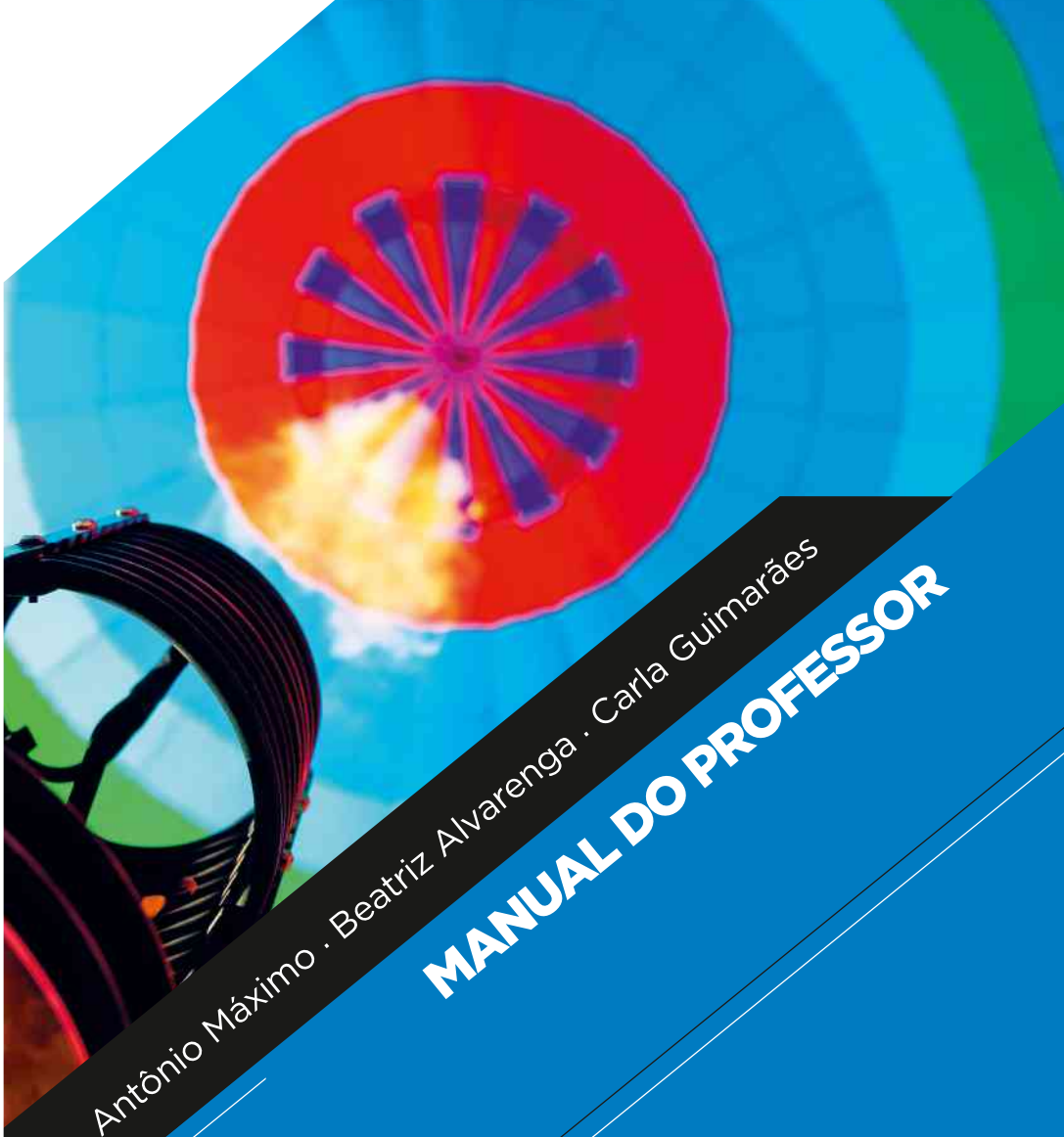
2



Antônio Máximo · Beatriz Alvarenga · Carla Guimarães

MANUAL DO PROFESSOR

FÍSICA

CONTEXTO & APLICAÇÕES

FÍSICA · ENSINO MÉDIO

editora scipione

FÍSICA

CONTEXTO & APLICAÇÕES

FÍSICA · ENSINO MÉDIO

MANUAL DO PROFESSOR

2

Antônio Máximo Ribeiro da Luz

Licenciado e bacharel em Ciências–Física pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Professor adjunto do Departamento de Física da UFMG.

Beatriz Alvarenga Álvares

Engenheira civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Professora emérita do Departamento de Física da UFMG.

Carla da Costa Guimarães

Licenciada e bacharela em Ciências–Física pela Universidade de São Paulo (USP).

Professora do Departamento de Engenharia da Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP).

Professora do Departamento de Ciências Sociais do Instituto Presbiteriano Mackenzie, São Paulo (SP).

2ª EDIÇÃO
SÃO PAULO
2016

editora scipione

editora scipione

Diretoria editorial
Lidiane Vivaldini Olo

Gerência editorial
Luiz Tonolli

Editoria de Matemática e Física
Ronaldo Rocha

Edição
Alexandre Braga D'Avila

Gerência de produção editorial
Ricardo de Gan Braga

Arte
Andréa Dellamagna (coord. de criação),
A+ Comunicação (progr. visual de miolo),
Adilson Casarotti (progr. visual de capa),
André Gomes Vitale (coord.),
Christine Getschko (edição)
e MRS Editorial (diagram.)

Revisão
Hélia de Jesus Gonsaga (ger.),
Rosângela Muricy (coord.),
Ana Paula Chabaribery Malfa, Célia da Silva Carvalho,
Claudia Virgilio e Vanessa de Paula Santos;
Brenda Morais e Gabriela Miragaia (estagiárias)

Iconografia
Sílvio Kligin (superv.), Denise Durand Kremer (coord.),
Roberta Freire Lacerda Santos (pesquisa), Cesar Wolf e
Fernanda Crevin (tratamento de imagem)

Ilustrações
Alex Argozino, Antonio Robson, Artur Kenji Ogawa, Formato
Comunicação, João X. de Campos, Osni de Oliveira, Paulo
César Pereira e Paulo Manzi

Cartografia
Eric Fuzii, Márcio Souza

Foto da capa: Detalhe interno de um balão de
ar quente usado em sobrevoos.
Luneva Nadya/Shutterstock

Protótipos
Magali Prado

Direitos desta edição cedidos à Editora Scipione S.A.
Avenida das Nações Unidas, 7221, 1º andar, Setor D
Pinheiros – São Paulo – SP – CEP 05425-902
Tel.: 4003-3061
www.scipione.com.br / atendimento@scipione.com.br

2016

ISBN 978 85 262 9921 4 (AL)
ISBN 978 85 262 9922 1 (PR)
Cód. da obra CL 713394
CAE 566 283 (AL) / 566 284 (PR)

2ª edição
1ª impressão

Impressão e acabamento

EDITORA AFILIADA

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

Luz, Antônio Máximo Ribeiro da
Física : contexto & aplicações : ensino médio /
Antônio Máximo Ribeiro da Luz, Beatriz
Alvarenga Álvares, Carla da Costa Guimarães. --
2. ed. -- São Paulo : Scipione, 2016.

Obra em 3 v.

1. Física (Ensino médio) I. Álvares, Beatriz
Alvarenga. II. Guimarães, Carla da Costa.
III. Título.

16-02953 CDD-530.07

Índices para catálogo sistemático:

1. Física : Ensino médio 530.07

Apresentação

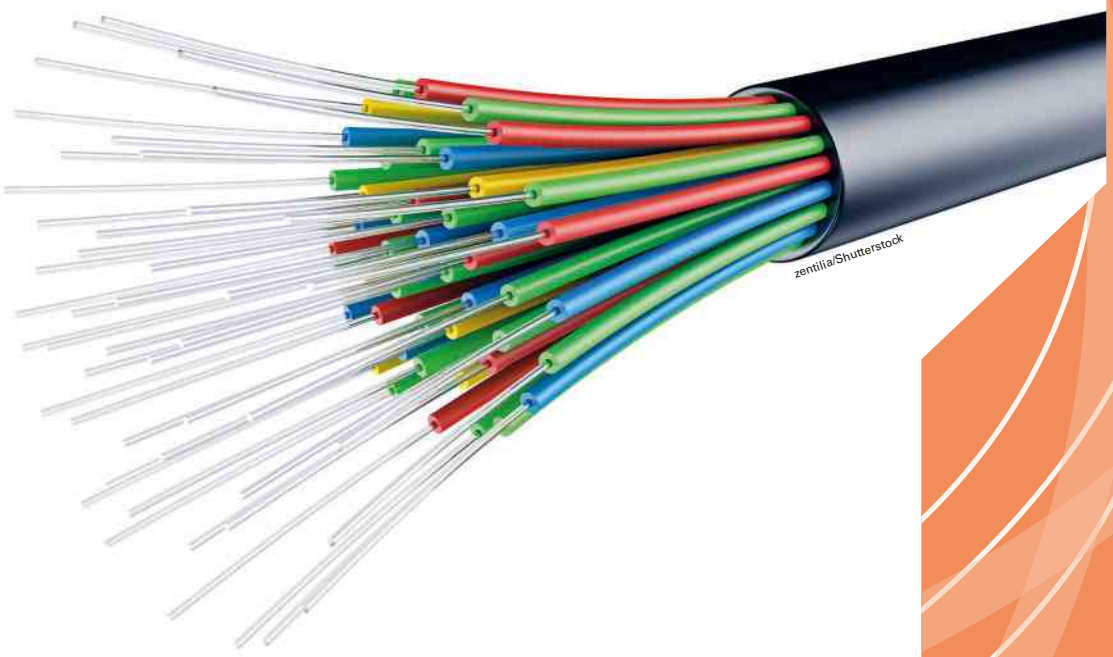
Caro aluno,

Ao elaborar esta coleção, uma de nossas maiores preocupações foi tornar o estudo da Física interessante e agradável, por isso optamos por uma linguagem que fosse acessível e que não exagerasse no formalismo matemático. Além disso, procuramos ilustrar, por meio de seções específicas e exemplos diversificados, como essa ciência se relaciona com a sua realidade. Assim, esperamos que os conteúdos estejam apresentados de uma forma atraente e motivadora, mesmo para aqueles que têm preferências por outras áreas do conhecimento.

A aprendizagem das leis e fenômenos físicos pode trazer um complemento importante para sua formação cultural e intelectual, não apenas pela relação que apresentam com o desenvolvimento tecnológico do mundo moderno, mas também porque nosso cotidiano está "repleto de Física". Ao estudar os assuntos do livro, você vai perceber que essa ciência pode ser usada para explicar muito daquilo que acontece ao nosso redor, desde coisas aparentemente simples, como a água fervendo em uma panela, até outras que parecem mais complexas, como a formação de um arco-íris ou um trem levitando sobre os trilhos.

Com a orientação de seu professor, lendo com atenção os textos de cada capítulo, discutindo com seus colegas e procurando realizar as atividades sugeridas, esperamos que, ao final do curso, você tenha conseguido compreender as leis fundamentais da Física. É possível que essa compreensão faça crescer dentro de você uma admiração pelos fenômenos naturais, bem como respeito pelos grandes cientistas que, por meio de vidas inteiras dedicadas à pesquisa, edificaram esse importante ramo do conhecimento humano.

Os autores


zentilia/Shutterstock

Conheça seu livro

A obra abrange os temas centrais da Física clássica e da Física contemporânea, além de suas relações com o desenvolvimento tecnológico e outras áreas do conhecimento.

PARA INICIAR A CONVERSA

Após a leitura do texto que abre o capítulo, são propostas três questões com o objetivo de:

- verificar o conhecimento de temas gerais da Física;
- avaliar os conhecimentos prévios sobre o assunto que será abordado;
- estimular a busca de informações e conteúdos.



CAPÍTULO 2

Comportamento dos gases

A escala Kelvin, ou escala absoluta, é amplamente utilizada no estudo do comportamento dos gases, para conhecer seu estado. A partir dessas investigações foi possível formular a hipótese de que, a baixas temperaturas, as moléculas que formam o gás não poderiam fornecer mais energia, ou seja, estariam completamente imóveis e, consequentemente, teriam pressão nula.

Observou-se, no entanto, que nas proximidades do zero absoluto a matéria se comporta de forma diferente, apresentando outras características, como um novo estado físico, conhecido como condensado de Bose-Einstein.

No extremo oposto, a altíssimas temperaturas, os gases que formam as estrelas também atingem outro estado, conhecido como plasma. A pressão exercida por esses gases é tão intensa que consegue impedir o colapso gravitacional das estrelas.

PARA INICIAR A CONVERSA

- Quais são os estados físicos que a matéria pode assumir?
- Quais conceitos físicos são apropriados para caracterizar o estado do gás?
- Relacione a lei de Avogadro com a teoria cinética dos gases.

30

LEITURAS

As leituras são apresentadas nos três boxes descritos a seguir, que aparecem intercalados com o desenvolvimento do conteúdo e que têm como objetivo ampliar os conceitos físicos vistos no capítulo.



APLICAÇÕES DA FÍSICA

Câmaras termográficas

Desde a sua descoberta, por William Herschel (1738-1822), em 1800, a radiação infravermelha foi utilizada nas mais diversas áreas da ciência. A termografia, por exemplo, é uma técnica que utiliza uma câmara termográfica (figura 3.17) para captar a radiação infravermelha que é emitida pelos objetos. Utilizam-se imagens termográficas na área militar desde a Segunda Guerra Mundial, quando surgiu o primeiro sistema de visão noturna (figura 3.18).

No início do século XXI as câmaras termográficas começaram a ser empregadas em engenharia civil na inspeção e na manutenção de edifícios e residências. Uma das grandes vantagens da sua utilização deve-se à redução do tempo que é gasto no processo de identificação de infiltrações não visíveis (figura 3.19), na detecção de fendas estruturais e na análise térmica das fugas de calor dos edifícios para melhorar o isolamento das residências em regiões frias.

Figura 3.17. Câmara termográfica mostrando a emissão de radiação infravermelha proveniente de uma residência.

Figura 3.18. Com os binóculos de visão noturna é possível identificar o movimento dos militares em treinamento durante a noite.

Figura 3.19. Detecção de infiltração de água nas paredes. À esquerda, as paredes e o teto parecem não ter problema algum; na foto da direita observam-se manchas escuras, que identificam infiltração.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

A termografia também tem utilização na área de saúde esportiva. Com ela é possível, por exemplo, diagnosticar lesões de forma não invasiva. Uma vez que o corpo humano emite radiação infravermelha, espera-se que os lados direito e esquerdo do corpo, em condições normais de saúde, tenham a mesma distribuição de temperatura. Assim, se uma região apresentar diferença de temperatura, o médico pode identificar a presença de lesões no músculo ou no tecido antes mesmo do processo inflamatório manifestar sintomas de dor e edema na região (figura 3.20).

QUESTÕES

1. Pesquise sobre outras aplicações práticas da câmara termográfica.
2. Nas aplicações médicas, quais são as vantagens do uso da câmara termográfica?

Figura 3.20. Imagem termográfica indicando diferenças de temperatura entre o joelho direito e o esquerdo de um atleta.

TERMODINÂMICA CAPÍTULO 3 65

Aplicações da Física

Seção que traz exemplos de aplicações tecnológicas que utilizam o desenvolvimento científico da Física. Além disso, apresenta propostas de pesquisas e debates.



FÍSICA NO CONTEXTO

Fenômeno de dilatação

Muitos fatos que ocorrem em nossa vida diária estão relacionados com o fenômeno de dilatação. A seguir, analisaremos alguns deles.

1) Ao aquecer uma placa metálica que apresenta um orifício (figura 1.18), podemos ter a impressão de que a dilatação desse objeto fará com que o orifício diminua. Entretanto, isso não é o que acontece, pois a placa se dilata em todas as direções e o orifício também aumenta de tamanho. O fenômeno de dilatação térmica durante o aquecimento de materiais e o de contração durante o resfriamento é muito utilizado na indústria quando se quer acoplar peças delicadas e não é possível aplicar pressão mecânica. Por exemplo, para acoplar um eixo a uma engrenagem dentada metálica com um furo central, quando o eixo é maior que o furo (figura 1.19), podemos aquecer a engrenagem, o que provocará a dilatação do orifício, permitindo que o eixo seja introduzido. Após esse processo, a temperatura diminui e volta a ser ambiente. A união eixo-engrenagem também será possível se o eixo (isso resfriado, ou seja, contraído. Nesse caso, o eixo diminuirá de tamanho permitindo seu encaixe no orifício da engrenagem.
2) A temperatura ambiente, em quase todos os lugares da Terra, sofre variações consideráveis do dia para a noite, de uma estação para outra, etc. Assim, os objetos existentes nesses lugares têm suas dimensões alteradas periodicamente. Para permitir que essas dilatações ocorram sem danos, nos trilhos de estradas de ferro ou nas grandes estruturas de concreto armado, são deixadas as chamadas juntas de dilatação, como ilustra a figura 1.20.

Do mesmo modo, para que uma ponte possa se dilatar livremente, sem trincar, os engenheiros a apoiam sobre rolos (figura 1.21). Se essas precauções não fossem adotadas, as estruturas se danificariam, pois são enormes as tensões que aparecem em peças submetidas à variação de temperatura e impedidas de se dilatarem ou de se contraírem (figura 1.22).

Figura 1.18. Se aquecermos a placa metálica, a temperatura ou ficente para que ela se dilate, o orifício aumentará.

Figura 1.19. Quando uma engrenagem dentada com um orifício é aquecida, tanto a engrenagem quanto o orifício aumentam de tamanho, permitindo o acoplamento com o eixo central. O orifício da engrenagem dentada geralmente é menor do que o diâmetro do eixo.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

Figura 1.20. Junta de dilatação utilizada em grandes juntas de concreto. Ponte Governador Orestes Quércia, em São Paulo (SP), 2016.

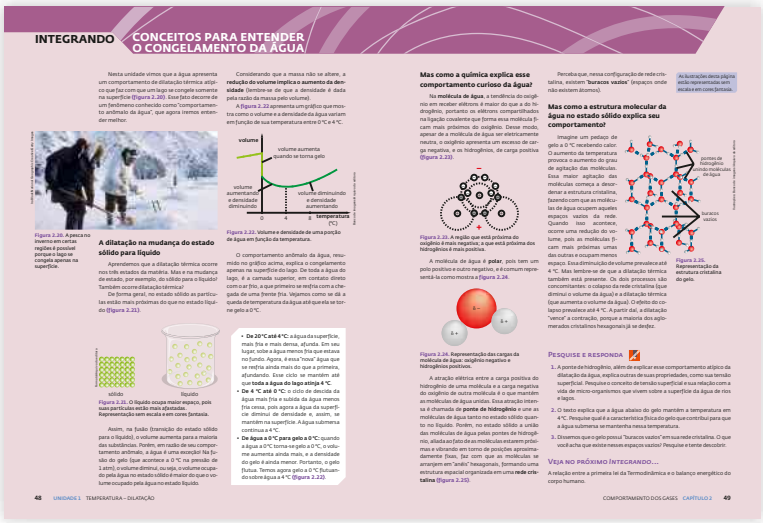
Figura 1.21. Para que a dilatação de pontes ocorra facilmente, elas são apoiadas sobre rolos.

Figura 1.22. Em 2012, o calor de 34 °C provocou a dilatação térmica da pavimentação de uma rua em Curitiba (PR), causando a ruptura do pavimento.

22 UNIDADE 1 TEMPERATURA – DILATAÇÃO

Física no contexto

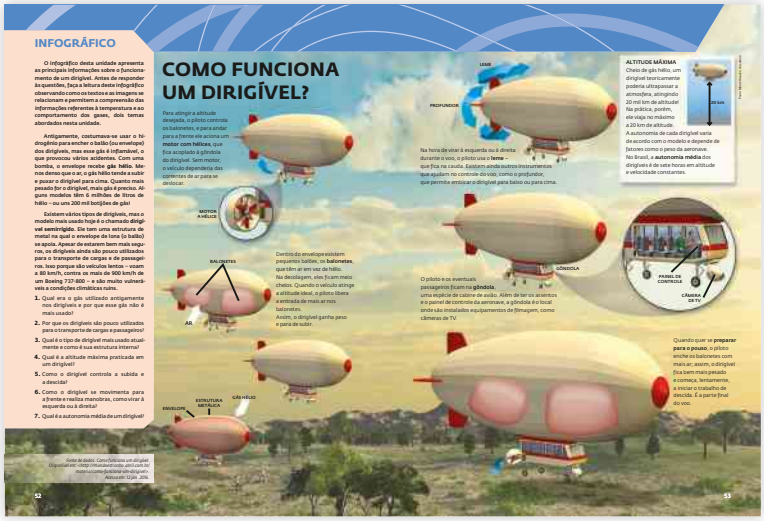
Leituras que complementam os conhecimentos abordados e mostram como a Física estudada no capítulo pode fornecer explicações para situações conhecidas do aluno. Além disso, apresenta passagens históricas, procurando relacionar esses acontecimentos com o avanço da Física e de outras ciências.



Integrando...

Tem por objetivo proporcionar uma visão mais abrangente de um assunto estudado no capítulo. Para tanto, relaciona conceitos comuns à Física e a outras áreas do conhecimento, como Matemática, Química e Biologia. Além disso, propõe questões e pesquisas relacionadas ao texto.

INFOGRÁFICO



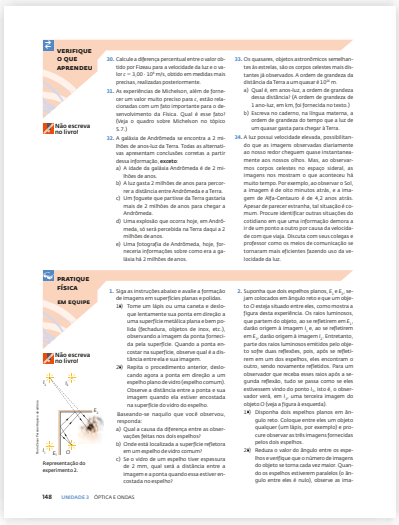
Cada Unidade é finalizada com uma proposta de leitura e análise de um infográfico que apresenta conceitos abordados em seus capítulos. As questões propostas exercitam a interpretação de imagens e textos e complementam o que foi estudado na Unidade.

ATIVIDADES

Estão divididas nas seções a seguir e distribuídas em níveis de dificuldade crescente.

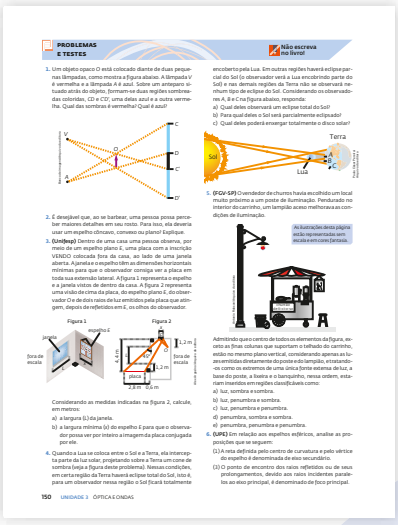
Pratique Física

Seção que traz propostas de observação e de atividades experimentais de cunho investigativo. As atividades sugeridas não demandam material sofisticado nem oferecem periculosidade, por isso podem ser realizadas tanto na escola quanto em casa.



