 2 De que maneira os tanques do observatório Auger detectam a radiação Cherenkov?



PATRICK LANDMANN/SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

Fundo de um poço de um reator nuclear onde se observa a luz Cherenkov (luz azulada).

Tanque de detecção de luz Cherenkov do observatório Auger (Pampa Amarilla, Argentina).



PIERRE AUGER OBSERVATORY

Uma lente de água

O objetivo da atividade é produzir uma lente de aumento com grande capacidade de ampliação utilizando materiais fáceis de obter. Para isso, você precisará de um apontador *laser*, facilmente encontrado em bancas de jornal ou papelarias, e de uma seringa descartável.

Procedimento

- 1 Encha a seringa com água da torneira. Quanto mais impurezas houver na água melhor, pois poderemos observar muitos microrganismos com a lente. Você pode acrescentar uma pequena quantidade de terra fina à água.
- 2 Aperte vagarosamente o êmbolo da seringa para que comece a se formar uma gota na ponta da seringa, mas não a deixe cair.
- 3 Agora, posicionado em frente a uma parede branca, apoie a seringa na borda de dois copos, pelas abas laterais (veja a figura). A parede branca servirá para projetar a imagem fornecida pela lente.



- 4 Apoie o apontador *laser* sobre uma mesa ou outro suporte em frente à seringa e direcione o feixe de luz para que passe através da gota. Você pode ajustar a altura do apontador usando livros ou cadernos. Desligue as luzes do ambiente e observe a imagem projetada na parede. Responda às questões a seguir.

Questões

- 1 Qual é a natureza da imagem conjugada pela gota? Ela funciona como uma lente convergente ou divergente? Justifique sua resposta.
- 2 A imagem projetada na parede é direita ou invertida? Justifique sua resposta.

... ler no escuro faz mal à visão?

Você provavelmente já ouviu alguém dizer: "Não leia no escuro porque faz mal para a vista!". Algumas pessoas acham que ler em um local mal iluminado prejudica a visão, provocando alguns dos problemas vistos nesta unidade. A opinião mais comum é que se adquire, prematuramente, a presbiopia. Talvez isso explique por que essa deficiência de visão seja conhecida popularmente como "vista cansada". Mas ler em um ambiente pouco iluminado faz realmente mal à visão?

Para descobrir se há algum fundo de verdade nessa convicção de algumas pessoas, convidamos você e seu grupo a responder às questões a seguir.

DMYTRO VIETROV/SHUTTERSTOCK



Questões para discussão em grupo

- 1 Pergunte a amigos e familiares se eles acham que ler um livro no escuro faz mal à visão e como justificam suas opiniões. Anote os diferentes pontos de vista.
- 2 Nesta unidade, vimos que a íris e a pupila exercem a função de regular a entrada da luz em nossos olhos. A retina tem função de coletar a luz. Pesquise com seu grupo como a retina é constituída e a função de cada uma de suas partes.
- 3 Pesquise com seu grupo quais seriam os sintomas que a leitura no escuro poderia provocar.
- 4 Discuta com seu grupo se há relação entre pouca luz e os defeitos da visão.



Socialize

Você e seu grupo vão aplicar um teste em alguns amigos e familiares para verificar se algum deles tem presbiopia. Selecione cinco pessoas de cada faixa etária que ainda não usem óculos para ler e recorte uma notícia de revista ou jornal para testá-las. As referências para o teste são estas: um de seus colegas deve conseguir ler a notícia a, no máximo, 12 cm de distância dos olhos; uma pessoa na faixa de 30 anos deve ler a notícia à distância de 20 cm; uma pessoa acima dos 40 anos, aproximadamente, 40 cm; se a pessoa tiver dificuldade, vá aumentando a distância até que ela consiga ler. À medida que você aplica o teste, anote o resultado em uma tabela idade \times distância de leitura. Ao finalizar o teste, construa um gráfico com os dados da tabela. Ambos serão utilizados para discussão em sala de aula.

S25

No *Suplemento*, há alguns dados relativos às questões para discussão e ao "Socialize".

- 1 (Enem) As miragens existem e podem induzir à percepção de que há água onde não existe. Elas são a manifestação de um fenômeno óptico que ocorre na atmosfera.

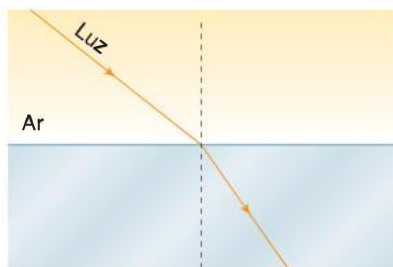
Esse fenômeno óptico é consequência da:

- a) refração da luz nas camadas de ar próximas do chão quente.
- b) reflexão da luz ao incidir no solo quente.
- c) reflexão difusa da luz na superfície rugosa.
- d) dispersão da luz nas camadas de ar próximas do chão quente.
- e) difração da luz nas camadas de ar próximas do chão quente.

- 2 (UFSCar-SP) Durante o dia, uma pessoa dentro de casa olha através do vidro de uma janela e enxerga o que está do lado de fora. À noite, a pessoa olha através da mesma janela e enxerga sua imagem refletida pelo vidro, não enxergando o que está do lado de fora. A alternativa que melhor explica a situação descrita é:

- a) O índice de refração da luz no meio externo à janela é maior à noite do que durante o dia.
- b) O índice de refração da luz no meio externo à janela é menor à noite do que durante o dia.
- c) Durante o dia, a luz que atravessa o vidro da janela, proveniente dos objetos localizados no exterior da casa, é muito mais intensa que a luz refletida pelo vidro da janela, proveniente dos objetos no interior da casa.
- d) Durante o dia, a polarização da luz no vidro da janela é positiva e permite que se enxergue o lado de fora.
- e) Durante a noite, a polarização da luz no vidro da janela é negativa e não permite que se enxergue o lado de fora.

- 3 (Mackenzie-SP) Um raio de luz monocromático que se propaga no ar (índice de refração = 1) atinge a superfície de separação com um meio homogêneo e transparente, sob determinado ângulo de incidência, diferente de 0° . Considerando os meios da tabela abaixo, aquele para o qual o raio luminoso tem o menor desvio é a/o:

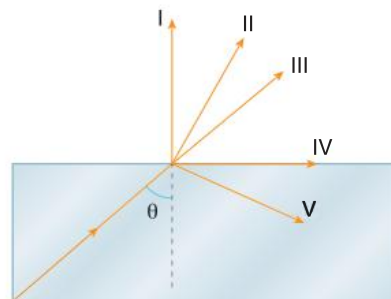


- a) água.
- b) álcool etílico.
- c) diamante.
- d) glicerina.
- e) vidro comum.

- 4 (UFPA) O desvio angular sofrido por um raio de luz que incide segundo o ângulo de 60° com a normal à superfície de uma lâmina de faces paralelas, após atravessá-la é de:

- a) 0°
- b) 15°
- c) 30°
- d) 60°
- e) 120°

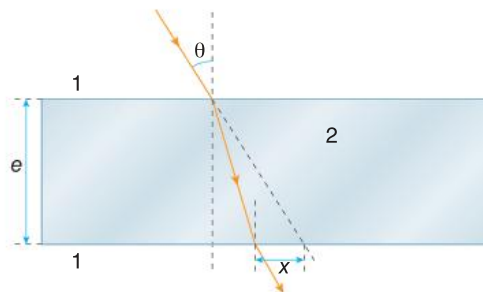
- 5 (PUC-PR) A figura mostra um arranjo experimental. No fundo do vaso, uma fonte pontual emite um raio que se desloca na água e atinge a superfície dióptrica.



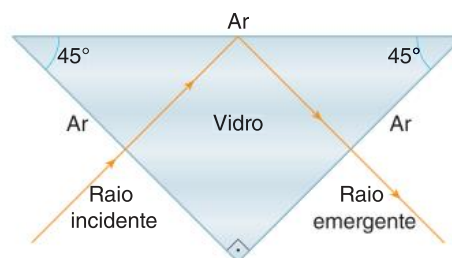
Considerando o ângulo θ como ângulo limite, o raio emergente é o raio:

- a) IV
- b) V
- c) I
- d) II
- e) III

- 6 (UnB-DF) Um feixe de luz passa do meio 1 (ar) para um meio 2 e chega novamente ao meio 1, conforme a figura. A linha tracejada representa um prolongamento do feixe incidente. Sendo $\theta = 30^\circ$, $e = 2\sqrt{3}$, $x = 1$, calcule o índice de refração do meio 2.



- 7 (Fuvest-SP) Alguns instrumentos de óptica utilizam "prismas de reflexão total" como espelhos, como no caso da figura.



O valor do índice de refração do vidro desse prisma deve ser maior que:

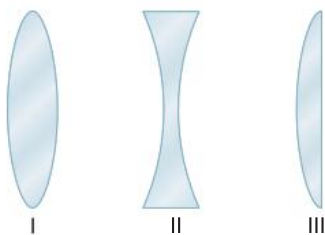
- a) 2,00
- b) 1,73
- c) 1,41
- d) 1,00
- e) 0,707

- 8 (PUC-SP) Na figura, a imagem de um livro é observada através de um instrumento óptico.

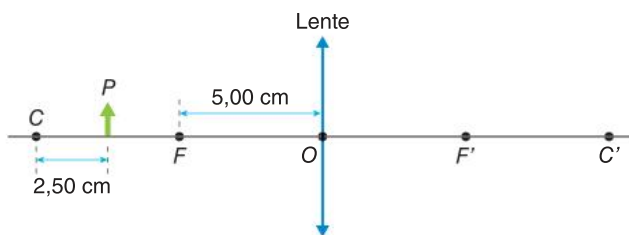


Então ela será:

- a) real, formada por uma lente divergente, com o objeto (livro) colocado entre o foco objeto e a lente.
 - b) virtual, formada por uma lente convergente, com o objeto (livro) colocado entre o foco objeto e a lente.
 - c) virtual, formada por uma lente divergente, com o objeto (livro) colocado entre o foco objeto e a lente.
 - d) real, formada por uma lente convergente, com o objeto (livro) colocado entre o foco objeto e o ponto antiprincipal objeto da lente.
 - e) virtual, formada por uma lente convergente, com o objeto (livro) colocado sobre o foco objeto da lente.
- 9 (UFMG) Na figura, está representado o perfil de três lentes de vidro. Rafael quer usar essas lentes para queimar uma folha de papel com a luz do sol. Para isso, ele pode usar apenas:



- a) a lente I.
 - b) a lente II.
 - c) as lentes I e III.
 - d) as lentes II e III.
 - e) as lentes I, II e III.
- 10 (Mackenzie-SP) A figura ilustra o esquema, sem escala, de um pequeno objeto real P , situado sobre o eixo principal de uma lente delgada convergente, com os respectivos focos principais, F e F' , e pontos antiprincipais, C e C' .



A imagem conjugada de P é _____, _____ e de altura _____ que a do objeto. A alternativa que preenche, corretamente, na ordem correta de leitura, as lacunas do texto é:

- a) virtual, direita, igual ao dobro.
 - b) virtual, invertida, igual ao triplo.
 - c) real, direita, igual ao dobro.
 - d) real, invertida, igual ao triplo.
 - e) real, invertida, igual ao dobro.
- 11 (UFU-MG) A objetiva de uma máquina fotográfica tem distância focal 100 mm e possui um dispositivo que permite seu avanço ou retrocesso. A máquina é utilizada para tirar duas fotos: uma de um objeto no infinito e outra de um objeto distante 30 cm da objetiva. O deslocamento da objetiva, de uma foto para outra, em mm, foi de:
- a) 50
 - b) 100
 - c) 150
 - d) 200
 - e) 250
- 12 (UFU-MG) Uma lupa, quando produz uma imagem a 30 cm da lente, para fornecer um aumento linear transversal de 16 vezes, deve ter sua distância focal de:
- a) 2 cm
 - b) 2,5 cm
 - c) 3 cm
 - d) 3,5 cm
 - e) 4 cm
- 13 (Cesgranrio-RJ) A vergência ou "grau" de uma lente de óculos, expressa em dioptrias (di), equivale ao inverso da distância focal (f), medida em metros. Uma pessoa com hipermetropia, para ver com nitidez um objeto colocado a 25 cm de seus olhos, precisa usar óculos de leitura de "grau" 2 di positivas. A distância mínima, em centímetros, para que essa pessoa, quando sem óculos, veja um objeto com nitidez é de:
- a) 20
 - b) 30
 - c) 40
 - d) 50
 - e) 80
- 14 (PUC-MG) Uma pessoa não consegue ver os objetos, pois a imagem está sendo formada entre o cristalino e a retina. Para ver a imagem nitidamente, essa pessoa deverá usar óculos:
- a) com lentes divergentes.
 - b) com lentes convergentes.
 - c) com lentes convergentes e divergentes, simultaneamente.
 - d) com duas lentes convergentes.
- 15 (Unicamp-SP) Um sistema de lentes produz a imagem real e menor de um objeto, conforme a figura a seguir. Localize a lente, sua distância focal e esboce dois raios de luz que identificam a imagem.



UNIDADE

5

Oscilações e ondas

Para começo de conversa

É possível estar em um *show de rock* e não escutar a música?

S1

Professor, consulte o *Suplemento* para obter orientações sobre a questão introdutória, os objetivos desta unidade e a proposta de abordagem inicial dos conteúdos.

O fenômeno da interferência, tanto construtiva como destrutiva, pode formar regiões de reforço inadequado do som, bem como de ausência dele. Assim, é possível estar em um *show de rock* e não conseguir escutar a música.

Show de rock
ao ar livre, Barcelona, 2012.

Os fenômenos ondulatórios inundam nossa vida

O número de fenômenos físicos que envolvem o movimento ondulatório é muito grande e diversificado. A variedade de sons produzidos pelos instrumentos musicais baseia-se na superposição de *ondas estacionárias*, tanto nas cordas de instrumentos como a guitarra e o piano quanto na coluna de ar dos tubos que formam os instrumentos de sopro e nas superfícies vibrantes dos instrumentos de percussão. No entanto, o que nos emociona na música está além da Física.

ARRIBA TEJO/SHUTTERSTOCK

Capítulos

- 17 Fenômenos ondulatórios
- 18 Fenômenos sonoros: a música e o efeito Doppler

Fenômenos ondulatórios

ou: Por que a suspensão de um automóvel necessita de amortecedores associados às molas para funcionar?

Os sistemas de suspensão de automóveis são formados basicamente por molas e amortecedores. Se esse sistema fosse composto apenas de molas, ao passar por buracos ou lombadas, ele permaneceria oscilando por muito tempo. O amortecedor tem a função de dissipar a energia de oscilação das molas mais rapidamente.

1 Introdução

Quando dizemos que um objeto oscila, quase sempre imaginamos um movimento com características específicas: o objeto vai de um lado para o outro, repetindo a mesma trajetória. Se a trajetória é percorrida sempre da mesma maneira, no mesmo intervalo de tempo, trata-se de um movimento periódico. Como exemplos, temos o movimento de um balanço infantil, do pêndulo de um relógio ou das cordas de um instrumento musical como o violino (fig. 1).

S2

No Suplemento, há orientações para o trabalho com a questão introdutória.

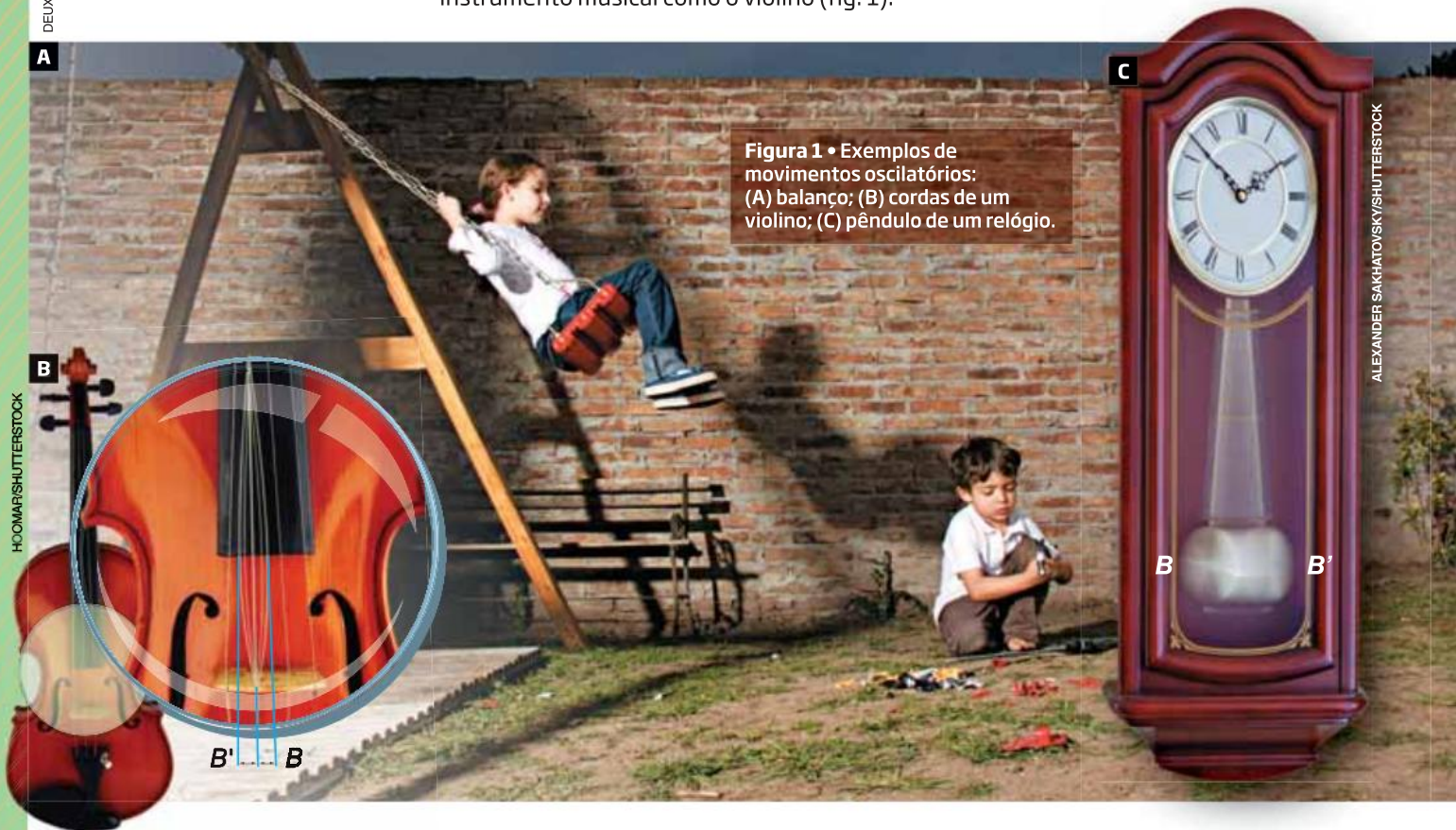


Figura 1 • Exemplos de movimentos oscilatórios: (A) balanço; (B) cordas de um violino; (C) pêndulo de um relógio.

Tanto no exemplo do violino quanto do relógio, a corda e o pêndulo executam **movimento oscilatório**. Nesse movimento oscilatório, os pontos **B** e **B'** são chamados de **pontos de retorno**.

Há uma variedade imensa de sistemas que executam movimentos com essas características, desde átomos vibrando em torno de suas posições fixas em um corpo sólido (fig. 2) até pontes e edifícios. Por isso os movimentos oscilatórios são tão importantes para a Física.

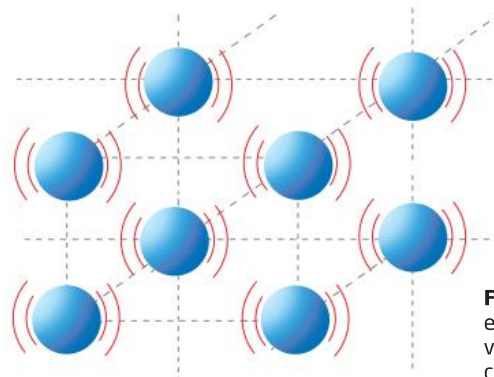


Figura 2 • Representação esquemática dos átomos vibrando em uma rede cristalina.

2 O oscilador massa-mola

Os físicos criaram um modelo simples para o estudo do movimento oscilatório. Esse modelo é constituído de um bloco com certa massa m preso a uma mola de constante elástica k . Todo o conjunto está sobre um plano horizontal sem atrito, inicialmente em repouso (fig. 3). Quando comprimimos ou distendemos a mola, o bloco passa a oscilar em torno desse ponto de repouso do sistema, em uma trajetória retilínea.

Considerando o bloco como um ponto material, a origem do referencial será a posição desse ponto material quando a mola não está comprimida ou distendida (fig. 3).

Se, por exemplo, comprimimos a mola, o bloco passa a oscilar, invertendo o sentido do movimento nos pontos B' e B , que são chamados de pontos de retorno do movimento. Um ciclo do movimento se completa quando o bloco vai, por exemplo, de um ponto de retorno ao outro e volta para o mesmo ponto (fig. 4).

Definimos a distância entre a posição de equilíbrio e o ponto extremo da trajetória de um corpo em movimento oscilatório como a amplitude A do movimento.

Como estamos desconsiderando a força de atrito, a única força responsável por esse movimento é a força elástica da mola, cuja intensidade é diretamente proporcional à deformação que ela sofre:

$$F = -k \cdot x$$

O sinal negativo indica que a força é do tipo restauradora, fazendo com que o corpo retorne à posição de equilíbrio do sistema. Note que o bloco ocupa, alternadamente, posições de abscissa positiva e negativa. Quando o bloco está como na figura 4C, o valor de x é negativo, tornando o valor de F positivo, o que está de acordo com a orientação positiva do eixo x . Quando o bloco está como na figura 4B, x assume valores positivos, fazendo com que o valor de F seja negativo. Isso indica que a força restauradora está no sentido oposto ao da orientação positiva do eixo x .

Um movimento em que a força restauradora depende apenas da posição do sistema é chamado de **movimento harmônico simples**; vamos usar simplesmente **MHS**.

3 O pêndulo simples

O pêndulo simples é um sistema composto de uma massa presa à extremidade de um fio (fig. 5). A outra extremidade é fixada ao teto, por exemplo, de maneira que a massa possa oscilar.

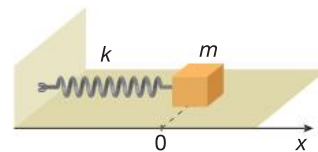
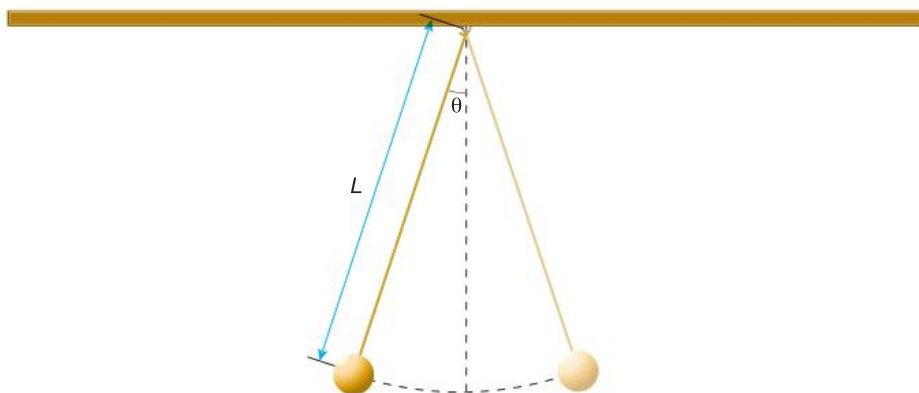


Figura 3 • Para iniciar o estudo do movimento oscilatório a partir do sistema massa-mola, definimos o referencial como o eixo das abscissas (x), paralelo à trajetória do bloco, uma vez que o movimento ocorre em uma dimensão.

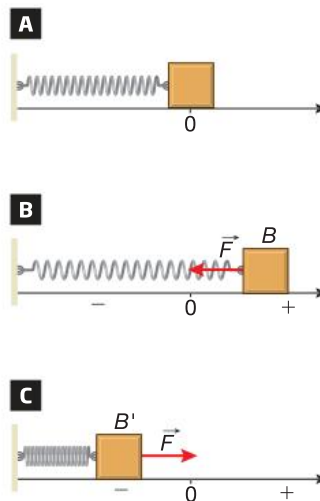


Figura 4 • O movimento do sistema massa-mola fica restrito pelos pontos B' e B .

S3

No *Suplemento*, há indicação de site que contém um programa de simulação do movimento de um pêndulo.

Figura 5 • O movimento de um pêndulo simples pode ser considerado um MHS para pequenos deslocamentos angulares.

Embora se trate de um movimento oscilatório, para grandes deslocamentos angulares, o movimento de um pêndulo não é um MHS porque sua trajetória não é retilínea. Mas, então, por que discuti-lo no capítulo dedicado ao MHS?

Para pequenos deslocamentos angulares (menores que 10°), podemos considerar retilínea a trajetória curva do pêndulo (fig. 6).

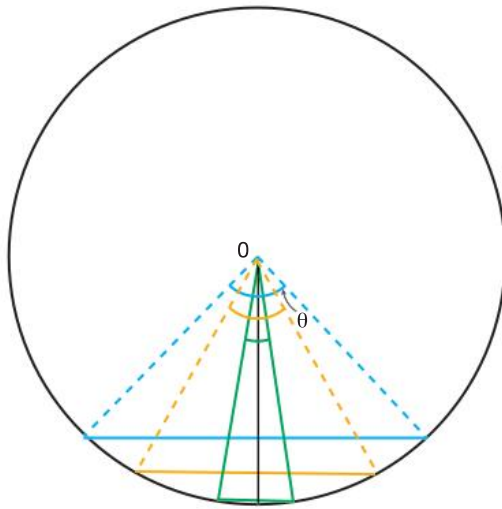


Figura 6 • À medida que o ângulo θ (inicialmente em azul) diminui, a corda aproxima-se do tamanho do arco até eles se tornarem praticamente iguais (corda em verde). Por essa razão, para ângulos pequenos ($\sin \theta \approx \theta$), podemos considerar a trajetória aproximadamente retilínea.

No entanto, isso não garante que o movimento seja um MHS. Para isso, a aceleração do movimento deve depender da posição do pêndulo. Essa relação é dada por:

$$a = -\left(\frac{g}{L}\right) \cdot x$$

em que g é a aceleração local da gravidade e L é o comprimento do pêndulo. Assim, o movimento aproximado para pequenas oscilações do pêndulo simples é um MHS.

O período de oscilação no MHS refere-se ao tempo em que determinado corpo efetua uma oscilação completa. Ou seja, é o tempo gasto por um corpo para, ao ser abandonado do ponto de amplitude máxima, passar pela posição de equilíbrio, atingir a amplitude máxima oposta e retornar até o ponto de partida. Já o valor da frequência pode ser obtido por meio do cálculo do inverso do período.

As expressões para o cálculo do valor da frequência e do período do pêndulo simples, em relação aos parâmetros físicos do sistema, são:

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{L}}$$

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Intuitivamente, poderíamos pensar que, quanto maior a massa presa à extremidade do fio, mais rapidamente o pêndulo oscilaria, ou seja, maior seria sua frequência e menor seu período. No entanto, analisando as expressões para a frequência e o período, notamos que elas não dependem da massa do pêndulo. Essas grandezas dependem apenas da aceleração da gravidade local (g) e do comprimento do pêndulo (L). É importante lembrar que essas expressões foram deduzidas a partir de uma aproximação para pequenos ângulos.

Quanto maior é o comprimento do pêndulo, menor a sua frequência de oscilação e, conseqüentemente, maior é o seu período. Em relação à aceleração da gravidade local, observamos que ocorre o oposto, ou seja, em um planeta com aceleração da gravidade maior que a aceleração da gravidade terrestre ($\approx 9,8 \text{ m/s}^2$), um relógio de pêndulo adiantaria em relação a um relógio idêntico na Terra, pois seu período seria menor e sua frequência maior. Isso significa que ele bateria um número maior de vezes por unidade de tempo.

QUESTÕES RESOLVIDAS

- R1** a) Qual é o período de um pêndulo simples cujo comprimento é 1,8 m e que realiza pequenas oscilações em um local com módulo de aceleração da gravidade de 10 m/s^2 ? Despreze os efeitos de resistência do ar e considere $\pi = 3$.
- b) Qual é a frequência de oscilação desse pêndulo?

► Resolução

a) O período do pêndulo simples é:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g}} \Rightarrow T = 2 \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{1,8}{10}} \therefore T \approx 2,5 \text{ s}$$

b) A frequência pode ser obtida pela relação entre frequência e período:

$$f = \frac{1}{T} \Rightarrow f \approx \frac{1}{2,5} \therefore f \approx 0,4 \text{ Hz}$$

- R2** Determine o período e a frequência de um relógio de pêndulo cuja haste mede 0,9 m e que realiza pequenas oscilações em um local cuja aceleração da gravidade é de 10 m/s^2 . Despreze os efeitos de resistência do ar e considere $\pi = 3$.

► Resolução

Sabemos que o período de um pêndulo é dado pela relação:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Substituindo os valores na expressão acima, temos:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{0,9}{10}} \Rightarrow T = 2\pi \cdot \sqrt{0,09} \therefore T = 1,8 \text{ s}$$

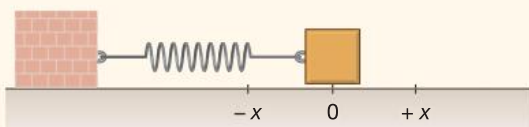
Sendo a frequência o inverso do período, temos:

$$f = \frac{1}{T} \Rightarrow f = \frac{1}{1,8} \therefore f \approx 0,56 \text{ Hz}$$

QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

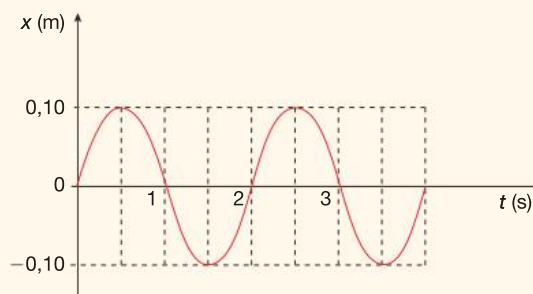
- 1** Uma partícula de massa m , presa à extremidade de uma mola, oscila num plano horizontal de atrito desprezível, em trajetória retilínea em torno do ponto de equilíbrio.



Considere a afirmação: "O movimento é harmônico simples e, por essa razão, o corpo realiza MRUV".

A afirmação é falsa ou verdadeira? Justifique sua resposta.

- 2** A partir do gráfico a seguir, determine a amplitude e os instantes, durante os quatro primeiros segundos, em que a velocidade se anulou.



3 Dois pêndulos simples, com características diferentes, são construídos: o primeiro tem o dobro da massa e a metade do comprimento do segundo. Em relação à frequência de oscilação desses pêndulos, são feitas as seguintes afirmações:

- I. Por causa de sua massa maior, o período do primeiro pêndulo é o dobro do período do segundo pêndulo.
- II. Por causa de seu maior comprimento, o período do segundo pêndulo é a metade do período do primeiro pêndulo.
- III. A massa de um pêndulo não interfere no seu período.

Há afirmativa(s) correta(s)? Quais?

4 Em um laboratório, três estudantes discutem a respeito de uma experiência envolvendo um pêndulo simples. O primeiro estudante acha que, se a amplitude de oscilação do pêndulo dobrar, seu período dobrará. O segundo estudante, ao contrário do primeiro, acha que o período cairá pela metade. O terceiro acha que o período do pêndulo não é afetado pela amplitude de oscilação. Qual deles está correto?

- a) O primeiro estudante.
- b) O segundo estudante.
- c) O terceiro estudante.
- d) Nenhum deles.

5 Uma pessoa observa o lustre do teto de uma catedral e percebe que uma corrente de ar entra pela porta e provoca oscilações no lustre. Após fechar a porta, a pessoa contabiliza 10 oscilações de pequena amplitude a cada 5 s. Com esse dado e sabendo que o valor da aceleração da gravidade local é de 10 m/s^2 , essa pessoa descobriu a distância da ponta do lustre até o teto. Qual é esse valor?

6 (Enem) Christiaan Huygens, em 1656, criou o relógio de pêndulo. Nesse dispositivo, a pontualidade baseia-se na regularidade das pequenas oscilações do pêndulo. Para manter a precisão desse relógio, diversos problemas foram contor-

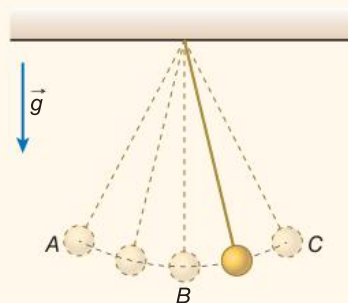
nados. Por exemplo, a haste passou por ajustes até que, no início do século XX, houve uma inovação, que foi sua fabricação usando uma liga metálica que se comporta regularmente em um largo intervalo de temperaturas.

YODER, J. G. *Unrolling Time: Christiaan Huygens and the mathematization of nature*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004 (adaptado).

Desprezando a presença de forças dissipativas e considerando a aceleração da gravidade constante, para que esse tipo de relógio realize corretamente a contagem do tempo, é necessário que o(a):

- a) comprimento da haste seja mantido constante.
- b) massa do corpo suspenso pela haste seja pequena.
- c) material da haste possua alta condutividade térmica.
- d) amplitude da oscilação seja constante a qualquer temperatura.
- e) energia potencial gravitacional do corpo suspenso se mantenha constante.

7 (UPE) Um pêndulo é solto a partir do repouso e o seu movimento subsequente é mostrado na figura.



ADILSON SECCO

Sabendo que ele gasta 2,0 s para percorrer a distância AC, é **CORRETO** afirmar que sua amplitude e frequência valem, respectivamente:

- a) AC e 0,12 Hz
- b) AB e 0,25 Hz
- c) BC e 1,0 Hz
- d) BA e 2,0 Hz
- e) BC e 4,0 Hz

4 Onda em uma corda: ondas unidimensionais

Propagação de um pulso

Imagine que estamos segurando a extremidade de uma corda mantendo-a tensionada, enquanto a outra extremidade fica presa a uma parede (fig. 7A, na página seguinte).

Se fizermos um movimento brusco com a mão na direção vertical, vamos ver essa perturbação se propagar pela corda (fig. 7B). Essa perturbação é também chamada de **pulso** e é uma reprodução do movimento da mão pelos pontos da corda.

No entanto, o mais interessante é que, embora o movimento dos pontos da corda ocorra também na direção vertical, podemos ver o pulso caminhando com certa velocidade pela corda na direção perpendicular (fig. 7C).

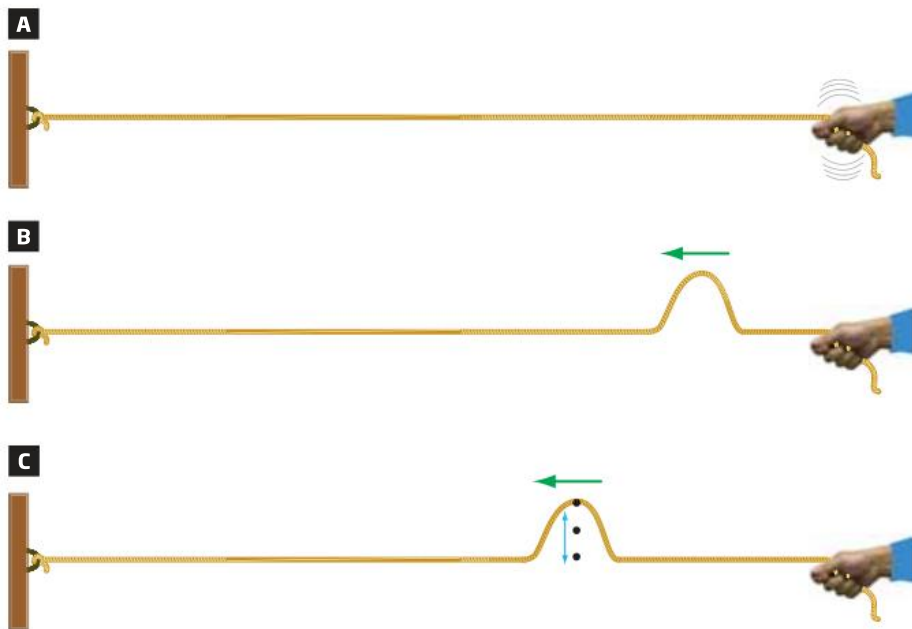


Figura 7 • (A) A corda tensionada é um meio material de propagação de ondas unidimensionais. (B) O movimento da mão da pessoa gera um pulso na corda. (C) Os pontos da corda copiam o movimento vertical da mão.

Concluimos, portanto, que os pontos da corda não sofrem deslocamento horizontal enquanto o pulso caminha por ela. Isso significa que, apesar de transportar a energia inicial fornecida pela mão, o pulso não transporta matéria, pois os pontos da corda permanecem na mesma vertical.

Onda como uma sequência de pulsos

Se fizermos uma sequência de movimentos verticais com a mão, provocaremos uma série de pulsos que vão se propagar ao longo da corda. Essa série de perturbações forma o que chamamos de **onda**. Na figura 8, podemos observar algumas características que definem uma onda.

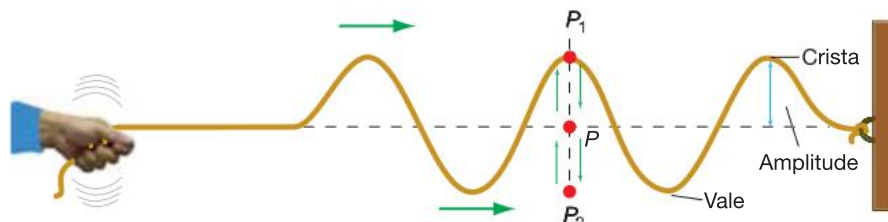


Figura 8 • Características: cristas, vales e amplitude de uma onda.

Os pontos mais altos dos pulsos, como o ponto P_1 , são chamados de **cristas da onda**.

Os pontos mais baixos dos pulsos, como o ponto P_2 , são chamados de **vales da onda**.

Agora, vamos analisar o movimento de um ponto qualquer da corda, inicialmente em repouso em P . À medida que os pulsos caminham por ela, esse ponto realiza apenas movimento vertical (fig. 9). O ponto da corda vai, então, de P até P_1 , voltando a P , quando o pulso superior termina de passar. Na sequência, um pulso inferior leva o ponto da corda de P até P_2 , retornando a P .

A distância de P até P_1 ou de P até P_2 é definida como **amplitude da onda**. O número de vezes por segundo que o ponto da corda realiza a trajetória completa (saindo de P e retornando a P , passando por P_1 e P_2) define a frequência de vibração desse ponto e, portanto, a **frequência da onda**.

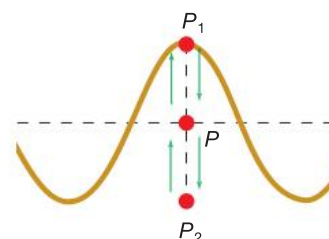


Figura 9 • Movimento vertical do ponto P da corda.

A amplitude e a frequência de uma onda em um meio qualquer (corda) são definidas pela amplitude e pela frequência de qualquer um dos pontos desse meio no qual a onda se propaga.

A partir da situação analisada acima, podemos extrair outra propriedade importante do movimento ondulatório: a amplitude e a frequência da onda são determinadas pela fonte (nossa mão). Podemos alterar a frequência da onda à medida que variamos a frequência com que vibramos a extremidade da corda. O mesmo pode ser feito para a amplitude, bastando variar a amplitude do movimento feito pela mão.

O período da onda (T) é definido pelo tempo que o ponto da corda leva para sair de P e retornar a ele, passando por P_1 e P_2 .

Classificação das ondas

Na representação da onda formada em uma corda mostrada na figura 8, na página anterior, constatamos que, embora os pulsos se propaguem na direção horizontal, os pontos da corda se movimentam na direção vertical, perpendicular à propagação dos pulsos na corda. Ondas desse tipo são denominadas **ondas transversais**.

Mas é possível haver outro tipo de propagação? Imagine agora que, em vez de uma corda, estamos segurando a extremidade de uma mola, que está com a outra extremidade fixada em uma parede. Se fizermos uma sequência de movimentos horizontais com a mão, notaremos que os pontos da mola vão oscilar ao longo do próprio comprimento (fig. 10), paralelamente à direção do movimento da mão.

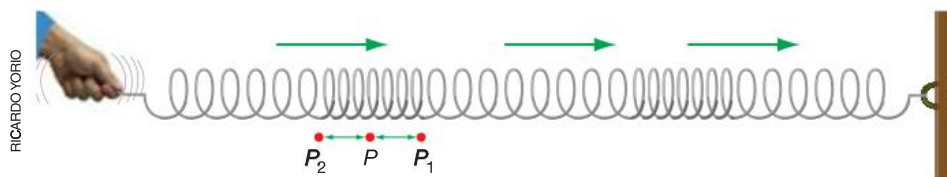


Figura 10 • O movimento oscilatório do ponto P agora acontece na direção horizontal.

Regiões de compressão e rarefação se deslocam ao longo da mola e a perturbação (ou pulso) se propaga ao longo dela. Nesse caso, a direção do movimento dos pontos da mola coincide com a direção de propagação dos pulsos (horizontal). Por essa razão, ondas desse tipo são chamadas de **ondas longitudinais**.

Resumindo:

Com relação à forma de propagação, as ondas podem ser classificadas em ondas transversais, quando as partículas do meio oscilam perpendicularmente à direção de propagação, ou ondas longitudinais, quando as partículas do meio oscilam na mesma direção de propagação da onda.

É importante observar que, nos dois casos, as partículas do meio realizam um movimento oscilatório, sendo sujeitas a uma força restauradora, exatamente como no movimento harmônico simples (MHS).

As ondas podem ser classificadas também quanto à sua natureza. A maioria das ondas analisadas aqui necessita de um meio material para se propagar. É o caso das ondas em uma corda, das ondas na água e das ondas sonoras. Esse tipo de onda que depende de um meio para sua propagação é denominado **onda mecânica**.

Existem ondas que não necessitam de um meio para se propagar. Essas ondas são produzidas a partir de fenômenos eletromagnéticos e, por essa razão, são chamadas de **ondas eletromagnéticas**.

Velocidade de propagação de uma onda

A velocidade de propagação de uma onda em um meio é determinada pela velocidade de propagação dos pulsos nesse meio. Assim, se provocamos um pulso em uma corda de certo comprimento L e medimos o tempo Δt gasto pelo pulso para percorrer essa distância, podemos determinar sua velocidade de propagação:

$$v = \frac{L}{\Delta t}$$

Se uma corda tem um comprimento de 10 m e os pulsos que formam uma onda gastam 2 s para percorrer essa distância, a velocidade da onda é de 5 m/s.

Comprimento de onda e equação fundamental da Ondulatória

Ao realizar um movimento completo, saindo do ponto *O*, indo até o ponto *B*, descendo até *B'* e retornando até *O*, a corda assume o formato representado na figura 11A.

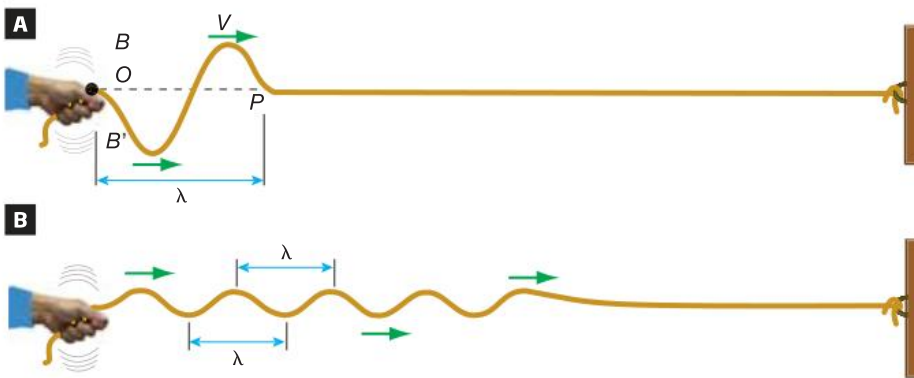


Figura 11 • (A) A distância percorrida pela onda no intervalo de tempo de um período *T* é o comprimento de onda λ . (B) A distância entre duas cristas sucessivas ou dois vales também é o comprimento de onda.

Vimos que o intervalo de tempo gasto para realizar uma oscilação completa é o período *T* da onda. Durante esse tempo, a onda se propaga do ponto *O* até o ponto *P* com certa velocidade constante \vec{v} . Essa distância percorrida pela onda, *OP*, é denominada **comprimento de onda**, que representamos pela letra grega λ (lambda). Podemos, então, concluir que a distância entre duas cristas ou dois vales sucessivos é igual ao comprimento de onda λ .

Com essas definições, obtemos uma equação bastante útil para o estudo dos fenômenos ondulatórios. Se a onda percorre uma distância λ em um intervalo de tempo *T*, então $L = \lambda$ e $\Delta t = T$. Considerando a velocidade da onda constante e lembrando que $f = \frac{1}{T}$, podemos escrever:

$$v = \frac{\lambda}{T} \Rightarrow v = \lambda \cdot f$$

Essa equação é conhecida como **equação fundamental da Ondulatória**. Uma vez que a velocidade de uma onda depende do meio no qual ela se propaga, essa velocidade deve ser constante se a onda não muda seu meio de propagação.

Então, se a frequência da onda se modifica porque a frequência da fonte foi alterada, o comprimento de onda deve se modificar de modo a manter a velocidade constante, uma vez que frequência e comprimento de onda são grandezas inversamente proporcionais (fig. 12).

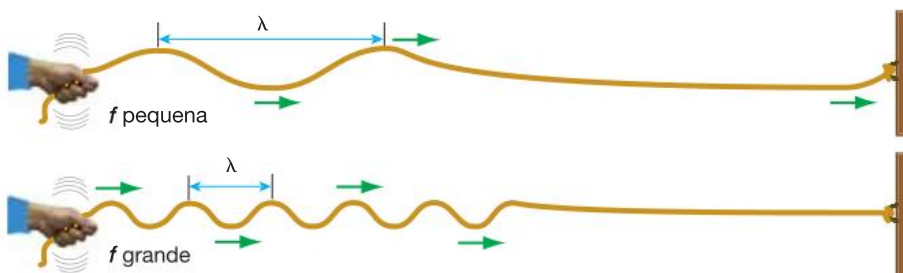


Figura 12 • Quanto maior o comprimento de onda, menor a frequência dos pulsos, sendo as duas grandezas inversamente proporcionais.

QUESTÕES RESOLVIDAS

- R3** Uma pessoa bate a mão na superfície de um lago. A figura representa o formato de uma das ondas produzidas em determinado instante. A velocidade de propagação dessa onda é de 32 cm/s. Qual é o comprimento de onda? E qual é sua frequência? Cada divisão do quadriculado corresponde a 8 cm.



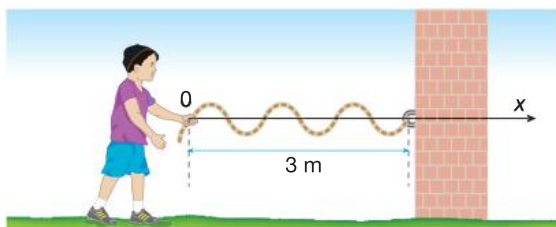
► Resolução

Podemos contar 2 divisões formando um comprimento de onda. Se cada divisão tem 8 cm, temos: $\lambda = 2 \cdot 8 \therefore \lambda = 16 \text{ cm}$

Podemos determinar a frequência pela equação fundamental da Ondulatória:

$$v = \lambda \cdot f \Rightarrow 32 = 16 \cdot f \therefore f = 2 \text{ Hz}$$

- R4** Um menino produz ondas em uma corda. Na figura, podemos ver o formato de uma onda produzida por ele em determinado instante. Determine a frequência e o período dessa onda, sabendo que sua velocidade é de 0,9 m/s.



► Resolução

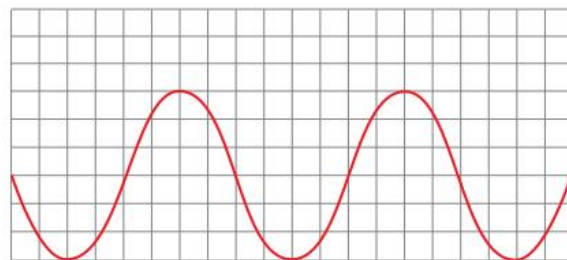
Podemos contar 3 comprimentos de onda inteiros na corda. Se o comprimento total da onda é de 3 m, $\lambda = 1 \text{ m}$. A frequência pode ser obtida da equação fundamental da Ondulatória:

$$v = \lambda \cdot f \Rightarrow f = \frac{0,9}{1} \therefore f = 0,9 \text{ Hz}$$

O período é o inverso da frequência:

$$T = \frac{1}{f} \Rightarrow T = \frac{1}{0,9} \Rightarrow T \approx 1,1 \text{ s}$$

- R5** Uma onda se propaga em uma corda tendo o seguinte aspecto em determinado instante de tempo.



Se a frequência da onda é de 15 Hz, qual é sua velocidade? Considere cada divisão da figura igual a 5 cm.

► Resolução

A distância entre as duas cristas é igual ao comprimento de onda. Existem 8 divisões, cada uma com 5 cm. Portanto, $\lambda = 8 \cdot 5 \text{ cm} = 40 \text{ cm}$. Utilizando a equação fundamental da Ondulatória, podemos calcular a velocidade da onda:

$$v = \lambda \cdot f \Rightarrow v = 0,40 \cdot 15 \therefore v = 6 \text{ m/s}$$

Mudança de meio de propagação

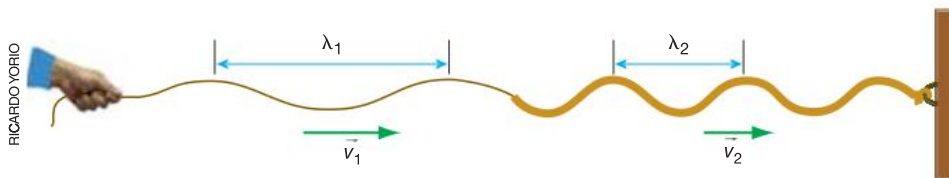
O que ocorre com uma onda quando ela muda seu meio de propagação? Vamos considerar pulsos que se propagam em uma corda com diferentes densidades: uma parte mais fina (menos densa) e outra mais grossa (mais densa) (fig. 13).



Figura 13 • Uma corda, com diferentes densidades, se comporta como dois meios de propagação diferentes.

Quando produzimos ondas nessa corda, os pulsos se propagam na parte mais fina com velocidade v_1 e atingem a parte mais grossa, passando então a se propagar com velocidade v_2 , sendo $v_2 < v_1$. Dizemos, então, que a onda sofreu **refração**, que é a mudança de velocidade quando a onda passa de um meio para outro. As partes da corda com diferentes espessuras funcionam como meios diferentes.

Se a velocidade da onda se modificou quando ela mudou de meio, o que aconteceu com a frequência e o comprimento de onda? A partir da equação fundamental da Ondulatória ($v = \lambda \cdot f$), podemos pensar que os dois parâmetros ou apenas um deles se modifica para que haja alteração na velocidade da onda. No entanto, a frequência se mantém igual na parte mais fina e na parte mais grossa da corda. Assim, para que a velocidade diminua, é necessário que o comprimento de onda se modifique, tornando-se menor na parte mais grossa da corda ($\lambda_2 < \lambda_1$) (fig. 14).



Chame a atenção dos alunos para o ponto de união entre as duas cordas. Se as frequências delas fossem diferentes, elas não poderiam estar unidas.

Figura 14 • Ao mudar de meio de propagação, a onda não modifica sua frequência.

Com base nas considerações acima, chegamos à seguinte conclusão:

A frequência de uma onda não se modifica quando ela passa de um meio para outro; assim, a frequência da onda depende apenas da frequência da fonte.

Interferência de pulsos em cordas

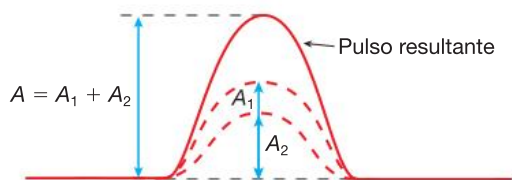
Considere uma corda esticada na direção horizontal na qual se propagam dois pulsos em sentidos opostos. Os pulsos podem ser de dois tipos: aqueles que possuem cristas e aqueles que possuem vales. Vamos chamá-los, de maneira geral, de cristas e vales e analisar duas situações: quando temos o encontro de duas cristas ou dois vales ou de uma crista e um vale.

- **Dois cristas ou dois vales** (fig. 15): os pulsos têm amplitudes diferentes, A_1 e A_2 .



Figura 15 • Propagação de dois pulsos de amplitudes diferentes.

No instante em que as duas cristas se encontram (instante da superposição dos pulsos), a amplitude resultante A é igual à soma das amplitudes de cada pulso (fig. 16). Esse tipo de interferência (entre duas cristas ou dois vales) é chamado de **interferência construtiva**.



S4

No **Suplemento**, há sugestões para trabalhar, em sala de aula, o conceito do princípio de superposição.

Figura 16 • Interferência construtiva de dois pulsos.

Após a interferência, os dois pulsos continuam a se propagar na corda com a mesma amplitude que tinham antes da superposição, como se a interferência não tivesse ocorrido (fig. 17).



Figura 17 • Após a interferência, os dois pulsos se propagam com as mesmas características que tinham anteriormente.

- **Uma crista e um vale** (fig. 18A): nesse caso, a amplitude resultante, no instante da superposição dos pulsos, é a diferença das amplitudes individuais dos dois pulsos, pois os pulsos têm amplitudes opostas (fig. 18B). Esse tipo de interferência é chamado de **interferência destrutiva**. Da mesma forma que no caso anterior, os pulsos, após a interferência, também se propagam mantendo suas características iniciais (fig. 18C).

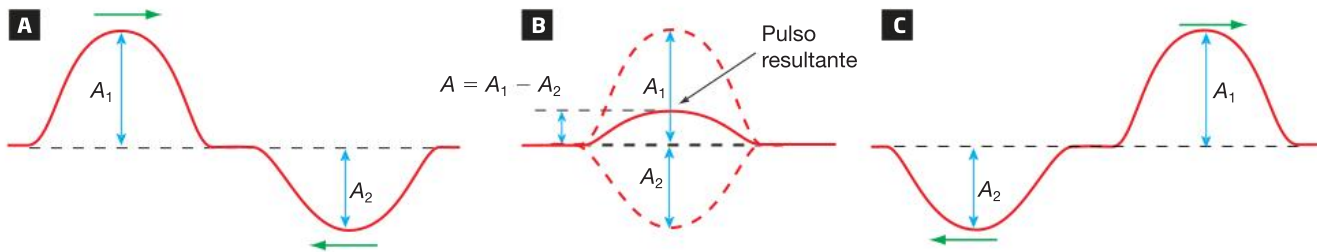


Figura 18 • Interferência destrutiva de dois pulsos.

Em qualquer instante da interferência, a deformação da corda é a soma algébrica das deformações provocadas por cada pulso; esse fato é denominado **princípio de superposição**.

5 Onda em superfícies de meios líquidos: ondas bidimensionais

Os pulsos que formam as ondas que se propagam na superfície de líquidos podem ser circulares ou retos (fig. 19).

Observe que a propagação dessas ondas ocorre no plano e, por esse motivo, ondas desse tipo são denominadas **bidimensionais**.

Os pulsos que formam as ondas são também chamados de frentes de onda. Uma frente de onda divide a região que ainda não foi atingida pela onda da região que já foi atingida.

As retas perpendiculares aos pulsos retos e os raios das circunferências que representam os pulsos circulares definem os raios de propagação desses dois tipos de pulsos.

Reflexão de ondas em líquidos

Suponha que produzimos pulsos retos em um tanque com água e que esses pulsos se propagam até colidir obliquamente com uma barreira nesse tanque. Experimentalmente observa-se que o ângulo formado entre o raio da onda incidente e a reta normal à barreira no tanque é igual ao ângulo formado entre o raio da onda refletida e a mesma reta normal (fig. 20).

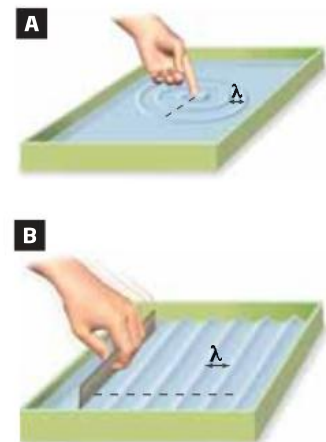
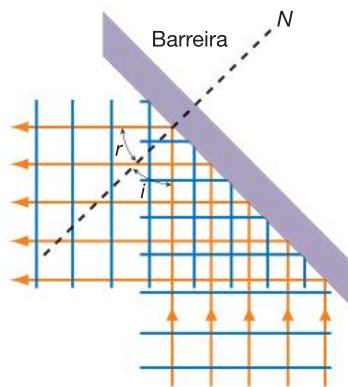
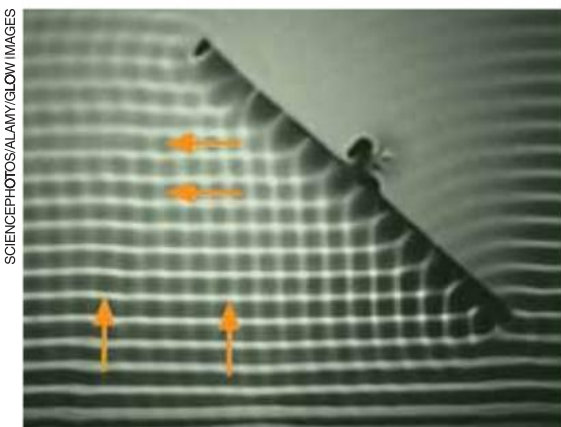


Figura 19 • Geração de pulsos circulares (A) e pulsos retos (B) na superfície de um líquido.



S5

No *Suplemento*, há indicação de site com um estudo sobre o fenômeno da reflexão de ondas.

Figura 20 • Reflexão de pulsos retos em um meio líquido.

Denominando os ângulos de incidência i e de reflexão r , vale a lei da reflexão:

O ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão:

$$i = r$$

Com isso, percebemos que a analogia com a reflexão da luz estudada em Óptica geométrica é imediata. Embora tenhamos usado os pulsos retos para chegar a essa conclusão, a lei da reflexão é válida também para os pulsos circulares (fig. 21).

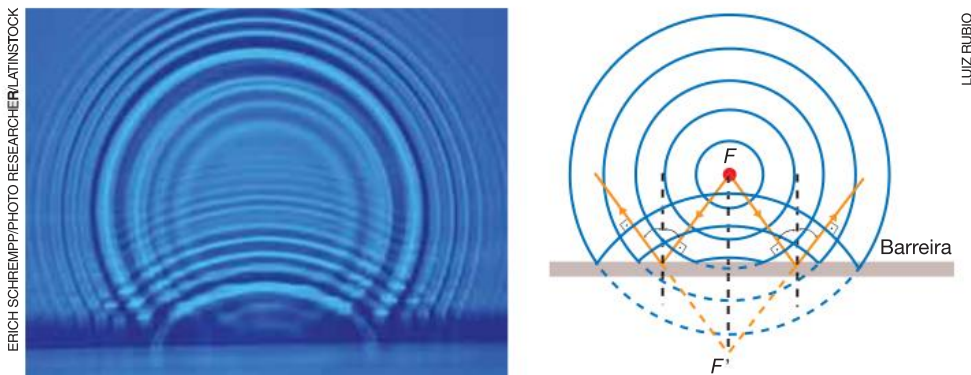


Figura 21 • Reflexão de pulsos circulares em um meio líquido.

Refração de ondas em líquidos

Considere agora que estamos produzindo novamente ondas com pulsos retos e que o tanque de água possui uma região mais profunda e outra mais rasa (fig. 22).

Experimentalmente, é possível verificar que a velocidade de propagação das ondas na região mais profunda é maior que na região mais rasa. Como a velocidade de propagação das ondas depende das características do meio, concluímos que as duas regiões do tanque se comportam como dois meios diferentes nos quais a onda se propaga.

Para compreender o que acontece com a onda quando ela sofre essa mudança de velocidade, vamos analisar um pulso reto quando ele passa da região mais profunda (meio 1) para a mais rasa (meio 2), incidindo obliquamente na fronteira de separação entre as duas regiões (fig. 23).

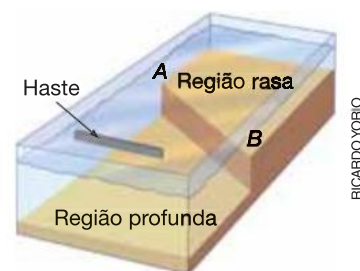


Figura 22 • Ondas que se propagam em um tanque sofrem refração ao passar de uma região mais profunda para uma região mais rasa.

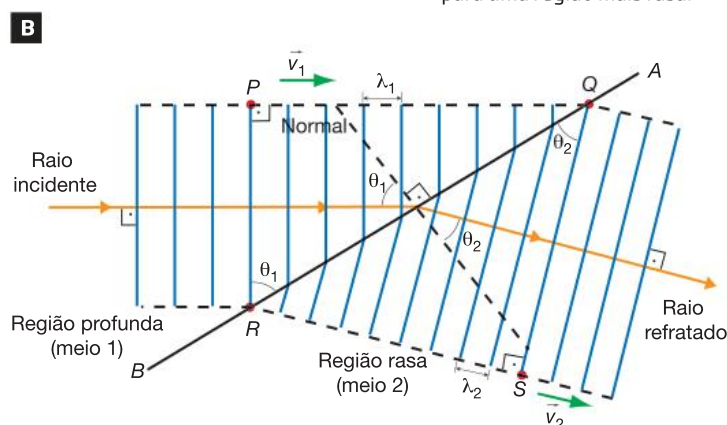
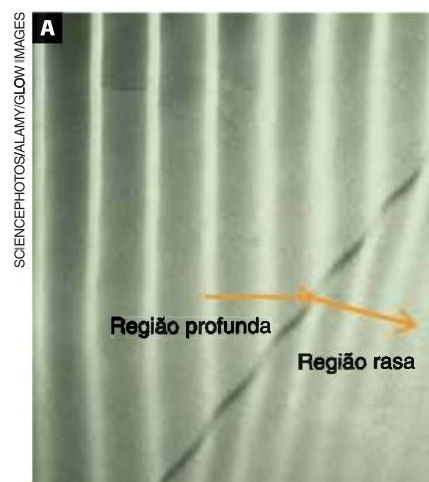


Figura 23 • (A) Foto da refração de ondas ao passar de uma região mais profunda para uma mais rasa. (B) Representação esquemática da refração.

Quando o pulso reto RP , com velocidade \vec{v}_1 , muda de meio, os diferentes pontos que formam esse pulso não mudam de velocidade simultaneamente. O primeiro ponto a mudar de velocidade é o ponto R . A partir daí, essa extremidade se propaga no meio 2 com uma velocidade \vec{v}_2 , menor que a velocidade do ponto P , percorrendo uma distância RS em um intervalo de tempo Δt .

A outra extremidade desse pulso, o ponto P , continua a se propagar no meio 1 com velocidade de módulo v_1 maior que v_2 , o que o leva a percorrer uma distância PQ maior que RS , no mesmo intervalo de tempo. Por causa disso, quando o pulso passa a se propagar no meio 2, ocorre uma mudança em sua direção de propagação, fazendo com que os raios da onda tenham diferentes direções em cada meio.

Note, pela figura, que não há como o lado RS do triângulo RQS ser menor que o lado PQ do triângulo PQR , se a mesma direção de propagação for mantida depois da mudança de meio para o mesmo intervalo de tempo, a menos que os pulsos, após essa mudança, deixem de ser retos.

Dizemos, então, que a onda sofre mudança na direção de propagação ao incidir obliquamente na fronteira de separação dos dois meios; o raio da onda definido pelos pulsos antes da mudança de meio é o **raio incidente** e o definido pelos pulsos depois da mudança é o **raio refratado**.

Mais uma vez não há como não comparar o fenômeno da refração de ondas com o da refração da luz. Aqui também é válida a lei de Snell-Descartes nos termos das velocidades de propagação nos dois meios:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

S6

Filmes que mostram o fenômeno da refração também podem ser encontrados na internet. No *Suplemento*, há indicação de um site onde o fenômeno pode ser visto.

Para saber mais

Conexões com o cotidiano

O poder destruidor do tsunami

No dia 26 de dezembro de 2004, o mundo conheceu o poder destruidor de uma série de ondas geradas por um terremoto ocorrido no fundo do oceano, com epicentro a oeste da ilha de Sumatra, no oceano Índico.

S7

No *Suplemento*, há orientações para o trabalho com este texto.



Fonte: <<http://earthquake.usgs.gov>>. Acesso em: 23 mar. 2016.

O número de mortos foi superior a 280 mil, o que despertou a atenção do mundo para o fenômeno dos **tsunamis**. O termo é a união das palavras japonesas **tsu** (onda) e **nami** (porto) e serve para descrever os deslocamentos verticais no nível do mar provocados por uma perturbação que gere uma série de ondas que atingem o litoral e causam destruição. A origem desses deslocamentos está ligada a erupções vulcânicas, deslizamentos de terra e até terremotos.

O terremoto de Sumatra-Andaman, como ficou conhecido, foi consequência do movimento de duas placas tectônicas, a placa Indiana e a placa da Birmânia, que deslocou verticalmente o leito do oceano em média 2 metros por uma extensão de cerca de 1.300 km. Mas o deslocamento atingiu valores de pico de até 15 metros. A magnitude do abalo sísmico chegou a 9,3 na escala Richter. A energia liberada pelo abalo equivale à energia liberada por cerca de 21 mil bombas atômicas como a lançada em Hiroshima, em 1945.

A onda gerada provocou uma elevação enorme no nível do mar costeiro, fazendo com que regiões habitadas fossem simplesmente varridas do mapa, demonstrando o poder devastador e a energia que o movimento ondulatório pode carregar. Os países mais atingidos foram Indonésia, Sri Lanka, Índia, Tailândia, Ilhas Maldivas, Malásia, Mianmar e Somália.

Apesar do desnível nas regiões costeiras, pessoas que estavam em embarcações relativamente próximas ao epicentro do terremoto disseram que não perceberam a passagem da onda. Como foi possível não perceberem a passagem de algo tão destruidor? Para responder a essa questão, é preciso compreender as relações entre velocidade, amplitude e energia de uma onda.

Um tsunami atinge velocidade em torno de 700 a 800 km/h. Em águas profundas essa onda pode atingir no máximo 1 metro de altura. Um navio de grande porte não perceberia sua passagem.

A velocidade de uma onda em uma superfície líquida é modificada quando a profundidade varia. Ao atingir as regiões costeiras, a profundidade se altera rapidamente, diminuindo a velocidade da onda. Como a energia que a onda transporta é muito grande, sua amplitude aumenta consideravelmente e seu comprimento de onda se reduz.

A consequência é a elevação do nível do mar, o que faz com que a onda avance continente adentro, provocando uma tragédia.

Fonte: Adaptado de SANTOS, Marcus Lacerda. "Tsunami: Que onda é essa?". São Paulo: Sociedade Brasileira de Física, *A Física na Escola*, n. 2, out. 2005.

DIGITAL GLOBE/GETTY IMAGES

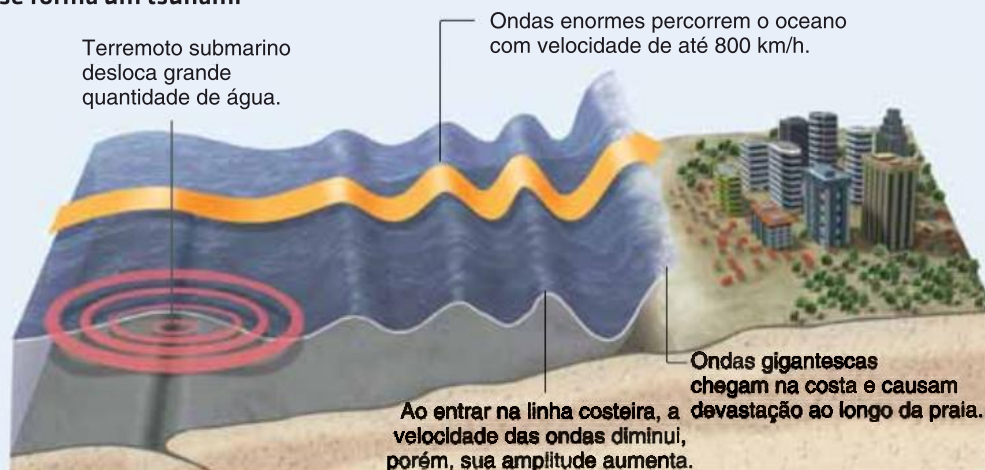


DIGITAL GLOBE/GETTY IMAGES



Em (A) vista de satélite da região de Banda Aceh (Indonésia) em 2004 antes da passagem do tsunami; em (B) o mesmo local após a passagem do tsunami.

Como se forma um tsunami



(Representação sem escala, cores-fantasia.)

Fonte: Source Longman. *Physical Geography in Diagrams*.

PAULO MANZI

AMPLIANDO SUA LEITURA

- 1 Quais grandezas físicas de uma onda são alteradas quando ela se aproxima da zona de arrebentação, próxima à praia?
- 2 Ao se aproximar da costa, um tsunami passa por um barco ancorado com velocidade de 50 km/h e amplitude de 10 m. Se essa onda tem comprimento de 1 km, quanto tempo demora para passar pelo barco?

QUESTÕES RESOLVIDAS

- R6** Uma onda na superfície de um líquido refrata-se quando ocorre uma mudança abrupta na profundidade do tanque onde ela se propaga. Com isso, sua velocidade reduz-se para 70% do seu valor inicial. Sabendo que a frequência da fonte é de 80 Hz e o comprimento de onda no primeiro meio é igual a 1,5 m, determine o comprimento de onda no segundo meio.

► Resolução

É necessário determinar a velocidade da onda no primeiro meio para descobrir seu valor no segundo e calcular o comprimento de onda. A velocidade no primeiro meio pode ser determinada pela equação fundamental da Ondulatória, lembrando que a frequência depende apenas da fonte:

$$v_1 = \lambda_1 \cdot f \Rightarrow v_1 = 1,5 \cdot 80 \therefore v_1 = 120 \text{ m/s}$$

A velocidade é reduzida para 70% do seu valor no primeiro meio. Logo:

$$v_2 = 0,7 \cdot 120 \therefore v_2 = 84 \text{ m/s}$$

Utilizando novamente a equação fundamental da Ondulatória, agora para o segundo meio, teremos:

$$v_2 = \lambda_2 \cdot f \Rightarrow 84 = 80 \cdot \lambda_2 \Rightarrow \lambda_2 = \frac{84}{80} \therefore \lambda_2 = 1,05 \text{ m}$$

- R7** Em uma cuba de ondas com duas profundidades distintas, pulsos retos se propagam, sendo de 0,5 s o intervalo de tempo entre dois pulsos consecutivos na parte rasa. O comprimento de onda na parte rasa é igual a 5 cm. O ângulo de incidência é igual a 30° e o ângulo de refração, 45°. Determine a velocidade da onda na região funda da cuba.

► Resolução

Devemos usar a lei de Snell-Descartes para determinar a velocidade da onda na parte funda da cuba de ondas. Para isso, devemos calcular a velocidade da onda na parte rasa através da equação fundamental da Ondulatória:

$$v_1 = \frac{\lambda_1}{T} \Rightarrow v_1 = \frac{0,05}{0,5} \therefore v_1 = 0,1 \text{ m/s}$$

Usando a lei de Snell-Descartes, temos:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow \frac{\sin 30^\circ}{\sin 45^\circ} = \frac{0,1}{v_2} \Rightarrow \frac{\frac{1}{2}}{\frac{\sqrt{2}}{2}} = \frac{0,1}{v_2} \Rightarrow \frac{1}{1,4} = \frac{0,1}{v_2} \Rightarrow v_2 \approx 1,4 \cdot 0,1$$

$$\therefore v_2 \approx 0,14 \text{ m/s} = 14 \text{ cm/s}$$

O fenômeno da difração

Um fenômeno que caracteriza o movimento ondulatório é a **difração**. Novamente vamos considerar pulsos retos que se propagam em um tanque com água. O que acontece com os pulsos se existir um obstáculo no meio do tanque, por exemplo, uma fenda (fig. 24)?

Observe que, dependendo do tamanho da fenda, os pulsos deixam de ser retos e se tornam circulares. Esse fato faz com que a onda consiga atingir regiões atrás da parede que forma a fenda. Dizemos, então, que a onda contornou a parede (fig. 24).

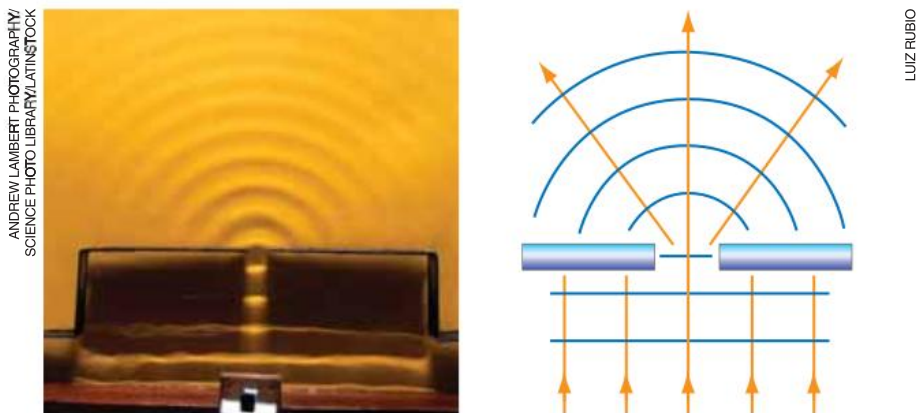


Figura 24 • Ondas sofrendo difração ao atravessar uma fenda.

A difração é a propriedade que as ondas têm de contornar obstáculos quando sua propagação é interrompida parcialmente por eles.

A difração pode ser facilmente observada nas ondas sonoras, que estudaremos adiante. Imagine que estamos conversando com alguém atrás de um muro. Uma pessoa que esteja passando do outro lado do muro pode escutar a conversa, o que mostra que o som (como o da conversa) tem a propriedade de contornar obstáculos (como o muro) à sua propagação.

Outra característica da difração está relacionada ao tamanho da fenda e ao comprimento de onda. Observe a figura 25:

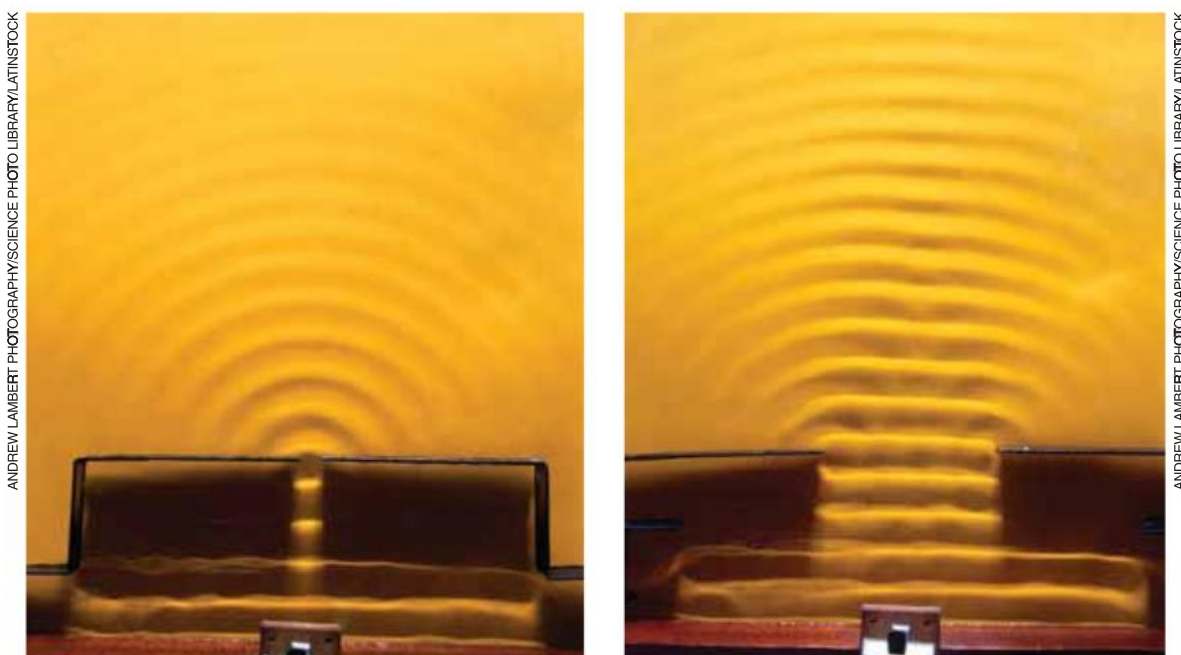


Figura 25 • A difração se torna menos evidente quando aumentamos o tamanho da fenda.

Note que, à medida que o tamanho da fenda aumenta em relação ao comprimento de onda λ , menos evidente se torna a difração. Dessa forma, podemos concluir que, quanto menor for a largura da fenda, mais acentuada será a difração de uma onda. O comportamento é inverso quando alteramos o comprimento de onda: quanto maior o comprimento, mais evidente é a difração.



No *Suplemento*, há indicação de vídeo sobre o fenômeno da difração e também sugestões para a discussão em classe.

Interferência de ondas bidimensionais

O estudo da interferência de ondas em cordas mostrou que as amplitudes de duas ou mais ondas que se superpõem são somadas algebricamente, de acordo com o princípio de superposição. Esse princípio pode ser generalizado para o caso de ondas bidimensionais.

Considere um tanque cheio de água. Se batermos as pontas dos dedos indicadores na superfície da água aproximadamente ao mesmo tempo e com a mesma intensidade, vamos produzir ondas com a mesma frequência e amplitude. Dizemos que as fontes estão **em fase**, ou seja, quando uma crista é gerada por uma fonte (um dos dedos indicadores), outra crista também é gerada pela outra fonte (fig. 26A). Essas ondas, ao se propagarem na água, interferirão umas nas outras, produzindo a configuração típica representada na figura 26B.

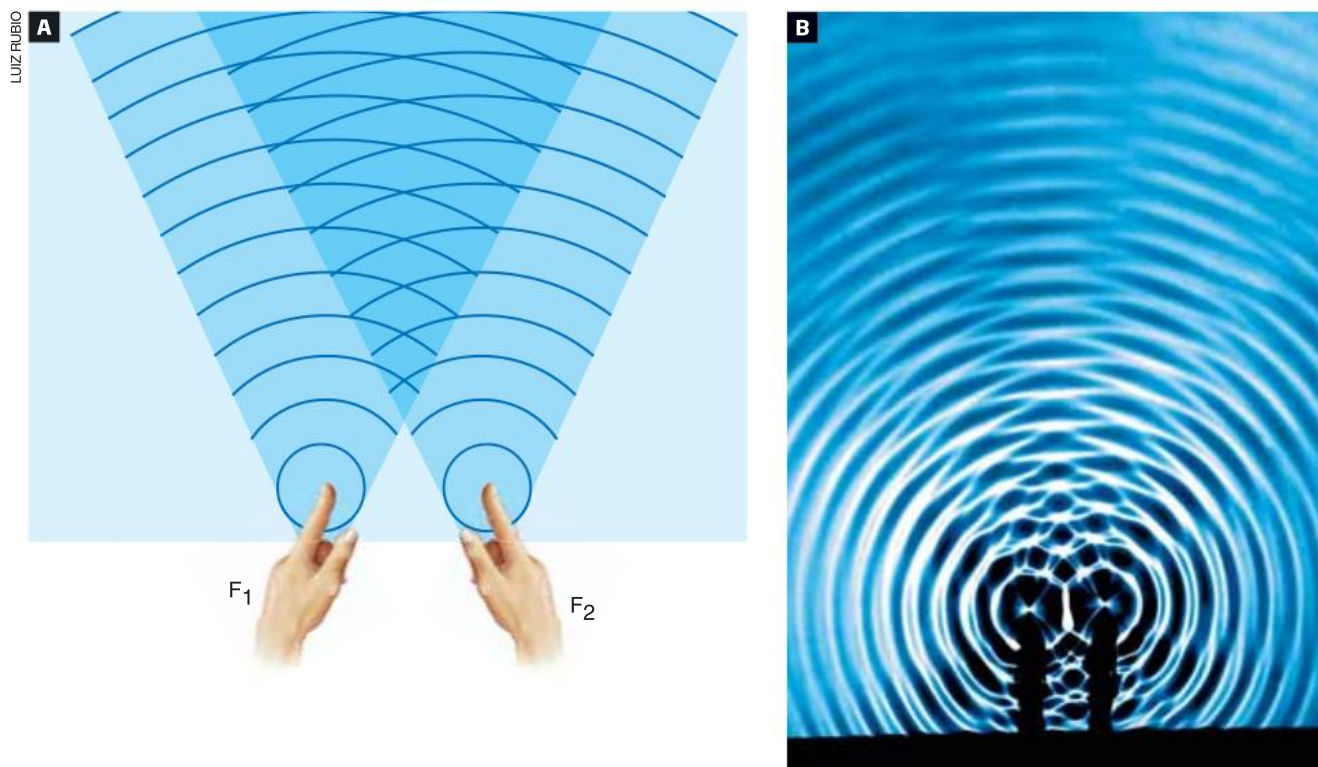


Figura 26 • Fontes em fase (A) produzem figuras típicas de interferência entre ondas (B).

Podemos observar na figura 26B linhas escuras divergentes, partindo das duas fontes. Essas linhas são consequência da **interferência destrutiva** entre as ondas, ou seja, quando cristas encontram vales, mantendo a superfície do líquido em repouso, são denominadas **linhas nodais**. As **interferências construtivas**, quando duas cristas ou dois vales se encontram e suas amplitudes se somam, localizam-se na linha média entre duas linhas nodais. A representação esquemática a seguir (fig. 27, na página seguinte) ajuda a compreender melhor a formação dessas figuras de interferência.

BERENICE ABBOTT/PHOTORESEARCHERS/LATINSTOCK

Reprodução proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

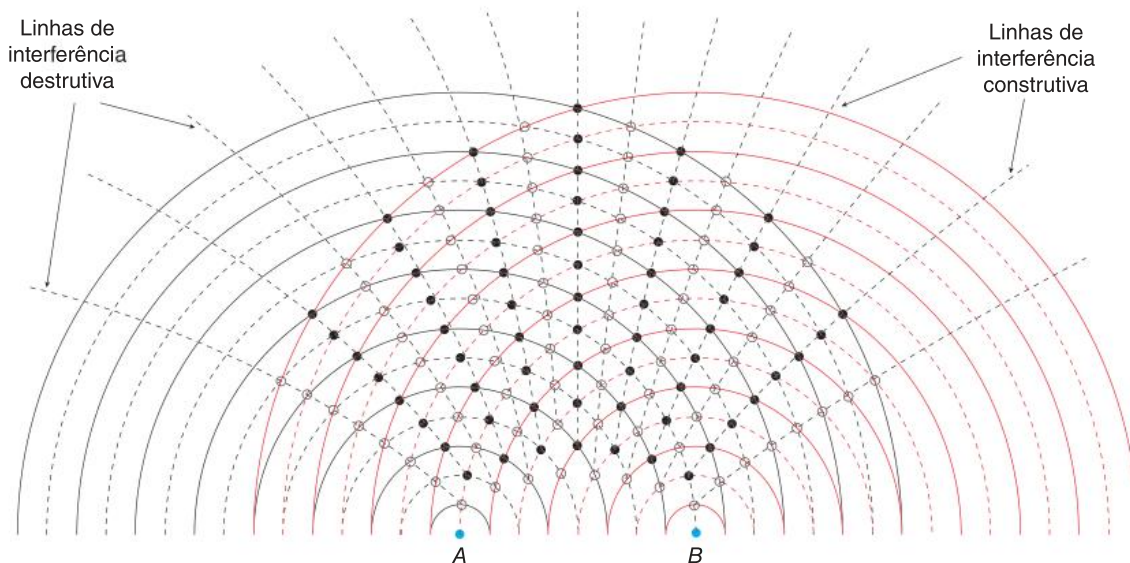


Figura 27 • Formação das linhas de interferência construtiva e destrutiva.

As linhas cheias pretas representam as cristas das ondas emitidas pela fonte *A*, e as vermelhas, as cristas emitidas por *B*. As linhas tracejadas intermediárias são os vales de cada onda. O cruzamento de duas linhas cheias é, portanto, uma interferência construtiva, representada pelos pontos pretos.

Quando uma linha cheia e uma tracejada se cruzam, temos uma interferência destrutiva, representada por pontos vazios. Esses pontos formam as linhas nodais.

6 Ondas sonoras: ondas tridimensionais

Quando duas ou mais pessoas conversam, suas vozes são percebidas em todas as direções. Concluimos, então, que ondas sonoras são ondas tridimensionais. Esse fato restringe a forma de propagação: ondas tridimensionais só podem ser **longitudinais**.

Além disso, sabemos que, no vácuo, não existe propagação de som; isso mostra a necessidade de haver um meio material para que o som se propague. O som é, portanto, uma **onda mecânica**.

Um exemplo ajuda a compreender melhor o tipo de onda que é o som: imagine uma lâmina vibrando (fig. 28). A vibração produz zonas de compressão e rarefação no ar, determinando a direção de propagação da onda sonora.

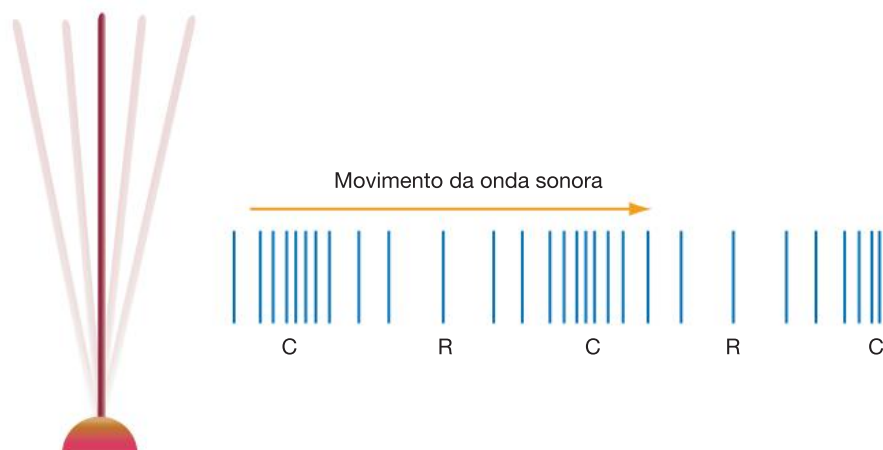


Figura 28 • Lâmina vibrando e produzindo regiões de compressão (C) e rarefação (R) que se propagam pelo ar.

Podemos também visualizar o modo de propagação da onda sonora fazendo uma analogia com as ondas longitudinais que se propagam em uma mola: ao comprimir e em seguida soltar uma determinada região da mola, percebemos que zonas de compressão e de rarefação se estabelecem entre seus elos, levando a perturbação a se propagar na mesma direção de vibração (fig. 29). Processo semelhante ocorre com os meios onde uma onda sonora se propaga.

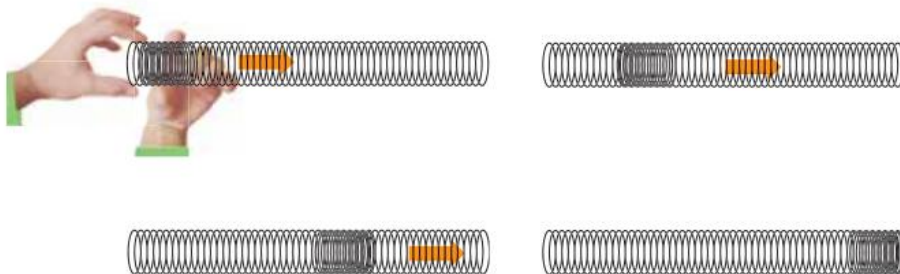


Figura 29 • A propagação longitudinal das ondas sonoras pode ser simulada em uma mola *slink*.

Concluindo:

O som é uma onda mecânica longitudinal e tridimensional.

Espectro sonoro

A frequência também é uma grandeza característica das ondas sonoras. O que chamamos de som são ondas em uma determinada faixa de frequência que podem ser percebidas pelo sistema auditivo humano. Essa faixa vai de **20 Hz** até **20.000 Hz**. Esses limites não são fixos, variando de pessoa para pessoa. Alguns animais têm a capacidade de perceber ondas que estão além dessa faixa.