Problemas e testes

Problemas e testes variados de diferentes níveis em que o estudante terá a oportunidade de aplicar as leis e os conceitos tratados em todos os tópicos do capítulo. Inclui questões de vestibular e questões do Enem.

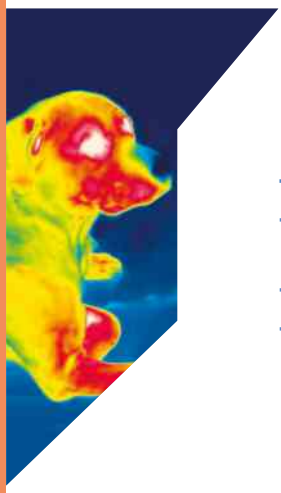


Verifique o que aprendeu

Exercícios propostos que têm por finalidade auxiliar a compreensão dos conceitos vistos em cada um dos tópicos do capítulo.

Sumário

UNIDADE 1



Temperatura — Dilatação

1. Temperatura e dilatação

1.1 Temperatura – Escalas termométricas, 11

1.2 Dilatação dos sólidos, 17

1.3 Dilatação dos líquidos, 23

Pratique Física, 28

Problemas e testes, 28

2. Comportamento dos gases

2.1 Transformação isotérmica, 31

2.2 Transformação isobárica, 34

2.3 Transformação isovolumétrica, 37

2.4 Equação de estado de um gás ideal, 40

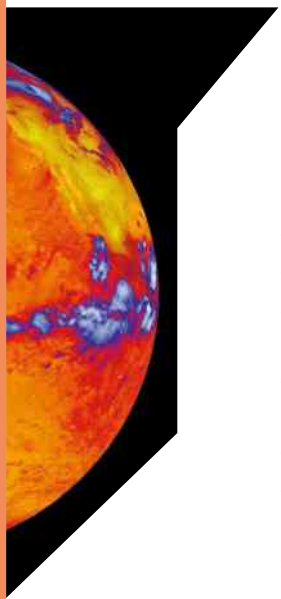
2.5 A evolução do modelo molecular da matéria, 42

Pratique Física, 47

Problemas e testes, 50

Infográfico, 52

UNIDADE 2



Calor

3. Termodinâmica

3.1 O calor como energia, 57

3.2 Transferência de calor, 59

3.3 Capacidade térmica e calor específico, 66

3.4 Trabalho em uma variação de volume, 71

3.5 A 1ª lei da Termodinâmica, 73

3.6 Aplicações da 1ª lei da Termodinâmica, 75

3.7 Máquinas térmicas – a 2ª lei da Termodinâmica, 77

Pratique Física, 81

Problemas e testes, 84

Apêndice D

Máquinas térmicas – Ciclo de Carnot, 85

Problemas e testes, 91

4. Mudanças de fase

4.1 Sólidos, líquidos e gases, 93

4.2 Fusão e solidificação, 97

4.3 Vaporização, condensação e calefação, 99

4.4 Influência da pressão, 103

4.5 Sublimação – Diagrama de fases, 105

4.6 Pressão de vapor, 108

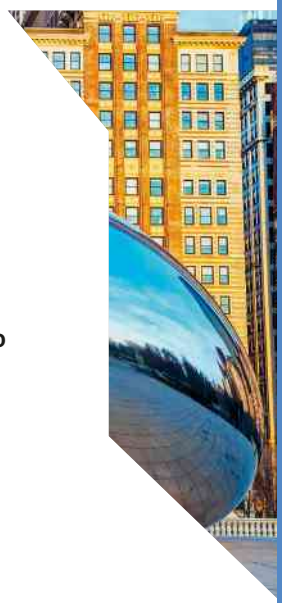
Pratique Física, 111

Problemas e testes, 112

Infográfico, 114

UNIDADE 3

Óptica e ondas



5. Reflexão da luz

5.1 Conceitos iniciais, 119
5.2 Reflexão da luz, 125
5.3 Espelho plano, 128
5.4 Espelhos esféricos, 132
5.5 Imagem de um objeto extenso, 138
5.6 A equação dos espelhos esféricos, 142
5.7 A velocidade da luz, 145
Pratique Física, 148
Problemas e testes, 150

6. Refração da luz

6.1 Refração da luz, 153
6.2 Formação de imagem por refração, 157
6.3 Dispersão da luz, 162
6.4 Lentes esféricas, 168
6.5 Formação de imagens nas lentes, 173
6.6 Instrumentos ópticos, 177
6.7 A natureza da luz, 182
Pratique Física, 188
Problemas e testes, 189

7. Movimento ondulatório

7.1 Movimento harmônico simples, 191
7.2 Ondas, 196
7.3 Fenômenos de reflexão e refração em uma onda, 201
7.4 Difração, 206
7.5 Interferência, 209
7.6 Interferência com a luz, 212
7.7 Ondas sonoras, 218
7.8 O efeito Doppler, 227
Pratique Física, 230
Problemas e testes, 232

Apêndice E

E.1 Cordas vibrantes e tubos sonoros, 234
E.2 As equações do efeito Doppler, 240
Problemas e testes, 243
Infográfico, 244

Respostas, 246
Sugestões de leitura, 254
Bibliografia, 255
Índice remissivo, 256

UNIDADE

1 Temperatura – Dilatação

A radiação infravermelha, percebida na forma de calor, é uma das radiações eletromagnéticas emitidas pelo Sol. Descoberta por William Herschel em 1800, a radiação infravermelha é essencial para a manutenção da vida no planeta, pois é absorvida pela superfície da Terra, provocando aumento de sua temperatura e emissão dessa radiação para a atmosfera.

Os seres vivos são emissores de radiação infravermelha, e sua distribuição de calor pode ser mapeada em uma termografia.

A termografia tem diversas aplicações em medicina e em engenharia.

CAPÍTULO 1
Temperatura e dilatação

CAPÍTULO 2
Comportamento dos gases



Termografia por radiação infravermelha de um cachorro.



Scientifica/Corbis/Latinstock



Reprodução/<http://kfkl.cz/techlab/en/>

O dilatômetro é um aparelho utilizado para medir o coeficiente de dilatação de metais.

CAPÍTULO 1

Temperatura e dilatação

P Para evitar que, em casos de aumento de temperatura, as vigas das pontes e dos edifícios exerçam forças umas sobre as outras, causando rupturas.

P Quando a temperatura de um objeto diminui, suas moléculas reduzem o movimento, diminuindo a distância entre elas; em consequência o material se contrai.

P Porque é um metal que em temperatura ambiente é líquido e se dilata facilmente.

Os fenômenos de dilatação e contração térmica estão presentes em qualquer material que seja submetido a grandes variações de temperatura. Quando, por exemplo, aumentamos a temperatura de um material, seja ele sólido, líquido ou gasoso, aumentamos a agitação das partículas que o constituem, provocando em quase todos os materiais um aumento de suas dimensões.

Dessa forma, quando um engenheiro vai projetar uma ponte de concreto, uma estrada de ferro ou um avião, por exemplo, deve prever esse fenômeno deixando no material juntas de dilatação para prevenir sua ruptura.

Em regiões onde as variações entre as temperaturas máximas e mínimas são significativas, deve-se ter maior cuidado com a fixação dos trilhos aos dormentes, por exemplo.

Termômetros são instrumentos próprios para medir a temperatura. A maioria dos termômetros utilizados em nosso cotidiano baseia-se na dilatação de materiais líquidos armazenados no interior de uma coluna. Um dos principais líquidos utilizados nos termômetros é o mercúrio.

PARA INICIAR A CONVERSA

Por que pontes e edifícios devem contar com juntas de dilatação?

O que é contração térmica? Cite um exemplo.

Por que o mercúrio é uma boa substância para preencher um termômetro?

1.1 Temperatura – Escalas termométricas

Temperatura

A temperatura é um dos conceitos físicos ao qual nos referimos frequentemente em nosso cotidiano. Mesmo ainda bebês, quando tomamos mamadeira, conseguimos expressar, em um dos primeiros estágios de nossa comunicação, quando o alimento está quente demais. À medida que crescemos, passamos a nos relacionar com o clima de nossa cidade pela temperatura, identificando se está quente ou frio, de modo a interpretar bem quanto significa um "calor" de 30 °C durante o verão.

Entretanto, nossos sentidos são insuficientes para avaliar a ampla gama de fenômenos físicos relacionados à temperatura e suas implicações nos mais diversos contextos. Por essa razão, para que seja possível obter informações mais objetivas sobre a temperatura, é relevante conhecer os principais conceitos relacionados a ela e como ela pode ser medida.

Embora nosso tato possa nos enganar, em muitos casos podemos perceber, entre dois objetos, qual é o mais quente e qual é o mais frio, isto é, reconhecer qual apresenta **temperatura** mais elevada. Em primeira aproximação, podemos dizer que a temperatura de um objeto é uma propriedade relacionada ao fato de ele estar mais quente ou mais frio.

Equilíbrio térmico

Suponha que tivéssemos, em um ambiente isolado de influências externas, duas amostras com temperaturas diferentes: água fervente em uma chaleira e algumas pedras de gelo. À medida que o tempo passa, mesmo que essas duas amostras não estejam em contato, notamos que a água fervente esfria, enquanto o gelo derrete, até começar a aquecer. Depois de algum tempo, as amostras atingem a mesma temperatura e deixam de sofrer alterações. Dizemos, então, que elas atingiram uma situação final, denominada **estado de equilíbrio térmico**. Portanto:

Dois (ou mais) corpos, a temperaturas diferentes, em contato ou não e isolados de influências externas, tendem para um estado final, denominado estado de equilíbrio térmico, caracterizado pela uniformidade nas suas temperaturas.

Termômetros

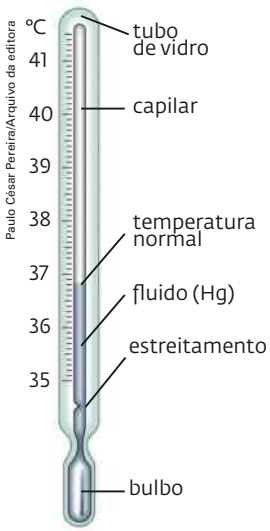
A temperatura, grandeza que caracteriza o estado de agitação interna dos corpos, pode ser medida com um termômetro **(figura 1.1)**.

Existem diversos tipos de termômetro, e cada um deles utiliza a variação de certa grandeza, provocada por uma variação de temperatura. Há termômetros construídos com base nas variações que a temperatura provoca no comprimento de uma haste metálica, no volume de um gás, na resistência elétrica de um material, na cor de um sólido muito aquecido, etc.



Maros Bauer/Shutterstock

Figura 1.1. Representação de um termômetro comum de líquido (mercúrio ou álcool) em tubo de vidro.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 1.2. Representação de um termômetro clínico. Em virtude de um estreitamento na base do tubo capilar, a coluna de Hg é impedida de retornar ao reservatório. Por isso, esse termômetro continua indicando a temperatura da pessoa, mesmo não estando mais em contato com ela.

Entretanto, para compreender o conceito de temperatura, não é necessário analisar essa grande variedade de aparelhos. Vamos desenvolver o nosso estudo com base apenas no tipo de termômetro que relaciona a temperatura com a altura da coluna de um líquido no interior de um tubo capilar de vidro **(figura 1.1)**. Nesse termômetro, variações na temperatura provocam dilatações ou contrações do líquido, fazendo a coluna de líquido subir ou descer, permitindo que a cada altura da coluna seja possível associar o valor numérico da temperatura que determinou aquela altura.

O líquido mais utilizado nesse tipo de termômetro é o mercúrio (por exemplo, nos termômetros clínicos, como representado na **figura 1.2**). Alguns termômetros mais baratos utilizam álcool colorido, geralmente com corante vermelho.

Escalas termométricas

Para que possamos medir temperaturas, é necessário graduar o termômetro, isto é, marcar nele as divisões e atribuir números a essas divisões. Quando procedemos dessa maneira, estamos construindo uma **escala termométrica**.

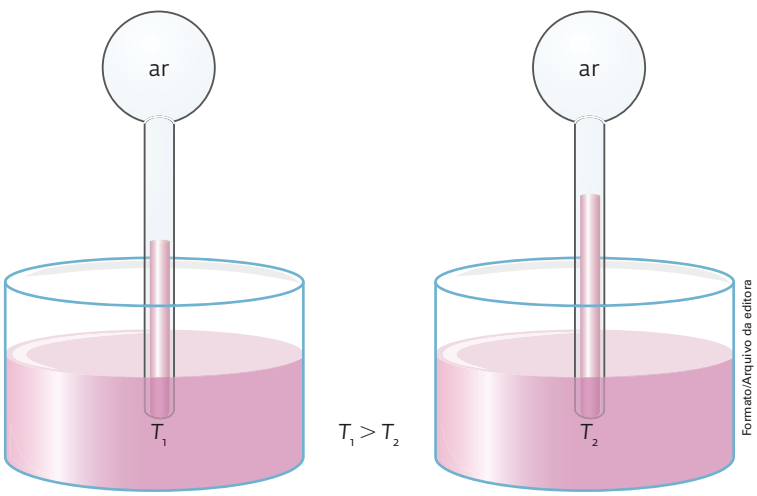
A medida e o controle da temperatura, nos dias atuais, desempenham um papel muito importante. Nas indústrias, nos laboratórios científicos, na medicina e até mesmo em nossas casas, estamos constantemente fazendo uso de termômetros para medir e controlar a temperatura de vários objetos, nas mais diversas circunstâncias.

Termoscópio de Galileu

As técnicas usadas no estabelecimento de escalas termométricas e na construção de termômetros vêm passando por grande evolução desde o século XVI.

O primeiro dispositivo de que se tem notícia foi construído por Galileu Galilei, em 1592. Ele consistia em um bulbo de vidro, terminando por um tubo fino, cuja extremidade era introduzida em um recipiente contendo água colorida **(figura 1.3)**. Antes de emborcar o tubo na água, Galileu aquecia um pouco o bulbo de vidro para expulsar parte do ar nele contido. Então, mergulhando o tubo no recipiente, quando a temperatura do bulbo retornava ao seu valor inicial, a água subia no tubo (forçada pela pressão atmosférica) até certa altura. Esse aparelho permitia comparar as temperaturas de objetos colocados em contato com o bulbo, pois a altura da coluna de água é tanto menor quanto maior for a temperatura do bulbo.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.



Formato/Arquivo da editora

Figura 1.3. Nesta representação, o termoscópio da esquerda indica uma temperatura maior que o da direita.

Conta-se que os médicos da época passaram a usar esse dispositivo desenvolvido por Galileu **(figura 1.3)** para verificar se seus pacientes estavam com febre. Para isso, colocavam o bulbo na boca de uma pessoa sadia e marcavam o nível da água no tubo. Em seguida, colocavam o bulbo na boca do paciente e, se a coluna descesse abaixo do nível anterior, o médico concluía que a temperatura do doente estava acima da normal.

O aparelho de Galileu não era propriamente um "termômetro", pois não possuía escala para medir as temperaturas. Na realidade, ele permitia apenas a comparação de duas temperaturas; por isso, devemos denominá-lo, mais apropriadamente, de "termoscópio de Galileu".

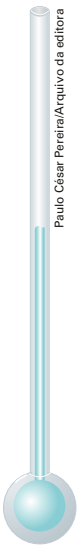

Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 1.4. Esquema do termômetro de líquido, construído em 1637, semelhante aos que são usados atualmente. Representação sem escala e em cores fantasia.

Os primeiros termômetros de líquido

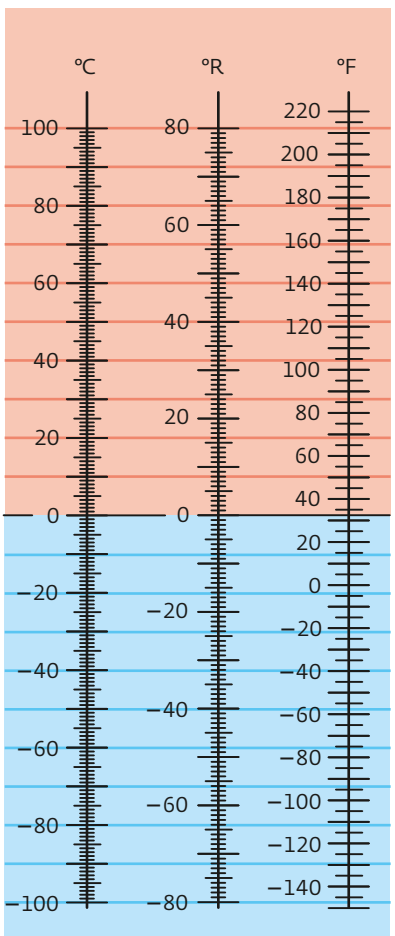
No termoscópio de Galileu, as variações de temperatura eram indicadas pela dilatação ou contração de uma massa de ar. O primeiro termômetro de líquido, semelhante aos que são usados até hoje, foi construído por Jean Rey, um médico francês, em 1637. Nesse termômetro, as variações de temperatura eram indicadas, de maneira semelhante aos termômetros atuais, pela dilatação ou contração da água contida no reservatório. Porém, a extremidade superior do tubo termométrico era aberta, como ilustrado na **figura 1.4**.

Alguns anos mais tarde, Fernando II, grão-duque da Toscana, que se interessava por ciências, desejando medir temperaturas inferiores ao ponto de solidificação da água, construiu um termômetro, semelhante ao de Rey, usando álcool em lugar de água – pois o álcool se congela a uma temperatura bem mais baixa do que a da água. Para evitar a evaporação desse líquido, ele teve a ideia de fechar hermeticamente a parte superior do tubo, construindo, assim, um termômetro realmente igual aos atuais.

O grão-duque Fernando II contribuiu enormemente para o desenvolvimento da termometria, fundando em Florença uma academia especializada na construção de termômetros. Os habilidosos especialistas que trabalhavam nessa academia foram os primeiros a usar o mercúrio como líquido termométrico. Esses termômetros florentinos foram amplamente usados por mais de cem anos, e ainda hoje é possível encontrar alguns exemplares desses aparelhos.

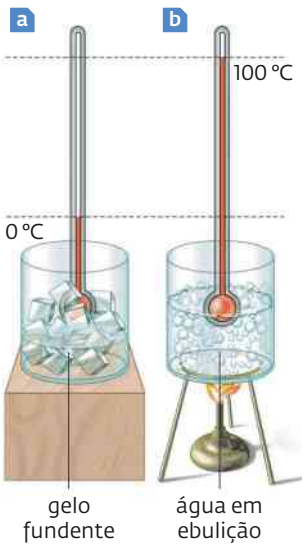
Como a graduação dos termômetros podia ser realizada de maneira arbitrária, ao longo da história foram surgindo diferentes escalas termométricas. Cada país podia adotar a própria escala e até cientistas diferentes de um mesmo país podiam utilizar escalas distintas. No início do século XVII existiam mais de 15 escalas termométricas em uso. As mais comuns eram as escalas de Réaumur, de Fahrenheit e de Celsius **(figura 1.5)**.

Na escala de Réaumur o zero é o ponto de fusão do gelo (0 °R) e o ponto de ebulição da água é 80 °R. Logo, o intervalo da escala de Réaumur é dividido em 80 partes iguais. Na escala de Fahrenheit o ponto de fusão do gelo é de 32 °F e o ponto de ebulição 212 °F. Nessa escala, 1 grau corresponde a 1/180, o que dificultava sua aceitação por diversos cientistas. Anders Celsius, em 1742, propôs uma escala centígrada, ou seja, uma escala dividida em 100 partes iguais. Nessa escala o ponto de fusão do gelo é 0 °C e o ponto de ebulição 100 °C. Somente anos depois de sua descoberta essa escala ficaria conhecida como escala Celsius.



Alex Argozino/Arquivo da editora

Figura 1.5. Escalas de Celsius, Réaumur e Fahrenheit.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 1.6. Por convenção, a temperatura do gelo fundente é 0 °C, e a da água em ebulição é 100 °C.

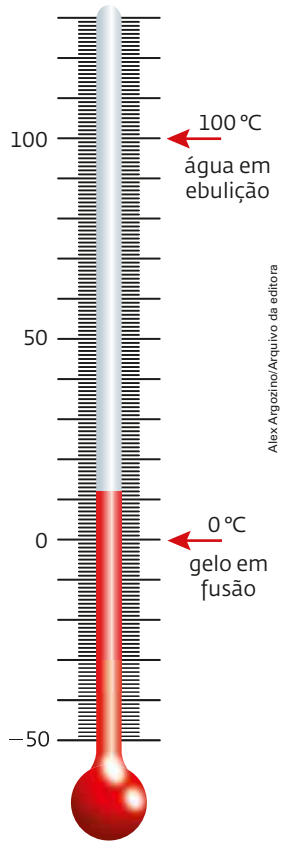
As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Escala Celsius

A escala termométrica Celsius, anteriormente denominada escala centígrada, hoje é a adotada em quase todo o mundo. Para determinar os valores dessa escala:

1) Introduz-se o termômetro em uma mistura de gelo e água em equilíbrio térmico (gelo fundente) à pressão de 1 atm. Aguarda-se até que o termômetro entre em equilíbrio térmico com a mistura, quando a altura da coluna líquida no interior do termômetro se estabiliza. Marca-se zero na extremidade da coluna **(figura 1.6.a)**. Estabelece-se, assim, que a temperatura do gelo em fusão (à pressão de 1 atm) é zero grau Celsius, e escrevemos 0 °C.
2) Introduz-se, depois, o termômetro em água em ebulição, à pressão de 1 atm. No ponto em que a coluna líquida se estabilizar, marca-se **cem**. Pode-se dizer, então, que a temperatura da água em ebulição (à pressão de 1 atm) é 100 graus Celsius, e escrevemos 100 °C **(figura 1.6.b)**.
3) Divide-se o intervalo entre 0 °C e 100 °C em 100 partes iguais, estendendo-se a graduação acima de 100 °C e abaixo de 0 °C. Cada intervalo entre duas divisões sucessivas (o "tamanho" de 1 °C) corresponde à variação de temperatura, que é representada por Δ (1 °C), como indicado na **figura 1.7**.

Depois dessas operações, o termômetro estará pronto para nos fornecer, na escala Celsius, a temperatura de um objeto com o qual ele tenha entrado em equilíbrio térmico.



Alex Argozino/Arquivo da editora

Figura 1.7. Escala termométrica Celsius. Os intervalos são iguais ao longo da escala do termômetro.



SPL/Latinstock

WILLIAM THOMSON, LORDE KELVIN (1824-1907)

Engenheiro, matemático e físico britânico cujos trabalhos contribuíram enormemente para o desenvolvimento científico do século passado. Foi um dos responsáveis pelo lançamento do primeiro cabo submarino através do oceano Atlântico, tendo sido sagrado cavaleiro pela rainha Vitória. Publicou mais de 600 trabalhos em diversos campos da ciência, salientando-se, entre eles, a criação da escala absoluta de temperatura.

Escala Kelvin

Outra escala, usada sobretudo nos meios científicos, foi proposta por William Thomson, conhecido como Lorde Kelvin, e é denominada **escala Kelvin** ou **escala absoluta**. A ideia de se propor essa escala surgiu das discussões sobre temperaturas máximas e mínimas que podem ser atingidas por um objeto.

Verificou-se que não há, teoricamente, um limite superior para a temperatura que o objeto pode alcançar. Até 2013 acreditava-se que existia um limite inferior para a temperatura, que corresponde a −273,15 °C. Essa temperatura é denominada **zero absoluto**. Entretanto, pesquisadores da Universidade Ludwig Maximilian, na Alemanha, obtiveram pela primeira vez temperatura abaixo do zero absoluto, apenas alguns bilionésimos de 1 kelvin.[1]

[1] Fonte de consulta:
Uma temperatura abaixo de zero absoluto (*A temperature below absolute zero*).
Disponível em: <www.mpg.de/research/negative-absolute-temperature>. Acesso em: 18 dez. 2015.

Apesar disso, por convenção, adota-se:

O limite inferior para a temperatura de um objeto é −273 °C. Essa temperatura é denominada zero absoluto.

Kelvin propôs como zero de sua escala (representado por 0 K)[2] a temperatura do zero absoluto e um intervalo unitário igual ao intervalo de 1 °C, isto é, $\Delta(1\ K) = \Delta(1\ °C)$. Pela **figura 1.8**, podemos perceber que:

0 K	corresponde a	−273 °C
1 K	corresponde a	−272 °C
373 K	correspondem a	100 °C, etc.

De modo geral, designando por T a temperatura Kelvin e por T_C a temperatura Celsius correspondente, e observando a **figura 1.8**, concluímos que:

$$T = T_C + 273$$

Logo, para se expressar, na escala Kelvin, uma temperatura dada em graus Celsius, basta adicionar 273 a esse valor.

Veja, na **tabela 1.1**, algumas temperaturas notáveis (em graus Celsius), desde o zero absoluto até a temperatura da superfície do Sol.

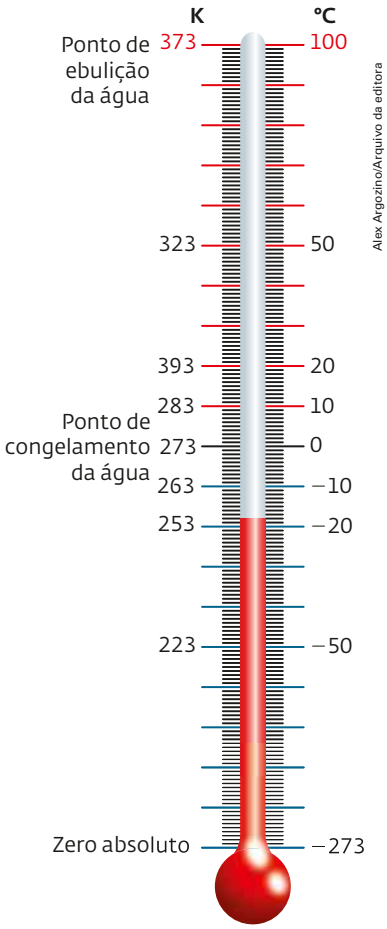


Figura 1.8. Observando a figura, concluímos que $T = T_C + 273$.

Comentário

É comum ouvirmos que "a temperatura é uma medida do calor dos objetos". Essa afirmativa, entretanto, **não** é correta. Como você viu, a temperatura é um número usado para quantificar o estado de **quente** ou **frio** dos objetos. Como veremos no capítulo 3 deste volume, a expressão **calor do objeto** não tem significado físico.

Uma maneira correta de conceituar a temperatura seria dizer que ela é uma medida da maior ou menor agitação das moléculas ou dos átomos que constituem o objeto. No capítulo seguinte, veremos que, quanto maior for a temperatura de um gás, maior será a energia cinética de suas moléculas. Da mesma forma, quando a temperatura de um gás diminui, a agitação de suas moléculas torna-se menor. Assim, zero absoluto corresponde a uma situação de energia cinética mínima de átomos e moléculas do objeto.

Tabela 1.1

Algumas temperaturas notáveis

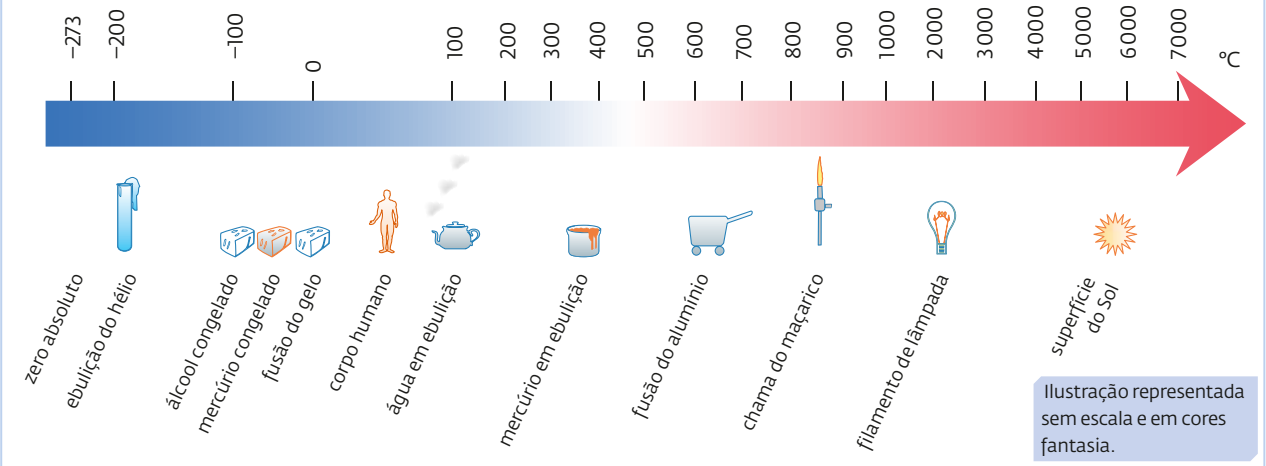


Ilustração representada sem escala e em cores fantasia.

[2] Até há algum tempo, escrevia-se 0 °K e lia-se "zero grau kelvin". Atualmente, convencionou-se abolir a palavra "grau" ao se trabalhar com a escala Kelvin. Assim, escreve-se 0 K (lê-se "zero kelvin"), 1 K (lê-se "um kelvin"), etc.

Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

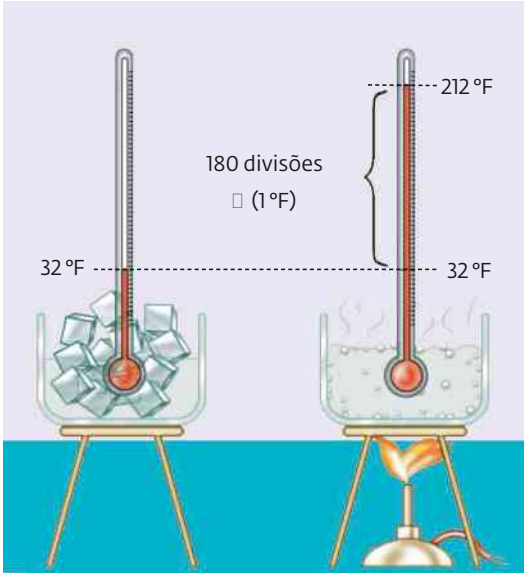


Figura 1.9. Os termômetros Fahrenheit indicam 32 °F para a fusão do gelo e 212 °F para a ebulição da água.

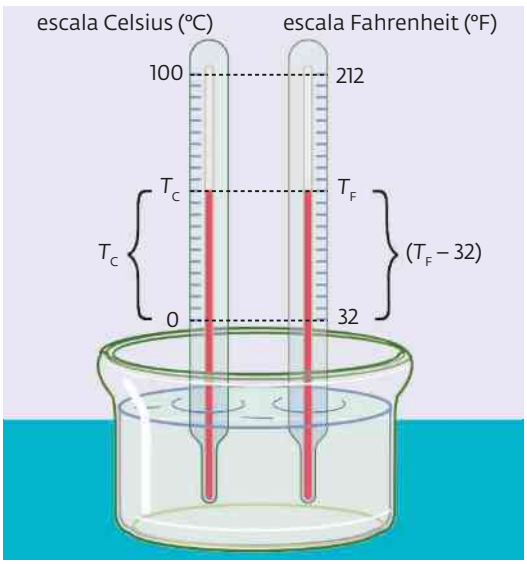


Figura 1.10. Comparação entre as escalas Celsius e Fahrenheit.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

A escala Fahrenheit

Na escala Fahrenheit, ainda utilizada em alguns lugares, como Estados Unidos e Porto Rico, o ponto de fusão do gelo é marcado por 32 graus Fahrenheit (32 °F), e o ponto de ebulição da água, por 212 °F **(figura 1.9)**. Assim, o intervalo entre essas temperaturas corresponde a 180 divisões. Como na escala Celsius esse mesmo intervalo de temperatura corresponde a 100 divisões, concluímos que o intervalo de 1 °F, isto é, Δ (1 °F), corresponde aproximadamente à metade do intervalo de 1 °C (tem-se Δ (1 °F) = (5/9) Δ (1 °C)).

Suponha um termômetro graduado na escala Celsius e outro na escala Fahrenheit, sendo usados para medir uma mesma temperatura **(figura 1.10)**. Seja T_C a leitura do termômetro Celsius, e T_F a do termômetro Fahrenheit. Evidentemente, T_C e T_F são leituras diferentes da **mesma temperatura**.

Observando a **figura 1.10**, notamos que:

- T_C divisões em °C correspondem a $(T_F - 32)$ divisões em °F;
- 100 divisões em °C correspondem a 180 divisões em °F.

Logo, podemos escrever:

$$\frac{T_C}{100} = \frac{T_F - 32}{180} \quad \text{ou} \quad \frac{T_C}{5} = \frac{T_F - 32}{9}$$

Essa expressão nos permite converter as leituras Celsius em leituras Fahrenheit e vice-versa. Por exemplo, sabendo-se que os termômetros de Nova York, em um dia quente de verão, acusam 104 °F, podemos obter a temperatura equivalente na escala Celsius da seguinte maneira:

$$\frac{T_C}{5} = \frac{104 - 32}{9} \quad \therefore \quad T_C = 40\ °C$$

Embora a escala Fahrenheit seja a mais popular nos Estados Unidos, existe um grande esforço para sua substituição pela escala Celsius, não só nos trabalhos científicos, mas também entre a população.

Atualmente, as técnicas de medida de temperatura estão altamente desenvolvidas. Os termômetros de mercúrio ainda são amplamente utilizados, mas vários outros tipos de termômetros e novos processos de medida de temperatura foram criados. Ainda neste capítulo, você conhecerá outros aparelhos e técnicas usados para a medida de temperaturas.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

1. Dois objetos, *A* e *B*, com temperaturas diferentes, sendo $T_A > T_B$, são colocados em contato e isolados de influências externas.
   a) Descreva o que se passa com os valores de T_A e T_B. T_A diminui e T_B aumenta.
   b) Como se denomina o estado para o qual tendem os dois objetos? Estado de equilíbrio térmico.
   c) Quando esse estado é alcançado, o que podemos dizer sobre os valores de T_A e T_B? $T_A = T_B$

2. Para medir a temperatura de uma pessoa, devemos manter o termômetro em contato com ela durante um certo tempo. Por quê?
   Para que o termômetro entre em equilíbrio térmico com a pessoa.

3. Em um laboratório de pesquisas, um cientista mediu a temperatura na qual certo gás se liquefaz, obtendo um valor extremamente baixo. Qual dos valores seguintes pode ter sido encontrado por ele? Explique.
   a) −327 °C b) −15 K c) −253 °C
   −253 °C, pois os outros dois são inferiores ao zero absoluto.

4. Dois recipientes, *A* e *B*, contêm massas iguais de um mesmo gás a temperaturas diferentes, sendo $T_A > T_B$. Lembrando-se do que você leu no texto desta seção, responda se é correto dizer:
   a) "O gás em *A* possui mais calor do que o gás em *B*". Errado.
   b) "A energia cinética das moléculas do gás em *A* é maior do que a energia cinética das moléculas do gás em *B*". Correto.

5. Por que a expressão "termômetro" não é adequada para designar o dispositivo construído por Galileu, representado na figura 1.3?
   Porque ele não permite medir temperaturas.

6. a) Uma pessoa afirma que a escala Celsius foi adotada universalmente porque ela se baseia nos valores "verdadeiros" dos pontos de fusão do gelo e ebulição da água. Você acha que essa afirmativa é correta? Comente.
   b) Qual é, provavelmente, a razão de ter sido essa a escala preferida entre as inúmeras outras propostas no século XVIII?
   6. a) Não, pois os valores atribuídos àquelas temperaturas são arbitrários.
   b) O fato de ela ser centígrada (centesimal).

7. Existe uma temperatura na qual um termômetro Celsius e um Fahrenheit marcam o mesmo valor. Qual é essa temperatura? −40 °C ou −40 °F.

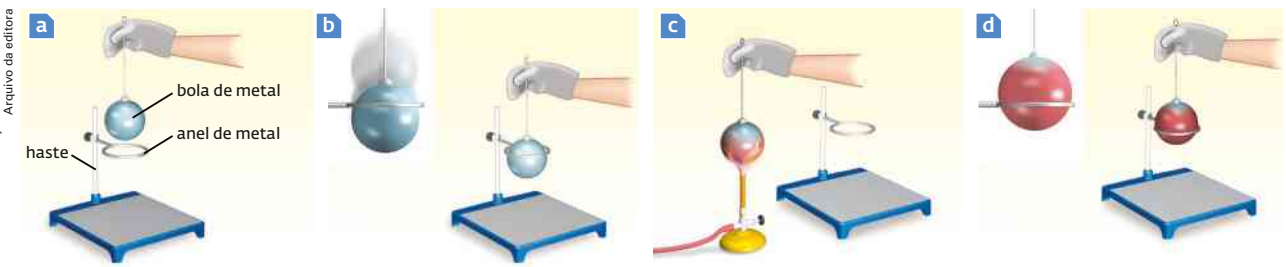
8. Durante o período de desenvolvimento das escalas termométricas, as comunidades de cientistas dos diversos países eram muito separadas, existindo tradições de pesquisas bastante distintas, o que levou ao desenvolvimento de escalas diferentes. Todavia, com o processo de globalização, é dada uma importância maior à comunicação e aos padrões de medidas utilizados em diversos países. Discuta, com ajuda do professor de Geografia, como a globalização tem afetado o desenvolvimento científico nos diferentes países.
   Veja resposta no Manual do Professor.

1.2 Dilatação dos sólidos

Dilatação

É observado que as dimensões de um objeto aumentam quando elevamos a sua temperatura. Salvo algumas exceções, todos os objetos – sólidos, líquidos ou gasosos – dilatam-se quando sua temperatura aumenta.

A figura 1.11 mostra uma experiência simples que ilustra a dilatação de um sólido: à temperatura ambiente, a esfera metálica pode passar, com pequena folga, através do anel. Aquecendo-se apenas a esfera, verifica-se que ela não poderá mais passar pelo anel. Em razão da elevação da temperatura, a esfera se dilata. Se você esperar que sua temperatura volte ao valor inicial, a esfera se contrairá e tornará a passar pelo anel.



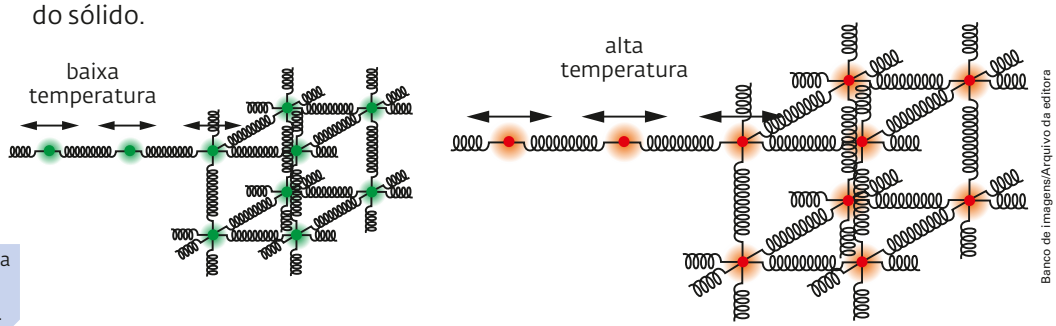
Ilustrações: Antonio Robson/ Arquivo da editora

Figura 1.11. Uma bola de metal fria está suspensa sobre um anel de metal preso a uma haste (**a**). Nesse estado, a bola de metal fria consegue atravessar o anel de metal (**b**). Após aquecer a bola de metal (**c**), ela se dilata e não consegue mais atravessar o anel de metal (**d**). Representação sem escala e em cores fantasia.

Por que um sólido se dilata

Se analisarmos a estrutura interna de um sólido, poderemos entender por que ocorre a dilatação. Os átomos que constituem o sólido distribuem-se ordenadamente, dando origem a uma estrutura denominada rede cristalina do sólido. A ligação entre esses átomos se faz por meio de forças interatômicas, que atuam como se existissem pequenas "molas" unindo um átomo a outro **(figura 1.12)**. Esses átomos estão em constante vibração em torno de uma posição média, de equilíbrio.

Quando a temperatura do sólido aumenta, há uma intensificação na agitação de seus átomos, fazendo com que eles, ao vibrar, afastem-se mais da posição de equilíbrio. Entretanto, a força que se manifesta entre os átomos atua como se a "mola" fosse mais dura para ser comprimida do que para ser distendida. Em consequência, a distância média entre os átomos torna-se maior **(figura 1.12)**, ocasionando a dilatação do sólido.



As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Figura 1.12. A elevação de temperatura acarreta um aumento na distância média entre os átomos de um sólido. Por isso ele se dilata.

Dilatação linear

Se aquecermos uma barra a certa temperatura, haverá um aumento em todas as suas dimensões lineares, isto é, em seu comprimento, sua altura, sua largura ou qualquer outra linha que imaginarmos traçada na barra. Em um laboratório, podemos descobrir experimentalmente quais fatores vão influenciar na dilatação de qualquer uma dessas dimensões.

Consideremos que seja L_0 o comprimento inicial de uma barra bem fina e estreita, à temperatura T_0. Elevando a temperatura da barra para T, o seu comprimento passa a ser L. Logo, uma variação de temperatura $\Delta T = T - T_0$ provocou uma dilatação $\Delta L = L - L_0$ no comprimento da barra **(figura 1.13)**. Fazendo-se várias medidas de ΔT e ΔL para barras de diversos comprimentos (diversos valores de L_0), foi possível concluir que a dilatação (ΔL) depende do comprimento inicial (L_0) e do aumento de temperatura (ΔT), sendo proporcional a ambos. Isto é:

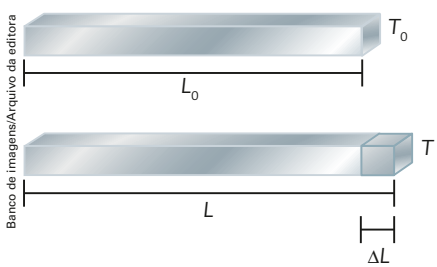


Figura 1.13. Representação da dilatação linear de uma barra.

$$\Delta L \propto L_0 \quad \text{e} \quad \Delta L \propto \Delta T$$

Uma das propriedades das proporções nos permite escrever que:

$$\Delta L \propto L_0 \Delta T \quad \therefore \quad \Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

A constante de proporcionalidade α (lê-se alfa) é denominada **coeficiente de dilatação linear**. A equação $\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$ nos permite calcular a dilatação de qualquer dimensão linear, se conhecermos o seu valor inicial, L_0, a variação de temperatura, ΔT, e o valor de α.

O coeficiente de dilatação linear

Da expressão $\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$, vemos que é possível obter o valor de α se medirmos os valores de ΔL, L_0 e ΔT:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T}$$

Realizando-se experiências com barras feitas de diferentes materiais, verifica-se que o valor de α é diferente para cada um deles. Isso ocorre porque as forças que ligam os átomos e as moléculas variam de uma substância para outra, fazendo com que elas se dilatem diferentemente. A **tabela 1.2** nos fornece os coeficientes de dilatação linear de alguns materiais.

Pela expressão $\alpha = \Delta L / L_0 \Delta T$, vemos que a unidade de medida de α é o inverso de uma unidade de temperatura, pois $\Delta L / L_0$ é um número adimensional (número puro, sem unidade). Logo, α pode ser expresso em:

$$\frac{1}{°C} = °C^{-1} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{K} = K^{-1}$$

Observe que, na **tabela 1.2**, os coeficientes estão expressos em $°C^{-1}$. Para o cobre, por exemplo, temos $\alpha = 17 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$. Isso significa que uma barra de cobre, de 1 cm (ou 1 m, ou 1 km, etc.) de comprimento, aumenta em $17 \cdot 10^{-6}$ cm (ou m, ou km, etc.) quando sua temperatura é elevada em 1 °C.

Tabela 1.2

COEFICIENTES DE DILATAÇÃO LINEAR

Substância	α ($°C^{-1}$)
Alumínio	$23 \cdot 10^{-6}$
Cobre	$17 \cdot 10^{-6}$
Invar[3]	$0{,}7 \cdot 10^{-6}$
Vidro (comum)	$9{,}0 \cdot 10^{-6}$
Zinco	$25 \cdot 10^{-6}$
Vidro (refratário)	$3{,}2 \cdot 10^{-6}$
Tungstênio	$4 \cdot 10^{-6}$
Chumbo	$29 \cdot 10^{-6}$
Sílica	$0{,}4 \cdot 10^{-6}$
Aço	$11 \cdot 10^{-6}$
Diamante	$0{,}9 \cdot 10^{-6}$

[3] Invar é uma liga metálica à base de níquel (30 a 35%) e ferro.

Dilatação superficial e volumétrica

No estudo da dilatação superficial, isto é, o aumento da área de um objeto provocado por uma variação de temperatura, são observadas as mesmas leis da dilatação linear. Considerando uma placa de área inicial A_0 e elevando sua temperatura em ΔT, a área passa a ser A, sofrendo uma dilatação superficial $\Delta A = A - A_0$ **(figura 1.14)**.