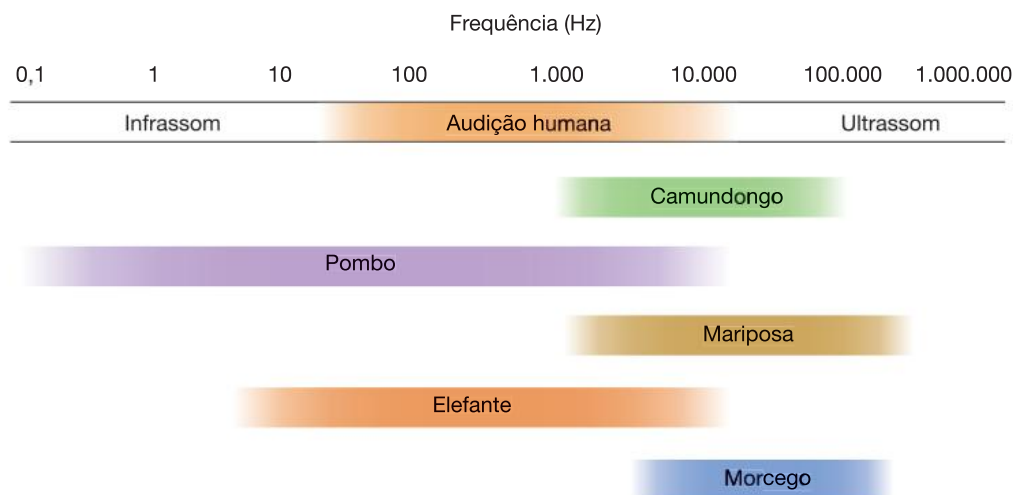


Figura 30 • O espectro sonoro mostra a região de frequência da audição humana e de alguns animais.

Fonte: *Physics today*. Nova York: American Institute of Physics, 2008.

Ondas com frequências abaixo de **20 Hz** são chamadas de **infrassom** ou **subsom**. Pela figura 30, observamos que alguns animais percebem ondas nessa região de frequência, que é a das ondas provocadas por terremotos. No final de 2004, um grande terremoto ocorreu em alto-mar, próximo à Indonésia, gerando uma onda gigantesca, ou seja, um tsunami (leia a seção "Conexões com o cotidiano"), que atingiu o litoral de diversos países e causou a morte de milhares de pessoas. Habitantes de uma ilha do Pacífico conseguiram se salvar graças aos elefantes, que perceberam as ondas geradas pelo terremoto e fugiram. Desconfiados, os habitantes também fugiram para as partes mais altas da ilha, escapando do tsunami.

Ondas com frequência acima dos **20.000 Hz** são denominadas **ultrassom**. O morcego consegue emitir ultrassons com os quais localiza obstáculos, presas e predadores (fig. 31).

O ultrassom tem várias aplicações tecnológicas e médicas, por exemplo, nos exames de ultrassonografia, em que ondas de ultrassom são geradas e direcionadas para os órgãos a serem examinados. A reflexão dessas ondas é interpretada eletronicamente, gerando uma imagem do órgão examinado. Essa técnica de exames é muito empregada nos casos em que não é possível utilizar os raios X, como nos exames realizados durante a gravidez (fig. 32).



Figura 31 • O morcego utiliza o ultrassom para se orientar.



Figura 32 • Imagem digital de um feto gerada a partir de ondas ultrassônicas.

A velocidade do som

Da mesma forma que nos casos anteriores, a velocidade do som depende apenas do meio onde ele se propaga. Isso faz com que a temperatura e a pressão sejam essenciais para definir a velocidade das ondas sonoras, principalmente quando ocorrem nos gases. A velocidade do som é obtida a partir da relação:

$$v = \sqrt{\frac{B}{d}}$$

em que ***B*** é uma grandeza que caracteriza o meio de propagação, denominada **módulo de elasticidade volumar**. Podemos compreender essa grandeza comparando-a à tensão em uma corda. Quanto mais tensionada está uma corda, maior é a velocidade de propagação de uma onda, pois os pontos da corda retornam mais rapidamente à posição de equilíbrio e não retardam a passagem de um próximo pulso.

A grandeza ***d*** é a **densidade do meio**. Quanto mais denso for o meio, maior será a inércia para perturbar suas partículas, dificultando a propagação de ondas nesse meio.

Como exemplo, vamos calcular a velocidade de propagação do som no ar, a 0 °C e a 1 atm. Nesse caso, $B = 1,41 \times 10^5$ Pa e $d = 1,29$ kg/m³, o que nos dá:

$$v = \sqrt{\frac{B}{d}} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{1,41 \cdot 10^5}{1,29}} \Rightarrow v \approx \sqrt{1,09 \cdot 10^5} \Rightarrow v \approx \sqrt{0,109 \cdot 10^6} \Rightarrow \\ \Rightarrow v \approx 0,331 \cdot 10^3 \therefore v \approx 331 \text{ m/s}$$

Tabela 1 – Velocidade de propagação do som em diferentes gases

Gás	Ar (0 °C)	Ar (20 °C)	Hélio (0 °C)	Hidrogênio (0 °C)
Velocidade (m/s)	331	343	972	1.280

Tabela 2 – Velocidade de propagação do som em diferentes líquidos

Líquido	Álcool metílico (25 °C)	Água (0 °C)	Água (20 °C)	Água do mar (3,5% de salinidade)	Mercúrio (20 °C)
Velocidade (m/s)	1.140	1.400	1.480	1.520	1.450

Tabela 3 – Velocidade de propagação do som em diferentes sólidos

Sólido	Borracha	Polietileno	Chumbo	Prata	Cobre	Alumínio	Aço	Granito
Velocidade (m/s)	54	920	1.300	2.700	3.560	5.000	5.940	6.000

Fonte das tabelas: LIDE, D. R. (Ed.). *Handbook of Chemistry and Physics*. 84. ed. Boca Raton: CRC, 2003. p. 14-39 e 14-41.

Observação: Para comparação, alguns dos valores foram calculados com temperaturas diferentes de 0 °C.

Já sabe responder?

Por que a suspensão de um automóvel necessita de amortecedores associados às molas para funcionar?



CAR CULTURE/CORBIS/LATINSTOCK



VLADISLAV KOCHETKOV/
ALAMY/GETTY IMAGES

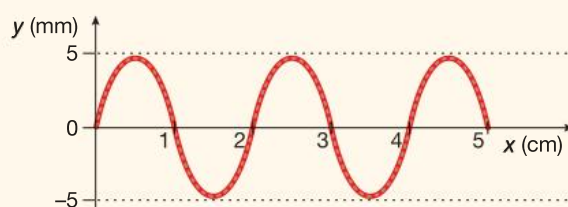
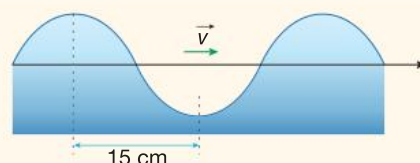
QUESTÕES PROPOSTAS

Lembre-se: resolva as questões no caderno.

- 8** Um barco que se desloca em um lago provoca ondas que assumem o seguinte aspecto.

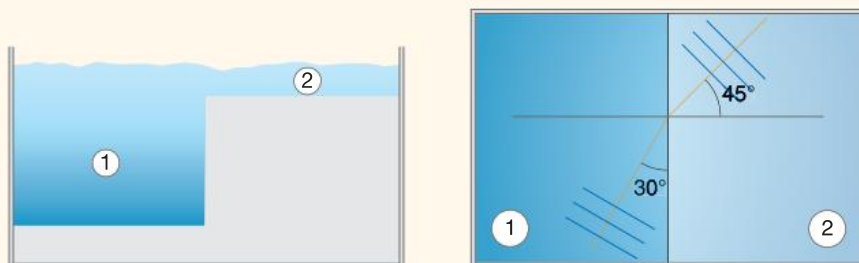
Sabendo que a velocidade de propagação é de 10 m/s, determine seu comprimento de onda e seu período.

- 9** Um oscilador de frequência igual a 3.600 rpm produz ondas em uma corda, como na figura a seguir. Determine o comprimento de onda, a amplitude e a velocidade de propagação dessa onda.



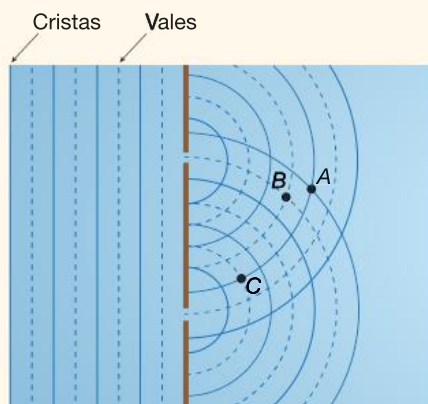
ILUSTRAÇÕES: LUIZ RUIBIO

- 10** Frentes de ondas são geradas em um tanque que tem duas profundidades, como pode ser visto na figura.



Sabendo que a velocidade de propagação das ondas no meio 1 é de 20 cm/s e que a frequência com que são geradas é de 2 Hz, encontre o comprimento de onda dessas ondas no meio 1 e no meio 2.

- 11** Ondas planas com a mesma frequência são geradas em um tanque com duas profundidades, que funcionam como dois meios de propagação diferentes. No meio 1, essas ondas têm velocidade de 15 cm/s e frequência de 3 Hz. No meio 2, essas ondas têm velocidade de 10 cm/s. Qual é o comprimento de onda no meio 2?
- 12** Ondas na superfície da água atravessam uma parede com duas fendas, como pode ser visto na figura. As linhas cheias são cristas das ondas e as tracejadas são vales.



- a) Quais são os fenômenos ondulatórios presentes após as ondas passarem pelos obstáculos?
- b) O que representam os pontos A, B e C?
- 13** O eco é um fenômeno em que o observador ouve, separadamente, o som emitido diretamente por ele e o som refletido por um obstáculo. Para que ele ocorra, o intervalo de separação deve ser igual ou superior a 0,1 s. Sendo a velocidade do som igual a 340 m/s, qual deve ser a distância mínima entre o obstáculo e o observador?
- 14** Um alto-falante emite ondas sonoras com frequência de 1.700 Hz e comprimento de onda 20 cm em direção a um obstáculo que está a 34 m. Após quanto tempo o eco referente a essas ondas sonoras pode ser escutado?
- 15** Uma onda sonora se propaga no ar, com temperatura de 20 °C, e atinge frontalmente uma superfície de granito. Supondo que a fonte que gerou essas ondas sonoras tenha frequência de 1.500 Hz, qual é a razão entre o comprimento de onda dessas ondas sonoras no ar e no granito?
- (Considere: $v_{\text{som, ar}} = 340 \text{ m/s}$; $v_{\text{som, granito}} = 6.000 \text{ m/s}$)

Fenômenos sonoros: a música e o efeito Doppler

ou: Por que se escuta um estrondo sonoro quando um avião supersônico ultrapassa a barreira do som?

 **S9**

No Suplemento, há orientações para o trabalho com a questão introdutória.

1 Introdução

Quando um avião está voando produz ondas sonoras. Se sua velocidade é menor que a do som (340 m/s no ar), as ondas sonoras se propagam à frente do avião. Se um avião voar mais rápido que o som, quebrará a barreira do som, produzindo um estrondo sônico no momento em que a ultrapassa. O estrondo é gerado quando há um aumento repentino na pressão do ar, que é provocado pela superposição das ondas sonoras que foram geradas pelo avião e que normalmente se propagariam à frente dele.

Quem não gosta de música? São muitas as pessoas que têm uma relação próxima com a música. Ela desperta sentimentos como alegria, afeto, tranquilidade, angústia etc. É comum as pessoas associarem alguma canção a situações vividas, como o início ou o fim de um relacionamento, por exemplo. No cinema, a trilha musical de um filme pode ser fundamental para gerar na plateia um determinado estado emocional. Uma música lenta e romântica geralmente não “funciona” em uma cena de ação ou em um filme de terror.

Não se sabe muito bem por que a música é um fenômeno tão especial. A arte de combinar sons de maneira agradável às nossas orelhas parece não seguir nenhuma receita, até porque o que é agradável para alguns pode não ser para outros. É pouco provável que a Física possa contribuir para a “escolha” de uma combinação de sons.

No entanto, qualquer música, por mais elaborada que seja, pode não ser devidamente admirada se não for executada de maneira correta em um instrumento afinado ou em uma sala com boa acústica.

Nessas questões, a Física pode ajudar, e muito. Neste capítulo, vamos ver algumas características das ondas sonoras que sensibilizam nossa audição e que ajudarão a compreender uma parte do fenômeno da música, como o timbre de uma voz ou de um instrumento musical. Vamos discutir, também, a Física envolvida nos instrumentos musicais de corda.

Este capítulo também aborda outro fenômeno facilmente percebido em nosso cotidiano: quando um carro se aproxima em alta velocidade e depois se afasta, notamos uma mudança no som do motor, agudo quando se aproxima e grave quando se afasta. Vamos ver que essa modificação está relacionada a uma mudança na frequência das ondas sonoras emitidas pela fonte, em decorrência do movimento relativo entre ela e quem escuta o som. Esse fenômeno recebeu o nome de efeito Doppler, em homenagem ao físico austríaco Christian Doppler (1803-1853) pelos trabalhos que permitiram compreender esse efeito.

Figura 1 •

A apresentação na concha acústica torna o concerto mais audível para o público que se senta ao ar livre. Boston, Estados Unidos, 2013.



ARAM BOGHOSIAN/
THE BOSTON GLOBE/
GETTY IMAGES

2 Qualidades fisiológicas do som

Altura

Em termos musicais, o som grave é baixo, e o som agudo é alto. No entanto, no cotidiano, quando nos referimos a um som alto, queremos dizer que a intensidade do som está alta ou que o volume do aparelho de som está alto. Esse tipo de erro não é um problema quando nos dirigimos a pessoas que não são profissionais de música. Se seu pai ou sua mãe chegarem em casa e disserem que o som está “alto”, é provável que você abaixe o volume do aparelho de som. Embora eles tenham usado uma linguagem cientificamente incorreta, você entendeu o pedido para diminuir o volume. No entanto, entre músicos profissionais, é preciso usar a terminologia científica correta, ou seja, um som alto é agudo, e um som baixo é grave. A altura do som é uma característica que está relacionada com sua frequência. Quanto maior a frequência sonora, mais agudo é o som e, portanto, mais alto. É interessante notar que, com essa definição de altura, podemos “gritar” um som muito baixo (grave) e “sussurrar” um som muito alto (agudo).

A altura do som também caracteriza as notas musicais. Uma escala musical é uma sequência crescente de frequências. A escala musical mais conhecida é a chamada escala natural (tabela 1). Nela, as frequências dos sons são classificadas em apenas sete notas.

Tabela 1 – Frequências das notas musicais da escala natural (Hz)								
Nota	Dó	Ré	Mi	Fá	Sol	Lá	Si	Dó
Frequência (Hz)	261,7	293,7	329,7	349,2	392,0	440,0	493,9	523,4

Fonte: MATRAS, Jean-Jacques. *O som*. São Paulo: Martins Fontes, 1991.

Mas uma música tem uma variedade muito maior de sons de diferentes frequências e, portanto, mais do que apenas sete notas musicais. Como explicar isso? Quando esgotamos as sete notas, tornamos a repetir a escala com o dobro da frequência da primeira sequência. Por exemplo, quando tocamos uma nota dó com uma frequência de 261,7 Hz, a próxima nota dó terá 523,4 Hz. Dizemos que a nota dó de 523,4 Hz está uma oitava acima da primeira nota, que a nota dó de 1.046,8 Hz está duas oitavas acima, e assim por diante.

Timbre

Diferentes instrumentos musicais podem tocar a mesma nota, com a mesma frequência e a mesma intensidade. Mesmo assim sabemos distinguir quando essa nota é tocada em um violão ou um violino. Isso acontece porque, embora o músico toque apenas as cordas do violão, todas as outras partes do instrumento também vibram (a madeira, as outras cordas, o ar dentro do violão), produzindo ondas sonoras. A superposição de todas essas ondas emitidas pelo instrumento define uma qualidade fisiológica do som chamada **timbre**. O violino e o violão têm timbres diferentes.

O fato de as outras partes do instrumento musical atuarem na composição da onda sonora resultante torna o timbre de cada instrumento diferente. Por exemplo, não são apenas as cordas do violão que vibram, a madeira da caixa também vibra. Isso ajuda a compreender por que as guitarras necessitam de amplificador para reforçar o som. As guitarras habitualmente não têm caixa como os violões, por isso precisam reforçar o som eletronicamente. Em compensação, podem ter os formatos mais variados (fig. 2).

O timbre está relacionado com a forma resultante da onda sonora emitida pelo instrumento. A figura 3 mostra a forma da onda sonora resultante de alguns instrumentos musicais e de uma voz humana.

S10

O Suplemento indica alguns sites que trazem descrições detalhadas da construção de escalas musicais. As sugestões podem auxiliá-lo a trabalhar esse conteúdo em suas aulas.



Figura 2 • Guitarras geralmente não utilizam caixas para reforçar o som: isso é feito por meio de amplificadores.



Figura 3 • Forma das ondas sonoras (timbre) de um diapasão, de dois instrumentos musicais e de uma voz humana.

Fonte: FIGUEIREDO, Anibal; TERRAZZAN, Eduardo A. "O ouvido e o som". *Revista de Ensino de Ciências*, São Paulo: Funbec, mar. 1987.

ILUSTRAÇÕES: LUIZ RÚBIO

QUESTÕES RESOLVIDAS

R1 Suponha que você está escutando o som de um violão e ele emite uma nota aguda, em seguida, escuta um violino que emite uma nota grave. Qual é o som de maior frequência e o de maior comprimento de onda?

► Resolução

Uma nota aguda atinge valores altos de frequência, correspondendo a uma nota mais alta, enquanto uma nota grave atinge frequências baixas. Portanto, o som de maior frequência é o do violão. Com relação ao comprimento de onda, como a velocidade do som provocado pelas duas notas é a mesma, pela equação fundamental da Ondulatória, $v = \lambda \cdot f$, o som que tem maior comprimento de onda é o de menor frequência, ou seja, o do violino.

R2 Considere que os dois instrumentos toquem agora a mesma nota musical. Como conseguimos distinguir o som do violão e o do violino?

► Resolução

A onda sonora de um instrumento musical não é provocada apenas pela corda do instrumento. A madeira e o formato da caixa que compõem o instrumento também vibram, assim como as outras cordas que não estão sendo tocadas. A superposição de todas as ondas geradas por essas vibrações resulta na nota do instrumento, dando-lhe uma característica chamada timbre. Como os instrumentos têm formatos e materiais diferentes, embora toquem a mesma nota, eles possuem timbres diferentes.

Intensidade sonora

Quando o aparelho de som está com seu volume no nível máximo, costumamos dizer que o som está "alto". Já vimos que a altura do som está relacionada com a frequência da onda sonora e não com a intensidade com que ele é gerado. A intensidade do som está relacionada com a energia da onda sonora.

Qualquer movimento ondulatório transporta energia. Se uma onda sonora atravessa certa área em determinado intervalo de tempo, a energia que ela carrega atinge essa área (fig. 4).

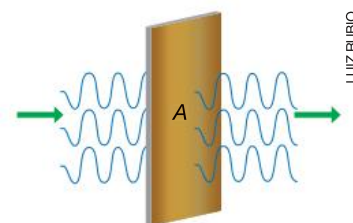


Figura 4 • Energia de uma onda sonora que atinge certa área A.

Reprodução proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998

Para determinar essa quantidade de energia (ΔE) que atravessa uma área (A) por unidade de tempo (Δt), definimos a grandeza **intensidade sonora** (I), dada pela expressão:

$$I = \frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t}$$

Como a razão entre energia e tempo representa a potência da fonte emissora, temos:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

A intensidade sonora é, então, dada por:

$$I = \frac{P}{A}$$

A unidade de intensidade sonora, no SI, é o W/m^2 .

A energia de uma onda está relacionada com sua amplitude. Quanto maior for a amplitude, mais energia a onda carregará. Quanto maior for a amplitude da onda sonora, maior será a intensidade do som.

Nível de intensidade sonora

Mas, e se houver um som dez vezes mais intenso, como a orelha humana percebe essa variação? Em primeiro lugar, existe uma intensidade mínima que nossas orelhas conseguem perceber, que depende da frequência do som e varia de pessoa para pessoa. Para uma pessoa com audição normal e uma frequência em torno de **100 Hz**, esse valor é **10^{-12} W/m^2** , geralmente representado por I_0 . Essa intensidade sonora mínima é usada como valor de referência para comparações com a intensidade sonora de outros sons e geralmente é chamada de **intensidade sonora fundamental**.

No entanto, um som com intensidade dez vezes maior não é percebido pelas nossas orelhas como dez vezes mais intenso. Pesquisadores descobriram que a sensação que o som produz em nossas orelhas não varia proporcionalmente em relação à intensidade sonora. Para medir a sensação que o som produz em nossas orelhas, utilizamos uma escala logarítmica e a grandeza **nível de intensidade sonora**, representada pela letra grega β :

$$\beta = \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

em que I é a intensidade do som e $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

A unidade do nível de intensidade sonora é o bel (B), em homenagem ao cientista escocês **Graham Bell** (1847-1922). No entanto, a unidade mais usada é uma fração do bel, o **decibel** (1 dB = 0,1 B). Note que:

$$I = I_0 \Rightarrow \beta = \log\left(\frac{I_0}{I_0}\right) = \log 1 \quad \therefore \beta = 0$$

$$I = 10 \cdot I_0 \Rightarrow \beta = \log\left(\frac{10 \cdot I_0}{I_0}\right) \Rightarrow \beta = \log 10 \quad \therefore \beta = 1 \text{ B} = 10 \text{ dB}$$

$$I = 100 \cdot I_0 \Rightarrow \beta = \log\left(\frac{100 \cdot I_0}{I_0}\right) \Rightarrow \beta = \log 100 \quad \therefore \beta = 2 \text{ B} = 20 \text{ dB}$$

$$I = 1.000 \cdot I_0 \Rightarrow \beta = \log\left(\frac{1.000 \cdot I_0}{I_0}\right) \Rightarrow \beta = \log 1.000 \quad \therefore \beta = 3 \text{ B} = 30 \text{ dB}$$

Assim, o som de 1 B tem intensidade dez vezes maior que a intensidade sonora fundamental I_0 ; o som de 2 B tem intensidade cem vezes maior, e assim por diante.



EDUARDO ZAPPIA/PULSAR IMAGENS

Figura 5 • A variação da intensidade sonora em um estádio de futebol é muito grande. Estádio do Itaquerão, São Paulo, SP, 2014.

Convém chamar a atenção dos alunos para essa característica da audição humana.

S11

No *Suplemento*, você encontra orientações para o trabalho com este “Explore”.

EXPLORE EM MATEMÁTICA

Para modelar a dependência entre duas grandezas quando o aumento de um fator 10 de uma delas implica o aumento da outra em apenas uma unidade, utiliza-se, normalmente, uma função logarítmica. Além do cálculo do NIS (nível de intensidade sonora), pesquise outros índices que utilizam o modelo logarítmico na estrutura de seus cálculos.

A tabela mostra os valores de intensidade sonora e dos níveis de intensidade sonora de algumas situações a que estamos sujeitos, como as das figuras a seguir.

JORGE ARAÚJO/FOLHAPRESS



SUSAN STEVENSON/SHUTTERSTOCK



VOUTECHVLS/SHUTTERSTOCK



	W/m ²	dB	
Avião a jato a 30 m	10	130	Limiar da dor
Turbina de avião a 7 m	1	120	
Trovão	0,1	110	
Motor de caminhão	0,01	100	Show de rock
Locais de trabalho ruidosos	0,001	90	
Picos muito fortes de música	0,0001	80	Música clássica (no palco)
Tráfego (carros) pesado a 10 m	0,00001	70	
Média de uma fábrica	0,000001	60	Conversa normal
Escritório ruidoso	0,0000001	50	
Média de um escritório	0,00000001	40	Sala silenciosa
Média de uma residência	0,000000001	30	
	0,0000000001	20	Estúdio de gravação silencioso
	0,00000000001	10	
	0,000000000001	0	Limiar da audição

Fonte: FIGUEIREDO, Anibal; TERRAZAN, Eduardo A. "O ouvido e o som", *Revista de Ensino de Ciências*, São Paulo: Funbec, mar. 1987.



CHRIS SELBY/ALAMY/GLOW IMAGES



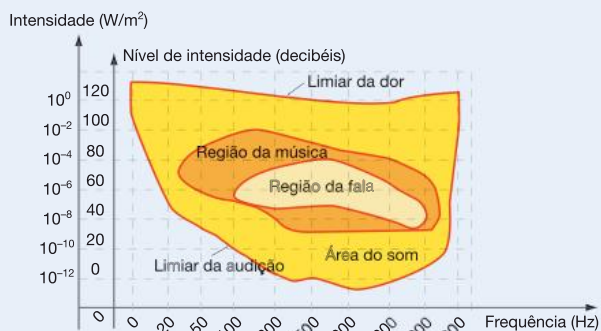
NORDICPHOTOS/ALAMY/GLOW IMAGES



FRANK CHMURA/ALAMY/GLOW IMAGES

Vimos que a audição humana é limitada, em termos de frequência, entre 20 Hz e 20.000 Hz. Em relação ao nível de intensidade sonora, nossa audição possui um limite inferior aproximado, que é o valor de zero dB, correspondente à intensidade sonora fundamental. No entanto, não existe um limite superior para o nível de intensidade sonora. O limite é o da sensação de dor provocada pelo som. O gráfico ao lado mostra em que valores de frequência (eixo das abscissas), intensidade sonora e nível de intensidade sonora (eixo das ordenadas) a orelha humana é capaz de ouvir o som.

Note que a região de percepção do som está definida entre 20 Hz e 20.000 Hz, como já havíamos dito, mas essa percepção depende da intensidade sonora da fonte, ou seja, um som com intensidade sonora de 10^{-10} W/m² e com frequência de 1.000 Hz é percebido pela orelha humana, enquanto um som com a mesma intensidade, mas com frequência de 50 Hz, já não é mais percebido.



Região de sensibilidade da orelha em função da frequência e da intensidade sonora. As escalas dessas duas grandezas são logarítmicas.

Fonte: FIGUEIREDO, Anibal; TERRAZAN, Eduardo A. "O ouvido e o som". *Revista de Ensino de Ciências*, São Paulo: Funbec, mar. 1987.

AMPLIANDO SUA LEITURA

- 1 De acordo com os dados registrados na tabela, se o nível de intensidade sonora dobrar de valor, por exemplo, de 20 dB para 40 dB, qual será o fator de aumento na intensidade em W/m^2 ?
- 2 Um som de frequência 5×10^3 Hz e intensidade sonora $60 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$ pode ser ouvido por uma pessoa com audição normal? Justifique.

QUESTÕES RESOLVIDAS

- R3** A intensidade sonora de um *show* de *rock* é de cerca de 1 W/m^2 . Qual é o valor do nível de intensidade sonora correspondente, em decibéis?

► Resolução

Sendo $I = 1 \text{ W/m}^2$ e $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$, podemos calcular o nível de intensidade sonora β diretamente por meio da expressão:

$$\beta = \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \Rightarrow \beta = \log\left(\frac{1}{10^{-12}}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \beta = \log(10^{12}) \Rightarrow \beta = 12 \cdot \log 10 \therefore \beta = 12 \text{ B}$$

Como a intensidade sonora deve ser em decibéis (dB), devemos multiplicar o resultado por 10. Portanto:

$$\beta = 120 \text{ dB}$$

- R4** O nível de intensidade sonora dentro de um estádio de futebol está em torno de 70 dB. A intensidade sonora no momento do gol é cerca de

1.000 vezes maior. Qual é o novo nível de intensidade sonora nesse instante?

► Resolução

Vamos denominar a intensidade sonora antes do gol como I_{antes} . Sabemos que o nível de intensidade sonora nesse momento é de 70 dB. Então, temos:

$$\beta = \log\left(\frac{I_{\text{antes}}}{I_0}\right) \Rightarrow 7 = \log\left(\frac{I_{\text{antes}}}{I_0}\right)$$

No momento do gol, a intensidade sonora, I_{gol} , é 1.000 vezes maior que I_{antes} ; portanto:

$$\beta = \log\left(\frac{I_{\text{gol}}}{I_0}\right) \Rightarrow \beta = \log\left(\frac{1.000 \cdot I_{\text{antes}}}{I_0}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \beta = \log\left(\frac{I_{\text{antes}}}{I_0}\right) + \log(1.000) \Rightarrow \beta = 7 + 3$$

$$\therefore \beta = 10 \text{ B} = 100 \text{ dB}$$

3 Instrumentos de corda

Um músico, ao tocar violão (fig. 6C), provoca uma série de ondas transversais nas cordas. Essas ondas são emitidas e refletidas nas extremidades e se superpõem às novas ondas incidentes, formando o que chamamos de nós e ventres na corda (fig. 7), por interferência destrutiva e construtiva, respectivamente, como vimos no capítulo anterior.



Figura 6 • Alguns instrumentos musicais de corda: harpa (A); violino (B); violão (C).

Os modos de vibração da corda, por causa dessa superposição de ondas incidentes e refletidas, são mostrados na figura 7. Essa figura apresenta apenas quatro modos de vibração, mas existem outros, sempre em números inteiros de nós ou ventres. Esses tipos de ondas são chamados de ondas estacionárias, pois os nós (ou ventres) estão em repouso em relação às extremidades fixas das cordas.

As cordas em vibração produzem regiões de compressão e rarefação no ar em torno delas. Essas regiões se propagam pelo ar, constituindo uma onda tridimensional e longitudinal, que é o som. Dependendo de sua frequência, esse som pode sensibilizar nossa orelha. A frequência da onda sonora é determinada pela frequência da corda. Essas duas frequências são iguais. A corda vibrante é, portanto, a fonte sonora.

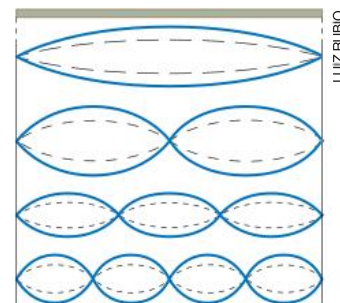


Figura 7 • Modos de vibração de uma corda fixa nas extremidades.

 **S12**

No Suplemento, há um texto sobre acústica com questões que podem ser propostas aos alunos.

4 Instrumentos de sopro

Os instrumentos de sopro são basicamente tubos com uma extremidade aberta e a outra fechada ou duas extremidades abertas. Os primeiros são chamados de tubos sonoros fechados e os segundos, de tubos sonoros abertos. O trombone (fig. 8A) e o oboé (fig. 8B) são exemplos de tubos sonoros fechado e aberto, respectivamente.

O princípio físico que permite a emissão de sons de várias frequências por esses instrumentos também se fundamenta na formação de ondas estacionárias dentro dos tubos. Essas ondas, porém, são diferentes das formadas nas cordas vibrantes. Ao soprar dentro do tubo, o músico introduz um jato de ar que provoca vibrações que se propagam através da coluna de ar no interior do tubo. Essas vibrações são longitudinais, ao contrário das ondas nas cordas, que são transversais.

A

MUKHOITOV OLEKSANDRI
SHUTTERSTOCK



B

JAMES STEIDL
SHUTTERSTOCK



Figura 8 • O trombone é um instrumento musical de tubo sonoro fechado (A). O oboé é um exemplo de instrumento musical de tubo sonoro aberto (B).

5 O efeito Doppler: fonte sonora em movimento, observador em repouso

Todos nós, de alguma forma, já observamos o seguinte fenômeno: quando um carro se aproxima em alta velocidade e depois se afasta, percebemos uma mudança no som do motor, agudo quando o veículo se aproxima e grave quando ele se afasta.

Se o carro está parado com o motor ligado e também estamos parados ao seu lado, não observamos nenhuma mudança na altura do som do motor. Da mesma maneira, não notamos diferença na frequência do som do motor quando estamos dentro do carro em movimento.

Podemos concluir, então, que essa diferença entre a frequência da fonte e a frequência observada é consequência do movimento da fonte sonora em relação ao observador, uma vez que, se ele estiver em movimento e a fonte parada ou os dois estiverem em movimento, essa diferença também é notada. Esse fenômeno recebeu o nome de **efeito Doppler**, em homenagem ao físico austríaco **Christian Doppler** (1803-1853) por seus trabalhos que permitiram compreender esse efeito.

Fonte em aproximação

Considere uma ambulância com a sirene ligada e em alta velocidade como nossa fonte sonora em movimento. As frentes da onda emitida por ela tornam-se mais próximas umas das outras na parte da frente da ambulância (no sentido do movimento), por causa de seu deslocamento. Na parte traseira, as frentes da onda ficam mais afastadas umas das outras, pois se deslocam no sentido contrário ao da ambulância (fig. 9).

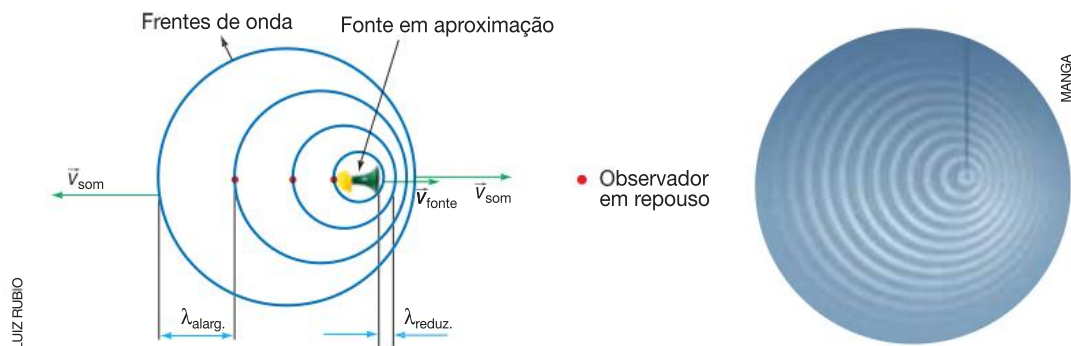


Figura 9 • As frentes de onda sonora são comprimidas na parte frontal da fonte e afastadas na parte traseira em consequência do seu movimento. Isso provoca uma variação de frequência que é percebida pelo observador.

Como consequência, a onda sonora tem menor comprimento de onda (maior frequência, som mais agudo) na parte da frente da ambulância e maior comprimento de onda (menor frequência, som mais grave) na parte traseira.

Se a fonte e o observador estão em repouso, a frequência com que as frentes de onda chegam até ele é a mesma com que as frentes são emitidas pela fonte, não havendo modificação na altura do som da sirene.

Mas como determinar a frequência percebida pelo observador ($f_{\text{obs.}}$), dada a velocidade relativa entre fonte e observador e a frequência da fonte (f_{fonte})? Vamos considerar, inicialmente, que a fonte se aproxima do observador. As ondas chegam até ele com a velocidade do som no ar (v_{som}) e com um comprimento de onda reduzido ($\lambda_{\text{reduz.}}$), como já dissemos. A frequência do observador pode ser obtida a partir da equação fundamental da Ondulatória:

$$v_{\text{som}} = \lambda_{\text{reduz.}} \cdot f_{\text{obs.}} \Rightarrow f_{\text{obs.}} = \frac{v_{\text{som}}}{\lambda_{\text{reduz.}}}$$

Mas como determinar $\lambda_{\text{reduz.}}$? O comprimento de onda reduzido, que nada mais é que a distância entre duas frentes de onda consecutivas, pode ser calculado multiplicando-se a velocidade relativa entre a frente de onda e a fonte ($v_{\text{rel.}}$) e o intervalo de tempo entre a emissão dessas duas frentes de ondas consecutivas, que é o período em que a fonte emite as ondas (T_{fonte}):

$$\Delta s = v \cdot \Delta t \Rightarrow \lambda_{\text{reduz.}} = v_{\text{rel.}} \cdot T_{\text{fonte}}$$

Usando a relação entre período e frequência, temos:

$$T = \frac{1}{f}$$

então, a expressão para $\lambda_{\text{reduz.}}$ torna-se:

$$\lambda_{\text{reduz.}} = \frac{v_{\text{rel.}}}{f_{\text{fonte}}}$$

A equação acima é a equação fundamental da Ondulatória aplicada quando a fonte emite as frentes de onda. Substituindo essa expressão na equação para a frequência do observador, temos:

$$f_{\text{obs.}} = \frac{v_{\text{som}}}{\left(\frac{v_{\text{rel.}}}{f_{\text{fonte}}}\right)} \Rightarrow f_{\text{obs.}} = \frac{v_{\text{som}}}{v_{\text{rel.}}} \cdot f_{\text{fonte}}$$

A velocidade relativa entre a frente de onda e a fonte é a diferença entre as duas velocidades, uma vez que elas se deslocam no mesmo sentido quando se aproximam do observador.

$$v_{\text{rel.}} = v_{\text{som}} - v_{\text{fonte}}$$

Então:

$$f_{\text{obs.}} = \frac{v_{\text{som}}}{v_{\text{som}} - v_{\text{fonte}}} \cdot f_{\text{fonte}}$$

Fonte em afastamento

Retomando a situação da ambulância, considere que ela se afasta do observador e que o movimento relativo entre as frentes de onda emitidas e a própria fonte provoque um alargamento do comprimento de onda na parte traseira do veículo (fig. 10).

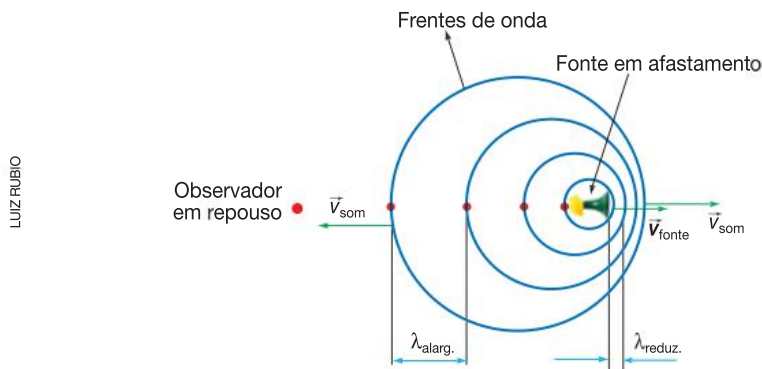


Figura 10 • O afastamento das frentes de onda na parte traseira da fonte diminui a frequência do som percebido pelo observador, tornando-o grave.

Da mesma forma que no caso anterior, o comprimento de onda alargado pode ser calculado pela equação fundamental da Ondulatória:

$$\lambda_{\text{alarg.}} = \frac{v_{\text{rel.}}}{f_{\text{fonte}}}$$

A diferença em relação à situação anterior está na velocidade relativa entre a frente de onda sonora e o movimento da fonte. Agora, ambos se movem em sentidos opostos, temos, portanto:

$$v_{\text{rel.}} = v_{\text{som}} + v_{\text{fonte}}$$

Substituindo a expressão para $\lambda_{\text{alarg.}}$ e $v_{\text{rel.}}$ na equação acima, temos:

$$f_{\text{obs.}} = \frac{v_{\text{som}}}{\left(\frac{v_{\text{rel.}}}{f_{\text{fonte}}}\right)} \Rightarrow f_{\text{obs.}} = \frac{v_{\text{som}}}{v_{\text{rel.}}} \cdot f_{\text{fonte}} \Rightarrow f_{\text{obs.}} = \frac{v_{\text{som}}}{v_{\text{som}} + v_{\text{fonte}}} \cdot f_{\text{fonte}}$$

Por meio dessa equação, podemos determinar a frequência modificada para um observador em repouso, quando a fonte se afasta, conhecendo a velocidade das ondas no meio, a velocidade e a frequência da fonte emissora.

De maneira geral, se levarmos em conta, além do movimento da fonte, o movimento do observador, cálculos similares nos permitem obter apenas uma expressão para a frequência observada:

$$f_{\text{obs.}} = \frac{v_{\text{som}} \pm v_{\text{obs.}}}{v_{\text{som}} \pm v_{\text{fonte}}} \cdot f_{\text{fonte}}$$

Nela, o sinal que precede $v_{\text{obs.}}$ ou v_{fonte} é determinado pelo referencial representado na figura 11, orientado do observador para a fonte.

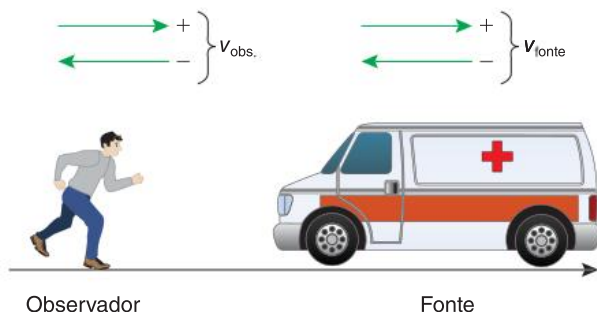


Figura 11 • Referencial utilizado para determinar os sinais das velocidades da fonte e do observador.

Já sabe responder?

Por que se escuta um estrondo sonoro quando um avião supersônico ultrapassa a barreira do som?



QUESTÕES RESOLVIDAS

- R5** Um carro de bombeiros aproxima-se de um automóvel em alta velocidade. A frequência do som emitido pela sirene é de 1.110 Hz. A velocidade do carro de bombeiros é de 72 km/h e a do automóvel, de 144 km/h. Além disso, os dois veículos estão em sentidos contrários. Sendo a velocidade do som no ar de 340 m/s, determine a frequência percebida pelo observador.

► Resolução

A frequência da fonte é de 1.110 Hz. A fonte e o observador estão em movimento com velocidades de 72 km/h (20 m/s) e 144 km/h (40 m/s), respectivamente. A frequência observada para essa situação é dada por:

$$f_{\text{obs.}} = \left(\frac{v_{\text{som}} + v_{\text{obs.}}}{v_{\text{som}} - v_{\text{fonte}}} \right) \cdot f_{\text{fonte}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow f_{\text{obs.}} = \left(\frac{340 + 40}{340 - 20} \right) \cdot 1.110 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow f_{\text{obs.}} \approx 1,2 \cdot 1.110 \quad \therefore \quad f_{\text{obs.}} \approx 1.332 \text{ Hz}$$

O sinal positivo no numerador se justifica, pois as frentes de onda e o observador estão se mo-

vendo em sentido contrário. Essas velocidades, portanto, se somam. No caso do denominador, as frentes de onda e a fonte estão se movendo no mesmo sentido. As velocidades, então, devem ser subtraídas.

- R6** Uma fonte sonora emite um som de frequência 1.000 Hz. Um observador em movimento com velocidade de 15 m/s se afasta dessa fonte. Se a velocidade do som no ar é de 340 m/s, qual é a frequência ouvida pelo observador?

► Resolução

Nesse caso, o observador se afasta da fonte, que está em repouso, com velocidade de 15 m/s. A frequência aparente, para essa situação, é dada por:

$$f_{\text{obs.}} = \frac{v_{\text{som}} - v_{\text{obs.}}}{v_{\text{som}}} \cdot f_{\text{fonte}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow f_{\text{obs.}} = \frac{340 - 15}{340} \cdot 1.000 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow f_{\text{obs.}} \approx 0,96 \cdot 1.000 \quad \therefore \quad f_{\text{obs.}} \approx 960 \text{ Hz}$$

- 1 Os instrumentos musicais emitem sons que podem ser definidos pela altura, intensidade e timbre. Qual das alternativas abaixo está **correta**?
 - a) A altura distingue os sons graves (de alta frequência) dos agudos (de baixa frequência); a intensidade distingue os sons fortes (de alta amplitude) dos fracos (de baixa amplitude); o timbre distingue duas ondas sonoras de mesma altura e intensidade, mas de forma de ondas diferentes.
 - b) A altura distingue os sons graves (de alta amplitude) dos agudos (de baixa amplitude); a intensidade distingue os sons fortes (de alta frequência) dos fracos (de baixa frequência); o timbre distingue duas ondas sonoras de formas distintas.
 - c) A altura distingue os sons graves dos agudos; a intensidade distingue os sons fortes (de baixa frequência) dos fracos (de alta frequência); o timbre distingue a amplitude da onda.
 - d) A altura distingue os sons graves (de baixa frequência) dos agudos (de alta frequência); a intensidade distingue os sons fortes dos fracos; o timbre distingue a amplitude da onda.
 - e) A altura distingue os sons graves (de baixa frequência) dos agudos (de alta frequência); a intensidade distingue os sons fortes (de alta amplitude) dos fracos (de baixa amplitude); o timbre distingue dois sons de mesma altura e intensidade, mas de forma de ondas diferentes.
- 2 Suponha que você está em casa escutando música com o botão do volume do som nas últimas marcações. Sua irmã está estudando e grita para você: "O som está muito alto!". Discuta a frase de sua irmã em termos das qualidades fisiológicas do som.
- 3 Uma nota **lá** de frequência 1.760 Hz é quantas vezes maior que a frequência do **lá** padrão? Isso corresponde a quantas oitavas acima?
- 4 A intensidade sonora do som emitido por uma oficina mecânica é de 10^{-3} W/m^2 . Qual é o nível de intensidade sonora percebido por uma pessoa próxima a essa oficina? (Dado: $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$)
- 5 Se a intensidade sonora do som emitido pela oficina da questão anterior aumentar 100 vezes, qual será o aumento no nível de intensidade sonora?
- 6 Em um *show* de *rock*, o nível de intensidade sonora pode variar de 90 dB a 120 dB. Esses valores correspondem a que variação na intensidade sonora do som produzido?
- 7 O nível de intensidade sonora em uma construção é de 95 dB. A prefeitura, para atender à reclamação dos moradores da região, ordenou à construtora que o nível de intensidade sonora fosse reduzido em 30%. Qual é a intensidade sonora que a construção deve emitir para atender à prefeitura?
- 8 À medida que uma ambulância se aproxima de um carro parado, o motorista do carro percebe o som se tornar mais agudo. Antes que a ambulância passe pelo carro, o motorista arranca e passa a manter uma distância constante dela. A partir daí, ele deixa de perceber o som da ambulância mais agudo. Com base nos seus conhecimentos sobre efeito Doppler, explique o fenômeno ocorrido.
- 9 Um avião emite um som de frequência $f = 600 \text{ Hz}$ e percorre uma trajetória retilínea com velocidade $v = 300 \text{ m/s}$. O ar está em repouso em relação a um observador que está parado. A velocidade de propagação do som é de 340 m/s . Qual é a frequência do som percebido pelo observador em repouso quando o avião:
 - a) se aproxima do observador?
 - b) se afasta do observador?
- 10 Duas fontes sonoras, *A* e *B*, emitem sons de mesma frequência, igual a 700 Hz. A fonte *A* está em repouso e a fonte *B* se move para a direita, afastando-se de *A* com velocidade de 54 m/s em relação ao solo. Um observador situado entre as fontes se move para a esquerda, com velocidade de 20 m/s também em relação ao solo. Qual é a frequência do som emitido pela fonte *A* percebida pelo observador? E a frequência do som emitido pela fonte *B* percebida pelo observador?
- 11 (Enem) Ao ouvir uma flauta e um piano emitindo a mesma nota musical, consegue-se diferenciar esses instrumentos um do outro. Essa diferenciação se deve principalmente ao(à):
 - a) intensidade sonora do som de cada instrumento musical.
 - b) potência sonora do som emitido pelos diferentes instrumentos musicais.
 - c) diferente velocidade de propagação do som emitido por cada instrumento musical.
 - d) timbre do som, que faz com que os formatos das ondas de cada instrumento sejam diferentes.
 - e) altura do som, que possui diferentes frequências para diferentes instrumentos musicais.
- 12 (Udesc) Um carro de bombeiros transita a 90 km/h com a sirene ligada em uma rua reta e plana. A sirene emite um som de 630 Hz. Uma pessoa parada na calçada da rua, esperando para atravessar pela faixa de pedestre, escuta o som da sirene e observa o carro de bombeiros se aproximando. Nesta situação, a frequência do som ouvido pela pessoa é igual a:

(Adote: velocidade de som igual a 340 m/s)

a) 620 Hz	c) 570 Hz	e) 680 Hz
b) 843 Hz	d) 565 Hz	

Uma casa silenciosa!

Um sério problema enfrentado hoje pelas pessoas que moram nas grandes cidades é o da poluição sonora. Esse tipo de poluição é característico de um ambiente onde o som está acima da condição normal de audição. Embora não fique acumulada no meio ambiente como outras, a poluição sonora pode causar vários danos ao corpo e prejudicar a qualidade de vida.

A poluição sonora é decorrente do som excessivo das indústrias, canteiros de obras, meios de transporte, áreas de recreação etc. Esses ruídos provocam efeitos negativos no sistema auditivo das pessoas, além de causar alterações comportamentais e emocionais.

A OMS (Organização Mundial da Saúde) considera que um som deve se limitar a 50 dB para não prejudicar o ser humano. A partir de 50 dB, os efeitos negativos começam. Alguns problemas podem ocorrer a curto prazo, outros levam anos para serem notados.

S13

No *Suplemento*, há questões que ajudarão os alunos a encontrar soluções para melhorar a acústica do ambiente.

EDILSON LIMA VAG A TARDE/FUTURA PRESS



BRUCE BURKHARDT/CORBIS/LATINSTOCK



Questões

- 1 Consulte seus familiares e amigos para verificar se eles convivem com o incômodo provocado pelo excesso de barulho na região por onde circulam ou se são importunados por outro tipo característico de ruído, como os provenientes de uma construção, de música alta etc.
- 2 Pesquise os efeitos negativos que a poluição sonora provoca na saúde das pessoas.
- 3 Você vai descrever como deve ser um ambiente – pode ser um quarto de dormir, uma sala ou um escritório – para que uma pessoa possa trabalhar ou estudar em silêncio. Identifique as modificações que devem ser feitas nesse ambiente, justificando essas alterações.

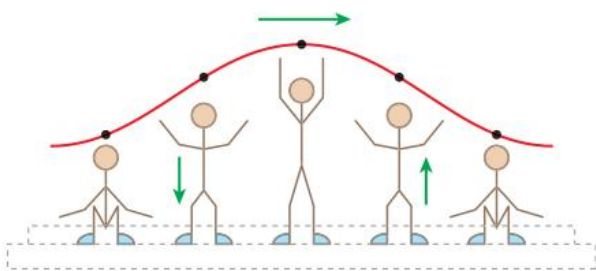
- 1 (Enem) Quando adolescente, as nossas tardes, após as aulas, consistiam em tomar às mãos o violão e o dicionário de acordes de Almir Chediak e desafiar nosso amigo Hamilton a descobrir, apenas ouvindo o acorde, quais notas eram escolhidas. Sempre perdíamos a aposta, ele possui o ouvido absoluto.

O ouvido absoluto é uma característica perceptual de poucos indivíduos capazes de identificar notas isoladas sem outras referências, isto é, sem precisar relacioná-las com outras notas de uma melodia.

LENT, R. *O cérebro do meu professor de acordeão*. Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br>. Acesso em: 15 ago. 2012 (adaptado).

No contexto apresentado, a propriedade física das ondas que permite essa distinção entre as notas é a:

- frequência.
 - intensidade.
 - forma da onda.
 - amplitude da onda.
 - velocidade de propagação.
- 2 (Enem) Uma manifestação comum das torcidas em estádios de futebol é a *ola mexicana*. Os espectadores de uma linha, sem sair do lugar e sem se deslocarem lateralmente, ficam de pé e se sentam, sincronizados com os da linha adjacente. O efeito coletivo se propaga pelos espectadores do estádio, formando uma onda progressiva, conforme ilustração a seguir.



Ola mexicana feita por torcedores em estádios de futebol.

Calcula-se que a velocidade de propagação dessa "onda humana" é 45 km/h, e que cada período de oscilação contém 16 pessoas, que se levantam e sentam organizadamente e distanciadas entre si por 80 cm.

Disponível em: <www.ufsm.br>. Acesso em: 7 dez. 2012 (adaptado).

Nessa *ola mexicana*, a frequência da onda, em hertz, é um valor mais próximo de:

- 0,3
 - 0,5
 - 1,0
 - 1,9
 - 3,7
- 3 (Fuvest-SP) Radiações, como raios X, luz verde, luz ultravioleta, micro-ondas ou ondas de rádio, são caracterizadas por seu comprimento de onda (λ) e por sua frequência (f). Quando essas radia-

ções propagam-se no vácuo, todas apresentam o mesmo valor para:

- λ
- f
- $\lambda \cdot f$
- $\frac{\lambda}{f}$
- $\frac{\lambda^2}{f}$

- 4 (Uece) Fornos de micro-ondas usam ondas de rádio de comprimento de onda de aproximadamente 12 cm para aquecer os alimentos. Considerando a velocidade da luz igual a 300 000 km/s, a frequência das ondas utilizadas é:

- 360 Hz
- 250 kHz
- 3,6 MHz
- 2,5 GHz

- 5 (UFSCar-SP) A diferença entre ondas mecânicas, como o som, e eletromagnéticas, como a luz, consiste no fato de que:

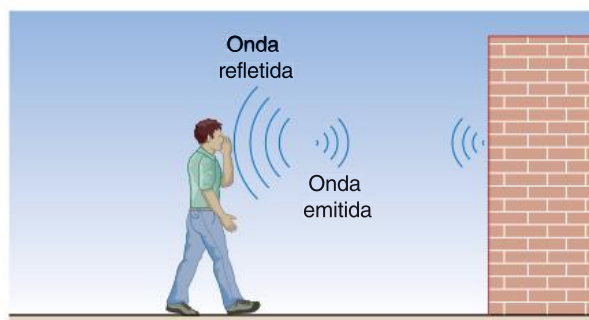
- a velocidade de propagação, calculada pelo produto do comprimento de onda pela frequência, só é assim obtida para ondas eletromagnéticas.
- as ondas eletromagnéticas podem assumir uma configuração mista de propagação transversal e longitudinal.
- apenas as ondas eletromagnéticas, em especial a luz, sofrem o fenômeno denominado difração.
- somente as ondas eletromagnéticas podem propagar-se em meios materiais ou não materiais.
- a interferência é um fenômeno que ocorre apenas com as ondas eletromagnéticas.

- 6 (Unemat-MT) No passado, durante uma tempestade, as pessoas costumavam dizer que um raio havia caído distante, se o trovão correspondente fosse ouvido muito tempo depois; ou que teria caído perto, caso acontecesse o contrário.

Do ponto de vista da Física, essa afirmação está fundamentada no fato de, no ar, a velocidade do som:

- variar como uma função da velocidade da luz.
- ser muito maior que a da luz.
- ser a mesma que a da luz.
- variar com o inverso do quadrado da distância.
- ser muito menor que a da luz.

- 7 (UFU-MG) João corre assoviando em direção a uma parede feita de tijolos, conforme figura a seguir.



A frequência do assvio de João é igual a f_{inicial} . A frequência da onda refletida na parede chamaremos de f_{final} . Suponha que João tenha um dispositivo "X" acoplado ao seu ouvido, de forma que somente as ondas refletidas na parede cheguem ao seu tímpano. Podemos concluir que a frequência do assvio que João escuta f_{final} é:

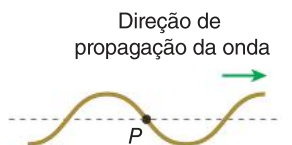
- maior do que $f_{\text{refletido}}$.
- igual a $f_{\text{refletido}}$.
- igual a f_{inicial} .
- menor do que $f_{\text{refletido}}$.

- 8 (UFRN) Duas pessoas, que estão em um ponto de ônibus, observam uma ambulância que delas se aproxima com a sirene de advertência ligada. Percebem que, ao passar por elas, o som emitido pela sirene se torna diferente daquele percebido durante a aproximação.

Por outro lado, comentando esse fato, elas concordam que o som mudou de uma tonalidade aguda para uma mais grave à medida que a ambulância se distanciava. Tal mudança é explicada pelo efeito Doppler, segundo o qual, para essa situação, a:

- amplitude do som diminuiu.
- frequência do som diminuiu.
- frequência do som aumentou.
- amplitude do som aumentou.

- 9 (UFMG) Enquanto brinca, Gabriela produz uma onda transversal em uma corda esticada. Em certo instante, parte dessa corda tem a forma mostrada na figura a seguir. A direção de propagação da onda na corda também está indicada na figura. A alternativa em que estão representados CORRETAMENTE a direção e o sentido do deslocamento do ponto P da corda, no instante mostrado, é:



- Direção de propagação para a direita; o ponto P está se deslocando para cima.
- Direção de propagação para a direita; o ponto P está se deslocando para baixo.
- Direção de propagação para a esquerda; o ponto P está se deslocando para cima.
- Direção de propagação para a esquerda; o ponto P está se deslocando para baixo.

- 10 (UFRGS-RS) A figura abaixo representa dois pulsos produzidos nas extremidades opostas de uma corda.



A alternativa que melhor representa a situação da corda após o encontro dos dois pulsos é:

- Um único pulso alto no centro, com seta verde apontando para a direita.
- Dois pulsos separados, com o da esquerda se deslocando para a esquerda e o da direita se deslocando para a direita.
- Dois pulsos separados, com o da esquerda se deslocando para a esquerda e o da direita se deslocando para a esquerda.
- Um único pulso baixo no centro, com seta verde apontando para a direita.
- Um único pulso alto no centro, com seta verde apontando para a esquerda.

- 11 (Uerj) A sirene de uma fábrica produz sons com frequência igual a 2.640 Hz.

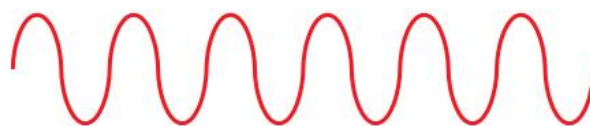
Determine o comprimento de onda do som produzido pela sirene em um dia cuja velocidade de propagação das ondas sonoras no ar seja igual a 1.188 km/h.

- 12 (UFRJ) Uma perturbação periódica em uma corda produz ondas de frequência 40 Hz e comprimento de onda 15 cm.

Neste caso, calcule:

- o período da onda;
- a velocidade da onda.

- 13 (Vunesp) A sucessão de pulsos representada na figura foi produzida em 1,5 s. Determine a frequência e o período da onda.





Respostas

UNIDADE 1

CAPÍTULO 1

Questões propostas

- Na primeira afirmação, Débora associa equivocadamente a temperatura da massa de leite com o calor; o calor deve ser relacionado com a energia interna em trânsito de um corpo para outro, e não com a temperatura da amostra de um só corpo. A segunda afirmação é correta, já que estabelece uma relação direta entre a temperatura da amostra e sua energia interna.
- Para que ocorra a transferência de energia interna de um corpo para outro, é necessário que, inicialmente, os corpos estejam a diferentes temperaturas quando colocados no interior do recipiente.
- I. falsa III. falsa
II. verdadeira IV. falsa
- Sabendo que os corpos **D** e **E** não estão em equilíbrio térmico, temos:
 $T_D \neq T_E$
E se os corpos **E** e **F** também não estão em equilíbrio térmico, temos:
 $T_E \neq T_F$
Combinando as duas equações:
 $T_D \neq T_E \neq T_F$
- I. incorreta III. incorreta
II. incorreta
- Nas noites frias de inverno, o cobertor de lã (isolante térmico) reduz a perda de calor do corpo de Ricardo para o ambiente externo, mantendo assim uma temperatura agradável sob o cobertor. Já nas noites de verão, o lençol de tecido fino não dificulta a troca de calor entre Ricardo e o ambiente externo, evitando assim que a temperatura sob o lençol aumente muito.
- A diferença entre as sensações térmicas nos dois ambientes se deve à diferença entre a condutibilidade térmica dos dois materiais. O ladrilho do banheiro parece estar mais frio, pois possui maior condutibilidade térmica do que o piso de madeira da sala, e, portanto, os pés de Andrea perdem calor mais rapidamente para o piso do banheiro do que para o piso da sala, causando essa sensação de frio.
- a) A transferência de calor entre o Sol e a Terra se dá por radiação térmica.
b) Existe um limite para a temperatura do conjunto. Quando a taxa de absorção de radiação do conjunto for igual à taxa de emissão de radiação e de calor, o equilíbrio térmico foi atingido.
- a) condução c) condução
b) radiação d) convecção
- d
- e

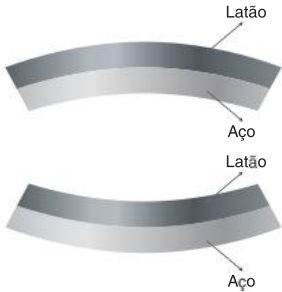

CAPÍTULO 2

Questões propostas

- Fahrenheit
- A temperatura de 318 K na escala Celsius corresponde a: $t_c = 45^\circ\text{C}$
A variação da temperatura do sistema na escala Celsius foi de: $\Delta t_c = 20^\circ\text{C}$
Portanto, a variação da temperatura da água na escala Fahrenheit é de:
 $\Delta t_f = 36^\circ\text{F}$
- A altura da coluna de mercúrio nos dois termômetros será a mesma, apenas os valores numéricos da temperatura em cada escala serão diferentes.
- $t_c = 68^\circ\text{F}$
- $y = 75^\circ\text{C}$
- a) $t_c + 10 = 5H$ b) $t_c = 65^\circ\text{C}$
- quando $t_c = 32^\circ\text{F}$: $t_c = 60^\circ\text{C}$
quando $t_c = 212^\circ\text{F}$: $t_c = -30^\circ\text{C}$
- As variações de temperatura nas escalas Celsius e Kelvin são numericamente iguais. $\Delta T = 8\text{ K}$
- b

CAPÍTULO 3

Questões propostas

- a) falsa c) verdadeira
b) falsa d) falsa
A dilatação dos corpos depende exclusivamente do material de que é composto o corpo, de suas dimensões iniciais e da variação de temperatura sofrida por ele; duas barras idênticas sofrendo a mesma variação de temperatura sofrerão a mesma alteração em suas dimensões iniciais.
- a) verdadeira c) falsa
b) falsa d) falsa
- a) 
b) 
- $D = 9,9932\text{ cm}$
- $\alpha = 6,25 \cdot 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$
- $\frac{\alpha_A}{\alpha_B} = 2$
- $T \approx 182,74^\circ\text{C}$
- a) O acionamento desse alarme de incêndio ocorre devido à dilatação não homogênea da lâmina bimetálica. Ao esquentá-la, a parte superior dilatará menos, enquanto a inferior dilatará mais, entortando-a. Esse entortamen-

to fará com que ela feche o contato com o circuito que aciona o alarme de incêndio.

- b) O metal da parte inferior da lâmina tem maior coeficiente de dilatação, pois, ao ser esquentada, ela vai entortar e fechar o contato.

9. e

10. Sabendo que o coeficiente de dilatação do alumínio é maior do que o do vidro, o procedimento correto para abrir o frasco consiste em aquecer todo o conjunto. Dessa forma, o diâmetro da tampa de alumínio será maior do que o diâmetro do recipiente de vidro.
11. Sabendo que à temperatura ambiente o diâmetro inicial do orifício é maior do que o diâmetro inicial do parafuso, quando o conjunto for resfriado, a contração sofrida pelo orifício será maior do que a contração sofrida pelo parafuso e a folga vai diminuir. De maneira análoga, quando o conjunto for aquecido, teremos um aumento na folga entre o parafuso e o orifício.

12. $\Delta A = 12,48\text{ cm}^2$

13. e

14. b

15. a) verdadeira

- b) Verdadeira. Resfriando as duas esferas e a chapa, as duas esferas atravessam o orifício; porém, a esfera de zinco terá um diâmetro menor do que o diâmetro do orifício, enquanto a esfera de ferro continuará apresentando o mesmo diâmetro do orifício.
- c) Falsa. A dilatação superficial da chapa é dada por:

$$\Delta A = A_0 \beta \Delta \theta \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta A = 25 \cdot 8 \cdot 2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 50$$

$$\therefore \Delta A = 0,24\text{ cm}^2$$

- d) Falsa. Ao aquecer a chapa, o diâmetro do orifício deve sofrer uma expansão.

16. a) falsa c) falsa
b) falsa d) falsa

A variação de temperatura gera uma variação de volume nos corpos sem alterar suas massas, causando uma mudança nos valores das densidades. As correntes de convecção geradas em fluidos são explicadas a partir da dependência que a densidade apresenta com a temperatura.

17. $\Delta V = 1,8\text{ cm}^3$

18. $\Delta V = 540\text{ mm}^3$

19. $\Delta T = -175^\circ\text{C}$

20. $\Delta V = 36\text{ cm}^3$

21. d

CAPÍTULO 4

Questões propostas

1. a) falsa b) verdadeira c) falsa

A dilatação real de um líquido depende apenas das características do líquido e da variação de temperatura por ele sofrida, independentemente do recipiente em que esteja. Já a dilatação aparente depende

das características do líquido e também das características do recipiente.

2. a) As hipóteses I e III são corretas.
b) O tanque de combustível de qualquer veículo sofre dilatação volumétrica, assim como o combustível. Porém, às vezes, a dilatação volumétrica da gasolina é superior à dilatação volumétrica do tanque, provocando vazamento. O volume de gasolina que vazou do tanque é chamado de dilatação aparente.
3. $\Delta V = 0,6 \text{ L}$
4. a) falsa d) falsa
b) verdadeira e) falsa
c) verdadeira
5. $\Delta V_{\text{real}} = -330 \text{ L}$
6. A água não se comporta termicamente como a maioria dos líquidos, porque sua dilatação é irregular. Até a temperatura de 4°C , a água da superfície se resfria e troca de lugar com a água do fundo, formando um ciclo: as correntes de convecção. Quando a água superficial atinge entre 0°C e 4°C , ocorre uma expansão volumétrica, resultando na redução de sua densidade. Como a água da parte inferior, nesse momento, é mais densa que a da parte superior, a água superficial não consegue descer, permanecendo na superfície até congelar a 0°C , formando uma camada de gelo superficial.
7. $V = 613,62 \text{ L}$
8. $T_f = 871,46^\circ\text{C}$
9. a) $\gamma_{\text{ap.}} = 1,6 \cdot 10^{-4}^\circ\text{C}^{-1}$
b) $\gamma_{\text{real}} = 1,84 \cdot 10^{-4}^\circ\text{C}^{-1}$
10. a) $\gamma_{\text{ap.}} = \frac{1}{3} \cdot 10^{-4}^\circ\text{C}^{-1}$
b) $\gamma_{\text{real}} = 6,03 \cdot 10^{-5}^\circ\text{C}^{-1}$
11. $\gamma_{\text{real}} = 5,3 \cdot 10^{-4}^\circ\text{C}^{-1}$
12. a) $\Delta V_{\text{liq.}} = 40 \text{ cm}^3$
b) $\Delta V_{\text{rec.}} = 2 \text{ cm}^3$
c) $\gamma_{\text{rec.}} = 0,25 \cdot 10^{-4}^\circ\text{C}^{-1}$
13. e

CAPÍTULO 5

Questões propostas

- O menor volume (0,6 L) sofrerá a maior variação de temperatura.
- O corpo de alumínio terá que receber sete vezes mais calor que o corpo de ouro.
- Uma panela de cobre aquece mais rapidamente do que uma panela de vidro quando ambas são expostas a fontes térmicas que fornecem a mesma quantidade de calor, pois o calor específico do cobre é menor que o do vidro. Por condução, a água será aquecida mais rapidamente na panela de cobre.
- O chumbo sofrerá maior elevação de temperatura.
- a) $Q = 3,2 \text{ cal}$ b) $Q = 4,0 \text{ cal}$

- c) $Q = 16,0 \text{ cal}$ d) $Q = 96,0 \text{ cal}$
6. $\Delta T_{\text{álcool}} \approx 0,06^\circ\text{C}$
7. $C = 40 \text{ cal/}^\circ\text{C}$
8. a) $C = 160 \text{ cal/}^\circ\text{C}$
b) $c = 0,32 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$
9. a) $C = 20 \text{ cal/}^\circ\text{C}$
b) Não. Como as massas são diferentes, as capacidades térmicas dos blocos de chumbo também serão diferentes.
10. $C = 200 \text{ cal/}^\circ\text{C}$
11. $c = 0,2 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$
12. a) $Q = 0,2 \text{ cal}$ c) $Q = -400 \text{ cal}$
b) $Q = 10 \text{ cal}$ d) $Q = -20 \text{ cal}$
13. $\Delta T = 2^\circ\text{C}$
14. $Q = 120 \text{ cal}$
15. a) verdadeira c) verdadeira
b) falsa d) verdadeira
16. $Q = 2.160 \text{ cal}$
17. $Q = -68.000 \text{ cal}$ ou $Q = -68 \text{ kcal}$
18. $\Delta T = 2,5 \cdot 10^{-3}^\circ\text{C}$
19. $\Delta t = 320 \text{ s}$
20. $P \approx 5,3 \text{ cal/s}$
21. $P = 70 \text{ cal/s}$; $c = 0,588 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$
Pela tabela, o valor obtido está próximo ao do calor específico do álcool.
22. Serão necessários 9 kg de bagaço de cana para aquecer a água na caldeira.
23. a) falsa d) verdadeira
b) verdadeira e) verdadeira
c) falsa
24. $P \approx 63,3 \text{ cal/s}$
25. a
26. a) $Q = 2.592.000 \text{ cal}$
b) $m = 25,92 \text{ kg}$ de gelo
27. $L = 50 \text{ cal/g}$
28. $c \approx 1,33 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$
29. a) $\Delta t = 200 \text{ s}$
b) $m \approx 222,2 \text{ g}$
30. a) Calor específico do gelo:
 $c_{\text{gelo}} = 0,5 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$
Calor latente de fusão do gelo:
 $L_{\text{gelo}} = 80 \text{ cal/g}$
b) $C_{\text{água}} = 100 \text{ cal/}^\circ\text{C}$
31. a) $L = 330 \text{ J/g}$
b) $Q_{\text{total}} = 1.098 \text{ kJ}$
32. a) Entre os instantes 2.000 s e 5.000 s, momento em que o corpo permanece à temperatura constante igual a 273 K (0°C), ocorre a mudança de estado (fusão) do gelo.
b) $c_{\text{água}} = 2 \cdot c_{\text{gelo}}$
33. a) ácido acético b) $\Delta t \approx 96 \text{ min}$

34. c
35. $T_f \approx 218^\circ\text{C}$
36. $T_f \approx 25,31^\circ\text{C}$
37. Não restará gelo na bacia.
38. a) $T_f = 45^\circ\text{C}$ c) $Q = -540 \text{ kcal}$
b) $Q = 165 \text{ kcal}$
39. a) Se o volume de água no calorímetro é 200 mL, a massa equivalente a esse volume é 200 g.
b) $C_{\text{calorímetro}} = 50 \text{ cal/}^\circ\text{C}$
40. $m_{\text{água}} = 112 \text{ g}$
41. $T_0 \approx 46,15^\circ\text{C}$
42. $C_{\text{garrafa}} = 48 \text{ cal/}^\circ\text{C}$
43. $T_f \approx 11,6^\circ\text{C}$
44. e
45. b

Questões de integração

- e
- e
- $t_f = 104^\circ\text{F}$
- d
- d
- e
- c
- c
- c
- c
- b
- c
- d
- b

UNIDADE 2

CAPÍTULO 6

Questões propostas

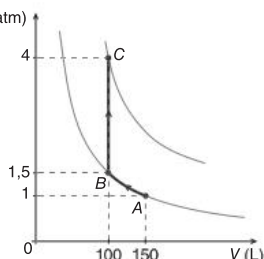
- Em um dia quente, as moléculas do desodorante têm alta energia cinética e a colisão dessas moléculas com as paredes da embalagem gera a pressão interna do conjunto. Num dia frio, as moléculas estão menos agitadas, o que causa um menor número de colisões entre elas e as paredes do recipiente, portanto, a pressão interna é menor. A diferença entre a pressão interna e a pressão atmosférica faz com que a embalagem murche até que a pressão interna se equilibre com a pressão externa.
- Lembrando que a pressão atmosférica ao nível do mar é 1 atm e que submetida a essa pressão a água ferve a 100°C , a panela de pressão cozinha mais rapidamente os alimentos porque a temperatura da água no seu interior ultrapassa os 100°C , atingindo aproximadamente 120°C .

Como a panela de pressão é totalmente fechada, o vapor de água que se forma não é dispersado, e a pressão interna da panela aumenta, tornando-se maior que a pressão atmosférica.

O aumento da pressão faz com que a água no interior da panela entre em ebulição, a uma temperatura acima de 100 °C. A pressão do vapor de água, porém, aumenta até certo limite. Superado esse limite, ela se torna suficientemente elevada para que o vapor levante o pino da válvula central e comece a sair da panela. A partir desse momento, a pressão do vapor se estabiliza porque é controlada pelo escapamento através da válvula. Em consequência, a temperatura no interior da panela também não aumenta mais.

A lata deve ser colocada em água fria antes de ser aberta, pois, devido à pressão interna, se aberta quente pode estourar e o doce quente espirrar e ferir a cozinheira.

3. a) $p_B = 1,5 \text{ atm}$
b) $p_C = 4 \text{ atm}$
c) $p \text{ (atm)}$



4. $p_B \approx 2,72 \text{ atm}$
5. $T_B = 57^\circ\text{C}$
6. $p_1 = 0,3 \text{ atm}$
7. a) À medida que o balão é conduzido da superfície até os 10 m de profundidade, seu volume diminui substancialmente por causa do aumento da pressão que a água exerce sobre ele. Esse fato pode ser notado pela equação abaixo:

$$\frac{PV}{T} = \text{constante}$$

Com o aumento substancial da pressão, o volume deve ser diminuído para que a constante seja mantida.

- b) Quando o balão penetra em uma região da corrente marinha de temperatura mais alta, ou seja, se T aumenta e P se mantém constante (já que a temperatura da água aumenta subitamente, pode-se desconsiderar a variação da pressão), o volume volta a aumentar. Isso também pode ser constatado observando a igualdade anterior.

8. a) $T = -73^\circ\text{C}$ b) $F = 16.600 \text{ N}$
9. $n = 6 \text{ mols}$
10. a) $n = 10^4 \text{ mols}$ b) $|Q| = 3 \cdot 10^6 \text{ J}$
11. $T = 227^\circ\text{C}$
12. a
13. d

CAPÍTULO 7

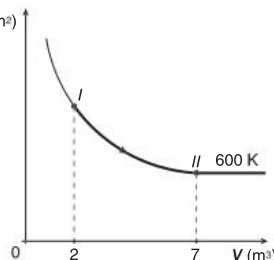
Questões propostas

1. a) Sabendo que o processo é isobárico, a pressão do gás permanece constante. O volume ocupado pelo gás diminui durante a transformação, pois o enunciado afirma que ele sofre uma compressão. A temperatura do gás diminui, já que deve apresentar a mesma pressão em um menor volume. Para isso suas moléculas devem perder energia cinética.
b) $\zeta = -5 \text{ J}$
2. a) Em um diagrama pressão \times volume, o trabalho realizado sobre o gás é numericamente igual à área sob a curva do gráfico, portanto, o trabalho será máximo quando a área for máxima, ou seja, durante o trajeto $1 \rightarrow 3 \rightarrow 2$.
b) Analogamente ao item a, o trabalho mínimo realizado sobre o gás é referente ao processo $1 \rightarrow 4 \rightarrow 2$, pois é o trajeto que apresenta a menor área sob a curva do gráfico.
3. $\zeta = 600 \text{ J}$
4. a) No percurso A, o gás sofre uma expansão isobárica seguida de uma transformação isovolumétrica com aumento de pressão. No percurso C, o gás sofre primeiro uma transformação isovolumétrica com aumento de pressão seguida de uma expansão isobárica.
b) Nos três casos, o trabalho realizado é positivo (gás sofre uma expansão), portanto, o trabalho foi realizado pelo gás sobre o meio.
c) O trabalho realizado pelo gás é numericamente igual à área sob a curva do gráfico.
Durante o processo A: $\zeta_A = 3.500 \text{ J}$
Durante o processo B, temos: $\zeta_B = 7.000 \text{ J}$
Durante o processo C: $\zeta_C = 10.500 \text{ J}$

5. $\zeta_{\text{total}} = 60 \text{ J}$
6. a) verdadeira c) falsa
b) falsa
7. O primeiro erro no texto está em afirmar que todo o calor absorvido pelo gás é convertido em trabalho; parte desse calor absorvido pode ser utilizada também para elevar sua energia interna. Além disso, como o enunciado afirma que o êmbolo sobe com velocidade constante, podemos concluir que o trabalho realizado pelo gás tem o mesmo módulo do trabalho da força peso do êmbolo durante todo o processo, o que leva a concluir que também é uma transformação isobárica.

8. a) $p_B = 0,8 \text{ Pa}$ b) $p_B = 0,9 \text{ Pa}$
9. a) Analisando o gráfico, vemos que o sistema sofre uma compressão isobárica.
b) $\zeta = -2.000 \text{ J}$
c) $\Delta U = -2.200 \text{ J}$

10. a) $p \text{ (N/m}^2\text{)}$



- b) $n \approx 417 \text{ mols}$ c) $\zeta = 10.000 \text{ J}$

11. a) Analisando o produto entre pressão e volume nos dois estados, vemos que a transformação é isotérmica.
b) A variação de energia interna do sistema é nula, pois não existe variação de temperatura durante o processo.
12. a) O gás sofreu uma expansão isovolumétrica.
b) Sabendo que não houve variação de volume, o trabalho realizado é nulo.
c) Mantendo o volume do sistema, a única forma de aumentar a pressão do gás é aumentando a energia cinética das partículas, ou seja, aumentando a temperatura.
d) Se a temperatura do sistema aumenta, sabemos que a energia interna do sistema também aumenta durante a transformação.
13. a) Analisando o gráfico, vemos que o estado final do gás está situado em uma isoterma de temperatura superior à isoterma do estado inicial; portanto, a energia interna do sistema aumentou durante o processo.
b) Vemos que houve uma compressão do gás; portanto, o trabalho foi realizado pelo meio sobre o gás.
c) $|\zeta| = 500 \text{ J}$
14. a) isovolumétrica
 $E = 2.000 \text{ cal}$
 $Q = 2.000 \text{ cal}$
 $\zeta = 0$
b) isobárica
 $E = 2.000 \text{ cal}$
 $Q = 2.800 \text{ cal}$
 $\zeta = 800 \text{ cal}$
c) isotérmica
 $E = 0$
 $Q = 2.200 \text{ cal}$
 $\zeta = 2.200 \text{ cal}$

15. $\Delta U = 750 \text{ J}$

16. $\zeta = 160 \text{ J}$ $\Delta U = 240 \text{ J}$

CAPÍTULO 8

Questões propostas

1. a) falsa c) falsa
b) falsa d) verdadeira
2. a) falsa c) falsa
b) falsa d) verdadeira
3. a) AB e CD: isovolumétrica; BC e DA: isobárica;
b) AB = nulo; BC = positivo; CD = nulo; DA = negativo
c) $\zeta = 10^6 \text{ J}$
d) $Q = 10^6 \text{ J}$

4. $Q_{\text{ciclo}} = 50 \text{ J}$
5. $V_f = 0,7 \text{ m}^3$
6. $T_1 = 500 \text{ K}$
7. Dobrando a temperatura da fonte quente e mantendo a temperatura da fonte fria, teremos um aumento no rendimento da máquina, que passará a ser: $\eta = 70\%$
8. a) $\eta = 16,67\%$ b) $Q_1 = 240 \text{ cal}$
9. $Q_1 = 1.250 \text{ cal}$
10. a) $T_2 = 112,5 \text{ K}$ b) $Q_1 = 2.000 \text{ cal}$
11. a) $\eta = 27\%$ c) $Q_2 = 584 \text{ cal}$
b) $\zeta = 216 \text{ J}$
12. a) $\zeta = 84 \text{ J}$ b) $e = 3$
13. A 2ª lei da Termodinâmica afirma que não existe transferência espontânea de calor de uma fonte mais fria para uma fonte mais quente; o funcionamento do refrigerador não viola esse princípio, pois o processo ocorrido não é espontâneo, ou seja, é preciso um motor que realize trabalho no sistema para que haja o fluxo de calor da fonte fria para a fonte quente.
14. $e = 44,4\%$

Questões de integração

1. d
2. d
3. d
4. d
5. d
6. a
7. d
8. a
9. e
10. e

UNIDADE 3

CAPÍTULO 9

Questões propostas

1. O livro é uma fonte de luz secundária, pois não produz a luz que emite; portanto, a luz que o torna visível é proveniente de alguma fonte primária, como o Sol, uma lâmpada ou uma vela. O livro reflete os raios de luz que o atingem, e esses raios refletidos chegam aos olhos do observador.

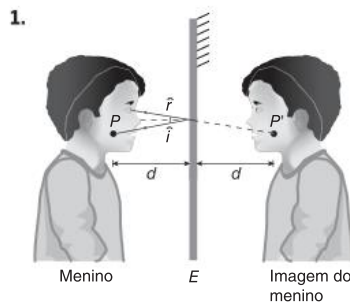


NELSON MATSUDA

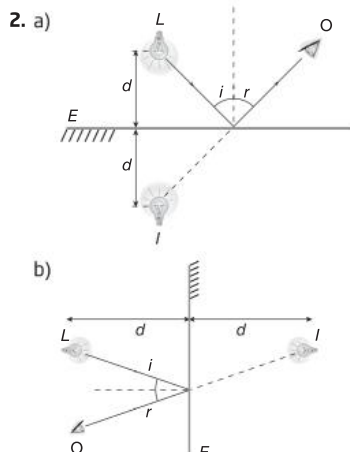
2. A situação descrita é possível devido à propagação retilínea dos raios de luz. O princípio da independência dos raios luminosos explica por que os dois feixes, verde e vermelho, não alteram suas trajetórias originais ao se cruzarem. O princípio da reversibilidade dos raios luminosos explica o fato de o raio verde retornar pelo mesmo caminho (mesma direção) em que seguia antes de ser refletido.
3. $h_p = 50 \text{ m}$
4. a) $h_p = 5,6 \text{ m}$
b) $x = 2 \text{ m}$. O comprimento da sombra do homem duplicará.
5. a) Os três corpos envolvidos nesse tipo de eclipse são o Sol, a Terra e a Lua.
b) O Sol faz o papel de fonte, a Terra de obstáculo e a Lua de anteparo.
6. e
7. c
8. $h = 8 \text{ cm}$
9. Se a estrela está a uma distância de 5 anos-luz da Terra, a luz emitida por ela leva 5 anos para chegar ao nosso planeta, portanto, ao observá-la, vemos a estrela como ela era cinco anos atrás.
10. c
11. $h = 26 \text{ m}$
12. a) não c) $d = 4,8 \cdot 10^{16} \text{ m}$
b) 10 anos
13. d

CAPÍTULO 10

Questões propostas



LUIZ RUBIO



3. c
4. A distância entre a vela e sua imagem conjugada será 150 cm.
5. Ao olhar para o espelho, o observador consegue ver os objetos B, C e D.
6. $A'B = 5\sqrt{2} \text{ m}$ 7. a
8. Os ângulos devem ser de 45° para que a trajetória seja a planejada.
9. d
10. b

CAPÍTULO 11

Questões propostas

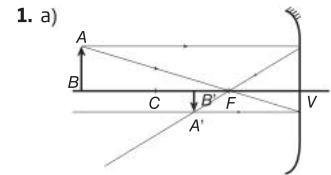


Imagem real, invertida e reduzida.

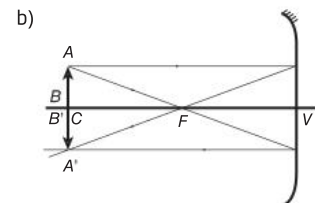


Imagem real, invertida e de mesmo tamanho do objeto.

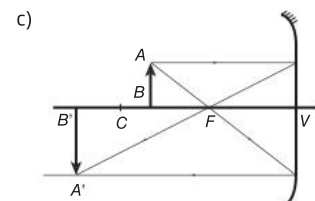
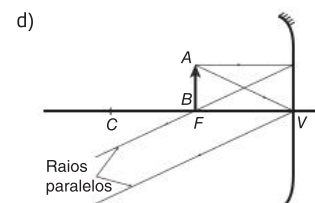


Imagem real, invertida e ampliada.



Os raios refletidos são paralelos. A imagem é imprópria.

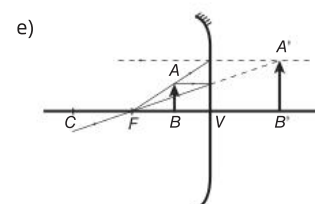
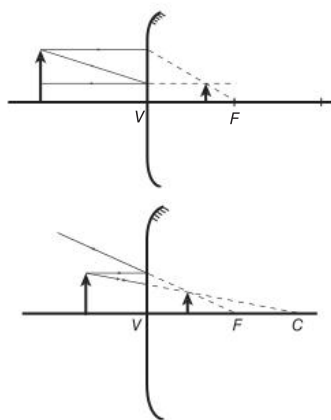


Imagem virtual, direita e ampliada.

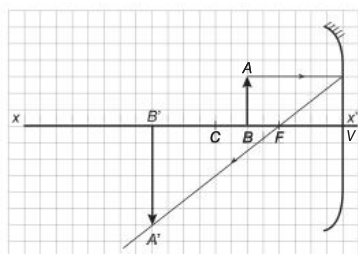
2. No esquema abaixo, é representado um espelho convexo e um objeto colocado em frente a ele em duas posições diferentes:

ILUSTRAÇÕES: LUIZ RUBIO

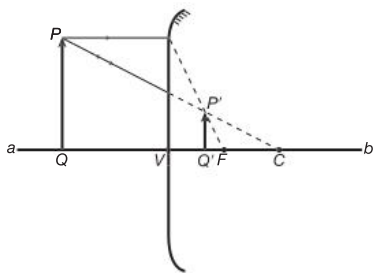


A imagem de um objeto real colocado na frente de um espelho côncavo é *sempre* virtual, direita e reduzida.

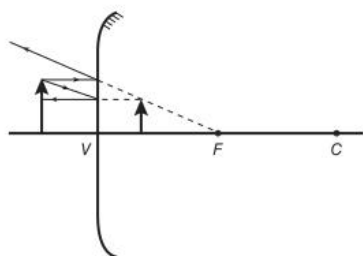
3. O rosto da pessoa deve estar a uma distância menor que 25 cm do espelho.
4. A imagem $A'B'$ é real, invertida e maior que o objeto AB . Trata-se de um espelho côncavo, e a imagem, sendo real, está na frente do espelho.



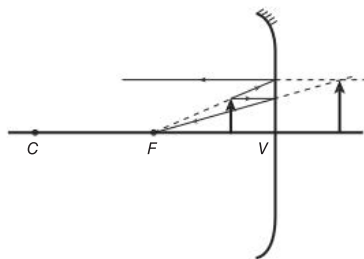
5. A imagem $P'Q'$ é virtual, direita e menor que o objeto PQ . Trata-se de um espelho convexo, e a imagem está atrás do espelho.



6. O espelho no qual Renata observou sua cabeça é convexo, porque a imagem formada era direita e reduzida.

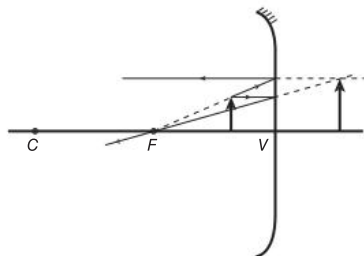


O espelho no qual Renata observou seu tronco é côncavo, e ela estava posicionada entre o foco e o vértice desse espelho, porque a imagem formada era direita e ampliada.



As imagens da cabeça e do corpo são virtuais.

7. a) O espelho deve ser côncavo para que a imagem fornecida seja direita e ampliada, e Bel deve posicionar-se entre o foco e o vértice.



- b) $R = 120$ cm
8. a) O espelho utilizado é convexo e fornece imagens direitas, reduzidas e virtuais. O campo visual é ampliado quando se usa esse tipo de espelho.
- b) $i = 30$ cm
9. espelho côncavo; $f = 8,0$ mm
10. a) Num espelho côncavo, a imagem "desaparece" quando o objeto é colocado exatamente sobre o foco, porque a imagem formada é imprópria, forma-se no infinito. Então, o foco desse espelho é $f = 15$ cm e seu raio de curvatura é $R = 30$ cm.
- b) $A = -0,5$
11. a) As imagens formadas em espelhos convexos são sempre virtuais, direitas e menores que o objeto.
- b) O campo visual fornecido por espelhos convexos é maior que o fornecido por espelhos planos nas mesmas condições.
- c) A imagem está localizada a 2,25 m do espelho e é quatro vezes menor que o objeto.
12. a) O espelho é côncavo, pois só espelhos côncavos formam imagens reais (de objetos reais), que podem ser projetadas em anteparos. Além disso, espelhos convexos sempre formam imagens menores que o objeto.
- b) $R = 0,75$ m

13. $f \approx -0,53$ m

14. c

15. b

Questões de integração

1. c

2. c

3. c

4. d

5. b

6. a

7. d

8. b

9. e

10. b

11. d

12. Não, a reflexão especular ou regular da luz exige que a superfície refletora seja plana e polida, como a de espelhos e metais.