Pode-se verificar que:

$$\Delta A \propto A_0 \Delta T \quad \text{ou} \quad \Delta A = \beta A_0 \Delta T$$

O coeficiente de proporcionalidade β (lê-se beta) é denominado **coeficiente de dilatação superficial**. Seu valor também depende do material do qual a placa é feita. Entretanto, não é necessário construir tabelas com valores de β, pois pode-se mostrar que, para um determinado material, tem-se:

$$\beta = 2\alpha$$

Se desejarmos saber, por exemplo, o valor de β para o aço, consultaremos a **tabela 1.2** e obteremos:

$$\beta = 2\alpha = 2 \cdot 11 \cdot 10^{-6} \quad \text{ou} \quad \beta = 22 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$$

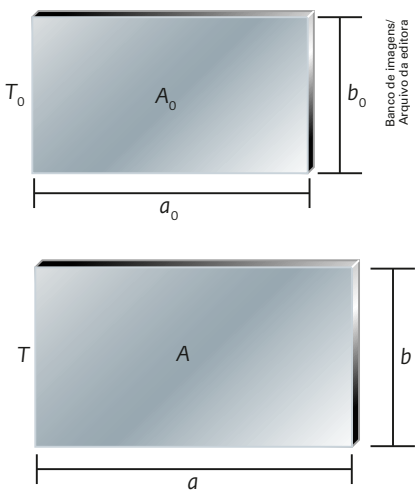
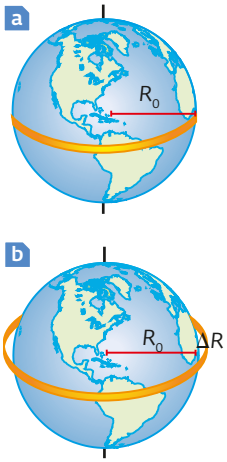


Figura 1.14. Representação (sem escala e em cores fantasia) da dilatação superficial de uma placa.

De maneira idêntica, verificamos que a dilatação volumétrica, isto é, a variação do volume de um objeto provocada pela variação da temperatura, segue as mesmas leis. Se um objeto de volume V_0 tem sua temperatura aumentada em ΔT, seu volume aumenta em $\Delta V = V - V_0$:

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

O coeficiente γ (lê-se gama) é denominado **coeficiente de dilatação volumétrica**; pode-se mostrar que, para um dado material, $\gamma = 3\alpha$.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 1.15. O anel se dilata como se estivesse preenchido. Representação sem escala e em cores fantasia.

Exemplo

Suponha que a Terra, na região do equador, fosse envolvida com um anel de alumínio, como está representado na figura 1.15.a. Se a temperatura do anel fosse elevada em apenas 1,0 °C, sem que a temperatura da Terra sofresse modificações, a que altura, acima da superfície da Terra, o anel ficaria (figura 1.15.b)?

O anel se dilataria como se fosse um disco maciço de alumínio. Logo, a altura procurada representa a dilatação do raio do anel, indicada por ΔR na figura 1.15.b. Mas o raio inicial, R_0, do anel, é o próprio raio da Terra (figura 1.15.a). Assim:

$$\Delta R = \alpha R_0 \Delta T$$

O coeficiente de dilatação do alumínio vale $\alpha = 23 \cdot 10^{-6}\,°C^{-1}$ (tabela 1.2), e sabemos que o raio da Terra é aproximadamente $R_0 = 6{,}4 \cdot 10^6$ m. Como $\Delta T = 1{,}0\,°C$, vem:

$$\Delta R = 23 \cdot 10^{-6} \cdot 6{,}4 \cdot 10^6 \cdot 1{,}0 \quad \therefore \quad \Delta R = 147 \text{ m}$$

Observe que esse valor corresponde à altura de um edifício de, aproximadamente, 50 andares.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

9. a) Explique por que um copo de vidro comum provavelmente se quebrará se for parcialmente ocupado com água fervente.

b) Por que, enchendo-o completamente, há menor probabilidade de se quebrar o copo?

c) Por que o copo não se quebrará se for de vidro refratário? Porque o coeficiente de dilatação do vidro refratário é pequeno.

9. a) Porque apenas a parte do copo em contato com a água se aquece e se dilata.

9. b) Porque o copo se aquece e se dilata igualmente por inteiro.

10. Para compreender o significado do coeficiente de dilatação linear, copie e complete as afirmações seguintes no caderno.

Quando se diz que o coeficiente de dilatação linear no chumbo vale $29 \cdot 10^{-6}\,°C^{-1}$, isso significa que uma barra de chumbo:

a) de 1 km de comprimento dilata-se em $29 \cdot 10^{-6}$ km quando sua temperatura aumenta em //////////// 1 °C

b) de 1 polegada de comprimento dilata-se em $29 \cdot 10^{-6}$ polegada quando sua temperatura aumenta em //////////// 1 °C

c) de 1 cm de comprimento dilata-se em //////////// cm quando sua temperatura aumenta em 1 °C. $29 \cdot 10^{-6}$ cm

11. a) Duas barras, *A* e *B*, de mesmo comprimento inicial, sofrem a mesma elevação de temperatura. As dilatações dessas barras poderão ser diferentes? Explique.

Sim, se seus coeficientes de dilatação forem diferentes (materiais diferentes).

b) Duas barras, *A* e *B*, de mesmo material, sofrem a mesma elevação de temperatura. As dilatações dessas barras poderão ser diferentes? Explique.

Sim, se tiverem comprimentos iniciais diferentes.

12. Uma esfera de aço está flutuando na superfície do mercúrio contido em um recipiente. Suponha que, por um processo qualquer, apenas a temperatura da esfera seja aumentada.

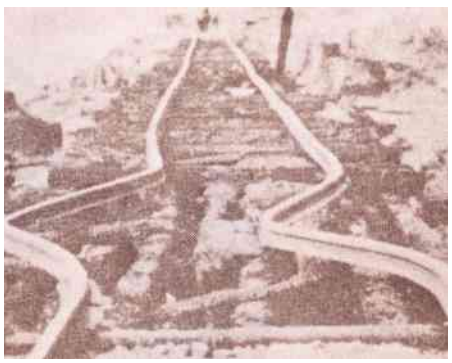
a) A densidade da esfera vai aumentar, diminuir ou não sofrerá alteração? Diminuirá.

b) A fração submersa da esfera aumentará, diminuirá ou não sofrerá alteração? Diminuirá.

13. As esferas usadas na ponta das canetas esferográficas em geral são feitas de tungstênio, e uma das razões para isso é a sua dureza. Analise a tabela 1.2 e encontre outra razão, além da dureza, para que essas esferas não sejam fabricadas de alumínio, cobre, chumbo ou aço, por exemplo. Justifique sua resposta.

13. O coeficiente de dilatação do tungstênio é menor do que o dos outros metais mencionados.

14. Suponha que uma estrada de ferro tenha sido construída com trilhos individuais de certo comprimento *L*, deixando-se entre eles juntas de dilatação de largura igual a 1 cm.



Reprodução/Arquivo da editora

A alta elevação de temperatura durante um incêndio provocou a deformação dos trilhos de uma estrada de ferro, apesar da existência de juntas de dilatação.

a) Se a estrada fosse construída com trilhos de comprimento maior do que *L*, as juntas de dilatação deveriam ter largura maior, menor ou igual a 1 cm? Explique.

b) Por que, se ocorrer um incêndio (como na foto acima), os trilhos da estrada de ferro se deformarão, apesar das juntas de dilatação?

14. a) Maior, pois a dilatação é proporcional ao comprimento inicial.
b) Porque, sendo muito grande a elevação de temperatura, a dilatação de cada trilho é maior do que a largura das juntas.

APLICAÇÕES DA FÍSICA

A lâmina bimetálica

Uma lâmina bimetálica é constituída de duas lâminas de materiais diferentes – por exemplo, ferro e latão – unidas firmemente **(figura 1.16)**.

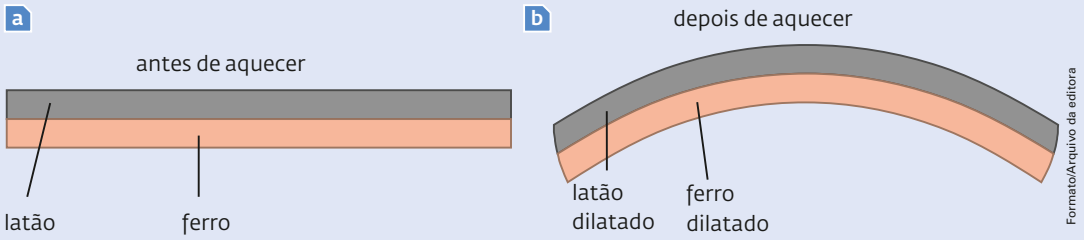
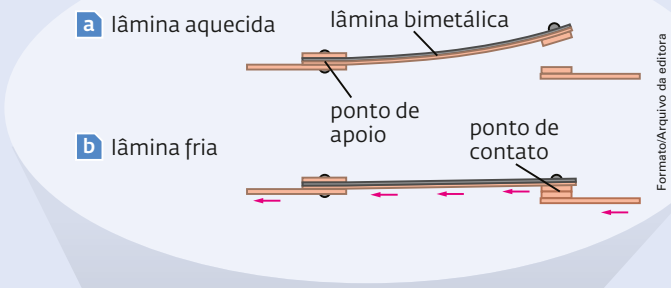


Figura 1.16. Uma lâmina bimetálica se curva ao ser aquecida.

Na temperatura ambiente, as lâminas são planas e possuem as mesmas dimensões **(figura 1.16.a)**. Ao serem aquecidas, uma das lâminas se dilata mais que a outra, pois cada material possui um coeficiente de dilatação diferente. Por se manterem fortemente unidas e passarem a ter tamanhos diferentes, elas se encurvam, da maneira mostrada na **figura 1.16.b**.

Essa característica da lâmina bimetálica é muito usada para provocar aberturas e fechamentos automáticos de circuitos elétricos. A **figura 1.17** mostra uma dessas aplicações em um ferro elétrico automático, no qual a lâmina é utilizada como um termostato (dispositivo que mantém a temperatura aproximadamente estável).



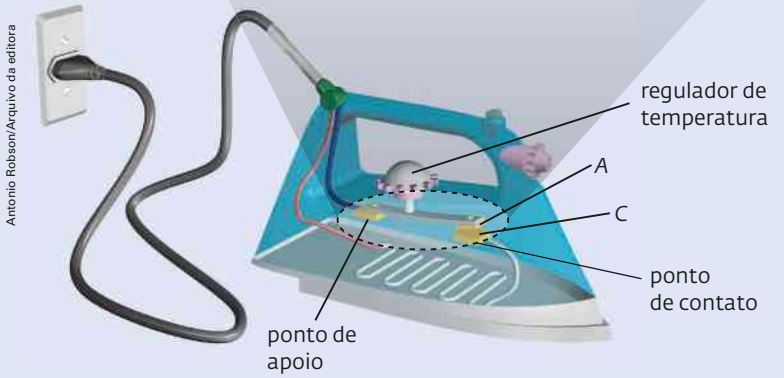


Figura 1.17. No ferro elétrico, a lâmina bimetálica *A* é parte de um termostato, dispositivo usado para manter o aparelho na temperatura desejada. Ao ser aquecida acima de certa temperatura, a lâmina se encurva para cima (a), interrompendo o circuito elétrico em *AC* (o ferro é desligado). Logo que o ferro sofre determinada diminuição de temperatura, a lâmina retorna à sua forma plana (b) e *A* faz contato com *C*, tornando a ligar o aparelho. O parafuso permite regular a temperatura desejada.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

1. Torradeira de pães, sanduicheira, cafeteira, etc. Esses aparelhos utilizam a lâmina bimetálica para controlar a temperatura. No entanto, cada um deles eleva a temperatura a um valor diferente.
2. Elas aquecem por efeito Joule e desarmam o dispositivo que as mantém acionadas.

QUESTÕES

1. Identifique em sua residência outros eletrodomésticos que utilizam o sistema de lâmina bimetálica como controle automático de temperatura. Quais são as diferenças e semelhanças entre esses equipamentos?

2. As lâminas bimetálicas também podem ser utilizadas em alguns dispositivos que protegem o circuito elétrico, conhecidos como disjuntores. Se ocorrer sobrecarga no circuito elétrico, a lâmina bimetálica desarma o disjuntor, interrompendo imediatamente a passagem de corrente elétrica. Procure saber como ocorre o aquecimento instantâneo dessa lâmina.

FÍSICA NO CONTEXTO

FENÔMENO DE DILATAÇÃO

Muitos fatos que ocorrem em nossa vida diária estão relacionados com o fenômeno de dilatação. A seguir, analisaremos alguns deles.

1) Ao aquecer uma placa metálica que apresenta um orifício (figura 1.18), podemos ter a impressão de que a dilatação desse objeto fará com que o orifício diminua. Entretanto, isso não é o que acontece, pois a placa se dilata em todas as direções e o orifício também aumenta de tamanho. O fenômeno de dilatação térmica durante o aquecimento de materiais e o de contração durante o resfriamento é muito utilizado na indústria quando se quer acoplar peças delicadas e não é possível aplicar pressão mecânica. Por exemplo, para acoplar um eixo a uma engrenagem dentada metálica com um furo central, quando o eixo é maior que o furo (figura 1.19), podemos aquecer a engrenagem, o que provocará a dilatação do orifício, permitindo que o eixo seja introduzido. Após esse processo, a temperatura diminui e volta a ser ambiente. A união eixo-engrenagem também seria possível se o eixo fosse resfriado, ou seja, contraído. Nesse caso, o eixo diminuiria de tamanho permitindo seu encaixe no orifício da engrenagem.


Andrey Kuzmin/Alamy/Latinstock

Figura 1.18. Se aquecermos a placa metálica a uma temperatura suficiente para que ela se dilate, o orifício aumentará.


Matthias Kulka/Corbis/Latinstock

Figura 1.19. Quando uma engrenagem dentada com um orifício é aquecida, tanto a engrenagem quanto o orifício aumentam de tamanho, permitindo o acoplamento com o eixo central. O orifício da engrenagem dentada geralmente é menor do que o diâmetro do eixo.

2) A temperatura ambiente, em quase todos os lugares da Terra, sofre variações consideráveis do dia para a noite, de uma estação para outra, etc. Assim, os objetos existentes nesses lugares têm suas dimensões alteradas periodicamente. Para permitir que essas dilatações ocorram sem danos, nos trilhos de estradas de ferro ou nas grandes estruturas de concreto armado, são deixadas as chamadas juntas de dilatação, como ilustra a figura 1.20.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

Do mesmo modo, para que uma ponte possa se dilatar livremente, sem trincar, os engenheiros a apoiam sobre rolos (figura 1.21). Se essas precauções não fossem adotadas, as estruturas se danificariam, pois são enormes as tensões que aparecem em peças submetidas à variação de temperatura e impedidas de se dilatarem ou de se contraírem (figura 1.22).

Jales Valquer/Fotoarena



Figura 1.20. Junta de dilatação utilizada em grandes estruturas de concreto armado. Ponte governador Orestes Quércia, em São Paulo (SP), 2016.

Paulo César Pereira/Arquivo da editora



Figura 1.21. Para que a dilatação de pontes ocorra facilmente, elas são apoiadas sobre rolos.

Geraldo Bubniak/Fotoarena/Folhapress



Figura 1.22. Em 2012, o calor de 34 °C provocou a dilatação térmica da pavimentação de uma rua em Curitiba (PR), causando a ruptura do pavimento.

1.3 Dilatação dos líquidos

Os líquidos dilatam-se obedecendo às mesmas leis que estudamos para os sólidos. Apenas devemos nos lembrar de que, como os líquidos não têm forma própria, mas tomam a forma do recipiente, é importante o conhecimento apenas de sua dilatação volumétrica. Por isso, para os líquidos, são tabelados apenas os coeficientes de dilatação volumétrica **(tabela 1.3)**.

Tabela 1.3

COEFICIENTES DE DILATAÇÃO VOLUMÉTRICA	
Substância	$\gamma\ (°C^{-1})$
Álcool etílico	$0{,}75 \cdot 10^{-3}$
Dissulfeto de carbono	$1{,}2 \cdot 10^{-3}$
Glicerina	$0{,}5 \cdot 10^{-3}$
Mercúrio	$0{,}18 \cdot 10^{-3}$
Petróleo	$0{,}9 \cdot 10^{-3}$

Dilatação aparente

Ao colocar um líquido em um frasco e aquecer esse conjunto, ambos se dilatarão, por isso se diz que a dilatação observada, para o líquido, será apenas **aparente**. A dilatação **real** do líquido será maior do que a observada. Ela será igual à soma da dilatação aparente com a dilatação volumétrica do recipiente.

Dilatação irregular da água

Em geral sólidos e líquidos têm seu volume aumentado quando elevamos sua temperatura. Entretanto, algumas substâncias **diminuem** de volume quando sua temperatura aumenta. Essas substâncias têm um coeficiente de dilatação **negativo**.

A água, por exemplo, é uma das substâncias que apresentam essa irregularidade na dilatação. **Quando a temperatura da água é aumentada entre 0 °C e 4 °C, o seu volume diminui**. Elevando-se sua temperatura acima de 4 °C, ela se dilata normalmente. O gráfico volume × temperatura para a água tem o aspecto mostrado na **figura 1.23**. Portanto, uma certa massa de água tem volume mínimo a 4 °C, ou seja, sua densidade é máxima nessa temperatura.

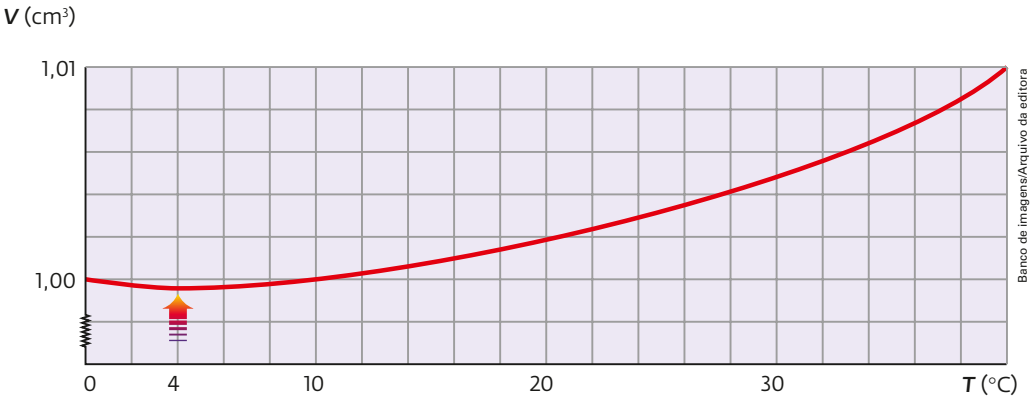


Figura 1.23. O volume de uma dada massa de água é mínimo a 4 °C.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 1.24. Representação (sem escala e em cores fantasia) da dilatação térmica do mercúrio.

Exemplo

Um frasco de vidro, cujo volume é exatamente 1 000 cm³ a 0 °C, está completamente cheio de mercúrio a essa temperatura (figura 1.24.a). Quando o conjunto é aquecido até 100 °C, entornam 15,0 cm³ de mercúrio (figura 1.24.b).

a) Qual foi a dilatação real do mercúrio?

Como sabemos, essa dilatação é dada por:

$$\Delta V_{Hg} = \gamma_{Hg} V_0 \Delta T$$

Nesse caso, o volume inicial do mercúrio é $V_0 = 1\,000\ cm^3$, e o aumento de temperatura vale $\Delta T = 100\ °C$. O valor do coeficiente de dilatação volumétrica do mercúrio é fornecido pela **tabela 1.3**: $\gamma_{Hg} = 0{,}18 \cdot 10^{-3}\ °C^{-1}$. Assim:

$$\Delta V_{Hg} = 0{,}18 \cdot 10^{-3} \cdot 1\,000 \cdot 100 \quad \therefore \quad V_{Hg} = 18{,}0\ cm^3$$

b) Qual foi a dilatação do frasco?

A dilatação aparente do mercúrio é dada pela quantidade que entornou, isto é, 15,0 cm³. Como a dilatação real foi de 18,0 cm³, é claro que a dilatação do frasco foi:

$$\Delta V_f = 18{,}0 - 15{,}0 \quad \therefore \quad \Delta V_f = 3{,}0\ cm^3$$

c) Qual é o valor do coeficiente de dilatação linear do vidro de que é feito o frasco?

Sabemos que:

$$\Delta V_f = \gamma_f V_0 \Delta T$$

em que γ_f é o coeficiente de dilatação volumétrica do frasco, $V_0 = 1\,000\ cm^3$ e $\Delta T = 100\ °C$. Assim, como $\Delta V_f = 3{,}0\ cm^3$:

$$3{,}0 = \gamma_f \cdot 1\,000 \cdot 100 \quad \therefore \quad \gamma_f = 3{,}0 \cdot 10^{-5}\ °C^{-1}$$

Lembrando que $\gamma_f = 3\alpha_f$, obtemos:

$$\alpha_f = \frac{\gamma_f}{3} = \frac{3{,}0 \cdot 10^{-5}}{3} \quad \therefore \quad \alpha_f = 1{,}0 \cdot 10^{-5}\ °C^{-1}$$

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

15. Uma pessoa encheu completamente o tanque de gasolina de seu carro e deixou-o estacionado ao sol. Depois de um certo tempo, verificou que, em virtude da elevação da temperatura, uma certa quantidade de gasolina havia entornado.

a) O tanque de gasolina se dilatou? Sim.

b) A quantidade que entornou representa a dilatação real que a gasolina sofreu?

15. b) Não; representa a dilatação aparente.

c) A dilatação real da gasolina foi maior, menor ou igual à dilatação do tanque? Maior.

d) E o coeficiente de dilatação da gasolina é maior, menor ou igual ao coeficiente de dilatação volumétrica do material de que é feito o tanque? Maior.

16. Um recipiente, cujo volume inicial é $V_0 = 100\ cm^3$, está completamente cheio de glicerina à temperatura de 20 °C. Aquecendo-se o conjunto até 50 °C, verifica-se que entorna 1,5 cm³ de glicerina.

a) Qual foi a dilatação aparente da glicerina? 1,5 cm³

b) Consulte a **tabela 1.3** e calcule a dilatação real sofrida pela glicerina. 1,5 cm³

c) Qual é o valor do coeficiente de dilatação do recipiente? Zero.

17. Um líquido, cujo coeficiente de dilatação volumétrica é $\gamma_L = 6{,}9 \cdot 10^{-5}\ °C^{-1}$, foi colocado em um recipiente de alumínio, atingindo uma altura *h* dentro dele.

a) Consultando a **tabela 1.2**, determine o coeficiente de dilatação volumétrica, γ_{Al}, do alumínio. $\gamma_{Al} = 6{,}9 \cdot 10^{-5}\ °C^{-1}$

b) Se o conjunto recipiente + líquido for aquecido, o nível do líquido subirá, descerá ou não sofrerá alteração? Não sofrerá alteração.

c) Qual foi a dilatação aparente do líquido? Zero.

18. Uma esfera de madeira está flutuando na superfície da água contida em um recipiente, à temperatura de 2 °C. Somente a água foi aquecida até sua temperatura atingir 4 °C. Responda:

a) O volume da água aumentará, diminuirá ou não sofrerá alteração? Diminuirá.

b) A densidade da água aumentará, diminuirá ou não sofrerá alteração? Aumentará.

c) A parte submersa da esfera aumentará, diminuirá ou não sofrerá alteração? Diminuirá.

FÍSICA NO CONTEXTO

CONGELAMENTO DA ÁGUA

Não escreva no livro!

O comportamento irregular da água explica por que, em países onde o inverno é rigoroso, os lagos, rios e mesmo os mares se congelam na superfície mantendo a água líquida no fundo. Isso ocorre porque a água tende a possuir máxima densidade quando está no estado líquido e a 4 °C. Essa característica, junto com o fato de o gelo ser um ótimo isolante térmico, é fundamental para a preservação da fauna e da flora desses lugares. Se a água não apresentasse essa irregularidade na dilatação, os rios e lagos se congelariam totalmente, causando danos irreparáveis às plantas e aos animais aquáticos.

Mesmo com a água da superfície de lagos e rios congelada, é possível pescar (figura 1.25), pois a água abaixo da camada de gelo encontra-se em estado líquido, com temperatura entre 0 °C e 4 °C.



Bert de Ruiter/Alamy/Latinstock

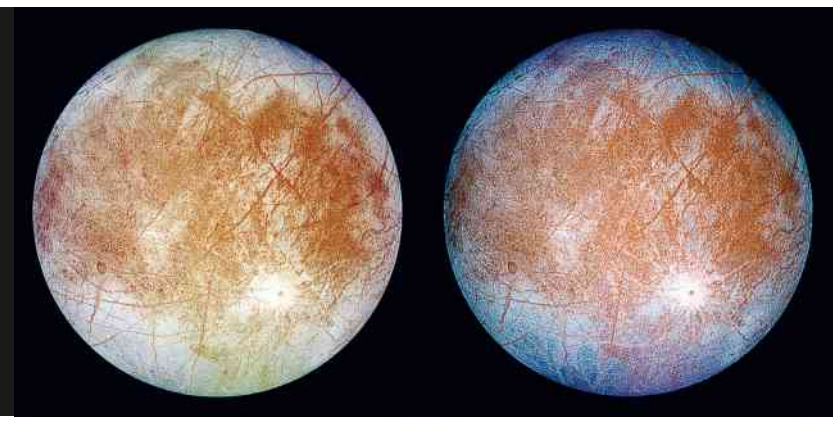
Figura 1.25. Prática de pesca em rio congelado de Pequim, China, 2014.

O comportamento da água também explica por que as garrafas cheias com líquidos compostos principalmente de água se quebram quando ficam muito tempo no congelador de uma geladeira. Nesses casos, a água, ao virar gelo, expande-se, quebrando o vidro ou o plástico da embalagem. Observa-se também que, em lugares frios, quando a temperatura cai abaixo de 0 °C, as tubulações de água costumam se romper em razão de seu congelamento. Nesses lugares a água colocada no radiador dos carros é misturada a um aditivo que diminui o seu ponto de solidificação, evitando seu congelamento.

Água em lua de Júpiter

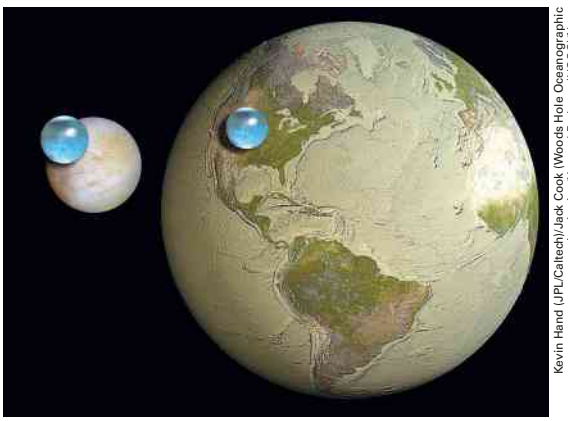
Europa é uma das 67 luas de Júpiter e tem despertado bastante o interesse dos pesquisadores do espaço pelas suas peculiaridades. Informações obtidas pela sonda Galileu, lançada pela Nasa em 1998 para estudar aquele planeta e suas luas, captou imagens como a da figura 1.26. Elas mostram que a superfície de Europa é totalmente coberta por uma camada de gelo, cuja espessura pode variar de 10 km a 30 km, com temperatura superficial máxima próxima de −163 °C.

A hipótese dos pesquisadores é que abaixo dessa camada há muita água no estado líquido (figura 1.27). Isso ocorreria graças à energia liberada pelo efeito de maré causado em Europa pela enorme gravidade de Júpiter, o que aumentaria a temperatura do gelo até o seu ponto de fusão, naquelas condições. E, também neste caso, a dilatação irregular da água e o fato de o gelo ser um isolante térmico eficiente garantiriam a presença de água no estado líquido, tão longe assim do Sol: Júpiter está 5,2 vezes mais distante do Sol do que a Terra.



Nasa/SPL/Latinstock

Figura 1.26. Imagens de Europa obtidas pela sonda Galileu. A sonda foi direcionada para Júpiter em 2003, ao final da missão, para evitar a colisão com qualquer um de seus satélites (Fonte: Nasa).



Kevin Hand (JPL/Caltech)/Jack Cook (Woods Hole Oceanographic Institution/Howard Perlman (USGS)/Nasa

Figura 1.27. Embora sendo quase do mesmo tamanho da nossa Lua, Europa teria mais água do que toda a água da Terra. Esta é uma representação em escala (mas em cores fantasia) de Europa e da Terra com as respectivas quantidades de água, indicadas pelas "gotas" azuis, de acordo com a hipótese dos cientistas (Fonte: Nasa).

APLICAÇÕES DA FÍSICA

Avanços na tecnologia da medida e do controle da temperatura

A importância da medida e do controle da temperatura, em ampla variedade de atividades científicas, industriais e domésticas, levou ao grande desenvolvimento dessa técnica.

São bastante conhecidos os papéis de relevo da termometria de precisão, dos controles de temperaturas elevadas ou muito baixas nos laboratórios de pesquisa de todo o mundo. Em quase todas as atividades industriais essas medidas são necessárias, destacando-se as indústrias agrícola, aeronáutica, eletrônica, automobilística, metalúrgica, de aquecimento, refrigeração e condicionamento, etc. Quanto à sua utilização doméstica, sabe-se que praticamente em toda residência encontramos pelo menos um termômetro ou termostato, seja para uso clínico, seja para controle de temperatura em fornos, fogões, geladeiras, etc.

Qualquer propriedade de uma substância que varie com a temperatura pode ser usada na construção de termômetros. Ainda hoje, entretanto, a maioria dos termômetros em uso se baseia, como acontecia em épocas passadas, na dilatação das substâncias, especialmente dos líquidos. Outros termômetros, de concepções mais modernas, baseados em outras propriedades, são, porém, amplamente utilizados. Sua escolha fica sujeita às vantagens que podem proporcionar em uma dada situação, relacionadas com precisão, sensibilidade, durabilidade, forma, custo, limites de temperatura que permitem medir, etc.

Os princípios nos quais se baseiam alguns desses termômetros e as principais características que levam à sua preferência são apresentados a seguir.

Termômetros de resistência elétrica

Permitem também alta precisão (até 0,0001 °C em alguns, que usam platina). Oferecem ótima reprodutibilidade nas leituras. Alguns termômetros desse tipo, que usam semicondutores (germânio, por exemplo), são os mais recomendados para medidas de temperaturas muito baixas (entre 0,2 K e 50 K).



tumsasedgars/Shutterstock

Figura 1.28. Termômetro infravermelho digital de superfície: a temperatura do objeto é obtida comparando-se a intensidade da radiação infravermelha (calor) emitida por um objeto com a emissividade do material. Similar ao termômetro clínico, a escala costuma variar entre 34 °C e 42 °C.

Termômetros de termopar

São, talvez, os termômetros mais importantes atualmente, amplamente usados na indústria para registros contínuos e controle de temperatura. Baseiam-se na medida da voltagem existente em junções de fios metálicos ou ligas de naturezas diferentes, a qual depende das temperaturas das junções. É muito grande a variedade de materiais que podem ser usados na construção dos termopares. Suas principais vantagens são: grande sensibilidade, pequena capacidade térmica e condições muito práticas de uso.

Termômetros de radiação

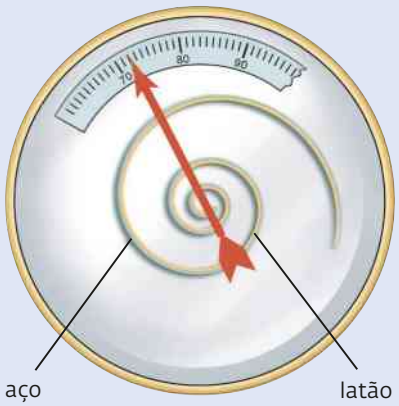
Baseiam-se na medida da energia irradiada por um objeto, a qual depende de sua temperatura. São empregados, principalmente, na obtenção de temperaturas muito elevadas, oferecendo a vantagem de permitir a medida sem contato do termômetro com o objeto.

Para medidas de temperaturas ainda mais elevadas, como a de chamas, estrelas, gases ionizados (plasmas), etc., são usadas técnicas baseadas na termometria espectroscópica.

Há ainda os termômetros desse tipo empregados na área médica **(figura 1.28)**, nos quais a aferição da temperatura é realizada pela comparação entre as intensidades do calor emitido pelo corpo humano.

Termômetros bimetálicos

São baseados no encurvamento de lâminas bimetálicas ao serem aquecidas. Embora apresentem pouca precisão, esses dispositivos são muito empregados como termostatos (em ferros elétricos, aquecedores, chaves automáticas ou disjuntores, etc.), por serem de uso simples e oferecerem prontidão nas leituras **(figura 1.29)**.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 1.29. Representação (sem escala e em cores fantasia) de um termômetro bimetálico. O aquecimento faz com que a espiral bimétalica se encurve, movendo o ponteiro, que indica o valor da temperatura.

Termômetros acústicos

O princípio de funcionamento desses aparelhos é a variação da velocidade do som (ou do ultrassom) com a temperatura. São usados com sucesso para temperaturas muito baixas (2 K a 40 K).

Termômetros magnéticos

Esses termômetros têm por base a medida de propriedades magnéticas de determinados materiais, que variam com a temperatura. São usados, sobretudo, para medidas de temperaturas inferiores a 1 K. As temperaturas mais baixas que vêm sendo alcançadas sucessivamente, com valores próximos de 0,000001 K, são medidas com esse tipo de termômetro.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

Indicadores de temperatura

Alguns materiais apresentam, em situações especiais, determinada propriedade que se reproduz, com sensível precisão, a uma certa temperatura. Conjuntos desses materiais, cada um sensível especificamente a uma temperatura, costumam ser usados como termômetros. Novas tecnologias têm permitido utilizar plásticos e tintas sensíveis à temperatura, mudando de cor conforme ela varia.

Entre os indicadores, os cristais líquidos apresentam alterações de cor com a temperatura e a vantagem de serem reversíveis. Pequenas variações da temperatura provocam alterações, e os cristais líquidos apresentam diversas fases, cada uma característica de uma dada temperatura. Assim, é possível utilizar um mesmo cristal líquido para indicar temperaturas diversas, já que a cada uma delas a sua cor se modifica **(figura 1.30)**.


Ian Hootons/Science Photo Library/Latinstock

Figura 1.30. Termômetro de cristal líquido.

Outras técnicas de medida de temperatura têm sido desenvolvidas, como a **termografia**, que consiste no mapeamento de distribuição de temperaturas em áreas externas ou internas de um objeto **(figura 1.31)**.

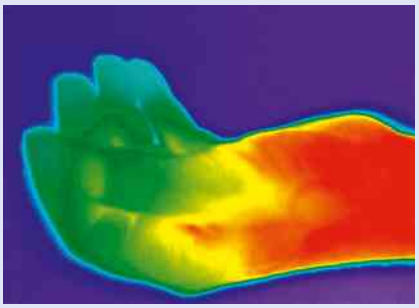

T-Service/Science Photo Library/Latinstock

Figura 1.31. Termografia da mão de uma pessoa. A cada cor vista na foto corresponde uma temperatura diferente.

Essas técnicas são empregadas na medicina (para indicar regiões em que estão localizados tumores ou inflamações), na indústria (para indicar alterações de temperatura na superfície de motores e máquinas), em pesquisas meteorológicas e até em pinturas de parede, para controle de temperaturas ambientais por meio de alterações das cores das superfícies que envolvem o ambiente.

QUESTÕES

1. A técnica de termografia é a mais indicada nesta situação.
2. Para verificar se uma pessoa está com febre, é necessário "calibrar" a sensação térmica de nossa mão para que possamos perceber se a temperatura dessa pessoa está normal ou não.

1. Entre os diferentes termômetros e técnicas de medição de temperatura apresentados, quais poderiam ser utilizados para identificar ilhas de calor em grandes centros urbanos?

2. Quando alguém nos pergunta se está com febre, mas não temos um termômetro para medir sua temperatura, geralmente colocamos a mão no próprio pescoço e depois no pescoço ou na testa da pessoa, retornando depois ao nosso. Por que são necessários esses passos?

PRATIQUE FÍSICA

EM EQUIPE

Veja comentário desta seção no Manual do Professor.

Não escreva no livro!



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Representação (sem escala e em cores fantasia) da dilatação térmica de água colorida.

1. O procedimento seguinte lhe permitirá observar facilmente a dilatação (e a contração) térmica de um líquido qualquer.

1º) Encha completamente um frasco de vidro médio, de 50 cm^3 de volume, com água previamente colorida.

2º) Faça um furo em uma rolha para passar através dele um tubo fino de plástico. Usando um pouco de cola, procure vedar qualquer orifício que exista na superfície da rolha.

Fechando o frasco com a rolha, forçando-a para que se ajuste bem, a água subirá até certa altura no interior do tubo, como mostra a figura ao lado.

3º) Com cuidado, coloque esse dispositivo que você preparou em um banho de água bem quente, de modo que ela envolva o frasco que contém água colorida. Observe o que ocorrerá com o nível da água no tubo.

Depois de certo tempo, transfira o dispositivo para um banho de água bem fria (mistura de água e gelo). Veja o que se passa com o nível da água no tubo.

2. Na seção 1.1 descrevemos o termoscópio de Galileu. Você poderá construir um dispositivo semelhante, aproveitando a aparelhagem utilizada na experiência 1.

Com cuidado, aqueça ligeiramente o frasco de vidro vazio, com o tubo adaptado através da rolha (tome cuidado para que quaisquer orifícios, entre a rolha e o frasco, ou entre a rolha e o tubo, estejam devidamente vedados). Emborque o tubo em um recipiente contendo água colorida, da maneira mostrada na **figura 1.3**. Controlando o aquecimento inicial do frasco, você poderá fazer com que, quando ele retornar à temperatura ambiente, a água suba até próximo à metade do tubo. Assim, estará pronto o seu termoscópio (igual ao de Galileu). Você poderá utilizá-lo para comparar as temperaturas de alguns objetos, ou das mãos de diversas pessoas.

ATENÇÃO!
Tome cuidado ao lidar com fogo ou objetos e substâncias quentes.

PROBLEMAS E TESTES

Não escreva no livro!

1. Um pino de aço é colocado, com pequena folga, em um orifício existente numa chapa de cobre. Tendo em vista a **tabela 1.2**, analise as afirmativas seguintes e indique no caderno qual delas está **errada**. d

a) Aquecendo-se apenas o pino, a folga diminuirá.

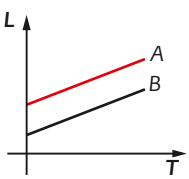
b) Aquecendo-se apenas a chapa, a folga aumentará.

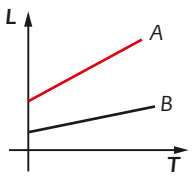
c) Ambos sendo igualmente aquecidos, a folga aumentará.

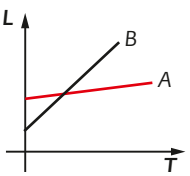
d) Ambos sendo igualmente aquecidos, a folga não vai se alterar.

e) Ambos sendo igualmente resfriados, a folga vai diminuir.

2. Duas barras, *A* e *B*, de um mesmo metal (isto é, com mesmo coeficiente de dilatação) são aquecidas a partir de 0 °C. Entre os gráficos deste problema, indique no caderno aquele que mostra corretamente como os comprimentos das duas barras variam enquanto a temperatura é aumentada. b

a)


b)


c)


Banco de imagens/Arquivo da editora

3. Peças metálicas costumam ser unidas por meio de rebites adaptados em temperaturas muito elevadas. Explique por que esse processo faz com que as peças se mantenham fortemente unidas. Ao se resfriarem, os rebites exercem fortes compressões sobre as peças.

4. Suponha que uma pessoa possua um termômetro comum (como o da **figura 1.1**) pouco sensível. Com ele, não é possível perceber variações muito pequenas de temperatura. Essa pessoa resolveu, então, construir um termômetro mais sensível. As alternativas seguintes descrevem providências que ela pretende tomar para alcançar seu objetivo. Indique no caderno qual delas **não** vai colaborar para o aumento da sensibilidade do termômetro. e

a) Usar um líquido de maior coeficiente de dilatação.

b) Aumentar o volume do bulbo do termômetro.

c) Diminuir o diâmetro do tubo capilar de vidro.

d) Usar um vidro de menor coeficiente de dilatação.

e) Aumentar o comprimento do tubo de vidro.

5. a) Duas crianças, *A* e *B*, estão com febre. A temperatura de *A* está 1 °C acima da temperatura normal, e a de *B* está 1 °F também acima do normal. Qual das duas crianças está mais febril? A criança *A*.

b) Em um termômetro, graduado na escala Celsius, a distância entre duas marcas correspondentes ao intervalo de 1 °C é igual a 1,0 mm. Se esse termômetro for graduado na escala Fahrenheit, qual será a distância entre duas marcas correspondentes ao intervalo de 1 °F? 0,55 mm

6. Fahrenheit, pois em Celsius ou Kelvin não é possível atingir uma temperatura tão baixa.

6. Em uma revista científica encontramos a seguinte afirmativa: "Em Plutão, a temperatura atinge 380 graus abaixo de zero". Embora não havendo declarado qual foi a escala termométrica utilizada, sabe-se que o autor do texto estava se referindo a uma das seguintes escalas: Kelvin, Celsius ou Fahrenheit. Qual foi a escala usada? Explique.

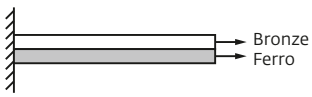
7. (UEA-AM) Um turista estrangeiro leu em um manual de turismo que a temperatura média do estado do Amazonas é de 87,8 graus, medido na escala Fahrenheit. Não tendo noção do que esse valor significa em termos climáticos, o turista consultou um livro de Física, encontrando a seguinte tabela de conversão entre escalas termométricas:

	Celsius	Fahrenheit
Fusão do gelo	0	32
Ebulição da água	100	212

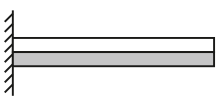
Com base nessa tabela, o turista fez a conversão da temperatura fornecida pelo manual para a escala Celsius e obteve o resultado: b

a) 25. b) 31. c) 21. d) 36. e) 16.

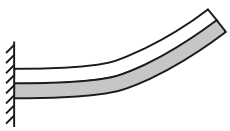
8. (Fuvest-SP) Uma lâmina bimetálica de bronze e ferro, na temperatura ambiente, é fixada por uma de suas extremidades, como visto na figura abaixo.

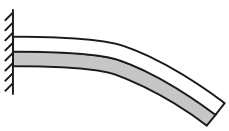


Nessa situação, a lâmina está plana e horizontal. A seguir, ela é aquecida por uma chama de gás. Após algum tempo de aquecimento, a forma assumida pela lâmina será mais adequadamente representada pela figura: d

a)


b)


c)


d)


e)


Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Note e adote:

O coeficiente de dilatação térmica linear do ferro é $1{,}2 \times 10^{-5}\,°C^{-1}$.

O coeficiente de dilatação térmica linear do bronze é $1{,}8 \times 10^{-5}\,°C^{-1}$.

Após o aquecimento, a temperatura da lâmina é uniforme.

9. (IFTO) Na Rússia, uma estrada de ferro com 900 km de comprimento varia sua temperatura de −6 °C no inverno até 24 °C no verão. O coeficiente de dilatação linear do material de que é feito o trilho é $10^{-6}\,°C^{-1}$. A variação de comprimento que os trilhos sofrem na sua extensão é igual a: e

a) 370 m. d) 45 m.

b) 37 m. e) 27 m.

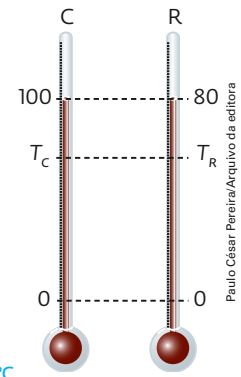
c) 270 m.

10. Um negociante de tecidos possui um metro de metal que foi graduado a 20 °C. Suponha que tal homem esteja usando esse metro em um dia de verão no qual a temperatura esteja próxima de 40 °C.

a) O comprimento do metro do negociante é maior ou menor do que 1 m? Maior.

b) Ao vender uma peça de tecido, medindo o seu comprimento com esse metro, o negociante estará tendo lucro ou prejuízo? (A dilatação do tecido é desprezível.) Prejuízo.

11. Na figura ao lado mostramos um termômetro R, calibrado na escala Réaumur, que foi muito usada na França no século XVIII.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

a) Determine uma expressão que nos permita converter uma temperatura qualquer T_R (na escala Réaumur) em sua correspondente T_C (na escala Celsius). $T_C/5 = T_R/4$

b) Qual é a temperatura Celsius correspondente a 20 °R? $T_C = 25\,°C$

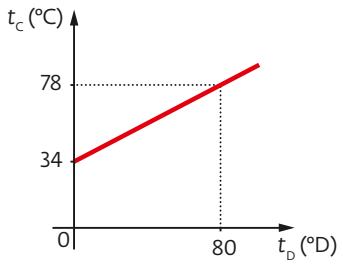
12. (Cefet-MG) Almir deve aquecer uma certa quantidade de água até 70 °C. Após o início do processo, ele quebrou, acidentalmente, o termômetro e teve que utilizar outro, graduado em Fahrenheit. Nessa escala, o aquecimento deve parar em: d

a) 102. b) 126. c) 142. d) 158.

Dados: 0 °C e 100 °C correspondem, respectivamente, a 32 °F e 212 °F.

13. (Fatec-SP) Um cientista criou uma escala termométrica D que adota como pontos fixos a temperatura de ebulição do álcool (78 °C) e a temperatura de ebulição do éter (34 °C).