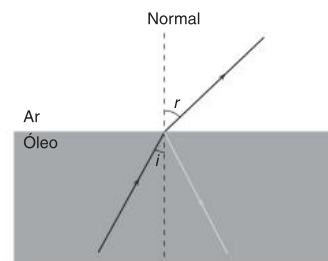
13. A distância entre as duas imagens será de 40 cm.

UNIDADE 4

CAPÍTULO 12

Questões propostas

1. a)



Como a velocidade da luz no óleo é menor que no ar, o raio de luz se afasta da normal.

b) $n_{\text{óleo}} = 1,5$

2. a) Verdadeira, pois o raio refratado se aproxima da normal.

b) Verdadeira, pois o índice de refração do meio 2 é maior do que o do meio 1.

3. $d = 0,2$ m $n_{\text{vidro}} = 1,5$

4. a) Para que haja reflexão total, a luz deve passar de um meio mais refringente para um menos refringente. Portanto, a reflexão total pode ocorrer quando a luz incide do quartzo para o vidro comum e não pode ocorrer quando incide da glicerina para o álcool.

b) O meio em que a luz proveniente do ar será mais desviada é aquele no qual a luz se move com a menor velocidade; portanto, o que tem maior índice de refração. Entre os meios apresenta-

dos na tabela, o álcool etílico é o mais refringente.

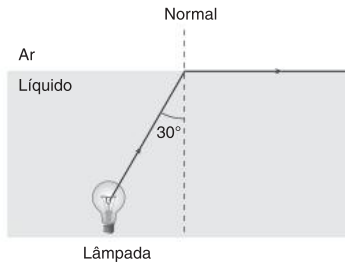
Da lei de Snell-Descartes, sabemos que:

$$\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{n_x}{n_{ar}} \Rightarrow \frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = n_x \Rightarrow \Rightarrow \sin \hat{r} = \frac{\sin \hat{i}}{n_x}$$

$\sin \hat{r}$ (portanto \hat{r}) é inversamente proporcional a n_x , ou seja, quanto maior for n , menor será o ângulo em relação à normal, indicando maior desvio, já que, ao passar de um meio menos refringente, para um mais refringente o raio de luz se aproxima da normal.

c) $\hat{L} = 49^\circ$

5. a) O raio emerge rasante à superfície; portanto, o ângulo de incidência de 30° é o ângulo limite entre o líquido e o ar. Veja a figura a seguir:



- b) Ocorre reflexão total.

6. a) $\hat{r} = 70^\circ$ b) $v = 2,25 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
c) $\hat{L} = 49^\circ$. Para ângulos maiores que 49° , haverá reflexão total e o peixe enxergará a lâmpada L refletida na superfície de separação.
7. a) No trecho AB o índice de refração diminui seu valor à medida que se aproxima do solo, de modo que o valor na camada superior de ar (n_1) é maior que o índice de refração da camada inferior (n_2). Isso ocorre porque o ar próximo ao solo é mais quente (menos denso) e, nessas condições, a velocidade da luz aumenta no meio n_2 .
- b) Em B ocorre reflexão total.
- c) Um observador em C verá a imagem da nuvem no prolongamento do raio que chega aos seus olhos, ou seja, abaixo de onde ela realmente se encontra.

8. $R_{\min} \approx 3,45 \text{ m}$
9. I. correta III. correta
II. correta
10. O líquido A pode ser o de número 2, e o B pode ser o de número 1.
11. I. correta III. correta
II. correta

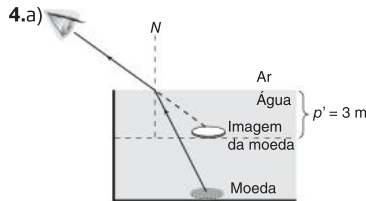
CAPÍTULO 13

Questões propostas

1. Se quisermos examinar o caranguejo com mais detalhes, devemos fotografá-lo na situação da figura 2, pois ele parecerá

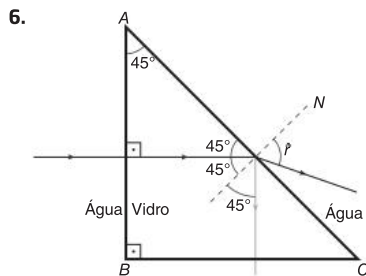
mais próximo do observador, já que sua imagem será formada acima de sua posição real.

2. I. verdadeira III. falsa
II. verdadeira
3. I. verdadeira III. verdadeira
II. falsa

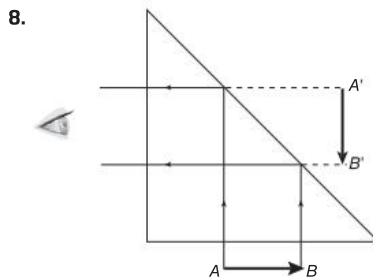


4. a)

- b) $p = 4 \text{ m}$
5. I. falsa III. verdadeira
II. verdadeira



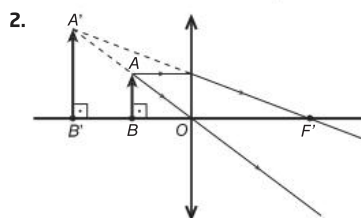
7. I. verdadeira III. verdadeira
II. verdadeira IV. verdadeira



CAPÍTULO 14

Questões propostas

1. para L , $|f| = 40 \text{ cm}$; para E , $|f| = 40 \text{ cm}$



3. a) Sendo $n_1 > n_2$, a lente plano-convexa da figura 1 comporta-se como uma lente convergente, enquanto a lente plano-côncava da figura 2 comporta-se como lente divergente.

- b) Se as duas lentes se comportam como lentes divergentes, na situação da figura 1, $n_1 < n_2$, e na situação da figura 2, $n_1 > n_2$.

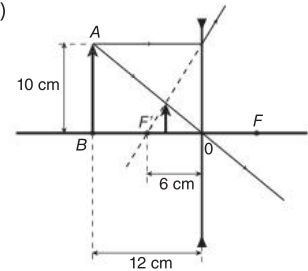
4. a) L_2 é divergente.
b) A distância focal de L_2 é $f = -20 \text{ cm}$.

CAPÍTULO 15

Questões propostas

1. a) A lente deve ser divergente para que forneça uma imagem reduzida e direita do objeto.
b) $f = -20 \text{ cm}$

2. a)



b) $A = \frac{1}{3}$; $i \approx 3,3 \text{ cm}$

3. o mesmo tamanho

4. a) A lente utilizada é convergente, pois é esse tipo de lente que fornece imagens ampliadas dos objetos.
b) A distância do rubi à lente é de $2,0 \text{ cm}$.

5. a) Os raios de luz provenientes da estrela podem ser considerados paralelos e convergem para o foco da lente. Portanto, a distância focal da lente é $f = 10 \text{ cm}$.

b) $p = 6 \text{ cm}$

6. $f = -40 \text{ cm}$ $V = -2,5 \text{ di}$

7. $V_{eq} \approx 6,67 \text{ di}$

8. e

CAPÍTULO 16

Questões propostas

1. Objetiva: a imagem de um objeto é real e invertida.
Ocular: para a lente ocular, essa imagem é virtual e invertida.

2. a) $p = 840 \text{ mm}$ b) $o = 1.000 \text{ mm}$

3. a) A distância focal da lente é $f = 30 \text{ cm}$.
b) $p = 20 \text{ cm}$

4. O comprimento da sala deve ser de $3.010 \text{ cm} = 30,1 \text{ m}$.

5. Imagens virtuais e reduzidas são fornecidas por lentes divergentes. Esse tipo de lente é utilizado na correção da miopia porque retarda a convergência dos feixes de luz, uma vez que no olho míope imagens de objetos distantes não se formam com nitidez por serem conjugadas antes da retina.

6. Na receita, lê-se a vergência ou grau da lente. Como $V = \frac{1}{f}$, a distância focal da lente receitada é > 0 , portanto, trata-se de uma lente convergente. Lentes convergentes são utilizadas na correção da presbiopia, defeito de visão no qual a imagem se forma depois da retina, devido ao enrijecimento do cristalino. O defeito não poderia ser miopia, pois, para corrigi-la, são utilizadas lentes divergentes.

7. I. falsa III. verdadeira
II. verdadeira IV. falsa

8. I. correta III. correta
II. correta

9. a) $f \approx 12,9 \text{ cm}$

b) Lentes convergentes são usadas na correção da hipermetropia ou presbiopia. Por se tratar de uma pessoa jovem, o defeito provavelmente é hipermetropia.

10. $V = 3 \text{ di}$

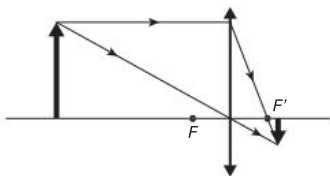
11. a) O míope deve usar lentes divergentes. Esse tipo de lente é utilizado na correção da miopia porque retarda a convergência dos feixes de luz, uma vez que no olho míope imagens de objetos distantes não se formam com nitidez por serem conjugadas antes da retina, já que seu ponto remoto está localizado a uma distância finita, e não no infinito.

b) $V \approx -3,3 \text{ di}$ ou "graus"

12. $i = 0,02 \text{ mm}$

Questões de integração

1. a
2. c
3. a
4. a
5. a
6. $n_2 = 1,8$
7. c
8. b
9. c
10. e
11. a
12. a
13. d
14. a
15.



ADILSON SECCO

UNIDADE 5

CAPÍTULO 17

Questões propostas

1. falsa
2. $A = 0,1 \text{ m}$
instantes $0,5 \text{ s}$; $1,5 \text{ s}$; $2,5 \text{ s}$; $3,5 \text{ s}$
3. I. incorreta III. correta
II. incorreta
4. c
5. $L \approx 6,3 \text{ cm}$
6. a
7. b
8. $\lambda = 0,3 \text{ m}$ $T = 0,03 \text{ s}$
9. $v = 120 \text{ cm/s}$, $A = 5 \text{ mm}$ e $\lambda = 2 \text{ cm}$
10. $\lambda_1 = 10 \text{ cm}$; $\lambda_2 \approx 8,16 \text{ cm}$
11. $\lambda_2 \approx 3,33 \text{ cm}$
12. a) Os fenômenos ondulatórios que podem ser vistos são o da difração e o da interferência.
b) Corresponde ao processo de interferência construtiva para A e B e destrutiva para C.
13. $\Delta s = 17 \text{ m}$
14. $\Delta t = 0,2 \text{ s}$
15. $\frac{\lambda_{\text{som, granito}}}{\lambda_{\text{som, ar}}} = \frac{4}{0,23} \approx 17,39$

O comprimento de onda do som no granito é aproximadamente 17 vezes maior do que no ar.

CAPÍTULO 18

Questões propostas

1. e
2. A altura do som é uma característica que está relacionada à frequência. Quanto maior a frequência, mais agudo é o som. Quanto menor a frequência, mais grave é o som.
3. quatro vezes maior e duas oitavas acima
4. $\beta = 9 \text{ B} = 90 \text{ dB}$ 5. $\beta = 110 \text{ dB}$
6. Isso significa que o aumento é de 1.000 vezes na intensidade sonora.
7. $10^{-5,35} \text{ W/m}^2$
8. O efeito Doppler consiste na diferença de frequências sonoras que são captadas por um observador, que pode estar em repouso ou não. Essa diferença de frequências é percebida pela sensação auditiva de agu-

dos e graves. A grandeza física responsável por tal diferença é a frequência da onda sonora. As frequências mais baixas são percebidas como um som grave, e as frequências maiores, como um som agudo.

No caso do efeito Doppler, é possível perceber que, quando a fonte sonora se aproxima de um observador, ele perceberá o som mais agudo emitido pela fonte e, quando a fonte se afasta, perceberá um som mais grave.

Quando a ambulância se aproxima do observador, as frentes de onda emitidas por ela se tornam mais próximas umas das outras na parte da frente do veículo (no sentido do movimento), por causa do seu deslocamento. Do seu ponto de vista, o observador receberá frentes de onda com intervalos menores de tempo se comparado com a fonte em repouso. O resultado será a percepção, pelo observador, de um som mais agudo, ou seja, a frequência da onda sonora para o observador será maior do que a que está sendo emitida pela fonte.

Quando a ambulância mantém uma distância constante do observador, este não perceberá mais o som agudo, pois a frequência não será alterada pela velocidade relativa dos corpos; assim, as frentes de onda alcançarão o observador com menor frequência, que é a frequência original da onda emitida pela ambulância.

9. a) $f_{\text{obs.}} = 5.100 \text{ Hz}$ b) $f_{\text{obs.}} = 318,75 \text{ Hz}$
10. Com relação à fonte A, ela está em repouso, e o observador, em movimento de aproximação:
 $f_{\text{obs.}} \approx 741,18 \text{ Hz}$
Com relação à fonte B, tanto o observador como a fonte estão em movimento e se afastando:
 $f_{\text{obs.}} \approx 568,53 \text{ Hz}$

11. d

12. e

Questões de integração

1. a
2. c
3. c
4. d
5. d
6. e
7. a
8. b
9. b
10. b
11. $\lambda = 0,125 \text{ m}$
12. a) $T = 0,025 \text{ s}$
b) $v = 6 \text{ m/s}$
13. $f = 4 \text{ Hz}$; $T = 0,25 \text{ s}$



Bibliografia

- BARHAM, P. *A ciência da culinária*. São Paulo: Roca, 2002.
- BERKES, I. *A Física no cotidiano*. Lisboa: Gradiva, 1992.
- BOUVET, J. F. *Tem mesmo ferro no espinafre? E outras ideias feitas, testadas e aprovadas*. São Paulo: Ática, 1998.
- BRAGA, M.; GUERRA, A.; FREITAS, J.; REIS, J. C. *Newton e o triunfo do mecanicismo*. São Paulo: Atual, 1999.
- _____. *Einstein e o universo relativístico*. São Paulo: Atual, 2000.
- BRAZ, D. J. *Física moderna: tópicos para o ensino médio*. Campinas: Companhia da Escola, 2002.
- BRENNAN, R. P. *Gigantes da Física*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1998.
- DAOUL, L.; CARUSO, F. *Tirinhas de Física*. Rio de Janeiro: Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2001. v. 1-4.
- EINSTEIN, A.; INFELD, L. *A evolução da Física*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2008.
- FEYNMAN, R. P. *Está a brincar, Sr. Feynman!* Lisboa: Gradiva, 1988.
- _____. *QED: a estranha teoria da luz e da matéria*. Lisboa: Gradiva, 1992.
- _____. *O que é uma lei física*. Lisboa: Gradiva, 1989.
- _____. *Física em seis lições*. Rio de Janeiro: Ediouro, 1995.
- _____. *Lições de Física de Feynman*. São Paulo: Artmed, 2008. v. 3.
- FIGUEIREDO, A.; PIETROCOLA, M. *Luz e cores*. São Paulo: FTD, 2000. (Coleção Física, um outro lado)
- _____. *Calor e temperatura*. São Paulo: FTD, 2000. (Coleção Física, um outro lado)
- _____. *Faces da energia*. São Paulo: FTD, 2000. (Coleção Física, um outro lado)
- FIOLHAIS, C. *Física divertida*. Lisboa: Gradiva, 1991.
- GAMOW, G. *O incrível mundo da Física Moderna*. São Paulo: Ibrasa, 1980.
- GILMORE, R. *Alice no país do quantum: a Física Quântica ao alcance de todos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1995.
- _____. *O mágico dos quarks: a Física de partículas ao alcance de todos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2001.
- GLEISER, M. *A dança do universo*. São Paulo: Companhia das Letras, 1997.
- _____. *O fim da terra e do céu*. São Paulo: Companhia das Letras, 2001.
- _____. *A harmonia do mundo*. São Paulo: Companhia das Letras, 2006.
- GREENE, B. *O universo elegante*. São Paulo: Companhia das Letras, 2001.
- GRIBBIN, J. *À procura do gato de Schrödinger*. Lisboa: Presença, 1988.
- _____. *Fique por dentro da Física Moderna*. São Paulo: Cosac Naify, 2001.
- GUERRA, A.; BRAGA, M.; REIS, J. C. *Bohr e a interpretação quântica da natureza*. São Paulo: Atual, 2005.

- HEWITT, P. G. *Física conceitual*. Porto Alegre: Artmed, 2002.
- KRAUSS, L. M. *Sem medo da Física*. Rio de Janeiro: Campus, 1995.
- MENEZES, L. C. *Vale a pena ser físico?* São Paulo: Moderna, 1988.
- NUSSENZVEIG, M. *Física básica*. Rio de Janeiro: Edgard Blucher, 2002. v. 3.
- PERELMAN, I. *Física recreativa*. Moscou: Mir, 1980.
- SAGAN, C. *O mundo assombrado pelos demônios*. São Paulo: Companhia das Letras, 1997.
- _____. *Bilhões e bilhões*. São Paulo: Companhia das Letras, 1998.
- STANNARD, R. *O tempo e o espaço do tio Alberto*. Lisboa: Edições 70, 1992.
- _____. *Os buracos negros e o tio Alberto*. Lisboa: Edições 70, 1999.
- _____. *O tio Alberto e o mundo dos quanta*. Lisboa: Edições 70, 2009.
- THIS, H. *Um cientista na cozinha*. 3. ed. São Paulo: Ática, 1998.
- VALADARES, E. C. *Física mais que divertida*. Belo Horizonte: UFMG, 2000.
- WALKER, J. *O grande circo da Física*. Lisboa: Gradiva, 1990.
- WOLKE, R. L. *O que Einstein disse a seu cozinheiro*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2003.
- _____. *O que Einstein disse a seu cozinheiro 2*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2005.



Museus e centros de ciências

Espaço Ciência – Museu Interativo de Ciência

Olinda, PE

<<http://www.espacociencia.pe.gov.br>>

MAST – Museu de Astronomia e Ciências e Afins

Rio de Janeiro, RJ

<<http://www.mast.br>>

Museu de Mineralogia e Petrologia Luiz Englert

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre, RS

<<http://www.ufrgs.br/museum/porsite.htm>>

Centro de Divulgação Científica e Cultural – CDCC

São Carlos, SP

<<http://www.cdcc.sc.usp.br>>

Laboratório de Divulgação Científica da**Universidade Federal de Minas Gerais**

Belo Horizonte, MG

<<http://www.fisica.ufmg.br/divertida>>

Museu de Ciência e Tecnologia da Universidade do Estado da Bahia

Salvador, BA

<<http://www.uneb.br/mct>>

Seara da Ciência

Fortaleza, CE

<<http://www.seara.ufc.br>>

Associação Brasileira de Centros e Museus de Ciência

Rio de Janeiro, RJ

<<http://www.abcmc.org.br>>

Fundação Museu da Imagem e do Som

Rio de Janeiro, RJ

<<http://www.mis.rj.gov.br>>

Laboratório Aberto de Ciência, Tecnologia, Educação e Arte – Lactea

Belo Horizonte, MG

<<http://www.lactea.cefetmg.br>>

Usina Ciência da Ufal

Maceió, AL

<<http://www.usinaciencia.ufal.br>>

Museu de Ciências Naturais

Caxias do Sul, RS

<<http://www.ucs.br/site/museu-de-ciencias-naturais/>>

Museu de Ciências e Tecnologia

Porto Alegre, RS

<<http://www.pucrs.br/mct>>

Sabina Parque Escola do Conhecimento

Santo André, SP

<<http://sabina.santoandre.sp.gov.br/>>

Parque CienTec – Parque de Ciência e Tecnologia da USP

São Paulo, SP

<<http://www.parquecientec.usp.br>>

Espaço Catavento – Cultural e Educacional

São Paulo, SP

<<http://www.cataventocultural.org.br>>

Bosque da Ciência

Manaus, AM

<<http://bosque.inpa.gov.br/>>

Praça da Ciência

Vitória, ES

<<http://www.vitoria.es.gov.br/cidade/pracas>>

Museu da Vida

Rio de Janeiro, RJ

<<http://www.museudavida.fiocruz.br>>

Museu de Geociências da USP

São Paulo, SP

<<http://www.igc.usp.br/museu/home.php>>

Parque Geológico do Varvito

Itu, SP

<<http://www.itu.com.br/parquedovarvitohot>>

(Acessos em: 15 abr. 2016.)



SUPLEMENTO PARA O PROFESSOR

CONVERSA INICIAL

Nós, autores desta coleção de Física para o Ensino Médio, somos professores há mais de vinte anos e lecionamos em escolas públicas e particulares. Durante todo esse tempo, nosso grupo foi produzindo, aplicando, avaliando, reformulando e aplicando novamente materiais elaborados por nós em sala de aula. Nesse processo, avaliamos a aprendizagem de nossos alunos, e os resultados positivos nos estimularam a produzir esta obra didática.

A dedicação ao magistério não foi impedimento para continuar nossos estudos teóricos sobre o ensino de Ciências e de Matemática. Esses estudos nos ajudaram a identificar problemas de ensino-aprendizagem e a buscar soluções para eles.

Com essas considerações iniciais, pretendemos manifestar nosso desejo de que esta coleção didática contribua para o trabalho do professor de Física e reflita nossa prática pedagógica.

Sabemos quanto é importante o trabalho do professor e como o livro didático pode auxiliá-lo. Mas é muito difícil que apenas o livro atenda às distintas realidades dos cursos no país. Portanto, o professor deve selecionar conteúdos e atividades que complementem as escolhas de seu planejamento pedagógico e atendam às necessidades de suas turmas.

Convidamos o professor a analisar nossa proposta. Todas as críticas e sugestões serão bem-vindas e, desde já, agradecemos.

Os autores



SUMÁRIO

Parte geral

1. Apresentação, 293	
2. Sobre um curso de Física para o Ensino Médio, 293	
2.1 - Tratamento matemático.....	294
2.2 - Contextos.....	295
2.3 - Conhecimento físico e tecnologia.....	295
2.4 - Física Moderna.....	295
2.5 - Dimensão empírica no ensino de Física ...	296
3. Estrutura da coleção, 296	
3.1 - Seleção e organização dos conteúdos	297
3.1.1 - Distribuição dos conteúdos.....	299
3.2 - Questões iniciais das unidades e capítulos	301
3.2.1 - Questões de abertura das unidades....	301
3.2.2 - Questões de abertura dos capítulos....	302
3.3 - Critérios de elaboração do texto didático	302
3.4 - Sobre as questões propostas.....	302
3.5 - Sobre as seções que compõem o livro	303
3.5.1 - Seção "Para saber mais".....	303
3.5.2 - Seção "Já sabe responder?".....	303
3.5.3 - Seção "Trilhando o caminho das competências".....	303
3.5.4 - Seção "Investigar é preciso - atividade experimental".....	304
3.5.5 - Seção "Para pesquisar em grupo - Será verdade mesmo que...".....	304
3.5.6 - Outras seções e boxes.....	304
4. Orientações sobre o uso deste material didático, 305	
5. Avaliação da aprendizagem, 307	
5.1 - Avaliação da aprendizagem em Física.....	309
Bibliografia sugerida, 310	

Parte específica

1. Apresentação, 312	
2. Orientações para a utilização da obra e instrumentos de complementação didático-pedagógica, 312	

UNIDADE 1 CALOR E TEMPERATURA, 313

Abertura da unidade	313
Capítulo 1 - Temperatura, calor e sua propagação.....	315
Capítulo 2 - Termômetros: grandezas e equações de conversão.....	317
Capítulo 3 - Dilatação dos sólidos.....	318
Capítulo 4 - Dilatação dos líquidos.....	320
Capítulo 5 - Calorimetria.....	321

UNIDADE 2 GASES E TERMODINÂMICA, 327

Abertura da unidade	327
Capítulo 6 - Estudo dos gases e a equação de um gás ideal.....	329
Capítulo 7 - 1ª lei da Termodinâmica.....	331
Capítulo 8 - 2ª lei da Termodinâmica.....	333

UNIDADE 3 PRINCÍPIOS DA ÓPTICA GEOMÉTRICA E REFLEXÃO DA LUZ, 336

Abertura da unidade	336
Capítulo 9 - Princípios da propagação da luz....	338
Capítulo 10 - Reflexão da luz.....	342
Capítulo 11 - Espelhos esféricos.....	343

UNIDADE 4 REFRAÇÃO DA LUZ, 345

Abertura da unidade	345
Capítulo 12 - Refração luminosa.....	347
Capítulo 13 - Sistemas refratores; dispersão da luz.....	349
Capítulo 14 - Lentes esféricas: formação de imagens.....	351
Capítulo 15 - Lentes esféricas: estudo analítico.....	352
Capítulo 16 - Instrumentos ópticos e óptica da visão.....	354

UNIDADE 5 OSCILAÇÕES E ONDAS, 357

Abertura da unidade	357
Capítulo 17 - Fenômenos ondulatórios.....	359
Capítulo 18 - Fenômenos sonoros: a música e o efeito Doppler.....	360

3. Resoluções 364

UNIDADE 1 364

Capítulo 1	364
Capítulo 2	365
Capítulo 3	366
Capítulo 4	368
Capítulo 5	369

UNIDADE 2 374

Capítulo 6	374
Capítulo 7	375
Capítulo 8	376

UNIDADE 3 378

Capítulo 9	378
Capítulo 10	380
Capítulo 11	381

UNIDADE 4 384

Capítulo 12	384
Capítulo 13	386
Capítulo 14	387
Capítulo 15	387
Capítulo 16	388

UNIDADE 5 390

Capítulo 17	390
Capítulo 18	391



1 Apresentação

Este *Suplemento*, por meio das seções apresentadas, pretende, em linhas gerais:

- Contribuir como fonte de referência e de informações sobre o ensino e a aprendizagem de Física no Ensino Médio.
- Contribuir como apoio didático-pedagógico para o desenvolvimento de atividades.
- Discorrer sobre os pressupostos pedagógicos que justificam as abordagens teóricas propostas na coleção.
- Apresentar propostas de complementações às atividades do livro do aluno.

Dividimos este *Suplemento* em duas partes: a primeira parte, comum aos três volumes da coleção, e a segunda parte, específica para cada um deles.

Na primeira parte, apresentamos textos e exemplos que visam ao cumprimento das funções do *Suplemento* descritas anteriormente.

Na segunda parte, apresentamos sugestões ao professor para abordagens dos conteúdos e também para o tratamento dos temas das seções dos capítulos e das unidades do volume.

2 Sobre um curso de Física para o Ensino Médio

A formação dos alunos de Ensino Médio (EM) passou a ser vista de modo diferente nos últimos anos, especialmente a partir da publicação da Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB), em 1996.¹ A visão anterior à LDB, vigente em grande parte dos cursos de EM, que residia prioritariamente na preparação dos alunos para a continuidade de seus estudos nas universidades, passou, no período, por profundas transformações, que acompanharam, de certa forma, as mudanças ocorridas na sociedade. Entre as causas dessas mudanças, podemos apontar o crescimento vertiginoso dos mecanismos de comunicação e a ampliação da possibilidade de acesso, de todas as camadas da população, às escolas de EM.

Este *Suplemento* não tem por objetivo aprofundar a discussão teórica a respeito das mudanças ocorridas no modo de enxergar as finalidades do EM, embora o

estudo das diversas manifestações de pesquisadores da educação seja aconselhável a todos aqueles que, de alguma forma, estão em contato com adolescentes, sejam pais, professores, coordenadores educacionais etc. Na bibliografia sugerida para o professor, apresentada na página 25 deste *Suplemento*, são citadas algumas obras de referência sobre o assunto, destacando-se os *Parâmetros Curriculares Nacionais* (PCN),² de leitura indispensável.

Citamos a seguir algumas considerações que julgamos necessárias para justificar os pressupostos pedagógicos desta coleção. O artigo 35 da LDB aponta as seguintes finalidades dos cursos de Ensino Médio:

- I – A consolidação e aprofundamento dos conhecimentos adquiridos no Ensino Fundamental, possibilitando o prosseguimento dos estudos.
- II – A preparação básica para o trabalho e a cidadania do educando como humano, incluindo a formação ética e o desenvolvimento da autonomia intelectual e do pensamento crítico.
- III – A compreensão dos fundamentos científico-tecnológicos dos processos produtivos, relacionando a teoria com a prática, no ensino de cada disciplina.

A aceitação inquestionável dessas finalidades, no âmbito da formação geral do estudante, faz refletir sobre a importância de cada disciplina na busca pelos objetivos que podem ser desvelados a partir dos enunciados da LDB. Interessa-nos especialmente refletir sobre como podemos enfrentar o desafio proposto nessas três finalidades em um curso de Física, ou seja:

- Preparar o adolescente para a continuidade dos estudos em qualquer área que escolha, e não apenas para aquelas diretamente relacionadas ao conhecimento físico.
- Propiciar condições ao estudante para o exercício de estudos e reflexões acerca da importância do papel social da ciência, e particularmente da Física, no sentido de desenvolver sua capacidade de pesquisa independente e seu pensamento crítico.
- Estimular o estudo dos fenômenos físicos relacionados aos avanços recentes da tecnologia, associando-o, sempre que possível, às condições socioculturais e científicas que conduziram a tais avanços.

¹ BRASIL. *Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional*, Lei n. 9.394, promulgada em 20 de dezembro de 1996.

² BRASIL. Ministério da Educação, Secretaria de Educação Média e Tecnológica. *Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio*. Brasília, 1999.

A partir do exposto, questionamos: de que modo podemos elaborar nossos planejamentos para que essas finalidades possam ser claramente identificadas?

Não acreditamos que exista resposta única para esta questão, embora tenhamos a convicção de que algumas ações podem e precisam ser realizadas. Discorreremos sobre algumas delas, explicitando os momentos em que é possível identificá-las nesta coleção. Começaremos comentando a importância do **tratamento matemático**, que podemos associar ao desenvolvimento dos conceitos físicos.

2.1 Tratamento matemático

A realização de pesquisas na área das ciências exige, quase sempre, um tratamento matemático adequado. Muitas vezes, esse tratamento é desenvolvido especialmente para a adequação dos dados analisados no momento, enquanto há casos que exigem apenas ferramentas estatísticas auxiliares na organização e interpretação dos resultados obtidos. Mesmo que de formas distintas para uma ou outra área, para um ou outro tipo de pesquisa, relatórios de conclusão apresentam, via de regra, análises estruturadas com base em dados numéricos. Especialmente no caso da Física, é rotineira a mobilização de sofisticadas ferramentas matemáticas pelo pesquisador, seja na preparação de seu trabalho, seja na interpretação dos resultados, seja nas conclusões que divulga. Assim, no âmbito daqueles que se dedicam às ciências, a Matemática desempenha papel de grande relevância.

As opiniões expressas no parágrafo anterior são corroboradas por relatos de diversos físicos e pensadores. Schenberg³ aponta uma conexão estreita entre conhecimento físico e matemático, destacando a relação de interdependência histórica entre esses dois saberes. Segundo ele, o desenvolvimento das teorias físicas ocorreu apenas porque a Matemática disponível se fazia presente; em situações em que tal vinculação não se observou, a Física precisou esperar a criação do ferramental necessário. Feynman⁴ aponta uma reflexão sobre o fato de que, ao utilizar a Matemática como mediadora de um modo de pensar e raciocinar, a Física consegue mais do que uma simples tradução, pois, segundo ele, é por meio da Matemática que se realizam as inferências necessárias para a legitimação das teorias.

Se existe a relação intrínseca e histórica entre o desenvolvimento dos conhecimentos físicos e matemáticos, como aponta Schenberg, e se é a Matemática que permite a legitimação do conhecimento físico, de acordo com Feynman, pensando no curso de Física do Ensino Médio, questionamos: **em que medida devemos valorizar a presença da Matemática na apresentação dos conceitos, de acordo com as premissas**

expressas na LDB, de formação geral do estudante e continuidade de seus estudos em qualquer área do conhecimento?

Consideramos a importância da Matemática em sua capacidade de exprimir de maneira sintética e precisa o conhecimento dos fenômenos por intermédio das leis físicas, tanto no espectro de ação do pesquisador da ciência quanto no do aprendiz. Guardadas, naturalmente, as evidentes diferenças entre curiosidades e necessidades de um e outro.

Assim, se, por um lado, não concebemos o desenvolvimento de um curso de Física de Ensino Médio desarticulado do aparato matemático necessário, por outro, reconhecemos a necessidade de identificar com clareza o grau dessa articulação, para que, em primeira e última instâncias, a prioridade do trabalho recaia sobre a construção do conhecimento físico.

Alguns dos temas de estudo da Física parecem exigir maior vinculação aos conhecimentos matemáticos, a julgar pelo modo com que, outrora, alguns cursos eram estruturados. No grupo de conteúdos desses temas, identificamos, por exemplo, a Cinemática e a Óptica.

Um dos riscos comuns no estudo da Cinemática consiste em priorizar a análise matemática dos movimentos em detrimento da compreensão dos conceitos associados, enquanto no ensino dos fenômenos ópticos corremos o perigo de abordar o curso enfatizando apenas as construções geométricas e de esquecer que a verdadeira óptica não está no papel, mas, sim, nos óculos, nas câmeras, nas comunicações etc. A busca pela medida ideal para a aplicação das funções de 1º e 2º graus na Cinemática, e para o reconhecimento das propriedades dos triângulos, na Óptica, constitui um desafio constante.

Situações-problema específicas podem exigir a aplicação de ferramentas matemáticas mais elaboradas, e precisamos sempre nos perguntar se tais casos são imprescindíveis, se perseguimos os objetivos de nosso planejamento. As leis de conservação, por exemplo, são, talvez, os princípios físicos que mais podem contribuir para a formação geral e para a construção da cidadania, abordando, por exemplo, modos de equilibrar o consumo elétrico residencial e as causas e consequências do aquecimento global. Assim, não podemos deixar de apresentar, com a devida atenção, as leis de conservação aos nossos alunos. Para tanto, será preciso aplicar as equações para o cálculo da energia cinética, da energia potencial, da quantidade de movimento etc. na resolução de situações-problema. Todavia, devemos fazê-lo sem a preocupação de simular situações fictícias, nas quais a aplicação de fórmulas pode vir a suplantiar em importância a real compreensão conceitual.

³ SCHENBERG, Mário. *Pensando a Física*. São Paulo: Brasiliense, 1984.

⁴ FEYNMAN, Richard P. *O que é uma lei física?* Lisboa: Gradiva, 1989.

O papel da Matemática, como elemento estruturador do conhecimento físico, relaciona-se a um aspecto bastante importante especialmente na concepção das atividades que apresentamos para nossos alunos: os **contextos** sobre os quais se desenvolvem as ações.

2.2 Contextos

Entendemos que determinado conceito apresenta-se de modo contextualizado quando é possível percebê-lo em algumas de suas múltiplas relações de significado com outros conceitos. Tais relações de significado poderão ser estimuladas a partir de conexões internas ou não à área de estudo do conceito. Nessa perspectiva, um conceito pode ser apresentado com base nas relações que podemos estabelecer com outros conceitos próprios da Física, ou podemos destacar as conexões que este conceito permite estabelecer com objetos de conhecimento de outras áreas. A aceleração da gravidade terrestre, por exemplo, é um importante conceito que pode ser abordado considerando o comportamento matemático da queda de um corpo, via análise de fotografias estroboscópicas presentes no material didático, mas pode também compreender a observação da queda de moedas ou pedras em situações de laboratório.

O conhecimento matemático e o contexto sobre o qual se desenvolve a situação-problema, como afirmamos, são temas relacionados. A abordagem de conceitos físicos com base unicamente em situações cotidianas exige, quase sempre, que uma série de simplificações sejam realizadas, a fim de que o instrumental matemático que o aluno conhece seja suficiente para o estudo em questão. Assim é que, no caso de análise de movimentos, é comum que desprezemos os atritos com o solo e com o ar, e mesmo quando não o fazemos, consideramos apenas situações particulares, de corpos que não rotacionam ou não se deformam. Considerar a interferência dos fatores que desprezamos significa, de certa forma, valorizar as relações conceituais internas à própria física, desviando o foco do cotidiano imediato. Tal caminho exige a mobilização de conhecimentos matemáticos mais elaborados, nem sempre à disposição dos alunos, nem sempre condizentes com o objetivo de formação geral tratado anteriormente. A relação entre contexto e tratamento matemático dos conceitos deve ser considerada e balanceada pelo professor, para que focos excessivos sobre um ou outro aspecto não venham a comprometer a qualidade da formação conceitual dos alunos.

A eficácia na construção conceitual pode estar relacionada à escolha do contexto mais ou menos apropriado a cada situação, o que não significa aceitar, *a priori*, que o desenvolvimento de determinado conceito deva se dar unicamente sob a via de um contexto de característica única. Caberá sempre ao professor analisar as condições da sua turma de alunos para escolher em que proporção relacionar aspectos internos do conhecimento físico com situações do cotidiano. Exageros numa ou noutra direção podem conduzir a situações extremas e

por vezes inadequadas, como, por exemplo, calcular a diferença entre o valor da aceleração da gravidade nos polos e no Equador, ou restringir o estudo de Cinemática à análise de testes automobilísticos.

Um recurso que podemos utilizar para ampliar as chances de escolha por contextos significativos consiste em valorizar, sempre que possível, as relações entre o **conhecimento físico** e os **avanços tecnológicos**.

2.3 Conhecimento físico e tecnologia

O curso de Física que apresentamos aos nossos alunos deve permitir a construção de conhecimentos necessários para a compreensão do mundo contemporâneo. Sabemos como o desenvolvimento da Física influenciou profundamente as transformações sociais sofridas a partir, principalmente, do século XX. Compreender, por exemplo, a importância da Física na corrida espacial, nos avanços na tecnologia da informação, no aumento da expectativa de vida das populações ou na percepção dos problemas ambientais, torna-se, hoje, prioritário para a construção da cidadania dos jovens de nosso tempo. Precisamos, portanto, permitir a eles o acesso a conhecimentos envolvidos nos processos de telecomunicações, nos desenvolvimentos atuais da medicina diagnóstica e na interpretação dos impactos ambientais. Nesses e em outros aspectos que, de alguma forma, influenciam o modo de vida atual, a Física está presente, e, como professores, podemos priorizar a função de estudá-los e de apresentá-los aos nossos alunos.

A escolha de contextos significativos para a apresentação dos conceitos, com base nas relações entre conhecimento físico e tecnologia, é prerrogativa do professor. Acreditamos que tal tarefa possa ser facilitada com a ajuda de um livro didático e, por isso, fizemos constar desta coleção uma série de textos e atividades.

2.4 Física Moderna

Aliar o conhecimento físico ao desenvolvimento tecnológico exige, muitas vezes, a abordagem de temas da Física Moderna. Existe, evidentemente, uma série de equipamentos elétricos ou eletrônicos cujo funcionamento não está baseado em princípios de Física Moderna. Fazem parte desse grupo os refrigeradores, os aparelhos de ar-condicionado, os televisores tradicionais, os motores em geral etc. Além disso, nossos alunos mantêm contato permanente com equipamentos desenvolvidos com base nos avanços da Física no século XX, por exemplo, os televisores de plasma, LCD e LED, os sensores fotoelétricos, os processadores de computadores, os telefones celulares, entre outros. Precisamos, de alguma forma, dar resposta à curiosidade dos alunos voltada aos princípios físicos que regulam o funcionamento de equipamentos desses dois grupos.

Nesta coleção, o estudo de conceitos de Física Moderna segue dois enfoques distintos. Em primeiro lugar, estabelecemos ligações entre os conceitos da Física Clássica e os da Física Moderna em diversos

capítulos dos três volumes, com as seções “Para saber mais – Diálogos com a Física Moderna”. Em outro momento, no volume do 3º ano, destinamos uma unidade para o necessário aprofundamento do estudo dos principais conceitos da Física Moderna. Adiante, na apresentação das seções que permeiam os capítulos, exemplificaremos alguns dos temas de Física Moderna abordados na coleção.

2.5 Dimensão empírica no ensino de Física

A Física é uma ciência experimental, e devemos levar isso em conta ao planejar um curso de Ensino Médio. Assim, em princípio, concordamos que **atividades experimentais** sejam contempladas em todos os momentos dos cursos de Física, uma vez que, envolvidos em práticas dessa natureza, nossos alunos exercitam o “método científico”. Muitas vezes, entretanto, as situações experimentais vivenciadas pelos estudantes nas salas e nos laboratórios de Ensino Médio não lhes permitem percorrer as etapas do método científico, pois, nesses casos, eles apenas constatarem as condições teóricas que já conheciam, não chegando a investigar nenhuma hipótese. Se os alunos vão ao laboratório para realizar um experimento a fim de determinar o valor da aceleração da gravidade terrestre, já tendo resolvido uma série de situações-problema sobre o assunto, o valor que obtiverem poderá servir para desconfiarem da validade teórica, dados os erros grosseiros que costumam acompanhar procedimentos dessa natureza.

Laboratórios de Física de Ensino Médio são normalmente preparados para demonstrações, ou seja, para mostrar aos alunos experimentos que comprovam a teoria “apreendida”, quando seria recomendável que, além disso, fossem elaborados com o objetivo de instigar a curiosidade a respeito do “como se explica isto?”, sobre o fenômeno que observam. Em outras palavras, a proposta de investigação experimental deve visar mais que as demonstrações nas quais as ocorrências justificam a prática com a expressão “não falei que era assim?”, invertendo e subvertendo a questão que deveria passar a ser “por que isto é assim?”. Para fazer isso, geralmente não é necessário grandes aparatos experimentais, bastando utilizar, por exemplo, molas, seringas, controles remotos, alguns brinquedos infantis e outros objetos do cotidiano. Trata-se, portanto, de introduzir nas aulas a dimensão empírica que acompanha a fenomenologia que a Física pode justificar.

Também consideramos importante a realização de atividades experimentais recolhidas da vivência cotidiana dos estudantes. Os alunos participam de um mundo repleto de objetos manipuláveis e de fenômenos que ocorrem o tempo todo; nesse sentido, devemos incentivá-los a mobilizar suas habilidades cognitivas na observação, no registro e na interpretação dessas ocorrências. Nessa perspectiva, o laboratório extrapola o ambiente escolar, e a sala

de aula torna-se o espaço adequado para relatos, discussões e teorizações acerca do mundo exterior a ela. Entendemos, portanto, que a experimentação em Física é bem mais abrangente do que as práticas laboratoriais realizadas apenas na sala de aula, e que não é aconselhável reduzi-la a isso.

Para introduzir a dimensão empírica nas aulas de Física, podemos também utilizar filmes, trechos de livros clássicos de ficção, objetos virtuais de aprendizagem, filmes comerciais, histórias em quadrinhos, vídeos retirados da internet, entre outros.

Nesta coleção, apresentamos em uma das seções, comentada adiante, algumas sugestões de montagens experimentais e também diversas sugestões de livros, simulações e vídeos para o trabalho do professor em sala de aula.

Retomando os comentários, enfatizamos que nossas concepções acerca de um curso de Física para o Ensino Médio se fundamentam sobre o reconhecimento da importância:

- Da relação entre o conhecimento matemático e o desenvolvimento dos conteúdos da Física.
- De a Matemática estabelecer as relações lógicas nos casos em que descrições ou explicações verbais não são suficientes.
- Da escolha apropriada de contextos significativos para a apresentação dos conceitos físicos.
- De que contextos extraídos de situações cotidianas sejam tão valorizados quanto aqueles caracterizados por relações intrínsecas aos conceitos físicos.
- Da aproximação entre os conceitos físicos e as aplicações tecnológicas em que é possível detectar sua presença.
- De que o aluno seja capaz de compreender não apenas o funcionamento, como também avaliar questões pertinentes à produção e aos eventuais impactos causados pela incorporação indiscriminada de equipamentos tecnológicos pela sociedade de consumo.
- De propor situações nas quais os estudantes envolvam-se em procedimentos investigativos, buscando respostas através da proposição e verificação de hipóteses.
- De que os estudantes possam mobilizar habilidades cognitivas no sentido de construir, para si, um rol pertinente de conceitos científicos.

3 Estrutura da coleção

Com base nos pressupostos anteriores, passamos agora a comentar como estruturamos a coleção. Neste percurso, justificaremos nossas opções quanto aos elementos que compõem nossa proposta, compreendendo a seleção de conteúdos, os critérios utilizados

na confecção dos textos das seções, a elaboração das questões iniciais das unidades e capítulos, a seleção de situações-problema etc.

A coleção está organizada em três volumes. Cada volume é dividido em unidades, e cada unidade, em capítulos. A estrutura básica de cada uma das unidades que compõem a coleção é a seguinte:

Apresentação

- Imagem
- Texto de abertura
- Questão inicial: “Para começo de conversa”

Capítulos

- Questão inicial
- Introdução
- Texto
- Questões resolvidas
- Questões propostas
- Seções: Para saber mais (Sempre foi assim?, Saber físico e tecnologia, Conexões com o cotidiano e Diálogos com a Física Moderna); Já sabe responder?; Trilhando o caminho das competências.

Final de algumas unidades

- Investigar é preciso – Atividade experimental
- Para pesquisar em grupo – Será verdade mesmo que...

3.1 Seleção e organização dos conteúdos

O rol de conteúdos que apresentarmos aos nossos alunos poderá ser tão extenso quanto o aprofundamento exigido. Na perspectiva da formação geral do adolescente, protagonizada na quase totalidade dos cursos de Ensino Médio, precisamos considerar prioritária a formação geral do estudante, independentemente dos cursos a que se destine nos futuros segmentos. Tendo isso em mente, uma das primeiras questões que podemos propor no momento da elaboração de nosso planejamento é: quais são os conteúdos realmente importantes e dos quais não podemos abrir mão com vistas à pretendida formação geral do estudante?

Na busca pela resposta a essa questão, podemos imaginar o traçado de um fio condutor que se inicia no mais amplo e caminha no sentido do detalhamento. No nível mais amplo, situam-se os grandes temas da Física: Mecânica, Eletricidade, Óptica, Termologia, Ondas, Eletromagnetismo e elementos de Física Moderna. Todos esses temas precisam ser contemplados no planejamento e devem constar do material de apoio escolhido pelo

professor. Sua abordagem não precisa ocorrer de modo a impedir que elementos de um tangenciem elementos do outro. Pelo contrário, é recomendável que as diversas relações de significado entre os diversos conceitos, independentemente da classificação que recebam, sejam sempre que possível estimuladas. Apreender o significado de um conceito implica vê-lo em suas múltiplas relações com outros conceitos e/ou significados.

Considerando que todos os grandes temas da Física precisam ser abordados no curso de Ensino Médio, cabe ao professor conceber o nível de detalhamento necessário, em sua opinião, ao aprofundamento de cada um. Nessa concepção, a tarefa do professor compara-se à de um cartógrafo que imagina a escala com que deve elaborar o mapa de determinada região.

Se a necessidade exige a apresentação de um mapa com excesso de detalhes – ruas, praças, pontos de ônibus etc. –, a escala adequada é uma. Se, por outro lado, o foco sobre os limites de cada bairro em relação ao todo do município for o único aspecto importante, não haverá necessidade de adotar uma escala tão detalhista.

Uma escala minuciosa impele o professor a um tratamento conceitual que, geralmente, atinge o máximo de detalhes e que, muitas vezes, acaba por esbarrar na **necessidade de ferramentas matemáticas mais elaboradas** do que aquelas dominadas por seus alunos. No entanto, uma escala “larga” prioriza apenas uma abordagem superficial do fenômeno, fazendo com que questões fundamentais como “Como funciona?”, “O que faz?”, “Como foi criado?” ou “Para que serve?” sejam respondidas apenas de modo simplista.

Admitimos a existência de cursos específicos de Ensino Médio com características que estimulam o professor a optar por escalas de um ou de outro extremo.

Na elaboração desta coleção, fizemos opções em relação ao aprofundamento dos grandes temas da Física. A apresentação dos conteúdos baseou-se, principalmente, no respeito às exigências das três finalidades do Ensino Médio, citadas anteriormente, ou seja, propiciar condições para que o estudante:

- Prossiga com qualidade seus estudos em qualquer área do conhecimento.
- Reflita sobre a importância do papel social da ciência e, particularmente, da Física.
- Identifique a presença dos fenômenos físicos nos avanços recentes da tecnologia.
- Tenha uma preparação básica para o trabalho e para a cidadania.

Os sumários dos três volumes desta coleção indicam claramente os grandes temas que estruturam a distribuição dos conteúdos. Assim, no volume do 1º ano, por exemplo, damos destaque aos conceitos da Mecânica, enquanto Calor, Óptica e Ondas são temas apresentados no volume do 2º ano, e Eletricidade,

Eletromagnetismo e Elementos de Física Moderna constam do volume do 3º ano. A análise rápida dos itens do sumário pode levar à conclusão de que a organização dos conteúdos se choca com o pressuposto citado anteriormente, acerca da necessidade de a apresentação dos conceitos se realizar de modo a permitir a integração entre elementos dos diversos temas. Será preciso, portanto, justificar como a abordagem adotada favorece a integração desejada.

O estudo e a compreensão dos conteúdos de determinado tema são os fatores que permitem, a nosso ver, a formação do campo conceitual necessário à interpretação significativa dos fenômenos físicos. Assim, por exemplo, a análise do funcionamento de um refrigerador poderá ficar comprometida caso o estudante não conheça, de fato, conteúdos de Mecânica, Termodinâmica e Eletricidade. A proposta de fazer uma análise dessa natureza, sem que a formação conceitual esteja realizada no nível almejado, conduz a explicações simplistas como “o ar interno é mais frio do que o externo”, ou “é o motor que resfria o ar”, ou, ainda, “sem eletricidade seria impossível fazer funcionar a geladeira”. Dessa forma, em conclusão provisória, afirmamos que a integração conceitual é mais eficiente se exigir do estudante a mobilização de conceitos construídos anteriormente por ele, em detrimento do aprendizado que poderia ser realizado a partir da análise dos fenômenos presentes em determinado aparato tecnológico. Esse é, portanto, um primeiro fator que justifica a apresentação dos conceitos desta coleção ser feita com base nos grandes temas da Física.

Todavia, de forma alguma descartamos a possibilidade de que procedimentos investigativos sejam utilizados como metodologia eficiente na construção conceitual, como os parágrafos anteriores podem sugerir. De fato, como também comentaremos adiante, apresentamos nesta coleção seções especialmente com esse propósito. Investigar é ato que desperta o interesse do aluno para a **descoberta** e a **explicação** dos fenômenos físicos que observa. Integração conceitual estimula o estabelecimento de relações entre significados de conceitos que o estudante já conhece. Assim, investigação e integração constituem dois elementos distintos referentes à expectativa de aprendizagem dos alunos, que podem e devem ser trabalhados conjuntamente.

A fim de promover a necessária integração entre os conteúdos dos grandes temas da Física, concebemos a estratégia de inserir questões e textos em momentos do desenvolvimento conceitual. As questões iniciais dos capítulos, em particular, merecem destaque especial. Comentaremos adiante, detalhadamente, a importância dessas questões e de que maneira sugerimos a sua abordagem.

A seleção e a organização dos conteúdos desta coleção privilegiaram a estruturação por grandes

temas, nos três volumes. O critério que endossou tal decisão foi a crença de que é necessária uma construção conceitual sólida, de modo que o estudante consiga estabelecer relações significativas entre conceitos dos vários temas da Física. Entretanto, julgamos que tal estruturação não impede que sejam estimuladas as relações pertinentes entre significados conceituais, e isso pode ser feito a partir de instrumentos especialmente concebidos para esse fim, durante a evolução da construção conceitual em cada capítulo e em cada unidade. Para tanto, inserimos nesta coleção algumas seções, que ainda analisaremos em detalhes, como é o caso, por exemplo, das questões de abertura do capítulo ou da unidade, ou da seção “Para saber mais”.

Citamos há pouco, e destacamos novamente, o texto que apropriamos da LDB acerca de uma das finalidades do Ensino Médio:

O curso de Física deve ser pensado de tal forma a permitir que o aluno prossiga com qualidade seus estudos em qualquer área do conhecimento.

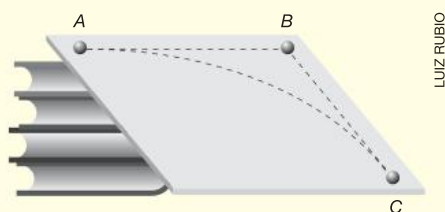
Essa consideração exige que o tratamento dos conteúdos seja estabelecido com base no que é fundamental em cada tema. Além disso, exige ainda que os tópicos selecionados recebam tratamento pedagógico que valorize, sobremaneira, tanto a existência do conceito como as relações que se podem estabelecer entre esse e outros conceitos. Há ainda a exigência de que o maior rol possível de conceitos físicos, dos vários temas, seja contemplado, para que o estudante construa uma visão ampla do espectro de fenômenos físicos presentes em seu cotidiano. Nessa perspectiva, não se justifica implementar o estudo de algum tópico com uma abordagem matemática que se sobreponha à interpretação do fenômeno e à significatividade do conceito, e também não se justifica destacar intervalos de tempo muito diferentes para a abordagem de um tema em detrimento do tempo diminuto que, por vezes, se destina a outro tema.

Julgamos que estas duas condições foram prioritárias na abordagem conceitual que promovemos nesta coleção: **destaque à significatividade conceitual e tratamento matemático com vistas, apenas, à estruturação que o conceito físico exige**. Vamos exemplificar essas premissas com trechos e abordagens presentes na coleção.

No volume do 1º ano, Unidade 2, apresentamos a composição vetorial de velocidades. Em determinado momento da evolução dos conteúdos, optamos por trabalhar o lançamento horizontal no vácuo, embora não tivéssemos ainda apresentado as leis de Newton. A simples apresentação das condições matemáticas do movimento composto pode, a nosso ver, mascarar a investigação do aluno para detectar as característi-

cas físicas do fenômeno, especialmente o fato de que o movimento é acelerado em uma direção e uniforme em outra. Em função disso, fizemos a opção de apresentar um modelo simples, de fácil construção pelo professor, para simular, em sala de aula, o movimento composto. Discutimos com profundidade o modelo na parte específica do *Suplemento* do volume do 1º ano; todavia, podemos agora analisá-lo sob o ponto de vista da construção conceitual com base nas premissas citadas anteriormente.

Uma tábua de madeira apoiada sobre um conjunto de livros, uma bolinha, uma folha de papel, uma folha de papel-carbono e um cronômetro; esse é o material necessário à construção do modelo. A análise do movimento de queda da bolinha, rolando sobre a rampa, permitirá constatar a possibilidade de decompor o movimento em duas direções perpendiculares: em uma delas o movimento é acelerado e na outra é uniforme.



A interpretação matemática do fenômeno, com a confecção de gráficos, a escrita de equações e a determinação dos valores de velocidade e aceleração, é feita apenas para dar a estrutura necessária à consolidação da investigação do fenômeno.

Os exercícios resolvidos e as questões propostas, que seguem o texto principal, têm o mesmo objetivo, ou seja, exigem que o aluno atribua significados físicos àquilo que observou ou sobre o qual refletiu, mobilizando, para tanto, a ferramenta matemática exigida, que compõe uma das séries de exercícios resolvidos.

Respeitando as premissas e considerando a carga horária semanal média destinada aos cursos de Física no Ensino Médio, optamos pela seleção e pelo aprofundamento dos conteúdos da maneira apresentada nos índices dos volumes e nos diversos capítulos que compõem a coleção. São vários os momentos em que é possível identificar abordagens conceituais que priorizam determinados conteúdos em detrimento de outros, caso dos Capítulos 7 e 8, do volume do 3º ano, em que preferimos enfatizar os significados das grandezas físicas das associações de elementos em circuitos elétricos simples, em detrimento da análise de circuitos constituídos de diversos ramos, com muitos elementos, o que exigiria a escrita e a resolução de diversas equações.

3.1.1 Distribuição dos conteúdos

Apresentamos a seguir a distribuição dos conteúdos pelos volumes, unidades e capítulos da coleção.

Volume do 1º ano

Unidade 1	Capítulo 1	Capítulo 2	Capítulo 3	
Movimentos	Conceitos de Cinemática e movimento uniforme (MU)	Movimento uniformemente variado (MUV)	Lançamento vertical no vácuo	
Unidade 2	Capítulo 4	Capítulo 5	Capítulo 6	
Cinemática vetorial	Grandezas vetoriais	Lançamentos no vácuo	Movimento circular uniforme (MCU)	
Unidade 3	Capítulo 7	Capítulo 8	Capítulo 9	Capítulo 10
Leis de Newton	1ª e 3ª leis de Newton	Forças de atrito	2ª lei de Newton: corpos acelerados	Aplicações das leis de Newton
	Capítulo 11	Capítulo 12	Capítulo 13	
	Dinâmica do movimento circular uniforme	Leis de Kepler	Gravitação universal	
Unidade 4	Capítulo 14	Capítulo 15	Capítulo 16	
Sólidos e fluidos em equilíbrio estático	Estática do ponto material e do corpo extenso	Hidrostática: pressão em fluidos	Hidrostática: princípio de Arquimedes	
Unidade 5	Capítulo 17	Capítulo 18	Capítulo 19	
Trabalho e energia mecânica	Trabalho, potência e energia cinética	Energia potencial	Transformações de energia mecânica	

Unidade 6	Capítulo 20	Capítulo 21		
Princípio da conservação da quantidade de movimento	Quantidade de movimento e impulso	Conservação da quantidade de movimento		

Volume do 2º ano

Unidade 1	Capítulo 1	Capítulo 2	Capítulo 3	Capítulo 4
Calor e temperatura	Temperatura, calor e sua propagação	Termômetros: grandezas e equações de conversão	Dilatação dos sólidos	Dilatação dos líquidos
	Capítulo 5			
	Calorimetria			
Unidade 2	Capítulo 6	Capítulo 7	Capítulo 8	
Gases e Termodinâmica	Estudo dos gases e a equação de um gás ideal	1ª lei da Termodinâmica	2ª lei da Termodinâmica	
Unidade 3	Capítulo 9	Capítulo 10	Capítulo 11	
Princípios da Óptica geométrica e reflexão da luz	Princípios da propagação da luz	Reflexão da luz	Espelhos esféricos	
Unidade 4	Capítulo 12	Capítulo 13	Capítulo 14	Capítulo 15
Refração da luz	Refração luminosa	Sistemas refratores; dispersão da luz	Lentes esféricas: formação de imagens	Lentes esféricas: estudo analítico
	Capítulo 16			
	Instrumentos ópticos e óptica de visão			
Unidade 5	Capítulo 17	Capítulo 18		
Oscilações e ondas	Fenômenos ondulatórios	Fenômenos sonoros: a música e o efeito Doppler		

Volume do 3º ano

Unidade 1	Capítulo 1	Capítulo 2	Capítulo 3	Capítulo 4	
Eletrização; força e campo elétrico; trabalho e potencial elétrico	Processos de eletrização	Forças entre cargas elétricas: lei de Coulomb	Campo elétrico	Potencial elétrico	
Unidade 2	Capítulo 5	Capítulo 6	Capítulo 7	Capítulo 8	Capítulo 9
Circuitos elétricos	Tensão, corrente e resistência elétrica: leis de Ohm	Potência elétrica	Associação de resistores	Geradores e receptores	Capacitores
Unidade 3	Capítulo 10	Capítulo 11	Capítulo 12	Capítulo 13	Capítulo 14
Magnetismo e ondas eletromagnéticas	Fenômenos magnéticos	Campo magnético gerado por corrente elétrica	Força magnética	Força eletromotriz induzida e energia mecânica	Ondas eletromagnéticas e seu espectro
Unidade 4	Capítulo 15	Capítulo 16	Capítulo 17		
Questões da Física do século XXI	A teoria da relatividade restrita	Elementos da Mecânica Quântica	Desafios da Física no século XXI		

3.2 Questões iniciais das unidades e capítulos

A primeira proposição importante que gostaríamos de destacar na coleção, referente à possibilidade de organização do professor de Física na condução de seu trabalho cotidiano, diz respeito às **questões iniciais das unidades e capítulos**.

O principal objetivo na proposição das questões que iniciam as unidades ou os capítulos é aproveitar os conhecimentos espontâneos que os estudantes trazem de sua vivência cotidiana e levam para a sala de aula. Julgamos imprescindível considerar, como afirmam os PCN do Ensino Médio: *o mundo vivencial dos alunos, sua realidade próxima ou distante, os objetos e os fenômenos com que efetivamente lidam, ou os problemas e indagações que movem sua curiosidade* (p. 230).

Acreditamos que as questões iniciais das unidades e dos capítulos podem ser um ponto de partida para investigações, abstrações e generalizações que o estudante venha a realizar durante o estudo dos conceitos da unidade ou do capítulo.

Obras de diversos estudiosos apontam para a importância da reflexão sobre o modo como os estudantes constroem conceitos científicos. Uma das correntes relevantes nesse estudo, apresentada originalmente por Vygotsky, indica que temos dois sistemas de formação conceitual, sendo um deles baseado em categorias probabilísticas e contextos particulares (espontâneo), e outro baseado em conceitos clássicos, logicamente definidos (científico). A interação entre esses dois sistemas é dinâmica, numa via de mão dupla, de modo que o grau de sua intensidade pode caracterizar o desenvolvimento pessoal da capacidade de construção do conhecimento. Conceitos espontâneos justificam fenômenos que não são explicados da mesma forma por conceitos científicos, e vice-versa. Nessa perspectiva, a formação de conceitos científicos não se dá de maneira pronta e rápida, mas, sim, por um processo composto por etapas de desenvolvimento relacionadas à capacidade geral do estudante.

Os importantes conceitos de voltagem, corrente e potência elétricas, próprios da Eletrodinâmica, por exemplo, estão presentes em inúmeras situações cotidianas conhecidas pelos alunos. Desse modo, podemos esperar que os alunos tragam consigo explicações para determinadas ocorrências que podemos classificar de conceitos espontâneos. Suas concepções explicam aspectos da ocorrência do fenômeno, mas não sua totalidade; em algum momento, as justificativas não se adéquam. Nós, professores, somos um dos agentes capazes de colocar os estudantes diante de contradições em suas concepções espontâneas. No caso dos conceitos de Eletrodinâmica, é comum que os alunos expliquem de modo equivocado, ou incompleto, por exemplo, a queda na luminosidade quando o chuveiro da residência é ligado simultaneamente às lâmpadas, ou por que o foco da economia de consumo de energia elétrica deve recair sobre o chuveiro elétrico em vez

de no equipamento de som. A experiência mostra que questioná-los sobre temas dessa natureza faz emergir conceitos de múltiplas características, e que podemos, nesses momentos, estimular a reflexão sobre os “furos” das explicações que apresentam. Nesse sentido, cabe pedir que alguns alunos leiam em voz alta as respostas que julgam prováveis para as questões. Sugerimos que o professor construa uma lista com algumas das respostas ou recolha várias delas para que, ao fim do capítulo, sejam analisadas, comparadas e discutidas. Acreditamos que agindo dessa maneira os alunos podem reconhecer mais claramente nos novos conhecimentos aprendidos os elementos essenciais para que respondam com mais propriedade à pergunta inicial. Esse tipo de ação, realizada de modo sistemático, pode contribuir para a formação de conceitos científicos.

Apesar de as questões iniciais das unidades e dos capítulos terem sido propostas com objetivos comuns, há significados diferentes que podemos atribuir a umas e a outras que, a nosso ver, merecem ser justificados.

3.2.1 Questões de abertura das unidades

Nas aberturas de unidades, apresentamos, sob o título “Para começo de conversa”, uma questão que, de alguma maneira, está relacionada ao texto que acompanha as imagens iniciais. As questões têm por objetivo estimular:

- o aluno a iniciar o estudo dos conceitos da unidade;
- a exposição das concepções espontâneas dos alunos acerca de fenômenos relacionados aos conceitos que estudarão na unidade.

Consideremos, por exemplo, a abertura da Unidade 6 do volume do 1º ano, “Princípio da conservação da quantidade de movimento”. Justaposta à imagem da página inicial, em alusão à legenda ali colocada, lançamos a questão:

O que aconteceria se os cerca de 7 bilhões de habitantes da Terra resolvessem andar para o mesmo lado ao mesmo tempo?

Não devemos esperar que os alunos respondam corretamente a questões dessa natureza, nem foi esse o objetivo na elaboração da questão. Ao contrário, é esperado que o professor incentive uma espécie de “tempestade cerebral” em cada aluno e recolha as diversas justificativas surgidas, a fim de compor um quadro de conceitos espontâneos a partir do qual poderá iniciar o estudo dos conceitos científicos.

Ainda sob a forma de questões, propomos que você apresente aos alunos os objetivos dos estudos que eles realizarão na unidade. Nesse caso, as questões foram elaboradas com o intuito de estimular os alunos a refletirem sobre seus conhecimentos prévios dos conteúdos da unidade. Veja na Parte específica.

Outro aspecto a ressaltar a respeito da questão proposta no início de cada unidade refere-se à possibilidade de o aluno autoavaliar o desenvolvimento cognitivo que adquiriu no percurso, comparando a resposta dada à questão no início do estudo com aquela que poderá elaborar ao final da unidade. Para destacar

nossa intenção de que o aluno desenvolva essa atitude reflexiva, sugerimos que o professor proponha sempre a seguinte conduta:

Refleta sobre respostas prováveis para essa questão e escreva em seu caderno o que você já sabe sobre isso. Ao final da unidade, escreva que novos conhecimentos você adquiriu depois de estudar esse assunto.

3.2.2 Questões de abertura dos capítulos

De início, vamos considerar uma questão exemplar para auxiliar a análise de nossos objetivos. No volume do 3º ano, Unidade 1, Capítulo 1, apresentamos a questão:

Por que quem leva choque elétrico é representado nos desenhos com os pelos eriçados?

No capítulo em questão, são abordados os processos de eletrização e as características dos corpos condutores e dos isolantes. Na etapa de escolaridade em que se encontram, é bastante provável que os alunos tenham tido contato com experimentos envolvendo eletrização, seja na escola, seja em feiras de ciências ou, ao menos, pela via virtual. Ao lançar a questão, queremos que eles, por um lado, busquem na memória situações vividas e mantenham relação de proximidade com o fenômeno descrito na questão, e, por outro, apresentem explicações para a ocorrência desse fenômeno. Com esse procedimento, esperamos que exponham suas concepções espontâneas acerca de como os corpos se eletrizam e sobre o comportamento da força entre corpos eletrizados.

Questões como essa, envolvendo o conceito de eletrização, podem, a nosso ver, estimular os estudantes naquela fase de construção conceitual que Vygotsky denominou “terceira fase”, segundo a qual o grau de abstração exigido deve ser capaz de, simultaneamente, mobilizar estratégias mentais de generalização e diferenciação. Diferenciar pode significar, nesse nosso exemplo, os modos pelos quais é possível eletrizar corpos inicialmente neutros, enquanto generalizar pode corresponder ao reconhecimento das propriedades comuns dos corpos eletrizados, de se atraírem ou se repelirem, acompanhado da incorporação do modelo atômico das substâncias. Trata-se, portanto, de proporcionar ao estudante uma oportunidade de expor suas definições, ainda cotidianas, espontâneas, preconceituais, para que possam ser refinadas e formalizadas a partir dos estudos dos conteúdos do capítulo. Nesse processo, o papel do professor é de fundamental importância, tanto no momento inicial, no levantamento das concepções cotidianas, quanto no momento final, quando se faz necessária a formalização do conceito.

As questões iniciais da unidade e dos capítulos são, portanto, elementos importantes a serem trabalhados pelo professor.

3.3 Critérios de elaboração do texto didático

Iniciamos todos os capítulos com uma questão, de acordo com as características comentadas an-

teriormente. Em seguida, apresentamos uma breve introdução sobre o tema a ser desenvolvido, tentando, principalmente, relacioná-lo a situações cotidianas, conhecidas dos estudantes, ou a aspectos que remetem à história da ciência. No volume do 2º ano, Capítulo 9 da Unidade 3, de Óptica, por exemplo, apresentamos o seguinte texto de introdução:

Quem já tentou se locomover de olhos vendados sabe quanto somos dependentes da visão. Associamos a ela nossa capacidade de observar a natureza, e especialmente a habilidade de construir diferentes representações do mundo. Como sabemos, para que seja possível enxergar, é necessário haver luz. A luz que nos permite ver provém de fontes como as lâmpadas ou o Sol.

A luz e seu comportamento são estudados há muito tempo. Uma das teorias aceitas na Grécia antiga (por volta do séc. V a.C.) descrevia a luz como uma formação de pequenas partículas emitidas pelo olho em direção ao objeto observado, que se iluminava ao ser atingido por elas. Posteriormente, o filósofo grego Aristóteles (384-322 a.C.) propôs uma natureza ondulatória para a luz, considerando-a uma espécie de fluido imaterial que chegava aos nossos olhos, vindo dos objetos visíveis.

Sabemos hoje que muitos fenômenos que envolvem a luz também podem ser explicados por um modelo corpuscular da luz. Nesse modelo, a luz é considerada um feixe de partículas emitidas por uma fonte que atinge os olhos, estimulando a visão.

Nesse texto, convidamos os alunos a refletir sobre como explicar a maneira pela qual enxergamos. Para tanto, apresentamos inicialmente algumas antigas concepções a respeito dessa questão e, em seguida, citamos a explicação atual, acerca da luz como onda eletromagnética.

À introdução dos capítulos seguem-se os textos de apresentação dos conceitos. Na elaboração desses textos, priorizamos mais de um tipo de linguagem – escrita, gráficos, desenhos, tabelas –, de modo que o conceito pudesse ser apresentado com alguns de seus vários significados.

Julgamos importante ressaltar novamente que a necessária linguagem matemática é introduzida a fim de estruturar o conhecimento físico, sem todavia suplantá-lo. Nessa medida, queremos destacar que as expressões matemáticas são sempre acompanhadas de textos que as analisam em detalhe, destacando a natureza das relações de dependência entre as grandezas envolvidas, suas unidades, suas ordens de grandeza etc.

3.4 Sobre as questões propostas

Após a explanação de conteúdos, são apresentadas as “Questões resolvidas” e as “Questões propostas”, que envolvem os conteúdos expostos. As questões foram selecionadas com base nos seguintes critérios:

- Exigir do estudante a mobilização dos aspectos conceituais mais importantes de cada conteúdo.

- Demandar a aplicação de ferramental matemático suficiente para estruturar a significação conceitual, sem ir além disso.

São questões cuja resolução solicita que o aluno escreva suas argumentações teóricas ou apresente os cálculos que podem justificar as respostas obtidas. Vamos considerar, por exemplo, a seguinte questão:

Volume do 2º ano, Unidade 3, Capítulo 9

Um holofote emite um feixe de luz verde que é interceptado por um feixe de luz vermelha. Ao seguir sua trajetória, o feixe verde encontra uma porta onde está fixado um espelho no qual incide e, ao ser refletido, retorna pelo mesmo caminho. Cite os princípios de propagação que tornam possível a situação descrita e identifique em cada parte do trajeto sua aplicação.

No exemplo, temos uma questão sobre os princípios de propagação da luz, que, para ser resolvida, exige a interpretação do contexto expresso no enunciado e a correta argumentação com base nos princípios.

3.5 Sobre as seções que compõem o livro

As seções que elaboramos e que intercalam o texto dos capítulos, de forma geral, servem para dinamizar a leitura e orientar o tratamento conceitual. De forma específica, cada seção foi concebida com determinado objetivo, conforme descreveremos a seguir.

3.5.1 Seção “Para saber mais”

Essa seção propõe quatro enfoques diversos sobre a temática desenvolvida na unidade com o objetivo de ampliar o conhecimento adquirido pelo aluno. Além disso, visa auxiliar o educando a perceber a relevância do que estudou em relação ao seu crescimento pessoal e intelectual. Em cada uma das propostas, os alunos são convidados a identificar nos textos apresentados as referências que tornam possível o estabelecimento de relações entre suas experiências cotidianas e os saberes desenvolvidos na unidade. Há pelo menos uma inserção por unidade de:

- **SABER FÍSICO E TECNOLOGIA** – Os textos dessa seção relacionam o conhecimento físico ao desenvolvimento tecnológico, conforme pressuposto pedagógico destacado anteriormente.
- **DIÁLOGOS COM A FÍSICA MODERNA** – Os textos dessa seção esclarecem as ligações entre as concepções científicas baseadas na Física Clássica – desenvolvidas no decorrer da obra – e as eventuais modificações que surgiram com o advento das teorias da Nova Física.

Outros temas da Física Moderna são explorados no volume do 3º ano.

- **SEMPRE FOI ASSIM?** – Um rápido estudo voltado à história da ciência nos mostrará uma série de conceitos físicos que tiveram suas formulações refinadas a partir de novas descobertas e indagações. Alguns desses conceitos foram selecionados e contemplados nos textos dessa seção.
- **CONEXÕES COM O COTIDIANO** – Os textos dessa seção evidenciam a necessidade do conhecimento físico na interpretação de inúmeros fenômenos e/ou situações cotidianas.

Com o objetivo de incentivar a reflexão sobre os variados temas apresentados na seção “Para saber mais”, criamos o item “Ampliando sua leitura”. Nesse complemento, propomos questões que buscam, por um lado, verificar a compreensão do tema explorado na seção e, por outro, extrapolar algum dos conceitos abordados, por meio de uma situação-problema a ser resolvida.

3.5.2 Seção “Já sabe responder?”

Essa seção retoma a questão motivadora do início do capítulo. Inclui necessariamente uma figura, com o objetivo de fornecer elementos visuais para a elaboração da resposta à questão. Não há texto acompanhando a figura, mas pode haver uma pequena legenda. O estudo dos conceitos desenvolvidos no capítulo deve permitir ao aluno a elaboração de uma resposta significativa para a questão, completando, de certa forma, o ciclo que se iniciou com a provocação, continuou com a construção e se encerra, agora, com uma avaliação parcial dos conhecimentos adquiridos.

3.5.3 Seção “Trilhando o caminho das competências”

O grau de domínio dos conteúdos disciplinares, em qualquer área do conhecimento, precisa permitir ao estudante estabelecer relações de significado entre conceitos, interna ou externamente aos limites estabelecidos pelo escopo da disciplina. Assim, se é fundamental que o estudante compreenda, por exemplo, as leis de conservação a partir da resolução de problemas propostos nos livros didáticos, é também importante que ele as extrapole tanto para a análise de situações similares de outras áreas do conhecimento como para situações de seu cotidiano social.

A importância das disciplinas é indiscutível, pois são elas que destacam os objetos de estudo e os analisam, fornecendo os subsídios necessários para o desenvolvimento de competências pessoais. Além disso, entendemos que o terreno no qual os objetos de estudo são vistos em seus significados externos às fronteiras das disciplinas pode permitir fértil germinação das competências que se buscam desenvolver.

Concebemos a seção “Trilhando o caminho das competências” com o objetivo de colocar os estudantes em contato com situações que os estimulem a mobilizar competências pessoais, para vencer os

desafios que lhes são propostos na atividade. A vitória, nesses casos, estará sempre associada, por um lado, à mobilização dos conceitos que o estudante tiver construído durante sua vivência anterior no curso, e, por outro, à sua capacidade de selecionar, interpretar e organizar dados e informações apresentados por meio de textos, tabelas, gráficos, entre outros recursos.

Em síntese, com a criação dessa seção, visamos estimular o contato do estudante com situações que exigem as competências básicas necessárias para o enfrentamento de situações-problema mais complexas.

Ressaltamos que promover o estabelecimento de relações entre diferentes significados conceituais é um dos pilares sobre os quais se estruturam os princípios epistemológicos da coleção, e esse objetivo foi perseguido durante a confecção dos três volumes.

3.5.4 Seção “Investigar é preciso – atividade experimental”

Nessa seção, são propostos experimentos simples, para serem realizados pelos alunos, envolvendo os conceitos estudados na unidade. Na maioria dos casos, os alunos poderão realizá-los na própria sala de aula, com o auxílio do professor, ou como investigação pessoal, em casa, uma vez que os experimentos não exigem materiais ou procedimentos que possam comprometer a segurança dos alunos, tampouco necessitam de espaços físicos especiais para serem realizados.

Conforme já salientado, consideramos importante a prática frequente da dimensão empírica que acompanha a fenomenologia do saber físico. Entendemos, por isso, que experimentos produzidos e dirigidos pelos próprios estudantes, com materiais de fácil acesso, podem permitir, por um lado, a constatação de propriedades estudadas em sala de aula e, por outro, a investigação de fenômenos com o objetivo de lançar hipóteses e avaliar, em seguida, a possibilidade de comprová-las ou refutá-las. Enfatizamos a importância das questões propostas ao final do texto, elaboradas com o objetivo de estimular a reflexão dos alunos acerca das hipóteses que lançaram para a explicação do fenômeno observado. A condução da discussão pelo professor sobre acertos ou erros na elaboração das respostas poderá enriquecer a construção do conhecimento.

3.5.5 Seção “Para pesquisar em grupo – Será verdade mesmo que...”

A seção “Para pesquisar em grupo – Será verdade mesmo que...” convida os alunos a pensar sobre uma ideia ou um fato considerados verdadeiros, cuja proposição ou explicação se baseia no senso comum. São sugeridos caminhos para que grupos de trabalho elaborem pequenos projetos para verificar a pertinência da ideia ou revelar a explicação científica do fato.

A partir de uma questão inicial, os alunos são convidados e orientados a pesquisar a validade ou não do conteúdo exposto na questão. De modo geral, o

trabalho de pesquisa e de elaboração de respostas poderá ser realizado com a turma organizada em grupos, conforme sugerido nas orientações que constam da atividade. Após a realização da proposta de trabalho, é importante construir com os alunos uma formalização do conceito apresentado na seção.

3.5.6 Outras seções e boxes

São muitas as seções desta coleção que apresentam temas que extrapolam o campo teórico e experimental da Física, possibilitando uma abordagem integrada com outras áreas do conhecimento, por exemplo, “Para saber mais – Conexões com o cotidiano”, “Para saber mais – Saber físico e tecnologia” e “Trilhando o caminho das competências”, nas quais exploramos assuntos como o funcionamento de um *air bag*, a concentração de pessoas nas estações e vagões do metrô, entre outros. Essas seções incentivam os alunos a refletir sobre conceitos de outras disciplinas, permitindo sua ampliação em um trabalho interdisciplinar. A respeito dessa questão, convém retomar a análise realizada anteriormente sobre a importância dos contextos, pois eles ampliam o horizonte possibilitando relacionar diferentes assuntos.

Os contextos que podemos adotar para o tratamento dos conceitos são diversos e merecem ser contemplados, todos e a seu tempo, no trabalho pedagógico, especialmente aqueles que permitem realizar associações de significados entre conceitos de duas ou mais disciplinas, como propomos na seção “Explore em...”, apresentada ao longo dos volumes.

O tratamento de conceitos de modo interdisciplinar incentiva os alunos a estabelecer relações, ampliando seu universo de conhecimento e, nesse sentido, o papel do livro didático cresce em importância. As intervenções destacadas em alguns momentos do texto foram criadas com o objetivo de auxiliar o professor a buscar integrações entre o significado do conceito em sua disciplina e uma provável ampliação desse significado para outras disciplinas. Como exemplo, vamos analisar o “Explore em...” que está na Unidade 3, do volume do 1º ano, sobre as leis de Newton.



Explore em História

O lançamento do satélite russo Sputnik, em 1957, foi um dos marcos da chamada corrida espacial e da Guerra Fria, período marcado pela tensão político-militar entre a então URSS e os EUA. Outro fato marcante desse período foi o episódio conhecido como “crise dos mísseis”. O que foi essa crise?

Na unidade citada, são tratados os conceitos sobre gravitação universal. Um deles refere-se ao movimento de um satélite em órbita. Identificamos, assim, o tema e o momento pertinente para que o professor converse com os alunos sobre o período

histórico caracterizado como Guerra Fria, um dos mais marcantes de toda a convulsão política e social ocorrida no século XX. Para a abordagem do tema com a profundidade adequada, além do que é sugerido neste *Suplemento*, o professor de Física poderá atuar em conjunto com os professores de História, Filosofia, Arte e Sociologia, dada a riqueza das questões que podem ser extraídas da questão principal.

Os “Explore em...” oferecem, portanto, propostas de trabalho que relacionam conceitos da Física aos de outras áreas de conhecimento.

Assim como ocorre nas demais áreas do conhecimento, o trabalho com a oralidade, visando a defesa de ideias e de pontos de vista, baseados na argumentação e na linguagem adequada, deve fazer parte do processo de ensino e aprendizagem de Física desenvolvido em sala de aula. Para formalizar esse trabalho, oferecemos a seção “Socialize”, presente ao longo dos três volumes da coleção.

Em um dos “Socialize”, por exemplo, aproveitamos o assunto explorado na seção “Para pesquisar em grupo – Será verdade mesmo que... a Terra gira ao redor do Sol?”, para propor aos alunos um trabalho que envolve oralidade e argumentação. Vejamos:

Socialize

Proponha as duas questões anteriores para, pelo menos, uma pessoa da família. Compare as respostas obtidas com as suas. São respostas semelhantes ou totalmente diferentes? Se forem diferentes, em que diferem? Utilize a linguagem adequada e produza um texto na forma de reportagem de um jornal televisivo, expondo as opiniões colhidas e a do grupo. Argumente a favor e contra os modelos geocêntrico e heliocêntrico.

De acordo com a orientação do professor, leia a reportagem para seus colegas e ouça a avaliação que fizerem.

Partindo do tema da unidade, os alunos vão verificar o que algumas pessoas pensam sobre os sistemas geocêntrico e heliocêntrico. Talvez as respostas os surpreendam e eles possam utilizar seus conhecimentos de Física para expor o resultado da pesquisa. Nesse processo, as discussões em grupo, a construção de opiniões, a elaboração de argumentos baseados nos conhecimentos físicos e, por fim, os exercícios do debate e do convencimento tornam-se importantes instrumentos de aprendizagem.

A seguir, são listadas as seções e os boxes específicos inseridos na obra com o objetivo de complementar a apresentação dos conceitos e propor outras formas de abordagem.

- **Glossário:** definições de termos relacionados ao conhecimento presente no texto e que devem ser apresentados deslocados das explica-

ções. São significados importantes que não se encaixam no desenvolvimento da teoria.

- **Você se lembra:** conceitos, equações/fórmulas provenientes de outras disciplinas (Matemática, Química, Biologia) ou da própria Física (desenvolvidas nos demais volumes). Contém elementos fundamentais que garantem a continuidade da aprendizagem do conteúdo desenvolvido no capítulo e que foram aprendidos anteriormente.
- **Você precisa saber:** pequenos textos compostos por definições e/ou comentários importantes, que contenham ou não figuras, e que são essenciais para a compreensão de um conceito ou da teoria desenvolvida no capítulo, mas que devem ser deslocados do texto principal para evitar quebra de fluência textual.

4 Orientações sobre o uso deste material didático

O modo de utilização de qualquer material didático, com a aplicação das diversas atividades que o compõem, é prerrogativa única do professor, que organiza seu planejamento a partir das características de seus alunos e do curso que objetiva desenvolver.

Na escolha do material didático que adota, o professor revela sua concordância com a proposta pedagógica desenvolvida por seus autores. No sentido de fornecer ao professor o detalhamento natural da proposta, com sugestões de abordagens dos conteúdos e de aplicação das atividades, destacamos dois momentos neste *Suplemento*. Em um deles oferecemos, especialmente, sugestões para a condução dos trabalhos em cada capítulo de cada unidade. Nessa etapa, que consta da parte específica do *Suplemento*, propomos, por exemplo, o encaminhamento das discussões acerca das respostas às questões iniciais, modos de abordagem para os temas das diversas seções, aprofundamentos prováveis para os conceitos do capítulo, resolução das questões propostas etc.

Nesta parte do *Suplemento*, apresentamos sugestões gerais sobre como o professor poderá utilizar o livro em suas aulas, independentemente dos conteúdos deste ou daquele capítulo.

O primeiro passo que julgamos importante referir-se à organização dos conteúdos nos tempos de aula. Cabe ao professor considerar a adequação da sequência de tratamento dos conceitos, em cada capítulo, ao seu cronograma de aulas do período. Nessa escolha, será importante que o professor tenha em mente algumas observações anteriores deste *Suplemento* acerca da necessidade de:

- Tratar de modo equilibrado os conceitos de todos os grandes temas da Física.
- Selecionar a escala adequada para o desenvolvimento dos conceitos de cada tema, de modo

a poder apresentá-los aos alunos com a qualidade exigida, respeitada a disponibilidade da grade curricular.

- Considerar a abordagem matemática dos conceitos como elemento auxiliar na interpretação e na tradução dos fenômenos, minimizando a proposição de exercícios que exijam aplicação mecânica de fórmulas e procedimentos.

Abertura de unidades e capítulos

Conforme mencionamos anteriormente, julgamos importante que os alunos reflitam sobre as concepções espontâneas que possuem sobre os conceitos que serão abordados, e que lhes seja disponibilizada a possibilidade de revisão dessas concepções a fim de que possam construir seu conhecimento físico com as características desejadas.

O título de cada capítulo é acompanhado de uma questão, de acordo com os objetivos já destacados. Além dos aspectos comentados sobre a importância de tais questões em nossa proposta pedagógica, julgamos que elas podem ser o estopim para a introdução dos conceitos do capítulo, no sentido de que, de alguma forma, traduzem uma situação-problema na qual os alunos poderão se envolver buscando respostas. Dessa forma, considerando a importância de abordar as questões iniciais, propomos que o professor avalie a possibilidade de que seus alunos reflitam sobre elas em momentos anteriores às aulas, preparando, de certa forma, o ambiente para a introdução do conceito. Em outras palavras, refletir sobre respostas às questões iniciais dos capítulos poderá se transformar em **tarefa de casa** para os alunos.

Os textos de introdução de cada capítulo podem e devem ser lidos pelos alunos, independentemente da atuação do professor. Esses textos pretendem estimular a atenção dos alunos para os temas de estudo do capítulo e podem também ser analisados com antecedência, sob a forma de tarefas de casa.

Texto principal e desenvolvimento dos conteúdos

Todos os textos dos capítulos podem e devem ser lidos e interpretados pelos alunos, em situações de sala de aula ou em outros momentos (em casa, na biblioteca etc.). Cabe ao professor selecionar as condições que julgar mais adequadas para que seus alunos apreciem o texto principal de cada capítulo. De qualquer forma, é o texto que fornece mais claramente ao professor uma das possíveis maneiras de apresentar os conceitos, e, nessa medida, poderá ser utilizado antes ou após seu momento de aula.

Questões resolvidas

As questões resolvidas devem servir para que os alunos verifiquem sua compreensão dos conteúdos que estão sendo desenvolvidos, e, de preferência, devem ser discutidas em sala de aula, com o acom-

panhamento do professor. A resolução apresentada a cada exercício permitirá que apenas os alunos com maiores dificuldades, que não consigam obter os resultados corretos, solicitem a ajuda de colegas ou do professor. Para o enfrentamento das questões resolvidas, o professor poderá propor aos alunos que se organizem em duplas, e assim estimular a discussão e o intercâmbio de procedimentos de resolução.

Questões propostas

As questões propostas, que permeiam os itens dos capítulos, foram concebidas com o propósito de sedimentar a construção conceitual. Nessa medida, devem, sempre que possível, ser resolvidas em sala de aula, com o acompanhamento do professor. Todavia, a disposição das aulas de Física na grade curricular poderá exigir que os alunos resolvam parte das questões como tarefa de casa. Nesse caso, será importante que, em momento apropriado, o professor considere e discuta as dúvidas que eventualmente surgirem.

Destacamos que as questões propostas não têm por objetivo apenas a fixação dos conteúdos, mas também dar continuidade ao processo de construção conceitual iniciado nas investigações, nas exposições, nas leituras ou nos experimentos dos quais os alunos participam. Nesse contexto, torna-se importante que todas as questões de uma seção sejam resolvidas antes de ser iniciado o estudo dos conceitos de outra.

No final de cada unidade, apresentamos a seção "Questões de integração", que traz questões selecionadas de concursos, como Enem e vestibulares de várias instituições brasileiras de ensino superior. O objetivo é proporcionar uma revisão de alguns conteúdos dos capítulos da unidade e oferecer questões diferenciadas para o aluno acompanhar seu aprendizado.

Seções

As diversas seções que permeiam os textos das unidades foram concebidas a partir dos objetivos arrolados anteriormente, e entendemos que a qualidade da construção conceitual que os alunos venham a atingir está diretamente relacionada à vivência que possam ter com a realização das situações propostas nas seções. Dessa forma, recomendamos ao professor que avalie com cuidado a possibilidade de aplicar os temas de todas as seções, comentando-as em sala de aula ou pedindo que os alunos leiam e reflitam sobre os temas em casa e tragam dúvidas e comentários para a aula, para serem discutidos com os demais colegas.

Lembramos que algumas das seções foram criadas com o objetivo específico de estimular a realização de atividade em grupo. Julgamos importante que os alunos possam socializar suas dúvidas e conclusões a respeito de determinados conteúdos, e que momentos de atividades em grupo sejam previstos e cumpridos à medida que se desenvolvem os conteúdos programáticos.

5 Avaliação da aprendizagem

A avaliação da aprendizagem dos alunos do curso de Física tem características próximas da avaliação que se faz em outras disciplinas do Ensino Médio. Mas não podemos deixar de considerar as especificidades de uma disciplina que tem bases experimentais. Assim, pensar a avaliação da aprendizagem em Física implica considerar dois aspectos: um de cunho geral, fundamentado pelos recentes estudos didático-pedagógicos,⁵ e outro associado ao anterior, voltado às características próprias da relação ensino-aprendizagem do conhecimento físico.

Por que avaliar?

A avaliação da aprendizagem é um dos principais elementos de sustentação da atual lógica escolar, na medida em que procedimentos avaliativos são, de certa forma, responsáveis por legitimar a qualidade da evolução dos alunos na construção de seu conhecimento acadêmico. Se não há curso que não avalie, com todas as dificuldades que tal ato signifique, pensar a avaliação como processo global de identificação do desempenho estudantil, com sucessos e fracassos, é prioridade em todo e qualquer planejamento pedagógico.

Há casos em que avaliações são os únicos elementos motivadores das práticas de sala de aula, sendo vistas com temor pelos alunos e como reflexo de poder pelo professor. Felizmente, é cada vez menor o número de “educadores” a manter prática dessa natureza, expressa, normalmente, nos jargões diários como “é isto que vai cair na prova”, “a prova estará muito difícil; estudem!”, “quem não fizer todos estes exercícios vai se dar mal”. Avaliar, nesse contexto, traduz-se simplesmente em “aprovar” ou “reprovar”; avaliar é mais do que isso, muito mais.

Um processo avaliativo voltado para estudantes que passam boa parte de seu tempo diário na escola, em cursos regulares de formação básica, deve ter por objetivo a verificação do aprendizado efetivamente alcançado pelo estudante, mas, ao mesmo tempo, precisa contemplar a possibilidade real de fornecer elementos que subsidiem o trabalho docente. De certa forma, portanto, é a avaliação educacional o elemento que referenda a qualidade do trabalho pedagógico. Um antigo provérbio, aplicado ao contexto pedagógico, poderia ser assim escrito: “Dize-me como avalias e te direi o professor que és”.

Partindo do pressuposto de que a avaliação educacional é um dos pilares da estrutura pedagógica de um curso de formação, vale pensar que, ao avaliar nossos alunos, estamos agindo de acordo com nossa

concepção sobre a maneira pela qual eles constroem seu conhecimento. Sistemas formados por avaliações com uma única característica, notadamente as objetivas, registradas no tempo e espaço, são signatários da concepção de que o conhecimento humano se constrói cartesianamente, pouco a pouco, como elos de uma corrente que o estudante vai construindo à medida que é aprovado de uma etapa a outra de sua escolaridade. Todavia, os atuais estudos sobre a natureza epistemológica do conhecimento⁶ apontam para a ideia de que aprendemos determinado conceito quando compreendemos seu significado, ato que é realizado apenas quando percebemos esse significado associado a outros e mais outros, que de alguma forma lhes são próximos. Compreender, portanto, é construir significados sobre os objetos de conhecimento. Desse modo, o ato de compreender determinado conceito está mais relacionado com a metáfora de uma teia que se constrói com múltiplos nós e caminhos do que com a ideia cartesiana da corrente de elos.

A concepção segundo a qual construímos nosso conhecimento à medida que elaboramos uma espécie de rede formada por nós/significados, entrelaçados nos mais variados caminhos, exige pensar em processos avaliativos que cumpram a dupla função citada anteriormente: acompanhar a evolução do estudante e subsidiar a prática pedagógica do professor.

Assim, respondida a questão inicial sobre “por que avaliar”, o passo seguinte nos leva a buscar resposta a outra indagação: “O que avaliar?”.

O que avaliar?

Boa parte da avaliação que preparamos busca verificar se nossos alunos adquiriram ou não conteúdos específicos. De fato, se, por um lado, não há como analisar a evolução dos alunos nem recolher elementos para o prosseguimento do trabalho pedagógico se não aplicarmos avaliações de conteúdo, precisamos, por outro, ampliar o foco de nosso olhar para aspectos mais gerais e formativos, que caminham para além da importância dos conteúdos; precisamos focar **competências**.

O princípio de um ensino voltado para o desenvolvimento de competências serviu de base para a criação dos PCN, em 1999. Desde então, educadores têm se mobilizado na busca por compreender quanto seus projetos educativos se adéquam a essa nova orientação. Em linhas gerais, a organização curricular, de acordo com a proposta de um ensino para o desenvolvimento de competências pessoais, deve considerar:⁷

- a visão orgânica do conhecimento.

⁵ Ver bibliografia apresentada para complementação da formação docente.

⁶ Na bibliografia indicada para o professor, encontram-se referências sobre o trabalho de Nilson José Machado acerca do conhecimento que se constrói com base na metáfora da rede de significados.

⁷ Adaptado dos PCN Ensino Médio, p. 87.

- as múltiplas interações entre as disciplinas do currículo.
- as relações entre o aprendido e o observado, entre a teoria e as aplicações práticas.
- as linguagens como formas de constituição dos conhecimentos.
- que o conhecimento é construção coletiva.
- que a aprendizagem mobiliza afetos, emoções e relações com seus pares.

Não entraremos na questão da pertinência dos currículos ao desenvolvimento de competências, detendo-nos apenas em comentários sobre como podemos detectar em nossos alunos, em momentos de avaliação, a mobilização de determinadas competências.

Demonstra competência em determinada situação o sujeito que mobiliza capacidades gerais cognitivas para o enfrentamento de alguma dificuldade que lhe é apresentada. Parece, portanto, que um ser competente é aquele capaz de resolver problemas, das mais variadas naturezas. Se isso é fato, precisamos pensar nossos cursos, e também nossas avaliações, com o foco na metodologia da resolução de problemas.

Avaliar as competências de nossos alunos pode significar propor a eles que resolvam situações inéditas, para as quais necessitem mobilizar uma série de habilidades cognitivas e elaborar estratégias de enfrentamento do problema. Nessa perspectiva, precisamos relativizar a apresentação aos nossos alunos de exercícios emoldurados com os tradicionais comandos “Calcule... Resolva... Determine...” e priorizar propostas de situações-problema contextualizadas, envoltas por narrativas mais elaboradas, que exijam definição de estratégias e seleção de procedimentos e argumentações.

Retomando a questão inicial sobre “O que avaliar?”, os PCN explicitam a necessidade de estimular o desenvolvimento de competências pessoais e pedem que nossos procedimentos avaliativos sejam concebidos com esse mesmo foco. Para tanto, compreendemos ser necessário colocar o foco não apenas sobre instrumentos de resultados imediatos, mas também considerar aspectos mais gerais da formação do estudante, como aqueles citados há pouco (o conhecimento é construção coletiva; a aprendizagem mobiliza afetos, emoções; as linguagens como formas de constituição dos conhecimentos etc.). Não imaginamos a possibilidade de desenvolvimento de cursos e a aplicação de avaliações sem a construção conceitual, ou, em outros termos, sem que os alunos dominem os conceitos disciplinares (da Física, da História, da Gramática etc.). Podemos, sim, esperar de nossos alunos mais do que a simples reprodução de situações discutidas anteriormente, ou a simples aplicação de rotinas de resolução exercitadas há pouco, à exaustão; podemos esperar, e avaliar, que:

- leiam e interpretem os textos narrativos dos enunciados de situações-problema;
- sejam capazes de identificar e relacionar as variáveis importantes;

- identifiquem os procedimentos de resolução mais adequados para o momento;
- pesquisem as informações que eventualmente não possuam e que sejam importantes para o caso que analisam;
- socializem com seus pares as possibilidades que imaginam para a superação do desafio que lhes foi imposto;
- organizem as resoluções que elaboram;
- apresentem os resultados de modo que possam ser compreendidos por todos.

Como avaliar?

Avaliar é um processo dinâmico, de diagnóstico contínuo da evolução dos estudantes, que permite repensar e reformular, se for o caso, os procedimentos e os instrumentos utilizados, a fim de que seu objetivo maior seja atingido, isto é, que os alunos realmente aprendam.

O dinamismo implícito no processo avaliativo exige pensá-lo como algo contínuo, para o qual a atenção do professor deve sempre estar voltada. Dessa forma, momentos de avaliação são praticamente todos os momentos de aula, e não apenas formados por avaliações objetivas, com datas prefixadas. O sentido maior da avaliação, de diagnosticar a evolução dos estudantes, exige a análise dos resultados parciais, a identificação das causas de resultados não desejados e, ainda, correções instantâneas de possíveis distorções. De fato, não há possibilidade de um sistema avaliativo eficiente, cumpridor das tarefas listadas, sem que seja concebido com o propósito da continuidade.

Se a avaliação é um processo contínuo e formativo, podemos inferir sobre a necessidade de diversificar, ao máximo, os instrumentos que utilizamos nessa tarefa. Assim, além da observação contínua, é importante considerar os momentos de provas, os trabalhos realizados individualmente ou em grupos, as avaliações em que permitimos consultas a livros e/ou cadernos, as pequenas tarefas que solicitamos de uma aula para outra, a criação de situações-problema com base nos contextos discutidos em sala de aula etc. Será a ampliação do espectro de instrumentos que permitirá ao professor analisar, revisar, ponderar e concluir seu veredito acerca da evolução de cada aluno.

Sintetizando as rápidas respostas às três questões (“Por que avaliar?”, “O que avaliar?” e “Como avaliar?”), citamos o texto de Machado,⁸ que resume a importância do professor na elaboração do processo de avaliação de seus alunos:

[...] a complexidade da tarefa do professor ao avaliar envolve o reconhecimento e a sementeira de valores fundamentais, que às vezes aparentemente se entrecrocavam, como razão, emoção, criatividade, disciplina, imaginação, concentração, solidariedade, desempenho, honra, honestidade, vontade, entre outros. Mas envolve também a competência e o discernimento de um magistrado, sabendo situar-se acima de filigranas técnicas, quando o que está em cena é o pleno desenvolvimento do ser humano. (p. 279)

⁸ MACHADO, Nilson José. *Epistemologia e didática*. São Paulo: Cortez, 2002.

5.1 Avaliação da aprendizagem em Física

As características próprias do conhecimento físico exigem, como os demais, um processo de avaliação contínuo e diversificado que considere a aprendizagem de conteúdos específicos e, além disso, o desenvolvimento de competências pessoais. Partindo dessa premissa, vamos considerar, em concordância com os pressupostos pedagógicos que sustentam nossa proposta, sugestões de quando e como podemos conceber momentos de avaliação.

Avaliações objetivas

Consideramos avaliações objetivas aquelas em que o aluno registra o conhecimento específico sobre algum tópico de conteúdo. Não questionamos, portanto, a validade desse tipo de instrumento, desde que não se constitua em instrumento único, ou que supere o valor que se possa atribuir a todos os demais.

Para avaliar, por exemplo, o conhecimento dos alunos acerca do conceito de conservação de energia mecânica, podemos pedir que resolvam situações-problema clássicas, como aquelas contextualizadas sobre o movimento de um carrinho de brinquedo de parque de diversões. Mas, além disso, devemos apresentar a eles outros contextos e situações, para que percebam a dimensão real do conceito, e o percebam em seus diversos significados. De qualquer maneira, avaliações objetivas não precisam sempre exigir conteúdos memorizados pelos alunos, podendo permitir que eles consultem seus apontamentos ou o livro didático. O conjunto de problemas das seções “Questões propostas” do livro pode servir de modelo tanto para o professor, na busca e seleção que fizer de questões para a composição formal da avaliação, como para os alunos, que, ao se envolverem com a resolução dos problemas, tomarão contato com os conceitos aplicados em diferentes situações, com diferentes significados.

Avaliações em grupos

A resolução de problemas em Física deve se constituir no principal eixo metodológico para o trabalho em sala de aula, e isso deve ocorrer com a avaliação. Resolver problemas é ato contínuo, que demanda tempo e que se desenvolve como resultado de um ensino prolongado e planejado. Ao oferecer a oportunidade de, cotidianamente, enfrentarem situações-problema de vários tipos, nos quais os conceitos transpareçam relacionados intra e interdisciplinarmente, o professor estará estimulando nos alunos a capacidade de mobilizar estratégias de raciocínio cada vez mais eficazes para funções cada vez mais complexas.

Uma avaliação elaborada com o objetivo de ponderar a capacidade dos estudantes na resolução de problemas precisa considerar problemas não padronizados, que não tenham características semelhantes àqueles com os quais eles se envolveram anteriormente. Nesses casos, avaliações pensadas para serem cumpridas por duplas de alunos é uma estratégia recomendável, na medida em que estimulam a socia-

lização, favorecendo comportamentos importantes, como responsabilidade e organização.

Vários textos apresentados nas seções “Para saber mais” poderão ser utilizados pelo professor para compor situações de avaliação em grupo. Nesses casos, sugerimos que os alunos se organizem e leiam o texto sem a interferência do professor, fazendo registros de suas interpretações a respeito da leitura e respondendo às questões propostas.

Trabalhos extraclasse e de pesquisa

O conhecimento físico extrapola aquele que podemos apresentar aos nossos alunos em sala de aula, por mais tempo e dedicação que nós e eles tenhamos. Dentro da perspectiva relatada anteriormente, a respeito da escolha de uma escala apropriada para a apresentação dos conceitos, está implícita a ideia de que o tempo de estudo dos alunos pode ser expandido para além daquele destinado ao contato direto com o professor dentro da escola. No entanto, para que esse tempo seja, de fato, utilizado para auxiliar a formação conceitual e a mobilização de comportamentos desejáveis, não podemos solicitar que ele seja despendido apenas na fixação da teoria discutida em classe. A resolução de exercícios de fixação é apenas um dos componentes do rol de atividades que podemos propor aos nossos alunos.

Diariamente são divulgados na mídia acontecimentos envolvendo conceitos científicos, e o professor poderá solicitar que os alunos acompanhem as comunicações orais e/ou escritas para delas recolher elementos que permitam a identificação dos conteúdos estudados.

As tarefas que os alunos devem cumprir fora do ambiente da sala de aula, seja na biblioteca da escola, seja no laboratório de informática ou em casa, precisam ser avaliadas com critérios muito bem definidos. Uma das possibilidades, nesse caso, consiste em lhes oferecer fichas de avaliação, para que eles registrem todos os resultados parciais do trabalho que realizam.

Retomando os aspectos elencados anteriormente, a respeito da avaliação da aprendizagem dos alunos, destacamos a importância de:

- avaliar os conceitos físicos que os alunos dominam e como expressam seus conhecimentos sobre eles;
- analisar os processos e a clareza, objetividade e coerência com que os alunos expõem suas conclusões e opiniões;
- compor um processo contínuo de avaliação, formado por diferentes instrumentos;
- propor situações-problema em que os conceitos físicos possam ser vistos em seus diferentes significados e envoltos por diferentes contextos;
- proporcionar momentos de autoavaliação;
- destacar a evolução dos alunos de modo constante, com vistas a reformulações e/ou manutenções de propostas e objetivos;
- estimular o uso de materiais didáticos de todo tipo, começando pelo livro didático e chegando a publicações especializadas do contexto científico.

Bibliografia sugerida

Documentos oficiais

BRASIL. *Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio, Diretrizes para o Ensino Médio*. Brasília: MEC; SEB, 1999.

BRASIL. *PCN+ Ensino Médio: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio*. Brasília: MEC; SEMTEC, 2002.

BRASIL. *Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional*, Lei nº 9.394. Brasília: Casa Civil, 1996.

Pedagogia

ALMEIDA, Maria José P. M. *Linguagens comum e matemática em funcionamento no ensino de Física*. II Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, 1999.

ARENDT, Hannah. *Responsabilidade e julgamento*. São Paulo: Companhia das Letras, 2004.

ASTOLFI, Jean-Pierre; DEVELAY, Michel. *A didática das ciências*. Campinas: Papirus, 1994.

BACHELARD, Gaston. *Formação do espírito científico*. Rio de Janeiro: Contraponto, 2002.

BODEN, Margaret A. *Dimensões da criatividade*. Porto Alegre: Artmed, 1999.

BRONOWSKY, J. *Ciências e valores humanos*. São Paulo: Edusp, 1979.

BRUNER, Jerome. *A cultura da educação*. Porto Alegre: Artmed, 2001.

_____. *Atos de significação*. Porto Alegre: Artmed, 1997.

_____. *Uma nova teoria da aprendizagem*. Rio de Janeiro: Bloch, 1976.

DELIZOICOV, Demétrio et al. *Ensino de ciências: fundamentos e métodos*. São Paulo: Cortez, 2003.

EGAN, Kieran. *A mente educada*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002.

FREIRE, P. *Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa*. São Paulo: Paz e Terra, 1997.

GILBERT, John K.; BOULTER, Carolyn J. Aprendendo ciências através de modelos e modelagem. In: *Modelos e educação em ciências*. Rio de Janeiro: Ravil, 1998.

GUSDORF, Georges. *Professores para quê?* São Paulo: Martins Fontes, 2003.

HADJI, Charles. *Avaliação desmistificada*. Porto Alegre: Artmed, 2001.

KUHN, T. S. *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo: Perspectiva, 1978.

MACHADO, Nilson José. *Educação: competência e qualidade*. São Paulo: Escrituras, 2009.

_____. *Epistemologia e didática*. São Paulo: Cortez, 1995.

MARINA, José Antonio. *Teoria da inteligência criadora*. Lisboa: Caminho da Ciência, 1995.

MOLES, Abraham A. *A criação científica*. São Paulo: Perspectiva, 2007.

MOREIRA, Marco Antonio. Modelos mentais. In: MORTIMER, Eduardo; SMOLKA, Ana Luiza. *Linguagem, cultura e cognição*. Belo Horizonte: Autêntica, 2001.

MORTIMER, E. F. *Linguagem e formação de conceitos no ensino de ciências*. Belo Horizonte: UFMG, 2000.

PERRENOUD, Philippe. *Dez novas competências para ensinar*. Porto Alegre: Artmed, 2000.

_____. *Escola e cidadania*. Porto Alegre: Artmed, 2005.

PIETROCOLA, Maurício. A Matemática como estruturante do conhecimento físico. In: *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. Florianópolis: UFSC, 2002.

POPPER, Karl R. *Conhecimento objetivo*. São Paulo: Edusp, 1975.

POZO, Juan Ignacio. *A solução de problemas*. Porto Alegre: Artmed, 1998.

ROBILOTTA, M. R. *Construção e realidade no ensino de Física*. São Paulo: IFUSP, 1985.

Ensino de Física

ABDALLA, M. *Bohr: o arquiteto do átomo*. São Paulo: Odysseus, 2003.

BARHAM, P. *A ciência da culinária*. São Paulo: Roca, 2002.

BASSALO, J. M. et al. *Aspectos contemporâneos da Física*. Belém: UFPA, 2000.

BATHERN, R. *A luz*. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

BERKES, I. *A Física no cotidiano*. Lisboa: Gradiva, 1992.

BOUVET, J. F. *Tem mesmo ferro no espinafre? E outras ideias feitas testadas e aprovadas*. São Paulo: Ática, 1998.

BRAGA, M.; GUERRA, A.; FREITAS, J.; REIS, J. C. *Newton e o triunfo do mecanicismo*. São Paulo: Atual, 1999.

BRENNAN, R. P. *Gigantes da Física*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1998.

BRODY, E. B. et al. *As sete maiores descobertas científicas da história*. São Paulo: Companhia das Letras, 1999.

CANIATO, R. *As linguagens da Física mecânica*. São Paulo: Ática, 1990.

CARVALHO, A. M. P. *Física: proposta para um ensino construtivista*. São Paulo: Pedagógica e Universitária, 1989.

CAVALCANTE, M. A. et al. *Física moderna experimental*. São Paulo: Manole, 2007.

CHAVEZ, A. et al. *Aplicações da Física quântica: do transistor à nanotecnologia*. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

CHESMAN, C. et al. *Física moderna experimental e aplicada*. São Paulo: Livraria da Física, 2004.

DAOUL, L.; CARUSO, F. *Tirinhas de Física*. Rio de Janeiro: Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2001.

EINSTEIN, A.; INFELD, L. *A evolução da Física*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2008.

- FEYNMAN, R. P. *Está a brincar, Sr. Feynman!* Lisboa: Gradiva, 1988.
- _____. *Física em 12 lições*. Rio de Janeiro: Ediouro, 2006.
- _____. *Física em seis lições*. Rio de Janeiro: Ediouro, 1995.
- _____. *Lições de Física de Feynman*. Porto Alegre: Artmed, 2008.
- _____. *Sobre as leis da Física*. Rio de Janeiro: Contraponto, 2012.
- FIGUEIREDO, A.; PIETROCOLA, M. *Calor e temperatura*. São Paulo: FTD, 2000.
- _____. *Física, um outro lado – Faces da energia*. São Paulo: FTD, 2000.
- _____. *Física, um outro lado – Luz e cores*. São Paulo: FTD, 2000.
- FIOLHAIS, C. *Física divertida*. Lisboa: Gradiva, 1991.
- FISCHER, L. *A ciência no cotidiano: como aproveitar a ciência nas atividades do dia a dia*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2004.
- GAMOW, G. *Einstein e o universo relativístico*. São Paulo: Atual, 2000.
- _____. *O incrível mundo da Física Moderna*. São Paulo: Ibrasa, 1980.
- GAZZINELLI, R. *Teoria da relatividade especial*. Rio de Janeiro: Edgard Blücher, 2009.
- GLEISER, M. *A dança do Universo*. São Paulo: Companhia das Letras, 1997.
- _____. *A harmonia do mundo*. São Paulo: Companhia das Letras, 2006.
- _____. *O fim da terra e do céu*. São Paulo: Companhia das Letras, 2001.
- GREENE, B. *O Universo elegante*. São Paulo: Companhia das Letras, 2001.
- GREF. *Grupo de Reelaboração do Ensino de Física*. São Paulo: Edusp, 1990.
- GRIBBIN, J. *À procura do gato de Schrödinger*. Lisboa: Presença, 1988.
- _____. *Fique por dentro da Física Moderna*. São Paulo: Cosac Naify, 2001.
- GUERRA, A.; BRAGA, M.; REIS, J. C. *Bohr e a interpretação quântica da natureza*. São Paulo: Atual, 2005.
- HEWITT, P. G. *Física conceitual*. Porto Alegre: Artmed, 2002.
- KRAUSS, L. M. *Sem medo da Física*. Rio de Janeiro: Campus, 1995.
- MENEZES, L. C. *Vale a pena ser físico?* São Paulo: Moderna, 1988.
- MONTANARI, V. *Nas ondas da luz*. São Paulo: Moderna, 1995.
- OLIVEIRA, I. *Física moderna para iniciados, interessados e aficionados*. São Paulo: Livraria da Física, 2005. 2 v.
- PERELMAN, I. *Física recreativa*. Moscou: Mir, 1980.
- PESSOA Jr., O. *Conceitos de Física quântica*. São Paulo: Livraria da Física, 2006. v. 1.
- PIRES, A. *Evolução das ideias da Física*. São Paulo: Livraria da Física, 2008.
- ROCHA, J. F. *Origem e evolução das ideias da Física*. Bahia: EDUFBA, 2002.
- SAGAN, C. *Bilhões e bilhões*. São Paulo: Companhia das Letras, 1998.
- _____. *O mundo assombrado pelos demônios*. São Paulo: Companhia das Letras, 1997.
- SPEYER, E. *Seis caminhos a partir de Newton*. Rio de Janeiro: Campus, 1995.
- STRATHERN, P. *Oppenheimer e a bomba atômica em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1998.
- WALKER, J. *O grande circo da Física*. Lisboa: Gradiva, 1990.
- WOLKE, R. L. *O que Einstein disse a seu cozinheiro*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2003.
- _____. *O que Einstein disse a seu cozinheiro 2*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2005.



1 Apresentação

De acordo com as concepções gerais para o ensino de Física, destacadas na parte geral deste Suplemento, consideramos importante que você tenha a seu dispor todo um arsenal de informações e orientações que possa complementar seu trabalho, da forma que julgar apropriada. Para tanto, abordaremos os seguintes aspectos nesta parte específica:

- apresentação das habilidades gerais, objetivos e conteúdos de cada capítulo.
- orientações de tratamento metodológico e sugestões de complementação para desenvolvimento dos conteúdos apresentados em cada unidade e em cada capítulo.
- resolução de todos os exercícios propostos.
- sugestões de atividades complementares.
- indicações bibliográficas para aprofundamento da formação pedagógica e especializada do professor.
- indicações bibliográficas para o aluno, visando a complementação da construção conceitual realizada em sala de aula.

Convidamos você a analisar com atenção todos os aspectos que lhe serão apresentados, convictos de que o professor é o personagem fundamental na condução do processo de ensino-aprendizagem, a quem caberá julgar, selecionar e colocar em prática as sugestões que, em seu entender, possam contribuir positivamente para seu trabalho e para uma aprendizagem efetiva dos alunos.

2 Orientações para a utilização da obra e instrumentos de complementação didático-pedagógica

Sobre o texto de apresentação

Sugerimos que o texto de apresentação do livro do aluno seja lido com a turma. Ao escrevê-lo, tivemos o propósito de caracterizá-lo como um convite aos estudantes para perceberem de que maneira a Física pode mudar sua maneira de enxergar e compreender o mundo físico que os cerca. Esperamos que o aluno pressinta que sua jornada de conhecimento ao longo do Ensino Médio poderá levá-lo a se tornar um leitor mais consciente dos fenômenos que ocorrem no seu entorno, sentindo-se muito mais motivado a aprender.

Relembre com seus alunos quais temas da Física já foram tratados no Ensino Fundamental. “De que modo eles se relacionaram com esse conhecimento?” “A análise foi fenomenológica ou também algébrica?” Pensamos que é de grande importância que você conheça pelo menos parte daquilo que os alunos pensam ou sabem sobre os conteúdos que verão em seguida. Essa perspectiva de abordagem pode ajudá-lo a estruturar seu curso com mais propriedade. Além disso, valoriza-se o que o aluno sabe e, ao que ele já conhece, propõem-se novas questões estimulando sua disposição em aprender.

Peça aos estudantes que citem situações ou fenômenos vinculados ao cotidiano, que, segundo eles, poderiam ser estudados pela Física ao longo do Ensino Médio. Faça, se possível, uma lista na lousa e, no final, sinalize quais daqueles tópicos serão objeto de estudo no 1º, 2º e 3º anos.

Calor e temperatura



Abertura da unidade



A seguir, apresentamos o que se espera dos alunos ao final desta unidade e uma proposta para introdução dos conteúdos.

Objetivos:

Ao final desta unidade, o aluno deverá ser capaz de:

- Diferenciar calor de temperatura.
- Estabelecer relações entre diferentes escalas termométricas.
- Compreender e utilizar diagramas e gráficos que expressam relações entre diferentes escalas termométricas ou relações entre diversas grandezas termométricas e temperatura.
- Identificar as formas de transmissão de calor: condução, convecção e radiação.
- Reconhecer a dilatação volumétrica dos sólidos como um dos efeitos das trocas de calor entre corpos.
- Aplicar as leis de dilatação linear, superficial e volumétrica dos sólidos na resolução de situações-problema que envolvem a dilatação térmica dos corpos.
- Identificar evidências de dilatação e contração térmica nas situações vivenciadas no cotidiano.
- Compreender a relação entre a dilatação real e a aparente de um líquido e a dilatação do recipiente que o contém.
- Conceituar capacidade térmica de um corpo e calor específico de uma substância.
- Resolver problemas utilizando a equação fundamental da Calorimetria.
- Diferenciar calor sensível de calor latente.
- Analisar as trocas de calor em um sistema termicamente isolado.
- Distinguir calorímetros ideais e reais.
- Interpretar as curvas de aquecimento de um corpo, identificando as regiões de mudança de fase.

Nesta unidade, iniciam-se os estudos dos fenômenos físicos relacionados ao calor, uma forma de energia bastante particular e de importância fundamental para a existência dos seres vivos na Terra. Discutimos o conceito de calor, suas formas de propagação, bem como dois de seus principais efeitos: a dilatação e a contração térmicas.

Após a apropriação do conceito de calor, é possível estabelecer a equação fundamental da Calorimetria e discutir os fenômenos associados às mudanças de estado e às trocas de calor em recipientes termicamente isolados.

No Capítulo 1, procuramos diferenciar a noção de sensação térmica do conceito de temperatura. A sensação térmica é uma avaliação qualitativa do estado térmico de um sistema, ao passo que a temperatura é uma grandeza física associada à agitação térmica das partículas de um sistema e pode ser quantificada.

Além disso, discutimos o conceito de calor e apresentamos seus processos de propagação: condução, convecção e radiação térmicas. Optamos por um enfoque fenomenológico dos processos de propagação, de modo que os alunos possam comparar e analisar situações cotidianas e/ou fenômenos naturais em que tais processos de propagação estejam presentes e identificar cada um deles nas diversas circunstâncias.

Iniciamos o Capítulo 2 com a apresentação do conceito de grandezas termométricas, esclarecendo que é necessário graduar e calibrar um termômetro para efetuar a leitura de valores de temperatura em uma escala termométrica. A seguir, mostramos as escalas Celsius e Fahrenheit. Com base em uma representação esquemática que mostra a variação da temperatura de um sistema em uma escala termométrica em função da temperatura na outra, estabelecemos a relação matemática entre essas escalas por meio de sua relação de proporcionalidade. Consideramos essencial a discussão sobre o significado de uma escala absoluta. Como a temperatura é a grandeza física relacionada à agitação molecular, e o zero absoluto está relacionado à ausência dessa agitação térmica, é impossível atingir tal valor de temperatura.

Finalizamos esse capítulo com o desenvolvimento de equações de conversão entre uma grandeza termométrica qualquer em função da temperatura. Optamos por uma abordagem que explicita a relação de proporcionalidade entre essas grandezas e desaconselhamos qualquer tipo de memorização dessas equações.

Ao longo do Capítulo 3, discutimos a dilatação térmica dos sólidos. No dia a dia, o aluno costuma se deparar com diversas circunstâncias nas quais observa os efeitos de expansão e contração volumétricas em corpos submetidos à variação de temperatura. Embora todos os corpos sofram variações simultâneas em suas três dimensões, optamos por analisar separadamente, para fins didáticos, as dilatações e contrações lineares, superficiais e volumétricas dos corpos. Convém chamar a atenção dos alunos para a impossibilidade de encontrar situações em que ocorram exclusivamente dilatações (ou contrações) lineares ou superficiais.

Dedicamos o Capítulo 4 ao estudo da dilatação volumétrica dos líquidos. Embora breve, esse capítulo apresenta um tema com o qual o aluno convive cotidianamente. Destacamos a dilatação anômala da água, em virtude da importância dessa substância e da irregularidade de seu comportamento em relação à dilatação dos líquidos, em geral.

No Capítulo 5, apresentamos a equação fundamental da Calorimetria a partir do conceito de calor específico de uma substância e das relações de proporcionalidade direta entre as grandezas quantidade de calor trocada por um corpo e sua respectiva massa ou variação de temperatura. Nossa opção metodológica privilegia o tratamento qualitativo dos fenômenos. No estudo do calor e especialmente nas relações entre as grandezas aqui citadas, essa opção se confirma. Mas reconhecemos a importância da interpretação matemática do fenômeno na estruturação e na análise quantitativa das situações-problema propostas ao longo do estudo das leis físicas associadas à Calorimetria, notadamente quando se relacionam à equação fundamental.

Abordamos ainda o experimento de Joule que possibilitou a determinação do equivalente mecânico do calor. Ressaltamos a importância do estudo das interações entre eventos mecânicos e os relacionados ao calor. Consideramos fundamental que o aluno se aproprie da aplicação do princípio de conservação de energia às partículas ínfimas da matéria e aos sistemas estudados nas situações-problema deste capítulo.

Passamos, a seguir, às mudanças de fase dos corpos quando aquecidos ou resfriados. O aluno vivencia em seu cotidiano vários acontecimentos que envolvem mudanças de estado dos corpos, especialmente em corpos compostos majoritariamente de água. O conhecimento qualitativo de nossos alunos a respeito das transformações que acontecem ao observar o gelo derretendo, a chuva caindo, a água em ebulição etc. é proveniente em parte de sua vivência, em parte de seus estudos no Ensino Fundamental. O saber físico escolar do Ensino Médio comporta tanto a análise quantitativa quanto a qualitativa dos fenômenos associados à mudança de fase. Nessa etapa, destacamos a necessidade de incentivar os alunos a construir e analisar curvas de aquecimento e de resfriamento de substâncias. O desenvolvimento dessa competência facilita a compreensão dos conceitos que envolvem as mudanças de estado.

Na sequência, enfocamos as situações-problema envolvendo as trocas de calor em recipientes termicamente isolados. Sugerimos o levantamento de fatos do cotidiano que envolvam trocas de calor em recipientes termicamente isolados ou não.

Para começo de conversa: *O que são “ilhas de calor” de uma região?*

Conforme expusemos na parte geral deste *Suplemento*, julgamos que a questão proposta na abertura pode ser importante para, por um lado, verificar conhecimentos espontâneos que os alunos trazem sobre os conceitos

abordados na unidade e, por outro, permitir o traçado de um fio condutor para revestir esses conceitos da qualidade própria dos conhecimentos científicos. Desse modo, peça a alguns alunos que leiam em voz alta as prováveis respostas para a questão. Em seguida, sugerimos construir uma lista com algumas das respostas ou recolher várias delas para serem analisadas ao final da unidade.

Assim, os alunos poderão reconhecer mais claramente os novos conhecimentos aprendidos e os elementos essenciais para responder com mais propriedade à pergunta inicial.

Sugerimos que esse procedimento seja adotado em todas as unidades da obra, conforme explicitado neste *Suplemento*. Para evitar a repetição dessa instrução, ela será inserida apenas na primeira unidade de cada um dos volumes, podendo também ser consultada, quando necessário, na parte geral do *Suplemento*.

A questão apresentada na abertura desta unidade faz referência às denominadas “ilhas de calor”. Trata-se de um fenômeno típico de algumas regiões das grandes metrópoles. Nessas regiões, a temperatura medida em local de sombra pode atingir 3 °C acima da temperatura registrada nos bairros periféricos, por exemplo. Para discutir a questão, solicite aos alunos que apresentem seus conhecimentos prévios sobre o tema. Existe a possibilidade de o assunto ter sido estudado em Geografia. Caso contrário, solicite que façam uma pesquisa sobre o assunto ou proponha um trabalho conjunto com o professor daquela disciplina. Eles também podem elaborar um roteiro de perguntas a ser encaminhado ao professor de Geografia. As respostas podem ser discutidas tanto nas aulas de Física como nas de Geografia, de acordo com o enfoque pretendido pelos professores. Sugerimos planejar uma aula conjunta sobre o tema “ilhas de calor”.

A pergunta visa dar início à discussão sobre a propagação de calor e seus efeitos. Como a resposta envolve vários dos conceitos a serem abordados posteriormente e oferece ao aluno a oportunidade de mostrar o que já sabe sobre o assunto, é recomendável ler com a classe o texto de abertura da unidade, observando também a foto da cidade de Recife, com os bairros verticalizados, e os mapas que representam o adensamento urbano da cidade, causa da formação das “ilhas de calor”.

É provável que os alunos apresentem respostas relacionadas com o efeito estufa ou com o aquecimento global. Esse tema é muito importante na agenda de questões da atualidade e também é discutido ao longo desta unidade.

Convite à reflexão

Conhecer como o calor é transmitido vai auxiliar os alunos a entender alguns dos efeitos dessa propagação em situações que envolvem, por exemplo, a dilatação e a contração térmicas. Os fenômenos associados às variações de temperatura e explicados pelas trocas de calor entre corpos são alguns dos temas tratados na Termologia, parte da Física cujo estudo inicia-se nesta unidade. Para introduzir o assunto, sugerimos propor aos alunos as questões a seguir:

- Por que uma bebida quente permanece mais tempo aquecida quando colocada em uma garrafa térmica?
- Por que existem vãos entre as placas de concreto de viadutos e pontes?
- Por que, ao caminhar descalços ao redor de um lago em uma manhã ensolarada, sentimos que a terra está mais quente que a água? Por que a sensação é a mesma quando caminhamos na faixa de cimento ou de pedra que rodeia uma piscina?
- É mais fácil cozinhar alimentos inteiros ou cortados em pequenos pedaços? Por quê?
- Por que se utiliza água na refrigeração de automóveis?

É recomendável que os alunos respondam às questões do “Convite à reflexão” a partir de suas ideias, sem se preocupar em formular respostas absolutamente corretas. Nesse momento da aprendizagem, convém pesquisar os conhecimentos prévios dos alunos, visando a aquisição de elementos para desestabilizá-los, se necessário. Essas questões devem servir para despertar a curiosidade sobre os conceitos tratados na unidade e mostrar que os conhecimentos de que os alunos dispõem podem não ser suficientes para responder às questões propostas.

A primeira pergunta tem a intenção de incentivar o aluno a refletir sobre um objeto relativamente comum, cujo funcionamento nem sempre é conhecido. A garrafa térmica é um bom dispositivo para estudar as formas de transmissão de calor: condução, convecção e radiação térmicas. Ao se deparar com a questão, eles poderão perceber que não têm informações suficientes para respondê-la. Dessa maneira, terão a oportunidade de incorporar novos conhecimentos sobre o funcionamento desse e de outros dispositivos a partir do estudo da propagação de calor.

Na segunda questão, caso perceba que os alunos não têm informações sobre a existência de vãos entre as placas de concreto em viadutos e pontes, incentive-os a pesquisar em livros e na internet a respeito desse tema. O objetivo da questão é o aluno reconhecer a dilatação térmica dos corpos como um dos efeitos do calor.

Um dos principais objetivos desta unidade é apresentar os conceitos de capacidade térmica e calor específico. Ao responder à terceira questão, os estudantes devem ser incentivados a recordar suas sensações térmicas ao vivenciar as situações propostas na pergunta. Encaminhe a discussão solicitando que questionem o motivo das diferenças entre essas sensações.

Peça-lhes que consultem seus familiares e levantem hipóteses que pareçam mais prováveis para responder à quarta questão. As aulas subsequentes podem começar com o relato das respostas obtidas por eles.

Essa questão tem o objetivo de estimular o aluno a perceber que, quanto menor for a massa de um corpo, maior será a quantidade de energia térmica recebida por ele, ou seja, o ganho de energia térmica é inversamente proporcional à massa do corpo. Assim, quanto menores os pedaços de alimento a serem cozidos,

maiores quantidades de calor serão absorvidas em determinados intervalos de tempo e será mais fácil cozinhá-los. A questão intenciona facilitar a aprendizagem do conceito de capacidade térmica.

A última questão remete ao conceito de calor específico e difere da terceira, pois tem por objetivo incentivar o aluno a refletir sobre uma propriedade característica da água. É desejável estender esse conceito para todas as substâncias, embora essa generalização provavelmente só seja obtida ao longo do estudo do Capítulo 5 desta unidade.

CAPÍTULO 1

Temperatura, calor e sua propagação

ou: Por que, habitualmente, chocolates e bombons são embrulhados em papel-alumínio?

1 Habilidades a serem desenvolvidas

- Reconhecer o conceito de calor como energia em trânsito devido à diferença de temperatura entre corpos.
- Reconhecer o conceito de temperatura como grandeza associada ao grau de agitação térmica média das partículas de um sistema.
- Diferenciar as grandezas calor e temperatura.
- Identificar situações em que se estabelece o equilíbrio térmico.
- Analisar situações cotidianas e fenômenos naturais em que ocorram processos de propagação de calor (condução, convecção ou radiação) e identificar o(s) processo(s) envolvido(s) em cada uma dessas situações.

2 Sobre a questão introdutória



Reiteramos a opção de abordar os conceitos de temperatura e calor privilegiando a análise de fenômenos naturais e cotidianos. Assim, com os estímulos fornecidos pelas questões formuladas no início da unidade e do capítulo e com os fenômenos apresentados, procuramos diferenciar temperatura e calor e propor situações variadas em que a identificação dos processos de propagação de calor contribua para a assimilação dos conceitos de temperatura, equilíbrio térmico e calor.

Como os fenômenos relacionados ao calor são processos em que ocorrem transformações energéticas, é recomendável que, em suas aulas, sejam consideradas as relações entre os fenômenos mecânicos e os referentes ao calor. As situações estudadas neste capítulo podem ser consideradas aplicações do princípio de conservação da energia às partículas componentes dos corpos e sistemas analisados.

Convém reforçar a apresentação do conceito de calor como energia em trânsito devido à diferença de temperatura, pois os alunos ainda veem o calor como algo possuído por um corpo ou sistema. A abordagem do conceito de calor é excelente oportunidade para trabalhar o significado desse termo para o senso comum e o saber físico.

Ao término do capítulo, quando a pergunta introdutória é reapresentada no quadro “Já sabe responder?”, convém que a resposta seja dada por escrito. Depois disso, peça aos alunos que se reúnam em pequenos grupos (3 a 4 alunos) para comparar as respostas dadas nas duas ocasiões, no início do capítulo e ao término do estudo. Para concluir, solicite-lhes que produzam uma resposta final única construída a partir da troca de ideias entre os elementos do grupo.

3 Orientações para o trabalho dos conteúdos



A seguir, há uma questão sobre o princípio do equilíbrio térmico. Trata-se de uma questão simples na qual o aluno precisará estabelecer a relação entre o conhecimento desse princípio e sua expressão matemática. A atividade pode ser realizada em duplas.

- Em um sistema isolado termicamente são colocados quatro corpos, *A*, *B*, *C* e *D*. Os corpos *A*, *B* e *C* estão inicialmente em equilíbrio térmico. A temperatura do corpo *D* é maior que a temperatura dos corpos *A*, *B* e *C*.
- a) Estabeleça uma relação matemática que evidencie uma comparação entre os valores iniciais das temperaturas dos corpos.
- b) Após certo intervalo de tempo, o que ocorre com as temperaturas dos corpos colocados no recipiente termicamente isolado? Estabeleça uma relação matemática que evidencie uma comparação entre os valores finais das temperaturas dos corpos.

Respostas

- a) Pela lei zero da Termodinâmica, como os corpos *A*, *B* e *C* estão inicialmente em equilíbrio térmico, suas temperaturas são iguais. Como a temperatura do corpo *D* é maior que a dos corpos *A*, *B* e *C*, uma relação matemática que evidencie a comparação entre os valores iniciais das temperaturas dos corpos pode ser expressa por: $T_A = T_B$; $T_A = T_C$; $T_A < T_D$
- b) Após certo intervalo de tempo, há transferência de energia térmica na forma de calor do corpo *D* para os corpos *A*, *B* e *C*, pois estes se encontram a uma temperatura menor. Essa transferência cessa quando o sistema atinge novo equilíbrio térmico, provavelmente a uma temperatura intermediária entre os valores iniciais das temperaturas dos corpos *A*, *B*, *C* e *D*. A relação matemática que evidencie uma comparação entre os valores finais das temperaturas dos corpos é expressa por: $T'_A = T'_B$; $T'_A = T'_C$; $T'_A = T'_D$



A questão proposta a seguir pode servir como estímulo à pesquisa dos alunos ou como discussão introdutória ao estudo dos processos de propagação de calor.

- É possível voar aproveitando a diferença de temperatura do ar?

Resposta

No caso dos balões de ar quente, usa-se uma chama para aquecer o ar da parte interna. Essa massa de ar sobe para a parte superior do balão, resfria-se, retorna para baixo, aquece-se na chama, torna-se menos densa, sobe novamente, e assim sucessivamente. Esse movimento da massa de ar caracteriza as correntes de convecção. Nesse processo, a temperatura do ar no interior do balão torna-se maior que a temperatura externa. Essa mistura de gases é menos densa que o ar externo devido ao aquecimento da massa de ar interna do balão. Assim, a diferença de temperatura possibilita que o balão suba e, dessa maneira, as pessoas possam “voar”.

A discussão e a elaboração da resposta devem ser feitas em grupos pequenos (3 a 4 alunos). Para ilustrar a resposta, os grupos podem pesquisar imagens de balões usados em passeios turísticos na internet.

Essa questão permite que o aluno retome os conceitos aprendidos, como equilíbrio de forças, a segunda lei de Newton e empuxo. A retomada desses conceitos pode ser feita a partir da leitura dos textos: “Como funcionam os submarinos?”; disponível em: <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/submarinos.htm>>, e “Como funcionam os balões de ar quente?”, disponível em: <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/baloes-de-ar-quente.htm>>; acessos em: 12 abr. 2016.



Essa atividade pode ser desenvolvida com o professor de Geografia. A previsão do tempo baseia-se em dados observados de hora em hora nas estações meteorológicas de superfície espalhadas pelo território nacional e em imagens obtidas por satélite.

No Brasil, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) coordena cerca de 400 estações, distribuídas em dez distritos regionais que recebem, processam e enviam dados para a sede, em Brasília-DF, onde esses dados são processados e divulgados por satélite.

Após a coleta de dados (precipitação, ventos, umidade relativa do ar, pressão etc.), com o auxílio de supercomputadores, faz-se uma simulação, utilizando modelos numéricos, sobre como o tempo variará num intervalo de 24, 48, 72 e 96 horas. Além das informações fornecidas pelo modelo numérico, usam-se também as imagens de satélites, que podem ser geradas a cada 30 minutos, de hora em hora ou a cada 3 horas.

A previsão do tempo é muito importante para setores como agricultura, aeronáutica, navegação marítima e fluvial, turismo, entre outros.

Mais informações sobre previsão do tempo estão disponíveis em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>; <<http://goo.gl/2cYLbZ>>; acessos em: 9 maio 2016.

A atividade pode ser complementada com uma pesquisa sobre as alterações climáticas que vêm ocorrendo no mundo e provocando o aumento dos desastres naturais.



O aquecimento global é tema atual e objeto de debate na comunidade científica e na sociedade. Embora ainda não tenha sido desenvolvido o estudo dos gases (objeto da Unidade 2 deste volume), consideramos pertinentes as discussões sobre efeito estufa e aquecimento global ao longo desta unidade, pois constituem temas relacionados com os processos de propagação de calor.

A seguir, sugerimos a leitura de alguns textos sobre efeito estufa e aquecimento global: “Efeito estufa e aquecimento global”, disponível em: <<http://goo.gl/ZOm6mo>>; “As mudanças climáticas”, disponível em: <<http://goo.gl/O3w4ND>>; “Alterações climáticas”, disponível em: <<http://goo.gl/F6lgAf>>; acessos em: 12 abr. 2016. Para desenvolver a atividade, a turma pode ser dividida em grupos. A seguinte questão problematizadora pode ser proposta aos grupos: “O efeito estufa é prejudicial à vida na Terra?”. Cada grupo deve respondê-la com base na leitura dos textos indicados ou outros que forem pesquisados em jornais, revistas ou na internet.

CAPÍTULO 2

Termômetros: grandezas e equações de conversão

ou: *Estar em um ambiente onde a temperatura esteja a 70 graus pode ser agradável?*

1 Habilidades a serem desenvolvidas

- Identificar a existência de grandezas termométricas, ou seja, grandezas que variam proporcionalmente com a temperatura.
- Reconhecer a necessidade de calibração ou gradação de um termômetro para o registro de valores de temperatura em uma escala.
- Estabelecer relações entre diferentes escalas termométricas.
- Compreender e utilizar diagramas e gráficos que expressem relações entre diferentes escalas ou grandezas termométricas e a grandeza física temperatura.
- Representar em gráfico cartesiano a variação de temperatura em determinada escala em função da variação de outra escala ou grandeza termométrica qualquer.

2 Sobre a questão introdutória



Sugerimos iniciar o capítulo solicitando aos alunos a estimativa de valores de

temperaturas, na escala Celsius, em situações cotidianas, como: a do ambiente, do dia e da noite anterior, da fervura da água etc. Essa iniciativa tem o objetivo de avaliar e valorizar o conhecimento prévio deles.

É provável que apresentem temperaturas nas quais a unidade é o “grau centígrado”. É dessa maneira que a mídia costuma se referir à escala Celsius. Nesse caso, pergunte aos alunos se têm ideia do significado da palavra “centígrada”. Talvez eles a associem a “cem” e a “grau”. Nesse momento, questione se conhecem a escala Celsius e exemplifique com situações do dia a dia o uso dessa escala na medição da temperatura e sua gradação. Questione também se conhecem outras escalas termométricas propondo que respondam à questão: “Estar em um ambiente onde a temperatura esteja a 70 graus pode ser agradável?”. Incentive os alunos a pesquisar respostas para essa questão. Vale lembrar que as investigações devem ser realizadas em fontes confiáveis, que forneçam informações corretas, precisas e atualizadas.

A questão tem o objetivo de avaliar se os alunos conhecem outras escalas termométricas, além da escala Celsius. Ao longo da discussão, convém chamar a atenção para o uso incorreto do termo “graus” como unidade de temperatura. A temperatura de 70 graus pode ser agradável dependendo da escala termométrica empregada. Nessa questão, é omitida a unidade termométrica, o que constitui um erro. Se na pergunta fosse explicitada a unidade de temperatura, poderíamos respondê-la da seguinte maneira: 70 graus Celsius (70 °C) não representam uma temperatura agradável, mas 70 graus Fahrenheit (70 °F) indicam uma temperatura amena, equivalente a aproximadamente 21 °C.

Ao término do capítulo, quando a pergunta introdutória é reapresentada na seção “Já sabe responder?”, sugerimos que os alunos a respondam por escrito. Depois, reunidos em grupos, eles podem comparar as respostas fornecidas nas duas ocasiões, isto é, no início do capítulo e no final. Para terminar, solicite aos grupos que produzam uma resposta única, a partir da troca de ideias e dos conhecimentos aprendidos ao longo do capítulo.

3 Orientações para o trabalho dos conteúdos



Propomos a seguir uma atividade experimental bastante simples para introduzir uma discussão sobre a calibração de um termômetro e também sobre o estabelecimento de uma equação de conversão entre uma grandeza termométrica e a temperatura medida por um termômetro previamente graduado.

Nesta atividade, são necessários dois termômetros, uma régua flexível ou fita-crepe, na qual se possa escrever e/ou desenhar, um béquer ou um recipiente para colocar água, gelo ou água gelada. Caso não haja número suficiente de termômetros, pode-se montar apenas um conjunto e realizar a atividade mostrando os passos do procedimento para os alunos. Nesse caso, três alunos manipulam os dispositivos e colhem os dados durante a realização do experimento.

O procedimento é simples: fixa-se a régua flexível ou a fita-crepe (com uma escala previamente desenhada) a um dos termômetros, tendo o cuidado de não deixar que a origem da régua coincida com a indicação zero grau Celsius do termômetro.

As leituras de temperatura no termômetro acoplado à régua estão relacionadas às variações em centímetros das medidas de altura da coluna de mercúrio. Coloca-se água à temperatura ambiente no bquer e mede-se sua temperatura nesse recipiente, utilizando os dois termômetros: o graduado em graus Celsius e aquele no qual a régua está fixada. Repetem-se as leituras com o recipiente contendo água gelada ou uma mistura de água e gelo. Após a coleta dos dados, os alunos devem ser incentivados a estabelecer uma relação de conversão entre as duas escalas utilizadas. É aconselhável retomar o teorema de Tales com eles.



Nossa opção de abordagem busca reconhecer a construção do saber como um empreendimento dinâmico, evidenciando o caráter histórico do conhecimento científico. Recomendamos a leitura do texto do professor Alexandre Medeiros. Nesse artigo, o autor discorre sobre a importância da pesquisa histórica e sobre a história do desenvolvimento da escala Fahrenheit. O texto está disponível em: <<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/%20article/viewFile/1082/839>>; acesso em: 9 abr. 2016.

CAPÍTULO 3

Dilatação dos sólidos

ou: Um avião pode ter o comprimento alterado enquanto está voando?

1 Habilidades a serem desenvolvidas

- Reconhecer a dilatação e a contração volumétricas dos sólidos como um dos principais efeitos das trocas de calor entre corpos.
- Identificar a dilatação e a contração volumétrica dos sólidos nas situações vivenciadas no cotidiano.
- Aplicar as leis de dilatação linear, superficial e volumétrica dos sólidos nas resoluções de situações-problema que envolvam a dilatação térmica dos corpos no estado sólido.

2 Sobre a questão introdutória



É provável que os alunos saibam que os corpos sofrem dilatações e contrações volumétricas quando submetidos a variações de temperatura. Sugerimos iniciar o estudo deste capítulo pela leitura, em sala de aula, dos textos contidos na Introdução e no item 2, “Dilatações e contrações”. Após a leitura, solicite aos alunos exemplos de situações cotidianas nas quais são percebidas dilatações e contrações térmicas. Nesse momento, talvez surjam contextos relacionados à dilatação e/ou contração térmica de líquidos ou, até mesmo, de gases. Aproveite a

oportunidade e faça uma lista com esses exemplos, que serão posteriormente aproveitados.

Ao final do capítulo, quando for trabalhar a pergunta introdutória na seção “Já sabe responder?”, convém que a resposta seja dada por escrito. Depois, os alunos, reunidos em grupos, poderão comparar as respostas fornecidas nas duas ocasiões (no início e no fim do capítulo). Nesse momento, a lista de respostas registradas na introdução do capítulo será de grande valia. Para terminar, peça aos grupos que produzam uma resposta única a partir da troca de ideias e dos conhecimentos aprendidos ao longo do capítulo.

3 Orientações para o trabalho dos conteúdos



A questão a seguir tem o objetivo de despertar o interesse dos alunos para uma pesquisa sobre a relação entre a dilatação térmica dos sólidos e o período de oscilação de um pêndulo. A última unidade deste volume trata das ondas, e o pêndulo simples é parte desse estudo. Cabe ao professor avaliar se a questão proposta é adequada às turmas com que está trabalhando, ou se é melhor apresentá-la quando do estudo dos movimentos periódicos.

- É possível que o tempo se dilate com a variação da temperatura?

Resposta

Nos antigos relógios de pêndulo calibrados de acordo com determinado “intervalo de temperatura”, a contagem do tempo poderia se “dilatar” ou se “contrair” em função do aumento ou da diminuição da temperatura, respectivamente. Nesse tipo de relógio, a marcação do tempo depende do período de oscilação de um pêndulo. Caso ocorra um aumento de temperatura fora do intervalo para o qual o relógio foi calibrado, o aumento do comprimento do pêndulo tornará seu período de oscilação mais longo. Em decorrência disso, a marcação do tempo se tornará mais lenta. Em relógios de pêndulo mais modernos, utilizam-se materiais cujas dimensões praticamente não variam com a temperatura, pois seus coeficientes de dilatação térmica são muito baixos. Desse modo, as possibilidades de “contração” ou “dilatação” da contagem do tempo são minimizadas.

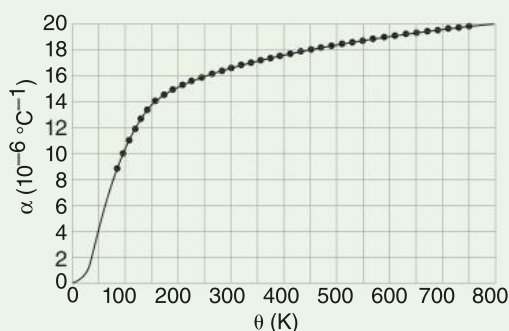
Sugerimos que a discussão e a elaboração da resposta sejam feitas em grupos pequenos (3 a 4 alunos).



A seguir, reproduzimos um trecho do artigo “Um experimento sobre a dilatação térmica e a lei de resfriamento”, dos professores Carlos Eduardo Aguiar e Luiz Fernando de Souza (Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro), publicado nas atas do *Simpósio Nacional de Ensino de Física*. Nesse artigo, os autores discutem brevemente a magnitude e a variação dos coeficientes de dilatação linear de materiais em função da temperatura.

[...] Um aspecto importante a ser observado [...] é que os coeficientes de dilatação são muito pequenos, tipicamente da ordem de $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Isso significa que, para um aumento de temperatura de $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, uma barra de 1 metro terá um aumento de comprimento da ordem de 0,01 milímetro. Esses valores tão pequenos tornam difícil acompanhar visualmente uma expansão térmica, o que complica a realização de demonstrações sobre o fenômeno em uma sala de aula. [...]

O coeficiente de dilatação de um corpo pode depender da temperatura [...]. A figura mostra como o coeficiente de dilatação do cobre varia com a temperatura [NIX, 1941].



Coeficiente de dilatação térmica do cobre como função da temperatura

Embora os coeficientes de dilatação sejam geralmente positivos, algumas substâncias apresentam coeficientes negativos. O exemplo mais famoso é o da água, que, entre $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, se contrai ao ser aquecida.

Disponível em: <<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xviii/sys/resumos/T0402-2.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2016.



Consideramos viável e adequada a proposta de demonstração relatada no artigo disponível em: <<http://goo.gl/AhQUUo>>; acesso em 9 abr. 2016. De acordo com os autores, Luiz Fernando de Souza e Carlos Eduardo Aguiar, a demonstração consiste em verificar como uma barra de alumínio, que foi aquecida pela chama de uma vela, esfria em contato com o ar; os resultados quantitativos do experimento são apropriadamente descritos pela lei de Newton. O objetivo é proporcionar ao aluno a visualização da dilatação térmica de um sólido de uma maneira diferente das situações cotidianas. Pode-se utilizar o arranjo experimental descrito no texto para coletar dados e determinar o coeficiente de dilatação térmica do alumínio. Ao realizar essa demonstração em sala de aula ou, se possível, no laboratório de Física, convém prestar muita atenção ao uso dos materiais, sobretudo às velas utilizadas para o aquecimento da barra de alumínio, orientando os alunos a serem cuidadosos ao manipulá-las.



A questão a seguir pode ser proposta aos alunos como questão problematizadora, tornando-se um estímulo para a introdução ao estudo da dilatação superficial dos sólidos.

Para o trabalho com essa questão em sala de aula, a discussão e a elaboração da resposta podem ser feitas em grupos pequenos (3 a 4 alunos). Como apoio para a resposta, podem ser apresentadas aos alunos fotos de objetos que contenham orifícios, como rolimãs, CDs, engrenagens etc.

- O tamanho do espaço vazio no centro de uma engrenagem, de um rolimã ou de um CD também se altera quando a temperatura varia?

Resposta

Objetos com orifícios, como CDs, rodas de veículos, espelhos de tomadas, anéis, entre outros, são alguns exemplos de corpos que apresentam superfícies nas quais há áreas vazias.

Quando esses corpos são submetidos à variação de temperatura, suas superfícies ficam sujeitas à dilatação ou à contração. As partes vazias, porém, aumentam ou diminuem de tamanho? Em caso de aumento de temperatura, o orifício aumentará de perímetro (e de diâmetro, caso seja circular), como se estivesse totalmente preenchido. Com a elevação de temperatura, as partículas ao longo do perímetro se afastam de suas posições de equilíbrio, expandindo esse perímetro (ou diâmetro). O fenômeno inverso ocorre quando a temperatura diminui. Todas as dimensões do corpo, incluindo suas áreas vazias, se contraem.



S15

Sugerimos que os alunos leiam o texto a seguir em sala de aula. As questões propostas podem ser discutidas em grupos para ampliar a leitura realizada.

Dilatação térmica de materiais: um fenômeno que auxilia na construção de peças e componentes industriais

A dilatação térmica dos materiais é uma preocupação constante para engenheiros, arquitetos e projetistas.

No entanto, algumas vezes, o fenômeno da dilatação térmica é aproveitado para permitir o encaixe perfeito entre peças, como ocorre no processo de fabricação de determinados tipos de rodas esportivas para automóveis e motocicletas.



A dilatação térmica é aproveitada em uma das etapas da fabricação de rodas esportivas. O mesmo fenômeno era antigamente utilizado para circundar com aros metálicos as rodas de madeira de carroças.

O aro da roda esportiva (o qual será depois envolto pelo pneu) e o centro dessa roda (a parte que será aparafusada ao veículo) são fabricados separa-

damente, geralmente em alumínio. O centro da roda apresenta raio externo ligeiramente maior que o raio interno do aro ao qual deverá se encaixar. Para permitir a conexão ao centro da roda, o aro é uniformemente aquecido com um maçarico. Seu espaço central então se dilata, permitindo que o centro da roda possa ser nele inserido. Com o resfriamento, o diâmetro interno do aro diminui, proporcionando um encaixe perfeito e rígido. Uma solda ou prendedores auxiliares são então aplicados para garantir a união entre as duas peças.

LUIZ RUBIO



Na fabricação de rodas de liga leve (por exemplo, de alumínio), a dilatação térmica tem a função de produzir o encaixe perfeito entre o aro e o centro da roda.

Elaborado com base em: HORA, Valberto Ferreira da. Apostila da disciplina Processo de Fabricação Veicular do curso de Engenharia Mecânica Automobilística. Faculdade de Engenharia Industrial (FEI); e LIMA, João M. Inspeção e diagnóstico de juntas de dilatação em obras de arte rodoviárias. *Revista Engenharia Civil*, Lisboa, n. 28, 2007.

Questões

1. De que maneira o aro e o centro da roda são encaixados na fabricação de rodas esportivas?
2. Se o aro da roda esportiva é aquecido, seu espaço central não deveria diminuir por causa da dilatação do material, em vez de aumentar?

Respostas

1. O centro da roda esportiva é fabricado de maneira que seu raio externo seja maior que o raio interno do aro. Esse aro é aquecido com maçarico para que o espaço central se dilate até ficar maior que o raio externo do centro da roda. O centro é encaixado no aro e, quando este se resfria, o diâmetro interno se reduz, aderindo perfeitamente à parte central. As duas peças são soldadas ou fixadas com prendedores auxiliares, garantindo uma união perfeita.



STOCKSNAPP/
SHUTTERSTOCK

LUIZ RUBIO

2. O espaço central da roda deve aumentar por causa da dilatação, e não diminuir. Se considerarmos o modelo mecânico de um sólido cristalino, quando a temperatura se eleva, as partículas, que estão fixas em suas posições na rede cristalina, passam a vibrar mais e a ocupar um espaço maior. É por essa razão que o sólido se dilata. Se o espaço central diminuísse em vez de aumentar, as partículas na borda interior do furo estariam mais próximas umas das outras e, portanto, com menos espaço para vibrar. Com o aumento de temperatura da peça, a única situação possível para que as partículas tenham mais espaço para vibrar é quando o espaço central aumenta.

CAPÍTULO 4

Dilatação dos líquidos

ou: Por que uma garrafa de vidro cheia de suco pode quebrar depois de ficar algumas horas no freezer?

1 Habilidades a serem desenvolvidas

- Reconhecer a dilatação e a contração volumétricas dos líquidos como um efeito das trocas de calor entre corpos.
- Identificar a dilatação e a contração volumétricas dos líquidos nas situações vivenciadas no cotidiano.
- Compreender a relação entre a dilatação real e aparente de um líquido e a dilatação do recipiente que o contém.
- Aplicar as leis de dilatação volumétrica dos líquidos nas resoluções de situações-problema.

2 Sobre a questão introdutória



S16

Como a dilatação dos sólidos foi tratada no capítulo anterior, é provável que os alunos estejam preparados para trabalhar com a ideia da dilatação dos líquidos. Além disso, eles vivenciam experiências que mostram a dilatação térmica dos líquidos, caso, por exemplo, do aquecimento do leite, ou da quebra de garrafas de vidro totalmente preenchidas por líquido quando esquecidas no congelador. Propomos que se inicie o Capítulo 4 incentivando os alunos a responder à questão introdutória. Dessa maneira, aqueles que tiveram essa experiência podem trocar ideias com os colegas que não passaram por essa situação. Convide-os a levantar hipóteses sobre esse fenômeno e a pensar em outros exemplos parecidos, como o transbordamento de combustível dos tanques de veículos quando estão totalmente preenchidos. Pergunte a eles qual é a diferença entre o transbordamento de combustível com o aumento da temperatura e a expansão da água com a diminuição da temperatura. Além disso, convém levá-los a pensar na dilatação real e aparente dos líquidos antes de ler sobre esse tema no livro ou desenvolvê-lo em aula. Dessa maneira, as manifestações de conhecimento prévio dos alunos serão valorizadas.

Ao término do capítulo, quando a pergunta introdutória é reapresentada na seção “Já sabe responder?”, é importante que a resposta seja dada por escrito. Depois, os alunos, reunidos em grupos, poderão comparar as respostas fornecidas nas duas ocasiões (no início e no fim do capítulo). Para finalizar, sugerimos pedir aos grupos que produzam uma resposta única a partir da troca de ideias e dos conhecimentos aprendidos ao longo do capítulo.

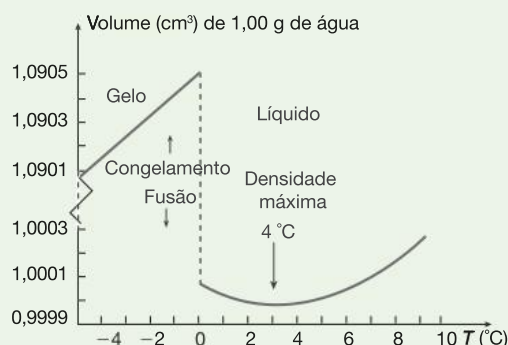
3 Orientações para o trabalho dos conteúdos



O texto a seguir discute a dilatação anômala da água. Recomendamos sua leitura para a turma, acompanhada da reprodução do gráfico na lousa e da respectiva explicação.

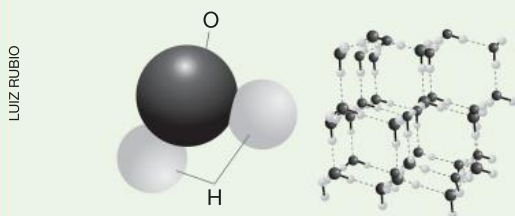
Dilatação anômala da água

Em geral, as substâncias e os materiais tendem a se contrair ao serem resfriados. A água, no entanto, é uma exceção, pois entre 4 °C e 0 °C seu volume aumenta em vez de diminuir.



Variação do volume da água em função da temperatura.

Se acompanharmos o gráfico no sentido do resfriamento (da direita para a esquerda), notaremos que, quando a água se solidifica (a 0 °C), ocorre uma pronunciada dilatação. A partir daí, se a temperatura continuar diminuindo, o gelo se contrairá, como qualquer outra substância. Mas por que a água tem esse comportamento incomum?



Representação esquemática, sem escala.

Na molécula de água, os átomos não estão alinhados, mas, sim, dispostos de modo que os dois átomos de hidrogênio formem um ângulo com o de oxigênio. No estado sólido, essa disposição angular das moléculas impede que elas formem agrupamentos muito próximos, gerando, em vez disso, estruturas cristalinas complexas, com muitos espaços vazios. Essas estruturas cristalinas ocupam um volume maior do que ocupariam se estivessem no estado líquido. A água líquida começa a adquirir esse arranjo quando sua temperatura desce abaixo de 4 °C, por isso seu volume começa a aumentar já antes da solidificação.

CAPÍTULO 5

Calorimetria

ou: Por que alimentos ainda quentes não devem ser levados à geladeira?

1 Habilidades a serem desenvolvidas

- Reconhecer a capacidade térmica como uma grandeza que representa a razão entre a quantidade de calor fornecida ou cedida por um corpo e a variação de sua temperatura, identificando-a como uma grandeza física característica de cada corpo.
- Reconhecer calor específico como uma grandeza física associada à característica de uma substância para receber ou ceder calor.
- Identificar situações cotidianas e fenômenos naturais explicados pelos conceitos de calor específico e de capacidade térmica.
- Aplicar a equação fundamental da Calorimetria na resolução de situações-problema.
- Relacionar as grandezas físicas quantidade de calor e energia mecânica por meio do estabelecimento do equivalente mecânico do calor.
- Diferenciar calor sensível de calor latente.
- Identificar situações nas quais aquecimentos/resfriamentos provocam mudanças no estado físico de um corpo.
- Compreender, interpretar e utilizar diagramas e gráficos que expressem curvas de aquecimento de um corpo e identificar nesses gráficos as regiões que indicam mudanças de estado físico.
- Representar em gráfico cartesiano a variação da quantidade de calor fornecida ou cedida por um corpo em função da variação de sua temperatura ou do tempo necessário para a ocorrência das trocas de calor a que o corpo está submetido.
- Analisar situações em que ocorrem trocas de calor em sistemas termicamente isolados.
- Diferenciar calorímetros ideais e reais.
- Resolver situações-problema em que estejam envolvidas trocas de calor aplicando o princípio de conservação da energia.

O Capítulo 5 começa com a formalização da unidade caloria e com a definição de fontes de calor. Na sequência, desenvolvemos o estudo dos conceitos de capacidade térmica de um corpo e de calor específico de uma substância. Os objetivos desse capítulo são estabelecer a **equação fundamental da Calorimetria**, abordar as fases e mudanças de fase da matéria

e as trocas de calor. Optamos por desenvolver a equação fundamental da Calorimetria a partir do conceito de calor específico de uma substância e das relações de proporcionalidade direta entre a quantidade de calor trocada por um corpo e:

- sua respectiva variação de temperatura;
- sua massa.

Reiteramos nossa opção de abordar os conceitos envolvidos nas situações estudadas privilegiando a análise de fenômenos cotidianos e da natureza. Dessa maneira, com os estímulos fornecidos pelas várias questões formuladas e pelos fenômenos físicos apresentados, procuramos estabelecer a equação fundamental da Calorimetria como uma relação significativa para a obtenção da quantidade de energia necessária para a variação da temperatura de um corpo. Convém lembrar que não é possível reduzir a equação apenas a uma fórmula a ser memorizada.

2 Sobre a questão introdutória



A pergunta introdutória de cada capítulo visa problematizar o assunto nele tratado, relacionando o conhecimento

prévio dos alunos com os conceitos e temas ali desenvolvidos. Assim, pode-se pedir a alguns deles que leiam em voz alta as respostas que julgarem prováveis para a questão. Você poderá elaborar uma lista com algumas das respostas ou recolher várias para analisar e discutir com a turma ao final do capítulo. Desse modo, os alunos poderão reconhecer mais claramente nos novos conhecimentos aprendidos os elementos essenciais para responder com mais propriedade à pergunta inicial.

Ao término do capítulo, quando a pergunta introdutória é reapresentada na seção “Já sabe responder?”, convém que a resposta seja dada, de preferência, por escrito. Os alunos, reunidos em grupos, poderão comparar as respostas fornecidas nas duas ocasiões.

Ao discutir a resposta da questão introdutória, sugerimos questionar a turma sobre o tempo ideal, após o preparo, para um alimento ser levado ao refrigerador. O alimento muito quente pode fazer a geladeira consumir mais energia elétrica para reduzir o aquecimento do ar interno causado por esse alimento; no entanto, os especialistas em saúde recomendam que os alimentos não consumidos imediatamente após o preparo devem ser levados ao refrigerador, para evitar a proliferação de bactérias, que podem causar infecção gastrointestinal.

3 Orientações para o trabalho dos conteúdos



A unidade cal (caloria) utilizada para a grandeza quantidade de calor é tam-

bém referência para a quantidade de energia fornecida pelos alimentos. No entanto, nas tabelas divulgadas em jornais, revistas e sites, ocorre uma supressão do prefixo quilo (k), referente à unidade caloria, fato que pode confundir os estudantes. Nessas tabelas, a unidade deveria ser corretamente expressa em quilocalorias (kcal), e não em calorias (cal), como geralmente ocorre.

Você pode aproveitar a apresentação mais formal da unidade caloria para desenvolver um trabalho sobre o uso dessa unidade nas tabelas de quantidade de energia dos alimentos. Se o tema ainda não tiver sido estudado em Biologia, sugerimos solicitar aos alunos que façam uma pesquisa sobre o assunto ou um trabalho com o professor dessa disciplina. Eles poderão elaborar perguntas e encaminhá-las ao professor de Biologia e discutir as respostas tanto nas aulas de Física quanto nas de Biologia, de acordo com o enfoque pretendido pelos professores. Assim, ambos poderão preparar aulas conjuntas sobre as “calorias dos alimentos”. A integração de disciplinas e a reafirmação do caráter multidisciplinar de temas abordados em ciência costumam motivar os alunos.

A partir da leitura do texto indicado a seguir, os alunos podem elaborar tabelas com dados de seus hábitos alimentares relacionados à quantidade de energia (em calorias) obtida por meio da alimentação. Convém lembrar que não temos formação especializada para fornecer aos alunos orientações nutricionais. A elaboração desse tipo de tabela visa apenas levá-los a manipular quantidades de energia estabelecidas na unidade caloria e seus múltiplos, que ora se torna objeto de estudo. Além disso, o estudo do uso da unidade caloria, associado às situações vivenciadas pelos estudantes em seu cotidiano, pode ser um meio eficaz para reforçar a aprendizagem do conceito de calor como forma de energia.

O texto a seguir foi extraído do livro *O que Einstein disse a seu cozinheiro: a ciência na cozinha*, de Robert L. Wolke. Nele, o autor apresenta a caloria da forma geralmente utilizada nas tabelas de quantidade de energia fornecida pelos alimentos. Se possível, distribua o texto para os alunos, para que, após a leitura, debatam o uso que se faz da unidade caloria nessas tabelas.

Caloria

Eu sei que uma caloria é uma unidade de calor, mas por que comer calor me faz engordar? E se eu só comesse comida fria?

Uma caloria é um conceito muito mais amplo do que apenas calor; é uma quantidade de qualquer tipo de energia. Poderíamos medir a energia de um caminhão em alta velocidade em calorias, se quiséssemos.

Energia é o que faz as coisas acontecerem; chame-a de “umpf”, se quiser. Ela vem sob diversas formas: movimento físico (pense no caminhão), ener-

gia química (pense na dinamite), energia nuclear (pense em reator), energia elétrica (pense na bateria), energia gravitacional (pense em cachoeira) e, sim, na forma mais comum de todas, calor.

Não é o calor que é o seu inimigo; é a energia – a quantidade de energia para viver que seu corpo recebe por meio da metabolização dos alimentos. E se o metabolismo daquele *cheesecake* produz mais energia do que a que você gasta caminhando da geladeira até a TV, o seu corpo vai guardar o excesso de energia como gordura. A gordura é um armazém concentrado de energia, porque tem o potencial de liberar montes de calor ao ser queimada. Mas não se precipite nas conclusões. Quando um anúncio promete: “queima de gordura”, é apenas uma metáfora; um maçarico não é um dispositivo viável para a perda de peso. Quanta energia é uma caloria e por que alimentos diferentes “contêm” (quer dizer, produzem) valores diversos de calorias ao serem metabolizados? Como o calor é a forma mais comum e mais conhecida de energia, a caloria é definida em termos de calor – quanto calor é necessário para aumentar a temperatura da água em determinada quantidade. Especificamente, como o termo é usado em nutrição, uma caloria é a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de um quilo de água em um grau Celsius.

[Os químicos, ao contrário dos nutricionistas e dietistas, usam uma “caloria” muito menor, apenas um milésimo disso. No mundo deles, a caloria nutricional é chamada de quilocaloria. Mas neste livro eu uso a palavra caloria no sentido comum, aquele de que falam os livros de alimentos, rótulos de alimentos e dietas.]

Eis uma ideia de quanto calor é uma caloria: uma caloria nutricional é a quantidade de calor que seria necessária para elevar a temperatura de meio litro de água em 0,11 °C.

Alimentos diferentes, como todo mundo sabe, nos fornecem quantidades diferentes de energia. No início, o conteúdo de caloria nos alimentos era medido realmente queimando-os num recipiente cheio de oxigênio mergulhado em água e medindo-se o aumento da temperatura da água. (O aparelho é chamado de calorímetro.) [...]

Mas a quantidade de energia liberada quando uma fatia de torta é queimada no oxigênio é a mesma quantidade de energia liberada ao ser metabolizada no corpo? Por incrível que pareça, é, embora os mecanismos sejam bem diferentes. O metabolismo libera sua energia bem mais devagar do que a combustão, e felizmente sem chamas. A reação química total, no entanto, é exatamente a mesma: alimento mais oxigênio produz energia e mais diversos produtos da reação. E um princípio básico da química diz que, se as substâncias iniciais e finais forem as mesmas, a quantidade de energia liberada é a mesma, não importa como a reação aconteceu. A única diferença prática é que os alimentos não são digeridos ou “queimados” completamente no corpo, de modo que, na verdade, retiramos deles um pouco menos do que a quantidade total de energia que eles liberariam se fossem queimados em oxigênio.

Na média, acabamos recebendo 9 calorias de energia para cada grama de gordura e 4 calorias para cada grama de proteína ou carboidrato. Desse modo, em vez de correr para o laboratório e botar fogo em todos os alimentos que estão à vista, os nutricionistas atualmente apenas somam os números de gramas de gordura, proteína e carboidrato numa porção e multiplicam por 9 ou por 4.

Sua taxa normal de metabolismo basal – o mínimo de energia usada só para respirar, fazer o sangue circular, digerir os alimentos, consertar os tecidos, manter a temperatura corporal normal e manter o fígado e rins etc. executando suas tarefas – é cerca de 1 caloria por hora para cada quilo de peso. O que dá cerca de 1.600 calorias por dia para um homem de 68 kg. Mas isso pode variar bastante, dependendo do gênero (mulheres precisam de 10% menos), idade, condições de saúde, tamanho e feitio do corpo e daí por diante. Entre outras coisas, o ganho de peso depende de quanto a ingestão de energia dos alimentos excede o gasto de energia com metabolismo e exercícios, sem contar o levantamento de garfo. Para um adulto saudável médio, a Academia Nacional de Ciências Norte-americana recomenda uma ingestão diária de 2.700 calorias para homens e 2.000 para mulheres – mais para atletas e menos para preguiçosos que ficam em frente à televisão.

A esperançosa teoria sobre comer alimentos frios, desprovidos de calorias, foi propalada sob várias formas durante algum tempo, mas infelizmente não funciona. Uma variação que ouvi foi que beber água gelada ajuda a perder peso porque você tem que gastar calorias aquecendo a água até que ela atinja a temperatura corporal. Em princípio, ela está certa e é trivial. Aquecer um copo de 250 mL de água gelada até a temperatura corporal usa menos do que 9 calorias, o equivalente a um único grama de gordura. Se dieta fosse tão fácil, os spas teriam piscinas de sorvete, pois tremer também gasta energia.

WOLKE, R. L. *O que Einstein disse a seu cozinheiro: a ciência na cozinha*. Rio de Janeiro: Zahar, 2003. p. 159-61.




O site <<http://www.cienciaemtela.nutes.ufrj.br/artigos/0208pereira.pdf>>; acesso em: 11 abr. 2016, da Rede de Investigação, Divulgação e Educação em Ciências da UFRJ, traz o artigo “Da construção ao uso em sala de aula de um vídeo didático de Física térmica”, do professor Marcus Vinicius Pereira, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Química, Nilópolis, RJ. No texto, o autor partilha de nossa opção por uma abordagem fortemente fenomenológica, enfatizando a importância de tratar dessa maneira os conceitos estudados na Física térmica. Ele também defende o uso dos vídeos didáticos como ferramenta eficiente tanto para a aprendizagem dos alunos como para a prática dos professores.

Além disso, o professor Marcus V. Pereira apresenta os *links* de acesso às demonstrações experimentais listadas a seguir, que compõem o vídeo “Demonstrações sobre conceitos de Física térmica”.

Código	Título	Duração
A1	Natureza do calor: calor como matéria	1 min 26 s
A2	Natureza do calor: calor como forma de energia	2 min 05 s
B1	Temperatura: grandeza intensiva	0 min 45 s
B2	Capacidade térmica: grandeza extensiva	1 min 58 s
C	Condutores e isolantes térmicos	2 min 20 s
D	Trocas de calor (I e II)	1 min 52 s
E	Mudanças de estado	2 min 03 s
F	Dilatação térmica	1 min 48 s
G1	Propagação do calor: condução	3 min 05 s
G2	Propagação do calor: convecção	1 min 52 s
G3	Propagação do calor: radiação	0 min 40 s

Antes de apresentar teoricamente o conceito de capacidade térmica, seria adequado exibir para os alunos o vídeo “Capacidade térmica: grandeza extensiva”, empregando a metodologia descrita pelo professor. De maneira resumida, a estratégia sugerida para o uso dos experimentos apresentados no vídeo consiste na observação de um experimento filmado, seguida da possibilidade de realização de um registro. A próxima etapa é a formulação de uma pergunta aos alunos, com posterior elaboração de uma hipótese na tentativa de responder ao questionamento levantado.


Caso seja do seu interesse, há um material didático denominado *Guia de acompanhamento ao vídeo*, cujo *link* está indicado no artigo, que pode ser utilizado tanto no registro da observação como na identificação das grandezas físicas relevantes e suas inter-relações. Esse guia também inclui questões cujo objetivo é estimular os alunos a elaborarem hipóteses explicativas acerca do fenômeno observado. No artigo, há um exemplo desse tipo de guia de acompanhamento.

 **S21** O tratamento matemático das equações que representam as dependências entre grandezas físicas passa pela apresentação e discussão das relações entre essas grandezas, de maneira a valorizar a expressão matemática como uma forma de representar as variáveis relacionadas ao fenômeno, deixando de lado a simples memorização da fórmula. Buscamos mostrar as equações por meio das relações de proporcionalidade entre as grandezas físicas envolvidas.

Esse enfoque é utilizado no estabelecimento da equação fundamental da Calorimetria.

A proporcionalidade é o elemento principal a ser detectado e observado na obtenção dessa equação, que relaciona a quantidade de calor (Q) necessária para um corpo de massa (m) e de calor específico (c) variar sua temperatura (Δt). Assim, o texto do item “Equação fundamental da Calorimetria” deve ser acom-

panhado da discussão das situações mostradas nas figuras inseridas ao longo do item. Dessa maneira, os alunos poderão estabelecer relações entre as grandezas envolvidas na formalização dessa equação.


 **S22** A questão proposta a seguir visa levar o aluno a retomar a relação entre calor e energia mecânica. Se for conveniente, ela poderá ser respondida em duplas.

- Por que o leite aquece quando o misturamos com chocolate em pó?

Resposta

Ao agitar o leite, transferimos energia mecânica da colher para as moléculas de leite, que adquirem energia cinética. Conforme comprovado pelo experimento realizado por Joule, isso faz com que a temperatura do líquido varie.

Essa questão permite que o aluno retome o conceito de calor como forma de energia. Pode-se aproveitá-la para mostrar o salto que ocorre na passagem da abordagem do fenômeno em si para a formalização de um conceito. Nessa situação, pode-se estabelecer com a turma o equivalente mecânico do calor, descrevendo as etapas do experimento de Joule. Nessa etapa, esse desenvolvimento poderá ser mais formal.

 **S23** Pode-se dar início ao estudo do item “Mudanças de fase e calor latente” realizando um procedimento experimental para a elaboração da curva de aquecimento da água. Caso não seja possível realizar o experimento, os alunos poderão assistir ao vídeo “Mudanças de estado”: <https://www.youtube.com/watch?v=_RiE-gPFQb4>; acesso em: 11 abr. 2016, elaborado pelo professor Marcos Vinicius Pereira, da UFRJ. Em apenas dois minutos, os alunos poderão acompanhar a demonstração do aquecimento de uma massa de água, desde o estado sólido até o gasoso. A atividade experimental apresentada no vídeo substitui satisfatoriamente a realização do experimento em sala de aula e é útil para desenvolver a capacidade de observação e a de formulação de hipóteses. Além disso, ela também propicia o levantamento de questões. Após a apresentação, convide seus alunos a:

- discutir sobre a não variação da temperatura durante as mudanças de fase;
- redigir um texto com a síntese da observação realizada;
- esboçar a curva de aquecimento de uma massa de água do estado sólido ao gasoso.

Após a introdução do tema por meio de um procedimento experimental, proponha aos alunos algumas questões como incentivo à aprendizagem desse assunto. Para auxiliar o trabalho, sugerimos a leitura do texto “Como manter o gelo fora do congelador sem derreter por um longo período?”

Alguma substância, adicionada à água, dificulta o derretimento?”, disponível em: <<http://cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/revista-ch-2006/224/como-manter-o-gelo-fora-do-congelador-sem-derreter>>; acesso em: 11 abr. 2016. Sugerimos que os alunos realizem uma pesquisa para responder às questões propostas no título do texto enquanto estão estudando o item “Mudanças de fase e calor latente”. Enquanto isso, programe uma aula para apresentar as respostas e promover uma discussão sobre o assunto.



A maior parte da matéria que conhecemos no Universo está na forma de plasma. Apesar disso, de maneira geral, os alunos do Ensino Médio ainda sabem pouco sobre esse estado físico da matéria.

Como dissemos, a maior parte da matéria conhecida no Universo se encontra no quarto estado, o plasma. Um dos fenômenos mais estudados na Física envolvendo esse estado é o vento solar, plasma ejetado pelo Sol que interage com os planetas. Esse fenômeno é bastante comum, tanto que muitas vezes causa interferência nos meios de telecomunicações.

O site <www.ced.ufsc.br/men5185/trabalhos/A2005_outros/35_ventosolar/index.htm>; acesso em: 11 abr. 2016, traz informações sobre o fenômeno dos ventos solares. Os alunos podem acessar diretamente o conteúdo ali exposto ou apresentá-lo em classe, caso seja adequado ao plano de aulas.

Sugerimos que a leitura do texto a seguir sobre o quinto estado da matéria seja feita após a discussão com os alunos da seguinte questão: “Pode haver outros estados da matéria além dos quatro estudados ao longo do capítulo?”.

Outra pergunta que pode surgir, após a leitura do texto, diz respeito à aplicação desse tipo de descoberta. Convém mostrar aos estudantes que inúmeras descobertas científicas não tiveram aplicação imediata. Entre os muitos exemplos, pode-se citar a descoberta das ondas eletromagnéticas que posteriormente possibilitaram o surgimento da televisão, da transmissão via satélite, do celular, do forno de micro-ondas etc.

Sugestão de sites com textos relacionados a essa seção: <www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010160071030> e <www.ced.ufsc.br/men5185/trabalhos/15_quinto_estado_materia/condensado_bose.htm>; acessos em: 11 abr. 2016.

O quinto estado da matéria

Nesta unidade, vimos que geralmente podemos encontrar a matéria em quatro estados físicos – sólido, líquido, gasoso e plasma – e descrevemos as características de cada uma dessas fases.

Em 1995, cientistas produziram em laboratório um novo estado da matéria denominado condensado de Bose-Einstein ou BEC (do inglês Bose-Einstein Condensate), em homenagem aos físicos

Satyendra N. Bose e Albert Einstein, que previram teoricamente a existência desse quinto estado em 1925, ou seja, setenta anos antes de sua produção em aprisionador de átomos.

O condensado é obtido a partir do resfriamento de uma amostra de átomos de gás até temperaturas próximas do zero absoluto (em torno de 0,0000001 K).

Dessa maneira, a amostra caracteriza-se por ter um grau de energia extremamente baixo. Seus átomos, então, comportam-se e atuam como se fossem um único átomo gigante, que os pesquisadores denominaram “átomo artificial”.

Para facilitar a compreensão do que ocorre de diferente nesse estado físico, vamos imaginar um cubo de gelo. Nesse cubo, sabemos que as moléculas de água podem vibrar com certa liberdade. No entanto, suas posições são mais ou menos definidas, e, graças a essa característica, o sólido tem forma fixa. No quinto estado, ao atingir a configuração de condensado, os movimentos vibratórios individuais ficam restritos, como se as moléculas da amostra entrassem em certo sincronismo. No entanto, ainda existe movimento.

Esse estado, caracterizado por energia extremamente baixa, tem um efeito singular. Como os átomos já estão em estado de energia mínima, não conseguem diminuí-la nem sequer por atrito, uma forma comum de um sistema perder energia. Com isso, o condensado tem viscosidade nula, pois viscosidade é a resistência que um corpo oferece ao seu escoamento em razão do atrito entre as próprias partículas e as paredes do recipiente que o contém. A viscosidade nula do condensado permite que as forças de adesão entre seus átomos e o recipiente vençam a ação da força da gravidade. Dessa forma, o condensado consegue escorrer espontaneamente através das paredes para dentro ou para fora de um recipiente. Esse efeito é chamado de superfluidez. Se esse efeito ocorresse em temperatura ambiente, seria equivalente a colocar água em um copo em repouso sobre a mesa e de repente observar a água escorrendo para fora do copo, através das paredes, sem que ninguém o movimentasse.