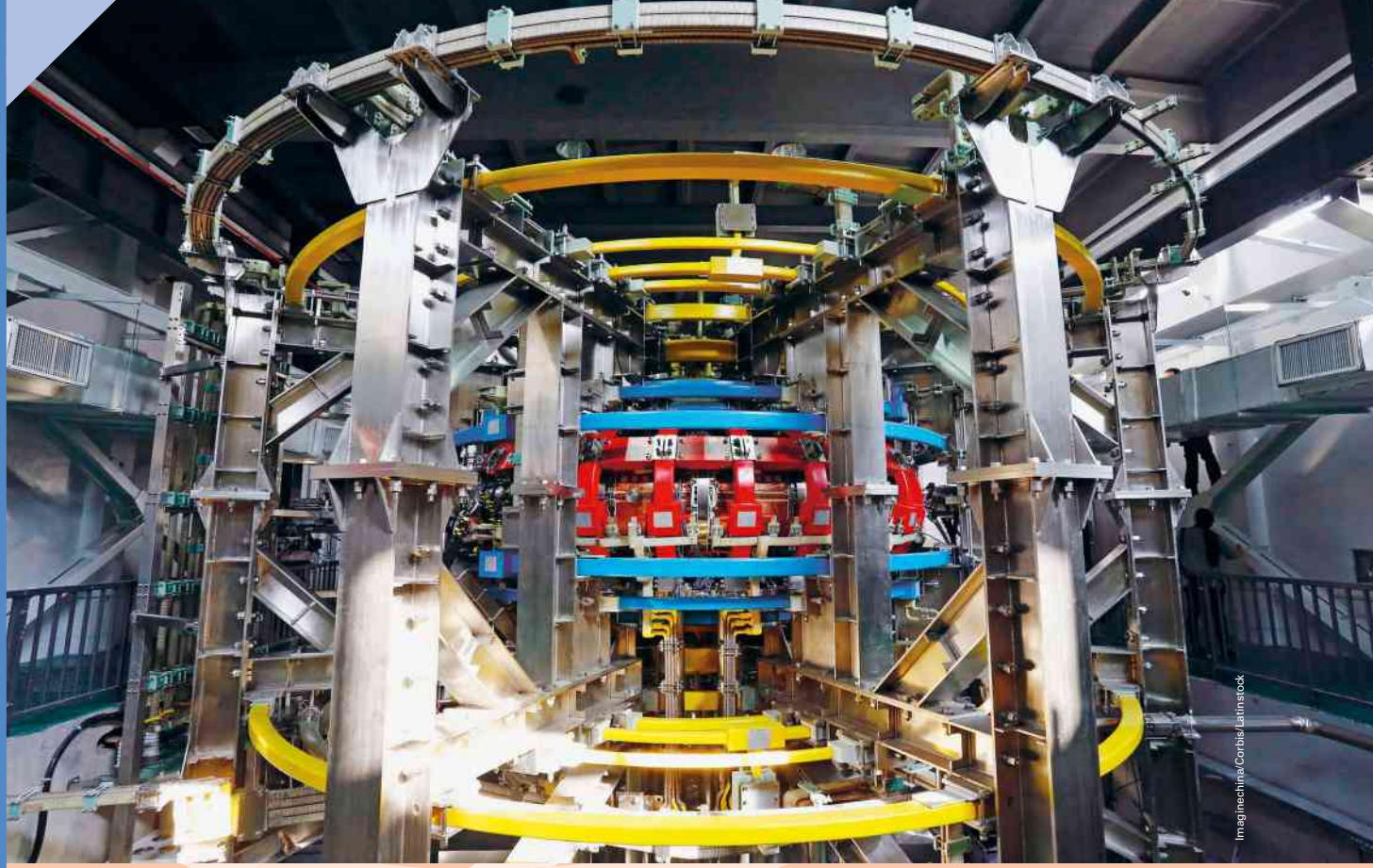
O gráfico a seguir relaciona esta escala D com a escala Celsius.



A temperatura de ebulição da água vale, em °D: d

a) 44. c) 112. e) 160.

b) 86. d) 120.



Imaginechina/Corbis/Latinstock

O Tokamak é um reator de fusão nuclear, na forma de toroide, que confina o plasma – um gás quente e ionizado – em seu interior por meio de um potente campo magnético. Nele ocorrem reações similares àquelas que acontecem no Sol, isto é, os átomos de hidrogênio, quando aquecidos sob pressão, unem-se formando átomos de hélio. A produção de energia elétrica a partir da fusão nuclear é vista como uma solução promissora para os problemas climáticos que o planeta pode enfrentar. Hefei, província de Anhui, China. Fotografia de 2015.

CAPÍTULO 2

Comportamento dos gases

P Sólido, líquido, gasoso, condensado de Bose-Einstein e plasma.

P Pressão, volume e temperatura.

P Veja resposta no Manual do Professor.

A escala Kelvin, ou escala absoluta, é amplamente utilizada no estudo do comportamento dos gases, para conhecer seu estado. A partir dessas investigações foi possível formular a hipótese de que, a baixas temperaturas, as moléculas que formam o gás não poderiam fornecer mais energia, ou seja, estariam completamente imóveis e, consequentemente, teriam pressão nula.

Observou-se, no entanto, que nas proximidades do zero absoluto a matéria se comporta de forma diferente, apresentando outras características, como um novo estado físico, conhecido como condensado de Bose-Einstein.

No extremo oposto, a altíssimas temperaturas, os gases que formam as estrelas também atingem outro estado, conhecido como plasma. A pressão exercida por esses gases é tão intensa que consegue impedir o colapso gravitacional das estrelas.

PARA INICIAR A CONVERSA

Quais são os estados físicos que a matéria pode assumir?

Quais conceitos físicos são apropriados para caracterizar o estado do gás?

Relacione a lei de Avogadro com a teoria cinética dos gases.

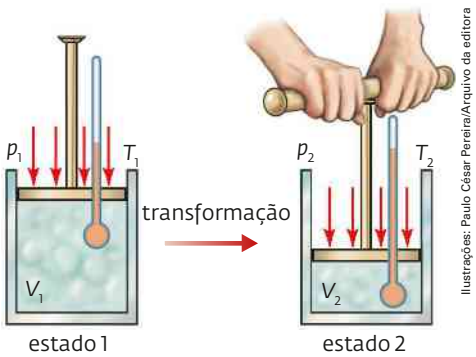
2.1 Transformação isotérmica

No capítulo anterior, ao estudarmos a dilatação dos sólidos e líquidos, não fizemos nenhuma referência à influência da pressão nesse fenômeno, porque somente grandes variações na pressão podem alterar sensivelmente as dimensões de sólidos e líquidos. De modo geral, em situações do cotidiano, não conseguimos perceber a influência da pressão sobre sólidos e líquidos sem o auxílio de instrumentos de medida.

Analisando o comportamento de um gás, entretanto, percebemos que as variações de pressão podem provocar alterações apreciáveis em seu volume e temperatura. Estudando experimentalmente o comportamento de uma dada massa, m, de gás, os cientistas verificaram que seria possível expressá-lo por meio de relações matemáticas simples entre sua pressão, p, seu volume, V, e sua temperatura, T. Uma vez que sejam conhecidos os valores dessas grandezas (massa, pressão, volume e temperatura), a situação em que está o gás fica definida ou, em outras palavras, fica definido o seu **estado**.

Provocando-se uma variação em uma dessas grandezas, nota-se que, em geral, as outras também se modificam. Esses novos valores caracterizam outro **estado** do gás. Dizemos que o gás sofreu uma **transformação** ao passar de um estado para outro **(figura 2.1)**.

Nas leis experimentais, que veremos a seguir, serão estudadas algumas transformações que um gás pode sofrer. Essas leis são válidas apenas, aproximadamente, para os gases que existem na natureza, denominados **gases reais** (O_2, H_2, N_2, etc.). Um gás que se comporte de acordo com tais leis é denominado **gás ideal**. Os gases reais, submetidos a pequenas pressões e altas temperaturas, comportam-se como ideais; portanto, nessas condições, o estudo que faremos neste capítulo poderá ser usado para descrever, com boa aproximação, o comportamento dos gases reais.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 2.1. Quando um gás passa de um estado para outro, dizemos que ele sofreu uma transformação.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Transformação isotérmica (T = constante)

Suponha que um gás tenha sido submetido a uma transformação na qual a sua temperatura foi mantida constante. Dizemos que ele sofreu uma **transformação isotérmica** (*isos* = 'igual' + *thérme* = 'temperatura'). Considerando que a massa do gás também se manteve constante (não houve saída nem entrada de gás no recipiente), constata-se que, na transformação isotérmica de um gás, apenas a pressão e o volume são as grandezas que variam.

A **figura 2.2** apresenta uma maneira de realizar uma transformação isotérmica. Na **figura 2.2.a**, certa massa de ar está confinada em determinado **volume** de um tubo fino, por meio de uma pequena coluna de Hg. A **pressão** que atua nesse volume de gás é a soma da pressão atmosférica, p_a, que permanece constante, com a pressão exercida pela coluna de Hg. Adicionando-se Hg lentamente no tubo, o aumento da altura da coluna acarreta um aumento na pressão que atua sobre o gás e, consequentemente, ocorre uma redução em seu volume **(figuras 2.2.b e 2.2.c)**. Se a operação for feita lentamente, a massa de ar permanecerá sempre em equilíbrio térmico com o meio ambiente, de modo que sua temperatura se mantenha praticamente constante, ou seja, será uma **transformação isotérmica**.

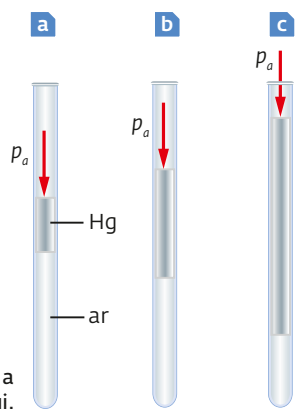


Figura 2.2. Em uma transformação isotérmica, quando a pressão sobre o gás aumenta, seu volume diminui.

SPL/Latinstock



ROBERT BOYLE (1627-1691)

Físico irlandês conhecido por suas experiências pioneiras sobre as propriedades dos gases. Adepto da teoria corpuscular da matéria, que deu origem à moderna teoria química dos elementos, criticava duramente as ideias de Aristóteles e dos alquimistas sobre a composição das substâncias.

Lei de Boyle

Se medirmos a pressão e o volume do gás (ar) em uma experiência como a apresentada na **figura 2.2**, poderemos encontrar uma relação simples entre essas grandezas. Suponhamos que, na **figura 2.2.a**, o volume do ar confinado fosse $V_1 = 60\ mm^3$, e a pressão total sobre ele, $p_1 = 80$ cmHg. Em seguida, imagine que, na **figura 2.2.b**, a pressão tenha sido aumentada para $p_2 = 160$ cmHg. No experimento, o volume do gás se reduziria para $V_2 = 30\ mm^3$. Aumentando-se novamente a pressão para $p_3 = 240$ cmHg **(figura 2.2.c)**, o volume passaria a ser $V_3 = 20\ mm^3$. Se aumentássemos a pressão para 320 cmHg, o volume seria $V_4 = 15\ mm^3$, e assim sucessivamente. Tabelando as medidas, obtemos:

p (cmHg)	80	160	240	320
V (mm^3)	60	30	20	15

Compare a primeira coluna com as demais e observe que:

- duplicando $p \rightarrow V$ é dividido por 2;
- triplicando $p \rightarrow V$ é dividido por 3;
- quadruplicando $p \rightarrow V$ é dividido por 4, e assim sucessivamente.

Esse resultado comprova que o volume V de um gás é inversamente proporcional à pressão p a que ele está submetido e, consequentemente, o produto $p \cdot V$ é constante. O físico irlandês Robert Boyle, em 1660, foi o primeiro a chegar a essas conclusões, depois de realizar uma série de experiências semelhantes à que descrevemos. Por tal motivo, o resultado a que chegamos é conhecido como **lei de Boyle**:

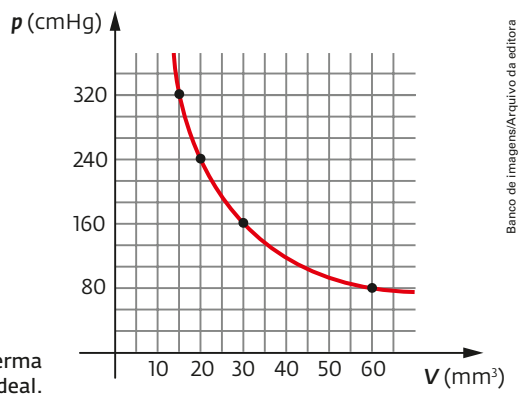
Se a temperatura T de uma dada massa gasosa for mantida constante, o volume V desse gás será inversamente proporcional à pressão p exercida sobre ele, ou seja:

$$pV = \text{constante (se } T = \text{constante)}$$

O gráfico $p \times V$

Na **figura 2.3**, apresentamos o gráfico $p \cdot V$, construído com os valores de p e V da tabela relativa à transformação isotérmica da experiência que descrevemos. Veja como foram lançados, no gráfico, os dados da tabela e observe que a curva obtida mostra a variação inversa do volume com a pressão (enquanto V aumenta, p diminui).

Como nessa transformação p e V são inversamente proporcionais, podemos concluir que a curva da **figura 2.3** é uma hipérbole. Por descrever uma transformação isotérmica, essa curva também é denominada **isoterma** do gás.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 2.3. Isoterma de um gás ideal.

Influência da pressão na densidade

A densidade de um objeto é dada por $\rho = \frac{m}{V}$. Para os objetos sólidos e líquidos, uma variação na pressão exercida sobre eles praticamente não altera o volume V, de modo que a densidade desses objetos é muito pouco influenciada pela pressão.

O mesmo não acontece com os gases. Em uma transformação isotérmica, por exemplo, quando aumentamos a pressão sobre uma massa gasosa, seu volume reduz-se apreciavelmente. Em consequência, sua densidade também aumenta sensivelmente, uma vez que o valor de m não se altera. De fato, para um determinado valor de m, a lei de Boyle nos permite deduzir o seguinte:

- duplicando $p \rightarrow V$ fica dividido por $2 \rightarrow \rho$ duplica;
- triplicando $p \rightarrow V$ fica dividido por $3 \rightarrow \rho$ triplica; e assim sucessivamente.

Com base nesse esquema, podemos concluir que $\rho \propto p$,isto é, se mantivermos constante a temperatura de uma dada massa gasosa, sua densidade será diretamente proporcional à pressão do gás.

Exemplo

Um recipiente, contendo O_2, é provido de um pistão (figura 2.4) que permite variar a pressão e o volume do gás. Verifica-se que, quando está submetido a uma pressão $p_1 = 2{,}0$ atm, o O_2 ocupa um volume $V_1 = 20$ L. Comprime-se lentamente o gás, de modo que sua temperatura não varie, até que a pressão atinja o valor $p_2 = 10$ atm.

a) Qual o volume V_2 do oxigênio nesse novo estado?

Supondo que o O_2 esteja se comportando como um gás ideal, podemos aplicar a lei de Boyle, por se tratar de uma transformação isotérmica. Portanto, como pV = constante:

$$p_2V_2 = p_1V_1 \quad \text{ou} \quad 10 \cdot V_2 = 2{,}0 \cdot 20 \quad \therefore \quad V_2 = 4{,}0 \text{ L}$$

b) Supondo que a densidade do O_2, no estado inicial, seja de 1,2 g/L, qual será sua densidade no estado final?

Como vimos, em uma transformação isotérmica ρ é diretamente proporcional a p. A pressão passou de $p_1 = 2{,}0$ atm para $p_2 = 10$ atm, isto é, foi multiplicada por 5. Consequentemente, a densidade também ficará 5 vezes maior, e o novo valor de ρ será:

$$\rho = 5 \cdot 1{,}2 \quad \text{ou} \quad \rho = 6{,}0 \text{ g/L}$$

4.

Estado	p (atm)	V (L)	pV (atm · L)
I	0,50	12	6,0
II	1,0	6,0	6,0
III	1,5	4,0	6,0
IV	2,0	3,0	6,0



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 2.4. Representação (sem escala e em cores fantasia) da transformação.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

1. a) Quais são as grandezas que determinam o estado de um gás? Pressão p, volume V, massa m e temperatura T.
b) O que significa dizer que um gás sofreu uma transformação? Pelo menos duas das grandezas, p, V, m e T, variaram.

2. a) O que são gases reais?
b) O que se entende por um gás ideal?
c) Em que condições os gases reais se comportam como gases ideais?

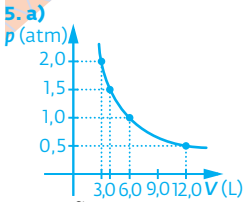
2. a) Aqueles que existem na natureza.
2. b) Gás cujo comportamento obedece rigorosamente às leis estudadas neste capítulo.
2. c) A pressões baixas e temperaturas altas.

3. Considere a transformação isotérmica mostrada na figura 2.2. Das grandezas p, V, m e T:
a) quais permanecem constantes? m e T.
b) quais estão variando? p e V.

4. Certa massa de um gás ideal sofre uma transformação isotérmica. Lembrando-se da lei de Boyle, copie a tabela a seguir e complete-a.

Estado	p (atm)	V (L)	pV (atm · L)
I	0,50	12	//////////////
II	1,0	/////	//////////////
III	1,5	/////	//////////////
IV	2,0	/////	//////////////

5. a)



5. a) Com os dados da tabela do exercício anterior, construa, no seu caderno, o gráfico $p \times V$.
b) Como se denomina a hipérbole assim obtida? Isoterma de um gás ideal.

6. Suponha que o gás do exercício 4, no estado I, tenha uma densidade de 2,0 g/L. Calcule os valores de sua densidade nos estados II, III e IV. 4,0 g/L; 6,0 g/L; 8,0 g/L.

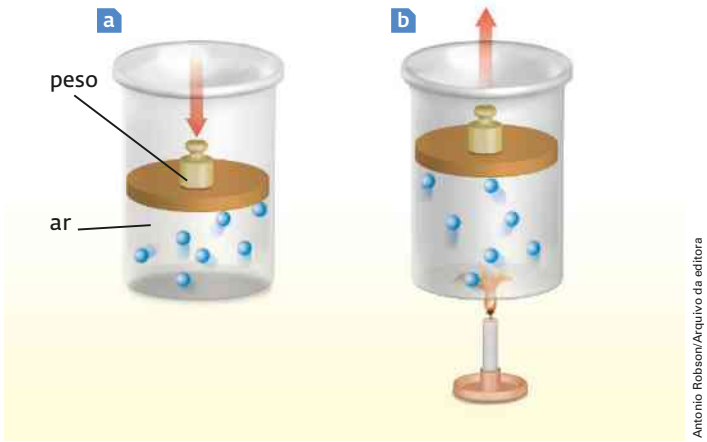
Não escreva no livro!

2.2 Transformação isobárica

O que é uma transformação isobárica?

Consideremos certa massa de gás, em um tubo de vidro, suportando uma pressão igual à pressão atmosférica mais a pressão de um peso, como na **figura 2.5.a**. Aquecendo-se o gás e deixando-o expandir-se livremente, como na **figura 2.5.b**, a pressão sobre ele não se altera, pois continua sendo exercida pela atmosfera e pelo peso.

Uma transformação como essa, em que o volume do gás varia com a temperatura, enquanto a pressão é mantida constante, é denominada **transformação isobárica** (*isos* = 'igual' + *baros* = 'pressão').



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 2.5. Em uma transformação isobárica, quando a temperatura sobre o gás aumenta, o volume aumenta. Representação sem escala e em cores fantasia.



SPL/Latinstock

JOSEPH-LOUIS GAY-LUSSAC (1778-1850)

Químico e físico francês que, além de suas investigações sobre o comportamento dos gases, desenvolveu várias técnicas de análises químicas e foi um dos fundadores da meteorologia. Usando balões meteorológicos, estudou os efeitos da altitude no magnetismo terrestre e na composição do ar. Deve-se, ainda, a ele a obtenção dos elementos potássio e boro e a identificação do iodo como elemento químico.

Todos os gases se dilatam igualmente

Consideremos dois blocos sólidos, de mesmo volume, um de cobre e o outro de ferro. Aquecendo os dois blocos até eles apresentarem a mesma variação de temperatura, eles sofrerão acréscimos diferentes em seus volumes, portanto apresentarão diferentes volumes finais. Isso acontece porque os coeficientes de dilatação do cobre e do ferro no estado sólido não são iguais, ao contrário do que ocorre, em geral, com os coeficientes de dilatação das substâncias no estado gasoso.

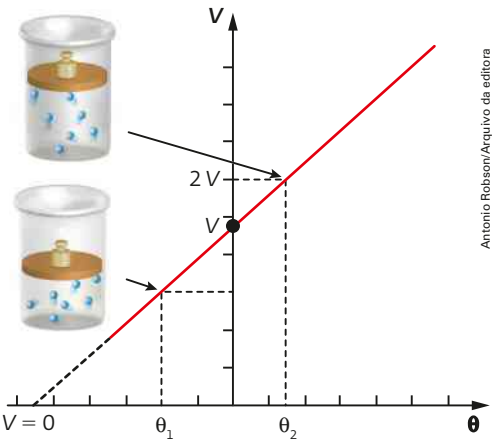
Imagine que realizássemos uma experiência semelhante com os gases. Consideremos volumes iguais de dois gases diferentes (O_2 e H_2, por exemplo) a uma mesma temperatura inicial. Submetendo os dois volumes de gás à mesma variação de temperatura, e mantendo constantes as suas pressões, observaremos que **eles apresentarão o mesmo volume final**. Isso só ocorre porque eles têm o mesmo coeficiente de dilatação. O francês Gay-Lussac, no início do século XIX, realizando uma série de experiências, verificou que esse resultado é válido para todos os gases. Logo,

Se tomarmos um dado volume de gás a uma certa temperatura inicial e o aquecermos sob pressão constante até dada temperatura final, a dilatação observada será a mesma, qualquer que seja o gás usado na experiência, isto é, o valor do coeficiente de dilatação volumétrica é o mesmo para todos os gases.

O gráfico $V \times T$

Em suas experiências, Gay-Lussac realizou medidas do volume e da temperatura de determinado gás, enquanto ele era aquecido e se expandia à pressão constante. Com os resultados dessas medidas, o cientista construiu um gráfico do volume V em função da temperatura θ, expressa em graus Celsius. Obteve um gráfico retilíneo, semelhante ao da **figura 2.6**, concluindo que **o volume de dada massa gasosa, sob pressão constante, varia linearmente com sua temperatura Celsius.**

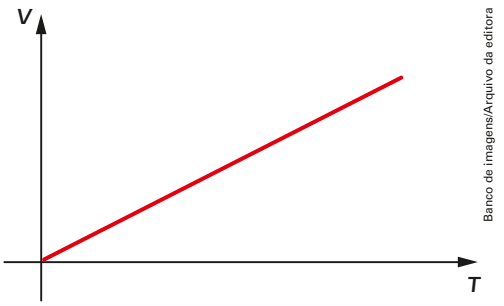
No gráfico da **figura 2.6**, vemos que o gás ocupa um volume V a 0 °C. O volume do gás se reduziria gradualmente à medida que a temperatura baixasse. Pensando nessa redução, Gay-Lussac procurou determinar a que temperatura o volume do gás se anularia (se isso fosse possível), prolongando a reta do gráfico, como mostra a **figura 2.6**. Dessa maneira, verificou que o ponto em que V supostamente seria zero corresponde à temperatura $\theta = -273$ °C. Essa temperatura é denominada **zero absoluto** e considerada o **zero** da escala Kelvin.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 2.6. Em uma transformação isobárica, o volume de um gás varia linearmente com sua temperatura Celsius. As ilustrações estão fora de escala e em cores fantasia.