Questões

1. De que maneira o condensado de Bose-Einstein é obtido e como seus átomos se comportam?
2. O que é o fenômeno da superfluidez?

Respostas

1. O condensado de Bose-Einstein é obtido a partir de uma amostra de gás que é resfriada à temperatura próxima do zero absoluto (em torno de 0,0000001 K). Nesse estado de energia tão baixa, os átomos do condensado comportam-se

como se fossem um único átomo gigante, chamado de “átomo artificial”.

2. Quando os átomos do gás atingem a configuração de condensado, sua energia é mínima, de maneira que não conseguem perder energia nem por atrito. Assim, o condensado tem viscosidade nula, ou seja, não existe atrito entre as partículas do condensado e o recipiente que o contém. Dessa forma, a força de adesão entre os átomos do condensado e o recipiente supera a força da gravidade, de modo que o condensado pode escorrer para fora do recipiente espontaneamente. Nessa resposta foram listadas todas as transformações envolvidas, mas é comum os alunos não considerarem a energia radiante; verifique se será ou não conveniente destacar esse tipo de energia nesse momento.



Para introduzir o estudo das trocas de calor, sugerimos um procedimento experimental simples: misturar duas

massas iguais de água a diferentes temperaturas iniciais. Divididos em grupos, os alunos devem ser orientados a medir os valores assumidos pela temperatura da mistura, ao longo do intervalo de tempo necessário para atingir o equilíbrio térmico. Por isso, convém que você realize o procedimento durante a preparação de aula, a fim de definir previamente valores de massa e tempo adequados para o experimento. Oriente os alunos a misturar massas diferentes de água a temperaturas iniciais não iguais, tampouco com valores muito próximos. É recomendável indicar valores máximos e mínimos de massas de água e temperaturas iniciais e deixar os alunos livres para escolher valores entre os intervalos sugeridos. O procedimento deve ser repetido, anotando-se os valores da temperatura final das misturas. Um representante de cada grupo deve anotar na lousa os valores de massas e temperaturas iniciais e finais obtidas, elaborando uma tabela. Dessa maneira, toda a turma poderá utilizar os dados de todos os grupos para levantar questões e elaborar hipóteses a respeito do fenômeno observado. Posteriormente, os alunos poderão aproveitar os valores obtidos para elaborar situações-problema. Isso pode ser proposto como atividade de avaliação e/ou finalização do estudo do capítulo.

Caso não seja possível realizar os procedimentos experimentais descritos, recomendamos novamente o uso do vídeo “Demonstrações sobre conceitos de Física térmica”, elaborado pelo professor Marcus Vinicius Pereira. Para o estudo deste capítulo, o vídeo indicado é “Trocas de Calor” (I e II), disponível em: <www.youtube.com.br/watch?v=h40IAb-PoSsk>; acesso em: 11 abr. 2016. Caso você decida usar o vídeo, sugerimos que os valores de massas e temperaturas ali observados possam ser utilizados pelos alunos como dados para a elaboração de situações-problema.



Recomendamos o objeto virtual de aprendizagem “A temperatura predileta do meu refrigerante”, disponível em:

<www.labvirt.fe.usp.br/simulacoes/fisica/sim_calor_refrigerante.htm>; acesso em: 11 abr. 2016. Nosso intuito, com isso, é motivar os alunos a trabalharem com o cálculo de quantidades de calor em processos de trocas de calor.



Estados de hipotermia geralmente são causados por imersão em água gelada ou por contato direto com tem-

peraturas muito baixas, como nas regiões onde neva durante o inverno. Nessa situação, se a pessoa não estiver adequadamente agasalhada, pode sofrer muito com o frio. Em casos extremos, a hipotermia pode levar à morte. Mas não é só a hipotermia que é prejudicial à saúde, a hipertermia também é. Praticamente todas as pessoas já tiveram febre alguma vez e sentiram algum mal-estar por causa da elevação da temperatura corporal. Se a temperatura do nosso corpo, que normalmente gira em torno de $36,5^{\circ}\text{C}$, se eleva, entramos em estado de hipertermia. Solicite aos alunos que relatem as características dos processos febris que vivenciaram. A seguir, peça que estimem a ordem de grandeza da quantidade de calor que uma pessoa trocaria com o meio ambiente em uma situação determinada, por exemplo, se estivesse com 40°C de febre e a temperatura externa fosse de 25°C . A turma pode efetuar alguns cálculos a partir desses dados estimando um valor de calor específico para o corpo humano; para isso, lembre-os de que cerca de 70% do corpo humano é formado por água.



Propomos que os alunos trabalhem com o objeto virtual de aprendizagem “Faça você mesmo seu experimento”,

disponível no endereço: <www.labvirt.fe.usp.br/simulacoes/fisica/sim_termo_calorimetro.htm>; acesso em: 11 abr. 2016, descrito a seguir: “Nesse objeto, a simulação se passa em um laboratório onde um professor pede a seu aluno que prepare vários experimentos sobre trocas de calor, utilizando corpos distintos, com massas diferentes. O objetivo dessa simulação é que o aluno perceba como as variáveis interferem no processo de trocas de calor até atingirem o equilíbrio térmico”. Com esse objeto, os alunos poderão realizar, em um contexto de experimentos virtuais, algumas das situações descritas no livro nas questões resolvidas ou propostas.

A ideia básica do objeto é elaborar misturas em um calorímetro com algumas quantidades de diferentes materiais com massas diversas. Estão disponíveis massas de alumínio, cobre, chumbo, prata e ferro. O aluno pode adicionar elementos ao calorímetro apenas usando o *mouse*. Quando ele arrasta uma massa para o calorímetro, automaticamente fica disponível o calor específico de cada um dos materiais. A partir daí, o aluno deve alterar as massas e as temperaturas de cada material utilizado.

Sugerimos uma situação a ser discutida: “Se escolhermos diferentes materiais e diferentes massas, porém mantendo a mesma temperatura para todos os materiais, qual será a temperatura final de equilíbrio?”. O aluno poderá utilizar a simulação para conferir se sua resposta está correta. Essa situação pode ser proposta como atividade de avaliação.



Observar a fusão do gelo é uma experiência que ilustra como alguns eventos do cotidiano do aluno, que passariam despercebidos por serem corriqueiros, podem ainda ser admirados. A Física é uma ciência que

está presente no dia a dia e, com esse experimento, os alunos podem ganhar motivação para estudá-la. Além disso, o experimento complementa o que foi discutido na unidade e possibilita que o aluno ganhe percepção e proximidade sobre o que acontece nos processos de mudança de estado dos corpos e também sobre as diferenças de densidade. Sugira que discutam uma maneira de observar o fenômeno de mudança de estado mais claramente. Depois, apresente-lhes o experimento e oriente-os a realizá-lo na sala de aula ou em casa. Ao fim, estimule um debate para discutir os principais aspectos do experimento e questioná-los sobre as questões indicadas.

UNIDADE 2

Gases e Termodinâmica



Abertura da unidade



A seguir, apresentamos o que se espera dos alunos ao final desta unidade e uma proposta para introdução dos conteúdos.

Objetivos:

Ao final desta unidade, o aluno deverá ser capaz de:

- Diferenciar as transformações gasosas e reconhecer as variáveis de estado de um gás que se alteram em cada uma dessas transformações.
- Aplicar a lei geral dos gases perfeitos e a equação de Clapeyron na resolução de situações-problema que envolvam transformações gasosas.
- Conhecer a aplicação do conceito de trabalho nos sistemas que contenham gases.
- Compreender a relação entre as grandezas calor, trabalho e energia interna como um princípio de conservação de energia.
- Identificar fenômenos irreversíveis e compreender a aplicação da 2ª lei da Termodinâmica a esse tipo de fenômeno.

A Termodinâmica pode ser uma parte motivadora do curso, pois engloba os conceitos essenciais em praticamente todas as áreas da Física. Além disso, fenômenos ligados ao estudo de sistemas termodinâmicos estão presentes em diversos âmbitos da vida cotidiana: da política energética dos países ao funcionamento das geladeiras, dos motores dos carros ao mistério do moto-perpétuo.

Parte da dificuldade relacionada às leis da Termodinâmica reside na necessidade de interpretar e

manipular as novas magnitudes, agora microscópicas, próprias de um sistema gasoso e, consequentemente, distintas das referentes a um sistema de corpos da mecânica newtoniana. Por isso, desde o início desta unidade, procuramos propor como modelo da matéria gasosa um sistema de partículas, associando o modelo microscópico com a fenomenologia descrita por meio de variáveis macroscópicas. Desse modo, julgamos que antes de iniciar o estudo dos gases, visto no Capítulo 6, você, professor, deve procurar conhecer os esquemas prévios dos alunos. Para isso, sugerimos uma atividade de simulação de um sistema de partículas, que visa esclarecer como os alunos estabelecem a relação entre temperatura e energia, e analisar o que pensam sobre o comportamento de variáveis termodinâmicas.

Para começo de conversa: *Se a energia se conserva, por que precisamos economizá-la?*

A questão visa dar início à discussão sobre o princípio da conservação de energia. Primeiro, pode-se questionar os alunos sobre as várias situações cotidianas em que eles são solicitados a economizar energia: em casa, na escola, nas vias públicas, nos meios de transporte etc. Em seguida, convém incentivá-los a refletir sobre se existe ou não coerência entre uma lei da Física que afirma o princípio de conservação e os pedidos de economia de energia. Além disso, pergunte a eles quais tipos de energia conhecem e quais são mais facilmente aproveitáveis. É recomendável não finalizar a discussão, pois a ideia com essa pergunta é introduzir o estudo da Termodinâmica.

Alguns alunos avaliam que o princípio da conservação da energia torna inesgotável a energia disponível para os sistemas físicos realizarem trabalho. O fato de esse princípio representar um dos pilares da Física torna o estudo e o entendimento dos modos de conversão de energia essenciais à compreensão de fenômenos do cotidiano. A questão se complica quando o aluno se dá conta de que, se o calor é uma forma de energia e se a energia sempre se conserva, o pedido de “economizar energia” pode ser interpretado como um chamamento à diminuição dos custos financeiros relativos à utilização dessa energia. Embora importante, esse aspecto da economia energética não pode ser considerado o principal, visto que é impossível aproveitar toda a energia térmica gerada a partir de processos de transformação de energia.

Você poderá minimizar esse obstáculo apresentando situações que confrontam algumas das concepções dos alunos sobre o assunto. O não aproveitamento integral da energia térmica, além de sua indisponibilidade para o reaproveitamento, fica evidente quando se observam os princípios de funcionamento das máquinas térmicas. Desse modo, pode-se iniciar o estudo da unidade abordando o assunto de maneira interdisciplinar com o professor de História. A Revolução Industrial na Inglaterra deve muito à modificação da máquina a vapor por James Watt, que tornou possível a produção de mercadorias em larga escala. A inserção de conceitos no contexto histórico e social no qual eles surgiram permite a realização de constantes paralelos entre o que será trabalhado no decorrer da unidade e o funcionamento de uma máquina. Além disso, reforça a ideia de que, na história da Ciência, a falta de compreensão de conceitos associados ao processo de obtenção de energia levou a incidentes e equívocos, mas também possibilitou melhorias e aperfeiçoamentos dos sistemas.

Nesse sentido, comente com a turma que a primeira máquina a vapor com propósitos produtivos foi a máquina de Newcomen. No século XVII, na Inglaterra, a infiltração de água nas minas profundas se tornou um sério problema econômico e tecnológico, ameaçando a prospecção de carvão e de cobre. A partir dessa ameaça, descobriu-se que o vapor podia ser usado como fonte de energia para bombear a água estagnada para fora da mina.



Para realizar essa atividade, é necessária uma caixa de base transparente (quase uma bandeja), em que se colocam algumas bolinhas de gude, representando as moléculas de um gás em movimento.

A caixa deve ser colocada sobre a base de um retroprojetor, de modo que, ao fazer movimentos bruscos nas paredes da caixa, você provoque o movimento das bolas, cujas sombras nítidas serão vistas por toda a turma. Deve-se fazer o possível para não perder a horizontalidade da caixa, não permitindo aglomeração

entre as bolas. Convém chamar a atenção dos alunos para o fato de que há uma distância considerável entre as bolinhas e que elas têm muita mobilidade, chocando-se contra as paredes da caixa.

Em seguida, com a caixa em repouso, pode-se propor a seguinte discussão:

Suponhamos que, de alguma maneira, possamos medir a temperatura da caixa.

- a) Se introduzirmos uma parede no meio da caixa, o que ocorre com as temperaturas de ambas as partes? E se a parede não estiver exatamente no meio?
- b) Se a temperatura da caixa aumentar de alguma forma, a quantidade de movimento do sistema vai variar? O que irá ocorrer com a energia cinética do sistema? E da partícula?
- c) A temperatura da caixa se altera se ela está em movimento? Depois dessa discussão, deve-se esclarecer que a caixa representa um sistema mecânico para o qual se pode definir uma energia obtida pela soma de todas as energias cinéticas das partículas. A partir daí, pode-se pedir aos alunos que reflitam sobre as mesmas questões, considerando agora a definição de energia interna da caixa apresentada. Provavelmente haverá diferenças nas respostas, que deverão ser discutidas.

Depois disso, em uma terceira etapa, introduza na caixa uma bolinha exatamente igual às outras, mas de cor diferente. Movendo a caixa de maneira bem rápida e irregular com o retroprojetor desligado, peça aos alunos que observem o movimento da bolinha diferente. “Como é seu movimento em comparação às outras?” Em seguida, ligue o retroprojetor. “É possível identificar a bolinha diferente?”

Adicionando uma bola de massa maior à caixa (pode ser uma bolinha de borracha), discuta com os alunos como é o movimento dessa bola em comparação com o das demais bolinhas. “O que ocorreria com o movimento das bolinhas se a temperatura da caixa aumentasse? E com a bola maior?”

Convite à reflexão

As leis que regem as relações entre trabalho, calor e outras formas de energia são tema central da Termodinâmica, um dos principais ramos da Física. Para introduzir o assunto, sugerimos propor aos alunos as questões a seguir:

- Por que alguns produtos comercializados em embalagens metálicas trazem a inscrição: “Não coloque esta embalagem no incinerador nem no fogo, mesmo depois de ter utilizado todo o produto?”
- Por que nem sempre temos facilidade para abrir a porta de um *freezer*?
- Por que o ar no interior de uma bomba de ar usada para encher bolas ou pneus de bicicleta se aquece durante o processo de calibração desses objetos?

- O que é um motor 16 V (16 válvulas)?
- Qual é a diferença entre carros com motor 1.0 e 2.0?

Os alunos devem responder às questões do “Convite à reflexão” a partir de suas ideias sobre os temas, sem se preocupar em formular respostas absolutamente corretas. Você pode pesquisar os conhecimentos prévios deles acerca desses temas, de modo a adquirir elementos para desestabilizá-los, se necessário. Essas questões devem servir para despertar a curiosidade a respeito dos conceitos que serão tratados nesta unidade e para mostrar que os conhecimentos de que os alunos dispõem nem sempre são suficientes para responder às questões propostas.

Um dos principais objetivos desta unidade é diferenciar as transformações gasosas e reconhecer as variáveis de estado de um gás que se alteram em cada uma dessas transformações, utilizando-as em situações-problema.

A primeira questão visa levar o estudante a perceber a existência de algum perigo ao se colocar esse tipo de embalagem no fogo ou em um incinerador. Sabemos que a pressão aumenta em função da elevação da temperatura, pois o volume da embalagem não varia consideravelmente no início desse processo de aquecimento. No entanto, com o aumento da pressão, a embalagem explode.

O objetivo da segunda questão é fazer com que os alunos atribuam a dificuldade de abrir a porta ao resfriamento do ar contido no *freezer*. Convém perguntar se apenas o resfriamento dificultaria a abertura do compartimento do refrigerador. A percepção da relação entre a redução da temperatura e a consequente diminuição da pressão no interior do *freezer* geralmente não é imediata para os alunos. Por isso, essa questão pode e deve ser retomada após o estudo dos gases (Capítulo 6).

A terceira questão tem a intenção de estimular o aluno a refletir sobre algo presente em seu mundo vivencial e que talvez não tenha chamado a sua atenção. Caso uma bomba de ar esteja disponível na escola, seria interessante levá-la para a sala de aula e fazer uma breve demonstração. É importante incentivar os alunos a pensar sobre essa questão a partir da demonstração realizada.

Entre as transformações que serão estudadas ao longo desta unidade, as adiabáticas são as menos conhecidas dos alunos.

A quarta questão incentiva o aluno a refletir sobre algo de que talvez não tenha se dado conta. Um motor com 16 válvulas tem maior eficiência de queima de combustível que o de 8 válvulas. As válvulas controlam a entrada e a saída de gases no motor: metade regula a entrada de combustível e de ar, enquanto a outra metade controla a saída dos gases após a combustão. “Quanto mais ar e combustível no interior do motor, mais intensa é a explosão e mais energia é liberada. Resultado: mais potência”, afirma José Roberto Augus-

to de Campos, chefe da divisão de motores e veículos do Instituto Mauá de Tecnologia, de São Caetano do Sul, São Paulo. Mas, atenção, o dobro de válvulas de um veículo em relação a outro com as mesmas características não implica o dobro de potência.

A formulação de hipóteses que respondam à última questão deve ser estimulada por um constante retorno a essa pergunta. Dessa maneira, a construção coletiva de uma resposta também pode ser elaborada durante a sequência de aulas destinada ao estudo dos gases e da Termodinâmica. Para começar, pode-se sugerir aos alunos que pesquisem a diferença de potência e de cilindradas entre esses dois tipos de motor. As indicações de motores 1.0 e 2.0 relacionam-se com a potência mecânica do veículo. Os motores 1.0 têm menor desempenho que os motores 2.0, cuja potência é maior. Este *Suplemento* e o próprio livro do aluno fornecem elementos mais precisos sobre isso.

CAPÍTULO 6

Estudo dos gases e a equação de um gás ideal

ou: Por que não é aconselhável calibrar os pneus após percorrer grandes distâncias?

1 Habilidades a serem desenvolvidas

- Identificar as características da matéria do estado gasoso (modelo de gás perfeito) e reconhecer as grandezas físicas: pressão, volume e temperatura como variáveis que representam o estado de um gás em determinado instante.
- Diferenciar as transformações gasosas e reconhecer as variáveis de estado de um gás que se alteram em cada uma dessas transformações em situações-problema.
- Compreender, interpretar e utilizar diagramas e gráficos que representem transformações gasosas por meio das relações entre as variáveis de estado de um gás.
- Representar, por meio de gráficos cartesianos, as diferentes transformações gasosas.
- Compreender o estabelecimento da equação de um gás ideal, ou equação de Clapeyron, como generalização de leis de transformações gasosas obtidas a partir de resultados experimentais.
- Aplicar a equação de estado de um gás perfeito ou equação de Clapeyron na resolução de situações-problema que envolvam transformações gasosas.

O Capítulo 6 trata do estudo dos gases a partir de suas características associadas a um sistema de partículas que altera seu comportamento devido às variáveis de estado: temperatura, pressão e volume.

Convém discutir com os alunos as características microscópicas do modelo de um gás, bem como as relações entre as variáveis de estado em cada uma das transformações gasosas, de modo que eles possam compreender melhor os fenômenos físicos que envolvem as alterações de estado das massas gasosas. É sempre recomendável apresentar os fenômenos de maneira contextualizada.

Ajude os alunos a perceberem a relevância do método experimental para estabelecer as leis que regem o comportamento dos gases em suas transformações. Optamos por apresentar, ainda que sucintamente, os procedimentos experimentais para a obtenção das leis de Boyle, de Charles e de Gay-Lussac, respeitando o processo histórico que levou a elas. A equação de Clapeyron ou equação de estado de um gás ideal é estabelecida a partir das leis que a antecederam, o que reitera a importância do método experimental no estudo das transformações gasosas.

Esperamos que, ao trabalhar com as equações que representam as leis dos gases, não se percam de vista:

- a análise do caráter microscópico dos gases envolvidos nas situações-problema;
- as relações entre as variáveis de estado de um gás nos fenômenos estudados.

O capítulo é encerrado com o estudo da lei dos gases ideais (ou perfeitos). Convém discutir com a turma se é possível utilizar as equações estudadas ao longo do capítulo para os gases reais.

2 Sobre a questão introdutória



A questão introdutória do capítulo deve ser aproveitada para atingir os objetivos a que ele se propõe, apresentados na parte geral deste *Suplemento*.

A pergunta introdutória de cada capítulo tem por objetivo problematizar o assunto nele tratado, relacionando o conhecimento prévio do aluno com os conceitos e temas ali desenvolvidos.

Assim, cabe pedir a alguns alunos que leiam em voz alta as respostas que julgam prováveis para a questão. Elabore uma lista com algumas dessas respostas ou reúna várias delas para analisá-las e discuti-las com a classe ao final do capítulo. Desse modo, os estudantes poderão reconhecer mais claramente nos novos conhecimentos aprendidos os elementos essenciais para responder com mais propriedade à pergunta inicial.

Quando a questão introdutória for reapresentada na seção “Já sabe responder?”, deve-se pedir aos alunos que a respondam por escrito. Depois, reunidos em pequenos grupos (3 a 4 alunos), eles poderão comparar as respostas dadas nas duas ocasiões. Você poderá contribuir com essas comparações utilizando as respostas recolhidas na introdução do capítulo. Por fim,

solicite aos alunos que elaborem uma resposta final única, construída a partir da troca de ideias entre os componentes do grupo.

3 Orientações para o trabalho dos conteúdos



Nossa abordagem para o estabelecimento das leis relativas às transformações gasosas e às leis gerais dos gases fundamenta-se no caráter experimental e no desenvolvimento cronológico de tais leis. Quanto ao tratamento matemático dado a essas equações, representativas das dependências entre as variáveis de estado de um gás, optamos por apresentar e discutir, em cada uma das transformações estudadas, as relações entre essas variáveis. Dessa maneira, buscamos valorizar as expressões matemáticas como modos de representação dos fenômenos e não apenas como simples objetos de memorização. Como no estabelecimento de outras leis ao longo de outras unidades, procuramos mostrar as equações por meio das relações de proporcionalidade entre as grandezas físicas envolvidas.

Antes da apresentação teórica das transformações gasosas e das expressões matemáticas que sintetizam as relações entre as variáveis de estado, temperatura, pressão e volume desses fenômenos físicos, é recomendável que os alunos acessem o objeto de aprendizagem “Usina: Leis dos gases”, disponível no site da Rived (Rede Interativa Virtual de Educação): <<http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/handle/mec/820>>; acesso em: 29 fev. 2016. Passando por todos os itens disponibilizados no objeto de aprendizagem, como: “Produzir álcool”, “Tampar a chaminé”, “Variar a temperatura” e “A química e a fumaça”, os alunos podem vir a perceber as relações que se estabelecem entre temperatura, pressão, volume e o número de mols (a quantidade de matéria) de um gás.

A introdução do *Guia do professor* (<<http://rived.mec.gov.br/sistema/upload/guia/181.pdf>>; acesso em: 29 fev. 2016) apresenta questões, que podem ser propostas aos alunos, e é uma interessante ferramenta para o entendimento das leis gerais dos gases, como salientado na conclusão: “garantindo uma aprendizagem significativa, o aluno construirá o conhecimento através de situações manipuladas por ele mesmo, o que permite uma maior fixação do conteúdo aprendido”.

No endereço <<https://www.youtube.com/watch?v=RSKKNV6xUfs>>; acesso em: 11 maio 2016, há outro objeto virtual que simula as transformações isobáricas, isovolumétricas (isocóricas) e isotérmicas. Esse objeto pode ser indicado como atividade complementar após o estudo dos gases.

Os alunos poderão realizar as simulações introduzindo condições iniciais distintas para cada uma das transformações gasosas estudadas, ou observando

as variações apresentadas. Convém incentivá-los a observar atentamente as representações esquemáticas, bem como a análise sobre o que ocorre com o fluxo de calor e a respectiva representação gráfica.



A questão proposta a seguir visa estimular o aluno a refletir sobre a possibilidade de voo de um balão de ar quente. Ela também poderá ser resolvida em duplas, caso considere conveniente.

- Como um balão de ar quente consegue voar?

Resposta

Inicialmente, o envelope que constitui o balão está praticamente vazio e contém ar frio. Quando o ar (gás) contido no balão é aquecido por um maçarico, ele se expande. Como o envelope do balão possui uma abertura na parte inferior, uma parcela de ar quente escapa. O balão aumenta de volume e simultaneamente vai se tornando menos pesado à medida que o ar aquecido escapa pela abertura do envelope. Ou seja, o ar no interior do balão vai se tornando menos denso que o ar exterior. Podemos considerar a transformação gasosa como isobárica, pois o balão está sujeito apenas à pressão atmosférica.

Essa pressão exerce sobre o balão um empuxo que aumenta à medida que aumenta o volume de ar deslocado. Quando o empuxo se torna maior que o peso do balão, ele tende a subir. Essa questão está relacionada a uma pergunta apresentada na Unidade 1 deste *Suplemento*:

- É possível voar aproveitando a diferença de temperatura do ar?

Resposta

A chama aquece o ar na parte interna de um balão. Essa massa de ar sobe, se resfria, retorna para baixo, se aquece, torna-se menos densa e tende a subir novamente. Esse movimento da massa de ar caracteriza as correntes de convecção.

A temperatura do ar no interior do balão é maior que a temperatura externa. A mistura de gases no interior do balão é menos densa que o ar externo, devido ao aquecimento sofrido pela massa de ar interna do balão. Assim, a diferença de temperatura possibilita que o balão suba e, dessa maneira, as pessoas possam “voar”.

Chamamos a atenção para os diferentes enfoques das perguntas e das respectivas respostas. Para o estudo desenvolvido nesta unidade, esperamos que o aluno discuta o voo do balão a partir do comportamento do gás que está no envelope que constitui esse meio de transporte, ao passo que, na Unidade 1, esperava-se uma discussão centrada na propagação de calor, mais especificamente na convecção. Convém mostrar aos alunos as diferentes possibilidades de análise de um mesmo fenômeno a partir de âmbitos de conhecimento diversos.

ou: *Por que o desodorante aerossol parece frio em contato com a pele?*

1 Habilidades a serem desenvolvidas

- Reconhecer a aplicação do conceito de trabalho nos sistemas que contenham gases.
- Compreender a relação entre as grandezas calor, trabalho e variação de energia interna como um princípio da conservação da energia.
- Aplicar a 1ª lei da Termodinâmica às diferentes transformações gasosas.
- Compreender a 1ª lei da Termodinâmica como uma expressão do princípio da conservação de energia.

2 Sobre a questão introdutória



Não é difícil constatar que a superfície do frasco contendo líquidos em aerossol se torna quase gelada quando acionamos a válvula durante um tempo prolongado. Sugira aos alunos que façam esse experimento como tarefa de casa antes do início do capítulo (lembrando sempre que jamais devem danificar ou tentar furar o frasco). Em aula, peça-lhes que tentem imaginar o que há no interior do frasco de um aerossol:

- É um líquido ou um gás?
- Ao sair pela válvula, a substância sofre uma expansão ou uma compressão?
- Se a temperatura do material que restou no frasco cai, o que acontece com sua energia?

Sugerimos, a seguir, a leitura do texto “O que é aerossol”, disponível em: <http://mundoestranho.abril.com.br/ciencia/pergunta_286527.shtml>; acesso em: 29 fev. 2016.

A questão problematizadora do início do capítulo, reapresentada na seção “Já sabe responder?”, deve ser respondida preferencialmente por escrito. No caso dos aerossóis, nesse momento da unidade, o aluno deve ter conhecimento suficiente para tratar o assunto utilizando a nomenclatura e a simbologia matemática associadas à transformação adiabática. Sugerimos que os alunos, em grupo, comparem as respostas dadas nas duas ocasiões. Você poderá pedir que produzam uma resposta final única, construída a partir da troca de ideias entre os elementos do grupo.

3 Orientações para o trabalho dos conteúdos



O texto a seguir pode ser copiado e distribuído aos grupos ou ser lido em sala de aula para introduzir o estudo sobre a 1ª lei da Termodinâmica.

Os segredos que o frio esconde

A 1ª lei da Termodinâmica expressa o princípio da conservação da energia. Trata-se da ideia de que podemos transferir energia para um corpo apenas a partir da realização de um trabalho ou por troca de calor. Pode-se trabalhar com os alunos a seguinte constatação: ao levantar um copo de vidro à altura de um metro, realizamos um trabalho para que isso aconteça. A força peso, que atrai todos os corpos, é contrária a esse tipo de movimento e, por isso, quando levantamos o objeto, sabemos que ele acumula energia potencial gravitacional.

Quando soltamos o copo, ele entra em movimento em direção ao chão (em virtude do campo gravitacional que o atrai) e vai transformando a energia potencial gravitacional em energia cinética (energia de movimento). Ao bater no chão, o copo sofre uma parada brusca e a energia cinética se dissipa na forma de calor e som, quebrando as ligações das moléculas que o compõem, transformando-o em muitos cacos de vidro.

Entretanto, em uma queima de combustível, como a que ocorre em um automóvel ou mesmo em nosso corpo, a energia química, presente nas ligações moleculares, transforma-se em calor. No caso dos automóveis, o combustível reage com o ar, liberando calor e expandindo os gases que empurram um pistão no interior dos cilindros do motor, proporcionando o movimento de eixos que fazem o carro se mover.

No corpo humano, a “queima” acontece no interior das células. O “motor” celular principal é a mitocôndria, uma organela que extrai energia sobretudo da glicose (contida nos alimentos que comemos), transformando-a em moléculas de ATP (trifosfato de adenosina), utilizadas para liberar a energia química em nosso organismo.

Entretanto, embora a energia sempre se conserve nos processos físicos, químicos e biológicos, há sempre uma fração perdida na forma de calor que não é aproveitada, ou seja, apenas uma parte dessa energia pode transformar-se em trabalho útil. Nos automóveis, cerca de dois terços da energia liberada da queima de combustível é perdida na forma de calor. No caso do nosso corpo, que é muito mais eficiente, o rendimento é superior a 60%. Por esse motivo, o motor do automóvel funde se não for refrigerado adequadamente e nosso organismo entra em colapso caso não consiga controlar sua temperatura.

Adaptado de: OLIVEIRA, A. de. “Os segredos que o frio esconde”. *Ciência Hoje on-line*, 16 maio 2008. Disponível em: <<http://cienciahoje.uol.com.br/colunas/fisica-sem-misterio/os-segredos-que-o-frio-esconde/>>. Acesso em: 29 fev. 2016.

Pergunte aos alunos como concebem energia, trabalho e calor. Para tanto, seria interessante pedir que preencham o quadro a seguir, analisando se as afirmativas relacionadas a cada uma das grandezas são verdadeiras ou falsas. Abaixo das afirmativas, apresentamos as respostas.

Energia	Trabalho	Calor
Transforma-se V	É uma maneira de o sistema trocar energia V	É uma maneira de o sistema transferir energia V
Está relacionada com a capacidade de realização de trabalho V	É uma forma de energia F	É uma forma de energia calorífica F (A forma de energia é chamada térmica e não calorífica como incorretamente alguns manuais propõem)
Está relacionada com os processos de mudança de estado V	Sua magnitude é expressa nas mesmas unidades que a energia V	Sua magnitude é expressa nas mesmas unidades que a energia V
É uma função de estado V	É uma função de estado F (Convém explicar aos alunos que função de estado é a dependência da pressão, do volume ou da temperatura do corpo ou do gás)	É uma função de estado F
A quantidade de energia no Universo é constante V	A quantidade de trabalho do Universo é constante F	A quantidade de calor do Universo é constante F



O texto a seguir possibilita uma discussão sobre as transformações gasosas que ocorrem nas embalagens dos aerossóis. O texto pode ser distribuído para os alunos e, depois que eles responderem à questão proposta, incentive-os a debater o assunto.

Aerossol: uma tecnologia impulsiva?

No início da década de 1930, o engenheiro norueguês Eric Rotheim patenteou o projeto da lata de aerossol. Em seu trabalho, o inventor estabeleceu os principais elementos componentes das latas de aerossóis encontradas até os dias atuais. A princípio, o invento não teve grande repercussão. Como um produto, foi utilizado nos aerossóis contendo inseticida usados pelos soldados americanos na Segunda Guerra Mundial. Terminada a guerra, várias indústrias passaram a adaptar a tecnologia dos aerossóis para uma grande diversidade de usos. Em nossos dias, encontramos de medicamentos a cosméticos, de desodorantes a produtos de cozinha contidos em latas de aerossol.

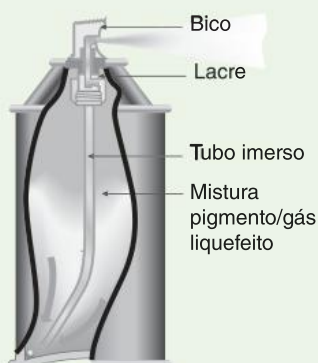
Interior de uma lata de aerossol de gás comprimido



Pressione o bico para pulverizar

Esquema representando corte longitudinal do interior de um sistema aerossol contendo gás a alta pressão.

Interior de uma lata de aerossol de gás liquefeito



Qual é o princípio de funcionamento das latas de aerossol? De maneira simplificada, aerossóis são misturas de dois fluidos em que um deles, denominado propelente, é armazenado sob alta pressão com o objetivo de impulsionar o outro, chamado de produto, para sair de uma lata de metal lacrada.

Para criar um sistema aerossol, pode-se derramar um produto líquido, por exemplo, um desodorante, dentro de uma lata. Lacra-se esse recipiente e, em seguida, bombeia-se um gás, o propelente, sob alta pressão. Esse gás comprime intensamente o desodorante.

No sistema aerossol contendo gás comprimido a alta pressão, em geral, existe um tubo ligando a válvula situada na parte superior ao fundo do recipiente. A válvula é um dispositivo que contém um pino entre seus componentes. Ao abaixarmos o pino, abre-se um canal de ligação entre o exterior e o interior do recipiente. Como a pressão exterior é muito menor que a pressão interior, o produto é impulsionado até a parte superior do recipiente para sair da lata.

Outra maneira de constituir um sistema aerossol se dá por meio do uso de um gás liquefeito como

propelente, ou seja, o fluido toma a forma de um líquido ao ser pressionado intensamente. O produto é derramado dentro do recipiente. Lacra-se a lata e, a seguir, bombeia-se o propelente sob alta pressão. Quando o pino é pressionado, reduz-se instantaneamente a pressão sobre o propelente. Sob pressão de baixa intensidade, o gás liquefeito começa a ferver e, nesse processo, partículas são liberadas. Por sua vez, essas partículas formam uma camada de gás que se concentra na parte superior do tubo. Tal camada de gás pressurizado empurra tanto o propelente quanto o produto para saírem do recipiente.

Questões

- Dentro da embalagem de alguns aerossóis há apenas substâncias no estado líquido, mas quando a válvula é acionada, podemos perceber que um gás é ejetado. Como você explica esse fenômeno?

Resposta

Os líquidos contidos em alguns tipos de aerossóis são, na verdade, gases liquefeitos mantidos na embalagem sob alta pressão. Quando a válvula é acionada, a rápida diminuição da pressão faz com que o líquido sofra rápida expansão e se transforme no gás que é ejetado pela válvula.

CAPÍTULO 8

2ª lei da Termodinâmica

ou: Por que geladeiras transmitem calor para o ambiente?

1 Habilidades a serem desenvolvidas

- Compreender, interpretar e utilizar diagramas e gráficos que representem transformações gasosas cíclicas.
- Identificar o caráter de irreversibilidade de fenômenos e compreender a aplicação da 2ª lei da Termodinâmica a essas situações físicas.
- Diferenciar máquinas térmicas de combustão interna e externa.
- Identificar as máquinas térmicas presentes no mundo vivencial.
- Aplicar a 2ª lei da Termodinâmica ao funcionamento de motores que equipam veículos, ônibus, aviões etc.
- Diferenciar motores de cilindradas diversas, multiválvulas, bicombustíveis, diesel etc.

Sabemos que as leis da Termodinâmica tiveram origem na invenção e no aperfeiçoamento das chama-

das máquinas térmicas. Ao contrário de um número expressivo de leis físicas originadas de teorias prévias ou de postulados científicos, as teorias que relacionam calor e trabalho, presentes na Termodinâmica, foram sistematizadas a partir do conhecimento adquirido no desenvolvimento das máquinas térmicas. Ainda que atualmente nos reconheçamos parte de uma sociedade essencialmente industrializada, os alunos não costumam atribuir o funcionamento dos motores de aviões, carros, geladeiras, lanchas, motocicletas, ônibus, trens etc. às transformações energéticas que ocorrem em uma máquina térmica. Além disso, eles geralmente não percebem que o trabalho realizado pelo gás nesse tipo de motor pode ser calculado de maneira idêntica à do capítulo anterior.

Em vista disso, especialmente neste capítulo, convém acompanhar as leituras dos textos da seção “Para saber mais”, que podem contribuir para a diminuição da distância entre o mundo da sala de aula e o mundo real.

Falar de máquinas térmicas quase sempre constitui um desafio para o professor. Em geral, não possuímos os conhecimentos sobre o modo operacional dos automóveis e, ao nos aventurar por esse caminho, podemos nos deparar com perguntas dos alunos que eventualmente não sabemos responder. Raros são os cursos de graduação em Física que nos oferecem subsídios para compreender, ainda que superficialmente, a diferença entre motores de dois e quatro tempos, entre automóveis com motores 1.0 e 2.0 ou mesmo entre motores a gasolina e a *diesel*. Pensando nisso, incluímos neste *Suplemento* alguns textos que podem complementar tanto as informações que você já possui como as fornecidas no livro do aluno. Nossa intenção é, por meio de um assunto envolvente, desenvolver o curso com mais qualidade, garantindo uma aprendizagem dinâmica e interativa.

2 Sobre a questão introdutória



É provável que alguns alunos se recordem do calor proveniente da parte traseira da geladeira. Talvez alguns deles já tenham cometido a impropriedade de colocar uma roupa ou um tênis na grade que protege o compressor da geladeira para secá-los mais rapidamente. A ideia da questão, portanto, não é de todo estranha. Convém encaminhar a reflexão para o fato de que geladeiras não têm essa finalidade. Assim, se no seu interior, os alimentos continuam sendo resfriados, por que ela envia calor para o exterior? Pode-se recolher os textos com a resposta dos alunos a essa pergunta e devolvê-los ao final do capítulo.

Eles devem voltar a respondê-la, de preferência por escrito, no fim do capítulo. Sugerimos que, reunidos em grupos pequenos, comparem as respostas dadas nas duas ocasiões e produzam uma resposta final única, construída a partir da troca de ideias entre os elementos do grupo.

3 Orientações para o trabalho dos conteúdos



É recomendável enfatizar a diferença entre uma máquina térmica de combustão externa, como a máquina a vapor, e os motores de combustão interna, como os que equipam automóveis, aviões, motos etc. Para isso, sugerimos a consulta a alguns sites que trazem informações sobre máquinas e locomotivas a vapor, disponíveis em: <<http://goo.gl/KE1GbN>>; <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/motor-a-vapor1.htm>>; acesso em: 30 abr. 2016. A consulta pode ser feita com a turma no laboratório de informática da escola, se houver possibilidade. Pode-se também propor aos alunos a construção de uma máquina térmica seguindo as explicações disponíveis no endereço <<http://goo.gl/tDzYM>>; acesso em: 30 abr. 2016.

O site traz um experimento bastante simples e interessante chamado “Máquina térmica”, de Sérgio Damélio. O material e os passos para a montagem são ilustrados com uma sequência de fotos. Sabemos que a Física é uma ciência baseada em observações de fenômenos. Por isso, convém pedir aos alunos que descrevam cuidadosamente o fenômeno observado, relacionando-o aos conceitos estudados no capítulo.

A demonstração de experiências em sala de aula deve ser feita sempre que possível, pois traz ganhos pedagógicos expressivos.



A exploração do tema Revolução Industrial é bastante propícia à interdisciplinaridade por se tratar de momento paradigmático da História ocidental. O professor de História poderá acompanhar as discussões sobre o tema com os alunos, abordando os acontecimentos históricos decorrentes das transformações que a introdução das máquinas térmicas na indústria impuseram às relações de trabalho, fato que também provocou profundas mudanças sociais e culturais. Para obter informações sobre a Revolução Industrial consulte: <<http://goo.gl/64Q3Vg>>; <<http://goo.gl/8wNNy2>>; acessos em: 30 abr. 2016.



No estudo da Termodinâmica, podemos encontrar certa dificuldade na proposição de investigações experimentais. Por isso, simulações e filmes didáticos ajudam a transpor para situações concretas os conceitos estudados na unidade. Recomendamos que, durante a demonstração, tanto em filme quanto em animações, você interaja com a turma, perguntando sobre os princípios e as leis físicas aplicados nas situações, refletindo sobre o que ocorre quando são alterados determinados parâmetros, ajudando os alunos a extrair informações relevantes e a formular conclusões sobre o assunto que está sendo exposto, construindo diagramas etc.

No endereço <<https://www.youtube.com/watch?v=1KGEBToFlvY>>; acesso em: 30 abr. 2016, é possível encontrar uma animação do motor de quatro tempos (ciclo de Otto), típico dos automóveis movidos a álcool ou gasolina.

Costuma haver dificuldade em associar o gráfico representando um ciclo do motor de quatro tempos e a movimentação do pistão. No endereço <www.if.ufrgs.br/cref/ntef/simulacoes/termodinamica/motor.html>; acesso em: 29 fev. 2016, as transformações térmicas sofridas pelo gás dentro do cilindro do motor são expressas em um gráfico $p \times V$ e relacionadas às etapas de funcionamento de um motor, em tempo real.

Para ajudar os alunos a visualizar como funcionam, em conjunto, todos os cilindros de um motor de Otto, sugerimos que vejam o vídeo indicado nos endereços a seguir em que uma animação sofisticada, em três dimensões, apresenta o movimento do pistão, bem como o movimento das válvulas: <<http://www.youtube.com/watch?v=r8ZZTei3IRQ&NR=1>> ou <<http://www.youtube.com/watch?v=UA9H2WLV9MO>>; acessos em: 29 fev. 2016.



S13 Sabemos como é difícil representar e assimilar as etapas do ciclo de Carnot; por isso, sugerimos consultar os textos e simulações destes endereços <<http://goo.gl/NQ9XPU>>; <<http://goo.gl/4hx0yc>>, acessos em: 30 abr. 2016, que podem ser esclarecedores para os alunos. Convém estimular a discussão sobre as características específicas das transformações presentes no ciclo de Carnot, como a possibilidade de, na expansão isotérmica, haver conversão integral de calor em trabalho e sobre a ausência de calor nas transformações adiabáticas, nas quais ocorrem as mudanças de temperatura do fluido.



S14 Para complementar o texto da seção “Para saber mais – Conexões com o cotidiano”, recomendamos a leitura do texto a seguir, que trata da injeção eletrônica de automóveis.

Os motores dos veículos automotivos mudaram bastante desde a invenção do automóvel. Há décadas, era comum deixar o motor aquecendo antes de sair com o veículo. Isso acontecia porque num veículo com carburador, o ar frio atrapalha a vaporização e reduz a entrada de combustível na mistura. “Aí o motor perde potência e engasga”, explica o engenheiro mecânico Francisco Nigro, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), em São Paulo. A situação melhora depois de alguns minutos, quando o motor esquenta e o ar entra no carburador. Com a injeção eletrônica, esse problema não ocorre, pois esse recurso regula a mistura automaticamente mesmo quando o ar está frio. Além disso, o controle da quantidade e da proporção da mistura ar-combustível é feito eletronicamente por meio de um *chip*. Nos motores que usam carburador, há um equilíbrio mecânico dessa entrada, por meio de um parafuso de regulação. Com o

motor funcionando na marcha lenta, gira-se bem devagar o parafuso (“da mistura”) no sentido horário (apertando) até que o motor comece a balançar. Desse ponto, segundo os mecânicos, é só voltar cerca de 1/4 de volta ou até que a marcha lenta se estabilize. Quando paramos num semáforo e percebemos o motorista ao lado “tremendo como geleia” dentro do carro, sabemos que a mistura combustível-ar está mais rica ou muito pobre, deixando o motor com a marcha lenta irregular (o que pode provocar quebras de elementos do motor e do câmbio) o sistema de injeção eletrônica equipa todos os carros de passeio que saem de fábrica no Brasil. Os carburadores ainda são usados em motos, *buggys* e veículos *off-road*.



S15 Recomendamos a leitura deste texto para a turma, pois, muitas vezes, a solução de um problema do cotidiano leva a um invento que se mostra muito útil, caso das geladeiras.

As primeiras geladeiras domésticas surgiram nos Estados Unidos, em 1850. Elas nada mais eram do que um armário de madeira forrado de ardósia por dentro. No inverno, os blocos de gelo eram cortados dos rios e lagos congelados e armazenados nessas geladeiras. Uma das grandes contribuições à invenção da geladeira tal como a conhecemos hoje veio do americano John Gorrie, devotado médico que passou boa parte da vida interessado em melhorar as condições dos doentes, na maioria marinheiros sofrendo de febre amarela. Esses pacientes eram tratados em seu hospital em uma cidade portuária conhecida por seu clima extremamente quente e úmido. A partir de 1838, ele teve a ideia de pendurar sacos de gelo nas salas do hospital, para tornar mais ameno o ar que seus pacientes respiravam. O difícil era conseguir gelo em quantidade suficiente. Diante disso, em 1850, Gorrie resolveu pôr em prática seus conhecimentos de Física: construiu uma máquina a vapor que movia um pistão dentro de um cilindro. Em volta do sistema havia um recipiente com água salgada, que congela a uma temperatura mais baixa que a água pura.



S16 Não deixe de ler o artigo “Proposta de atividade para abordagem do conceito de entropia”, dos professores Marco Aurélio Alvarenga Monteiro, José Silvério Edmundo Germano, Isabel Cristina de Castro Monteiro e Alberto Gaspar publicado no *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 26, n. 2, ago. de 2009, p. 367-378. Nele os autores discorrem sobre o conceito de entropia de maneira esclarecedora, além de sugerirem uma atividade de fácil realização em sala de aula, para auxiliar a compreensão do aluno sobre esse tema.

O artigo: “Proposta de atividade para abordagem do conceito de entropia” está disponível em: <<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/9816/10889>>; acesso em: 29 fev. 2016.



O conceito de entropia englobado na 2ª lei da Termodinâmica é uma das mais complexas ideias da Física. O experimento da desordem dos feijões busca simular macroscopicamente o comportamento de um gás em um recipiente. Com isso, espera-se que os alunos tirem conclusões sobre a 2ª lei da Termodinâmica ao observar o comportamento dos feijões, análogo ao que os cientistas obtiveram no experimento dos

gases. É uma forma de, além de tornar a entropia mais palpável, aproximar os estudantes do mundo microscópico. Para abordar o experimento dos feijões, questione os alunos sobre os temas do cotidiano relacionados à entropia, assim como já foi feito ao longo da unidade. Solicite exemplos que eles conheçam de processos de aumento da desordem no cotidiano, em que há necessidade de gastar energia para manter sistemas organizados. Sugerimos que realize o experimento em sala de aula, para que o aluno seja orientado em caso de dúvidas e que, após sua realização, seja proposto um debate a partir das questões relacionadas pelos estudantes.

UNIDADE 3

Princípios da Óptica geométrica e reflexão da luz



Abertura da unidade



A seguir, apresentamos o que se espera dos alunos ao final desta unidade e uma proposta para introdução dos conteúdos.

Objetivos:

Ao final desta unidade, o aluno deverá ser capaz de:

- Relacionar os princípios da Óptica geométrica a fenômenos simples associados à reflexão da luz e da visão.
- Definir as leis da reflexão aplicando-as à formação de imagens em espelhos planos e esféricos.
- Determinar a natureza das imagens geradas por espelhos planos e esféricos, relacionando-as a fatores como distância do objeto ao espelho, foco e centro da curvatura no caso dos espelhos esféricos.
- Estabelecer os principais elementos geométricos que compõem os espelhos esféricos e suas relações.
- Resolver problemas envolvendo a construção de imagens em espelhos planos e esféricos.

A Unidade 3 inicia os alunos na investigação do ramo da Física que trata do estudo da luz e dos fenômenos luminosos.

O interesse pelos fenômenos ópticos e suas aplicações remonta à Antiguidade. As origens da tecnologia óptica situam-se em épocas remotas, com o surgimento

dos primeiros espelhos feitos de cobre polido, bronze e, mais tarde, de espéculo (do latim *speculum*, significando espelho), uma liga de cobre rica em estanho.

As artes, como a pintura e a literatura, revelam muito do encantamento que os fenômenos ligados à reflexão da luz sempre suscitaram nas pessoas.

Muitos dos estudos da Óptica surgiram das necessidades dos artistas que pretendiam retratar o mundo utilizando a perspectiva e a combinação criteriosa de luzes e cores. No decorrer dos capítulos, procuramos apresentar uma parte das articulações entre os fenômenos ópticos e algumas manifestações artísticas importantes. Sugerimos um trabalho conjunto com os professores de Literatura e de Arte para tratar desses contextos comuns às duas disciplinas.

A partir do século XVII, a Óptica passa a apresentar um caráter mais vinculado ao saber científico com base nas teorias desenvolvidas por Newton, Huygens, Young etc. Graças à sistematização obtida por meio desse conhecimento, podemos identificar em nosso cotidiano inúmeras situações ligadas aos fenômenos da Óptica. Em nossa vivência escolar, a ausência de um laboratório para demonstrar os fenômenos luminosos não pode constituir impedimento para a consolidação de concepções sobre as teorias desse ramo da Física pelos alunos. Fenômenos ligados à presença da luz estão sempre ao nosso alcance e é importante aproveitá-los para trabalhar os conhecimentos com base nas experiências cotidianas. No livro do aluno,

ao apresentar os conceitos relacionados aos temas da unidade, procuramos estabelecer essas conexões de modo a dar significado à aprendizagem. Além disso, neste *Suplemento*, propomos algumas atividades que permitem alcançar esse objetivo, evitando mais uma vez que o ensino de Física seja realizado mediante a apresentação de conceitos, leis e fórmulas distanciados do mundo vivencial dos alunos.

No Capítulo 9, apresentamos os princípios de propagação da luz em um modelo geométrico. Resaltamos a necessidade de conhecer as concepções espontâneas ou alternativas dos alunos a partir da concepção de “raio visual”. Muitos alunos ainda concebem a visão como produto da luz que vai do olho ao objeto para captá-lo visualmente. Dessa maneira, a visão não dependeria da existência de luz. Sugerimos que a questão de abertura do capítulo seja amplamente debatida a partir da atividade proposta mais adiante e em detalhes neste *Suplemento*.

Os espelhos planos e as leis da reflexão são tratados no Capítulo 10. Por que crianças muito pequenas, ao se deparar com espelhos, procuram olhar atrás deles? Só mais tarde elas se dão conta de que não há nada naquele lugar e o espelho perde, assim, parte de seu mistério. Isso ocorre porque a imagem formada por um espelho plano é virtual. É recomendável discutir em sala de aula o significado do termo “virtual”. Atualmente, ele é muito aplicado: realidade virtual, mundo virtual etc., sempre para designar algo que existe sim, mas não está lá, não tem espaço físico-geográfico.

Se houver tempo disponível, promova uma reflexão sobre a internet e seu caráter virtual, abrindo espaço para que os alunos exponham suas ideias a respeito e estabeleçam relações com o que irão aprender posteriormente.

Salientamos a importância da construção gráfica como um modo eficiente de representação da trajetória da luz ao incidir em espelhos. É importante que o aluno se habitue a traçar a reta normal à superfície refletora, identificando-a, bem como os ângulos de incidência e de reflexão. Deve-se valorizar o esboço da trajetória como um dos elementos que facilita a resolução de problemas, na medida em que ajuda a estimar o resultado a ser encontrado.

Finalmente, no Capítulo 11, apresentamos os espelhos esféricos. É essencial que os alunos percebam que esses espelhos nada mais são que uma seção da *calota esférica* que lhes deu origem. Peça-lhes que pesquisem o significado do termo *calota esférica*. Alguns talvez tenham em casa uma bola espelhada, como as usadas em árvores de Natal. Espelhos esféricos são comuns no dia a dia e podem ser facilmente reconhecidos. Solicite que identifiquem o uso de espelhos esféricos em seu cotidiano, fazendo na lousa uma lista com os diferentes usos apontados por eles.

Lembramos que é fundamental que o aluno primeiro aprenda a construir imagens de objetos diante de espelhos esféricos para somente depois começar a determinar a posição das imagens a partir da equação de Gauss. Para isso, você poderá construir um referencial gaussiano em uma cartolina e deixá-lo exposto na sala de aula. Desaconselhamos qualquer tipo de memorização relacionada à natureza e à posição da imagem de acordo com a posição do objeto. Por essa razão, as questões propostas no capítulo solicitam diversos esquemas de construção de imagens. O aluno deve ser instruído a elaborar um esboço da situação relatada nos problemas (por meio de um esquema de construção de imagem) para ter uma ideia aproximada do valor que deverá encontrar realizando cálculos.

Para começo de conversa: *Por que é mais difícil localizar um objeto em uma sala escura?*

A pergunta visa dar início à discussão sobre o que é raio de luz. Antes de definir o que, na Óptica geométrica, se convencionou chamar de raio de luz, é importante conhecer as ideias que compõem os modelos de pensamento espontâneo dos alunos. Diversos estudos¹ discutem aspectos interessantes sobre o conflito entre as formas de pensar do senso comum e da ciência. Geralmente, os alunos dão crédito a um modelo em que não é preciso luz para ver.

Na concepção espontânea, a ideia do raio visual constitui um conceito fundamental para explicar a visão. Essa maneira de conceber a visão não é exclusiva dos alunos. Uma teoria bastante difundida na Antiguidade sustentava a hipótese dos raios visuais, afirmando que do olho emanavam segmentos retilíneos, capazes de examinar o mundo externo e trazer à mente os dados necessários para nos levar a conhecer e a representar as formas e cores dos corpos. Entre os principais defensores dessa teoria estava o filósofo grego Pitágoras (século VI a.C.), para quem os raios visuais emanavam do olho, propagavam-se em linha reta e se chocavam com o corpo observado, sendo a visão a consequência desse choque. Essas formas de conceber diferem essencialmente daquilo que o saber físico admite como o elemento desencadeador da visão.

Sabemos que, por muito tempo, teorias sobre a essência, a natureza e o comportamento da luz foram propostas. Seja qual for a verdadeira natureza da luz, para explicar muitos dos fenômenos estudados em Óptica é preciso recorrer a uma abstração denominada raio de luz.

Muitos estudantes consideram que, para vermos um objeto, a luz não precisa vir do objeto até nossos olhos. O modelo dos “raios visuais” de Aristóteles está bem arraigado neles. Outros associam o sentido da

¹ Entre outros, Osborne & Black. Young children's ideas about light and their development. *International Journal of Science Education*, v. 15, n. 1, 1993, p. 83-93; La Rosa et al. Commonsense knowledge in optics: preliminary results of an investigation into the properties of light. *European Journal of Science Education*, v. 6, n. 4, 1984, p. 387-397.

visão à clareza que tudo envolve. Como sabemos, as concepções alternativas têm um amplo poder explicativo e por isso influenciam fortemente a aprendizagem. Para que os modelos espontâneos dos alunos sobre as ideias de luz e visão sejam questionados e desestabilizados, eles primeiramente precisam se apropriar da ideia de que a visão de um objeto só é possível quando esse objeto emite luz na direção do observador, impressionando sua retina.

Convite à reflexão

Nesta unidade, iniciaremos o estudo dos fenômenos luminosos. Os próximos capítulos trarão os elementos que ajudarão os alunos a compreender como a luz se propaga e de que maneira sofre reflexão. A aprendizagem dará a eles condições de responder às seguintes questões do “Convite à reflexão”:

- Como a imagem de um objeto tão grande quanto uma montanha pode entrar na pupila do olho do observador?
- O que é uma imagem virtual?
- Que aparência teria o céu se não existisse atmosfera?

Os alunos devem responder às questões a partir de suas ideias sobre o assunto, sem medo de apresentar uma resposta certa ou errada. Devem ser estimulados a pensar sobre os assuntos ligados ao saber físico. De preferência, deve-se recolher o que escreveram, mas sem corrigir. Como estamos iniciando um novo campo de estudo, parece-nos importante conhecer o que eles pensam originalmente a respeito de alguns fenômenos vinculados à propagação da luz.

Após o término da unidade, pode-se pedir que respondam às mesmas questões e comparem suas respostas com as recolhidas no início.

A primeira questão retorna à ideia do raio visual. É importante que você saiba se essa concepção foi ou não descartada e, em caso afirmativo, se parcial ou totalmente.

Para os antigos pensadores, uma hipótese plausível consistia em conferir aos objetos muito grandes, como uma montanha, por exemplo, a propriedade de se contrair ao longo do caminho até se tornarem pequenos o bastante para entrar na pupila do olho do observador. A questão tem o objetivo de preparar o aluno para o conceito de ângulo visual.

Os alunos devem ser estimulados a expressar livremente suas ideias sobre o conceito mencionado na terceira questão e a indicar ocasiões nas quais identificam a presença de imagens virtuais.

A última pergunta abre a reflexão sobre o espalhamento da luz, essencial para o aluno compreender a ideia de raio de luz associando-a à visão dos objetos. Sem ar, não há como difundir a luz do Sol, e o céu seria negro. Da mesma maneira, os objetos só são vistos se espalharem em direção ao nosso olho a luz que recebem.

Princípios da propagação da luz

ou: É possível uma pessoa parecer mais alta que a Torre Eiffel?

1 Habilidades a serem desenvolvidas

- Identificar o modelo de raio de luz característico da Óptica geométrica e descrever corretamente como se dá a visão dos objetos.
- Aplicar os princípios de propagação da luz a situações nas quais há formação de sombra e penumbra, como eclipses etc.
- Entender a formação de diferentes imagens a partir da alteração do ângulo visual.

Sabemos hoje que a maioria dos fenômenos físicos pode ser explicada considerando a luz como uma partícula que se move com a velocidade $c = 3,0 \times 10^8$ m/s. Vale a pena comentar com os alunos que, no entanto, alguns fenômenos só podem ser explicados considerando a luz como uma onda. Muito provavelmente eles já leram algo sobre essa questão em revistas ou ouviram algum comentário em programas de televisão. Pode-se sugerir que façam uma pesquisa sobre a natureza da luz e discutir a abordagem dos fenômenos luminosos quando explicados pela Óptica geométrica e quando analisados pela Óptica física.

Será interessante mencionar que na Física, bem como nas demais ciências, são comuns as teorias conflitantes sobre os fatos observados, mas a que consegue explicar a maioria dos fenômenos é aceita. Às vezes, descobre-se que uma teoria considerada verdadeira durante séculos era equivocada, como ocorreu com o geocentrismo.

A partir do modelo proposto por Copérnico, segundo o qual a Terra se move em torno do Sol, o paradigma de que nosso planeta se encontrava parado foi sendo derrubado pelos pensadores que o sucederam.

Para que o conceito de raio de luz possa ser entendido de modo mais concreto, vale a pena fazer uma demonstração simples para os alunos. Para isso, use um apontador *laser* de baixa potência, encontrado em papelerias, ou uma lanterna cujo feixe de luz seja estreito e um pulverizador de água ou pó de giz. Cobre-se o *laser* com papel-alumínio, fazendo no papel um pequeno furo, para que o feixe emitido seja bem estreito. Em seguida, aponta-se o *laser* para o teto, ao mesmo tempo que se borrifa água ou pó de giz no caminho do feixe de luz. É importante comentar que o fato de a luz se propagar em linha reta torna possível a representação geométrica por meio do raio de luz para estudar os fenômenos luminosos. Convém aproveitar o momento para explicar que as fontes de luz podem ser classificadas quanto à sua origem ou extensão e que um feixe de luz pode ter

raios paralelos, como nos *lasers*, pode ser divergente, como em uma vela, ou mesmo convergente, como o feixe que acende a tocha olímpica.

2 Sobre a questão introdutória



Antes desta aula, peça aos alunos que façam uma pequena pesquisa para saber em qual país se situa a Torre Eiffel, qual é sua altura e sua importância na história daquele país; informações disponíveis em: <<http://goo.gl/rzLVBa>>; acesso em: 1º maio 2016. Ao propor a questão, pode-se comparar a informação sobre a altura da torre pesquisada por eles com o tamanho do aluno mais alto da classe. Quantas vezes a altura da torre é maior que o tamanho desse aluno? Depois dessa constatação, os alunos poderão responder à pergunta introdutória do capítulo.

3 Orientações para o trabalho dos conteúdos



Sugerimos explorar o tema dos eclipses pesquisando alguns registros históricos, pois essa abordagem irá contribuir para tornar a aprendizagem desse assunto mais significativa. Com a colaboração e a orientação do professor de História, os alunos podem investigar como os povos antigos interpretavam os eclipses. Informações disponíveis em: <<http://www.planetario.ufrgs.br/eclipselunar.html>>; <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol02a16.pdf>>; acessos em: 4 mar. 2016.



Se for possível, leve para a sala de aula uma máquina fotográfica que funcione com filme fotográfico e chame a atenção dos alunos para as semelhanças entre ela e a câmara escura de orifício que estudaram. Verifique se percebem que, apesar da grande quantidade de inovações tecnológicas nas câmaras fotográficas de hoje – incluindo a diferença de tamanho –, o princípio de funcionamento é o mesmo, ou seja, aquele que assegura ser possível projetar a imagem de um objeto no fundo de uma câmara escura de orifício.

A atividade experimental sugerida a seguir pode ser executada em sala de aula por grupos de alunos ou prevista como lição de casa a ser apresentada ao professor, que poderá testar a eficiência das caixas.

As questões 3, 4 e 5 desta atividade trazem elementos e conceitos que serão desenvolvidos nas unidades seguintes. Cabe a você julgar a pertinência de despertar a curiosidade nos seus alunos sobre esses assuntos neste momento; caso contrário, será suficiente eles responderem somente às questões 1 e 2.

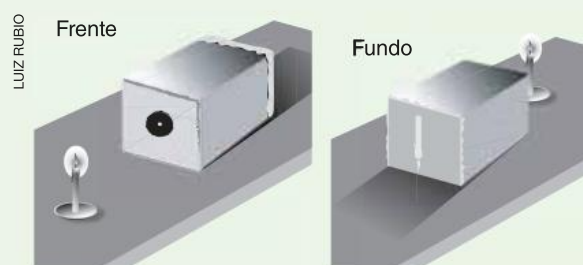
Textos para consulta encontram-se nestes sites: <www.feiradeciencias.com.br>; <efisica.if.usp.br>; <www2.fc.unesp.br/experimentosdefisica>. Acessos em: 4 mar. 2016.

Atividade experimental – Fotografia em uma caixa de papelão

1. Introdução

Atualmente, fotografar se tornou uma atividade de mais acessível para um número expressivo de pessoas, pois, além da facilidade de aquisição de câmaras digitais, os celulares também vêm com esse recurso. As inovações tecnológicas presentes nas câmaras digitais ajudaram a tornar menos complicado o ato de fotografar. Há algumas décadas, para fotografar com qualidade, era preciso dispor de equipamento sofisticado e de filme específico para cada modelo de câmara. Além disso, só era possível saber se a foto tinha nitidez e enquadramento corretos após a revelação do filme.

Hoje, podemos tirar diversas fotografias e de imediato verificar se ficaram boas ou não. Conseguimos armazenar uma quantidade gigantesca de fotos em arquivos digitais. No entanto, apesar de tanta tecnologia, é possível fotografar até mesmo em uma simples caixa de papelão, como vimos nesta unidade.



Nesta atividade, convidamos você e seu grupo a construir uma câmara escura de orifícios, como a descrita no Capítulo 9, e constatar que o princípio de funcionamento de todos os tipos de máquinas fotográficas é o mesmo. A atividade será realizada em grupos de 3 a 4 alunos.

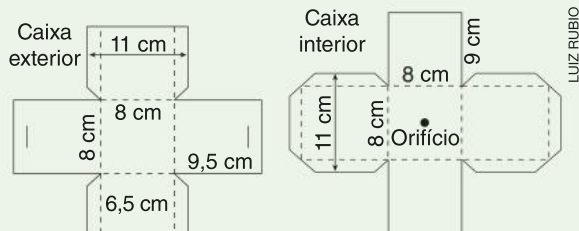
2. Material utilizado

- Papelão de fundo preto de 30 cm × 60 cm
- Fita isolante preta
- Pedaco de papel-alumínio de 10 cm × 10 cm
- Papel vegetal de 20 cm × 20 cm
- Tesoura, prego e alfinete
- Cola de papel

3. Montagem e procedimento

Siga a indicação da figura e desenhe o molde das duas caixas (a caixa interior e a exterior) no papelão, recortando-as em seguida. Dobre a caixa interior e cole-a. Dobre a caixa exterior sobre a caixa interior e depois cole-a. Cole o papel vegetal na parte utilizada como fundo da caixa, onde você

observará o objeto. Use o prego para fazer um furo no papelão e o alfinete para furar a folha de alumínio. Centralize os dois furos e fixe o papel-alumínio sobre o papelão.



Sua câmara escura está pronta para ser usada. Escolha um ambiente da sua casa, feche as janelas e apague a luz, deixando o ambiente bem escuro. Ilumine o objeto escolhido e direcione o furo para ele. Observe a imagem no fundo da caixa.

É possível fotografar com essa câmara escura. Para isso, você deve substituir o papel vegetal pelo papelão opaco com o fundo pintado de preto. Com a caixa adequadamente vedada para a entrada de luz, tente usar papel de filme fotográfico, cortado e colocado no fundo da caixa. Deve-se tampar o orifício, impedindo assim a entrada de luz até o momento de fotografar, para não velar o filme fotográfico.

Quando for fotografar, destampe o furo e espere um bom tempo (cerca de 20 minutos). Após esse período, mantenha a caixa fechada para não danificar o filme fotográfico. Você pode levar a câmara a uma loja de revelação para que revelem o seu filme.

4. Questões para o grupo

a) Você e seu grupo já observaram que a imagem dos objetos aparece invertida no fundo da caixa.

Mas o que acontece com as laterais (direita e esquerda) da imagem do objeto que estão sendo projetadas no fundo da caixa?

Resposta

Como a propagação da luz é retilínea, o orifício seleciona os raios de luz que passam através dele. Assim, um raio de luz emitido da parte de cima do objeto visto é projetado na parte inferior do fundo da caixa. Da mesma forma, o lado esquerdo do objeto projeta seu raio de luz no lado direito da caixa e vice-versa. Assim, os lados direito e esquerdo da imagem também são invertidos em relação ao objeto.

b) Aumente um pouco o furo na frente da caixa. Houve alguma modificação na imagem? Qual? Discuta com seu grupo e explique o que foi observado.

Resposta

Um ponto do objeto que está sendo projetado no fundo da caixa emite uma infinidade de raios de luz. O orifício seleciona os raios que vão para o fundo da caixa. Quanto menor esse orifício, me-

nor será a quantidade de raios chegando em diferentes direções e, portanto, mais definida será a imagem. Se aumentarmos o buraco, mais raios de luz chegarão em diferentes direções, tornando a imagem menos nítida.

c) As máquinas digitais dispensam o uso de filme fotográfico. Pesquise de que maneira é possível obter uma fotografia com essas máquinas.

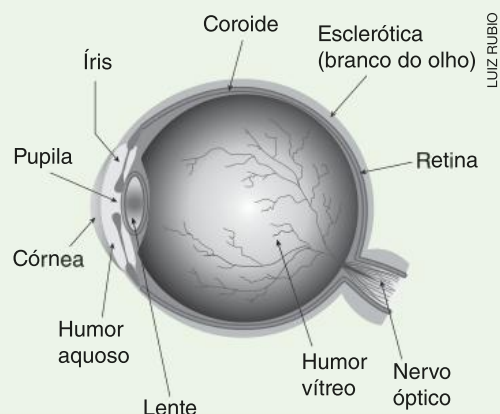
Resposta

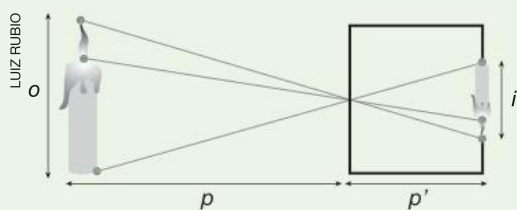
Em muitas máquinas fotográficas digitais, o filme fotográfico é substituído por um sensor de luz, chamado de câmera CCD (*charge-coupled device*, ou, em português, dispositivo de carga acoplada). Esse sensor consegue absorver uma quantidade de luz maior que o olho humano. Essa luz absorvida é transformada em sinal eletrônico e transmitida para a tela na parte de trás da câmara digital. Como a imagem é transformada em sinal eletrônico em um tempo extremamente curto, é possível verificar como ficou a fotografia logo após acionar a máquina.

d) O olho humano tem, basicamente, o mesmo princípio de funcionamento da câmara escura de orifício. Pesquise por onde entra a luz no olho humano e faça um esquema simplificado dele, comparando-o com uma câmara escura. Identifique qual elemento do olho corresponde ao orifício da câmara e que parte corresponde à folha de papel vegetal no fundo da caixa. Para ajudar a responder, observe o olho de um colega do grupo em uma região escura e depois em uma região clara do ambiente onde vocês estão.

Resposta

Podemos observar, pelos dois esquemas a seguir, que a pupila regula a quantidade de luz que entra no olho humano. Portanto, ela corresponde ao orifício da câmara escura. Isso pode ser constatado na experiência feita com o colega do grupo: quando aproximamos o colega de uma região clara do ambiente, a pupila dele se fecha para regular a entrada de luz no olho. Ainda observando as duas figuras, podemos perceber que as imagens, no caso do olho, são projetadas na região do olho conhecida como retina.





Representação esquemática.

e) Se o olho humano se comporta como uma câmera escura de orifício, a imagem no fundo do olho também deve se formar invertida. Então, por que não vemos o mundo de “cabeça para baixo”?

Resposta

Embora a imagem seja projetada na retina, sua interpretação é feita pelo cérebro, que a inverte novamente, deixando a imagem do objeto na posição correta. O cérebro realiza essa inversão em um intervalo de tempo tão curto que temos a sensação de que não existe a segunda inversão feita por ele.

Adaptado de: <www.laboratoriodefisica.com.br/GREF/optica/optica04.pdf>. Acesso em: 4 mar. 2016.



A relação entre o diâmetro aparente da Lua no horizonte e no zênite (zênite ou zênite = ponto superior da esfera celeste, segundo a perspectiva de um observador estacionado num plano sobre a Terra) é de cerca de dois para um, ou seja, no horizonte ele parece duas vezes maior que no zênite. Fotografias comprovam isso. Durante muitos séculos, os astrônomos atribuíram ao fenômeno diferentes causas.

Com a invenção do telescópio, o astrônomo francês Pierre Gassendi (1592-1655) argumentava que a Lua, sendo menos luminosa no horizonte do que no meridiano, produzia maior dilatação da pupila e, em consequência, sua imagem aparecia muito maior. Sua explicação não foi confirmada por nenhuma experiência. A partir daí, a questão foi examinada por muitos cientistas. Mas a hipótese mais aceitável surgiu no século XIX, quando o astrônomo francês Charles Delaunay desenvolveu uma explicação com base na psicologia da percepção. Para ele, quando a Lua está próxima do horizonte, nosso subconsciente a compara com os objetos do solo mais próximos, como casas, árvores, colinas, e assim suas dimensões são subestimadas.

Esse procedimento conjunto do olho e do cérebro introduz um achatamento aparente da abóbada celeste. Por isso, a Lua ou o Sol próximos do horizonte parecem maiores, quando a distância aparentemente é maior. Normalmente, quando um objeto retrocede do observador, parece conservar o mesmo tamanho, ainda que a sua imagem venha a se tornar mais reduzida para o olho. No caso da Lua, ocorre o contrário: toda vez que o horizonte parece mais afastado, sua imagem ótica é maior.

É difícil aceitar essa teoria, pois, em geral, as pessoas acreditam que a Lua no horizonte parece mais próxima do que quando está no zênite. Em 1942, os psicólogos americanos Donald W. Taylor e Edwin G. Boring demonstraram que a “ilusão lunar” estava associada à visão binocular. Eles constataram que a ilusão desaparecia quando a Lua no horizonte era vista através de um tubo, entre o polegar e o dedo indicador. O mesmo acontecia quando se abaixava a cabeça colocando-a entre as pernas para olhar a Lua no horizonte.

Os psicólogos demonstraram também que os objetos terrestres intermediários não têm nada a ver com essa ilusão. Ela depende da posição e da visão binocular dos olhos do observador. Esses experimentos saíram do campo da Astronomia e se transformaram num desafio para os cientistas.

Os psicólogos, por exemplo, acreditam que, quando se olha para o zênite, a posição da cabeça implica uma divergência das linhas para onde os olhos se dirigem, o que faz com que a Lua pareça bem menor. É possível que os dois fenômenos, o da abóbada celeste achatada, associado às diferentes posições da visão binocular, sejam responsáveis pela enorme dilatação da Lua no horizonte e sua redução no zênite. Essa ilusão óptica, que não se limita à Lua, ao Sol e às constelações, é ainda um problema sem solução.

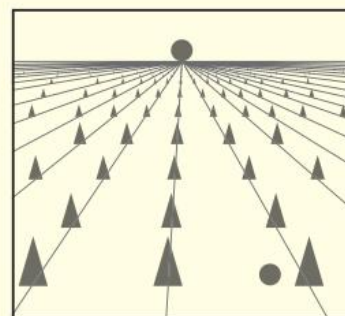
Adaptado de: *O tamanho da Lua cheia no horizonte é ilusão de ótica*, de Ronaldo Rogério de Freitas Mourão, astrônomo e membro da União Astronômica Internacional. Disponível em: <<http://super.abril.com.br/tecnologia/tamanho-lua-cheia-horizonte-ilusao-optica-439596.shtml>>; acesso em: 4 mar. 2016.

Fenômeno semelhante ocorre quando tentamos identificar, nos desenhos a seguir, qual miolo de flor é maior ou qual dos círculos é maior. Todos têm o mesmo diâmetro, porém, ao olhar de relance, temos a sensação de que são diferentes. O cérebro é “enganado” pelos elementos ao redor do círculo, que servem de referência para deduzirmos seu tamanho.

Os círculos são iguais ou diferentes?



Qual das esferas é maior: a que está no fundo da imagem ou a que está à frente?



Reflexão da luz

ou: Como podemos ver uma vela acesa dentro de um copo cheio de água?

1 Habilidades a serem desenvolvidas

- Relacionar os princípios da Óptica geométrica a fenômenos simples associados à reflexão da luz e da visão.
- Conhecer como ocorre a reflexão da luz de maneira especular e difusa.
- Entender o que é uma imagem virtual.
- Construir imagens formadas por reflexão em espelhos planos, aplicando as leis da reflexão.
- Reconhecer grandezas relevantes para a formação de imagens em espelhos planos e resolver problemas que as envolvam.
- Perceber situações cotidianas que podem ser explicadas pelas leis da reflexão.

2 Sobre a questão introdutória



Sabemos que, além de absorvida ou refratada, a luz pode sofrer reflexão ao incidir em uma superfície. Se não refletir

a luz que recebe, nem mesmo um vidro transparente poderá ser visto por nós. Quantas vezes não nos chocamos contra portas ou janelas de vidro simplesmente porque não conseguimos enxergá-las?

Os alunos também apresentam uma grande variedade de concepções alternativas sobre as imagens em espelhos planos. É muito comum a reflexão da luz não ser reconhecida em objetos opacos, o que reforça o modelo aristotélico de visão. Em geral, só se admite a reflexão para espelhos ou superfícies lisas.

Se possível, providencie pequenos espelhos planos para que os alunos os manipulem e proponha um desafio: partindo de uma moeda de R\$ 0,10, como é possível criar mais três utilizando apenas dois espelhos?

O dinheiro criado é real ou virtual? Afinal, ele existe mesmo? É interessante discutir com a turma as opiniões divergentes.

O reconhecimento de que uma imagem se forma “dentro” do espelho não é tarefa fácil para os alunos, especialmente porque esse “dentro” não existe. Nos modelos espontâneos, a imagem virtual costuma ser substituída por uma imagem localizada na superfície do espelho ou até na frente dele.²

Uma segunda concepção muito comum é a de que um objeto que não estiver na frente do espelho não formará imagem. A dependência da posição do observador (e não da posição do objeto) também é muito comum. Com isso, a igualdade da distância entre o objeto e o espelho com a distância entre a imagem e o espelho também fica prejudicada.

E, finalmente, uma concepção muito marcante, encontrada na revisão da literatura específica, se relaciona à crença de que o tamanho da imagem depende da posição do objeto em relação ao espelho. Em geral, os estudantes afirmam que, à medida que um objeto se afasta de um espelho, sua imagem diminui de tamanho.³

Por esses motivos, é importante que os alunos manuseiem diversos tipos de espelho. Além disso, convém dedicar-se à questão resolvida que trata do tamanho mínimo que o espelho deve ter para que uma pessoa se veja refletida nele por inteiro.

A pergunta tem por objetivo problematizar o assunto do capítulo, relacionando o conhecimento prévio do aluno com os conceitos e temas que serão desenvolvidos. Assim, pode-se pedir a alguns deles que leiam em voz alta as respostas que julgarem prováveis para a questão. Você mesmo poderá montar uma lista com algumas das respostas ou recolher várias delas para analisá-las e discuti-las.

Desse modo, os alunos poderão reconhecer mais claramente nos novos conhecimentos aprendidos os elementos essenciais para responder com mais propriedade à pergunta inicial.

3 Orientações para o trabalho dos conteúdos



Jogando uma bolinha de metal contra uma parede, proponha aos alunos que façam uma analogia com a luz que, depois de incidir em uma superfície opaca ou polida, retorna ao meio do qual provém. Lançando um feixe de luz, emitido por um pequeno *laser* (comprado em papelaria) de encontro a um espelho e pulverizando seu caminho com pó de giz, observamos um efeito semelhante ao da bolinha lançada contra a parede. A luz atinge o espelho e retorna para o ar.

Para demonstrar a lei da reflexão, o experimento descrito a seguir mostra-se bastante adequado. A atividade pode ser realizada em grupos de 3 a 4 alunos.

Você vai precisar de:

- uma superfície plana (pode ser o tampo da mesa)
- uma placa de isopor para simular o espelho

² GOLDBERG, F. M.; McDERMOTT, L. C. Students difficulties in understanding image formation by a plane mirror. *The Physics Teacher*, p. 472-480. nov. 1986.

³ HARRES, B. S. Um teste para detectar concepções alternativas sobre tópicos introdutórios de óptica geométrica. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 10, p. 220-234, n. 3, dez. 1993.

- uma folha de cartolina
- algumas esferas de metal ou bolinhas de gude
- um transferidor
- uma régua

Encoste a mesa em uma parede, fixe nela a placa de isopor e forre o tampo com a cartolina. Lance as bolinhas sobre a cartolina contra a placa de isopor, para observar a trajetória de ida e volta das bolinhas, que representam o raio de luz.

Na cartolina, trace as trajetórias de ida e volta (raios de incidência e reflexão) e a reta normal (perpendicular à placa de isopor) a partir do ponto de incidência. Marque os ângulos de incidência e reflexão e, com o transferidor, meça os ângulos e comprove que as medidas são iguais, como se esperava.



Esse “Explore em Matemática” trata de simetria, assunto que pode ser abordado com os professores de Matemática e de Arte. Proponha aos alunos que pesquisem, em grupo, figuras geométricas simétricas, pinturas e outras obras de arte que apresentem simetria e também a simetria na natureza. Essa é uma atividade que se enriquecerá bastante se os resultados forem expostos em cartazes com fotos, colagens, desenhos etc. A formação de imagem por reflexão em um espelho plano será mais bem compreendida se o aluno conhecer e identificar a simetria na natureza e nos objetos que o cercam.

Após a pesquisa, os alunos podem assistir ao vídeo produzido pelo MEC para a TV Escola, episódio “Simetrias”, da série *Arte e Matemática*, disponível em: <http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=6co_obra=20794>; acesso em: 14 abr. 2016.



Nesta atividade, sugerimos que os alunos construam seu próprio periscópio. A montagem é razoavelmente simples e pode ser feita com materiais fáceis de obter. São necessários dois espelhos pequenos, que podem ser conseguidos em uma vidraçaria. Os alunos devem ser divididos em grupos, de modo que repartam o material e todos contribuam na construção.

Um endereço com boas instruções de montagem é: <www.pontociencia.org.br>; acesso em: 4 mar. 2016. Basta digitar “periscópio” na caixa de busca.

CAPÍTULO 11

Espelhos esféricos

ou: É possível encolher olhando-se no espelho?

1 Habilidades a serem desenvolvidas

- Conhecer espelhos côncavos e convexos e identificar seus elementos geométricos.
- Identificar e diferenciar imagens reais e virtuais.
- Obter graficamente imagens de objetos conjugadas por espelhos esféricos aplicando as leis da reflexão.
- Reconhecer a utilização dos espelhos esféricos em situações do cotidiano.
- Resolver problemas envolvendo a construção de imagens em espelhos esféricos, determinando posições, tamanho etc.
- Aplicar as leis de dilatação linear, superficial e volumétrica dos sólidos nas resoluções de situações-problema que envolvam a dilatação térmica dos corpos no estado sólido.

2 Sobre a questão introdutória



No dia a dia, não é difícil encontrar situações em que se empregam superfícies curvas refletindo luz, como os espelhos esféricos e parabólicos, que têm diversas aplicações práticas e tecnológicas. A obtenção de uma imagem ampliada, a geração de feixes paralelos, a ampliação do campo visual de um observador, entre outros, são fenômenos associados aos espelhos côncavos e convexos.

Depois que os alunos refletirem sobre a questão introdutória do capítulo, peça-lhes que tragam para a sala de aula um utensílio de cozinha, como uma concha de feijão ou de sorvete ou mesmo uma colher de sopa, desde que sejam de metal bem polido, para que observem as imagens formadas. Embora não sejam esféricos, esses materiais permitem que os alunos identifiquem características importantes da imagem, como o tamanho, se é invertida ou direita etc.

Os alunos deverão registrar suas observações e, antes de começar a exposição sobre o tema do capítulo, você poderá ler com eles a Introdução. Após a leitura, divida a classe em grupos e solicite que respondam às seguintes questões:

1. A 1ª e a 2ª lei da reflexão da luz são válidas também para superfícies curvas? Justifique.
2. Uma pessoa afirma que, em um dia de sol, consegue queimar uma folha de papel com um espelho esférico. Você considera que isso seria possível? Apresente uma explicação para sua resposta.
3. Por que os espelhos esféricos, como os de maquiagem ou os retrovisores de veículos, podem modificar as dimensões da imagem de um objeto e os espelhos planos não fazem o mesmo?
4. Você já reparou que muitos comerciantes colocam espelhos em pontos estratégicos de suas lojas, com

o objetivo de “vigiar” o que ocorre em seu interior e evitar o furto de produtos? Tomando por base as características das imagens dos objetos, você afirmaria que esses espelhos são planos? Justifique.

Em seguida, os grupos poderão ler em voz alta as respostas para cada uma das questões e discutir as diferentes opiniões. Desse modo, o professor conhecerá o que seus alunos pensam sobre o assunto e poderá aproveitar essas informações para direcionar a elaboração de suas aulas.

Reiteramos que não deve haver memorização das posições das imagens a partir da posição dos objetos diante do espelho.

Os alunos devem dominar a representação gráfica dos raios de luz para poder determinar com facilidade a posição da imagem. Dessa maneira, o estudo analítico utilizando as equações do aumento e os pontos conjugados será facilitado.

3 Orientações para o trabalho dos conteúdos



Reconhecemos a dificuldade em demonstrar experimentalmente os conceitos e leis vinculados à Óptica,

ora porque a escola não possui um bom laboratório, ora porque o equipamento não é adequado, ou porque não há montagens disponíveis para todos os grupos de alunos. Pensando nisso, recomendamos que, sempre que possível, você indique a seus estudantes alguma simulação voltada para a aprendizagem. Para isso, sugerimos o site do Rived. Trata-se de um programa da Secretaria de Educação a Distância – Seed – ligado ao Ministério da Educação, que tem por objetivo a produção de conteúdos pedagógicos digitais, na forma de objetos virtuais de aprendizagem. Na atividade disponível no endereço a seguir, os alunos entrarão em contato com a formação de imagens a partir de um problema: <http://www.projetos.unijui.edu.br/matematica/fabrica_virtual/espelhos_gauss/fis1_ativ1.html>; acesso em: 4 mar. 2016.

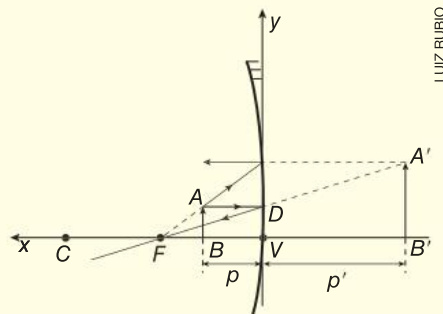
Para acessar o objeto deve-se clicar em “Avançar”. Nessa simulação, os alunos terão de resolver o problema de Frederico, que ainda não compreende muito bem por que e de que maneira as posições das imagens variam em espelhos esféricos. Ao longo da simulação, é possível movimentar Frederico, alterando sua distância do espelho, e visualizar como a imagem se modifica.

Ao término da atividade, convém recomendar aos alunos que não deixem de aceitar a sugestão de Frederico de tentar repetir a experiência utilizando espelhos de verdade, pois, afinal, até uma concha de feijão pode servir de espelho.



Pode-se demonstrar a equação de Gauss utilizando o esquema a seguir.

Nele podemos reconhecer a semelhança existente entre os triângulos FVD e $FB'A'$.



Assim, temos:

$$VD = BA \text{ e } B'A' = i \Rightarrow \frac{VD}{B'A'} = \frac{FV}{FB'}$$

Logo:

$$\frac{o}{i} = \frac{FV}{FB'}$$

$$\frac{o}{i} = \frac{f}{f - p'}$$

(Lembrando que: $p' < 0$; o esquema mostra uma imagem virtual.)

Mas, como já vimos:

$$\frac{o}{i} = -\frac{p}{p'}$$

Assim:

$$\frac{f}{f - p'} = -\frac{p}{p'}$$

$$-fp' = p(f - p')$$

$$-fp' = pf - pp'$$

$$pp' = pf + fp'$$

Dividindo ambos os membros por $fp p'$, temos:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$



Em 2009, a comprovação das teorias propostas por Einstein sobre o encurvamento da luz ao passar por um campo gravitacional completou 90 anos. Sugerimos a consulta ao texto disponível em: <<http://googl/7j3C3Q>>; acesso em: 1º maio 2016, para obter mais informações sobre a história dessa importante constatação, que pode ser enriquecedor para o curso de Física, especialmente por se tratar de material que aborda o assunto discutido na seção “Para saber mais – Diálogos com a Física Moderna”.



Pode-se iniciar essa seção discutindo com os alunos o conceito de espaço-tempo, utilizando uma analogia em que se compara o espaço-tempo a um lençol que é deformado pela presença de um objeto maciço. Desse modo, pode-se mostrar que a luz se propaga sobre o espaço-tempo (lençol). Um exemplo alternativo pode ser o de uma pessoa caminhando sobre um planície para representar a trajetória retilínea da luz e de um

navio navegando, por exemplo, entre os polos da Terra, para evidenciar a trajetória curvilínea da luz. Textos interessantes podem ser encontrados nos seguintes endereços:

<<http://www.ifsc.usp.br/~FCM0101/gui.pdf>>;

<ciencia.hsw.uol.com.br/a-formado-espaco1.htm>;

<efisica.if.usp.br/mecanica/avancado/relatividade/>;
acessos em: 1º maio 2016.



A atividade é uma ótima oportunidade para que os alunos identifiquem experimentalmente alguns elementos dos espelhos esféricos e os relacionem ao modelo que conheceram nas aulas. Os materiais usados são facilmente encontrados e o experimento é de simples execução. Essa atividade pode enriquecer a aula, tornando mais concretos os elementos dos espelhos esféricos.

UNIDADE 4

Refração da luz



Abertura da unidade



A seguir, apresentamos o que se espera dos alunos no final desta unidade e uma proposta para introdução dos conteúdos.

Objetivos:

Ao final desta unidade, o aluno deverá ser capaz de:

- Conceituar índice de refração absoluto, enunciar as leis de refração e operar com elas.
- Determinar o ângulo limite de refração, reconhecer suas aplicações em fibras ópticas e entender o fenômeno das miragens.
- Observar as imagens num dióptro plano e o desvio lateral nas lâminas de faces paralelas.
- Compreender a dispersão da luz nos prismas de vidro e em gotículas de água para formar o arco-íris.

A Unidade 4 dá continuidade ao estudo dos fenômenos associados à propagação da luz, apresentando um de seus aspectos mais interessantes: a refração luminosa. Muitas situações vivenciadas em nosso cotidiano podem ser explicadas a partir dos conhecimentos desenvolvidos nesta unidade. Por esse motivo, durante a apresentação dos conceitos e das expressões algébricas, convém fazer o maior número possível de associações entre os fenômenos ligados à refração da luz. A aprendizagem em Física não pode se limitar à troca de paradigmas preestabelecidos e selecionados pelo saber escolar. É preciso desenvolver estratégias que levem o estudante a modificar suas concepções prévias, seus esquemas interpretativos, de forma autônoma, a partir da necessidade de resolver as situações-problema propostas pelo professor.

Embora a maioria das situações-problema apresentadas no decorrer do texto tratem do fenômeno de

maneira qualitativa, não se pode negar a importância da simbolização matemática ou do cálculo nesse tema de estudo. O que se busca é gerar situações introdutórias nas quais a elaboração de explicações ligadas ao saber científico seja tão fundamental que, posteriormente, ao se introduzirem os algoritmos, os conceitos simbolizados por eles sejam percebidos com clareza e exatidão, além de corretamente associados.

Desse modo, julgamos desnecessário e pouco eficaz um estudo dos sistemas refratores (prismas, dióptros planos, lâminas de faces paralelas etc.) excessivamente preocupado com fórmulas matemáticas, sobretudo porque essa opção de ensino desvia a atenção do aluno dos conceitos envolvidos no fenômeno. Assim, não apresentamos as expressões para o cálculo do desvio entre as direções do raio incidente e emergente em uma lâmina de faces paralelas e tampouco deduzimos as fórmulas para o cálculo de ângulos ou de desvio em um prisma. Para este último, limitamo-nos ao estudo da dispersão da luz.

Apresentamos nesta unidade os conceitos de refração e a lei de Snell-Descartes. Ao explicar o comportamento da luz, pode-se empregar a analogia entre a variação de velocidade de um pequeno eixo com duas rodas que atravessa duas superfícies de asperezas diferentes e a refração que ocorre com a luz quando atravessa um pedaço de vidro. Trata-se de uma demonstração simples, talvez já vista no Ensino Fundamental, mas que pode ajudar o aluno a assimilar o conceito de refração. Prepara-se a superfície, metade de papel, metade de tapete, a fim de impulsionar obliquamente o eixo de um carrinho, de tal maneira que a primeira roda, ao passar para o tapete, tem sua velocidade diminuída, mudando a direção do eixo. Fazendo o eixo incidir perpendicularmente à superfície, pergunta-se aos alunos se o fato de não ocorrer mudança de direção implica a não alteração de velocidade. Eles

geralmente associam o fenômeno da refração apenas a situações nas quais há mudança de direção de propagação. Por isso, deve-se levá-los a perceber que a refração ocorre sempre que a velocidade da luz se altera, até em ocasiões em que o meio de propagação é o mesmo. A mudança de densidade de um mesmo meio (o tapete, por exemplo, pode ter maior ou menor espessura) é capaz de provocar desvio na direção de propagação, o que explica os fenômenos da refração atmosférica, miragem etc.

Abordamos ainda os sistemas refratores mais significativos para esse momento do estudo. Convém ler com os alunos a introdução que trata da experiência newtoniana da dispersão luminosa. Deve-se solicitar que, ao representar graficamente a refração de um raio de luz, eles desenhem também o raio refletido, lembrando que a luz, ao incidir em uma superfície de separação, sofrerá absorção, reflexão e refração ao mesmo tempo e em proporções diversas, dependendo das características dos meios. Eles também devem ser instruídos a representar, em seus desenhos, a direção original do raio de luz – ou seja, caso não houvesse refração, qual seria a trajetória do feixe luminoso? – para perceber melhor o afastamento ou a aproximação em relação à normal.

É recomendável discutir novamente o mecanismo de formação de imagens por refração, uma vez que se trata de um tema abstrato e de difícil elaboração conceitual.

Para começo de conversa: *A luz pode fazer curvas?*

A pergunta visa iniciar a discussão sobre a ideia da refração, partindo de um aparente paradoxo entre o conteúdo aprendido na unidade anterior e o desenvolvido nesta unidade.

O princípio da propagação retilínea da luz responde negativamente à questão sobre a possível curvatura e, por isso, deve ser a resposta mais provável dos alunos. Trata-se aqui de analisar de que maneira o estudante construiu sua aprendizagem do modelo geométrico de luz, visto que aparentemente há uma inconsistência conceitual, no caso de uma resposta afirmativa.

O fato de nenhum modelo científico estar livre de contradições ou de limitações deve permear a reflexão, embora saibamos que não é esse o caso da situação proposta pela pergunta. Podemos também pensar nos desdobramentos da questão quando a relacionamos ao estudo da Óptica, objeto de estudo posterior.

Pode-se dar à discussão um encaminhamento mais profundo, dependendo dos propósitos didáticos.

Se possível, leve para a classe um daqueles enfeites compostos de um feixe de fibras ópticas e peça aos alunos que observem a trajetória da luz (foto a seguir). A busca de uma explicação segundo o modelo geométrico que justifique o comportamento da luz em uma fibra óptica pode constituir um caminho promissor para levar o estudante a encontrar critérios capazes de favorecer a generalização conceitual esperada.



ASHARKVUSHUTTERSTOCK

Convite à reflexão

Nesta unidade, o objeto de estudo é o comportamento da luz ao mudar de meio de propagação. Para isso, recomendamos propor aos alunos que respondam às questões a seguir.

- É possível alterar a velocidade da luz?
- Por que a profundidade de uma piscina parece diminuir quando ela está cheia de água?
- Quando localizamos uma estrela no céu, podemos afirmar que determinamos sua real posição?

Os alunos devem responder a essas questões a partir de suas ideias sobre o assunto, sem o compromisso de uma resposta correta.

A primeira pergunta trata do tema central da unidade. Pode-se perguntar aos alunos se eles acham que a luz se propaga com a mesma velocidade na água e no ar. Quais são as consequências para a imagem que vemos de um objeto quando a velocidade de propagação da luz é alterada? Essas questões podem despertar a curiosidade dos alunos, levando-os a pensar no assunto que será estudado e a perceber que os conhecimentos de que dispõem até o momento não são suficientes para explicar o que se deseja saber.

Na segunda questão, propõe-se um olhar investigativo para um fenômeno do cotidiano que talvez não tenha chamado a atenção de muitos alunos. Para que a reflexão tenha mais qualidade, pode-se levar para a sala de aula um recipiente com água e colocar em seu interior um pequeno objeto. Os alunos vão ajudar o professor a “pescar” o objeto com uma pinça, orientando a posição de sua mão e avisando quando a pinça estiver sobre o objeto de maneira que ele possa pegá-lo. Caso haja muitas opiniões discordantes, retire a água e realize o mesmo procedimento. Em seguida, coloque novamente água no recipiente e peça aos alunos que pensem e escrevam uma explicação para o que foi visto.

Alguns alunos talvez se lembrem da ideia de ano-luz para responder à terceira questão, revelando uma associação possível. Uma explicação que pode ser considerada está relacionada ao tempo que a luz gasta para atingir a Terra. Desse modo, poderá haver estrelas que nem existem mais, cuja luz demorou muito tempo para atingir a Terra, e por isso ainda podem ser vistas no céu. Pode-se pedir aos alunos que considerem a

possibilidade de a estrela continuar emitindo luz. Supondo que a luz que chega a nossos olhos ainda está sendo enviada, a posição da estrela no instante em que olhamos para o céu é aquela em que a vemos?

CAPÍTULO 12

Refração luminosa

ou: Por que as estrelas parecem piscar no céu?

1 Habilidades a serem desenvolvidas

- Conceituar o fenômeno da refração da luz, identificando situações do cotidiano que podem ser descritas a partir do conhecimento sobre o comportamento da luz ao variar sua velocidade.
- Compreender o conceito de índice de refração absoluto e reconhecer as condições que provocam sua variação.
- Estabelecer a lei de Snell-Descartes e perceber sua aplicação em situações-problema propostas.
- Determinar o ângulo limite de refração e reconhecer suas aplicações em fibras ópticas e miragens.

2 Sobre a questão introdutória



A pergunta tem por objetivo problematizar o assunto do capítulo, relacionando o conhecimento prévio dos alunos com os conceitos e temas que serão desenvolvidos.

Assim, peça a alguns que leiam em voz alta as respostas que julgam prováveis para a questão. Monte uma lista com algumas das respostas ou recolha várias delas para analisá-las e discuti-las com a turma ao final do capítulo. Desse modo, os alunos poderão reconhecer mais claramente nos novos conhecimentos aprendidos os elementos essenciais para responder com mais propriedade à pergunta inicial.

Ao final do capítulo, eles deverão voltar a responder, de preferência por escrito, à questão problematizadora do início do capítulo. Depois, em grupos, vão comparar as respostas dadas nas duas ocasiões e produzir uma resposta final única a partir da troca de ideias entre os integrantes de cada grupo.

3 Orientações para o trabalho dos conteúdos



Antes de demonstrar a lei de Snell-Descartes, é recomendável deter-se por algum tempo na conceituação do fenômeno de refração e na compreensão do que representa o índice de refração. Entender o significado dos

valores descritos nas tabelas de índices de refração de alguns materiais é essencial para a compreensão dos itens citados a seguir.

O evento do canudo que parece quebrado na foto do item 2, “Refração da luz”, pode ser reproduzido em sala de aula, utilizando um lápis imerso em um copo de vidro com água.

Para a dedução da lei de Snell-Descartes, julgamos que uma análise de dados experimentais obtidos com um experimento simples, elaborado com materiais de baixo custo, pode ajudar os alunos a desvendar os conceitos e os algoritmos envolvidos no fenômeno da refração, encontrando a relação ou lei que o rege. Divida a classe em grupos, para que cada um faça o próprio conjunto de observações e medições. Se isso não for possível, pode-se montar ao menos um aparato, como o descrito a seguir, e demonstrar o experimento em um local onde toda a turma possa acompanhar. Nesse caso, os dados coletados deverão ser escritos na lousa para que os alunos acompanhem os cálculos.

Experimento de Snell-Descartes

Material utilizado

- Cuba de vidro de aproximadamente 10 cm de largura, 15 cm de altura e 20 cm de comprimento; transferidor de 360°; apontador *laser*; adesivos; tinta guache branca.

Procedimento

Encha a cuba de vidro com água misturada com a tinta (o suficiente para turvar a água). Posicione o centro do transferidor na linha da água e fixe-o à parede externa da cuba. Marque com um adesivo a direção da reta normal à superfície.

Incida obliquamente um feixe de luz proveniente do ar sobre a superfície de separação na intersecção com a normal.

Meça os valores do ângulo de refração para diferentes ângulos de incidência, como os sugeridos na tabela a seguir.

Ângulo de incidência (i)	Ângulo de refração (r)
15°	
25°	
35°	
45°	
60°	

Considerando os índices de refração do ar e da água respectivamente iguais a 1,0 e 1,33, obtenha a constante da lei de Snell-Descartes: $\frac{1,33}{1} = 1,33$

Solicite aos alunos que calculem a razão $\frac{\sin i}{\sin r}$ para cada par de ângulos da tabela. Apesar de as medições serem passíveis de erros, o valor encontrado pelos alunos para a razão entre os senos deve tender ao número 1,33.

A partir da análise dos dados obtidos, os alunos terão condições de entender a expressão da lei de Snell-Descartes.

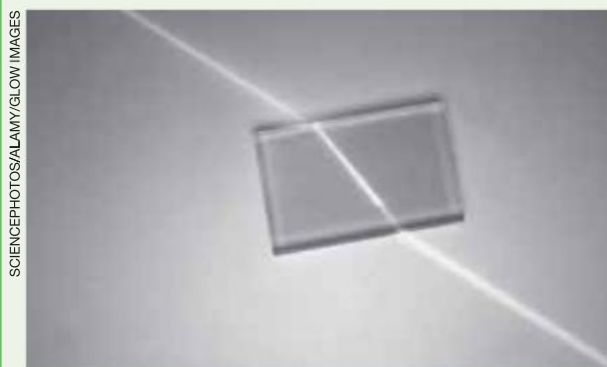
Adaptado de: ROCHA, Michael F. G et al. *Experimento de Snell-Descartes: uma aplicação para o Ensino Médio*. XVIII Simpósio Nacional de Ensino de Física (SNEF), 2009.



O princípio do menor tempo de Fermat, apresentado no texto a seguir, explica por que a luz, ao ser refratada, embora passe a ter o comprimento de sua trajetória aumentado, percorre-a no menor tempo possível. Procure fazer cópias do texto e leia-o com os alunos. O texto pode servir de base para o trabalho com a seção “Trilhando o caminho das competências”, no final deste capítulo.

O princípio do menor tempo de Fermat

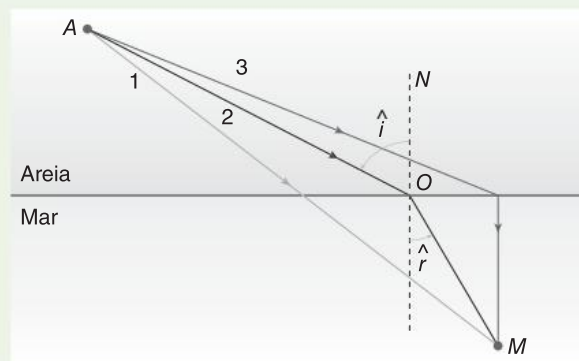
Quando observamos um raio de luz passando do ar para o vidro, verificamos que o desvio sofrido na direção de propagação provoca um aumento na distância percorrida pela luz, ou seja, a luz teria um percurso mais curto para se deslocar entre o ponto da emissão *A* e o ponto de chegada *M*, se fosse possível percorrer essa distância em linha reta.



Um advogado francês interessado em Matemática, chamado Pierre de Fermat, provou no século XVII que, apesar de ser o caminho mais longo, essa trajetória requer da luz o mínimo tempo para ser percorrida; se o deslocamento fosse feito em linha reta, o tempo seria maior. Essa constatação recebeu o nome de “princípio do menor tempo de Fermat”, que pode ser explicado por meio de uma analogia.

Suponha que um salva-vidas, em uma praia, perceba um banhista se afogando em um ponto *M*,

no mar, e deva, por isso, sair correndo de um ponto *A* na areia e chegar ao local onde o banhista está no menor tempo possível. Antes de sair correndo, ele pensa alguns instantes sobre qual caminho escolher.



Princípio do menor tempo.

Se ele adotar uma linha reta para ir de *A* até *M*, terá, sem dúvida, escolhido o menor caminho; entretanto, passará grande parte de seu tempo nadando a uma velocidade menor do que quando corre na areia (trajetória 1). Mas se decidir entrar no mar somente quando estiver bem de frente para o banhista, a trajetória sobre a areia será muito grande, o que também poderá não dar certo (trajetória 3).

A solução encontrada por Fermat (trajetória 2) foi determinar de que maneira seria uma trajetória que tomaria o menor tempo possível, ou seja, o salva-vidas gastaria um pouco mais de tempo correndo sobre a areia até o ponto *O* e nadaria o restante do percurso até o ponto *M*, de tal maneira que a seguinte relação fosse satisfeita:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_{\text{salva-vidas na areia}}}{v_{\text{salva-vidas no mar}}}$$

Isso significa que o ângulo \hat{r} de desvio da trajetória em relação à reta normal à superfície de separação ar-água depende de quanto o salva-vidas consegue correr mais rápido do que nadar.

Para um raio luminoso, vale a mesma relação. O seno do ângulo de refração é menor do que o seno do ângulo de incidência e depende da razão entre as velocidades de propagação dos meios envolvidos.



Investigações, em Física, podem ser classificadas em qualitativas ou quantitativas. São quantitativas as experimentações nas quais são produzidos dados que podem ser úteis para o cálculo de grandezas físicas. Esse tipo de atividade também pode ter como objetivo a constatação numérica de previsões relacionadas a leis reconhecidas como verdadeiras. Um exemplo bastante simples é o da medida da velocidade de um carro em movimento uniforme. Para verificar se a velocidade é

constante, calculamos seu valor em diferentes pontos da trajetória, de tal maneira que os resultados nos permitam classificar esse movimento.

As experiências qualitativas podem ser bastante valiosas. Algumas vezes, leis físicas fazem previsões em relação à ocorrência de um fenômeno para o qual conhecer as medidas das grandezas é menos importante que constatar e analisar seu comportamento. Um exemplo de experiência qualitativa é o lendário experimento de Galileu, que soltou objetos de diferentes massas do alto da torre de Pisa. Mais que se preocupar em medir a velocidade, a posição e o tempo de queda, Galileu estava interessado em descobrir se os dois objetos alcançariam o solo no mesmo instante.

No tema de estudo desta unidade, refração da luz, temos a possibilidade de realizar uma série de experimentos de caráter qualitativo. Um deles é indicado a seguir. Sugerimos que seja utilizado como atividade introdutória ao conceito de reflexão total da luz, antes mesmo da dedução da expressão matemática do ângulo limite.

O experimento pode ser realizado com materiais de baixo custo, facilmente encontrados em casa.

Com o auxílio de um recipiente de vidro, longo e transparente, um espelho e um apontador *laser*, o fenômeno de reflexão total da luz pode ser demonstrado aos alunos; esse fenômeno acontece no interior das fibras ópticas, muito utilizadas hoje em dia na área da comunicação, por exemplo, e será reproduzido em um filete de água.

A descrição mais detalhada do experimento está disponível no endereço <<http://www.seara.ufc.br/sugestoes/fisica/oti14.htm>>; acesso em: 22 mar. 2016.



Os diamantes extraídos das minas são divididos em pedras preciosas e industriais, conforme sua forma e pureza.

Os diamantes industriais são classificados em dois tipos: o de qualidade inferior, usado apenas como abrasivo, conhecido como *boart*, e o de melhor qualidade, usado em perfurações, entre outros usos. A partir da década de 1950, em razão da grande demanda, investimentos em pesquisas levaram à criação de processos de produção industrial de diamantes sintéticos. Esses diamantes são produzidos sob condições similares às naturais: pressões muito elevadas e temperaturas altíssimas. Um trabalho conjunto com o professor de Química ajudará os alunos a conhecerem outras utilizações dos diamantes e a perceberem que seu uso pode ir muito além da produção de joias. Além disso, o professor de Química poderá fornecer mais dados aos alunos sobre a composição dos diamantes, sua dureza etc. Mais informações sobre o assunto podem ser obtidas em: <<http://goo.gl/29xZow>>; acesso em: 22 mar. 2016.

**ou: É possível ver um arco-íris
num dia sem chuva?**

1 Habilidades a serem desenvolvidas

- Reconhecer as imagens conjugadas em um dióptro plano, localizando-as graficamente.
- Representar graficamente o comportamento da luz em lâminas de faces paralelas.
- Compreender o fenômeno da dispersão da luz, associando-o ao que ocorre em prismas de vidro e em gotículas de água na formação do arco-íris.

O Capítulo 13 trata da refração da luz em sistemas refratores, tais como os prismas, as lâminas de faces paralelas e os dióptros planos.

A pergunta da abertura do capítulo tem como objetivo incentivar a reflexão sobre um fenômeno natural só visto ocasionalmente em dias de chuva: o arco-íris. É possível que os alunos já tenham tentado reproduzir um arco-íris dispersando a luz com um esguicho de regar jardim. Pode ser também que tenham observado a dispersão da luz nas gotas de água das fontes.

Pergunte se conhecem outras maneiras de dispersar a luz. O aparato experimental de Newton para decompor as cores pode ser reproduzido em sala de aula de maneira a tornar visível para o aluno o texto que será lido na introdução do capítulo.

O endereço <http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/bending-light>; acesso em: 22 mar. 2016, apresenta um objeto de aprendizagem sobre a refração da luz em vários prismas. Há como variar o ângulo de incidência e de abertura do prisma, bem como os índices de refração.

2 Sobre a questão introdutória



Essa pergunta tem por objetivo problematizar o assunto do capítulo relacionando o conhecimento prévio dos alunos com os conceitos e temas que serão desenvolvidos. Assim, peça a alguns deles que leiam em voz alta as respostas que julgam prováveis para a questão. Monte uma lista com algumas das respostas ou recolha várias delas para analisá-las e discuti-las com a turma ao final do capítulo.

Desse modo, os alunos poderão reconhecer mais claramente nos novos conhecimentos aprendidos os elementos essenciais para responder com mais propriedade à pergunta inicial.

Os alunos devem voltar a responder, de preferência por escrito, à questão problematizadora do início do capítulo. Depois, em grupo, poderão comparar as respostas dadas nas duas ocasiões e produzir uma

resposta final única a partir da troca de ideias entre os elementos do grupo.

3 Orientações para o trabalho dos conteúdos



Para imagens fornecidas por objetos em dióptros planos, sugerimos uma demonstração simples. Insere-se uma moeda em um recipiente opaco, de maneira que o observador não consiga vê-la no fundo. Mantendo-se o observador na mesma posição, coloca-se água no recipiente para que a pessoa passe a ver a moeda. Peça aos alunos que representem o observador, a moeda e a água em um esquema gráfico e determinem a posição da imagem da moeda.



A saga do bruxo Harry Potter encanta crianças, adolescentes e adultos. Seu manto da invisibilidade é objeto de admiração dos leitores da coleção de livros repletos de aventuras fantásticas descritas pela escritora britânica J. K. Rowling.

Para a pesquisa científica do século XXI, situações de invisibilidade não são mais ficção e podem se tornar, cada vez mais, parte de nossa realidade. O artigo a seguir traz notícias sobre a busca pelos materiais que apresentam a refração negativa, ou seja, que podem se tornar invisíveis. Indicamos também o texto sobre metapele disponível em: <<http://goo.gl/ti2dil>>; acesso em: 12 maio 2016.

Chinês nos EUA produz “tapete” da invisibilidade

Ricardo Bonalume Neto

O “manto da invisibilidade” adorado pela ficção, de Harry Potter à Jornada nas Estrelas, ficou mais próximo agora. Um grupo nos EUA conseguiu mascarar um objeto tridimensional usando um “tapete óptico” que funciona quase em luz visível. Um avanço e tanto desde o primeiro experimento prático dessa tecnologia, em 2006, que usou micro-ondas.

A faixa do espectro agora usada, a do infravermelho próximo, ainda é invisível ao ser humano. Mas o resultado abre caminho para aplicações na região visível.

Assim como no caso das micro-ondas, o novo estudo foi feito graças a metamateriais, estruturas com propriedades que permitem um controle preciso do fluxo de ondas eletromagnéticas. A pesquisa, liderada por Xiang Zhang, da Universidade da Califórnia, em Berkeley, está publicada na última edição da revista *Nature Materials*.

Esses materiais agem invertendo a direção do fluxo de luz. Se este passa para o outro lado do

objeto escondido, a reflexão é detectada como se o objeto fosse transparente.

O “tapete” foi projetado para esconder um objeto colocado por baixo de uma superfície curva ao imitar a reflexão de uma superfície plana, como um espelho com uma saliência que parece ser totalmente chato.

Ao contrário do trabalho anterior, que usou elementos metálicos, o da equipe da Universidade da Califórnia utilizou um metamaterial fabricado com silício. É a primeira vez que um experimento desses é feito com um material isolante.

O efeito de invisibilidade foi obtido graças ao uso de um padrão específico de microscópicos buracos em uma camada de silício de 250 nanômetros (milionésimos de milímetro).

A escolha do material é fundamental. “Este enfoque representa um passo significativo na direção da óptica geral de transformação em frequências ópticas, que até agora tem permanecido um empreendimento desafiador devido a limitações de fabricação em metal”, escreveram os autores.

Sem perdas

O próprio Zhang havia desenvolvido no ano passado [2008] um metamaterial capaz de “dobrar” a luz numa faixa visível (o vermelho), mas este era metálico, frágil demais para aplicação em grande escala.

O “tapete óptico” é mais flexível e não causa perdas de luz como os metais, o que significa que o efeito de invisibilidade é mais completo.

Metamateriais são um sonho dos militares, que desejam um dia criar aviões e tanques invisíveis. O Departamento de Defesa dos Estados Unidos tem financiado diversas pesquisas para obtê-los.

Folha de S.Paulo, 1º maio 2009. Disponível em:
<<http://www1.folha.uol.com.br/folha/ciencia/ult306u559309.shtml>>.
Acesso em: 22 mar. 2016.



Recomendamos copiar o texto a seguir e distribuir aos alunos. Caso não seja possível, sugerimos que a questão da curvatura do arco-íris seja discutida em sala de aula e uma cópia da figura que acompanha o texto seja fixada em lugar de destaque na classe.

Por que vemos o arco-íris arqueado?

A forma curva do arco-íris é explicada pelo modo como a luz é refletida em diversas gotas de chuva e percebida por nossos olhos (veja ilustração).

Pela figura, vemos que o círculo só se forma pela metade, pois o observador está posicionado no chão.

Se a luz atravessasse a Terra e fosse possível enxergar além do horizonte, ele conseguiria ver um círculo colorido completo, e não apenas um arco.

O arco-íris é percebido graças a um fenômeno óptico e meteorológico. Ele é captado por nossos olhos por causa do desvio e da dispersão da luz branca do Sol em gotas de água suspensas no ar, seja pela chuva, seja por outro meio, como uma mangueira. Só algumas dessas gotas desviam a luz na direção dos olhos de um observador, pois cada faixa de luz sai da gota com uma direção diferente.

Outra pessoa, em outra posição, verá a luz desviada por outras gotas diferentes. Isso quer dizer que ela verá outro arco-íris. É possível também ver mais de um arco-íris ao mesmo tempo.

As gotas que formam um arco-íris podem estar bem perto do observador, como acontece quando vemos um pequeno arco-íris formado pela água espalhada por um esguicho de regar jardins.

A cor de maior inclinação é o vermelho, e a de menor inclinação é o violeta.

Raio de luz



1 Cores de saída

O raio de luz entra na gota, divide-se em sete cores e reflete na parede interna. Cada raio de cor sai em diferentes ângulos ou direções. O vermelho, por exemplo, é de 40°

3 Os sete semicírculos

Os olhos do observador estão no vértice dos raios coloridos que chegam das gotas. Como os raios partem delas com um ângulo de inclinação, o observador só pode ver as cores em semicírculos

2 Posição favorável

Uma pessoa pode perceber somente uma cor de cada gota, pois seus raios coloridos partem para várias direções. As sete cores correspondem a sete conjuntos diferentes de gotas no céu

Dados obtidos em: <ciencia.hsw.uol.com.br>. Acesso em: 22 mar. 2016.



Nossa opção didática foi, neste momento do curso, não desenvolver os conceitos sobre as cores dos objetos.

Os alunos ainda não conhecem a teoria ondulatória e os elementos a ela associados, tais como frequência, comprimento de onda etc. e, por isso, julgamos que as explicações sobre as cores dos objetos ficariam demasiadamente superficiais. Sabemos, no entanto, que a dispersão da luz em um prisma desperta nos alunos curiosidade sobre a composição de cores do espectro visível. Assim, certos de que essa vontade de conhecer dos alunos não deve ser ignorada, propomos o experimento a seguir para demonstração em sala de aula.

Misturas das cores

Dissemos, ao longo do capítulo, que a luz branca pode ser dividida em vários componentes. Nossos olhos só conseguem enxergar uma faixa do espectro. Ao dividir essa faixa do espectro, denominada óptica ou visível, veremos que seus componentes correspondem exatamente às cores que observamos.

Pensando nisso, uma das perguntas que podemos fazer aos alunos é se o processo contrário também é verdadeiro, ou seja: se misturarmos as cores, obteremos o branco? Para observar esse processo, propomos mais um experimento a ser demonstrado em sala de aula com os alunos divididos em grupos. Se houver material para todos os grupos, você poderá apenas orientar a investigação dos estudantes.

Acessando o endereço <www.pontociencia.org.br>; acesso em: 22 mar. 2016, digita-se “sabre de luz” na caixa de busca e em seguida seleciona-se o link com esse título.

Tanto a ideia como a execução desse experimento são muito simples.

Material

- Quatro béqueres (podem ser substituídos por potes plásticos); tesoura; tubos de ensaio; quatro conta-gotas; bastões luminescentes de cores diferentes (azul, verde e vermelho).

Procedimento

Ative os bastões e chacoalhe-os. Quando eles já estiverem brilhando, corte a extremidade de cada um deles e despeje o material neles contido em béqueres ou pequenos potes, separando cada cor em um recipiente diferente. Você vai precisar de um conta-gotas para cada pote. Usando os conta-gotas, você poderá misturar quantidades aproximadamente iguais de cada cor. A página do experimento dá uma sugestão interessante quanto à sequência das cores a serem adicionadas. Não esqueça de perguntar aos alunos como eles explicam o que observam. O resultado está de acordo com o que eles esperavam?

Deve-se levar os alunos a perceberem a importância do estudo das cores tanto para a tecnologia como para as artes. Eles certamente já devem ter se impressionado com o resultado da composição de cores em um quadro que acharam bonito, por exemplo, mas talvez não saibam que a composição das cores no monitor do computador segue o mesmo princípio.

CAPÍTULO 14

Lentes esféricas: formação de imagens

ou: *É possível obter fogo usando gelo?*

1 Habilidades a serem desenvolvidas

- Estabelecer a trajetória da luz ao atravessar lentes esféricas, identificando os processos que explicam o percurso.
- Classificar e identificar as lentes convergentes e divergentes.
- Obter graficamente as imagens de objetos colocados no eixo principal da lente, a partir de dois raios de luz principais.

O ensino de Óptica apresenta possibilidades interessantes de demonstrações práticas, uma vez que lentes, espelhos e fontes luminosas são acessíveis e fazem parte do cotidiano dos alunos. Assim, é interessante pôr em prática uma série de situações descritas tanto no livro-texto como nos exercícios.

Uma maneira razoavelmente simples de demonstrar as situações propostas é a utilização dos chamados bancos ópticos.

Há no mercado bancos ópticos montados por empresas especializadas, mas que podem ser muitas vezes inacessíveis ao professor e à escola. Uma alternativa de fácil construção e de baixo custo é sugerida pelo artigo publicado na revista *Física na Escola*, v. 5, n. 1, 2004, disponível no endereço: <www.sbfisica.org.br/fne/Vol5/Num1/v5n1a04.pdf>; acesso em: 22 mar. 2016, que descreve as etapas de construção de um banco óptico, além de trazer o material necessário (lentes, espelhos, base deslizante, fonte de luz e anteparo), em geral facilmente encontrado. O destaque da proposta justifica-se pelo acabamento e excelente visual. Vale lembrar que a montagem do instrumento pelos alunos favorece a participação e o envolvimento de todos. A própria construção constitui atividade complementar, que pode ser realizada pelo professor.

2 Sobre a questão introdutória



A pergunta tem por objetivo problematizar o assunto do capítulo relacionando o conhecimento prévio dos alunos com os conceitos e temas que serão desenvolvidos. Assim, peça a alguns deles que leiam em voz alta as respostas que julgam prováveis para a questão. Monte uma lista com algumas das respostas ou recolha várias delas para analisá-las e discuti-las com a classe ao final do capítulo. Desse modo, os alunos poderão reconhecer mais claramente nos novos conhecimentos aprendidos os elementos essenciais para responder com mais propriedade à pergunta inicial.

3 Orientações para o trabalho dos conteúdos



A natureza convergente ou divergente de uma lente biconvexa depende dos valores relativos entre seu índice

de refração e o do meio no qual está imersa. Para tal diferenciação, indicamos um artigo publicado no *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 16, n. 3, p. 349-352, dez. 1999, disponível no endereço: <www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/viewFile/6801/6281>. Acesso em: 22 mar. 2016.

CAPÍTULO 15

Lentes esféricas: estudo analítico

ou: Uma lente de aumento pode reduzir o tamanho da imagem?

1 Habilidades a serem desenvolvidas

- Calcular a posição e o tamanho de uma imagem utilizando a equação de Gauss.
- Reconhecer a dioptria como uma unidade presente no mundo vivencial das pessoas que usam óculos.
- Identificar as alterações de natureza da imagem a partir da determinação da posição do objeto diante da lente.

O Capítulo 15 aborda o estudo analítico das lentes esféricas. Optamos por um tratamento do tema que não se restrinja apenas à parte matemática, pois julgamos que são possíveis as aplicações do assunto relacionadas ao mundo vivencial do aluno. Por esse motivo, apresentamos a equação dos fabricantes de lentes somente neste *Suplemento*, deixando para o professor a decisão de incluir ou não esse conteúdo em seu curso.

2 Sobre a questão introdutória



A pergunta visa problematizar o assunto do capítulo relacionando o conhecimento prévio do aluno com os conceitos e temas que serão desenvolvidos. Assim, peça a alguns deles que leiam em voz alta as respostas que julgam prováveis para a questão. Monte uma lista com algumas das respostas ou recolha várias delas para analisá-las e discuti-las com a turma ao final do capítulo. Desse modo, os alunos poderão reconhecer mais claramente nos novos conhecimentos aprendidos os elementos essenciais para responder com mais propriedade à pergunta inicial.

Eles, então, deverão voltar a responder, de preferência por escrito, à questão problematizadora do início do capítulo. Depois, em grupo, poderão comparar as respostas dadas nas duas ocasiões e produzir uma resposta final única elaborada a partir da troca de ideias entre os integrantes do grupo.

3 Orientações para o trabalho dos conteúdos

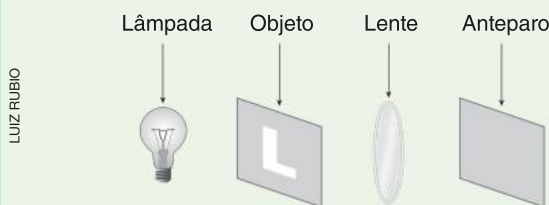


A aplicação da equação de Gauss a uma situação concreta facilitará sua compreensão pelos alunos. Sugerimos, a seguir, um experimento que cumpre essa função e que pode ser feito em grupo ou utilizado como demonstração pelo professor.

Determinação da distância focal de uma lente

Para determinar a distância focal de uma lente convergente, utilizaremos uma fonte de luz, cartolina, tesoura ou estilete e uma lente.

Em um pedaço de cartolina, recorta-se uma figura (recomenda-se a forma de um L); a cartolina vazada será usada como objeto luminoso. Outro pedaço de cartolina deverá servir de anteparo, onde a imagem será projetada depois da lente. A montagem geral é feita enfileirando a fonte de luz, o objeto (cartolina vazada), a lente e o anteparo, conforme a figura:



Os componentes podem ser fixados com massa de modelar, por exemplo. Mexendo no sistema, é possível encontrar uma imagem invertida projetada no anteparo.

Após obter a imagem, medir com uma régua o tamanho do objeto (L), da imagem e as distâncias objeto-lente (p) e lente-imagem (p'). De posse das medidas e com uma escala apropriada, deve-se representar a montagem em um papel milimetrado, indicando o raio de luz paralelo ao eixo principal (ou óptico) que sai do topo do objeto e atravessa a lente, sendo desviado e indo atingir a extremidade inferior da imagem invertida. A distância focal é encontrada pela distância entre a lente e o cruzamento desse raio com o eixo óptico.

Para confirmar o valor obtido, é preciso variar a posição do anteparo até que a imagem se reduza a um ponto ou próximo a um ponto (sendo a imagem a menor possível). Nessas condições, a distância entre anteparo e lente é a própria distância focal.

Para discussão

A lei de Gauss relaciona a distância focal com as distâncias objeto-lente e imagem-lente. No aparato experimental, é possível deixar a distância objeto-lente fixa e variar a distância imagem-lente. Uma vez que a distância focal depende apenas da geometria da lente, como você explica tal fato? E como pode ser usada a lei de Gauss para determinar a distância focal?

Observações

1. Cuidado ao usar objetos cortantes.
2. O "L" recortado não deve ser maior que o diâmetro da lente. Caso isso ocorra, não será possível determinar o tamanho da imagem, pois o objeto não será inteiramente projetado no anteparo.
3. Também é interessante determinar outros valores característicos da lente, como o aumento e a convergência.

Adaptado de: <<http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/bitstream/handle/mec/7919/lentes.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 30 mar. 2016.



Quando procuramos por atendimento médico por causa de uma queda ou pancada forte, é bastante comum o médico solicitar uma radiografia (raios X) para diagnosticar se houve ou não fratura.

Além das radiografias, existem outros exames baseados em imagens: ressonância magnética, tomografia, cintilografia, ultrassonografia, Doppler, entre outros.

O interessante é que todos esses recursos se baseiam em processos físicos bastante familiares a um físico especializado em medicina ou a um médico radiologista, mas que eventualmente podem nos parecer bem difíceis de compreender. Como se popularizaram, sobretudo pela menção frequente na mídia, esses exames são alvo de muita curiosidade por parte dos alunos.

Sugerimos a leitura de um artigo do periódico *Gazeta da Física*, uma publicação da Sociedade Portuguesa de Física, "A Física da imagem", de João José Pedroso de Lima, volume 30, fascículo 1, janeiro de 2007, disponível em: <<http://goo.gl/7ubk6o>>; acesso em: 2 maio 2016.

O artigo traz uma série de informações interessantes, desde a abordagem histórica do desenvolvimento das imagens de uso médico até uma explicação detalhada dos processos físicos envolvidos em cada um dos tipos de imagem fornecidos pelos aparelhos.

Após a leitura, convém incentivar os alunos a descobrir outras possibilidades de formação de imagens que não sejam necessariamente ópticas.

Várias outras técnicas se desenvolveram ao longo do tempo, e apresentá-las aos alunos poderá enriquecer a aula, além de ampliar o conhecimento da unidade, favorecendo o interesse pela Física. Talvez alguns alunos já tenham sido submetidos a exames que utilizam alguma das técnicas descritas no artigo. Como complemento da leitura, profissionais que trabalham diretamente com esse tipo de especialidade, como médicos radiologistas e físicos, poderão ser convidados a comparecer à escola para discutir com mais profundidade o assunto.

Se julgar adequado o trabalho com a equação dos fabricantes de lentes, indicamos a seguir uma questão a ser resolvida pelos alunos.

Equação dos fabricantes de lentes

Na lente esférica, a distância focal f depende do material que a constitui e do meio no qual ela está imersa. Sabe-se também que, por exemplo, nas lentes convergentes, quanto menores forem os raios de curvatura de suas faces, menor será o valor da distância focal e maior o tamanho da imagem produzida.

Assim, conhecendo os índices de refração n_L e n_{meio} , respectivamente da lente e do meio, é possível determinar a vergência V da lente, conhecendo os raios de curvatura R_1 e R_2 de suas faces.

A expressão que permite esse cálculo é chamada também de equação de Halley, em homenagem ao astrônomo inglês Edmond Halley (1656-1742), e é dada por:

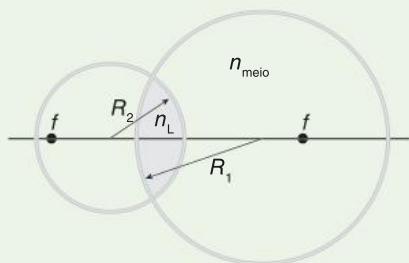
$$V = \frac{1}{f} = \left(\frac{n_L}{n_{\text{meio}}} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Para essa equação, adota-se a seguinte convenção de sinais para os raios de curvatura R_1 e R_2 :

face côncava → raio negativo ($R < 0$)

face convexa → raio positivo ($R > 0$)

face plana → raio infinito ($\frac{1}{R} = 0$)



Na lente biconvexa, os valores de R_1 e R_2 são positivos.

Exercício

Calcule a distância focal de uma lente biconvexa simétrica de vidro ($n = 1,5$), sabendo que o raio de curvatura de suas faces é igual a 25 cm. Considere que ela esteja imersa:

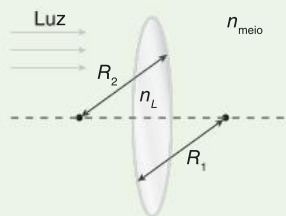
a) no ar ($n_{\text{ar}} = 1$);

b) em um meio de índice de refração igual a 2.

Resolução

a) Devemos utilizar a equação dos fabricantes sabendo que os raios de curvatura são iguais, pois a lente é biconvexa simétrica.

LUÍZ RUBIO



Logo: $R_1 = R_2 = 25 \text{ cm}$

Aplicando a equação, temos:

$$V = \frac{1}{f} = \left(\frac{n_L}{n_{\text{meio}}} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{1}{f} = \left(\frac{1,5}{1} - 1 \right) \left(\frac{1}{25} + \frac{1}{25} \right) \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{25}$$

$\therefore f = +25 \text{ cm}$

Ou seja, trata-se de uma lente convergente.

b) Temos $n_{\text{meio}} = 2$ e $n_L = 1,5$. Substituindo na equação dos fabricantes, resulta em:

$$V = \frac{1}{f} = \left(\frac{n_L}{n_{\text{meio}}} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{1}{f} = \left(\frac{1,5}{2} - 1 \right) \left(\frac{1}{25} + \frac{1}{25} \right) \Rightarrow \frac{1}{f} = -\frac{1}{50}$$

$\therefore f = -50 \text{ cm}$

Trata-se, agora, de uma lente divergente.

Observe que, se o meio exterior é mais refringente que o meio da lente, a lente que era convergente no ar passa a ser divergente no meio de maior índice de refração.

CAPÍTULO 16

Instrumentos ópticos e óptica da visão

ou: Por que os telescópios terrestres modernos são construídos em locais muito elevados?

1 Habilidades a serem desenvolvidas

- Classificar os instrumentos ópticos pela sua utilização relacionada à ampliação ou à aproximação do objeto.
- Identificar nos instrumentos ópticos apresentados os princípios de propagação da luz e os processos de obtenção de imagem para os quais as lentes são essenciais.
- Distinguir os principais elementos do olho humano e sua importância para o processo de visão.
- Reconhecer os problemas de visão mais comuns e as lentes usadas para solucioná-los.

O Capítulo 16 apresenta as aplicações mais conhecidas do uso de lentes esféricas. O fato de as imagens

dos objetos se formarem em nosso olho de maneira análoga às conjugadas por uma máquina fotográfica reforça nossa opção de incluir a óptica da visão no mesmo capítulo dedicado a alguns instrumentos ópticos.

A fotografia popularizou-se muito com o advento da câmara digital. Atualmente, telefones celulares dispõem de câmaras que tiram fotografias com nitidez e resoluções comparáveis às das antigas máquinas analógicas profissionais. Decidimos não nos deter nas diferenças entre as câmaras analógicas e as digitais, visto que ambas são dotadas de uma série de recursos que dependem da qualidade das lentes (se há grande aberração cromática), do tipo de focalização, do tipo de *zoom* etc. O fundamental é incentivar os alunos a reconhecer que, independentemente do tipo de máquina, a formação da imagem segue o mesmo princípio. Como se trata de um assunto que costuma interessá-los, pode-se aprofundar o tema. O artigo “Qual é o ‘campo de visão’ da objetiva de uma câmara fotográfica?”, do prof. Francisco Catelli e outros, publicado no *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 26, n. 2: p. 314-327, ago. 2009, disponível no endereço: <www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/download/11326/10897>; acesso em: 28 abr. 2016, aborda a questão de maneira interessante e fornece alguns elementos teóricos e técnicos que certamente enriquecerão a discussão.

2 Sobre a questão introdutória



Para o desenvolvimento do conteúdo deste capítulo, parece-nos apropriado voltar aos telescópios, mais precisamente ao Hubble, utilizando, para isso, as respostas dos alunos à questão que abre o capítulo.

O texto a seguir traz mais informações sobre o Hubble. Se considerar oportuno, providencie cópias para os alunos e discuta com eles a questão do início do capítulo a partir da leitura.

Telescópio Hubble

A grande importância do Telescópio Espacial Hubble (nome dado em homenagem ao astrônomo norte-americano Edwin Powell Hubble, 1889-1953) está no fato de ele estar fora da atmosfera da Terra. Trata-se de um telescópio refletor (seu elemento óptico principal é um espelho) com 2,40 m de diâmetro. Se fosse um telescópio de solo, seria considerado de porte médio. O Hubble está em uma órbita baixa, a 600 km da superfície da Terra, e gasta apenas 95 minutos para dar uma volta completa em torno de nosso planeta.

Na ativa desde 1990, o Hubble já completou mais de 100 mil órbitas e forneceu para astrônomos dados sem igual, impossíveis de serem obtidos

por telescópios na Terra. As informações permitiram aos cientistas, por exemplo, calcular a idade do Universo em 13,7 bilhões de anos, determinar que o processo de formação de planetas é relativamente comum e detectar moléculas orgânicas na atmosfera de um planeta fora do Sistema Solar.

Em maio de 2009, astronautas americanos realizaram o quinto e último conserto do Hubble.

Com a recauchutagem, a Nasa espera que o Hubble funcione por mais cinco a dez anos – e melhor do que nunca. As novas câmeras são mais potentes do que as antigas e permitirão aos cientistas observarem cantos inexplorados do universo.



Indicamos a consulta ao *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 11, n. 3, dez. 1994, artigo “A luneta com lente de óculos”, disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/viewFile/7148/6603>>; acesso em: 28 abr. 2016, no qual o professor João Batista Garcia Canalle indica como construir uma luneta astronômica, didática, de baixo custo, que usa lente de óculos de 1 grau no lugar da objetiva e monóculo de fotografia no lugar da ocular. O corpo da luneta é feito de canos e conexões de PVC. Além disso, também se sugere a construção de um tripé, fundamental para o sucesso da observação.

Vale a pena ler o artigo e propor aos alunos a construção de uma ou duas lunetas por turma. Caso estudem à noite, poderão aproveitar o próprio horário de aulas para observar o céu.

O horário das aulas pela manhã não deve ser empecilho para a observação, pois os alunos poderão levar a luneta para casa, revezando seu uso e relatando suas observações para a classe. É possível construir um diário dos comentários dos alunos sobre o que viram no céu com a luneta.

Pode-se também construir uma luneta de acordo com o artigo “Simplificando a luneta com lente de óculos”, também do professor João Batista Garcia Canalle, disponível em: <www.fsc.ufsc.br/cbef/port/22-1/artpdf/a7.pdf>; acesso em: 28 abr. 2016.

3 Orientações para o trabalho dos conteúdos



No site: <http://www.fisica.net/simulacoes/java/walter/ph11br/refractor_br.php>; acesso em: 28 abr. 2016, é possível simular um telescópio astronômico refrator (invertido) simples, constituído por duas lentes denominadas objetiva e ocular. Os raios de luz que incidem na objetiva são refratados por ela e pela ocular e atingem o olho da pessoa que está olhando pelo telescópio.



A questão desse “Explore” propõe a reflexão sobre o mecanismo de formação da imagem dos objetos na retina.

Peça aos alunos que façam um esquema de como imaginam que a imagem é conjugada.

A aprendizagem será favorecida se for possível construir um modelo de olho humano que permita a formação de imagens por meio de lentes convergentes. O tema pode ser explorado com a orientação do professor de Biologia, que pode abordar com os alunos o estudo do olho e de seus principais componentes, bem como do processo de detecção de imagens. Sugerimos construir um modelo com uma esfera de isopor de aproximadamente 25 cm de diâmetro, onde serão acopladas lentes de óculos de diversos graus. No fundo do “olho” cola-se um anteparo de papel vegetal translúcido. Uma lente convergente simula a córnea e a lente do olho (anteriormente chamada cristalino), convergindo a luz emitida por um objeto brilhante. A imagem será formada na “retina” de papel vegetal. Você pode calcular a dioptria das lentes para obter a representação de um olho míope e hipermetrope, com imagens sendo formadas antes e depois do “fundo do olho”. Um sistema conjugado de lentes pode corrigir essas anomalias. Os alunos poderão calcular as dioptrias das lentes. Você pode manipular o modelo de maneira a propor novos desafios aos alunos, estabelecendo representações baseadas em verificações experimentais. Os esquemas de trajetórias dos raios de luz passam a ter maior significação, sobretudo por serem produzidos a partir da confirmação experimental.



Atividade: Receita de óculos para o Mr. Magoo

Mr. Magoo é um personagem bastante conhecido tanto do cinema quanto dos desenhos animados: é bastante carismático e com sérias dificuldades para enxergar.

Nesta atividade o aluno poderá se colocar no lugar do oftalmologista de Mr. Magoo e ajudá-lo a encontrar a lente que ele usará como óculos. Para iniciar, o estudante deve acessar o seguinte endereço da internet: <www.labvirt.fe.usp.br/simulacoes/fisica/sim_otica_magoo.htm>; acesso em: 28 abr. 2016. Depois disso, basta avançar nas diferentes janelas da simulação e bancar o oftalmologista de Magoo.



Pacientes jovens com catarata podem, com mais frequência que os mais velhos, apresentar problemas de adaptação às lentes intraoculares, implantadas para correção do problema. As lentes agem como um prisma, dispersando o feixe de luz nas cores do espectro, o que causa uma falha na imagem, chamada – como sabemos – de aberração cromática. Em pacientes mais idosos, cujas pupilas, menores, praticamente impedem a dispersão dos raios de luz, grande parte dessa aberração é suavizada.

Os jovens, porém, veem as imagens desfocadas. Para resolver o problema, pesquisadores desenvolveram um novo tipo de lente intraocular que focaliza

apenas uma cor. O ponto em que todas as cores convergem é o mesmo, eliminando a aberração cromática.



Embora a atividade seja simples, ela permite uma ampliação de até 1.000 vezes dos microrganismos e impurezas presentes na gota de água. Além disso, é uma ótima oportunidade para desenvolver um trabalho conjunto com a disciplina de Biologia. Os alunos poderiam descrever os microrganismos presentes em gotas de água de diferentes fontes, por exemplo, a água filtrada, a água que passa pela tubulação das casas e a água de rios e córregos poluídos. Esse trabalho certamente enriquecerá as aulas de Física e Biologia. Além disso, é possível abordar temas relacionados à história da ciência, como de que maneira o desenvolvimento das técnicas de microscopia possibilitaram novas descobertas nos campos da medicina e da Biologia.



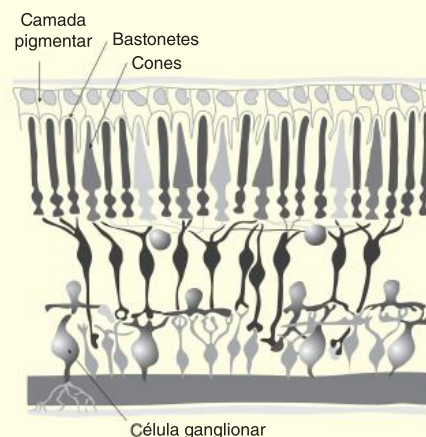
Sugerimos começar a discussão pela pergunta inicial da seção.

Pode-se, por exemplo, questionar os alunos se já ouviram esse tipo de aviso com relação à leitura em local com pouca iluminação. Depois de discutir com a turma os defeitos da visão apresentados no capítulo, pode-se perguntar quais desses defeitos poderiam ser associados à baixa luminosidade. A atividade é uma boa oportunidade para o aluno conhecer o funcionamento da retina e suas células altamente especializadas na coleta de luz. Esse assunto complementa o conteúdo deste capítulo.

Respostas das questões para discussão em grupo

1. Resposta pessoal.
2. A retina tem uma constituição muito complexa e é uma parte vital para nossa capacidade de enxergar. Sua principal função é receber e transmitir imagens para o cérebro e, para isso, há três tipos principais de células que a auxiliam:

- bastonetes;
- cones;
- células ganglionares.



LUÍZ RUIBO

Há na retina cerca de 125 milhões de bastonetes e cones que atuam como receptores de luz (fotorreceptores) para os olhos. Os bastonetes são os mais numerosos entre os dois fotorreceptores (superando os cones em uma proporção de 18 para 1) e são capazes de funcionar mesmo com pouca luz, criando imagens em preto e branco na penumbra. Mas, quando há bastante luz (por exemplo, a luz do dia ou luz artificial em uma sala), são os cones que entram em ação e nos dão a capacidade de enxergar cores e detalhes de objetos. Os cones são os responsáveis pela habilidade de ler, já que permitem ver em alta resolução. As informações recebidas pelos bastonetes e cones são então transmitidas para cerca de um milhão de células ganglionares da retina, que interpretam as mensagens enviadas e reenviam essas informações para o cérebro pelo nervo ótico.

3. Os oftalmologistas afirmam que iluminação deficiente faz com que os olhos se cansem mais depressa, uma vez que para ter boa visão é necessário que haja contraste entre as letras e o papel, o que não ocorre com pouca claridade. Além do

cansaço, a falta de iluminação pode causar dores de cabeça. No entanto, eles também afirmam que ler na penumbra não prejudica a visão. Como foi dito anteriormente, os bastonetes são células preparadas para funcionar mesmo com pouca luz.

4. Os defeitos da visão vistos nesta unidade estão relacionados à formação da imagem sobre a retina, causados pela projeção incorreta dos raios de luz sobre ela. No entanto, a quantidade de luz que incide sobre a retina não tem relação com esses defeitos.

Para a apresentação dos resultados do teste pedido no “Socialize”, cada grupo deve preparar uma apresentação, com duração máxima de 5 minutos, utilizando a tabela e o gráfico solicitados. Os grupos devem descrever o tipo de público que participou do teste (número de pessoas por faixa etária) e quantos casos houve de dificuldade de leitura. A confecção e a interpretação de gráficos são habilidades fundamentais na formação dos alunos. Além disso, é importante trabalhar a habilidade de exposição e argumentação oral, utilizando, no caso, a análise de uma construção gráfica.

UNIDADE 5

Oscilações e ondas



Abertura da unidade



A seguir, apresentamos o que se espera dos alunos ao final desta unidade e uma proposta para introdução dos conteúdos.

Objetivos:

Ao final desta unidade, o aluno deverá ser capaz de:

- Reconhecer movimentos oscilatórios periódicos, entre eles o movimento harmônico simples.
- Reconhecer ondas unidimensionais em cordas, classificá-las e determinar graficamente seu período e frequência.
- Estudar o movimento das ondas aplicando a equação fundamental da Ondulatória.
- Distinguir os diversos fenômenos ondulatórios: reflexão, refração, difração e interferência.
- Conceituar ondas sonoras, conhecer os limites da audição humana e reconhecer a mudança da velocidade de propagação do som conforme o meio.

- Definir efeito Doppler e calcular a frequência percebida pelo observador em qualquer configuração em relação à fonte sonora.

A divisão dos tópicos desta unidade teve o intuito de focalizar os conceitos fundamentais do movimento ondulatório partindo de modelos simplificados, como os movimentos de uma onda em uma corda (movimento unidimensional). Na sequência, à medida que o aluno se apropria dos diversos conceitos que descrevem esse tipo de onda, apresentam-se modelos mais sofisticados, como ondas bidimensionais e tridimensionais.

Assim, os fenômenos associados à interação das ondas com obstáculos e com outras ondas são expostos quase sempre através do estudo do movimento ondulatório em líquidos, pela facilidade de visualização. Os conceitos e as concepções compreendidos a partir de sua aplicação em modelos mais simplificados poderão facilitar a interpretação dos modelos mais complexos.

O Capítulo 17 aborda o movimento harmônico simples, uma aproximação do movimento realizado pelas

partículas de um meio material, como a água ou o ar, que dá suporte ao movimento ondulatório. É importante ressaltar que essa aproximação desconsidera os efeitos do atrito no meio material, que atenuam a propagação da onda. A consequência seria um movimento ondulatório indefinido. O movimento harmônico simples é um dos mais estudados pela Física, uma vez que diversos sistemas físicos, nas mais diferentes escalas, executam esse tipo de movimento.

Como exemplos, podemos citar o movimento de vibração molecular, os movimentos sísmicos ou os movimentos de estruturas como pontes e edifícios.

Esse capítulo também traz a descrição do movimento ondulatório propriamente dito, a partir de um modelo simplificado de ondas em uma dimensão, ou seja, ondas em uma corda. Essa metodologia facilita a compreensão de conceitos importantes para o movimento ondulatório, como o reconhecimento do movimento das partículas do meio (partes da corda) como um movimento harmônico simples. Além disso, esclarece uma de suas principais características: apenas a energia da onda é transportada, não havendo transporte de matéria.

Os diversos fenômenos decorrentes das interações entre uma onda e outra e entre ondas e obstáculos são tratados nesse capítulo e servem de base para a discussão a respeito da natureza da luz: ondulatória ou corpuscular.

O Capítulo 18 é dedicado a uma das mais impressionantes formas de arte produzidas pelo homem: a música. Esse é um tema muito próximo dos alunos, o que provavelmente facilitará a compreensão dos conceitos apresentados. Convém estimulá-los a manifestar suas concepções prévias sobre música, aproveitando a curiosidade própria do jovem sobre esse assunto. Nossa abordagem pretende mostrar como a Física pode ajudar a construir uma arte tão bela. Para isso, começamos discutindo as diversas qualidades do som que nos permitem distinguir suas diferentes formas. Em seguida, apresentamos a teoria física que descreve os sons produzidos por instrumentos de corda e de sopro, mas apenas de forma qualitativa, uma vez que privilegiamos a compreensão fenomenológica do assunto.

O fenômeno estudado logo depois, efeito Doppler, é percebido em diversas ocasiões, seja quando a fonte está em aproximação e o observador parado, seja quando a situação é contrária.

Para começo de conversa: *É possível estar em um show de rock e não escutar a música?*

A pergunta visa dar início à discussão sobre movimento ondulatório. Essa questão certamente causará polêmica, sobretudo por implicar aspectos aparentemente antagônicos da natureza dos fenômenos sonoros: como é possível não escutar a música tocada por um grupo de *rock* que, geralmente, é emitida em uma intensidade muito elevada? Nesse

caso, isso ocorre pelo fenômeno da interferência, que pode formar regiões de reforço inadequado do som, bem como de ausência dele; mas, nesse momento, é mais adequado levantar as respostas pensadas pelos alunos, discutindo-as posteriormente, conforme for avançando o estudo dos capítulos.

Convite à reflexão

Os alunos devem responder às questões do “Convite à reflexão” a partir de suas ideias sobre o assunto, sem o compromisso de uma resposta correta.

- Por que conseguimos escutar uma pessoa conversando com outra mesmo quando elas estão atrás de um muro? E por que não podemos vê-las?
- É possível não ouvir um som muito alto?
- Por que o som do motor de um carro se torna grave ao passar por nós?

A primeira questão propõe discutir um fenômeno bastante comum no dia a dia. Conseguimos ouvir duas pessoas conversando atrás de um muro, mas não conseguimos vê-las. Esse exemplo aparentemente mostra que o som tem a capacidade de se difratar e a luz não. Peça aos alunos que formulem hipóteses para explicar a diferença de comportamento entre o som e a luz. Caso eles respondam que os dois não se movimentam da mesma maneira, mencione a representação geométrica da luz e pergunte se essa representação é coerente com o fenômeno da difração.

Ao apresentar fenômenos como a reflexão e a refração de ondas, convém chamar a atenção dos alunos para o fato de que as leis que descrevem corretamente esses dois fenômenos são as mesmas tanto para a luz quanto para o som. A partir desse ponto, pode-se iniciar a discussão sobre a natureza da luz. Acreditamos que a estratégia anteriormente descrita de mostrar o comportamento contraditório da luz estimulará os alunos a refletir mais profundamente sobre a questão de sua natureza. Esse comportamento estranho provocou um dos maiores debates na Física, que durou cerca de 150 anos.

A segunda questão parte de uma correlação estabelecida frequentemente pelos alunos, que costumam relacionar a altura de um som à sua intensidade sonora. Pergunte se já ouviram esta reclamação: “O som está muito alto. Abaixem o som!”. O objetivo da pergunta é colocar em dúvida essa concepção prévia. Uma vez discutida e esclarecida a questão, convém chamar a atenção dos alunos para a distinção que deve ser feita entre a linguagem científica e a linguagem do cotidiano. Eles devem saber distinguir em quais situações alguns erros conceituais são permitidos em favor da compreensão da linguagem.

A última pergunta pretende abordar um fenômeno muito comum em nosso cotidiano, o efeito Doppler. A própria pergunta já desperta a curiosidade dos alunos.

A pouca familiaridade com o movimento ondulatório trará, provavelmente, dificuldades para a interpretação do fenômeno. A construção das noções desse movimento, a partir de modelos simplificados, dará ao aluno a possibilidade de responder com clareza a essa pergunta.

CAPÍTULO 17

Fenômenos ondulatórios

ou: Por que a suspensão de um automóvel necessita de amortecedores associados às molas para funcionar?

1 Habilidades a serem desenvolvidas

- Reconhecer movimentos oscilatórios e periódicos, entre eles o movimento harmônico simples.
- Reconhecer o modelo do oscilador massa-mola como adequado para simular fenômenos oscilatórios.
- Identificar o movimento do pêndulo simples como uma aproximação do movimento harmônico simples para pequenos ângulos de deslocamento.
- Distinguir quais parâmetros físicos de um pêndulo simples determinam seu período e frequência.
- Perceber que o movimento ondulatório transporta apenas energia, sem que haja transporte de matéria.
- Identificar os parâmetros que definem o movimento ondulatório, como frequência, período, amplitude e comprimento de onda.
- Reconhecer que a velocidade de uma onda depende do meio no qual ela se propaga.
- Estabelecer a dependência da frequência de uma onda unicamente relacionada à frequência da fonte.
- Relacionar parâmetros da onda como frequência e comprimento de onda através da equação fundamental da Ondulatória.
- Identificar fenômenos ondulatórios como reflexão, refração, difração e interferência.
- Reconhecer a luz como fenômeno ondulatório.

Ao conceituar o movimento harmônico simples, optamos por associar esse movimento a um tema que costuma despertar muito interesse nos alunos: os automóveis. A questão de abertura do capítulo convida-os a trazerem para a sala de aula o que já pensam sobre o assunto. Além disso, é uma oportunidade de identificar a presença desse tipo de movimento no cotidiano deles. Por exemplo, pergunte qual é a função

de um amortecedor em um sistema de suspensão. Alguns talvez percebam que a função desse elemento é atenuar o movimento de oscilação provocado pelas molas. Mas, como nem todos entendem a ação de um amortecedor na suspensão de um veículo, inicie a discussão sobre a questão perguntando o que aconteceria com o carro caso não houvesse as molas associadas em sua suspensão. A ideia é levá-los a perceber que o sistema de fixação das rodas sofreria impactos muito fortes com a ausência de molas e seria danificado.

Deve-se chamar a atenção para o fato de que um sistema de molas associadas à suspensão reduz impactos causados pelos terrenos, mas provoca um inconveniente: o movimento de oscilação vertical demorado que o carro faria após qualquer impacto.

É importante ressaltar que o movimento harmônico simples pode modelar vários fenômenos físicos, como é citado na introdução do capítulo, desde o movimento de moléculas até movimentos sísmicos.

Atualmente é muito comum prédios e pontes receberem amortecedores em suas fundações para evitar os danos decorrentes do movimento vibratório das estruturas com a passagem de veículos, especialmente os mais pesados.

É recomendável enfatizar a relação entre a grande quantidade de fenômenos oscilatórios (movimento molecular, de estruturas e construções, movimentos sísmicos etc.) e a capacidade de o oscilador massa-mola simular esses fenômenos, permitindo aos físicos extrair importantes informações sobre ele.

Pode-se aproveitar a questão introdutória do capítulo para atingir os objetivos imaginados na sua proposição, apresentados na parte geral deste *Suplemento*.

2 Sobre a questão introdutória



O objetivo da pergunta é problematizar o assunto do capítulo, relacionando as concepções prévias dos alunos com os conceitos e o tema desenvolvidos. Assim, peça a alguns deles que leiam em voz alta as respostas que julgam prováveis para a questão. Monte uma lista com algumas dessas respostas ou recolha várias para analisá-las e discuti-las com a turma ao final do capítulo. Desse modo, os alunos poderão reconhecer mais claramente nos novos conhecimentos aprendidos os elementos essenciais para responder com mais qualidade à pergunta inicial.

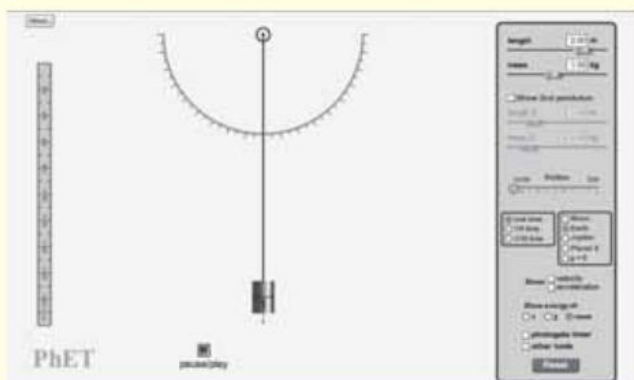
Os alunos deverão responder novamente, de preferência por escrito, à questão problematizadora do início do capítulo. Depois, em grupo, poderão comparar as respostas dadas nas duas ocasiões e produzir uma resposta final única construída a partir da troca de ideias entre seus integrantes.

3 Orientações para o trabalho dos conteúdos



O site <http://phet.colorado.edu/sims/pendulum-lab/pendulum-lab_en.html>; acesso em: 31 mar. 2016, apresenta um simulador de pêndulo simples no qual é possível alterar diversos parâmetros. Na parte de cima da caixa de diálogo, em verde, há dois botões que permitem alterar o comprimento e a massa do pêndulo. Outros botões podem regular a intensidade da força de atrito, modificar a aceleração da gravidade de maneira a transportar o pêndulo para a Lua ou para o planeta Júpiter e até simular o comportamento do pêndulo na ausência da força de atração gravitacional. A caixa de diálogo permite verificar ainda a variação de vários tipos de energia envolvidos no movimento, tais como a energia cinética, potencial gravitacional e térmica. Além disso, é possível mostrar os vetores velocidade e aceleração durante o percurso do pêndulo.

Essa atividade poderá ser desenvolvida na sala de informática da escola, se houver disponibilidade.



REPRODUÇÃO



Com uma mola tipo *slinky*, pode-se fazer uma demonstração simples para esclarecer o fenômeno da superposição: dois alunos devem segurar firmemente cada uma das pontas da mola mantendo-se separados um do outro. Em seguida, devem produzir pulsos, primeiramente com a mesma fase, evidenciando o aumento da amplitude durante a interação dos pulsos; e, depois, com a fase invertida, mostrando o cancelamento dos pulsos durante a superposição.



O endereço <<http://www.youtube.com/watch?v=Wl1te-QiFXbs>>; acesso em: 31 mar. 2016, apresenta um filme em que ondas planas são geradas e colidem com um obstáculo, produzindo ondas planas que são refletidas em um ângulo determinado pela mesma lei de reflexão da Óptica geométrica. Essa demonstração pode ser assistida na sala de aula, se houver equipamento de projeção, ou na sala de informática da escola. Para tornar clara a relação entre a reflexão de ondas e a reflexão da luz, deve-se mostrar que, no caso da luz, o raio é perpendicular à onda

plana, coincidindo com sua direção de propagação, o que torna as duas representações (frentes de onda plana e raio de luz) equivalentes na descrição do fenômeno.



O fenômeno da refração de ondas pode ser visto no endereço: <www.youtube.com/watch?v=stdi6XJX6gU>; acesso em: 31 mar. 2016. Essa demonstração pode ser vista em sala de aula, se houver equipamento de projeção, ou na sala de informática da escola. Deve-se adotar a mesma estratégia utilizada no caso da reflexão para mostrar a equivalência entre as representações para a luz e para as ondas, considerando agora o fenômeno da refração, embora, neste caso, não seja possível determinar a relação entre as velocidades e os ângulos de incidência e refração.



O texto sobre tsunamis dá uma ideia da quantidade de energia que uma onda pode carregar. Depois de ler o texto, será interessante discutir com os alunos a formação dessas ondas gigantescas. Na época do tsunami de 2004, a mídia mostrou alguns casos de pessoas que estavam em embarcações relativamente próximas ao epicentro do terremoto que gerou a onda e não perceberam sua passagem. Esse fato provavelmente despertará o interesse da turma para o assunto.



O endereço <www.youtube.com/watch?v=4EDr2YY9lyA>; acesso em: 31 mar. 2016, traz um vídeo sobre o fenômeno da difração. Procure exibi-lo em classe juntamente com as ilustrações relacionadas à difração presentes no livro do aluno. Convém chamar a atenção da turma para o fato de que, ao aumentar o tamanho da fenda, a difração se torna menos evidente. O que aconteceria se continuássemos aumentando o tamanho da fenda? Quando diminuimos o comprimento de onda, mantendo o tamanho da fenda, produzimos o mesmo efeito, ou seja, a diminuição da difração?

Após a leitura, sugerimos demonstrar a difração da luz utilizando um apontador *laser* e um fio de cabelo. Fazendo o feixe de *laser* incidir sobre o fio de cabelo e projetando-o na lousa, os alunos poderão ser chamados em pequenos grupos para observar a figura. Deve-se mostrar a eles que se trata de uma figura de interferência formada pela difração da luz.

CAPÍTULO 18

Fenômenos sonoros: a música e o efeito Doppler

ou: Por que se escuta um estrondo sonoro quando um avião supersônico ultrapassa a barreira do som?

1 Habilidades a serem desenvolvidas

- Identificar as qualidades fisiológicas do som, altura e timbre, e diferenciá-las.
- Distinguir intensidade sonora e nível de intensidade sonora.
- Reconhecer que a orelha humana não percebe variações na intensidade sonora de uma fonte de maneira proporcional.
- Reconhecer o fenômeno das ondas estacionárias como responsável pela produção dos sons nos instrumentos musicais de corda e de sopro.

Este capítulo aborda a música para exemplificar as diversas propriedades das ondas sonoras. Sabemos que o tema suscita grande interesse entre os alunos e por isso julgamos possível valorizar os conhecimentos musicais que eles já possuem para introduzir os conceitos relacionados ao som.

Optamos por dividir o capítulo discutindo na primeira seção a maneira como o som é percebido pelo ouvido humano. Ainda nessa parte, apresentamos um conceito que é empregado incorretamente nas situações cotidianas: o da qualidade fisiológica da altura sonora. A maioria das pessoas aplica esse termo ao se referir à intensidade sonora. É muito comum escutarmos o comentário: “O som está muito alto”. Essa distinção pode gerar alguma dificuldade de compreensão por parte dos alunos. Sugerimos que a seção se inicie com o exemplo da diferença entre as particularidades das vozes masculinas e femininas e os casos em que essas características são trocadas. Para evidenciar que a altura do som é um conceito relacionado à frequência, deve-se lembrar aos alunos que é possível “gritar” um som muito baixo (grave) e “sussurrar” um som muito alto (agudo). Recomendamos o uso dos outros exemplos citados no texto do livro do aluno para esclarecer possíveis dúvidas sobre esse assunto.

Outra ideia que pode gerar conflito para os alunos diz respeito à diferença de intensidade com que o ouvido humano percebe o som e a intensidade com que ele é emitido. A abordagem desse conteúdo pode ser feita a partir da seguinte questão: percebemos um som com a mesma intensidade com que ele é emitido? Um bom exemplo a se comentar é o da propagação do som em um estádio de futebol, que costuma despertar o interesse de grande parte da turma.

A seção seguinte trata da forma como a Física explica a produção de som pelos instrumentos musicais de corda e de sopro. A abordagem é fenomenológico-qualitativa, apresentada com o intuito de enfatizar os aspectos relevantes da produção do som, além de destacar que tipo de alterações são feitas nos instrumentos quando se deseja obter notas musicais distintas. Uma mola tipo *slinky* é útil para demonstrar na sala de aula a formação de ondas estacionárias nas cordas de um instrumento.

Peça a um aluno que segure um extremo da mola, enquanto você segura o outro, e produza ondas estacionárias com diferentes números de nós, como na figura a seguir.



PETER CHADWICK/DORLING KINDERSLEY/GETTY IMAGES

Mais adiante sugerimos uma atividade que permitirá aos alunos reconhecer, em um instrumento de corda, de que maneira um músico consegue produzir uma grande variedade de sons, ainda que não haja um grande número de cordas. Convém levá-los a perceber que ondas estacionárias também se estabelecem nas cordas de um violão, do mesmo modo que na mola *slinky*.

Na sequência do capítulo, discutimos a produção de sons por instrumentos musicais de sopro.

2 Sobre a questão introdutória



A pergunta visa dar início à discussão sobre movimento ondulatório abordando o fato de um avião quebrar a barreira do som, como mostra a foto da seção “Já sabe responder?”. A singularidade de Prandtl-Glauert ocorre apenas em determinadas condições de umidade. A barreira observada na foto da seção é resultado da condensação da umidade presente no ar. Pode-se perguntar aos alunos se o que eles observam em torno do avião são realmente ondas sonoras. Como é possível explicar o fenômeno e qual é a relação entre a imagem e o estrondo sônico provocado pelo avião que quebra a barreira do som? Eles poderão anotar as respostas para checá-las ao estudar o fenômeno do efeito Doppler.

É mais fácil compreender estrondos sônicos imaginando os rastros que os barcos deixam na água. Quando jogamos uma pedra em um lago, pequenas ondas se formam em círculos concêntricos e se propagam para longe a partir do ponto de impacto. Se um barco atravessa o lago entre 5 km/h e 8 km/h, pequenas ondas vão se propagar da mesma maneira à frente e atrás do barco, e ele se deslocará através delas. Se um barco viaja mais rápido que as ondas se propagando na água a partir dele, então as ondas “não conseguem sair do caminho” do barco com rapidez suficiente e formam um rastro (marola). Um rastro é maior que uma única onda. Ele é formado por todas as pequenas ondas que iriam se propagar à frente do barco, mas não puderam. Quando um avião está voando, produz ondas sonoras. Se o avião viaja mais lento que a velocidade do som (a velocidade do som varia com o meio, mas para o ar

ela normalmente é de 1.120 km/h), as ondas sonoras podem se propagar à frente do avião. Se um avião voa mais rápido que o próprio som, quebra a barreira do som, produzindo um estrondo sônico no momento em que ultrapassa a barreira. O estrondo é o “rastros” das ondas sonoras do avião. Todas as ondas sonoras que normalmente se propagariam à frente do avião se combinam. Primeiro, você não ouve nada, mas em seguida ouve o estrondo que elas criaram.

3 Orientações para o trabalho dos conteúdos



O assunto abordado neste capítulo pode ser enriquecido com uma discussão sobre escalas musicais. A construção dessas escalas desperta o interesse da Matemática e da Física desde a Antiguidade clássica, com o filósofo Pitágoras. Além disso, como já dissemos, a música é assunto de grande interesse para a maioria dos alunos. Certamente pelo menos uma de suas categorias (clássica, sertaneja, *rock*, *rap* etc.) encanta o adolescente. Portanto, o conhecimento da construção de escalas musicais é próprio da formação de uma pessoa que aprecia música. Há vários sites que trazem informações sobre músicas; o primeiro da lista a seguir é interativo, permitindo escutar variações de som.

<<http://www.edugama.pro.br/unid6pg2.htm>>.

<<http://www.ciframelodica.com.br/escalas/>>.

<<http://www.youtube.com/watch?v=J-btb3eywIE>>.

Acessos em: 31 mar. 2016.



A tabela de valores a seguir expressa a dependência entre duas grandezas A e B e é característica de uma função logarítmica, pois o aumento de um fator 10 em B implica aumento correspondente de 1 unidade em A .

B	20	200	2.000	20.000	200.000	2.000.000
A	1	2	3	4	5	6

(Equação da função: $y = \log \frac{x}{2}$)

Segundo a escala Richter, por exemplo, para que ocorra o aumento de 1 grau na magnitude de um terremoto, é preciso que ele libere 10 vezes mais energia do que liberaria se não houvesse esse aumento. Da mesma forma, o cálculo do potencial de hidrogênio iônico (pH), índice utilizado para medir o grau de acidez de uma solução, obedece a uma escala logarítmica:

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$$

[[H^+]: concentração de íons H^+ na solução]

Na água, por exemplo, há cerca de 1 íon-grama de H^+ para cada 10^7 litros, por isso o pH da água é igual a 7,0. Em uma limonada, há em torno de 1 íon-grama de H^+ para cada 10^2 litros. Em vista disso, o pH da limonada é próximo de 2,0.



O texto a seguir apresenta informações sobre acústica. Sugerimos que os alunos o leiam em sala de aula e respondam às questões propostas.

Atividade complementar Acústica

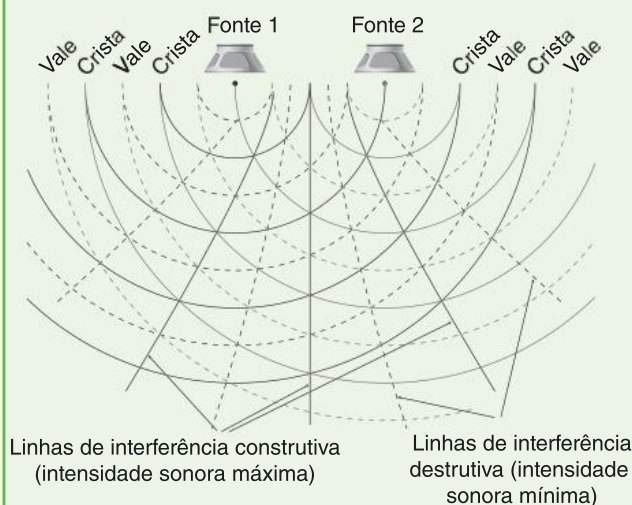
De maneira geral, a acústica é o ramo da Física que aborda as ondas sonoras, o que inclui o estudo e a criação de tecnologia para a construção de ambientes adequados à difusão do som. Para criar ambientes assim, precisamos identificar quais fenômenos sonoros são convenientes ou inconvenientes a uma sala com boa acústica.

Da mesma forma que ondas em uma corda ou ondas na superfície de um líquido, ondas sonoras também sofrem reflexão, refração, difração etc. Podem também sofrer interferência construtiva e destrutiva, o que significa reforço do som ou ausência de som, respectivamente.

Imagine um cantor em uma sala de auditório. Se as ondas sonoras emitidas por ele sofrerem reflexão nas paredes da sala, elas poderão interferir destrutiva e construtivamente nas novas ondas sonoras emitidas posteriormente. Se isso acontecer, haverá na sala regiões onde não será possível ouvir o cantor e outras onde a música será reforçada, o que será péssimo para o público.

Para que ocorra a interferência entre a onda sonora refletida e a emitida, o som precisa ser audível por determinado tempo no interior da sala. Esse tempo durante o qual o som se “sustenta” é chamado de **tempo de reverberação**. Não é desejável um tempo de reverberação muito longo, assim como não é desejável um tempo muito curto, pois o som logo desaparecerá.

A posição das caixas de som também pode provocar regiões de ausência e de reforço do som, como representado na seguinte figura:



A posição dos alto-falantes forma regiões de interferência construtiva e destrutiva. A distribuição dos equipamentos de som no ambiente interfere na qualidade sonora de uma audição, influenciando o sucesso ou o fracasso de uma apresentação.

Ambientes acusticamente adequados precisam evitar regiões de interferência sonora. Por essa razão, tais ambientes devem ter o tempo de reverberação otimizado. No caso de salas de audição, materiais absorventes podem ser colocados em pisos e paredes, bem como no revestimento das cadeiras. Até o público necessita ser considerado, pois ele também absorve as ondas sonoras, diminuindo o tempo de reverberação.

Para eliminar o eco, evitam-se grandes painéis duros e lisos, tanto retos como curvos, para impedir a formação de espelhos sonoros.

Questões

1. Quando um som é emitido, ele desaparece quase que instantaneamente ou pode se “manter por algum tempo”?

Resposta

O som não desaparece de imediato quando é emitido, ele se mantém por algum tempo. Esse tempo é chamado tempo de reverberação.

2. Considerando os fenômenos ondulatórios estudados (reflexão, refração, interferência etc.), de que modo eles poderiam prejudicar a audição de uma apresentação musical em um ambiente fechado?

Resposta

As ondas sonoras emitidas pelos instrumentos musicais, incluindo a voz, podem sofrer reflexão nas paredes do ambiente. Nesse caso, elas podem interferir destrutiva e construtivamente nas novas ondas sonoras emitidas posteriormente. Se isso acontecer, haverá no local regiões em que não será possível ouvir o som e outras em que a audição será reforçada.



A atividade é uma boa oportunidade para incentivar os alunos a colocar em prática os conhecimentos sobre acústica estudados nesta unidade. Pode-se iniciá-la observando com eles os ruídos emitidos nas vizinhanças da escola. Será que eles sentem algum incômodo em relação a esses barulhos? Há espaços na escola mais silenciosos do que outros? Modificações na sala de aula seriam capazes de minimizá-los? Essa abordagem inicial da atividade ajudará os alunos a buscar soluções para seus projetos de ambientes acusticamente adequados.

3 Resoluções

UNIDADE 1 CALOR E TEMPERATURA

CAPÍTULO 1

Temperatura, calor e sua propagação

Questões propostas

- 1 Na primeira afirmação, Débora associa equivocadamente a temperatura da massa de leite com o calor; o calor deve ser relacionado com a energia interna em trânsito de um corpo para outro, e não com a temperatura da amostra de um só corpo. A segunda afirmação está correta, já que estabelece uma relação direta entre a temperatura da amostra e sua energia interna.
- 2 Para que ocorra a transferência de energia interna de um corpo para outro, é necessário que, inicialmente, os corpos estejam a diferentes temperaturas quando colocados no interior do recipiente.
- 3 I. Falsa. A energia térmica de um corpo é diretamente proporcional à sua temperatura absoluta e, portanto, a única forma de um corpo apresentar energia térmica nula seria ter sua temperatura nula.
II. Verdadeira. Os três cubos estão à mesma temperatura; portanto, os cubos M e A estão em equilíbrio térmico.
III. Falsa. A diferença de temperatura entre os blocos é nula, pois o enunciado do problema alega estarem à mesma temperatura.
IV. Falsa. Calor não é a quantidade de energia contida em um corpo como a energia térmica; calor é a energia em trânsito entre dois corpos que inicialmente estão a diferentes temperaturas.
- 4 Sabendo que os corpos D e E não estão em equilíbrio térmico, temos:

$$T_D \neq T_E$$

E se os corpos E e F também não estão em equilíbrio térmico, temos:

$$T_E \neq T_F$$

Combinando as duas equações:

$$T_D \neq T_E \neq T_F$$

Porém, não se sabe a relação das temperaturas de T_D e T_F ; elas tanto podem ser iguais como diferentes.

Explore em Geografia

Alterações bruscas da temperatura costumam estar associadas a eventos climáticos como frentes frias, massas de ar polar, massas de ar seco etc. Conhecer antecipadamente as prováveis alterações climáticas é importante por muitos motivos, pois uma tempestade ou uma geada podem causar efeitos desastrosos nas cidades ou no campo. Por isso, existem os organismos governamentais que fazem as previsões do tempo. Os institutos de pesquisa, como o Inpe, por exemplo, têm uma série de medidores espalhados por várias partes do país, contendo leitores de condições climáticas

como índice de umidade, velocidade de ventos etc. Além disso, são soltos, várias vezes ao dia, balões meteorológicos que emitem sinais das condições do clima nas camadas superiores da atmosfera, e, mais importante, existem os satélites meteorológicos que enviam fotos. Todos esses sinais são captados e estudados com base em modelos matemáticos que simulam as condições do tempo para alguns dias.

Para saber mais

Conexões com o cotidiano – Convecção térmica: aplicações

Ampliando sua leitura

1. Para ser mais eficiente, o aparelho de ar-condicionado deve ser instalado na parte superior do ambiente, pois, pelo efeito da convecção, o ambiente será resfriado mais homogeneamente. Isso porque o ar frio, por possuir maior densidade que o ar quente, tende a ocupar as partes mais baixas do ambiente.
2. Em um forno de fogão a gás residencial, os queimadores são normalmente colocados na parte inferior e, ao serem acesos, provocam correntes de convecção no volume de ar interno do forno, de modo semelhante ao que ocorre com a água sendo aquecida em uma panela, ou seja, o ar quente sobe.

Conexões com o cotidiano – O efeito estufa na Terra

Ampliando sua leitura

Na estufa, o vidro bloqueia parte da radiação térmica, provocando o aumento da temperatura interna. De forma análoga, os gases que formam a camada acima da atmosfera impedem que determinada parte da radiação solar seja devolvida ao espaço, aprisionando-as em torno da Terra e estimulando a elevação da temperatura global.

Questões propostas

- 5 I. Incorreta. A transferência de energia térmica entre dois corpos independe da massa deles.
II. Incorreta. Se dois corpos estão à mesma temperatura, então não há troca de calor entre eles.
III. Incorreta. Dois corpos podem trocar calor independentemente do estado físico em que se encontram e da existência de um meio material entre eles.
- 6 Nas noites frias de inverno, o cobertor de lã (isolante térmico) reduz a perda de calor do corpo de Ricardo para o ambiente externo, pois mantém a temperatura agradável sob o cobertor. Já nas noites de verão, o lençol de tecido fino não dificulta a troca de calor entre Ricardo e o ambiente externo, evitando, assim, que a temperatura sob o lençol aumente muito.
- 7 A diferença entre as sensações térmicas nos dois ambientes se deve à diferença entre a condutibilidade térmica dos dois materiais. O ladrilho do banheiro parece estar mais frio, pois possui maior condutibilidade térmica do que

o piso de madeira da sala, e, portanto, os pés de Andrea perdem calor mais rapidamente para o piso do banheiro do que para o piso da sala, causando essa sensação de frio.

- 8** a) A transferência de calor entre o Sol e a Terra se dá exclusivamente por radiação térmica, já que não existe um meio físico ligando a Terra e o Sol que possibilitaria a transmissão de calor por outras formas.
- b) Existe um limite para a temperatura do conjunto água-jarra. Quando a taxa de absorção de radiação do conjunto for igual à taxa de emissão de radiação e de calor, o equilíbrio térmico terá sido atingido.
- 9** a) Condução, pois ocorre em um meio sólido.
- b) Radiação, por causa da ausência de contato entre os corpos.
- c) Condução, pois o vidro é um meio praticamente sólido.
- d) Convecção, pois o ar frio, mais denso que o ar quente, tende a ocupar a região mais baixa da sala.
- 10** I. Convecção. Nas geladeiras, as prateleiras são grades vazadas para que o ar frio (mais denso), desça, enquanto o ar quente (menos denso) suba.
- II. Radiação. Esse processo se dá através da propagação de ondas eletromagnéticas. Como não há movimento de massa, ele ocorre também no vácuo.
- III. Condução. O processo de condução precisa de um meio material para que ocorra, portanto, o vácuo entre as paredes da garrafa impede a troca por condução.
- alternativa d
- 11** A garrafa pintada de preto tem a característica de ser um melhor absorvedor e um melhor emissor devido justamente à sua cor; portanto, durante o experimento, a taxa de variação de temperatura da garrafa preta em relação à branca foi maior tanto no aquecimento como no resfriamento.
- alternativa e

Trilhando o caminho das competências

Os aquecedores solares

1. A torneira deve estar conectada à parte superior do reservatório para que a água que flui por ela seja mais quente do que a que entra pela parte de baixo do reservatório. É preciso que seja assim porque a água quente tem menor densidade do que a água fria e tende a ocupar a parte mais alta do reservatório.
2. A serpentina é metálica porque precisa ser suficientemente maleável para dar várias voltas no interior da placa coletora. Além disso, o metal não é isolante térmico e permite que o calor proveniente da radiação solar seja transferido para a água contida na serpentina. A placa coletora deve ser pintada na cor preta para absorver a maior quantidade possível de radiação que nela incide, com a mínima reflexão, a fim de aumentar a eficiência no aquecimento da água.
3. Não seria possível utilizar um coletor solar para resfriar a água, principalmente porque as placas são fabricadas para absorver a radiação, não para emitir radiação solar, o que seria necessário ocorrer para que a água fosse resfriada.

CAPÍTULO 2

Termômetros: grandezas e equações de conversão

Para saber mais

Sempre foi assim? – Do termoscópio de Galileu ao sensor elétrico: instrumentos que indicam ou medem temperatura

Ampliando sua leitura

1. Grandezas termométricas são grandezas físicas que variam proporcionalmente com a temperatura. No caso dos termômetros citados no texto, temos:
 - termoscópio de Galileu: altura do nível de líquido contido em um recipiente.
 - termômetro de bolinhas: densidade dos líquidos contidos nas bolinhas.
 - termômetros digitais: valor da resistência dos resistores contidos nos circuitos elétricos do equipamento.
 - termistor: variação da intensidade das cores provocada pela variação do valor da resistência elétrica de um resistor.
2. Em um dia de muito calor, as bolinhas tendem a subir para a parte superior do tubo.