Considerando esses fatos, se construirmos um gráfico do volume, V, do gás, à pressão constante, em função de sua temperatura absoluta, T, obteremos uma reta **passando pela origem (figura 2.7)**. Isso nos mostra que o volume do gás é diretamente proporcional à sua temperatura Kelvin, portanto o quociente V/T é constante.



Banco de Imagens/Arquivo da editora

Figura 2.7. Sob pressão constante, o volume de um gás é diretamente proporcional à sua temperatura absoluta.

Em resumo, para uma transformação isobárica, podemos afirmar que:

O volume V de uma dada massa gasosa, mantida à pressão constante, é diretamente proporcional à sua temperatura absoluta T, ou seja:

$$\frac{V}{T} = \text{constante (se } p = \text{constante)}$$

Influência da temperatura na densidade

Já que o volume de certo gás, à pressão constante, varia com a temperatura, a densidade desse gás ($\rho = m/V$) terá valores diferentes para diferentes valores da temperatura. Baseando-se nas conclusões a que chegamos a respeito da transformação isobárica, podemos deduzir que, para uma certa massa m do gás, teremos:

- duplicando $T \rightarrow V$ duplica $\rightarrow \rho$ fica dividido por 2;
- quadruplicando $T \rightarrow V$ quadruplica $\rightarrow \rho$ fica dividido por 4, e assim sucessivamente.

Com base nessa regularidade, podemos concluir que:

$$\rho \propto \frac{1}{T}$$

isto é, sendo mantida constante a pressão de dada massa gasosa, sua densidade varia em proporção inversa à sua temperatura absoluta.

FÍSICA NO CONTEXTO

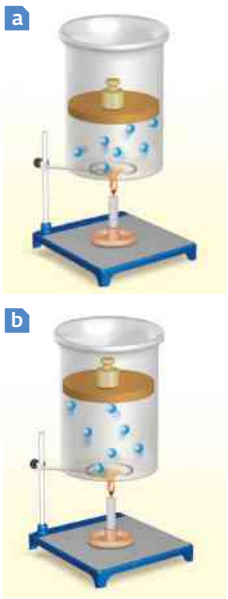
POR QUE O BALÃO SOBE NA ATMOSFERA?



Federico Neri/Corbis/Latinstock

Figura 2.8. Passeio de balão pelo parque Ngorongoro, na Tanzânia, em 2014.

A dilatação sofrida por uma massa gasosa aquecida costuma ser usada para fazer balões subirem na atmosfera. Balões de ar quente como o da **figura 2.8** são utilizados na prática do balonismo. O ar no interior do balão é aquecido pela chama de um bico de gás. Ao se dilatar, parte dele escapa e o ar que permanece dentro do balão terá, consequentemente, sua densidade reduzida. Dessa forma, o conjunto formado pelo material de que é feito o balão e o ar interno aquecido fica menos denso do que o ar externo. Nessas condições, quando o objeto é menos denso do que o fluido que o cerca, a força de empuxo para cima tem valor maior do que a força-peso para baixo, fazendo o objeto, neste caso o balão, subir. Regulando a temperatura do ar interno, pode-se fazer o balão subir ou descer.



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 2.9. Ao ser aquecido, o ar no interior do recipiente se expande, enquanto a pressão sobre ele fica constante. Representação sem escala e em cores fantasia.

Exemplo

Um recipiente contém um volume $V_1 = 10$ L de CO_2 gasoso, à temperatura $\theta_1 = 27$ °C (figura 2.9.a). Aquecendo o conjunto e deixando que o êmbolo do recipiente se desloque livremente, a pressão do gás se manterá constante enquanto ele se expande. Sendo $\theta_2 = 177$ °C a temperatura final do CO_2 (figura 2.9.b):

a) Qual será o volume final, V_2, do gás?

Como se trata de uma transformação isobárica, $\frac{V}{T}$ = constante, isto é:

$$\frac{V_2}{T_2} = \frac{V_1}{T_1}$$

Observe que as expressões acima se referem a temperaturas absolutas do gás. Portanto:

$$T_1 = \theta_1 + 273 = 27 + 273 \quad \therefore \quad T_1 = 300\ \text{K}$$

$$T_2 = \theta_2 + 273 = 177 + 273 \quad \therefore \quad T_2 = 450\ \text{K}$$

Como $V_1 = 10$ L:

$$\frac{V_2}{450} = \frac{10}{300} \quad \therefore \quad V_2 = 15\ \text{L}$$

b) Supondo que a densidade inicial do CO_2 seja 1,8 g/L, qual será sua densidade no estado final?

Vimos que, em uma transformação isobárica, a densidade de um gás é inversamente proporcional à sua temperatura absoluta. Como ela passou de $T_1 = 300$ K para $T_2 = 450$ K, isto é, foi multiplicada por 1,5, concluímos que a densidade será dividida por esse fator. Portanto, a densidade do gás, no estado final, será:

$$\rho = \frac{1{,}8}{1{,}5} \quad \text{ou} \quad \rho = 1{,}2\ \text{g/L}$$

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

7. Considere a transformação isobárica mostrada na figura 2.5. Das grandezas p, V, m e T:
a) quais permanecem constantes? p e m
b) quais variam? V e T

8. Certa massa de um gás ideal sofre uma transformação isobárica. Lembrando-se dos resultados das experiências de Gay-Lussac, copie a tabela abaixo no caderno e complete-a.

Estado	θ (°C)	T (K)	V (cm³)
I	−73	200	150
II	127	400	300
III	327	600	450
IV	527	800	600

Não escreva no livro!

Estado	θ (°C)	T (K)	V (cm³)
I	−73	////////////////////////////////	150
II	127	////////////////////////////////	////////////////////////////////
III	327	////////////////////////////////	////////////////////////////////
IV	527	////////////////////////////////	////////////////////////////////

2.3 Transformação isovolumétrica

O que é uma transformação isovolumétrica? (V = constante)

Consideremos a situação mostrada na **figura 2.10**, na qual o pistão foi fixado às paredes do recipiente, impedindo que o volume do gás aumente ou diminua. Aquecendo-se o gás, sua temperatura T e sua pressão p aumentam e ele, então, sofre uma transformação denominada **isovolumétrica** (ou seja, V = constante), também conhecida como transformação isocórica.

Essa transformação foi estudada experimentalmente pelos cientistas que estabeleceram a lei de transformação isobárica, e pode ser destacada da seguinte forma:



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 2.10. Em uma expansão isovolumétrica, o volume não se altera. Representação sem escala e em cores fantasia.

Se considerarmos um gás confinado em um recipiente de volume constante, sua pressão, p, vai variar em proporção direta a sua temperatura, T:

$$\frac{p}{T} = \text{constante (se } V = \text{constante)}$$

Exemplo

Suponha que o gás mostrado na figura 2.10 esteja em estado inicial (1), em que sua temperatura e pressão sejam $\theta_1 = 27\,°C$ e $p_1 = 1{,}5$ atm. O gás é aquecido até atingir um estado final (2), em que sua temperatura seja $\theta_2 = 127\,°C$ e sua pressão, p_2. Para determinar o valor de p_2, um estudante desenvolveu equivocadamente o seguinte cálculo:

$$\frac{p_2}{127} = \frac{1{,}5}{27}$$

$$p_2 = 7 \text{ atm}$$

a) Qual foi o engano cometido pelo estudante?

Ao aplicar a equação $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$, o estudante usou valores da temperatura expressos na escala Celsius. Ele deveria expressar esses valores na escala Kelvin. Assim, o valor de p_2 por ele encontrado não está correto.

b) Qual o valor correto de p_2?

Realizando o cálculo com a temperatura na escala Kelvin, temos:

$$\frac{p_2}{127 + 273} = \frac{1{,}5}{27 + 273} \Rightarrow p_2 \frac{400 \cdot 1{,}5}{300} \Rightarrow p_2 = 2{,}0 \text{ atm}$$

A lei de Avogadro

Até o início do século XIX, os cientistas já haviam adquirido uma razoável quantidade de informações sobre as reações químicas observadas entre os gases. O cientista italiano Avogadro, baseando-se nessas informações e em resultados de experiências realizadas por ele próprio, formulou, em 1811, uma hipótese muito importante, relacionando o **número de moléculas** existentes em duas amostras gasosas.

Segundo Avogadro, se considerarmos dois recipientes, de mesmo volume, contendo **gases diferentes**, ambos à mesma temperatura e pressão, **o número de moléculas contidas em cada recipiente deveria ser o mesmo** (figura 2.11).

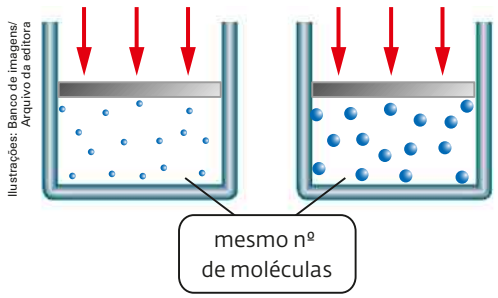


Figura 2.11. Segundo Avogadro, essas duas amostras gasosas, ocupando volumes iguais, sob a mesma pressão e temperatura, têm o mesmo número de moléculas. Representação sem escala e em cores fantasia.


SPL/Latinstock

AMEDEO AVOGADRO (1776-1856)
Físico italiano que, baseando-se em sua hipótese sobre o número de moléculas nas amostras gasosas, conseguiu explicar por que os gases se combinam em volumes que conservam uma proporção simples entre si. Ainda com base em sua hipótese, concluiu que os gases hidrogênio, nitrogênio e oxigênio apresentam-se, na natureza, sob a forma diatômica (H_2, N_2 e O_2). Apesar de terem sido propostas em 1811, essas ideias só começaram a ser aceitas a partir de 1858, após os trabalhos do cientista italiano Cannizzaro, que estabeleceu um sistema químico baseado na hipótese de Avogadro.

Posteriormente, um grande número de experiências confirmou essa afirmativa, que passou a ser conhecida como **lei de Avogadro**:

> **Volumes iguais, de gases diferentes, à mesma temperatura e pressão, contêm o mesmo número de moléculas.**

O número de Avogadro

Uma vez conhecida a lei de Avogadro, poder-se-ia indagar qual é o número de moléculas que há em uma dada massa do gás. Suponha, por exemplo, 1 mol de vários gases diferentes (2 g de H_2, 32 g de O_2, 28 g de N_2, etc.). O número de moléculas, em cada uma dessas amostras, é o mesmo. Esse número é denominado **número de Avogadro** e é representado por N_0.

O cientista Perrin, no início do século XX, realizou uma série de experiências, procurando determinar o valor de N0, concluindo que ele estaria compreendido entre $6{,}5 \cdot 10^{23}$ e $7{,}2 \cdot 10^{23}$ moléculas em cada mol. Por esse trabalho, Perrin recebeu o prêmio Nobel de Física, em 1926. Posteriormente, medidas mais precisas mostraram que o valor de N_0 é mais próximo de $6{,}02 \cdot 10^{23}$ moléculas/mol.

Densidade e massa molecular

Consideremos duas amostras gasosas, *A* e *B*, ocupando o mesmo volume, à mesma pressão e temperatura. Pela lei de Avogadro, sabemos que essas amostras contêm o mesmo número de moléculas. Supondo que a massa molecular de *A*, M_A, seja o dobro da massa molecular de *B*, M_B, a massa total de *A*, m_A, também será o dobro da massa total, m_B, de *B*. Mas, como as amostras têm volumes iguais, concluímos que a densidade de *A*, ρ_A, será o dobro da densidade de *B*, ρ_B. Do mesmo modo, se tivéssemos $M_A = 3M_B$, teríamos também $\rho_A = 3\rho_B$. Portanto, podemos concluir que $\rho \propto M$, isto é, a densidade de um gás é diretamente proporcional à sua massa molecular.

APLICAÇÕES DA FÍSICA

O planeta como uma grande estufa

1. Interferência negativa nos ecossistemas; elevação do nível das marés, o que afetaria a vida da população em regiões costeiras; alterações no ciclo de carbono do planeta.
2. Veja resposta no Manual do professor.

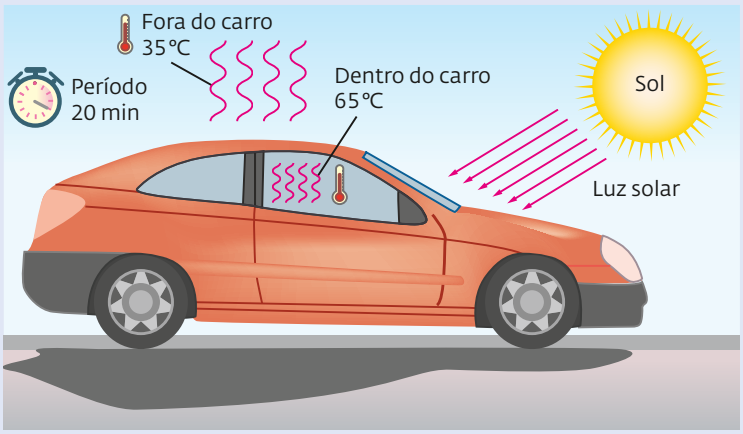
As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Em regiões de clima frio, é possível cultivar plantas típicas de clima quente utilizando uma estufa.

A luz solar é composta de diversas radiações, entre elas: ultravioleta (que provoca, entre outros efeitos, o bronzeamento da nossa pele), visível (luz) e infravermelha (calor). Ao atingir o vidro da estufa, a luz solar facilmente o atravessa, sendo absorvida pelas plantas e por outros objetos no seu interior.

As plantas e os objetos, por sua vez, reemitem radiação infravermelha, percebida na forma de calor, que não consegue atravessar o vidro. Assim, ela fica presa no interior da estufa, o que mantém a temperatura interna mais alta que a do ambiente externo.

O mesmo efeito acontece quando deixamos um veículo com os vidros fechados estacionado sob o sol **(figura 2.12)**.



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 2.12. É possível notar o efeito estufa em um carro estacionado. Como as janelas de vidro impedem que o calor escape, a temperatura no interior do veículo atinge valores muito superiores à do ambiente exterior.

Na Terra a radiação solar **(figura 2.13)** atravessa a atmosfera terrestre e é absorvida pelos elementos de sua superfície (solo, água, plantas, animais, pessoas, casas, edifícios, veículos, etc.), que, por sua vez, reemitem radiação infravermelha para a atmosfera. Os gases presentes na atmosfera terrestre, principalmente o vapor-d'água e o dióxido de carbono (CO_2), absorvem parte dessa radiação, que não consegue escapar do planeta; consequentemente, ela provoca aquecimento, evitando que a Terra seja fria demais para que nela exista vida. O efeito estufa é, então, um fenômeno natural que mantém a vida na Terra.

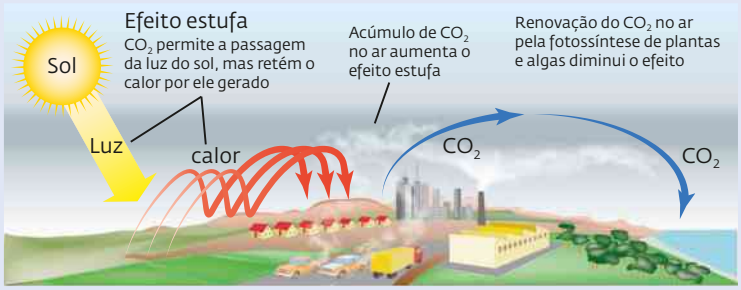


Figura 2.13. Os gases que compõem a atmosfera terrestre permitem que parte da radiação solar atinja a superfície da Terra, aquecendo o planeta (efeito estufa). Caso esse efeito não existisse, a temperatura estimada para o planeta estaria entre −18 °C e −50 °C, o que inviabilizaria a vida nele.

Há tempos as pessoas utilizam os recursos da natureza para sua sobrevivência. Iniciada a Revolução Industrial, o ser humano passou a extrair do subsolo combustíveis fósseis, como o petróleo, o carvão e o gás natural, para aplicá-los em processos industriais.

A queima dos combustíveis fósseis produz CO_2, aumentando a temperatura do planeta, pois este gás absorve a radiação infravermelha que deveria deixar naturalmente a Terra.

Cientistas preveem que, caso as emissões de gases do efeito estufa continuem crescendo, a temperatura da Terra poderá aumentar até 4,8 °C neste século, o que trará prejuízos ambientais extremos. Em longo prazo, acredita-se que as mudanças climáticas abruptas poderiam até extinguir a vida no planeta, uma vez que, durante a última era glacial, foi o aquecimento, e não o frio, que causou a extinção maciça de mamutes e preguiças-gigantes.

QUESTÕES

1. Apesar de alguns cientistas mostrarem-se preocupados com a mudança climática e o aquecimento global, muitos setores da sociedade ainda não demonstraram encarar o assunto com a seriedade que merece. Cite as principais consequências que podemos esperar em função do aumento da temperatura no planeta e em particular em nosso país.
2. Alguns cientistas discordam da afirmação de que o aquecimento global é causado pelo ser humano e outros ainda alegam que o aumento de temperatura pelo qual o planeta está passando faz parte de um ciclo natural que ocorre desde a formação da Terra. Pesquise sobre o tema e responda por que, ao estudar um mesmo problema, cientistas podem chegar a respostas tão distintas. E você? Partilhe com seus colegas a conclusão a que chegou após pesquisar.

2.4 Equação de estado de um gás ideal

Equação de estado de um gás ideal

Nas seções anteriores mostramos que, para um gás ideal, temos consequências da:

- lei de Boyle (T constante) $\rightarrow \rho \propto p$
- lei de Gay-Lussac (p constante) $\rightarrow \rho \propto \frac{1}{T}$
- lei de Avogadro (p, V e T constantes) $\rightarrow \rho \propto M$

Uma propriedade das proporções nos permite agrupar os resultados anteriores em uma única relação:

$$\rho \propto \frac{pM}{T}$$

Sendo m a massa da amostra gasosa, $\rho = m/V$. Logo:

$$\frac{m}{V} \propto \frac{pM}{T} \quad \text{ou} \quad pV \propto \left(\frac{m}{M}\right)T$$

O quociente m/M, entre a massa do gás e sua massa molecular, fornece-nos o número de mols, n, da amostra. Introduzindo, na relação anterior, a constante de proporcionalidade, que vamos designar por R, obteremos a seguinte igualdade:

$$pV = R(n)T \quad \text{ou} \quad pV = nRT$$

Concluímos que:

A pressão p, o volume V e a temperatura absoluta T de uma dada massa gasosa, contendo n mols do gás, estão relacionados pela equação

$$pV = nRT,$$

denominada equação de estado de um gás ideal.

Comentários

1) A equação $pV = nRT$ define um estado do gás. Isso significa que, para uma dada massa gasosa (um valor determinado, n, de mols), se medirmos sua pressão, seu volume e sua temperatura, em certa situação, o produto pV será igual ao produto nRT, obedecendo, assim, a equação de estado.

2) Se colocarmos n mols de um gás em um recipiente, é possível escolher arbitrariamente para ele os valores apenas de duas das três variáveis de estado (p, V e T). Por exemplo, se escolhermos arbitrariamente o volume que o gás vai ocupar e a sua temperatura, a pressão que ele exercerá não poderá ser escolhida por nós, como foi feito para o volume e a temperatura. A pressão, nessas condições, atingirá um valor que satisfaça à equação $pV = nRT$. Da mesma forma, se escolhêssemos arbitrariamente a pressão e a temperatura, o gás ocuparia um volume não arbitrário, determinado pela equação $pV = nRT$.

3) A equação $pV = nRT$, também conhecida como Equação de Clapeyron, pode ser escrita assim:

$$\frac{pV}{T} = nR$$

Portanto, para uma dada massa de gás (n = constante), como R também é constante, concluímos que (pV/T) = constante. Assim, se a massa gasosa passar de um estado (1), caracterizado por p_1, V_1 e T_1, para outro estado (2), definido por p_2, V_2 e T_2, podemos relacionar os dois estados pela equação:

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}$$

4) Não podemos nos esquecer de que a equação $pV = nRT$ se refere a um gás ideal. Entretanto, de acordo com o que foi dito no início deste capítulo, essa equação pode ser aplicada, com muito boa aproximação, a um gás qualquer, desde que sua temperatura não seja muito baixa e que sua pressão não seja muito elevada.

A constante universal dos gases

Verifica-se experimentalmente que a constante R, da equação $pV = nRT$, tem o mesmo valor para **todos** os gases, por isso ela é denominada **constante universal dos gases**. Da equação de estado, obtemos:

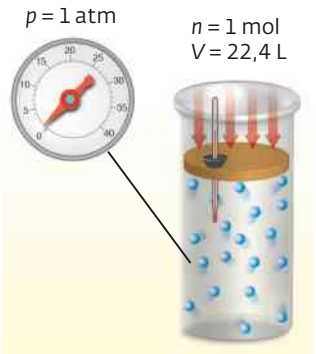
$$R = \frac{pV}{nT}$$

de modo que o valor de R poderá ser calculado se medirmos, em um laboratório, os valores de p, V, n e T para um dado estado do gás.

Por exemplo, verifica-se experimentalmente que, considerando-se 1 mol de qualquer gás ($n = 1$ mol), à temperatura de 0 °C (ou seja, $T = 273$ K) e à pressão $p = 1$ atm, ele ocupará um volume $V = 22{,}4$ L **(figura 2.14)**.

Substituindo esses valores na expressão $R = \frac{pV}{nT}$, obtemos:

$$R = 0{,}082\ \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 2.14. A constante universal dos gases, **R**, pode ser calculada por meio dos dados experimentais mostrados na figura. Representação sem escala e em cores fantasia.

O valor de R dependerá das unidades usadas nas medidas de p, V e T. Frequentemente, o valor de p é expresso[1] em N/m^2 e o valor de V, em m^3. Nessas condições, o valor de R será:

$$R = 8{,}31\ \frac{(N/m^2) \cdot m^3}{mol \cdot K} \quad \text{ou} \quad R = 8{,}31\ \frac{J}{mol \cdot K}$$

Exemplo

Uma pessoa afirma que colocou 3,5 mols de um gás (comportando-se como gás ideal) em um recipiente de volume igual a 8,0 L e que, após atingido o estado de equilíbrio, a temperatura do gás era de 27 °C e sua pressão de 5,0 atm.

a) Poderiam estar corretas as medidas feitas por essa pessoa?

Um gás ideal, em certo estado, obedece à equação $pV = nRT$. Com os dados fornecidos pela pessoa, temos:

$$pV = 5{,}0 \cdot 8{,}0 \quad \therefore \quad pV = 40\ \text{atm} \cdot \text{L}$$

$$nRT = 3{,}5 \cdot 0{,}082 \cdot 300 \quad \therefore \quad nRT = 86\ \text{atm} \cdot \text{L}$$

Como pV não é igual a nRT, concluímos que as medidas não podem estar corretas, isto é, não é possível, para qualquer gás (ideal), apresentar-se em um estado com aqueles valores de p, V, n e T.

b) Se, após uma verificação, constatou-se que os valores de *p*, *V* e *T* estavam corretos, qual o número real de mols do gás colocado no recipiente?