Questões propostas

- 1** Numericamente, o termômetro graduado em Fahrenheit vai indicar uma leitura maior. Analisando a equação de conversão da escala Celsius para a Fahrenheit, temos:

$$\frac{t_F - 32}{9} = \frac{t_C}{5} \Rightarrow t_F - 32 = \frac{9}{5} \cdot t_C \Rightarrow t_F = \frac{9}{5} t_C + 32$$

Obs.: Considerando que a medida da temperatura na escala Celsius foi registrada no Brasil, podemos afirmar que t_C é uma temperatura positiva. Analisando a expressão encontrada, vemos que, para dada temperatura positiva na escala Celsius (t_C), a temperatura correspondente na escala Fahrenheit (t_F) será numericamente maior.

- 2** A temperatura de 318 K na escala Celsius corresponde a:

$$T = t_C + 273 \Rightarrow 318 = t_C + 273 \therefore t_C = 45 \text{ } ^\circ\text{C}$$

A variação da temperatura do sistema na escala Celsius foi de:

$$\Delta t_C = t_f - t_i \Rightarrow \Delta t_C = 45 - 25 \therefore \Delta t_C = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Portanto, a variação da temperatura da água na escala Fahrenheit é de:

$$\Delta t_F = 1,8 (\Delta t_C) \Rightarrow \Delta t_F = 1,8 \cdot 20 \therefore \Delta t_F = 36 \text{ } ^\circ\text{F}$$

- 3** A altura da coluna de mercúrio nos dois termômetros será a mesma, já que o mercúrio de ambos estará submetido a uma mesma temperatura; apenas os valores numéricos da temperatura em cada escala serão diferentes.

- 4** Do enunciado, podemos obter a seguinte relação:

$$t_F = 3t_C + 8$$

Substituindo a relação dada na equação que relaciona Celsius e Fahrenheit, temos:

$$\frac{t_c}{5} = \frac{t_f - 32}{9} \Rightarrow \frac{t_c}{5} = \frac{(3t_c + 8) - 32}{9} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 9t_c = 5 \cdot (3t_c - 24) \therefore t_c = 20^\circ\text{C}$$

Substituindo a temperatura da água na escala Celsius na relação obtida pelo enunciado, temos:

$$t_f = 3t_c + 8 \Rightarrow t_f = 3 \cdot 20 + 8 \therefore t_f = 68^\circ\text{F}$$

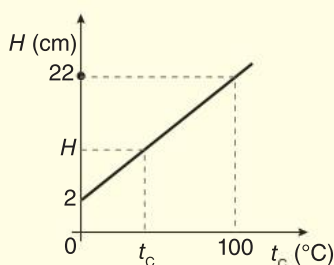
- 5 Com base no gráfico, podemos destacar dois pontos: (30; 50) e (50; 90). Portanto, para cada variação de 20° na escala x corresponde uma variação de 40° na escala y . Podemos montar a seguinte equação que relaciona as escalas x e y :

$$\frac{y - 50}{x - 30} = \frac{40}{20} \Rightarrow (y - 50) = 2(x - 30)$$

Quando $x = 42,5^\circ\text{C}$, temos:

$$(y - 50) = 2(42,5 - 30) \therefore y = 75^\circ\text{F}$$

- 6 a) O gráfico que relaciona a altura da coluna líquida com a temperatura na escala Celsius é:



Pela semelhança de triângulos, temos:

$$\frac{22 - 2}{H - 2} = \frac{100}{t_c} \Rightarrow t_c + 10 = 5H$$

- b) Quando a altura da coluna líquida atinge 15 cm, temos:

$$t_c + 10 = 5 \cdot H \Rightarrow t_c + 10 = 5 \cdot 15 \therefore t_c = 65^\circ\text{C}$$

- 7 Pelo gráfico, vemos que cada aumento de 76°F acarreta uma diminuição de 38°C . A equação que relaciona as duas escalas termométricas é:

$$\frac{38 - 0}{t_c - 0} = \frac{152 - 76}{152 - t_f} \Rightarrow \frac{38 - 0}{t_c - 0} = \frac{152 - t_f}{152 - t_f} = 2 \therefore 2t_c + t_f = 152$$

Sabendo que os pontos fixos da água na escala Fahrenheit são 32°F e 212°F , para $t_f = 32^\circ\text{F}$, temos:

$$2t_c + t_f = 152 \Rightarrow 2t_c + 32 = 152 \therefore t_c = 60^\circ\text{C}$$

Para $t_f = 212^\circ\text{F}$, temos:

$$2t_c + t_f = 152 \Rightarrow 2t_c + 212 = 152 \therefore t_c = -30^\circ\text{C}$$

- 8 As variações de temperatura nas escalas Celsius e Kelvin são numericamente iguais, então temos:

$$\Delta t_c = \Delta T \Rightarrow 4,5 - (-3,5) = \Delta T \therefore \Delta T = 8\text{ K}$$

- 9 De acordo com o enunciado, temos a seguinte relação de temperatura descrita:

$$18t_c = -10t_f \Rightarrow t_c = \frac{-10t_f}{18} \Rightarrow t_c = -\frac{5t_f}{9}$$

Usando a relação entre as escalas Celsius e Fahrenheit, temos:

$$\frac{t_f - 32}{9} = \frac{t_c}{5} \Rightarrow \frac{t_f - 32}{9} = \frac{1}{5} \cdot \left(-\frac{5t_f}{9}\right) \Rightarrow t_f - 32 = -t_f \Rightarrow$$

$$\Rightarrow -t_f = 32 \therefore t_f = 16^\circ\text{F}$$

alternativa b

Para saber mais

Diálogos com a Física Moderna – Próximo do zero absoluto!

Ampliando sua leitura

- Em um dia frio de inverno, dependendo da região do país, podemos ter temperaturas em torno dos 10°C . A temperatura interna de um *freezer* é de aproximadamente -15°C e a da geladeira por volta de 3°C . Para converter uma temperatura da escala Celsius para a escala Kelvin, devemos somar 273 à temperatura em Celsius. Assim, 10°C correspondem a 283 K, -15°C correspondem a 258 K, e 3°C , a 276 K. Podemos observar, então, que as temperaturas dos eletroímãs do LHC são realmente as temperaturas mais baixas do planeta e, em nosso cotidiano, não nos deparamos com temperaturas dessa ordem de grandeza.
- Os eletroímãs do LHC devem ser resfriados a temperaturas próximas do zero absoluto porque alguns metais, em temperaturas dessa ordem, adquirem uma propriedade chamada de supercondutividade, ou seja, não oferecem nenhum tipo de resistência à passagem de corrente elétrica. Essa propriedade permite gerar intensos campos magnéticos capazes de direcionar os feixes de partículas que vão colidir com o acelerador.

CAPÍTULO 3

Dilatação dos sólidos

Questões propostas

- a) Falsa. A dilatação linear sofrida por uma barra de 1 metro (100 cm) de alumínio para essa variação de temperatura é:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \Rightarrow \Delta L = 100 \cdot 2,3 \cdot 10^{-5} \cdot 100 \therefore \Delta L = 0,23\text{ cm}$$

b) Falsa. O coeficiente de dilatação linear realmente é uma característica de cada substância, porém não é uma grandeza adimensional.

c) Verdadeira. As duas barras têm o mesmo coeficiente de dilatação e comprimento inicial e são submetidas à mesma variação de temperatura; dessa forma, sofrerão dilatações idênticas.

d) Falsa. Para a barra retornar ao seu comprimento inicial, basta resfriá-la até sua temperatura inicial, antes da expansão.
- a) Verdadeira. Para cada grau Celsius é acrescentada ao comprimento uma unidade de coeficiente de dilatação linear. Calculando:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T = 1 \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot 1 \therefore \Delta L = 0,00002\text{ m}$$

b) Falsa. Para uma variação de 10°C na barra de latão de 1 m de comprimento, temos uma variação no comprimento de 0,0002 m. Logo, a barra de latão terá 1,0002 m.

c) Falsa. A variação na dimensão linear de cada barra é proporcional à sua dimensão inicial.

d) Falsa. Apesar de a igual variação de temperatura em barras idênticas resultar em igual variação de comprimento, o coeficiente de dilatação de um mesmo material muda em intervalos diferentes de temperatura.

- 3** a) Como o coeficiente de dilatação linear do latão é maior do que o do aço, quando a lâmina bimetálica for submetida a um aumento de temperatura, a face de latão da lâmina apresentará um comprimento final maior do que a face de aço da lâmina, portanto:



- b) Considerando uma diminuição de temperatura da lâmina, o comprimento final do latão será menor do que o comprimento final do aço, portanto:



- 4** O diâmetro do tubo após ser resfriado será:

$$D = D_0 + \Delta D \Rightarrow D = D_0 + D_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \Rightarrow D = 10 + 10 \cdot 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot (-10 - 30) \therefore D = 9,9932 \text{ cm}$$

- 5** Utilizando os dados retirados do gráfico:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \Rightarrow 0,5 = 400 \cdot \alpha \cdot 200 \therefore \alpha = 6,25 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

- 6** A equação de dilatação da barra A é:

$$\Delta L_A = L_{0A} \cdot \alpha_A \cdot \Delta T \Rightarrow (L - L_0) = L_0 \cdot \alpha_A \cdot 50$$

A equação para a barra B é:

$$\Delta L_B = L_{0B} \cdot \alpha_B \cdot \Delta T \Rightarrow (L - L_0) = L_0 \cdot \alpha_B \cdot 100$$

Dividindo uma equação pela outra, temos:

$$\frac{\alpha_A}{\alpha_B} = 2$$

- 7** A equação de dilatação do Concorde é:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha_{Al} \cdot \Delta T \Rightarrow 0,25 = 62,1 \cdot 2,4 \cdot 10^{-5} \cdot (T - 15) \therefore T \approx 182,74 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- 8** a) O acionamento desse alarme de incêndio ocorre devido à dilatação não homogênea da lâmina bimetálica. Ao esquentá-la, a parte superior dilatará menos, enquanto a inferior dilatará mais, entortando-a. Esse entortamento fará com que ela feche o contato com o circuito que aciona o alarme de incêndio.
- b) O metal da parte inferior da lâmina tem maior coeficiente de dilatação; pois, ao ser esquentada, ela vai entortar e fechar o contato.

- 9** Analisando os dados do gráfico para a dilatação linear, temos:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \Rightarrow L - L_0 = L_0 \cdot \alpha \cdot (T - T_0) \Rightarrow 801 - 800 = 800\alpha(110 - 10) \Rightarrow 1 = 8 \cdot 10^4 \alpha \Rightarrow \alpha = \frac{1}{8} \cdot 10^{-4} \therefore \alpha = 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

alternativa e

- 10** Sabendo que o coeficiente de dilatação do alumínio é maior do que o do vidro, o procedimento correto para abrir o frasco consiste em aquecer todo o conjunto. Dessa forma, o diâmetro da tampa de alumínio será maior do que o diâmetro do recipiente de vidro, facilitando a retirada da tampa.

- 11** Sabendo que à temperatura ambiente o diâmetro inicial do orifício é maior do que o diâmetro inicial do parafuso, quando o conjunto for resfriado, a contração sofrida pelo orifício será maior do que a contração sofrida pelo parafuso e a folga vai diminuir. De maneira análoga, quando o conjunto for aquecido, teremos um aumento na folga entre o parafuso e o orifício.

- 12** A variação da área da chapa é dada por:

$$\Delta A = A_0 \cdot \beta \cdot \Delta T \Rightarrow \Delta A = 60 \cdot 40 \cdot 2 \cdot 26 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \therefore \Delta A = 12,48 \text{ cm}^2$$

- 13** Como os copos são iguais, para conseguir separá-los é necessário aquecer o copo externo para dilatá-lo e resfriar o copo interno para contraí-lo, ou seja, mergulhar o copo B em água quente e encher o copo A com água gelada.
- alternativa e

- 14** Considerando que o orifício e a moeda têm o mesmo tamanho e ambos estão à mesma temperatura, a diferença no tamanho final após o aquecimento só pode ocorrer se esses materiais tiverem coeficientes de dilatação diferentes; aquele com menor coeficiente terá o menor tamanho, nesse caso, a moeda.

alternativa b

- 15** a) Verdadeira. A esfera de ferro e o orifício da placa de ferro continuarão com o mesmo diâmetro, porém a esfera de zinco apresentará um diâmetro maior que o orifício da placa, já que o zinco tem um coeficiente de dilatação maior que o do ferro.

- b) Verdadeira. Resfriando as duas esferas e a chapa, as duas esferas atravessam o orifício, porém a esfera de zinco terá um diâmetro menor do que o diâmetro do orifício, enquanto a esfera de ferro continua com o mesmo diâmetro do orifício.

- c) Falsa. A dilatação superficial da chapa é dada por:

$$\Delta A = A_0 \cdot \beta \cdot \Delta T \Rightarrow \Delta A = 25 \cdot 8 \cdot 2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 50 \therefore \Delta A = 0,24 \text{ cm}^2$$

- d) Falsa. Ao aquecer a chapa, o diâmetro do orifício deve sofrer uma expansão.

- 16** a) Falsa. O procedimento que deve ser feito para soltar o parafuso da placa é resfriar o parafuso e aquecer a placa, diminuindo, assim, o diâmetro do parafuso e aumentando o diâmetro do furo na placa.

- b) Falsa. Com o aumento da temperatura, observamos um aumento na coluna de mercúrio; portanto, o coeficiente de dilatação volumétrica do mercúrio é maior do que o coeficiente de dilatação volumétrica do vidro.

- c) Falsa. A variação de volume de um corpo é diretamente proporcional ao produto de seu volume inicial pela variação de temperatura sofrida pelo corpo.

- d) Falsa. Quando a esfera sofre um aquecimento, sua massa permanece inalterada, mas seu volume aumenta. Sabendo que a densidade é definida como a razão entre a massa e o volume do corpo $\left(d = \frac{M}{V}\right)$, podemos afirmar que, quando a esfera sofre um aquecimento, sua densidade diminui.

- 17** O aumento do volume interno é dado por:

$$\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T \Rightarrow \Delta V = 250 \cdot 3 \cdot 12 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \therefore \Delta V = 1,8 \text{ cm}^3$$

- 18** Podemos determinar a relação entre o coeficiente de dilatação linear do material e a variação de temperatura sofrida pelos corpos a partir de:

$$\Delta A = A_0 \cdot 2\alpha \cdot \Delta T \Rightarrow 0,36 = 10^6 \cdot 2\alpha \cdot \Delta T \Rightarrow \alpha \cdot \Delta T = 0,18 \cdot 10^{-6}$$

Então, temos:

$$\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T \Rightarrow \Delta V = 10^9 \cdot 3\alpha \cdot \Delta T \Rightarrow \Delta V = 10^9 \cdot 3 \cdot 0,18 \cdot 10^{-6} \therefore \Delta V = 540 \text{ mm}^3$$

- 19 A contração sofrida pelo cubo é:

$$\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T \Rightarrow -0,0063 \cdot V_0 = V_0 \cdot 3 \cdot 12 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T$$

$$\therefore \Delta T = -175^\circ\text{C}$$

- 20 Com base nas informações do gráfico, podemos calcular o coeficiente de dilatação linear do material:

$$\Delta A = A_0 \cdot 2\alpha \cdot \Delta T \Rightarrow 0,6 = 200 \cdot 2\alpha \cdot 100$$

$$\therefore \alpha = 15 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Um cubo de 20 cm de aresta desse mesmo material sofre dilatação de:

$$\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T \Rightarrow \Delta V = 20^3 \cdot 3 \cdot 15 \cdot 10^{-6} \cdot 100$$

$$\therefore \Delta V = 36 \text{ cm}^3$$

- 21 A quantidade de litros a mais vendida por dia devido a fraude é dada por:

$$\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T \Rightarrow \Delta V = 20 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} \cdot (35 - 5) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta V = 20 \cdot 30 \therefore \Delta V = 600 \text{ L}$$

Em uma semana (7 dias), vendendo cada litro a R\$ 1,60, podemos obter o ganho financeiro (L) multiplicando esses valores pela variação do volume, então temos

$$L = 600 \cdot 7 \cdot 1,6 \therefore L = \text{R\$ } 6.720,00$$

alternativa d

CAPÍTULO 4

Dilatação dos líquidos

Questões propostas

- 1 a) Falsa. A temperatura de um corpo afeta diretamente seu volume, alterando, dessa forma, sua densidade.
b) Verdadeira. A dilatação real do volume de um líquido independe do recipiente onde está contido.
c) Falsa. A água é uma substância que sofre dilatação anômala, pois, quando certa massa de água passa de 0°C para 4°C , seu volume diminui, e não aumenta, como esperado.
- 2 a) As hipóteses I e III são corretas.
b) O tanque de combustível de qualquer veículo sofre dilatação volumétrica, assim como a dilatação sofrida pelo combustível. Porém, às vezes, a dilatação volumétrica da gasolina é superior à dilatação volumétrica do tanque, provocando vazamento. O volume de gasolina que vazou do tanque é chamado de dilatação aparente.
- 3 Desprezando a dilatação volumétrica do tanque, temos:
 $\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T \Rightarrow \Delta V = 50 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \therefore \Delta V = 0,6 \text{ L}$
- 4 a) Falsa. Sabendo que parte do líquido transbordou durante o aquecimento, podemos afirmar que a dilatação do líquido foi maior do que a dilatação do recipiente.
b) Verdadeira. A expansão do recipiente pode ser obtida pela seguinte relação:
 $\Delta V_{\text{real}} = \Delta V_{\text{ap.}} + \Delta V_{\text{rec.}} \Rightarrow 1.000 \cdot 3 \cdot 10^{-4} \cdot 80 = 20 + \Delta V_{\text{rec.}} \Rightarrow$
 $\Rightarrow \Delta V_{\text{rec.}} = 24 - 20 \therefore \Delta V_{\text{rec.}} = 4 \text{ cm}^3$
c) Verdadeira. A dilatação real do líquido é dada por:
 $\Delta V_{\text{real}} = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T \Rightarrow \Delta V_{\text{real}} = 1.000 \cdot 3 \cdot 10^{-4} \cdot 80$
 $\therefore \Delta V_{\text{real}} = 24 \text{ cm}^3$
d) Falsa. Durante o aquecimento do conjunto, o frasco é dilatado.
e) Falsa. O coeficiente de dilatação volumétrica do recipiente é dado por:
 $\Delta V_{\text{rec.}} = V_0 \gamma_{\text{rec.}} \Delta T \Rightarrow 4 = 1.000 \cdot \gamma_{\text{rec.}} \cdot 80$
 $\therefore \gamma_{\text{rec.}} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

- 5 A contração sofrida pela massa de combustível será de:

$$\Delta V_{\text{real}} = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T \Rightarrow \Delta V_{\text{real}} = 15.000 \cdot 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot (10 - 30)$$

$$\therefore \Delta V_{\text{real}} = -330 \text{ L}$$

Em que o sinal negativo indica que a gasolina sofreu uma diminuição em seu volume.

- 6 A água não se comporta termicamente como a maioria dos líquidos, porque sua dilatação é irregular. Até a temperatura de 4°C , a água da superfície se resfria e troca de lugar com a água do fundo, formando um ciclo: as correntes de convecção. Quando a água superficial atinge entre 0°C e 4°C , ocorre uma expansão volumétrica, resultando na redução de sua densidade. Como a água da parte inferior, nesse momento, é mais densa que a da parte superior, a água superficial não consegue descer, permanecendo na superfície até congelar a 0°C , formando uma camada de gelo superficial.

- 7 A dilatação real do líquido é dada por:

$$\Delta V_{\text{real}} = \Delta V_{\text{ap.}} + \Delta V_{\text{rec.}} \Rightarrow 600 \cdot \gamma_{\text{real}} \cdot 100 =$$

$$= 12 + 600 \cdot 27 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \therefore \gamma_{\text{real}} = 2,27 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Assim, o volume final real de líquido ao final do aquecimento é:

$$\Delta V_{\text{real}} = V_0 \gamma_{\text{real}} \Delta T \Rightarrow V - 600 = 600 \cdot 2,27 \cdot 10^{-4} \cdot 100$$

$$\therefore V = 613,62 \text{ L}$$

- 8 Para que o líquido ocupe totalmente o espaço interno do recipiente, o volume final de ambos deverá ser o mesmo, logo:

$$V_{\text{f. liq.}} = V_{\text{f. vidro}} \Rightarrow V_{0 \text{ liq.}} \cdot (\gamma_{\text{liq.}} \Delta T + 1) = V_{0 \text{ vidro}} \cdot (\gamma_{\text{vidro}} \Delta T + 1) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 600 \cdot (8,1 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta T + 1) = 1.000 \cdot (27 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T + 1) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta T \approx 871,46 \therefore T_{\text{f}} \approx 871,46^\circ\text{C}$$

- 9 a) A dilatação aparente do mercúrio é dada por:

$$\Delta V_{\text{ap.}} = V_0 \cdot \gamma_{\text{ap.}} \cdot \Delta T \Rightarrow 4,8 = 300 \cdot \gamma_{\text{ap.}} \cdot 100$$

$$\therefore \gamma_{\text{ap.}} = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

- b) O coeficiente de dilatação real do mercúrio pode ser obtido por:

$$\Delta V_{\text{real}} = \Delta V_{\text{ap.}} + \Delta V_{\text{rec.}} \Rightarrow 300 \cdot \gamma_{\text{real}} \cdot 100 =$$

$$= 4,8 + 300 \cdot 3 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \therefore \gamma_{\text{real}} = 1,84 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

- 10 a) A dilatação aparente do líquido foi de:

$$\Delta V_{\text{ap.}} = V_0 \cdot \gamma_{\text{ap.}} \cdot \Delta T \Rightarrow 6 = 3.000 \cdot \gamma_{\text{ap.}} \cdot 60 \therefore \gamma_{\text{ap.}} = \frac{1}{3} \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

- b) O coeficiente de dilatação real pode ser obtido por:

$$\Delta V_{\text{real}} = \Delta V_{\text{ap.}} + \Delta V_{\text{rec.}} \Rightarrow 3.000 \cdot \gamma \cdot 60 =$$

$$= 6 + 3.000 \cdot 27 \cdot 10^{-6} \cdot 60 \therefore \gamma \approx 6,03 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

- 11 Utilizando o gráfico, vemos que o volume aparente do líquido aumenta 3 cm^3 a cada variação de 10° . Então, temos:

$$\Delta V_{\text{real}} = \Delta V_{\text{ap.}} + \Delta V_{\text{rec.}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 600 \cdot \gamma_{\text{real}} \cdot 10 = 3 + 600 \cdot 30 \cdot 10^{-6} \cdot 10$$

$$\therefore \gamma_{\text{real}} = 5,3 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

- 12 a) A dilatação real dos 1.000 cm^3 de glicerina para uma variação de temperatura de 80°C é dada por:

$$\Delta V_{\text{liq.}} = V_{0 \text{ liq.}} \cdot \gamma_{\text{liq.}} \cdot \Delta T \Rightarrow \Delta V_{\text{liq.}} = 1.000 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 80$$

$$\therefore \Delta V_{\text{liq.}} = 40 \text{ cm}^3$$

- b) Considerando a dilatação aparente igual a 38 cm^3 , a dilatação do frasco pode ser obtida por:

$$\Delta V_{\text{liq.}} = \Delta V_{\text{rec.}} + \Delta V_{\text{ap.}} \Rightarrow 40 = \Delta V_{\text{rec.}} + 38 \therefore \Delta V_{\text{rec.}} = 2 \text{ cm}^3$$

- c) O coeficiente de dilatação volumétrica do recipiente para uma variação de temperatura de 80 °C é dado por:

$$\Delta V_{\text{rec.}} = V_{0\text{rec.}} \cdot \gamma_{\text{rec.}} \cdot \Delta T \Rightarrow 2 = 1.000 \cdot \gamma_{\text{rec.}} \cdot 80 \Rightarrow 80 \times 10^4 \cdot \gamma_{\text{rec.}} = 2 \Rightarrow \gamma_{\text{rec.}} = \frac{2}{8 \times 10^4}$$

$$\therefore \gamma_{\text{rec.}} = 0,25 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

- 13** O volume de ar encontrado no tanque do caminhão é igual ao valor da contração da gasolina devido ao resfriamento de 20 °C. Esse valor é obtido por:

$$\Delta V_{\text{liq.}} = V_{0\text{liq.}} \cdot \gamma_{\text{liq.}} \cdot \Delta T \Rightarrow \Delta V_{\text{liq.}} = 40.000 \cdot 1,1 \times 10^{-3} \cdot 20$$

$$\therefore \Delta V_{\text{liq.}} = 880 \text{ L}$$

alternativa e

CAPÍTULO 5 Calorimetria

Questões propostas

- O menor volume (0,6 L) sofrerá a maior variação de temperatura, pois possui a menor massa e, portanto, a menor capacidade térmica. Como a potência dos bicos do fogão é a mesma, a quantidade de calor recebida pelas panelas é igual. Nesse caso, a capacidade térmica é inversamente proporcional à variação de temperatura.
- O corpo de alumínio terá que receber sete vezes mais calor que o corpo de ouro. Como os corpos têm massas iguais, a quantidade de calor recebidas para que atinjam a mesma temperatura é diretamente proporcional ao calor específico de cada material.
- Uma panela de cobre se aquece mais rapidamente do que uma panela de vidro quando ambas são expostas a fontes térmicas que fornecem a mesma quantidade de calor, pois o calor específico do cobre é menor que o do vidro. Por condução, a água será aquecida mais rapidamente na panela de cobre.
- O chumbo sofrerá maior elevação de temperatura porque esse material tem menor calor específico que a água, necessitando, portanto, de menor quantidade de calor para variar sua temperatura.
- Se $c = 0,8 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$, para elevar 1 °C a temperatura de 1 g dessa substância, é necessária 0,8 caloria.
 - Para elevar 4 °C a temperatura de 1 g dessa substância, são necessárias:
 $Q = 4 \cdot 0,8 = 3,2 \therefore Q = 3,2 \text{ cal}$
 - Para elevar 1 °C a temperatura de 5 g dessa substância, são necessárias:
 $Q = 5 \cdot 0,8 = 4,0 \therefore Q = 4,0 \text{ cal}$
 - Para elevar 4 °C a temperatura de 5 g dessa substância, são necessárias:
 $Q = 4 \cdot 5 \cdot 0,8 = 16,0 \therefore Q = 16,0 \text{ cal}$
 - Para elevar 12 °C a temperatura de 10 g dessa substância, são necessárias:
 $Q = 12 \cdot 10 \cdot 0,8 = 96,0 \therefore Q = 96,0 \text{ cal}$

- 6** O calor específico do mercúrio é 18 vezes menor que o do álcool, ou seja, uma determinada massa de mercúrio precisa receber menos calor que a mesma massa de álcool para que suas temperaturas variem igualmente. A massa de álcool recebe ainda menos calor que a de mercúrio; portanto, sua elevação de temperatura é muito menor. Podemos estimar esse valor com base nas relações abaixo. Para a capacidade térmica do mercúrio, temos:

$$C_{\text{mercúrio}} = \frac{Q}{\Delta T_{\text{mercúrio}}} = \frac{1.800}{10} \therefore C_{\text{mercúrio}} = 180 \text{ cal/}^\circ\text{C}$$

Como as massas de mercúrio e álcool são iguais e

$c_{\text{álcool}} = 18c_{\text{mercúrio}}$; então:

$$c_{\text{álcool}} = 18c_{\text{mercúrio}} \therefore c_{\text{álcool}} = 3.240 \text{ cal/}^\circ\text{C}$$

$$c_{\text{álcool}} = \frac{Q}{\Delta T_{\text{álcool}}} \Rightarrow \Delta T_{\text{álcool}} = \frac{Q}{c_{\text{álcool}}} = \frac{200}{3.240}$$

$$\therefore \Delta T_{\text{álcool}} = 0,06 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- 7** Dados: $Q = 2.000 \text{ cal}$; $\Delta T = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$

Sendo $C = \frac{Q}{\Delta T}$, temos:

$$C = \frac{2.000}{50} \therefore C = 40 \text{ cal/}^\circ\text{C}$$

- 8** Dados: $Q = 4.000 \text{ cal}$; $\Delta T = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$; $m = 500 \text{ g}$

a) Sendo $C = \frac{Q}{\Delta T}$, temos:

$$C = \frac{4.000}{25} \therefore C = 160 \text{ cal/}^\circ\text{C}$$

$$\text{b) } c = \frac{C}{m} \Rightarrow c = \frac{160}{500} \therefore c = 0,32 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$$

- 9** a) Durante os 3 minutos que permaneceu no forno, a quantidade de calor recebida pelo pedaço de chumbo foi $Q = 1.300 \text{ cal}$ e sua temperatura variou:

$$\Delta T = 90 - 25 \therefore \Delta T = 65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Sendo $C = \frac{Q}{\Delta T}$, temos:

$$C = \frac{1.300}{65} \therefore C = 20 \text{ cal/}^\circ\text{C}$$

- b) Não. Como as massas são diferentes, as capacidades térmicas dos blocos de chumbo também serão diferentes. O bloco de maior massa sofrerá menor variação de temperatura.

- 10** A capacidade térmica de um corpo é diretamente proporcional à sua massa. Então, um corpo de 5 kg terá maior capacidade térmica que um corpo de 2 kg.

Por causa da relação de proporcionalidade direta, podemos encontrar o valor de C para um bloco de massa 5 kg, do mesmo material do bloco de massa 2 kg, a partir da seguinte regra de três:

$$2 \text{ kg} \text{ ————— } 80 \text{ cal/}^\circ\text{C}$$

$$5 \text{ kg} \text{ ————— } C$$

$$\therefore C = 200 \text{ cal/}^\circ\text{C}$$

Para saber mais

Sempre foi assim? – Calor e energia mecânica

Ampliando sua leitura

- Quando o corpo cai com velocidade constante, sua energia cinética não varia. Desse modo, a energia potencial gravitacional inicial é a forma de energia que se converte em calor ao final da queda, sendo possível, assim, relacionar a energia mecânica à variação da energia interna do corpo.
- Podemos utilizar qualquer das duas unidades para medir a quantidade de calor absorvida por um corpo, uma vez que a conversão de uma unidade a outra é estabelecida pela relação determinada por Joule. Mas, habitualmente, expressa-se em caloria a quantidade de calor transferida de um corpo para outro e, em joule, a energia mecânica de um corpo.

Questões propostas

- 11** Dados: $Q = 2.000 \text{ cal}$; $m = 250 \text{ g}$
A variação de temperatura é: $\Delta T = 60 - 20 \therefore \Delta T = 40^\circ\text{C}$
Da equação fundamental da Calorimetria, temos:
 $Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow 2.000 = 250 \cdot c \cdot 40 \therefore c = 0,2 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$
- 12** A quantidade de calor cedida ou absorvida pelo zinco em cada situação é determinada a partir da equação fundamental da Calorimetria: $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$
- a) Dados: $c_{\text{zinco}} \approx 0,1 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; $m = 1 \text{ g}$; $\Delta T = 2^\circ\text{C}$
 $Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow Q = 1 \cdot 0,1 \cdot 2 \therefore Q = 0,2 \text{ cal}$
- b) Dados: $c_{\text{zinco}} \approx 0,1 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; $m = 100 \text{ g}$; $\Delta T = 1^\circ\text{C}$
 $Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow Q = 100 \cdot 0,1 \cdot 1 \therefore Q = 10 \text{ cal}$
- c) Dados: $c_{\text{zinco}} \approx 0,1 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; $m = 1.000 \text{ g}$; $\Delta T = -4^\circ\text{C}$
 $Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow Q = 1.000 \cdot 0,1 \cdot (-4) \therefore Q = -400 \text{ cal}$
- d) Dados: $c_{\text{zinco}} \approx 0,1 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; $m = 20 \text{ g}$; $\Delta T = -10^\circ\text{C}$
 $Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow Q = 20 \cdot 0,1 \cdot (-10) \therefore Q = -20 \text{ cal}$
- 13** Para o corpo de massa m , temos: $Q = 200 \text{ cal}$; $\Delta T = 2^\circ\text{C}$
Da equação fundamental da Calorimetria, vem:
 $Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow 200 = m \cdot c \cdot 2 \Rightarrow c = \frac{100}{m}$ (calor específico da substância)
Para o corpo de massa $2m$, temos: $Q = 400 \text{ cal}$
Então:
 $Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow 400 = 2m \cdot \frac{100}{m} \cdot \Delta T \therefore \Delta T = 2^\circ\text{C}$
- 14** Dados: $c = 0,4 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; $m = 100 \text{ g}$; $\Delta T = 3^\circ\text{C}$
Da equação fundamental da Calorimetria, vem:
 $Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow Q = 100 \cdot 0,4 \cdot 3 \therefore Q = 120 \text{ cal}$
- 15** a) Verdadeira. Quanto menor o calor específico, maior a temperatura final. Logo, a temperatura final da massa de ferro será maior que a temperatura final da massa de alumínio, pois o calor específico do ferro é metade do calor específico do alumínio.
- b) Falsa. O calor específico da água é cinco vezes maior que o calor específico do alumínio; logo, a temperatura final da água será menor.
- c) Verdadeira. Pela equação fundamental da Calorimetria, temos:
 $Q_{\text{água}} = m_{\text{água}} \cdot c_{\text{água}} \cdot \Delta T_{\text{água}}$ e $Q_{\text{ferro}} = m_{\text{ferro}} \cdot c_{\text{ferro}} \cdot \Delta T_{\text{ferro}}$
Como as massas estão expostas à mesma fonte de calor pelo mesmo intervalo de tempo:
 $Q_{\text{água}} = Q_{\text{ferro}} \Rightarrow m_{\text{água}} \cdot c_{\text{água}} \cdot \Delta T_{\text{água}} = m_{\text{ferro}} \cdot c_{\text{ferro}} \cdot \Delta T_{\text{ferro}}$
Queremos que $\Delta T_{\text{ferro}} = \Delta T_{\text{água}}$ e sabemos que $c_{\text{água}} = 10 c_{\text{ferro}}$. Assim, se a massa de ferro for igual a dez vezes a massa de água, teremos temperaturas finais iguais.
- d) Verdadeira. Pela equação fundamental da Calorimetria, temos:
 $Q_{\text{água}} = m_{\text{água}} \cdot c_{\text{água}} \cdot \Delta T_{\text{água}}$ e $Q_{\text{ferro}} = m_{\text{ferro}} \cdot c_{\text{ferro}} \cdot \Delta T_{\text{ferro}}$
Como a massa e a variação de temperatura são as mesmas, e segundo o enunciado $\frac{1}{5} c_{\text{água}} = c_{\text{alumínio}}$ e $c_{\text{ferro}} = \frac{1}{2} c_{\text{alumínio}}$, temos:
 $\frac{Q_{\text{água}}}{c_{\text{água}}} = \frac{Q_{\text{ferro}}}{c_{\text{ferro}}} \Rightarrow \frac{Q_{\text{água}}}{10 c_{\text{ferro}}} = \frac{Q_{\text{ferro}}}{c_{\text{ferro}}} \Rightarrow Q_{\text{água}} = 10 Q_{\text{ferro}}$
- 16** Dados: $c = 0,09 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; $m = 400 \text{ g}$
A variação de temperatura é: $\Delta T = 80 - 20 \therefore \Delta T = 60^\circ\text{C}$
Da equação fundamental da Calorimetria, temos:
 $Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow Q = 400 \cdot 0,09 \cdot 60 \therefore Q = 2.160 \text{ cal}$
- 17** A variação da temperatura da água é:
 $\Delta T = 25 - 42 \therefore \Delta T = -17^\circ\text{C}$

O volume de água coletado é:

$$4 \text{ L} = 4 \text{ dm}^3 = 4.000 \text{ cm}^3$$

Sendo $d_{\text{água}} = 1 \text{ g/cm}^3$, temos: $m_{\text{água}} = 4.000 \text{ g}$

A partir da equação fundamental da Calorimetria, a quantidade de calor cedida ao meio ambiente é:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow Q = 4.000 \cdot 1 \cdot (-17) \therefore Q = -68.000 \text{ cal ou } Q = -68 \text{ kcal}$$

- 18** A energia mecânica total do corpo é igual à sua energia potencial gravitacional ao ser abandonado de uma altura de 10 m :

$$E_{\text{pg}} = m \cdot g \cdot h \Rightarrow E_{\text{pg}} = 0,5 \cdot 10 \cdot 10 \therefore E_{\text{pg}} = 50 \text{ J ou } E_{\text{pg}} \approx 12,5 \text{ cal}$$

Sendo $d_{\text{água}} = 1 \text{ kg/L}$, temos: $m_{\text{água}} = 5 \text{ kg} = 5.000 \text{ g}$

A elevação da temperatura da água quando absorve $12,5 \text{ cal}$ é obtida a partir da equação fundamental da Calorimetria:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow 12,5 = 5.000 \cdot 1 \cdot \Delta T \therefore \Delta T = 2,5 \cdot 10^{-3}^\circ\text{C}$$

- 19** Sendo $d_{\text{água}} = 1 \text{ kg/L}$ e $m_{\text{água}} = 10 \text{ kg} = 10.000 \text{ g}$, a quantidade de calor necessária para aquecer 10 L de água de 20°C para 32°C é:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow Q = 10.000 \cdot 1 \cdot (32 - 20) \Rightarrow Q = 10.000 \cdot 1 \cdot 12 \therefore Q = 120.000 \text{ cal}$$

Em joule, temos:

$$Q = 120.000 \cdot 4 \therefore Q = 480.000 \text{ J}$$

A potência do resistor é 1.500 W , então o tempo que o aquecedor precisa funcionar é:

$$P = \frac{Q}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{Q}{P} = \frac{480.000}{1.500} \therefore \Delta t = 320 \text{ s}$$

- 20** Dados: $c = 0,1 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; $m = 400 \text{ g}$; $\Delta t = 5 \text{ min} = 300 \text{ s}$
A variação de temperatura é: $\Delta T = 60 - 20 \therefore \Delta T = 40^\circ\text{C}$
Assim:

$$P = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{\Delta t} \Rightarrow P = \frac{400 \cdot 0,1 \cdot 40}{300} \therefore P \approx 5,3 \text{ cal/s}$$

- 21** A potência do bico de Bunsen é determinada com base nos dados obtidos no aquecimento da água: $m_{\text{água}} = 210 \text{ g}$; $c_{\text{água}} = 1,000 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; $\Delta T_{\text{água}} = 8^\circ\text{C}$; $\Delta t_{\text{água}} = 24 \text{ s}$

$$P = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{\Delta t} \Rightarrow P = \frac{210 \cdot 1,000 \cdot 8}{24} \therefore P = 70 \text{ cal/s}$$

Para a substância desconhecida, temos: $m = 250 \text{ g}$; $\Delta T = 10^\circ\text{C}$; $\Delta t = 21 \text{ s}$

Assim, o valor do calor específico da substância desconhecida, sabendo que o estudante utilizou o mesmo bico de Bunsen (mesma potência), é:

$$P = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{\Delta t} \Rightarrow 70 = \frac{250 \cdot c \cdot 10}{21} \therefore c = 0,588 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$$

Pela tabela, o valor obtido está próximo do valor do calor específico do álcool.

- 22** A quantidade de calor necessária para aquecer os 200 L de água até o ponto de ebulição é:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow Q = 200.000 \cdot 1,0 \cdot (100 - 10) \therefore Q = 1,8 \cdot 10^7 \text{ cal} = 1,8 \times 10^4 \text{ kcal}$$

O bagaço de cana tem poder calorífico de 2.000 kcal/kg . Com base nisso, podemos escrever a seguinte regra de três:

$$2.000 \text{ kcal} \text{ ————— } 1 \text{ kg}$$

$$1,8 \times 10^4 \text{ kcal} \text{ ————— } x$$

$$\therefore x = 9 \text{ kg}$$

Logo, serão necessários 9 kg de bagaço de cana para aquecer a água na caldeira.

- 23** a) Falsa. Como o calor latente de fusão do ferro é $\frac{1}{9}$ do calor latente de ebulição da água, conseqüentemente, é necessária uma quantidade de calor nove vezes menor.
- b) Verdadeira. Quando uma substância se encontra em mudança de estado, suas temperaturas são determinadas e constantes.
- c) Falsa. A temperatura de fusão do ferro é de 1.537°C , enquanto a de ebulição da água é de 100°C .
- d) Verdadeira. A quantidade de calor para transformar em vapor 90 g de água é: $Q = 90L_{\text{água}}$
A quantidade de calor para fundir 10 g de ferro é: $Q = 10L_{\text{ferro}}$
Sabemos que $L_{\text{água}} = 9L_{\text{ferro}}$; logo: $Q = 810L_{\text{ferro}}$
Portanto, a quantidade de calor necessária para transformar 90 g de água em vapor é suficiente para fundir 10 g de ferro.
- e) Verdadeira. Como $c_{\text{água}} \approx 9c_{\text{ferro}}$, a afirmativa é verdadeira por aproximação.
- 24** Para elevar a temperatura de 500 g de água de 12°C a 100°C , a quantidade de calor necessária é:
 $Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow Q = 500 \cdot 1,0 \cdot (100 - 12) \therefore Q = 44.000 \text{ cal}$
Para transformar 200 g de água em vapor de água a 100°C , a quantidade de calor necessária é:
 $Q = m \cdot L \Rightarrow Q = 200 \cdot 540 \therefore Q = 108.000 \text{ cal}$
Assim:
 $Q_{\text{total}} = 44.000 + 108.000 \therefore Q_{\text{total}} = 152.000 \text{ cal}$
A potência da fonte de calor, funcionando durante 40 minutos, é:
 $P = \frac{152.000}{40} \therefore P = 3.800 \text{ cal/min} \approx 63,3 \text{ cal/s}$
- 25** Dados: $L = 80,0 \text{ cal/g}$; $\Delta T = 25,0^\circ\text{C}$; $c = 1,00 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$
A partir do gráfico, vemos que foram necessárias 800 calorias para derreter uma certa massa de gelo.
 $Q_1 = m \cdot L \Rightarrow 800 = m \cdot 80,0 \Rightarrow m = \frac{800}{80,0} \therefore m = 10 \text{ g}$
A quantidade de calor necessária para elevar a temperatura dessa massa até $25,0^\circ\text{C}$ é:
 $Q_2 = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow Q_2 = 10 \cdot 1,00 \cdot 25,0 \therefore Q_2 = 250 \text{ cal}$
A quantidade de calor necessária para que todo o gelo se transforme em água é dada pela soma das quantidades de calor parciais, logo:
 $Q = Q_1 + Q_2 \Rightarrow Q = 800 + 250 \therefore Q = 1.050 \text{ cal} \Rightarrow Q = 1,05 \text{ kcal}$
alternativa a
- 26** a) A máquina dissipa 86.400 J/min . Em duas horas a energia dissipada é de:
 $Q = 2 \cdot 60 \text{ min} \cdot 86.400 \text{ J/min} \Rightarrow$
 $\Rightarrow Q = 10.368.000 \text{ J} = 2.592.000 \text{ cal}$
- b) A quantidade de calor necessária para reduzir a temperatura de uma massa m de água de 20°C a 0°C é:
 $Q_1 = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow Q_1 = m \cdot 1 \cdot (0 - 20) \Rightarrow Q_1 = -20m$
A quantidade de calor necessária para transformar essa massa de água em gelo a 0°C é:
 $Q_2 = m \cdot L \Rightarrow Q_2 = m \cdot (-80) \Rightarrow Q_2 = -80m$
Portanto, a energia total necessária para fabricar gelo, a 0°C , é:
 $Q_1 + Q_2 = -100m$
Do item a, sabemos que:
 $Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2 = -2.592.000 \text{ cal}$
Toda a energia dissipada pela máquina é utilizada para “retirar calor” da água; daí o sinal negativo. Temos então:
 $-100m = -2.592.000 \therefore m = 25.920 \text{ g} = 25,92 \text{ kg}$

- 27** Entre 12,0 min e 14,0 min, 200 g da substância se fundem. A fonte de potência constante fornece $5,0 \text{ kcal/min}$; portanto, nesse intervalo de 2,0 min, foram absorvidas $10,0 \text{ kcal}$, ou seja, 10.000 cal .
O calor latente de fusão dessa substância é:
 $Q = m \cdot L \Rightarrow 10.000 = 200 \cdot L \therefore L = 50 \text{ cal/g}$
- 28** O patamar observado no gráfico quando o corpo atinge 330°C indica a transição da substância do estado líquido para o estado gasoso. No estado gasoso, ao fornecer uma quantidade de calor de: $Q = 1.800 \text{ cal} - 1.200 \text{ cal} = 600 \text{ cal}$, o corpo tem sua temperatura alterada em:
 $\Delta T = 360 - 330 \therefore \Delta T = 30^\circ\text{C}$
Assim, da equação fundamental da Calorimetria, temos:
 $Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow 600 = 15 \cdot c \cdot 30 \therefore c \approx 1,33 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$
- 29** a) O processo de vaporização da massa de água se inicia quando toda a sua massa atingir 100°C . Sendo $P = 1.200 \text{ J/s} = 300 \text{ cal/s}$, temos:
 $P = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{\Delta t} \Rightarrow 300 = \frac{80 \cdot 1 \cdot (100 - 25)}{\Delta t}$
 $\therefore \Delta t = 200 \text{ s}$
- b) A potência do aquecedor é constante e igual a 300 cal/s . O aquecedor opera por $10 \text{ min} = 600 \text{ s}$. Nos primeiros 200 s não há mudança de fase, e a quantidade de calor absorvida nessa etapa do processo é:
 $Q = P \cdot \Delta t = 300 \text{ cal/s} \cdot 200 \text{ s} = 60.000 \text{ cal}$
Nos 400 s finais a quantidade de calor absorvida é:
 $Q = P \cdot \Delta t = 300 \text{ cal/s} \cdot 400 \text{ s} = 120.000 \text{ cal}$
Assim:
 $Q = m \cdot L \Rightarrow 120.000 = m \cdot 540 \therefore m \approx 222,2 \text{ g}$
- 30** a) Para variar a temperatura de 100 g de gelo de -20°C a 0°C são fornecidas 1.000 cal . Assim, da equação fundamental da Calorimetria, temos:
 $Q = m \cdot c_{\text{gelo}} \cdot \Delta T \Rightarrow 1.000 = 100 \cdot c_{\text{gelo}} \cdot 20$
 $\therefore c_{\text{gelo}} = 0,5 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$
Para fundir totalmente 100 g de gelo, a quantidade de calor fornecida é: $Q = 9.000 - 1.000 \therefore Q = 8.000 \text{ cal}$
Assim:
 $Q = m \cdot L_{\text{gelo}} \Rightarrow 8.000 = 100 \cdot L_{\text{gelo}} \therefore L_{\text{gelo}} = 80 \text{ cal/g}$
- b) Para variar a temperatura da água de 0°C a 20°C , a quantidade de calor fornecida é:
 $Q = 11.000 - 9.000 \therefore Q = 2.000 \text{ cal}$
Assim:
 $Q = C_{\text{água}} \cdot \Delta T \Rightarrow 2.000 = C_{\text{água}} \cdot 20 \therefore C_{\text{água}} = 100 \text{ cal/}^\circ\text{C}$
- 31** a) Os 1.500 g do corpo são totalmente fundidos num intervalo de tempo $\Delta t = 6,2 - 0,7 \therefore \Delta t = 5,5 \text{ min} = 330 \text{ s}$
A fonte fornece $1.500 \text{ W} = 1.500 \text{ J/s}$; em 330 s a energia absorvida pelo corpo é de 495.000 J .
Assim, o calor latente de fusão da substância é:
 $Q = m \cdot L \Rightarrow 495.000 = 1.500 \cdot L \therefore L = 330 \text{ J/g}$
- b) $Q = P \cdot \Delta t$
- De 0 a 0,7 min: $\Delta t = 0,7 \text{ min} = 42 \text{ s}$
 $Q = 1.500 \cdot 42 \therefore Q = 63.000 \text{ J}$
 - De 0,7 a 6,2 min:
 $Q = 495.000 \text{ J}$ (calculado no item a)
 - De 6,2 a 12,2 min: $\Delta t = 6 \text{ min} = 360 \text{ s}$
 $Q = 1.500 \cdot 360 \therefore Q = 540.000 \text{ J}$
- Durante os 12,2 min, a quantidade de calor recebida pelo corpo é:
 $Q_{\text{total}} = 63.000 \text{ J} + 495.000 \text{ J} + 540.000 \text{ J} = 1.098 \text{ kJ}$
- 32** a) Entre os instantes 2.000 s e 5.000 s, intervalo de tempo em que o corpo permanece com temperatura constante

e igual a 273 K (0 °C), ocorre a mudança de estado (fusão) do gelo. Como substâncias puras não têm sua temperatura alterada durante mudanças de estado, temos o patamar no gráfico.

- b) Como a fonte de calor tem potência constante ao longo do intervalo de tempo analisado, a quantidade de calor recebida pela amostra é proporcional ao tempo. Também sabemos que a variação da temperatura da água e do gelo é a mesma. Assim, temos:

$$Q = \Delta t \cdot P \text{ e } Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$$P \cdot \Delta t_{\text{água}} = m \cdot c_{\text{água}} \cdot \Delta T \text{ e } P \cdot \Delta t_{\text{gelo}} = m \cdot c_{\text{gelo}} \cdot \Delta T$$

Para uma mesma variação de temperatura (20 K), $\Delta t_{\text{água}} = 4.000 \text{ s}$ e $\Delta t_{\text{gelo}} = 2.000 \text{ s}$. Assim, como as massas de gelo e água são as mesmas, $c_{\text{água}} = 2 \cdot c_{\text{gelo}}$

- 33 a) Do gráfico, podemos observar que, em um intervalo de tempo de 10 min (entre os instantes 20 min e 30 min), a temperatura da substância varia 20 °C (de 20 °C para 40 °C).

Como a potência P da fonte é 392 cal/min, nesse intervalo de tempo, o valor do calor trocado entre a fonte e a substância é igual a $Q = 3.920 \text{ cal}$. Assim:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow 3.920 = 400 \cdot c \cdot 20 \therefore c = 0,49 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$$

Pela tabela, concluímos que a substância é o ácido acético.

- b) Como a substância é o ácido acético, devemos utilizar o respectivo valor de calor latente de ebulição dessa substância ($L = 94 \text{ cal/g}$) para calcular o intervalo de tempo necessário para vaporizá-la totalmente. Então, a quantidade de calor fornecida na mudança do estado líquido para o gasoso foi de:

$$Q = m \cdot L \Rightarrow Q = 400 \cdot 94 \therefore Q = 37.600 \text{ cal}$$

A fonte fornece 392 cal/min. Logo:

$$\Delta t = \frac{Q}{P} \Rightarrow \Delta t = \frac{37.600}{392} \therefore \Delta t \approx 96 \text{ min}$$

- 34 Dados: $L = 2,25 \times 10^3 \text{ J/g}$; $P = 300 \text{ W}$; $\Delta t = 10 \text{ min} = 600 \text{ s}$

A quantidade de calor fornecida pelo fogão é:

$$Q = P \cdot \Delta t \Rightarrow Q = 300 \cdot 600 \therefore Q = 180.000 \text{ J}$$

Então, a massa de água que vai evaporar é:

$$Q = m \cdot L \Rightarrow 180.000 = m \cdot 2,25 \cdot 10^3 \Rightarrow m = \frac{180.000}{2,25 \cdot 10^3}$$

$\therefore m = 80 \text{ g}$
alternativa c

Para saber mais

Conexões com o cotidiano – Plasma: o quarto estado da matéria

Ampliando sua leitura

- O plasma é originado a partir de gases que, em condições particulares, sofrem ionização, ou seja, os átomos de que são formados têm seus elétrons arrancados de suas respectivas órbitas, produzindo uma massa disforme eletricamente neutra, composta de núcleos e elétrons dissociados.
- Algumas condições para que o plasma se mantenha são:
 - Alta temperatura, de modo que não seja possível restabelecer a ligação entre núcleos e elétrons após colisões.
 - Baixa densidade, ou seja, a massa de plasma é muito rarefeita, o que torna raras as colisões.
 - Existência de fontes externas de energia, como campos elétricos intensos ou radiações capazes de arrancar os elétrons dos átomos.

Explore em Biologia

Tremor de frio é uma das consequências do controle da temperatura interna do organismo, em geral mantida em torno de 37 °C, mesmo em ambientes muito frios. Tremores são causados por contrações musculares; assim, o ato de tremer involuntariamente gera certa quantidade de calor, que é usada na manutenção da temperatura corporal e ajuda o organismo a continuar funcionando. Além disso, também ocorre a contração dos vasos sanguíneos da periferia do corpo, e o fluxo circulatório é alterado para aquecer os órgãos vitais, como coração e pulmões. É por isso que os dedos dos pés e das mãos de quem está com muito frio ficam arroxeados.

Questões propostas

- 35 Dados: $m_{\text{ferro}} = 400 \text{ g}$; $T_{0 \text{ ferro}} = 240 \text{ }^\circ\text{C}$; $c_{\text{ferro}} = 0,11 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$; $m_{\text{chumbo}} = 400 \text{ g}$; $T_{0 \text{ chumbo}} = 140 \text{ }^\circ\text{C}$; $c_{\text{chumbo}} = 0,031 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$
No equilíbrio térmico:

$$Q_{\text{ferro}} + Q_{\text{chumbo}} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m_{\text{ferro}} \cdot c_{\text{ferro}} \cdot (T_f - T_{0 \text{ ferro}}) + m_{\text{chumbo}} \cdot c_{\text{chumbo}} \cdot (T_f - T_{0 \text{ chumbo}}) = 0 \Rightarrow 400 \cdot 0,11 \cdot (T_f - 240) + 400 \cdot 0,031 \cdot (T_f - 140) = 0$$

$$\therefore T_f \approx 218 \text{ }^\circ\text{C}$$

- 36 Dados: $m_{\text{ouro}} = 50 \text{ g}$; $T_{0 \text{ ouro}} = 1.000 \text{ }^\circ\text{C}$; $c_{\text{ouro}} = 0,032 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$; $V_{\text{água}} = 5 \text{ L}$; $m_{\text{água}} = 5 \text{ kg} = 5.000 \text{ g}$; $T_{0 \text{ água}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; $c_{\text{água}} = 1,0 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$

No equilíbrio térmico:

$$Q_{\text{ouro}} + Q_{\text{água}} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m_{\text{ouro}} \cdot c_{\text{ouro}} \cdot (T_f - T_{0 \text{ ouro}}) + m_{\text{água}} \cdot c_{\text{água}} \cdot (T_f - T_{0 \text{ água}}) = 0 \Rightarrow 50 \cdot 0,032 \cdot (T_f - 1.000) + 5.000 \cdot 1,0 \cdot (T_f - 25) = 0$$

$$\therefore T_f \approx 25,31 \text{ }^\circ\text{C}$$

A elevação na temperatura da água é de aproximadamente 0,31 °C.

- 37 A quantidade de calor necessária para variar a temperatura do gelo de -10 °C a 0 °C é:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow Q = 200 \cdot 0,5 \cdot 10 \therefore Q = 1.000 \text{ cal}$$

A quantidade de calor necessária para fundir 200 g de gelo a 0 °C é:

$$Q = m \cdot L \Rightarrow Q = 200 \cdot 80 \therefore Q = 16.000 \text{ cal}$$

Então, para derreter todo o gelo, inicialmente a -10 °C, são necessárias 17.000 cal. Para que ainda reste gelo na bacia, a quantidade de calor cedida pela água ao resfriar deve ser menor que 17.000 cal. Sendo $V_{\text{água}} = 4 \text{ L}$ e $m_{\text{água}} = 4 \text{ kg} = 4.000 \text{ g}$, supondo que a temperatura de equilíbrio seja 0 °C, temos:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow Q = 4.000 \cdot 1,0 \cdot (-20) \therefore Q = -80.000 \text{ cal}$$

A quantidade de calor cedida pela água é muito maior que a quantidade de calor absorvida pelo gelo, de forma que não restará gelo na bacia, pois a temperatura de equilíbrio deve ser maior que 0 °C.

- 38 a) Para o calorímetro isolado termicamente, inicialmente, temos:

$$V_I = 2,0 \text{ L} = 2.000 \text{ cm}^3; m_I = 2.000 \text{ g}; T_I = 55 \text{ }^\circ\text{C}$$

Para a massa de água adicionada ao calorímetro, temos:

$$m_{II} = 1 \text{ kg} = 1.000 \text{ g}; T_{II} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

No equilíbrio térmico:

$$Q_I + Q_{II} = 0 \Rightarrow m_I \cdot c_I \cdot \Delta T_I + m_{II} \cdot c_{II} \cdot \Delta T_{II} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 2.000 \cdot 1,0 \cdot (T_f - 55) + 1.000 \cdot 1,0 \cdot (T_f - 25) = 0$$

$$\therefore T_f = 45 \text{ }^\circ\text{C}$$

- b) A quantidade de energia que deve ser fornecida para que 3.000 g de água a 45 °C atinja 100 °C é:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow Q = 3.000 \cdot 1,0 \cdot (100 - 45)$$

$$\therefore Q = 165.000 \text{ cal} = 165 \text{ kcal}$$

- c) A quantidade de calor necessária para resfriar 3.000 g de água de 100 °C para 0 °C é:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow Q = 3.000 \cdot 1,0 \cdot (0 - 100)$$

$$\therefore Q = -300.000 \text{ cal} = -300 \text{ kcal}$$

A quantidade de calor necessária para solidificar 3.000 g de água a 0 °C é:

$$Q = m \cdot L \Rightarrow Q = 3.000 \cdot (-80)$$

$$\therefore Q = -240.000 \text{ cal} = -240 \text{ kcal}$$

Assim, para que toda a água fique congelada, devem ser retiradas do calorímetro:

$$Q = (-300) + (-240) \therefore Q = -540 \text{ kcal}$$

Para saber mais

Saber físico e tecnologia – Água que resfria e que aquece

Ampliando sua leitura

1. As torres das usinas atômicas são enormes trocadores de calor e têm a função de resfriar a água utilizada no controle de temperatura do reator, antes de lançá-la ao meio ambiente.
2. Em Fukushima, a água do mar era utilizada para resfriar os reatores. Com a quebra das bombas, o envio de água para o resfriamento ficou comprometido, e os reatores superaqueceram e explodiram, provocando o vazamento de líquido radioativo para fora da usina.

Questões propostas

- 39 a) Sendo $d_{\text{água}} = 1.000 \text{ kg/m}^3$ e $1 \text{ m}^3 = 10^6 \text{ cm}^3 = 10^6 \text{ mL}$, temos:

$$d_{\text{água}} = \frac{10^6 \text{ g}}{10^6 \text{ mL}} = 1 \text{ g/mL}$$

Assim, se o volume de água no calorímetro é 200 mL, a massa equivalente a esse volume é 200 g.

- b) Sabe-se que o equilíbrio térmico se dá a 30 °C. A quantidade de calor cedida pela liga metálica é totalmente absorvida pela água e pelo calorímetro, de forma que:

$$Q_{\text{água}} + Q_{\text{calorímetro}} + Q_{\text{liga}} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m_{\text{água}} \cdot c_{\text{água}} \cdot \Delta T_{\text{água}} + C_{\text{calorímetro}} \cdot \Delta T_{\text{calorímetro}} +$$

$$+ m_{\text{liga}} \cdot c_{\text{liga}} \cdot \Delta T_{\text{liga}} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 200 \cdot 1,0 \cdot (30 - 20) + C_{\text{calorímetro}} \cdot (30 - 20) + 125 \cdot 0,20 \cdot$$

$$\cdot (30 - 130) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 2.000 + 10C_{\text{calorímetro}} - 2.500 = 0 \therefore C_{\text{calorímetro}} = 50 \text{ cal/}^\circ\text{C}$$

- 40 No equilíbrio térmico:

$$Q_{\text{água}} + Q_{\text{calorímetro}} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m_{\text{água}} \cdot c_{\text{água}} \cdot \Delta T_{\text{água}} + C_{\text{calorímetro}} \cdot \Delta T_{\text{calorímetro}} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m_{\text{água}} \cdot 1,0 \cdot (48 - 50) + 8 \cdot (48 - 20) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow -2m_{\text{água}} + 224 = 0 \therefore m_{\text{água}} = 112 \text{ g}$$

- 41 Dados: $m_{\text{líquido}} = 200 \text{ g}$; $c_{\text{líquido}} = 0,65 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$; $T_f = 45 ^\circ\text{C}$; $C_{\text{calorímetro}} = 10 \text{ cal/}^\circ\text{C}$; $T_{0 \text{ calorímetro}} = 30 ^\circ\text{C}$

No equilíbrio térmico:

$$Q_{\text{líquido}} + Q_{\text{calorímetro}} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m_{\text{líquido}} \cdot c_{\text{líquido}} \cdot \Delta T_{\text{líquido}} + C_{\text{calorímetro}} \cdot \Delta T_{\text{calorímetro}} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 200 \cdot 0,65 \cdot (45 - T_{0 \text{ líquido}}) + 10 \cdot (45 - 30) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 5.850 - 130T_{0 \text{ líquido}} + 150 = 0 \therefore T_{0 \text{ líquido}} \approx 46,15 ^\circ\text{C}$$

- 42 Dados: $V_{\text{leite}} = 600 \text{ mL}$; $c_{\text{leite}} = 0,6 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$; $T_{0 \text{ leite}} = 64 ^\circ\text{C}$;

$$T_f = 60 ^\circ\text{C}; T_{0 \text{ garrafa}} = 24 ^\circ\text{C}$$

A massa de leite que preenche a garrafa é:

$$d = \frac{m}{V} \Rightarrow 1,2 = \frac{m}{600} \therefore m_{\text{leite}} = 720 \text{ g}$$

No equilíbrio térmico:

$$Q_{\text{leite}} + Q_{\text{garrafa}} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m_{\text{leite}} \cdot c_{\text{leite}} \cdot \Delta T_{\text{leite}} + C_{\text{garrafa}} \cdot \Delta T_{\text{garrafa}} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 720 \cdot 0,6 \cdot (60 - 64) + C_{\text{garrafa}} \cdot (60 - 24) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 36C_{\text{garrafa}} = 1.728 \therefore C_{\text{garrafa}} = 48 \text{ cal/}^\circ\text{C}$$

- 43 O calorímetro e os 50 g (m) de gelo colocados inicialmente estão em equilíbrio térmico; portanto, não há trocas de calor. Quando se acrescentam 80 g (m') de água a 70 °C, o gelo derrete (1) e a água proveniente do gelo derretido esquenta (2), assim como o calorímetro de alumínio (3). A água inicialmente a 70 °C perde calor (4), resfriando. Temos então:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m \cdot L + m \cdot c_{\text{água}} \cdot \Delta T_2 + C \cdot \Delta T_3 + m' \cdot c_{\text{água}} \cdot \Delta T_4 = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 50 \cdot 80 + 50 \cdot 1 \cdot (T_f - 0) + 8 \cdot (T_f - 0) + 80 \cdot 1 \cdot (T_f - 70) = 0$$

$$\therefore T_f \approx 11,6 ^\circ\text{C}$$

- 44 Dados: $\Delta T_{\text{água}} = 10 ^\circ\text{C}$; $m_{\text{água}} = 10 \text{ kg} = 10.000 \text{ g}$;

$$c_{\text{água}} = 1,0 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$M = 2,0 \text{ kg} = 2.000 \text{ g}$$

$$c_M = 0,10 \text{ cal/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$T_f = 30 ^\circ\text{C}$$

No equilíbrio térmico:

$$Q_{\text{água}} = Q_{\text{metal}} = 0 \Rightarrow m_{\text{água}} \cdot c_{\text{água}} \cdot \Delta T_{\text{água}} + M \cdot c_M \cdot \Delta T_M = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 10^4 \cdot 1,0 \cdot 10 + 2 \times 10^3 \cdot 0,10 \cdot (T_f - T_i) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 10^5 + 200 \cdot (30 - T_i) = 0 \Rightarrow 200T_i = 106.000 \therefore T_i = 530 ^\circ\text{C}$$

alternativa e

- 45 No equilíbrio térmico:

$$Q_{\text{fria}} + Q_{\text{quente}} = 0 \Rightarrow m_{\text{fria}} \cdot c_{\text{água}} \cdot \Delta T_{\text{fria}} + m_{\text{quente}} \cdot c_{\text{água}} \cdot \Delta T_{\text{quente}} = 0 \Rightarrow$$

$$= m_{\text{fria}} \cdot 1 \cdot (30 - 25) + m_{\text{quente}} \cdot 1 \cdot (30 - 70) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 5m_{\text{fria}} = 40m_{\text{quente}} \Rightarrow \frac{m_{\text{quente}}}{m_{\text{fria}}} = \frac{5}{40} \Rightarrow \frac{m_{\text{quente}}}{m_{\text{fria}}} = 0,125$$

alternativa b

Investigar é preciso

Atividade experimental – Observar a fusão do gelo

1. As pedras de gelo não afundaram, porque a densidade do gelo é menor do que a do óleo de cozinha.
2. Como o óleo estava a uma temperatura maior que a das pedras de gelo, passou a transferir calor para elas. As pedras, ao receberem calor, tiveram sua temperatura elevada até atingir a temperatura de fusão. Nesse momento, toda a energia recebida pelo gelo possibilitou a mudança do estado sólido para o líquido. A água em estado líquido continuou a receber calor do óleo até que os dois corpos entrassem em equilíbrio térmico.
3. As pedras de gelo demoram a derreter, pois estão a uma temperatura inferior à do ponto de

fusão (0 °C). Assim, inicialmente, toda a energia recebida do óleo é utilizada para elevar a temperatura do gelo, que só derreterá ao atingir a temperatura de fusão.

4. As gotas de água vão para o fundo do recipiente, pois são mais densas do que o óleo. A densidade do gelo aumenta no processo de fusão, o que faz com que a água no estado líquido fique mais densa do que o óleo e seja depositada na parte inferior da garrafa.
5. A água não se mistura com o óleo porque suas moléculas são eletricamente polarizadas, enquanto as do óleo têm uma longa cadeia carbônica apolar. Assim, como não há interação entre os dois tipos de moléculas, elas se mantêm separadas.

Para saber mais

Conexões com o cotidiano – Chuva de gelo

Ampliando sua leitura

1. As correntes de convecção no interior das nuvens fazem com que cristais de gelo, inicialmente pequenos, acumulem massa e aumentem de volume ao se movimentarem verticalmente, por diferentes regiões da nuvem. Ao atravessar regiões da nuvem que concentram grandes quantidades de gotículas de água, o cristal de gelo se choca com elas, que vão se acumulando na sua superfície. Ao ser apanhado por um fluxo de ar ascendente, o cristal volta às regiões mais frias da nuvem e as gotículas de água acumuladas em sua superfície solidificam.
2. Durante os movimentos de subida e descida no interior da nuvem, novas gotículas de água são agregadas ao granizo e se solidificam, aumentando o diâmetro da pedra.

UNIDADE 2 GASES E TERMODINÂMICA

CAPÍTULO 6

Estudo dos gases e a equação de um gás ideal

Para saber mais

Conexões com o cotidiano

Ampliando sua leitura

Nesse caso, a nuvem é composta por partículas sólidas em suspensão; portanto, não se trata de uma substância em estado gasoso.

Questões propostas

1. Em um dia quente, as moléculas do desodorante têm alta energia cinética. A colisão dessas moléculas com as pa-

redes da embalagem gera a pressão interna do conjunto. Num dia frio, as moléculas estão menos agitadas, o que causa um menor número de colisões entre as moléculas e as paredes do recipiente; portanto, a pressão interna é menor. A diferença entre a pressão interna e a pressão atmosférica faz a embalagem murchar até que a pressão interna se equilibre com a pressão externa.

2. Lembrando que a pressão atmosférica ao nível do mar é 1 atm e que, submetida a essa pressão, a água ferve a 100 °C, a panela de pressão cozinha mais rapidamente os alimentos porque a temperatura da água no seu interior ultrapassa os 100 °C, atingindo aproximadamente 120 °C. Como a panela de pressão é totalmente fechada, o vapor de água que vai se formando não consegue se dispersar e a pressão interna da panela aumenta: torna-se maior que a pressão atmosférica. O aumento da pressão faz com que a água no interior da panela entre em ebulição a uma temperatura acima de 100 °C. A pressão do vapor de água, porém, aumenta até certo limite. Superado esse limite, ela se torna suficientemente elevada para que o vapor levante o pino da válvula central e comece a sair da panela. A partir desse momento, a pressão do vapor se estabiliza, porque é controlada pelo escapamento através da válvula. Em consequência, a temperatura no interior da panela também não aumenta mais. A lata deve ser colocada em água fria antes de ser aberta, pois, devido à pressão interna, ela pode estourar se for aberta muito quente.

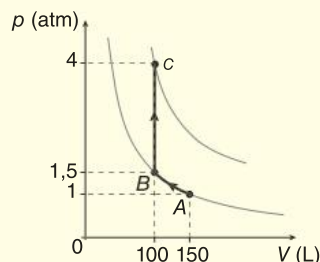
- 3 a) Para uma transformação isotérmica, temos:

$$p_A \cdot V_A = p_B \cdot V_B \Rightarrow 1 \cdot 150 = p_B \cdot 100 \therefore p_B = 1,5 \text{ atm}$$

- b) Para uma transformação isométrica, temos:

$$\frac{p_B}{T_B} = \frac{p_C}{T_C} \Rightarrow \frac{1,5}{27 + 273} = \frac{p_C}{527 + 273} \therefore p_C = 4 \text{ atm}$$

- c) O esboço do gráfico será:



A transformação AB é isotérmica e a transformação BC é isométrica.

4. Considerando que não há variação no volume do ar contido no pneu durante a transformação, temos:

$$\frac{p_A}{T_A} = \frac{p_B}{T_B} \Rightarrow \frac{3,0}{47,0 + 273} = \frac{p_B}{17,0 + 273} \therefore p_B \approx 2,72 \text{ atm}$$

5. Considerando que a transformação é isobárica, temos:

$$\frac{V_A}{T_A} = \frac{V_B}{T_B} \Rightarrow \frac{V_0}{27 + 273} = \frac{V_0 + 0,1V_0}{T_B} \Rightarrow T_B = 300 \cdot 1,1$$

$$\therefore T_B = 330 \text{ K} \Rightarrow T_B = 57 \text{ °C}$$

6. Sabendo que a temperatura do sistema é constante durante o processo, temos:

$$p_0 \cdot V_0 = p_f \cdot V_f \Rightarrow 1,2 \cdot 10^5 \cdot 2 = p_f \cdot (2 + 6) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow p_f = \frac{2,4 \cdot 10^5}{8} \therefore p_f = 3 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$$

Em atm, temos:

$$p_f = 3 \cdot 10^4 \cdot 10^{-5} \therefore p_f = 0,3 \text{ atm}$$

- 7 a) À medida que o balão é conduzido da superfície até os 10 m de profundidade, seu volume diminui substancialmente por causa do aumento da pressão que a água exerce sobre ele. Considerando que a temperatura se manteve constante, da lei geral dos gases ideais, temos: $p_0 \cdot V_0 = p_f \cdot V_f$

Assim, com o aumento substancial da pressão, o volume deve ser diminuído para que a relação $p \cdot V$ seja mantida constante.

- b) Considerando que a pressão se manteve constante, porque a temperatura da água aumenta subitamente, pela da lei geral dos gases ideais, temos: $\frac{V_0}{T_0} = \frac{V_f}{T_f}$

Quando o balão penetra na região com temperatura mais alta, seu volume também aumenta.

- 8 a) Da equação de Clapeyron, temos:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \Rightarrow 16,6 \cdot 10^5 \cdot 0,1^3 = 1 \cdot 8,3 \cdot T$$

$$\therefore T = 200 \text{ K}$$

Em graus Celsius, temos:

$$T = 200 - 273 \therefore T = -73^\circ \text{C}$$

- b) Pela definição de pressão:

$$p = \frac{F}{A} \Rightarrow 16,6 \cdot 10^5 = \frac{F}{0,1^2} \therefore F = 16.600 \text{ N}$$

- 9 Para o estado inicial do gás, temos:

$$p_0 \cdot V_0 = n_0 \cdot R \cdot T_0 \Rightarrow 3 \cdot V = n \cdot R \cdot T \Rightarrow \frac{R \cdot T}{V} = \frac{3}{n}$$

Para o estado final, temos:

$$p_f \cdot V_f = n_f \cdot R \cdot T_f \Rightarrow 1 \cdot V = (n - 4) \cdot R \cdot T \Rightarrow \frac{R \cdot T}{V} = \frac{1}{n - 4}$$

Igualando as duas equações, temos:

$$\frac{1}{n - 4} = \frac{3}{n} \Rightarrow n = 3n - 12 \Rightarrow n = 6 \text{ mols}$$

- 10 a) Pela equação de Clapeyron:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \Rightarrow 10^5 \cdot (10 \cdot 6 \cdot 4) = n \cdot 8 \cdot (27 + 273) \Rightarrow n = \frac{2,4 \cdot 10^7}{2.400} \therefore n = 10^4 \text{ mols}$$

- b) A quantidade de calor retirada da sala para que a temperatura da massa de ar diminua 10°C é:

$$Q = n \cdot c \cdot \Delta\theta \Rightarrow Q = 10^4 \cdot 30 \cdot (-10) \therefore |Q| = 3 \cdot 10^6 \text{ J}$$

- 11 O volume ocupado pelo vapor é a capacidade total da panela menos o volume ocupado pelo líquido: $3 \text{ L} - 1 \text{ L} = 2 \text{ L}$

Da equação de Clapeyron, temos:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \Rightarrow 4,1 \cdot 2 = 0,2 \cdot 0,082 \cdot T \therefore T = 500 \text{ K}$$

Em graus Celsius, temos:

$$T = 500 - 273 \therefore T = 227^\circ \text{C}$$

- 12 Para o aumento de 1°C , o êmbolo sobe uma altura h e o volume final passa a ser:

$$V_f = V_0 + A \cdot h \Rightarrow V_f = 600 + 3h$$

Assim, como a transformação é isobárica, temos:

$$\frac{V_0}{T_0} = \frac{V_f}{T_f} \Rightarrow \frac{600}{27 + 273} = \frac{600 + 3h}{27 + 1 + 273} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 600 \cdot 301 = 300 \cdot (600 + 3h) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 180.600 = 180.000 + 900h \Rightarrow h = \frac{180.600 - 180.000}{900}$$

$$\therefore h \approx 0,7 \text{ cm}$$

alternativa a

- 13 Quando a porta da geladeira é aberta, ocorre troca de calor entre o interior da geladeira e o exterior, fazendo com que a temperatura interna aumente. Quando a porta é fechada, a geladeira trabalha para reduzir a temperatura em seu interior. O ar é resfriado a volume constante; logo, se a temperatura dentro da geladeira diminui, a pressão também diminui, ficando menor que a pressão externa, o que dificulta a abertura da porta.

alternativa d

Questões propostas

- 1 a) Sabendo que o processo é isobárico, a pressão do gás permanece constante. O volume ocupado pelo gás diminui durante a transformação, pois o enunciado afirma que ele sofre uma compressão. A temperatura do gás diminui, já que deve apresentar a mesma pressão em um menor volume.

- b) O meio externo realiza trabalho sobre o gás.

$$\bar{C} = p \cdot \Delta V \Rightarrow \bar{C} = 10^5 \cdot (-10 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^{-2}) \therefore \bar{C} = -5 \text{ J}$$

- 2 a) Em um diagrama pressão \times volume, o trabalho realizado sobre o gás é numericamente igual à área sob a curva do gráfico; portanto, o trabalho será máximo quando a área for máxima, ou seja, durante o trajeto $1 \rightarrow 3 \rightarrow 2$.

- b) Analogamente ao item a, o trabalho mínimo realizado sobre o gás é referente ao processo $1 \rightarrow 4 \rightarrow 2$, pois é o trajeto que apresenta a menor área sob a curva do gráfico.

- 3 O trabalho realizado na expansão é:

$$\bar{C} = p \cdot \Delta V \Rightarrow \bar{C} = 10^5 \cdot 6,0 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6} \therefore \bar{C} = 600 \text{ J}$$

- 4 a) No percurso A, o gás sofre uma expansão isobárica seguida de uma transformação isovolumétrica com aumento de pressão. No percurso C, o gás sofre primeiro uma transformação isovolumétrica com aumento de pressão seguida de uma expansão isobárica.

- b) Nos três casos, o trabalho realizado é positivo (o gás sofre uma expansão); portanto, o trabalho foi realizado pelo gás sobre o meio.

- c) O trabalho realizado pelo gás é numericamente igual à área sob a curva do gráfico.

Durante o processo A:

$$\bar{C}_A \stackrel{N}{=} 5 \cdot (1.200 - 500) \therefore \bar{C}_A = 3.500 \text{ J}$$

Durante o processo B:

$$\bar{C}_B \stackrel{N}{=} \frac{(15 - 5) \cdot 700}{2} + (1.200 - 500) \cdot 5 \therefore \bar{C}_B = 7.000 \text{ J}$$

Durante o processo C:

$$\bar{C}_C \stackrel{N}{=} 15 \cdot (1.200 - 500) \therefore \bar{C}_C = 10.500 \text{ J}$$

- 5 Para determinar o trabalho realizado pelo gás, basta calcular a área sob a curva do diagrama $p \times V$. Assim:

- entre 0 m^3 e $1,0 \text{ m}^3$:

$$\bar{C}_{0-1} \stackrel{N}{=} \frac{(B + b) \cdot h}{2} = \frac{(20 + 10) \cdot 1,0}{2} = \frac{30}{2} \therefore \bar{C}_{0-1} = 15 \text{ J}$$

- entre $1,0 \text{ m}^3$ e $2,0 \text{ m}^3$:

$$\bar{C}_{1-2} \stackrel{N}{=} b \cdot h = 1,0 \cdot 20 \therefore \bar{C}_{1-2} = 20 \text{ J}$$

- entre $2,0 \text{ m}^3$ e $3,0 \text{ m}^3$:

$$\bar{C}_{2-3} \stackrel{N}{=} \frac{(B + b) \cdot h}{2} = \frac{(30 + 20) \cdot 1,0}{2} = \frac{50}{2} \therefore \bar{C}_{2-3} = 25 \text{ J}$$

Somando os valores encontrados para os três intervalos, temos:

$$\bar{C}_{\text{total}} = \bar{C}_{0-1} + \bar{C}_{1-2} + \bar{C}_{2-3} = 15 + 20 + 25 \therefore \bar{C}_{\text{total}} = 60 \text{ J}$$

- 6 a) Verdadeira. Nos três processos, a variação da energia interna é a mesma, pois os pontos iniciais e finais são os mesmos.

- b) Falsa. As áreas sob as curvas no diagrama $p \times V$ são diferentes nos três processos, portanto, o trabalho é diferente em cada um dos caminhos representados.

- c) Falsa. Pela 1ª lei da Termodinâmica sabemos que o calor trocado nos três processos é diferente, pois eles apresentam a mesma variação de energia interna, porém trabalhos diferentes.

- 7 O primeiro erro está em afirmar que todo o calor absorvido pelo gás é convertido em trabalho; parte desse calor absorvido é utilizado também para elevar sua energia interna. Além disso, como o enunciado afirma que o êmbolo sobe

CAPÍTULO 7

1ª lei da Termodinâmica

com velocidade constante, podemos concluir que o trabalho realizado pelo gás tem o mesmo módulo do trabalho da força peso do êmbolo durante todo o processo, o que leva a concluir que também é uma transformação isobárica.

- 8 a) Para um processo isotérmico:

$$p_A \cdot V_A = p_B \cdot V_B \Rightarrow 0,2 \cdot 4.000 = p_B \cdot 1.000 \therefore p_B = 0,8 \text{ Pa}$$

- b) Da lei geral dos gases perfeitos:

$$\frac{p_A \cdot V_A}{T_A} = \frac{p_B \cdot V_B}{T_B} \Rightarrow \frac{0,2 \cdot 4.000}{320} = \frac{p_B \cdot 1.000}{360} \therefore p_B = 0,9 \text{ Pa}$$

- 9 a) Analisando o gráfico, vemos que o sistema sofre uma compressão isobárica.

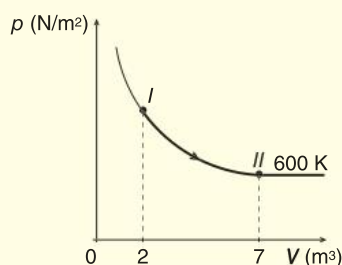
- b) O trabalho realizado foi:

$$\tau = p \cdot \Delta V \Rightarrow \tau = 4 \cdot 10^5 \cdot (4.000 - 9.000) \cdot 10^{-6} \therefore \tau = -2.000 \text{ J}$$

- c) Como o sistema cedeu 1.000 cal para o meio externo, pela 1ª lei da Termodinâmica, temos:

$$\Delta U = Q - \tau \Rightarrow \Delta U = -(1.000 \cdot 4,2) - (-2.000) \therefore \Delta U = -2.200 \text{ J}$$

- 10 a) O esboço do gráfico é:



LUIZ RUBIO

- b) Da equação de Clapeyron:

$$p_1 \cdot V_1 = n \cdot R \cdot T_1 \Rightarrow 10^6 \cdot 2 = n \cdot 8 \cdot 600 \therefore n \approx 417 \text{ mols}$$

- c) Sabendo que o processo é isotérmico, a variação da energia interna do gás é nula; então:

$$\Delta U = Q - \tau \Rightarrow 0 = 10.000 - \tau \therefore \tau = 10.000 \text{ J}$$

- 11 a) Analisando o produto entre pressão e volume nos dois estados, vemos que a transformação é isotérmica.

- b) A variação de energia interna do sistema é nula, pois não existe variação de temperatura durante o processo.

- 12 a) O gás sofreu uma transformação isovolumétrica.

- b) Sabendo que não houve variação de volume, o trabalho realizado é nulo.

- c) Mantendo o volume do sistema, a única forma de aumentar a pressão do gás é aumentando a energia cinética das partículas, ou seja, aumentando a temperatura. Portanto, a temperatura aumentou nessa transformação.

- d) Se a temperatura do sistema aumenta, sabemos que a energia interna do sistema também aumenta durante a transformação.

- 13 a) Analisando o gráfico, vemos que o estado final do gás está situado em uma isoterma de temperatura superior à isoterma do estado inicial; portanto, a energia interna do sistema aumentou durante o processo.

- b) Vemos que houve uma compressão do gás, portanto, o trabalho foi realizado pelo meio sobre o gás.

- c) O módulo do trabalho realizado é dado pela 1ª lei da Termodinâmica:

$$\Delta U = Q - \tau \Rightarrow 500 = 0 - \tau \therefore \tau = -500 \text{ J} \Rightarrow |\tau| = 500 \text{ J}$$

- 14 a) Durante a transformação isovolumétrica, o trabalho realizado é nulo e a quantidade de calor absorvida é de 2.000 calorias, segundo o enunciado; logo, pela 1ª lei da Termodinâmica:

$$E = Q - \tau \Rightarrow E = 2.000 - 0 \therefore E = 2.000 \text{ cal}$$

- b) A variação da energia interna no percurso B é a mesma variação da energia interna no percurso A, ou seja, 2.000 calorias; logo:

$$E = Q - \tau \Rightarrow 2.000 = 2.800 - \tau \therefore \tau = 800 \text{ cal}$$

- c) Durante a transformação isotérmica, a variação de energia interna é nula; logo:

$$E = Q - \tau \Rightarrow 0 = Q - 2.200 \therefore Q = 2.200 \text{ cal}$$

- 15 Da 1ª lei da Termodinâmica, temos:

$$\Delta U = Q - \tau \Rightarrow \Delta U = 250 \cdot 4,2 - 300 \therefore \Delta U = 750 \text{ J}$$

- 16 Sabendo que o processo é isobárico, o trabalho realizado pelo gás é:

$$\tau = p \cdot \Delta V \Rightarrow \tau = 80 \cdot (3 - 1) \therefore \tau = 160 \text{ J}$$

- Da 1ª lei da Termodinâmica, temos:

$$\Delta U = Q - \tau \Rightarrow \Delta U = 400 - 160 \therefore \Delta U = 240 \text{ J}$$

CAPÍTULO 8

2ª lei da Termodinâmica

Questões propostas

- 1 a) Falsa. A transformação AB é isovolumétrica.
b) Falsa. Nas transformações AB e CD não há variação de volume; portanto, o trabalho é nulo.
c) Falsa. A variação da energia interna de um ciclo é nula.
d) Verdadeira. O trabalho é numericamente igual à área do polígono formado; portanto:

$$\tau \stackrel{N}{=} A \Rightarrow \tau \stackrel{N}{=} (30 - 10) \cdot (0,3 - 0,1) \therefore \tau = 4 \text{ J}$$

- 2 a) Falsa. O trabalho em um ciclo é numericamente igual à área da figura formada no diagrama $p \times V$.
b) Falsa. A isoterma de maior temperatura é a isoterma do processo $1 \rightarrow 2$.
c) Falsa. Durante os processos $2 \rightarrow 3$ e $4 \rightarrow 1$ existe variação de temperatura.
d) Verdadeira. O ciclo representado tem sentido horário, ou seja, o trabalho é positivo e o gás realiza trabalho sobre o meio externo.

- 3 a) AB e CD: isovolumétrica; BC e DA: isobárica
b) AB: nulo; BC: positivo; CD: nulo; DA: negativo
c) O trabalho realizado durante um ciclo completo é dado pela área do retângulo formado no diagrama $p \times V$:
 $\tau \stackrel{N}{=} A \Rightarrow \tau \stackrel{N}{=} (4 - 2) \cdot 10^5 \cdot (8 - 3) \therefore \tau = 10^6 \text{ J}$
d) Como a variação da energia interna em qualquer transformação cíclica é nula, pela 1ª lei da Termodinâmica, temos:

$$Q = \tau \therefore Q = 10^6 \text{ J}$$

- 4 O trabalho realizado durante um ciclo completo é dado por:

$$\tau_{\text{ciclo}} = \tau_{\text{isobárica}} + \tau_{\text{isovolumétrica}} + \tau_{\text{adiabática}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \tau_{\text{ciclo}} = 5 \cdot 10^5 \cdot (0,6 - 0,3) \cdot 10^{-3} + 0 + (-100) \therefore \tau_{\text{ciclo}} = 50 \text{ J}$$

Utilizando a 1ª lei da Termodinâmica, temos:

$$\Delta U_{\text{ciclo}} = Q_{\text{ciclo}} - \tau_{\text{ciclo}} \Rightarrow 0 = Q_{\text{ciclo}} - 50 \therefore Q_{\text{ciclo}} = 50 \text{ J}$$

- 5 O trabalho realizado durante um ciclo completo é dado por:

$$\tau \stackrel{N}{=} A \Rightarrow \tau \stackrel{N}{=} (60 - 20) \cdot (V_f - 0,5) \therefore V_f = 0,7 \text{ m}^3$$

Explore em História

A introdução de máquinas térmicas na indústria foi um dos fatores fundamentais para o processo conhe-

cido como Revolução Industrial, desencadeado na Europa, principalmente na Inglaterra, a partir de 1780. A invenção das máquinas permitiu imprimir maior força motriz às fábricas, especialmente na indústria têxtil e na mineração. Em função disso, surgiram as indústrias de mecânica pesada (aço, máquinas, navios, locomotivas) e tornou-se possível a produção em série. Com o crescimento da produção industrial, ocorreu a abertura de novos postos de trabalho e a necessidade de contratação de mão de obra, criando-se, assim, duas novas classes sociais: a dos industriais ou proprietários dos meios de produção e a dos operários que vendem sua força de trabalho para os empresários. As consequências sociais desse processo não tardaram a aparecer, como os movimentos que reivindicavam melhores condições de trabalho e garantias trabalhistas e a reação dos patrões para reprimi-los.

Para saber mais

Saber físico e tecnologia – Motor de explosão

Ampliando sua leitura

1. Durante o funcionamento do motor são cumpridas quatro etapas, ou “tempos”. Nessa sequência, são realizadas as seguintes transformações: isobárica, adiabática e isovolumétrica.
2. Com o automóvel em funcionamento, os pistões são acoplados ao sistema que transmite seu funcionamento às rodas do automóvel. Nessa condição, o trabalho mecânico realizado é muito maior que o anterior, quando o automóvel estava parado. Assim, é necessário aumentar muito a injeção de combustível para manter a potência do motor e permitir o movimento do automóvel.

Conexões com o cotidiano – Carros com motores 1.0, 1.4, 1.6, 2.0: afinal, que diferença isso faz?

Ampliando sua leitura

1. A força gerada pela explosão do gás em cada pistão é de aproximadamente $15,0 \times 10^4$ N, de acordo com o texto. Assim, a força dos quatro pistões, somada, chega a $60,0 \times 10^4$ N, que é cerca de 67 vezes maior que o peso do automóvel.
2. a) Um motor 4.0 tem volume varrido pelos cilindros correspondente a 4,0 litros ou 4.000 cm^3 , ou 4.000 cilindradas.
b) O volume varrido por pistão em um automóvel 4.0 com 6 cilindros é de $\frac{4.000}{6} \approx 667 \text{ cm}^3$.

Questões propostas

- 6 Dos 5.000 J retirados da fonte quente, a máquina em questão converte apenas 1.000 J em trabalho; portanto, 4.000 J são rejeitados para a fonte fria. Sabendo que em um ciclo de Carnot a razão entre a quantidade de calor

na fonte quente e na fonte fria é proporcional à razão entre as temperaturas, temos:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow \frac{5.000}{4.000} = \frac{T_1}{400} \therefore T_1 = 500 \text{ K}$$

- 7 Sendo T_1 a temperatura da fonte fria e T_2 a temperatura da fonte quente, o rendimento da máquina de Carnot pode ser escrito como:

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow 0,4 = 1 - \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow \frac{T_1}{T_2} = 0,6$$

Dobrando-se a temperatura da fonte quente e mantendo a temperatura da fonte fria, obviamente teremos um aumento no rendimento da máquina, que passará a ser:

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{T_1}{2 \cdot T_2} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{1}{2} \cdot 0,6 \therefore \eta = 70\%$$

- 8 a) O rendimento de uma máquina térmica operando segundo um ciclo de Carnot é:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{500}{600} \Rightarrow \eta = \frac{1}{6} \Rightarrow \eta \approx 16,67\%$$

- b) Em um ciclo de Carnot, a razão entre a quantidade de calor na fonte quente e na fonte fria é proporcional à razão entre as temperaturas:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow \frac{Q_1}{200} = \frac{600}{500} \therefore Q_1 = 240 \text{ cal}$$

- 9 Utilizando a relação entre a quantidade de calor e temperatura na fonte fria e na fonte quente em um ciclo de Carnot, temos:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow \frac{Q_1}{1.000} = \frac{500}{400} \therefore Q_1 = 1.250 \text{ cal}$$

- 10 a) O rendimento da máquina de Carnot é dado por:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow 0,75 = 1 - \frac{T_2}{450} \therefore T_2 = 112,5 \text{ K}$$

- b) Sabendo que em um ciclo de Carnot a razão entre a quantidade de calor na fonte quente e na fonte fria é proporcional à razão entre as temperaturas, vem:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow \frac{Q_1}{500} = \frac{450}{112,5} \therefore Q_1 = 2.000 \text{ cal}$$

- 11 a) O rendimento da máquina operando segundo um ciclo de Carnot é:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{273}{373} \therefore \eta \approx 27\%$$

- b) O rendimento de uma máquina térmica também pode ser definido como:

$$\eta = \frac{\mathcal{C}}{Q_1} \Rightarrow 0,27 = \frac{\mathcal{C}}{800} \therefore \mathcal{C} = 216 \text{ J}$$

- c) Pela conservação de energia, temos:

$$Q_1 = \mathcal{C} + Q_2 \Rightarrow 800 = 216 + Q_2 \therefore Q_2 = 584 \text{ cal}$$

- 12 a) O trabalho é dado pela diferença entre o calor rejeitado para a fonte quente e o calor retirado da fonte fria; dessa forma:

$$\mathcal{C} = Q_1 - Q_2 \Rightarrow \mathcal{C} = 80 \cdot 4,2 - 60 \cdot 4,2 \therefore \mathcal{C} = 84 \text{ J}$$

- b) A eficiência da máquina frigorífica é dada por:

$$e = \frac{Q_2}{\mathcal{C}} \Rightarrow e = \frac{60 \cdot 4,2}{84} \Rightarrow e = 3$$

- 13 A 2ª lei da Termodinâmica afirma que não existe transferência espontânea de calor de uma fonte mais fria para uma fonte mais quente; o funcionamento do refrigerador não viola esse princípio, pois o processo ocorrido não é espontâneo, ou seja, deve haver a atuação de um motor realizando trabalho no sistema para que haja o fluxo de calor da fonte fria para a fonte quente.

- 14 $Q_1 = 2.600 \text{ cal}$; $\mathcal{C} = 1.800 \text{ cal}$

Assim, para calcular Q_2 :

$$\mathcal{C} = Q_1 - Q_2 \Rightarrow 1.800 = 2.600 - Q_2 \therefore Q_2 = 800 \text{ cal}$$

A eficiência do ar-condicionado é dada por:

$$e = \frac{Q_2}{\mathcal{C}} \Rightarrow e = \frac{800}{1.800} \therefore e \approx 44,4\%$$

Geladeiras de ontem e de hoje

1. O sistema de ventilação forçada é responsável por levar o ar da parte inferior para a parte superior do refrigerador, uma vez que, naturalmente, o ar frio não tenderia a subir, mas, sim, a descer, porque tem maior densidade em relação ao ar mais quente.
2. A eficiência máxima dos dois modelos de geladeira será igual se ambas operarem com os mesmos valores de temperaturas máximas e mínimas. A grandeza física eficiência máxima de uma máquina frigorífica pode ser obtida por meio da razão entre a temperatura da fonte quente (T_1) e a da fonte fria (T_2).

$$3. Q_1 = 120 \text{ cal} = 504 \text{ J}$$

$$Q_2 = 80 \text{ cal} = 336 \text{ J}$$

$$\mathcal{C} = Q_1 - Q_2 = 504 \text{ J} - 336 \text{ J} = 168 \text{ J}$$

$$e = \frac{Q_2}{\mathcal{C}} = \frac{336}{168} = 2$$

Ou seja, para cada 1 J de energia elétrica consumida pelo refrigerador são transferidos 2 J da fonte fria (congelador) para a fonte quente (ambiente).

Investigar é preciso

Atividade experimental – A desordem dos feijões

1. Pode-se afirmar que o nível de organização antes de agitar é alto, já que os grãos de feijão estão divididos de acordo com o tipo. Depois de agitar as caixas, os grãos perderam sua organização e se misturaram. O estágio inicial, portanto, é mais organizado que o posterior à agitação.
2. Provavelmente os grãos de feijão ficaram distribuídos de maneira mista.
3. Pela 2ª lei da Termodinâmica, os sistemas fechados tendem a uma configuração de maior desordem entre os corpos. Ao abrir as caixas, percebe-se maior preponderância dos estados de maior desordem. Assim, inicialmente, o sistema estava organizado, mas, com o movimento dos feijões, a entropia dentro das caixas aumentou e a configuração final de maior desorganização prevaleceu.
4. Pela 2ª lei da Termodinâmica, os estados de um sistema em que o grau de organização é alto são mais difíceis de ocorrer do que aqueles mais desorganizados. Então, como a configuração dos feijões divididos perfeitamente é muito organizada, é extremamente difícil que ela volte a ocorrer. Quanto mais feijões são colocados, maior é a quantidade de configurações iniciais possíveis e, portanto, mais difícil será para o sistema voltar ao estado inicial.

CAPÍTULO 9

Princípios da propagação da luz

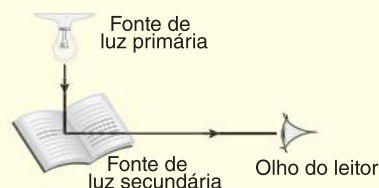
Explore em História

Os eclipses causavam temor e admiração nas civilizações antigas. O termo *eclipse* é de origem grega e significa “desmaio ou abandono”. Ao observar os eclipses, povos de diferentes épocas relacionaram-nos à ação de figuras mitológicas que pretendiam “devorar” os astros e sua luz. Os escandinavos associavam-nos a Skoll e Hati, dois lobos que, com o tempo, devorariam o Sol e a Lua. Os antigos chineses e siameses falavam de um dragão. Na mitologia hindu, era o demônio Rahu que perseguia o Sol e a Lua, por terem-no denunciado aos deuses pelo roubo do vinho da imortalidade.

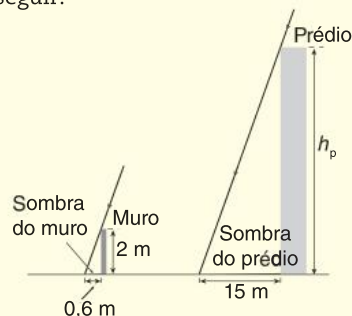
Fontes: <<http://www.planetario.ufrgs.br/eclipselunar.html>>; <<http://www.sbfisica.org.br/rbep/pdf/vol02a16.pdf>>; acessos em: 29 mar. 2016.

Questões propostas

1. O livro é uma fonte de luz secundária, pois não produz a luz que emite; portanto, a luz que o torna visível é proveniente de alguma fonte primária, como o Sol, uma lâmpada ou uma vela, por exemplo. O livro reflete os raios de luz que o atingem, e esses raios refletidos chegam aos olhos do observador.

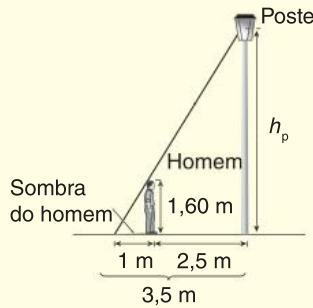


2. A situação descrita é possível devido à propagação retilínea dos raios de luz. O princípio da independência dos raios luminosos explica por que os dois feixes, verde e vermelho, não alteram suas trajetórias originais ao se cruzarem. O princípio da reversibilidade dos raios luminosos explica o fato de o raio verde retornar pelo mesmo caminho (mesma direção) que tinha antes de ser refletido.
3. Os raios de luz provenientes do Sol podem ser considerados paralelos ao incidirem na superfície terrestre. Assim, teremos dois triângulos semelhantes, como representa a figura a seguir:



$$\text{Assim: } \frac{h_m}{S_m} = \frac{h_p}{S_p} \Rightarrow \frac{2}{0,6} = \frac{h_p}{15} \therefore h_p = 50 \text{ m}$$

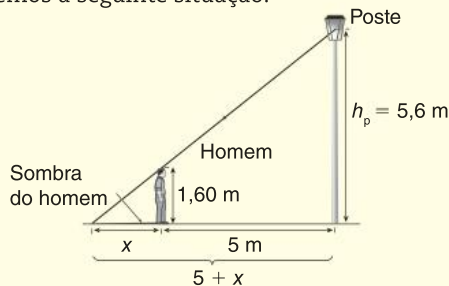
- 4 A lâmpada é uma fonte de luz pontual; portanto, emite raios em todas as direções, num feixe divergente.



- a) A distância da lâmpada ao chão (altura do poste h_p) pode ser obtida a partir da semelhança entre os triângulos representados na figura a seguir:

$$\frac{h_p}{3,5} = \frac{1,60}{1} \therefore h_p = 5,6 \text{ m}$$

- b) Temos a seguinte situação:

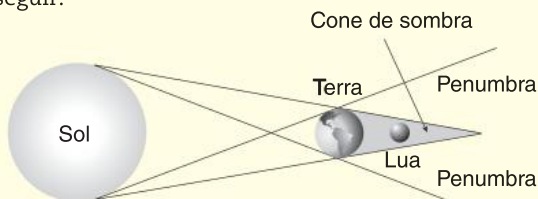


O comprimento de sua sombra (x) passará a ser:

$$\frac{1,60}{x} = \frac{5,6}{5+x} \Rightarrow 1,60(5+x) = 5,6x \Rightarrow 8 + 1,60x = 5,6x \Rightarrow 4x = 8 \therefore x = 2 \text{ m}$$

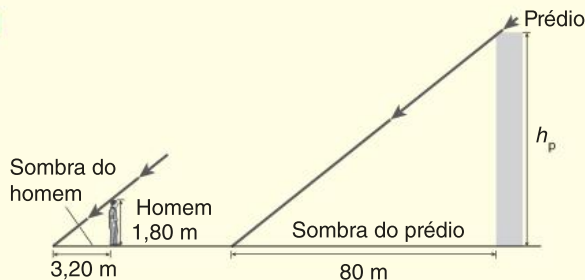
O comprimento da sombra do homem duplicará.

- 5 Um eclipse lunar ocorre quando a Terra se coloca entre o Sol e a Lua, mais precisamente quando a Lua se posiciona no cone de sombra da Terra, como representa o esquema a seguir:



- a) Os três corpos envolvidos nesse tipo de eclipse são o Sol, a Terra e a Lua.
b) O Sol faz o papel de fonte, a Terra, de obstáculo e a Lua, de anteparo.
- 6 A sombra do ioiô não é projetada no muro porque a pasta funciona como um anteparo opaco, impedindo a passagem de luz. A projeção da sombra do ioiô só seria vista na parede se a luz não se propagasse em linha reta. Assim, temos:
I. Incorreta. II. Correta. III. Correta.
alternativa e

- 7



ILUSTRAÇÕES: LUIZ RUBIO

Pela semelhança de triângulos, temos:

$$\frac{h_p}{1,80} = \frac{80}{3,20} \therefore h_p = 45 \text{ m}$$

alternativa c

Para saber mais

Sempre foi assim? – 300.000 km/s: três procedimentos experimentais realizados para medir o valor da velocidade da luz

Ampliando sua leitura

- No caso do experimento de Galileu, a impossibilidade residia no altíssimo valor da velocidade da luz quando comparado com as distâncias e os tempos de reação envolvidos. Já no caso das observações de Roemer, as dificuldades estavam no desconhecimento de algumas medidas, como a distância Terra-Júpiter.
- Segundo o texto, temos $L = 8,63 \text{ km}$ e, portanto, $2L = 17,26 \text{ km}$. Sendo o valor obtido para a velocidade da luz igual a 315.000 km/s , podemos escrever:

$$315.000 = \frac{17,26}{t} \Rightarrow t \approx 5,5 \times 10^{-5} \text{ s}$$

Questões propostas

- 8 Por semelhança entre os triângulos da figura, podemos determinar a altura h da imagem do poste:

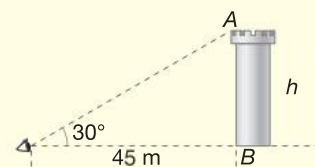
$$\frac{h}{4} = \frac{0,1}{5} \therefore h = 0,08 \text{ m} = 8 \text{ cm}$$

- 9 Se a estrela está a uma distância de 5 anos-luz da Terra, a luz emitida por ela leva cinco anos para chegar ao nosso planeta; portanto, ao observá-la, vemos a estrela como ela era cinco anos atrás.

- 10 Se a estrela está a uma distância de 1.000 anos-luz da Terra, a radiação emitida por ela leva 1.000 anos para chegar ao nosso planeta; portanto a radiação recebida hoje foi emitida pela estrela há 1.000 anos.

Note que não podemos dizer que a alternativa **d** é correta, pois, como a radiação detectada hoje foi emitida há mil anos, não podemos afirmar com certeza que hoje a estrela está onde estava no passado. Nesse intervalo de tempo, a distância entre a estrela e a Terra pode ter mudado, por exemplo.
alternativa c

- 11



Sendo 30° o ângulo com que o observador vê a torre, sua altura h pode ser determinada a partir de:

$$\text{tg } 30^\circ = \frac{h}{45} \Rightarrow \frac{\sqrt{3}}{3} = \frac{h}{45} \Rightarrow h = 15\sqrt{3} \therefore h \approx 26 \text{ m}$$

- 12 a) Não, pois o planeta está distante 5 anos-luz da Terra, o que significa que a luz leva 5 anos para percorrer a distância que separa os planetas. Como a nave viaja à velocidade da luz, a viagem não seria possível em um final de semana.
b) Teriam passado 10 anos entre a viagem de ida e a de volta.

- c) 1 ano-luz é a distância percorrida pela luz em 1 ano ($3,2 \cdot 10^7$ s). Podemos encontrar a distância d da Terra ao planeta empregando uma regra de três:

$$1 \text{ s} \quad \text{---} \quad 3,0 \cdot 10^8 \text{ m} \quad (\text{distância percorrida em 1 s})$$

$$5 \cdot 3,2 \cdot 10^7 \text{ s} \quad \text{---} \quad d \quad (\text{distância percorrida em 5 anos})$$

$$\therefore d = 4,8 \cdot 10^{16} \text{ m}$$

- 13 As câmeras fotográficas se baseiam no princípio físico de propagação retilínea da luz.
alternativa d

CAPÍTULO 10

Reflexão da luz

Explore em Matemática

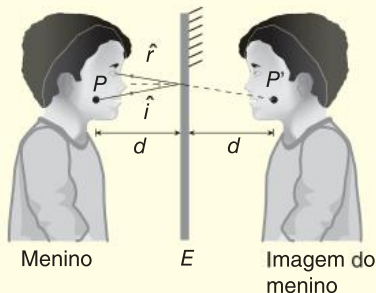
A simetria é uma característica que pode ser observada em algumas formas geométricas, em criações artísticas, em objetos, na natureza etc. Uma figura geométrica plana é considerada simétrica se for possível dividi-la por uma reta, de forma que as duas partes obtidas possam se sobrepor por dobras. As retas que levam a esse tipo de divisão chamam-se eixos de simetria da figura.

Mesmo no mundo microscópico, observamos simetria, como na descrição dos *quarks* (partículas subatômicas que formam prótons e nêutrons).

Questões propostas

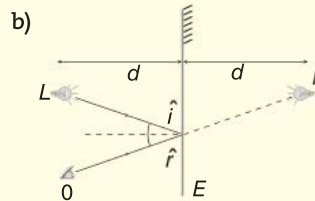
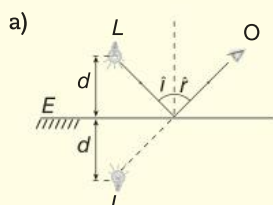
- 1 A imagem P' é simétrica ao objeto P em relação ao espelho (mesma distância d).

Um raio de luz que sai de P é refletido formando com a normal um ângulo (\hat{r}) igual ao ângulo de incidência (\hat{i}), atingindo o olho do menino.



- 2 A imagem I é simétrica ao objeto L em relação ao espelho (mesma distância d).

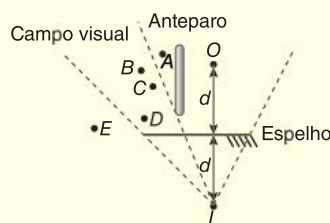
Um raio de luz que sai de L é refletido formando com a normal um ângulo (\hat{r}) igual ao ângulo de incidência (\hat{i}), atingindo o olho do observador O . O prolongamento desse raio "dentro" do espelho é indicado pela linha pontilhada.



- 3 Independentemente da distância do objeto ao espelho plano, a altura da imagem sempre terá o mesmo tamanho.
alternativa c

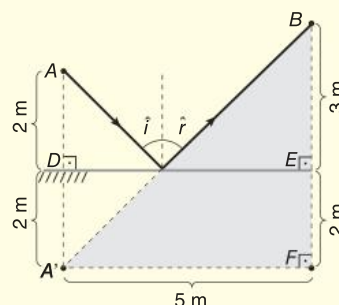
- 4 Inicialmente, a vela está a 25 cm do espelho. Se for afastada 50 cm da posição inicial, ficará a 75 cm do espelho. A imagem é simétrica ao objeto em relação ao espelho; portanto estará também a 75 cm de distância dele. Assim, a distância entre a vela e sua imagem conjugada será 150 cm.

- 5 O ponto I representado na figura abaixo é a imagem do observador O . Unindo I aos extremos do espelho, determinamos o campo visual.



Assim, ao olhar para o espelho, o observador consegue ver os objetos B , C e D .

6



A imagem A' é simétrica ao objeto A em relação ao espelho: $AD = DA' = 2 \text{ m}$.

Sendo F um ponto localizado sobre a reta que passa por BE , a 2 m do espelho, temos:

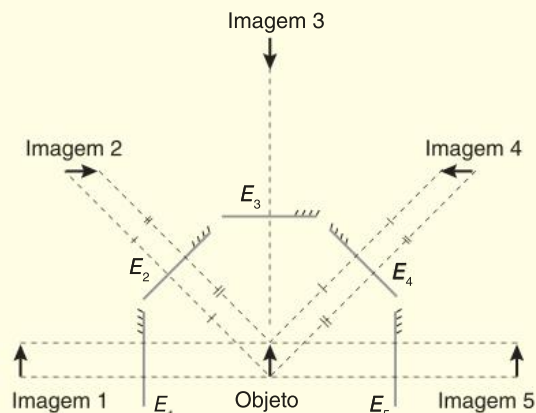
$$A'F = DE = 5 \text{ m}$$

$$BE = 3 \text{ m e } EF = 2 \text{ m, portanto, } BF = 5 \text{ m}$$

A distância $A'B$ é a hipotenusa do triângulo retângulo $A'BF$:

$$A'B^2 = 5^2 + 5^2 \therefore A'B = 5\sqrt{2} \text{ m}$$

7



As imagens do objeto formadas em cada um dos espelhos são obtidas traçando retas perpendiculares a eles, que passam por pontos do objeto. Sabemos que as distâncias em relação ao espelho de pontos correspondentes do objeto e da imagem devem ser iguais.

alternativa a

- 8 Os espelhos devem formar um triângulo retângulo isósceles com os cantos do instrumento. Assim, os ângulos devem ter 45° para que a trajetória seja a planejada.

- 9 No espelho plano, objeto e respectiva imagem são sempre simétricos em relação ao plano do espelho, independentemente da posição do observador. Portanto, a imagem desse objeto localiza-se no ponto 4.

alternativa d

- 10 Como objeto e imagem são simétricos em relação ao plano do espelho, a imagem aparece revertida em relação ao objeto.

alternativa b

Trilhando o caminho das competências

A oscilação da Lua

1. A descrição do fenômeno feita pelos monges apresenta características semelhantes às esperadas pelo choque de um corpo de grande massa com a Lua. É de se esperar, também, que, se a massa do corpo que cair em alta velocidade sobre a Lua for muito grande, poderá, de fato, alterar seu movimento, gerando uma oscilação que se perpetuará por muitos anos. Esses são alguns dos elementos que permitiram a Carl Sagan avaliar que o choque de um asteroide com a Lua foi o elemento responsável pela oscilação que o satélite apresenta.

2. A velocidade de rotação de um ponto do Equador terrestre é de 1.674 km/h e equivale, em m/s , a:
 $1.674 : 3,6 = 465$
 Como o tempo de ida e volta do sinal do *laser* é de cerca de $2,5 \text{ s}$, o ponto sobre o Equador terrestre terá se deslocado:
 $465 \text{ m/s} \cdot 2,5 \text{ s} = 1.162,5 \text{ m}$

CAPÍTULO 11 Espelhos esféricos

Para saber mais

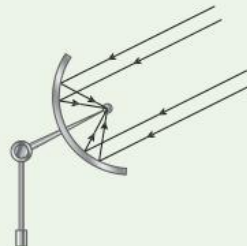
Saber físico e tecnologia – Espelhos parabólicos

Ampliando sua leitura

1. Os espelhos parabólicos são estigmáticos em relação ao seu foco principal, ou seja, nesses espelhos, o foco é bem mais definido do que nos espelhos esféricos. Ao sofrer reflexão, os raios de luz

incidentes paralelamente ao eixo de um espelho parabólico se concentram em um único ponto imagem; no caso, o foco desse espelho. Isso permite concentrar mais os raios solares incidentes num único ponto, possibilitando o alto poder calorífico dos fornos solares.

2.



Questões propostas

- 1 a) Objeto antes do centro de curvatura:

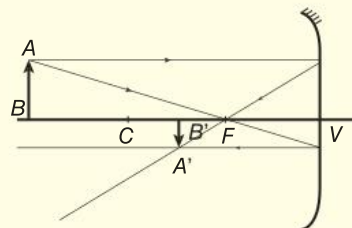


Imagem real, invertida e reduzida.

- b) Objeto no centro de curvatura:

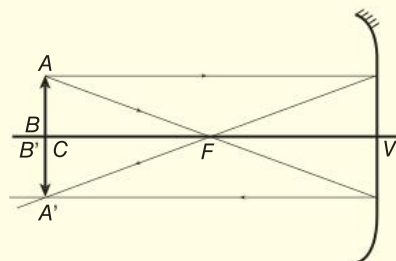


Imagem real, invertida e de mesmo tamanho que o objeto.

- c) Objeto entre o centro de curvatura e o foco:

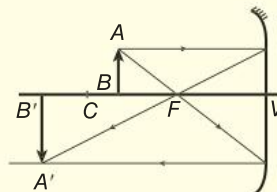
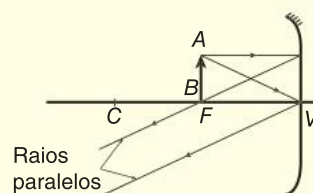


Imagem real, invertida e ampliada.

- d) Objeto no foco:



Os raios refletidos são paralelos. A imagem é imprópria.

e) Objeto entre o foco e o vértice:

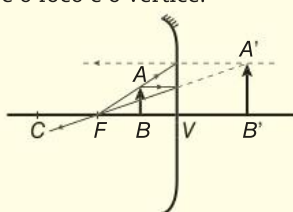
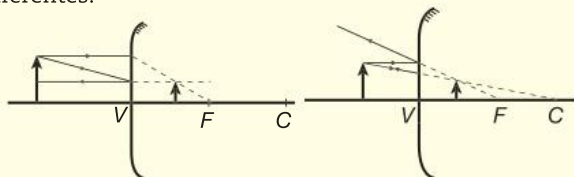


Imagem virtual, direita e ampliada.

- 2 No esquema abaixo é representado um espelho convexo e um objeto colocado em frente a ele em duas posições diferentes:



A imagem de um objeto real colocado na frente de um espelho convexo é sempre virtual, direita e reduzida.

- 3 Num espelho côncavo, para que a imagem fornecida seja virtual, direita e maior que o objeto, este deve ser posicionado entre o foco e o vértice.

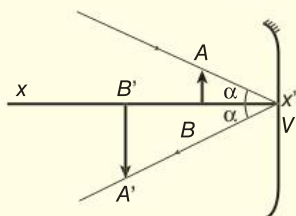
Como o raio de curvatura é 50 cm e $f = \frac{R}{2} \therefore f = 25$ cm.

Então, o rosto da pessoa deve estar a uma distância menor que 25 cm do espelho.

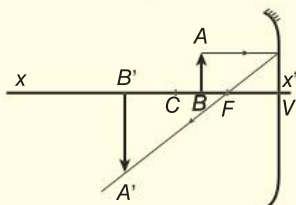
- 4 A imagem $A'B'$ é real, invertida e maior que o objeto AB . Trata-se de um espelho côncavo, e a imagem, sendo real, está na frente do espelho.

Vamos primeiro determinar a posição do espelho:

- Sabendo que os raios que incidem na direção do vértice se refletem simetricamente em relação ao eixo principal, temos dois triângulos semelhantes (ABV e $A'B'V$). Como $A'B' = 2AB$, a imagem está a uma distância do espelho duas vezes maior que o objeto.



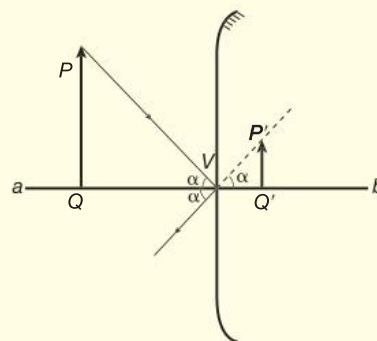
A partir disso, conseguimos determinar o foco, traçando um raio de luz que passa por A e incide no espelho paralelamente ao eixo principal. O centro de curvatura pode ser obtido sabendo que $C = 2f$.



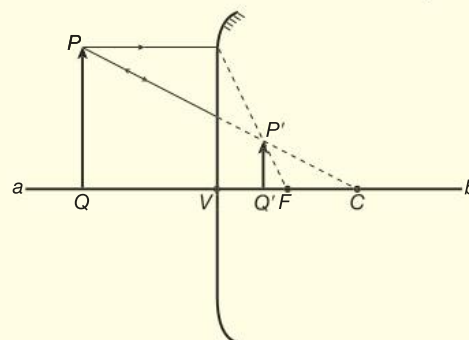
- 5 A imagem $P'Q'$ é virtual, direita e menor que o objeto PQ . Trata-se de um espelho convexo e a imagem está atrás do espelho.

Vamos primeiro determinar a posição do espelho:

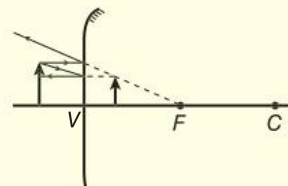
- Sabendo que os raios que incidem na direção do vértice se refletem simetricamente em relação ao eixo principal, temos dois triângulos semelhantes (PQV e $P'Q'V$). Como $PQ = 3P'Q'$, o objeto está a uma distância do espelho três vezes maior que a imagem.



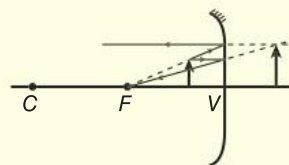
A partir disso, conseguimos determinar o foco, traçando um raio de luz que passa por P e incide no espelho paralelamente ao eixo principal (o prolongamento do raio refletido cruza o eixo principal no foco). O centro de curvatura pode ser obtido sabendo que $C = 2f$.



- 6 O espelho no qual Renata observou sua cabeça é convexo, porque a imagem formada é direita e reduzida.

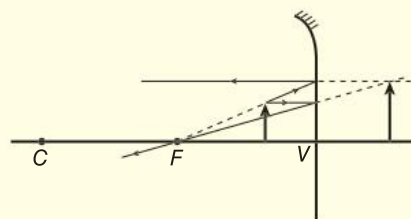


O espelho no qual Renata observou seu tronco é côncavo, e ela estava posicionada entre o foco e o vértice desse espelho, porque a imagem formada é direita e ampliada.



As imagens da cabeça e do corpo são virtuais.

- 7 a) O espelho deve ser côncavo para que a imagem fornecida seja direita e ampliada, e Bel deve posicionar-se entre o foco e o vértice.



- b) Bel costuma ficar a 30 cm do espelho $\rightarrow p = 30$ cm. A imagem (i) deve ser duas vezes maior que o objeto (o). Da equação do aumento linear transversal:

$$A = \frac{i}{o} = -\frac{p'}{p}$$

$$A = 2 \Rightarrow 2 = -\frac{p'}{p} \Rightarrow 2 = -\frac{p'}{30} \therefore p' = -60 \text{ cm}$$

Da equação de Gauss:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{30} + \frac{1}{-60} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{60}$$

$$\therefore f = 60 \text{ cm}$$

$$R = 2f \therefore R = 120 \text{ cm}$$

- 8 a)** O espelho utilizado é convexo e fornece imagens direitas, reduzidas e virtuais. O campo visual é ampliado quando se usa esse tipo de espelho.

b) São dados:

O espelho é convexo ($f < 0$): $f = -30 \text{ cm}$

A altura do cliente é 1,8 m: $o = 180 \text{ cm}$

O cliente está a 1,5 m do vértice do espelho: $p = 150 \text{ cm}$

Da equação de Gauss:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{-30} = \frac{1}{150} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{-6}{150} = \frac{1}{p'}$$

$$\therefore p' = -25 \text{ cm}$$

Da equação do aumento linear transversal:

$$A = \frac{i}{o} = -\frac{p'}{p} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{i}{o} = -\frac{p'}{p} \Rightarrow \frac{i}{180} = -\frac{-25}{150} \therefore i = 30 \text{ cm}$$

- 9** O espelho deve ser côncavo para fornecer uma imagem real, direita e ampliada. Do enunciado, temos:

$$p = 4 \text{ mm} \quad \text{e} \quad A = 2,0$$

Da equação do aumento linear transversal:

$$A = -\frac{p'}{p} \Rightarrow 2,0 = -\frac{p'}{4,0} \therefore p' = -8,0 \text{ mm}$$

Utilizando a equação de Gauss:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{4} + \frac{1}{-8,0} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{8,0}$$

$$\therefore f = 8,0 \text{ mm}$$

- 10 a)** Num espelho côncavo, a imagem “desaparece” quando o objeto é colocado exatamente sobre o foco, porque, como a imagem formada é imprópria, ela se forma no infinito. Então, o foco desse espelho é $f = 15 \text{ cm}$ e seu raio de curvatura é $R = 2f \therefore R = 30 \text{ cm}$.

- b)** Colocando o objeto a 45 cm da superfície espelhada côncava, temos:

$$p = 45 \text{ cm} \quad \text{e} \quad f = 15 \text{ cm}$$

Da equação de Gauss:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{15} = \frac{1}{45} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{p'} = \frac{2}{45}$$

$$\therefore p' = 22,5 \text{ cm}$$

O aumento linear transversal será então:

$$A = \frac{i}{o} = -\frac{p'}{p} \Rightarrow A = \frac{i}{o} = -\frac{22,5}{45} \Rightarrow A = -0,5$$

- 11 a)** As imagens formadas em espelhos convexos são sempre virtuais, direitas e menores que o objeto.

- b)** O campo visual fornecido por espelhos convexos é maior que o fornecido por espelhos planos nas mesmas condições.

- c)** $p = 9 \text{ m}$; $f = -3 \text{ m}$

Da equação de Gauss:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{-3} = \frac{1}{9} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{p'} = \frac{-3-1}{9}$$

$$\therefore p' = -\frac{9}{4} \text{ m}$$

O aumento é dado por:

$$A = -\frac{p'}{p} \Rightarrow A = -\frac{-\frac{9}{4}}{9} \Rightarrow A = \frac{1}{4}$$

A imagem que está localizada a 2,25 m do espelho é quatro vezes menor que o objeto.

- 12 a)** O espelho é côncavo, pois só espelhos côncavos formam imagens reais (de objetos reais), que podem ser projetadas em anteparos. Além disso, espelhos convexos sempre formam imagens menores que o objeto.

- b)** A imagem é real; portanto, invertida em relação ao objeto, então $A < 0$:

$$A = -3$$

A parede em que a imagem é projetada está a 1,5 m do vértice do espelho, assim:

$$A = -\frac{p'}{p} \Rightarrow -3 = -\frac{1,5}{p} \therefore p = 0,5 \text{ m}$$

Da equação de Gauss:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{1,5} + \frac{1}{0,5} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{4}{1,5} \therefore f = 0,375 \text{ m}$$

$$R = 2f \therefore R = 0,75 \text{ m}$$

- 13** Espelhos convexos sempre fornecem imagens virtuais, direitas e menores que o objeto. Sabemos que a relação entre o tamanho da menina e sua imagem é 4, portanto

$A = \frac{1}{4}$. Sendo $p = 1,6$ a distância da menina ao vértice do espelho, da equação do aumento linear transversal, obtemos:

$$A = -\frac{p'}{p} \Rightarrow \frac{1}{4} = -\frac{p'}{1,6} \therefore p' = -0,4 \text{ m}$$

A distância focal do espelho pode ser obtida da equação de Gauss:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{1,6} + \frac{1}{-0,4} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1-4}{1,6}$$

$$\therefore f \approx -0,53 \text{ m}$$

- 14** O espelho côncavo só conjuga uma imagem direita quando o objeto está posicionado entre o foco e o vértice desse espelho.

alternativa c

- 15** Se o raio de curvatura do espelho é 6 cm, temos: $f = 3 \text{ cm}$. A imagem conjugada pelo espelho é real, portanto, sua abscissa é positiva; logo: $p' = +12 \text{ cm}$. Aplicando a equação de Gauss, temos:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{3} = \frac{1}{p} + \frac{1}{12} \Rightarrow \frac{1}{p} = \frac{1}{3} - \frac{1}{12} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{1}{p} = \frac{4-1}{12} \Rightarrow \frac{1}{p} = \frac{3}{12} \Rightarrow p = \frac{12}{3} \therefore p = 4 \text{ cm}$$

alternativa b

Para saber mais

Diálogos com a Física Moderna – A luz se propaga sempre em linha reta?

Ampliando sua leitura

- O conceito introduzido no texto, importante para a compreensão da propagação curvilínea da luz, é o de espaço-tempo. Podemos relacionar a propagação da luz com o espaço-tempo pelo exemplo dado no texto: nele, o espaço-tempo é representado por um lençol esticado que se deforma quando colocamos um objeto pesado sobre ele, representando uma estrela como o Sol.

A luz se propaga sobre o espaço-tempo e tem sua trajetória encurvada pela deformação que a estrela provoca nele.

2. A propagação da luz emitida de um ponto distante dos objetos astronômicos de grande massa é retilínea. Podemos concluir isso pelo exemplo do texto, pois, ao retirar o objeto pesado do lençol, ele volta a ficar esticado, sem deformação. Se não há deformação, a luz que se propaga sobre ele segue uma trajetória retilínea.

Investigar é preciso

Atividade experimental – Determinando elementos de espelhos esféricos

1. O ponto de cruzamento dos raios refletidos corresponde ao foco do espelho construído.
2. Dobrando a distância focal, determinamos o centro de curvatura do espelho.
3. O diâmetro da garrafa deve ser o dobro da medida obtida na questão 2, pois ela é o centro de curvatura do espelho. Isso mostra que o espelho côncavo é parte da superfície que forma a garrafa.
4. Para determinar o foco do espelho convexo, é necessário prolongar para a parte de trás do espelho os raios refletidos por ele. Isso acontece porque o feixe de luz refletido pelo espelho convexo é divergente.
5. O foco do espelho côncavo está localizado na frente do espelho, enquanto o foco do espelho convexo está localizado atrás do espelho. O foco do espelho côncavo é formado no cruzamento efetivo dos raios de luz e, portanto, é real. O foco do espelho convexo é determinado pelo cruzamento dos prolongamentos dos raios de luz refletidos e, portanto, é virtual.

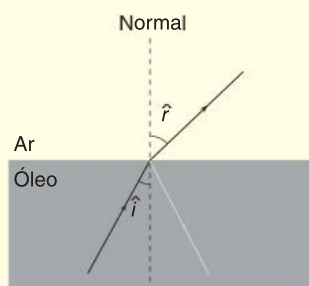
UNIDADE 4 REFRAÇÃO DA LUZ

CAPÍTULO 12

Refração luminosa

Questões propostas

1 a)



Como a velocidade da luz no óleo é menor que a velocidade da luz no ar, o raio de luz se aproxima da reta normal.

b) O índice de refração absoluto é dado por:

$$n_{\text{óleo}} = \frac{c}{v_{\text{óleo}}} \Rightarrow n_{\text{óleo}} = \frac{c}{\frac{2c}{3}} \Rightarrow n_{\text{óleo}} = 1,5$$

2 a) Verdadeira, pois o raio refratado se aproxima da normal.

b) Verdadeira, pois o índice de refração do meio 2 é maior do que o do meio 1.

3 Do gráfico, verificamos que a velocidade da luz no vidro é: $v_{\text{vidro}} = 2,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

A distância percorrida por esse raio de luz (espessura da placa) num intervalo de tempo $\Delta t = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ s}$ é:

$$v_{\text{vidro}} = \frac{d}{\Delta t} \Rightarrow d = v_{\text{vidro}} \cdot \Delta t \Rightarrow d = 2,0 \cdot 10^8 \cdot 1,0 \cdot 10^{-9}$$

$$\therefore d = 0,2 \text{ m}$$

O índice de refração absoluto do vidro é:

$$n_{\text{vidro}} = \frac{c}{v_{\text{vidro}}} \Rightarrow n_{\text{vidro}} = \frac{3,0 \cdot 10^8}{2,0 \cdot 10^8} \Rightarrow n_{\text{vidro}} = 1,5$$

Explore em Química

O diamante, tanto o natural de qualidade inferior quanto o sintético, tem inúmeros usos industriais, como abrasivo, em perfurações etc. Por exemplo, cada automóvel sai da linha de montagem com um quilate (0,2 grama) de diamante gasto em sua produção. Os sintéticos podem ser produzidos com grafita ou gás metano, entre outros materiais.

Questões propostas

4 a) Para que haja reflexão total, a luz deve passar de um meio mais refringente para um menos refringente. Portanto, a reflexão total pode ocorrer quando a luz incide do quartzo para o vidro comum e não pode ocorrer quando incide da glicerina para o álcool.

b) O meio em que a luz proveniente do ar será mais desviada ao incidir é aquele onde a luz se move com a menor velocidade; portanto, o que tem maior índice de refração. Entre os meios apresentados na tabela, o álcool etílico é o mais refringente.

Pela aplicação da lei de Snell-Descartes, sabemos que:

$$\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{n_x}{n_{\text{ar}}} \Rightarrow \frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = n_x \Rightarrow \sin \hat{r} = \frac{\sin \hat{i}}{n_x}$$

Portanto, \hat{r} é inversamente proporcional a n_x , ou seja, quanto maior n , menor será o ângulo em relação à reta normal, indicando maior desvio, já que, ao passar de um meio menos refringente para um mais refringente, o raio de luz se aproxima da normal.

c) O ângulo limite entre a água e o ar pode ser calculado por:

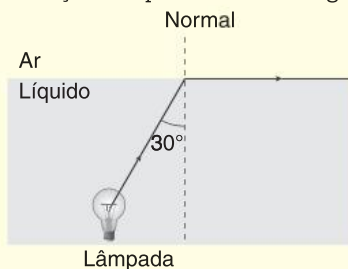
$$\sin \hat{L} = \frac{n_{\text{menor}}}{n_{\text{maior}}} \Rightarrow \sin \hat{L} = \frac{n_{\text{ar}}}{n_{\text{água}}} \Rightarrow \sin \hat{L} = \frac{1}{1,33} \approx 0,75$$

Procurando numa tabela trigonométrica encontramos o ângulo cujo seno é: 0,75: $\hat{L} = 49^\circ$

5 a) Pela lei de Snell-Descartes, temos:

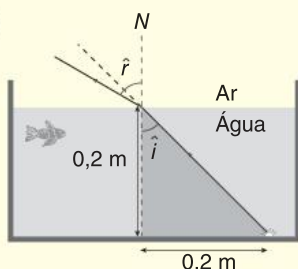
$$\frac{\sin 30^\circ}{\sin \hat{r}} = \frac{n_{\text{ar}}}{n_{\text{liq.}}} \Rightarrow \frac{\frac{1}{2}}{\sin \hat{r}} = \frac{1}{2} \Rightarrow \sin \hat{r} = 1 \therefore \hat{r} = 90^\circ$$

O raio emerge rasante à superfície. Portanto, o ângulo de incidência de 30° é o ângulo limite entre o líquido e o ar. A situação é representada na figura a seguir:



- b) Como 45° é maior que o ângulo limite entre a água e o líquido, ocorrerá reflexão total.

6 a)



Do triângulo retângulo destacado na figura, temos:

$$\operatorname{tg} \hat{i} = \frac{0,2}{0,2} = 1 \therefore \hat{i} = 45^\circ \Rightarrow \operatorname{sen} \hat{i} = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

E a partir da lei de Snell-Descartes, vem:

$$\frac{\operatorname{sen} \hat{i}}{\operatorname{sen} \hat{r}} = \frac{n_{\text{ar}}}{n_{\text{água}}} \Rightarrow \frac{\frac{\sqrt{2}}{2}}{\operatorname{sen} \hat{r}} = \frac{1}{\frac{4}{3}} \Rightarrow \operatorname{sen} \hat{r} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \approx 0,94$$

Em uma tabela trigonométrica, encontramos o ângulo cujo seno é aproximadamente 0,94: $\hat{r} = 70^\circ$

- b) A velocidade v da luz na água pode ser obtida de:

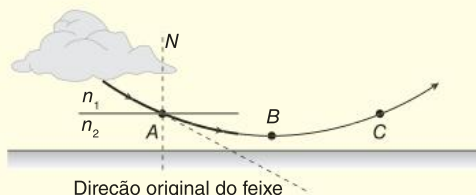
$$n_{\text{água}} = \frac{c}{v} \Rightarrow v = \frac{c}{n_{\text{água}}} \Rightarrow v = \frac{3 \cdot 10^8}{\frac{4}{3}} \therefore v = 2,25 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

- c) O ângulo limite entre a água e o ar pode ser obtido de:

$$\operatorname{sen} \hat{L} = \frac{n_{\text{menor}}}{n_{\text{maior}}} \Rightarrow \operatorname{sen} \hat{L} = \frac{n_{\text{ar}}}{n_{\text{água}}} \Rightarrow \operatorname{sen} \hat{L} = \frac{1}{\frac{4}{3}} \approx 0,75$$

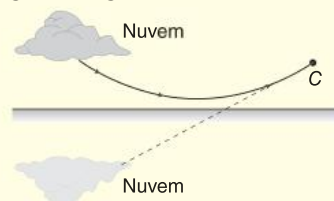
Em uma tabela trigonométrica, encontramos o ângulo cujo seno é 0,75: $\hat{L} = 49^\circ$. Para ângulos maiores que 49° , haverá reflexão total e o peixe enxergará a lâmpada L refletida na superfície de separação.

- 7 a) No trecho AB, o índice de refração diminui seu valor à medida que se aproxima do solo, de modo que o valor na camada superior de ar (n_1) é maior que o índice de refração da camada inferior (n_2). Isso ocorre porque o ar próximo ao solo é mais quente (menos denso) e, nessas condições, a velocidade da luz aumenta no meio n_2 .

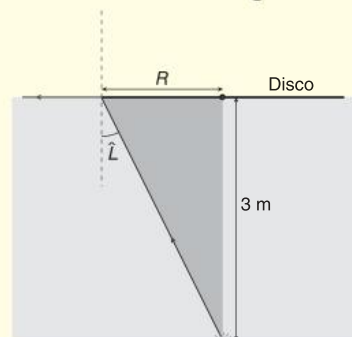


- b) Em B ocorre **reflexão total**. O feixe de luz incide de um meio mais refringente para um menos refringente, já que, à medida que as camadas se tornam mais próximas ao solo, o ar é mais quente e n diminui. Nesse caso, o feixe incide com ângulo maior que o limite, sendo totalmente refletido na direção de C.

- c) Um observador em C verá a imagem da nuvem no prolongamento do raio que chega aos seus olhos, ou seja, abaixo do local onde ela realmente está, como mostra a figura a seguir:



- 8 Como a água é mais refringente que o ar, para ângulos maiores que o ângulo limite, os raios de luz sofrem reflexão total. Para que a luz não saia da água, o disco deve interceptar os raios de luz que emergem sofrendo refração.



Calculando o ângulo limite, obtemos o raio mínimo do disco:

$$\operatorname{sen} \hat{L} = \frac{n_{\text{menor}}}{n_{\text{maior}}} \Rightarrow \operatorname{sen} \hat{L} = \frac{n_{\text{ar}}}{n_{\text{água}}} \Rightarrow \operatorname{sen} \hat{L} = \frac{1}{\frac{4}{3}} \approx 0,75$$

Procurando numa tabela trigonométrica, encontramos o ângulo cujo seno é 0,75: $\hat{L} = 49^\circ$

$$\operatorname{Sendo} \operatorname{tg} \hat{L} = \frac{R_{\text{mín.}}}{3}, \Rightarrow \operatorname{tg} 49^\circ = \frac{R_{\text{mín.}}}{3} \therefore R_{\text{mín.}} \approx 3,45 \text{ m}$$

- 9 I. Correta. A luz branca é policromática. No ar suas componentes (diferentes cores) têm praticamente a mesma velocidade, mas, ao incidir sobre a superfície do diamante, essas componentes sofrem desvios diferentes, pois a velocidade de propagação não é a mesma para todas.
- II. Correta. Como o diamante é mais refringente que o ar, a luz, ao incidir do diamante para o ar com ângulo maior que o limite, sofre reflexão total.
- III. Correta. Ângulo limite entre o diamante e o ar para a luz vermelha:

$$\operatorname{sen} \hat{L} = \frac{n_{\text{menor}}}{n_{\text{maior}}} \Rightarrow \operatorname{sen} \hat{L} = \frac{n_{\text{ar}}}{n_{\text{diamante}}} \Rightarrow \operatorname{sen} \hat{L} = \frac{1}{2,4} \approx 0,42$$

Portanto, $\hat{L} < 30^\circ$, pois $\operatorname{sen} \hat{L} < \frac{1}{2}$ e sabemos que:

$$\operatorname{sen} 30^\circ = \frac{1}{2}$$

- 10 O líquido A ocupa a camada superior do recipiente. Portanto, é menos denso que o líquido B.

O índice de refração de A deve ser maior que o índice de refração de B para que haja reflexão total.

Seguindo as condições acima ($d_A < d_B$ e $n_A > n_B$), concluímos que o líquido A só pode ser o de número 2, e o B, o de número 1.

- 11 I. Correta. Para que haja reflexão total, a luz deve passar de um meio mais refringente para um menos refringente, portanto: $n_{\text{núcleo}} > n_{\text{casca}}$
- II. Correta. O seno do ângulo limite é dado por:

$$\operatorname{sen} \hat{L} = \frac{n_{\text{menor}}}{n_{\text{maior}}}$$

III. Correta. Ao incidir do núcleo para a casca com ângulo maior que \hat{L} , os raios de luz sofrem reflexão total.

Trilhando o caminho das competências

O salva-vidas e o menor tempo

1. Normalmente, uma pessoa desenvolve velocidade maior ao correr.
2. A relação entre as velocidades do salva-vidas e os ângulos representados na figura se compara àquela estabelecida pela lei de Snell-Descartes, ou seja:

$$\frac{v_{\text{correr}}}{v_{\text{nadar}}} = \frac{\sin i}{\sin r}$$

O ângulo \hat{r} de desvio da trajetória, em relação à reta normal, representada na figura, dependerá de quanto o salva-vidas consegue correr mais rápido que nadar, para que o tempo de salvamento seja o menor possível.

CAPÍTULO 13

Sistemas refratores; dispersão da luz

Para saber mais

Saber físico e tecnologia – O manto da invisibilidade de Harry Potter

Ampliando sua leitura

1. Refração negativa é o nome que se dá ao fenômeno em que a luz incidente no meio material sofre um desvio na direção oposta, em relação à normal, à superfície, em vez de sofrer uma refração positiva. Com isso, os raios de luz parecem contornar a superfície material e voltar à trajetória original. Tal fenômeno só pode ser obtido em metamateriais.
2. Os metamateriais são ligas metálicas com estruturas muito pequenas, da ordem de nanômetros (10^{-9} metros). Em razão do alto custo e da produção extremamente especializada, é muito difícil fabricá-los.

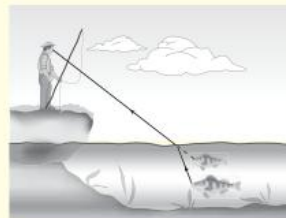
Questões propostas

- 1 Se quisermos examinar o caranguejo com mais detalhes, devemos fotografá-lo na situação da figura 2, pois ele parecerá mais próximo do observador, já que sua imagem será formada acima de sua posição real.
- 2 I. Verdadeira. O índice de refração da água é maior que o do ar; portanto, os raios de luz que emergem do lápis se afastam da normal ao passarem da água para o ar. Por isso, o estudante vê o lápis “quebrado”.
II. Verdadeira. Como $n_{\text{água}} > n_{\text{ar}}$, um feixe luminoso proveniente de B se afasta da normal.
III. Falsa. O ponto B' é uma imagem virtual, construída a partir do prolongamento do raio de luz que atinge o observador.

- 3 I. Verdadeira. Considerando $\sin 45^\circ = 0,7$, da lei de Snell-Descartes, temos:

$$\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{n_{\text{ar}}}{n_{\text{água}}} \Rightarrow \frac{\sin \hat{i}}{\sin 45} = \frac{1}{1,4} \Rightarrow \sin \hat{i} = 0,5 \therefore \hat{i} = 30^\circ$$

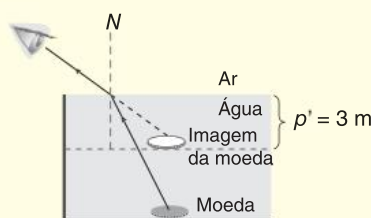
- II. falsa



A pessoa vê uma imagem virtual do peixe, que pode ser esquematicamente construída a partir do prolongamento dos raios de luz que atingem seus olhos, em uma posição aparente mais acima da posição real.

- III. Verdadeira. Como $n_{\text{ar}} < n_{\text{água}}$, se o ângulo de incidência de um raio de luz proveniente do peixe for maior que o ângulo limite, sofrerá reflexão total. Estando o observador numa posição como a descrita no enunciado, os raios de luz provenientes do peixe não atingirão seus olhos, portanto ele não o verá.

4 a)

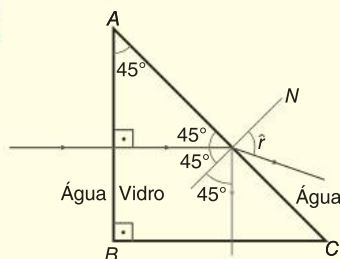


$$\text{b) } \frac{n_{\text{vai}}}{n_{\text{vem}}} = \frac{p'}{p} \Rightarrow \frac{1}{\frac{4}{3}} = \frac{3}{p} \therefore p = 4 \text{ m}$$

A profundidade real da piscina é 4 m.

- 5 I. Falsa. Nem toda a luz atravessa o prisma; parte dela é refletida para o meio incidente.
II. Verdadeira. O ângulo de refração é inversamente proporcional ao índice de refração; portanto, o violeta é o raio que mais se aproximará da normal, em comparação aos outros raios, sofrendo o maior desvio.
III. Verdadeira. A velocidade da luz no interior do prisma é inversamente proporcional ao índice de refração ($v = \frac{c}{n}$), portanto: $v_{\text{vermelho}} > v_{\text{verde}}$

6



- O feixe de luz incide no prisma perpendicularmente à face AB, não sofrendo desvio.
- O feixe de luz incide na face AC formando um ângulo de 45° , e em parte é refratado formando um ângulo $\hat{r} > 45^\circ$ com a normal N. Parte da luz é refletida, atingindo a face BC numa direção perpendicular a ela, e, nessa situação, não há desvio quando o feixe emerge para a água.

ILUSTRAÇÕES: LUZ RUBIO

7 A reta normal é uma reta que passa pelo centro da gota em cada caso.

- A velocidade da luz no interior do prisma é inversamente proporcional ao índice de refração ($v = \frac{c}{n}$). Portanto, $n_{\text{ar}} < n_{\text{água}}$; $v_{\text{ar}} > v_{\text{água}}$.
- O caminho óptico mostrado em A **não é aceitável**, pois um raio de luz incide obliquamente e não sofre desvio.
- O caminho óptico mostrado em B **é aceitável**. Quando o ar incide na gota, o raio de luz se aproxima da normal, pois $n_{\text{ar}} < n_{\text{água}}$. Ao sair da gota e emergir para o ar novamente, esse raio se afasta da normal.
- O caminho óptico mostrado em C **é aceitável**. Incidindo na gota sobre uma reta que passa pelo seu centro, a luz não sofre desvio.
- O caminho óptico mostrado em D **não é aceitável**, porque o raio incide obliquamente do interior da gota para o ar e não sofre desvio, quando necessariamente deveria sofrer.
- O caminho óptico mostrado em E **é aceitável**. Quando o ar incide na gota, o raio de luz se aproxima da normal, pois $n_{\text{ar}} < n_{\text{água}}$. Ao incidir na superfície interna da gota, sofre reflexão total.

Assim, temos:

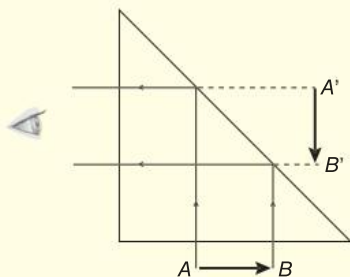
- I. verdadeira
- II. verdadeira
- III. verdadeira
- IV. verdadeira

- As figuras que apresentam a trajetória correta são B, C e E.

8 Ângulo limite entre o vidro e a água:

$$\text{sen } \hat{L} = \frac{1}{1,5} \approx 0,67$$

Procurando numa tabela trigonométrica ou usando uma calculadora científica, encontramos $\hat{L} \approx 42^\circ$. Assim, os raios de luz incidem na face inclinada do prisma com ângulo maior que o ângulo limite e sofrem reflexão total. A figura representa a imagem A'B' vista pelo observador:



CAPÍTULO 14

Lentes esféricas: formação de imagens

Questões propostas

1 Os raios incidem paralelamente ao eixo principal da lente L e são refratados na direção do foco imagem. Portanto, a distância focal da lente em valor absoluto é: $|f| = 40 \text{ cm}$

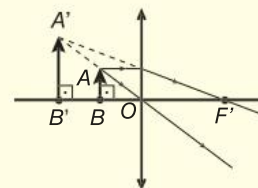
No espelho E, os raios incidentes retornam sobre si mesmos; portanto, incidem na direção do centro de curvatura de E. Assim, $C = 80 \text{ cm}$, e, em valor absoluto:

$$|f| = 40 \text{ cm} \left(f = \frac{C}{2} \right)$$

2 A imagem A'B' formada é virtual, direita e ampliada em relação ao objeto AB. Trata-se, portanto, de uma lente convergente.

Para determinar o centro óptico O, ligamos as extremidades A' e A da imagem e do objeto, pois os raios que incidem passando pelo centro óptico não sofrem desvio ao serem refratados.

Como já determinamos o centro óptico, traçamos um raio de luz paralelo ao eixo principal, saindo do topo do objeto AB até a posição da lente. Daí em diante, esse raio segue a direção dada pela reta que liga o topo da imagem A'B' e o ponto onde a luz encontra a lente, cruzando o eixo principal exatamente no foco da imagem F'.



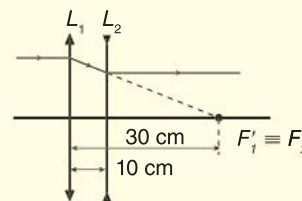
3 a) Sendo $n_1 > n_2$, a lente plano-convexa da figura 1 comporta-se como uma lente convergente, enquanto a lente plano-côncava da figura 2 comporta-se como uma lente divergente.

b) Se as duas lentes se comportam como lentes divergentes, na situação da figura 1, $n_1 < n_2$ e, na situação da figura 2, $n_1 > n_2$.

4 a) L_2 é divergente, já que os raios que convergiam anteriormente para um ponto, ao incidirem nessa lente, emergem paralelos.

b) Os raios de luz incidem em L_1 paralelamente ao eixo principal e são refratados na direção do seu foco imagem. Os raios que incidem em L_2 na direção do seu foco objeto são refratados paralelamente ao eixo principal. Então, o foco objeto de L_2 coincide com o foco imagem de L_1 .

Na figura a seguir, está representada a trajetória de um raio de luz:



Assim, a distância focal de L_2 é $f = -20 \text{ cm}$ (lente divergente: $f < 0$).

CAPÍTULO 15

Lentes esféricas: estudo analítico

Questões propostas

1 a) A lente deve ser divergente para que forneça uma imagem reduzida e direita do objeto.

b) Dados: $p = 60 \text{ cm}$; $A = \frac{1}{4}$

A posição da imagem pode ser obtida a partir da equação do aumento linear transversal:

$$A = \frac{i}{o} = -\frac{p'}{p} \Rightarrow \frac{1}{4} = -\frac{p'}{60} \therefore p' = -15 \text{ cm}$$

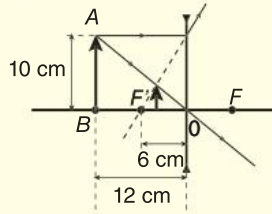
($p' < 0 \rightarrow$ imagem virtual)

Utilizando a equação de Gauss, obtemos a distância focal da lente:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{60} + \frac{1}{-15} \therefore f = -20 \text{ cm}$$

($f < 0 \rightarrow$ lente divergente)

2 a)



Temos: $f = -6 \text{ cm}$ ($f < 0$, pois a lente é divergente);
 $p = 12 \text{ cm}$

A partir da equação de Gauss:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{-6} = \frac{1}{12} + \frac{1}{p'} \therefore p' = -4 \text{ cm}$$

($p' < 0 \rightarrow$ imagem virtual)

b) Aumento linear transversal:

$$A = -\frac{p'}{p} \Rightarrow A = -\frac{-4}{12} \Rightarrow A = \frac{1}{3}$$

Tamanho da imagem:

$$A = \frac{i}{o} \Rightarrow \frac{1}{3} = \frac{i}{10} \Rightarrow i = \frac{10}{3} \therefore i \approx 3,3 \text{ cm}$$

3 Dados: $p = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$; $V = +20 \text{ di}$; $o = 0,4 \text{ cm}$

Sendo $V = \frac{1}{f}$, a partir da equação de Gauss, temos:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow 20 = \frac{1}{0,1} + \frac{1}{p'} \therefore p' = 0,1 \text{ m}$$

($p' > 0 \rightarrow$ imagem real)

Da equação do aumento linear transversal:

$$A = -\frac{p'}{p} \Rightarrow A = -\frac{0,1}{0,1} = -1$$

Portanto, a imagem da formiga é do mesmo tamanho da formiga.

4 a) A lente utilizada é convergente, pois é esse tipo de lente que fornece imagens ampliadas dos objetos.

b) A lente é convergente, portanto $f > 0$, $f = 2,2 \text{ cm}$. A imagem é virtual, então $p' < 0$. Como p é maior que zero, A será positivo.

$$A = -\frac{p'}{p} \Rightarrow 11 = -\frac{p'}{2,2} \Rightarrow p' = -11 \text{ cm}$$

A partir da equação de Gauss, vem:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{2,2} = \frac{1}{p} - \frac{1}{11} \Rightarrow \frac{1}{2,2} = \frac{11 - p}{11p}$$

$$\therefore p = 2,0 \text{ cm}$$

A distância do rubi até a lente é de 2,0 cm.

5 a) Os raios de luz provenientes da estrela podem ser considerados paralelos, e convergem para o foco da lente. Portanto, a distância focal da lente é $f = 10 \text{ cm}$.

b) Quando a lente é colocada próximo de um objeto (distância menor que f), funciona como uma lupa, conjugando uma imagem virtual ($p' < 0 \rightarrow p' = -15 \text{ cm}$) e ampliada. A distância p do objeto à lente pode ser obtida a partir da equação de Gauss:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{10} = \frac{1}{p} - \frac{1}{15} \therefore p = 6 \text{ cm}$$

6 Lentes divergentes sempre conjugam imagens virtuais, direitas e menores que o objeto.

Então: $p > 0$ e $p' < 0$, portanto $A > 0$

$$A = -\frac{p'}{p} \Rightarrow \frac{1}{2} = -\frac{p'}{40} \therefore p' = -20 \text{ cm}$$

Pela equação de Gauss, vem:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{40} + \frac{1}{-20} \therefore f = -40 \text{ cm}$$

Sendo $f = 40 \text{ cm} = -0,4 \text{ m}$, a vergência da lente é:

$$V = \frac{1}{f} \Rightarrow V = \frac{1}{-0,4} \therefore V = -2,5 \text{ di}$$

7 As lentes convergentes têm $f > 0$, assim $f_1 = 10 \text{ cm} = 0,10 \text{ m}$ e $f_2 = 30 \text{ cm} = 0,30 \text{ m}$. Para a lente divergente, $f < 0$, logo, $f_3 = -15 \text{ cm} = -0,15 \text{ m}$. A vergência V_{eq} da lente equivalente é calculada pela soma algébrica das vergências das lentes associadas, assim:

$$V_{eq} = V_1 + V_2 + V_3 \Rightarrow V_{eq} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{eq} = \frac{1}{0,10} + \frac{1}{0,30} + \frac{1}{-0,15} \therefore V_{eq} \approx 6,67 \text{ di}$$

8 A única lente capaz de conjugar uma imagem real é a lente convergente. Considerando o enunciado, temos:

$$p = p' = 40 \text{ cm}$$

Aplicando a equação de Gauss, temos:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{40} + \frac{1}{40} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{2}{40} \therefore f = 20 \text{ cm}$$

alternativa e

CAPÍTULO 16

Instrumentos ópticos e óptica da visão

Questões propostas

1 Objetiva: A imagem de um objeto no infinito se forma no plano focal imagem (F'_{objetiva}) da lente objetiva e é real e invertida.

Ocular: Para a lente ocular, a imagem é um objeto real que está posicionado entre o foco objeto (F_{ocular}) e o centro óptico; então, a imagem fornecida por essa lente é virtual e invertida em relação ao objeto (direita em relação à imagem fornecida pela objetiva).

2 a) Dados:

$$f = 40 \text{ mm}; p' = 42 \text{ mm};$$

Da equação de Gauss:

$$\frac{1}{40} = \frac{1}{p} + \frac{1}{42} \therefore p = 840 \text{ mm}$$

b) A altura máxima da imagem é 50 mm. A partir da equação do aumento linear transversal:

$$-\frac{p'}{p} = \frac{i}{o} \Rightarrow -\frac{42}{840} = \frac{50}{o} \therefore o = 1.000 \text{ mm}$$

3 a) Os raios solares podem ser considerados paralelos e convergem para o foco da lente. Portanto, a distância focal da lente é $f = 30 \text{ cm}$.

b) Quando a lente é colocada a uma distância menor que f , conjuga uma imagem virtual ($p' < 0$), direita e ampliada.

$$A = 3 \text{ (} A > 0 \text{, pois a imagem é direita)}$$

$$A = -\frac{p'}{p} \Rightarrow 3 = -\frac{p'}{p} \Rightarrow p' = -3p$$

A distância p da asa da borboleta à lupa pode ser obtida a partir da equação de Gauss:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{30} = \frac{1}{p} - \frac{1}{3p} \therefore p = 20 \text{ cm}$$

4 Dados:

$f = 10 \text{ cm}$; $A = -300$ ($A < 0$, a imagem é real; portanto, invertida em relação ao objeto).

Da equação do aumento transversal:

$$A = -\frac{p'}{p} = -300 \Rightarrow p = \frac{p'}{300}$$

E a partir da equação de Gauss:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{10} = -\frac{1}{p'} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{10} = \frac{300}{p'}$$

$$\therefore p' = 3.010 \text{ cm}$$

O comprimento da sala deve ser de $3.010 \text{ cm} = 30,10 \text{ m}$.

Explore em Biologia

Nossos olhos utilizam a lente (cristalino, na antiga nomenclatura), que funciona como uma lente convergente. A lente está situada atrás da pupila, porta de entrada da luz, que regula seu fluxo. A luz concentrada pela lente atinge a retina, que é composta de células nervosas que levam a imagem ao cérebro, através do nervo óptico, para ser interpretada. A distância da lente à retina faz com que a imagem projetada seja invertida. O cérebro interpreta esses sinais e inverte a imagem. Por isso, embora a luz seja captada pelos olhos, é o cérebro que enxerga e vê as imagens. É por esse motivo que, quando sofremos algum abalo na cabeça ou temos, por exemplo, uma crise de enxaqueca, as imagens dos objetos aparecem distorcidas, embora os olhos as estejam captando perfeitamente.

Para saber mais

Conexões com o cotidiano – Correção da catarata

Ampliando sua leitura

1. Nos olhos afetados pela catarata, a lente se torna opaca, gerando embaçamento, que aumenta gradativamente e dificulta cada vez mais a visão. A pessoa com catarata passa a necessitar de cada vez mais luz para poder enxergar, perdendo gradualmente a capacidade de visão noturna e de nitidez.
2. Um paciente com catarata ainda no início consegue melhorar a visão com a troca mais frequente da graduação das lentes, mas essa solução é temporária, pois o problema só se resolve por meio de cirurgia.

Questões propostas

- 5** Imagens virtuais e reduzidas são fornecidas por lentes divergentes. Esse tipo de lente é utilizado na correção da miopia porque retarda a convergência dos feixes

de luz, uma vez que no olho míope imagens de objetos distantes não se formam de maneira nítida por serem conjugadas antes da retina.

- 6** Na receita, lê-se a vergência ou grau da lente. Como $V = \frac{1}{f}$, a distância focal da lente receitada é $f > 0$; trata-se de uma lente convergente. Lentes convergentes são utilizadas na correção da presbiopia, defeito de visão no qual a imagem se forma depois da retina, devido ao enrijecimento do cristalino. O defeito não poderia ser miopia, pois para corrigi-la são utilizadas lentes divergentes.

- 7** I. Falsa. No olho míope, a imagem se forma antes da retina.

II. Verdadeira. A lente convergente aumenta a convergência dos raios de luz provenientes de objetos próximos, fazendo com que suas imagens se formem na retina, e não depois dela.

III. Verdadeira. A utilização de lentes cilíndricas corrige o defeito, que ocorre devido a irregularidades da córnea ou do cristalino.

IV. Falsa. A presbiopia é corrigida com o uso de lente convergente.

- 8** I. Correta. Quando um objeto (nesse caso, os olhos e a face) é posicionado entre o foco e o centro óptico de uma lente convergente, a imagem formada é virtual, direita e ampliada. Além disso, lentes divergentes sempre produzem imagens reduzidas.

II. Correta. Lentes divergentes sempre formam imagens virtuais, direitas e menores que o objeto. Esse tipo de lente é usado na correção da miopia.

III. Correta. Consegue-se concentrar os raios de Sol com uma lente convergente, usada na correção da hipermetropia.

- 9** a) Como Tina consegue projetar a imagem na parede, podemos concluir que a imagem é real e que a lente é convergente. Temos os seguintes dados:

- distância da chama à lente: $p = 18 \text{ cm}$
- distância da lente à parede: $p' = 45 \text{ cm}$

Da equação de Gauss:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{18} + \frac{1}{45} \therefore f \approx 12,9 \text{ cm}$$

b) Lentes convergentes são usadas na correção da hipermetropia e da presbiopia. Por se tratar de uma pessoa jovem, o defeito provavelmente é hipermetropia.

- 10** Considerando que o livro esteja a 25 cm de distância, a lente deve fornecer uma imagem localizada no ponto próximo, a 1 m dos olhos da pessoa, ou seja: $p = 25 \text{ cm} = 0,25 \text{ m}$; $p' = -100 \text{ cm} = -1 \text{ m}$ (imagem virtual).

Da equação de Gauss, lembrando que $V = \frac{1}{f}$, temos:

$$V = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \Rightarrow V = \frac{1}{0,25} - \frac{1}{1} \therefore V = 3 \text{ di}$$

- 11** a) O míope deve usar lentes divergentes. Esse tipo de lente é utilizado na correção da miopia porque retarda a convergência dos feixes de luz, uma vez que no olho míope imagens de objetos distantes não se formam de maneira nítida por serem conjugadas antes da retina, já que seu ponto remoto está localizado a uma distância finita, e não no infinito.

b) A lente divergente deve fornecer uma imagem no ponto remoto de um objeto localizado no infinito. Para isso, o foco imagem da lente deve coincidir com o ponto remoto, portanto:

$$f = -30 \text{ cm} = -0,3 \text{ m};$$

Assim:

$$V = \frac{1}{f} \Rightarrow V = \frac{1}{-0,3} \therefore V \approx -3,3 \text{ di ou "graus"}$$

- 12** O tamanho da imagem pode ser obtido pelo aumento linear transversal, assim, temos:

$$p = 3 \text{ m} = 3.000 \text{ mm}, o = 3 \text{ mm e } p' = 20 \text{ mm}$$

$$\frac{i}{o} = -\frac{p'}{p} \Rightarrow \frac{i}{3} = -\frac{20}{3.000} \Rightarrow i = -\frac{3 \cdot 20}{3.000} \Rightarrow i = -\frac{60}{3.000}$$

$$\therefore i = 0,02 \text{ mm}$$

Para saber mais

Diálogos com a Física Moderna – O efeito Cherenkov

Ampliando sua leitura

1. As duas afirmações do texto não são contraditórias, pois os elétrons muito energéticos podem superar a velocidade da luz na água, que é de 224.900 km/s. No entanto, os elétrons não superam a velocidade da luz no vácuo, que é de 300.000 km/s.
2. Os tanques do observatório Auger detectam a radiação Cherenkov quando as partículas muito energéticas, vindas do espaço exterior, atravessam a água contida nos tanques com uma velocidade superior à luz na água, emitindo a radiação, que é detectada por células fotoelétricas instaladas no interior desses tanques.

Investigar é preciso

Atividade experimental – Uma lente de água

1. Como a imagem é projetada na parede, ela é real, pois apenas imagens reais podem ser projetadas. A gota funciona como uma lente convergente, pois só esse tipo de lente forma imagens reais.
2. Como a imagem projetada é real, sabemos que ela é invertida, uma vez que toda imagem real é invertida.

UNIDADE 5 OSCILAÇÕES E ONDAS

CAPÍTULO 17

Fenômenos ondulatórios

Questões propostas

- 1** Diz-se que um corpo está em MHS quando, em uma determinada trajetória, oscila periodicamente em torno de uma posição de equilíbrio. No sistema massa-mola, temos a força máxima quando a mola se estica ou se comprime em sua

amplitude máxima, resultando em pontos com máxima aceleração. Quando a mola está no tamanho original, a força resultante do sistema é nula, de modo que a aceleração nesse ponto também será. Logo, quanto mais distante do ponto de equilíbrio, maior a aceleração do corpo. Já em um MRUV, a aceleração do corpo é constante durante toda sua trajetória, isto é, a velocidade do corpo varia uniformemente. Desse modo, a afirmação é falsa, pois o sistema massa-mola apresentado somente descreve um MHS.

- 2** A amplitude do movimento é dada pela máxima elongação da mola: $A = 0,1 \text{ m}$

A velocidade se anula quando ocorre máxima elongação da mola. Pelo gráfico, podemos ver que isso ocorre nos instantes 0,5 s; 1,5 s; 2,5 s; 3,5 s.

- 3** I. Incorreta. A relação que determina o período de um pêndulo simples, $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$, não depende da massa.

II. Incorreta. Como vimos no item I, o período T é diretamente proporcional à raiz quadrada do comprimento do pêndulo, ou seja, $T \propto \sqrt{L}$. De acordo com o enunciado, o segundo pêndulo tem o dobro do comprimento do primeiro. Logo, o período do segundo pêndulo vale: $T_2 = \sqrt{2} T_1$.

III. Correta. O período de um pêndulo simples independe da massa, conforme verificamos no item I.

- 4** O período de um pêndulo simples é obtido pela equação $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$. Logo, é possível afirmar que o período para um pêndulo completar uma oscilação só depende do comprimento do pêndulo (L) e da aceleração da gravidade (g). Assim, concluímos que somente o terceiro estudante está correto. alternativa c

- 5** O lustre oscila 10 vezes em 5 segundos:

Oscilações	Tempo (s)
10	5
1	T

$$\therefore T = 0,5 \text{ s}$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \Rightarrow 0,5 = 2\pi\sqrt{\frac{L}{10}} \Rightarrow 0,25 = 4\pi^2 \frac{L}{10} \Rightarrow L = \frac{2,5}{4\pi^2}$$

$$\therefore L \approx 0,063 \text{ m} = 6,3 \text{ cm}$$

- 6** Para oscilações de pequena amplitude, o período do pêndulo simples é dado por: $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$

Sendo a intensidade do campo gravitacional g constante, para o período não se alterar, o comprimento L da haste deve ser mantido constante.

alternativa a

- 7** A amplitude corresponde à máxima distância da posição central, que é igual a AB ou BC e o tempo para ir de A até C é a metade do período; assim, o período é $T = 4 \text{ s}$. Portanto, a frequência será:

$$f = \frac{1}{T} \Rightarrow f = \frac{1}{4} \therefore f = 0,25 \text{ Hz}$$

alternativa b

Para saber mais

Conexões com o cotidiano – O poder destruidor do tsunami

Ampliando sua leitura

1. Ao se aproximar da zona de arrebentação, próxima à praia, a onda perde velocidade; mas, como a profundidade diminui, sua amplitude aumenta e diminui seu comprimento de onda.
2. Podemos associar o tempo que a onda demora para passar pelo barco ao período da onda, isto é, ao tempo que um comprimento de onda demoraria para atravessar um ponto fixo. Esse cálculo pode ser feito por meio de uma proporção:

Distância (km)		Tempo (h)
50	—	1
1	—	x

$$\therefore x = \frac{1}{50} \text{ h} = 0,02 \text{ h} \Rightarrow 1,2 \text{ min} = 1 \text{ minuto e } 12 \text{ segundos}$$

Portanto, a onda demoraria um pouco mais de um minuto para passar pelo barco. Com uma amplitude de 10 m é provável que pessoas no barco percebessem o passar da onda, uma vez que se deslocariam 10 m acima da horizontal inicial.

Questões propostas

- 8** O valor mostrado na figura corresponde à metade de um comprimento de onda. Logo, temos $\lambda = 0,30 \text{ m}$ como o valor do comprimento de onda. Usando a equação fundamental da Ondulatória, temos:

$$v = \lambda f; \text{ como } f = \frac{1}{T} \Rightarrow v = \frac{\lambda}{T} \Rightarrow T = \frac{\lambda}{v}$$

Substituindo os valores:

$$T = \frac{0,30}{10} \therefore T = 0,03 \text{ s}$$

- 9** 3.600 rpm correspondem a 60 Hz. Pelo gráfico, obtemos $\lambda = 2 \text{ cm}$, e a amplitude da onda é $A = 5 \text{ mm}$. Usando a equação fundamental da ondulatória:

$$v = \lambda f \Rightarrow v = 60 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \therefore v = 1,2 \text{ m/s} = 120 \text{ cm/s}$$

- 10** O comprimento de onda no meio 1 pode ser determinado a partir da expressão:

$$\lambda_1 = \frac{v_1}{f} = \frac{20}{2} \therefore \lambda_1 = 10 \text{ cm}$$

O ângulo de incidência é medido em relação à reta normal à superfície de separação entre os meios. Assim, o ângulo de incidência é de 60 graus. Isso permite escrever que:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow \frac{\sin 60^\circ}{\sin 45^\circ} = \frac{20}{v_2} \Rightarrow \frac{\frac{\sqrt{3}}{2}}{\frac{\sqrt{2}}{2}} = \frac{20}{v_2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_2 = 20 \frac{\sqrt{6}}{3} \therefore v_2 = 16,33 \text{ cm/s}$$

O comprimento de onda no meio 2 pode ser determinado usando a expressão:

$$\lambda_2 = \frac{v_2}{f} \Rightarrow \lambda_2 = \frac{16,33}{2} \therefore \lambda_2 \approx 8,16 \text{ cm}$$

- 11** No meio 1, temos: $\lambda_1 = \frac{v_1}{f} \Rightarrow \lambda_1 = \frac{15}{3} \therefore \lambda_1 = 5 \text{ cm}$

Sendo $v_2 = 10 \text{ cm/s}$ e como as frequências são iguais nos dois meios, podemos afirmar que no meio 2:

$$f_1 = f_2 \Rightarrow \frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2} \Rightarrow \frac{15}{5} = \frac{10}{\lambda_2} \therefore \lambda_2 \approx 3,33 \text{ cm}$$

- 12** a) Os fenômenos ondulatórios que podem ser vistos são o da difração (ondas passando por fendas) e o da interferência (interação entre ondas distintas).

b) Os pontos A e B mostram o encontro de duas cristas e dois vales, respectivamente, o que corresponde ao processo de interferência construtiva. O ponto C mostra o encontro de uma crista e um vale, o que corresponde ao processo de interferência destrutiva.

- 13** O tempo que o som deve levar para ir até o obstáculo, ser refletido e voltar à fonte é de 0,1 s. Assim, o tempo de ida do som ao obstáculo corresponde à metade desse tempo, ou seja, 0,05 s. A distância mínima necessária para que ocorra o eco pode ser calculada usando a expressão:

$$\Delta s = v \cdot \Delta t \Rightarrow \Delta s = 340 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \therefore \Delta s = 17 \text{ m}$$

em que v é a velocidade do som e Δt o tempo de ida do som ao obstáculo.

- 14** A velocidade da onda sonora no ar é calculada pelo produto do comprimento de onda e da frequência:

$$v = \lambda \cdot f \Rightarrow v = 1.700 \cdot 0,2 \therefore v = 340 \text{ m/s.}$$

A distância a ser percorrida de modo que o som possa ser ouvido pelo emissor é de 68 m, que corresponde a duas vezes a distância que separa o alto-falante do obstáculo.

Logo:

$$\Delta s = v \cdot \Delta t \Rightarrow 68 = 340 \cdot \Delta t \therefore \Delta t = 0,2 \text{ s}$$

- 15** O comprimento da onda sonora no ar pode ser calculado usando:

$$v_{\text{som, ar}} = \lambda_{\text{som, ar}} \cdot f \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 340 = \lambda_{\text{som, ar}} \cdot 1.500 \therefore \lambda_{\text{som, ar}} = 0,23 \text{ m}$$

Como a frequência da onda não se altera ao mudar de um meio para o outro, podemos usar o mesmo método para calcular o comprimento da onda no granito. Sabendo que a velocidade do som no granito é $v_{\text{som, granito}} = 6.000 \text{ m/s}$:

$$v_{\text{som, granito}} = \lambda_{\text{som, granito}}$$

$$\therefore \lambda_{\text{som, granito}} = 4 \text{ m}$$

Isso implica que:

$$\frac{\lambda_{\text{som, granito}}}{\lambda_{\text{som, ar}}} = \frac{4}{0,23} \Rightarrow \frac{\lambda_{\text{som, granito}}}{\lambda_{\text{som, ar}}} \approx 17,39$$

Isso significa que o comprimento de onda do som no granito é aproximadamente 17 vezes maior do que no ar.

CAPÍTULO 18

Fenômenos sonoros: a música e o efeito Doppler

Explore em Matemática

Dois cálculos bastante conhecidos que adotam modelos logarítmicos são:

- cálculo da magnitude dos terremotos pela escala Richter;
- cálculo do pH de uma solução.

Para saber mais

Conexões com o cotidiano

Ampliando sua leitura

- O cálculo do nível de intensidade sonora, como mostrado no capítulo, é feito por meio de uma função logarítmica. Assim, para que o nível de intensidade sonora dobre, por exemplo, de 20 dB para 40 dB, é necessário que ocorra um aumento de 10^2 vezes, ou seja, que aumente 100 vezes. Na tabela, é possível verificar que 20 dB está associado ao valor de 10^{-10} watts, enquanto 40 dB está associado ao valor de 10^{-8} watts.
- Consultando o gráfico, podemos perceber que um som com frequência de 5.000 Hz e intensidade de 60×10^{-6} W/m² está associado à região da fala. Assim, podemos afirmar que um som dessa frequência e intensidade será perfeitamente audível para uma pessoa com audição normal.

Questões propostas

- alternativa e (por definição)
- A altura do som é uma característica que está relacionada à frequência. Quanto maior a frequência, mais agudo é o som. Quanto menor a frequência, mais grave é o som. Assim, se a irmã soubesse o conceito físico da palavra “altura” e “intensidade”, ela deveria dizer “A intensidade do som está muito grande”.
- A nota lá padrão tem frequência de 440 Hz. Logo, $\frac{1.760}{440} = 4$, ou seja, a nota é 4 vezes maior (ver tabela da página 265). Como a cada oitava a frequência da nota dobra seu valor, podemos escrever: $2^n \cdot 440 = 1.760 \Rightarrow n = 2$. Portanto, duas oitavas acima.
- O nível de intensidade sonora é dado por:

$$\beta = \log\left(\frac{I}{I_0}\right) = \log\left(\frac{10^{-3}}{10^{-12}}\right) = \log(10^9)$$

$$\therefore \beta = 9 \text{ B} = 90 \text{ dB}$$
- No caso de a intensidade sonora aumentar 100 vezes, temos:

$$\beta = \log\left(100 \frac{I}{I_0}\right) \Rightarrow \beta = \log(100) + \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \beta = 2 + 9 \therefore \beta = 11 \text{ B} = 110 \text{ dB}$$
- Para 90 dB = 9B:

$$9 = \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \Rightarrow 9 = \log(I_1) - \log(10^{-12}) \Rightarrow -3 = \log(I_1)$$

$$\therefore I_1 = 10^{-3} \text{ W/m}^2$$
 Para 120 dB = 12B

$$12 = \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \Rightarrow 12 = \log(I_1) - \log(10^{-12}) \Rightarrow 0 = \log(I_1)$$

$$\therefore I_1 = 1 \text{ W/m}^2$$
 A intensidade pode variar de 10^{-3} W/m² até 1 W/m². Ou seja, o aumento é de 1.000 vezes na intensidade sonora.
- A intensidade sonora da construção é dada por:

$$\beta = \log\left(\frac{I}{I_0}\right) = 9,5 \text{ B}$$

A diminuição de 30% corresponde a:

$$\beta_2 = 0,7 \cdot \beta = 0,7 \cdot 9,5 \therefore \beta_2 = 6,65 \text{ B}$$

Portanto, a nova intensidade sonora que a construção deverá emitir vale:

$$\beta_2 = \log\left(\frac{I_2}{I_0}\right) \Rightarrow 6,65 = \log I_2 - \log I_0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \log I_2 = 6,65 + \log 10^{-12} \Rightarrow \log I_2 = 6,65 - 12$$

$$\therefore I_2 = 10^{-5,35} \text{ W/m}^2$$

- O efeito Doppler consiste na diferença de frequências sonoras captadas por um observador, que pode estar em repouso ou não. Essa diferença de frequências é percebida pela sensação auditiva de agudos e graves. A grandeza física responsável por tal diferença é a frequência da onda sonora. As frequências mais baixas são percebidas como um som grave e as frequências maiores como um som agudo. No caso do efeito Doppler, é possível perceber que, quando a fonte sonora se aproxima de um observador, ele perceberá o som mais agudo emitido pela fonte e, quando a fonte se afasta, perceberá um som mais grave. Quando a ambulância se aproxima do observador, as frentes de onda emitidas por ela tornam-se mais próximas umas das outras na parte da frente do veículo (no sentido do movimento), por causa do seu deslocamento. Do seu ponto de vista, o observador receberá frentes de onda com intervalos menores de tempo se comparado com a fonte em repouso. O resultado será a percepção, pelo observador, de um som mais agudo, ou seja, a frequência da onda sonora para o observador será maior do que a que está sendo emitida pela fonte. Quando a ambulância mantém uma distância constante do observador, este não perceberá mais o som agudo, pois a frequência não será alterada pela velocidade relativa dos corpos; assim, as frentes de onda alcançarão o observador com menor frequência, que é a frequência original da onda emitida pela ambulância.
- a) Devido ao efeito Doppler, por aproximação, temos:

$$f_{\text{obs.}} = \frac{v_{\text{som}}}{v_{\text{som}} - v_{\text{fonte}}} \cdot f_{\text{fonte}} \Rightarrow f_{\text{obs.}} = \frac{340}{340 - 300} \cdot 600$$

$$\therefore f_{\text{obs.}} = 5.100 \text{ Hz}$$
 b) $f_{\text{obs.}} = \frac{v_{\text{som}}}{v_{\text{som}} + v_{\text{fonte}}} \cdot f_{\text{fonte}} \Rightarrow f_{\text{obs.}} = \frac{340}{640} \cdot 600$

$$\therefore f_{\text{obs.}} = 318,75 \text{ Hz}$$
- Com relação à fonte A, que está em repouso, o observador efetua um movimento de aproximação:

$$f_{\text{obs.}} = \frac{v_{\text{som}} + v_{\text{obs.}}}{v_{\text{som}}} \cdot f_{\text{fonte}} \Rightarrow f_{\text{obs.}} = \frac{340 + 20}{340} \cdot 700$$

$$\therefore f_{\text{obs.}} \approx 741,18 \text{ Hz}$$
 Com relação à fonte B, tanto o observador como a fonte estão em movimento e se afastando:

$$f_{\text{obs.}} = \frac{v_{\text{som}} - v_{\text{obs.}}}{v_{\text{som}} + v_{\text{fonte}}} \cdot f_{\text{fonte}} \Rightarrow f_{\text{obs.}} = \frac{340 - 20}{340 + 54} \cdot 700$$

$$\therefore f_{\text{obs.}} \approx 568,53 \text{ Hz}$$
- A qualidade do som que permite diferenciar notas de mesma frequência é o timbre.
alternativa d
- Sabendo que o observador está em repouso e que a fonte se aproxima dele, pela equação do efeito Doppler, temos:

$$v_{\text{fonte}} = 90 \text{ km/h} = 25 \text{ m/s}$$

$$f_{\text{obs.}} = \frac{v_{\text{som}} + v_{\text{obs.}}}{v_{\text{som}} + v_{\text{fonte}}} \cdot f_{\text{fonte}} \Rightarrow f_{\text{obs.}} = \frac{340 + 0}{340 - 25} \cdot 630 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow f_{\text{obs.}} = \frac{340}{315} \cdot 630 \therefore f_{\text{obs.}} = 680 \text{ Hz}$$
 alternativa e

ISBN 978-85-16-10511-2



9 788516 105112