Da equação de estado, obtemos:

$$n = \frac{pV}{RT} = \frac{5{,}0 \cdot 8{,}0}{0{,}082 \cdot 300} \quad \therefore \quad n = 1{,}6\ \text{mol}$$

Logo, no recipiente havia 1,6 mol do gás, e não 3,5 mols, como a pessoa havia afirmado. Observe que usamos o valor $R = 0{,}082$ atm · L/mol · K, uma vez que o valor de p foi fornecido em atmosferas, e o de V, em litros.

[1] A unidade N/m^2 é conhecida como pascal (Pa), em homenagem a Blaise Pascal (1623-1662), cientista que deu importantes contribuições ao estudo da mecânica dos fluidos, da geometria projetiva e da teoria das probabilidades. Inventou uma das primeiras máquinas calculadoras mecânicas. A pressão de 1 atm equivale a 101 325 Pa, ou aproximadamente 10^5 Pa.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

9. Verifica-se que, para um gás contido em um recipiente, o produto nRT vale 26 atm · L.
a) Qual é o valor do produto pV para o gás nesse estado? 26 atm · L
b) Adaptando-se um manômetro ao recipiente, ele indica, para o gás, uma pressão de 2,0 atm. Qual é o volume do recipiente? 13 L

10. O reservatório de um frigorífico, cujo volume é 0,15 m^3, contém 480 g de O_2 à pressão de $2{,}0 \cdot 10^5$ N/m^2.
a) Quantos mols de O_2 existem no reservatório? 15 mols.
b) Na equação $pV = nRT$, quando p está expresso em N/m^2 e V em m^3, qual é o valor que deve ser usado para R? $R = 8{,}31$ J/mol · K
c) A que temperatura absoluta está o O_2 no reservatório? 241 K
d) Expresse a temperatura do O_2 em °C. −32 °C

11. Uma pessoa coloca 0,50 mol de um gás ideal em um botijão de 15 L. Ela deseja que o gás, ao entrar em equilíbrio térmico com o ambiente (27 °C), tenha pressão de 1,5 atm. É possível alcançar as condições desejadas pela pessoa? Explique. Não, pois $pV \neq nRT$.

2.5 A evolução do modelo molecular da matéria

As primeiras ideias atômicas

A teoria atômica do século XX costuma ser apresentada como sendo análoga às ideias de Leucipo e Demócrito, que viveram na Grécia no século V a.C., o que é verdade apenas em parte. Naquela época, Leucipo e Demócrito formularam a hipótese de que todas as coisas eram compostas de uma parte menor, sólida e indivisível, que foi chamada de átomo, palavra de origem grega que significa "não divisível". Assim, tudo que existe seria formado a partir da união de átomos e estes seriam indivisíveis. Na teoria atômica do século XX descobriu-se que esses átomos não existem em número infinito nem são indivisíveis, que são compostos de partículas elementares ainda menores do que eles.

Por ocasião do Renascimento, época em que ressurgiram as grandes correntes de pensamento cultural, e, posteriormente, na Idade Moderna as ideias da teoria atômica foram retomadas por diversos cientistas. Entre eles destacam-se Descartes, Pierre Gassendi, Robert Boyle, seu assistente Robert Hooke e Newton.

Para Descartes, os átomos eram curvos como ganchos, para se prenderem uns aos outros, e era inconcebível que eles pudessem ser indivisíveis. Gassendi, em 1647, postulou a ideia da existência de átomos reunidos em pequenos grupos que chamou de moléculas. Boyle, em 1661, criou o conceito de elemento como sendo um ingrediente a partir do qual todos os corpos são feitos. O elemento de Boyle é diferente do elemento químico que conhecemos. A diferenciação entre átomo e molécula, como conhecemos atualmente, foi feita por Avogadro em 1811.

Para Newton, o mundo era composto de minúsculos corpúsculos, rígidos e indivisíveis, e estes se mantinham unidos por uma força que atuaria mesmo à distância. Essa teoria recebeu o título de corpuscularismo newtoniano e perdurou por certo tempo, até que muitos cientistas passaram a reconhecê-la como atomismo.

Desse ponto em diante, a literatura menciona que todas essas teorias vigentes nesse período, em particular a teoria newtoniana, foram a base das ideias para o modelo de átomo de John Dalton. Ele acreditava que os átomos eram esféricos e sólidos e seriam as menores partículas existentes na natureza. Veremos que esse atomismo será a base dos estudos realizados no século XX, com os modelos de Lorde Kelvin, Rutherford e Bohr, que culminaram com o estudo do núcleo do átomo, na área que ficou conhecida como física nuclear.

A teoria cinética dos gases

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

O estudo dos gases com o desenvolvimento inicial da teoria cinética dos gases proporcionou a consolidação das leis de Newton dentro desse cenário no qual cientistas de prestígio discutiam do que o mundo era feito.

As leis de Newton sobre o movimento foram aplicadas com sucesso a um modelo simples de gás considerando suas moléculas como partículas sólidas em constante movimento inteiramente ao acaso, isto é, as partículas movem-se em qualquer direção **(figura 2.15)**. Essa teoria permitiu explicar a lei de Boyle e deduzir equações que relacionavam algumas propriedades dos gases que envolviam grandezas como pressão, densidade e temperatura. Esse foi um duro golpe para todos os cientistas que discordassem da teoria newtoniana, como aconteceu com Robert Hooke e Daniel Bernoulli, entre outros.



Figura 2.15. As moléculas de um gás estão em constante movimento, com velocidades de valores e direções distribuídos ao acaso.

Bernoulli, baseando-se nos estudos de Hooke, publicou uma obra, em 1738, em que admitia que a pressão de um gás deveria ser simplesmente o resultado das colisões dos átomos ou das moléculas contra as paredes do recipiente. Com essa hipótese, conseguiu uma explicação para a lei de Boyle: reduzindo-se à metade o volume de um gás, sua densidade duplica. Teremos, assim, um número de moléculas duas vezes maior colidindo por segundo contra as paredes do recipiente, isto é, a pressão do gás se tornará duas vezes maior.

Além disso, Bernoulli conseguiu mostrar matematicamente que a pressão do gás é proporcional à média do quadrado das velocidades das moléculas. Apesar de as ideias de Bernoulli fazerem parte dos fundamentos da teoria cinética dos gases que é aceita atualmente e que foi elaborada por Clausius, Maxwell e Boltzmann, elas foram praticamente ignoradas por quase um século, pois divergiam das ideias de Newton, que detinha grande prestígio na época.

Cálculo cinético da pressão

No modelo cinético de um gás, o número de moléculas é muito grande e elas estão em constante movimento. Em consequência, as moléculas colidem continuamente contra as paredes do recipiente que contém o gás, exercendo uma pressão nelas **(figura 2.16)**.



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 2.16. A pressão de um gás sobre uma parede é causada pelas colisões de suas moléculas contra essa parede.

A pressão que um gás exerce sobre as paredes do recipiente que o contém se deve às incessantes e contínuas colisões das moléculas do gás contra tais paredes.

Relacionando a pressão exercida por um gás com as seguintes grandezas:

N – número total de moléculas no recipiente;
V – volume do recipiente;
M – massa de cada molécula;
$\overline{v^2}$ – média dos quadrados das velocidades das moléculas,[2]
a expressão a que chegaram foi a seguinte:

$$p = \frac{1}{3}\left(\frac{N}{V}\right)M\overline{v^2}$$

Analisando essa expressão, concluímos que:

1) $p \propto N$ – pois, quanto maior o número total de moléculas, maior o número de colisões contra as paredes, portanto maior a pressão exercida pelo gás.

[2] A média dos quadrados das velocidades é definida matematicamente como: $\overline{v^2} = \sum_{i=1}^{n} \frac{v_i^2}{n}$.

2) $p \propto 1/V$ – pois, quanto maior o volume do recipiente, maior a distância que uma molécula terá de percorrer para colidir contra as paredes; consequentemente, menor será o número de colisões, isto é, menor a pressão exercida pelo gás.

3) $p \propto m$ – pois, quanto maior a massa de uma molécula, maior a sua quantidade de movimento, portanto maior a força que ela exerce ao colidir contra a parede do recipiente.

4) $p \propto \overline{v^2}$ – pois, quanto maior $\overline{v^2}$, mais rapidamente as moléculas estarão se movimentando. Podemos perceber que, nessas condições, maior será a força que cada molécula exercerá ao colidir contra a parede e maior será o número de colisões.

Essa equação pode ser reescrita como:

$$p = \frac{1}{3}\rho\overline{v^2}$$

Ela permitiu determinar a velocidade média das moléculas de um gás, uma vez que os valores de p e r podem ser obtidos experimentalmente. Para moléculas do ar, por exemplo, o físico John Herapath, no século XIX, obteve uma velocidade média de cerca de 300 m/s. Assim, pela primeira vez na história da Física, foi obtido um valor numérico relacionado com a estrutura molecular da matéria.

Interpretação cinética da temperatura

No capítulo anterior, mencionamos que a temperatura de um objeto se relaciona com a energia de agitação de seus átomos e suas moléculas. Mostraremos, agora, como os cientistas, baseados no modelo cinético de um gás, chegaram a essa conclusão.

A expressão $p = \left(\frac{1}{3}\right)\left(\frac{N}{V}\right)M\overline{v^2}$, que havia sido obtida com base no modelo cinético, pode ser escrita desta maneira:

$$pV = \frac{1}{3}NM\overline{v^2}$$

Comparando-a com a equação de estado de um gás ideal, $pV = nRT$, que havia sido obtida experimentalmente, conclui-se que:

$$\frac{1}{3}NM\overline{v^2} = nRT$$

Sendo N_0 o número de Avogadro, que é o número de moléculas que existe em 1 mol, e n o número de mols que corresponde a N moléculas:

$$N = nN_0$$

Substituindo esse valor de N na igualdade anterior:

$$\frac{1}{3}nN_0M\overline{v^2} = nRT \text{ ou } M\overline{v^2} = 3\left(\frac{R}{N_0}\right)T$$

Dividindo-se os dois membros dessa igualdade por 2:

$$\frac{1}{2}M\overline{v^2} = \frac{3}{2}\left(\frac{R}{N_0}\right)T$$

Observe que o primeiro membro dessa expressão representa a **energia cinética média por molécula** (a soma das energias cinéticas das moléculas dividida pelo número delas). Essa energia cinética média será representada por $\overline{E}_c$, isto é, $\overline{E}_c = (1/2)M\overline{v^2}$.

O quociente (R/N_0), que aparece no segundo membro, é constante, pois tanto R quanto N_0 são constantes. Esse quociente é representado por k e denominado **constante de Boltzmann**, em homenagem a Ludwig Boltzmann, físico do século XIX. Assim:

$$k = \frac{R}{N_0} = \frac{8{,}31}{6{,}02 \cdot 10^{23}} \text{ ou } k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \text{J/K}$$

Dessa maneira, chegamos à seguinte expressão:

$$\bar{E}_c = \frac{3}{2}kT$$

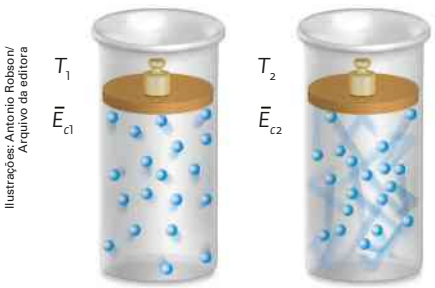
que mostra ser a energia cinética média das moléculas de um gás diretamente proporcional à sua temperatura absoluta, isto é, quanto maior a energia cinética média das moléculas, maior a temperatura do gás **(figura 2.17)**.

Destacamos, assim, que:

A temperatura absoluta, T, de um gás está relacionada com a energia cinética média, $\bar{E}_c$, de suas moléculas pela expressão:

$$\bar{E}_c = \frac{3}{2}kT$$

em que k é a constante de Boltzmann.



Ilustrações: Antonio Robson/ Arquivo da editora

Figura 2.17. Quanto maior a temperatura de um gás, maior a energia cinética média de suas moléculas. Representação sem escala e em cores fantasia.

$$\bar{E}_{c2} > \bar{E}_{c1} \Rightarrow T_2 > T_1$$

Exemplo

a) Um recipiente contém H_2 a 27 °C. Qual é a energia cinética média de suas moléculas?

Sabemos que $\bar{E}_c = (3/2)\,kT$ e, no nosso caso, $T = 300\ \text{K} = 273 + 27$. Logo:

$$\bar{E}_c = \frac{3}{2}kT = \frac{3}{2} \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \quad \therefore \quad \bar{E}_c = 6{,}2 \cdot 10^{-21}\ \text{J}$$

Observe que esse valor de $\bar{E}_c$ é muito pequeno, pois se refere à energia cinética média por molécula.

b) Qual seria a $\bar{E}_c$ para as moléculas de O_2 à mesma temperatura da questão anterior?

A expressão $\bar{E}_c = (3/2)kT$ nos mostra que a energia cinética média das moléculas só depende da temperatura, e não da natureza do gás. Como o O_2 e o H_2 estão à mesma temperatura, o valor de $\bar{E}_c$ é o mesmo para os dois gases.

c) Sabendo-se que a massa de uma molécula de H_2 é $3{,}3 \cdot 10^{-27}$ kg, qual deve ser a sua velocidade para que ela tenha uma energia cinética igual ao valor médio calculado no item a?

Como devemos ter $(1/2)Mv^2 = \bar{E}_c$, virá:

$$\frac{1}{2} \cdot (3{,}3 \cdot 10^{-27})v^2 = 6{,}2 \cdot 10^{-21} \quad \therefore \quad v = 1{,}9 \cdot 10^3\ \text{m/s}$$

Esse resultado nos mostra que o movimento das moléculas é muito rápido, pois $1{,}9 \cdot 10^3$ m/s equivale a cerca de 7 000 km/h.



SPL/Latinstock

LUDWIG BOLTZMANN (1844-1906)

Cientista e professor de Matemática e Física em várias universidades da Europa. Seu principal trabalho foi o desenvolvimento da Mecânica Estatística, que permite explicar como as propriedades visíveis da matéria são determinadas pelas características do grande número de átomos ou moléculas que a constituem. Essas ideias foram fortemente atacadas por muitos daqueles que não acreditavam na teoria atômica.

d) Qual seria a resposta para a questão anterior, se a molécula fosse de O_2?

A massa de uma molécula de O_2 é 16 vezes maior do que a massa de uma molécula de H_2, isto é, para uma molécula de O_2, teríamos:

$$M = 16 \cdot 3{,}3 \cdot 10^{-27} \quad \text{ou} \quad M = 53 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$$

De $(1/2)Mv^2 = \bar{E}_c$, obtemos:

$$\frac{1}{2} \cdot (53 \cdot 10^{-27})v^2 = 6{,}2 \cdot 10^{-21} \quad \therefore \quad v = 4{,}8 \cdot 10^2\ \text{m/s}$$

É importante perceber que, à mesma temperatura, o valor da energia cinética média das moléculas é igual para todos os gases, mas o valor médio das velocidades dessas moléculas varia de um gás para outro: quanto maior a massa molecular do gás, menor a velocidade média de suas moléculas.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

A teoria cinética adquire sua estrutura definitiva



Fotos: Andrew Lambert Photography/ Science Photo Library/Latinstock

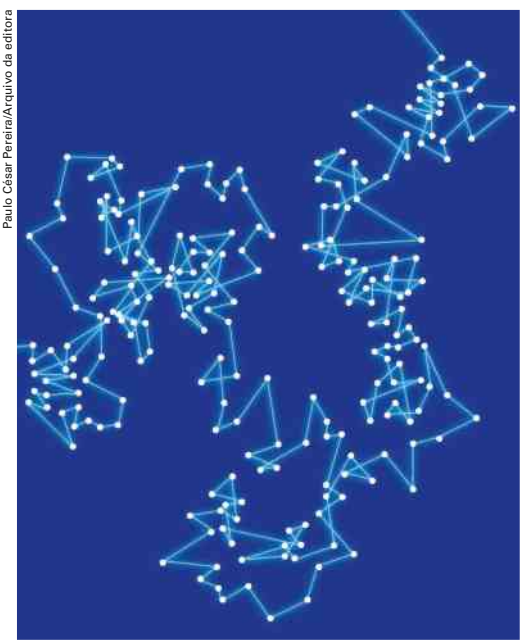
Figura 2.18. As fotos mostram a difusão do gás de bromo em um recipiente em que bromo líquido, de cor laranja, foi depositado. O bromo líquido se evapora com facilidade à temperatura ambiente, e o gás liberado difunde graças ao movimento browniano, ocupando após alguns minutos todo o frasco.

Poucos anos mais tarde, em 1848, o físico Joule, reconhecendo o valor do trabalho de Herapath, tentou rever as ideias básicas da teoria cinética. Inicialmente, Joule não foi bem-sucedido, mas, talvez em virtude do seu prestígio, não demorou muito para que outros cientistas de renome passassem a se interessar pelos estudos da teoria molecular.

Foi assim que, em 1856, R. Clausius publicou um trabalho no qual apresentava a teoria cinética com uma estrutura praticamente igual àquela aceita atualmente. No final do século XIX, Maxwell (na Inglaterra) e Boltzmann (na Áustria) apresentaram trabalhos complementando a teoria com detalhados desenvolvimentos matemáticos. Com esses estudos, a teoria cinética dos gases foi estruturada. Entretanto, um grande número de cientistas no início do século XX ainda se mostrava descrente com relação à hipótese da constituição atômico-molecular da matéria.

Em outras palavras, eles se recusavam a aceitar que os objetos fossem constituídos por átomos ou moléculas em movimento caótico constante, como propunham os adeptos da teoria cinética. A comprovação direta da realidade de átomos e moléculas só veio a ser concretizada com o trabalho de Einstein sobre o "movimento browniano" **(figuras 2.18** e **2.19)**, publicado em 1905.

Einstein, que acreditava ser a matéria realmente constituída de átomos e moléculas em constante movimento, estava procurando um fenômeno que tornasse evidente a existência dessas partículas. Ele propunha a seguinte explicação para o movimento browniano: estando em suspensão no líquido, uma partícula recebe simultaneamente os impactos de um número muito grande de moléculas do líquido, que, de acordo com a teoria cinética, estão em movimento constante e caótico.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 2.19. Segundo Einstein, o movimento browniano seria uma consequência direta do movimento caótico das moléculas de um líquido.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

12. De acordo com o modelo cinético, por que um gás exerce pressão contra as paredes do recipiente que o contém? Porque suas moléculas colidem com as paredes do recipiente.

13. Um recipiente de volume V contém N moléculas de H_2, com um certo valor de $\overline{v^2}$, a uma pressão de 1,2 atm. Supondo que o valor de $\overline{v^2}$ não se altere, diga qual será o valor da pressão do gás em cada um dos casos seguintes.

a) Mantém-se o valor de V, e mais N moléculas de H_2 são introduzidas no recipiente. 2,4 atm

b) Aumenta-se o volume para $2V$, mantendo-se o número de moléculas igual a $2N$. 1,2 atm

c) Mantém-se o volume V e substitui-se o H_2 por N moléculas de He (massa atômica = = 4 u.m.a.). 2,4 atm

14. Uma amostra de gás hélio está à temperatura de 1 000 K.

a) Calcule a energia cinética média, $\overline{E_c}$, das moléculas dessa amostra. $2{,}07 \cdot 10^{-20}$ J

b) Se duplicarmos a temperatura absoluta da amostra, por quanto será multiplicado o valor de $\overline{E_c}$? Por 2.

c) A que temperatura a $\overline{E_c}$ das moléculas do gás se anularia? Zero absoluto.

15. Suponha que o volume de um gás contido em um recipiente seja reduzido à quinta parte. Lembrando-se das ideias de Bernoulli, responda:

a) O que ocorre com o número de moléculas por unidade de volume desse gás? Aumenta 5 vezes.

b) Qual é a alteração sofrida pelo número de colisões por segundo que as moléculas efetuam contra as paredes do recipiente? Aumenta 5 vezes.

c) Quantas vezes maior torna-se a pressão do gás? 5 vezes.

d) As ideias de Bernoulli levam a resultados coincidentes com a lei de Boyle? Sim.

16. A densidade do ar nas condições normais de temperatura e pressão (considere $p = 1{,}0 \cdot 10^5$ N/m^2) é $\rho = 1{,}3$ kg/m^3.

a) Usando a equação citada no texto, obtida pelo físico inglês Herapath, calcule a velocidade média das moléculas do ar. 480 m/s

b) Qual foi a porcentagem de erro cometida por esse físico no valor que ele obteve para a velocidade média das moléculas do ar? Cerca de 37%.

17. Diga se a afirmativa seguinte é falsa ou verdadeira: "No início do século XX, a ideia de que a matéria era constituída de átomos e moléculas já era aceita por toda a comunidade científica". Falsa.

18. Responda resumidamente às seguintes questões:

a) O que é movimento browniano?

b) De acordo com as ideias de Einstein, qual é a causa do movimento browniano?

c) Qual é a importância do estudo do movimento browniano para a teoria cinética da matéria? Foi determinante para a aceitação da existência de átomos e moléculas.

18. a) Movimento caótico de pequenas partículas, em suspensão no interior de um fluido. **b)** Colisões das moléculas do fluido contra uma partícula em suspensão.

PRATIQUE FÍSICA

EM EQUIPE

Não escreva no livro!

ATENÇÃO!
Realize essa atividade sob a supervisão do professor.
Tome cuidado para evitar queimadura.

Veja comentários desta seção no Manual do Professor.

1. Quando aumentamos a temperatura de um gás, observamos geralmente que seu volume se eleva, acompanhado de um aumento em sua pressão. Esse fenômeno pode ser observado facilmente por meio da experiência seguinte.

1º) Adapte firmemente um balão de borracha ligeiramente inflado ao gargalo de um recipiente (um frasco de plástico) com cerca de 1 L de volume. Teremos, assim, uma certa massa de ar ocupando o volume do recipiente e do balão.

2º) Mergulhe totalmente o recipiente em um banho de água quente (temperatura próxima à de ebulição) com cuidado para não deixar a água encostar em você (figura ao lado). Observe o que acontece com o balão. O que ocorreu com o volume do ar ao ser aquecido? E com sua pressão?

3º) Mergulhe, agora, o recipiente em um banho de água bem fria (mistura de água e gelo). Observe novamente o que ocorre com o balão. Explique.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

2. Para realizar este experimento, você precisará de três copos com água e um corante líquido utilizado em alimentos. Em um dos copos você colocará água aquecida; no segundo, água em temperatura ambiente; no terceiro, água quase congelada. Pingue uma gota de corante em cada um dos copos e observe quanto tempo a água leva para ficar colorida. Com base no que você estudou sobre a relação da energia das moléculas com a temperatura, discuta com seus colegas por que a gota de corante se comporta de modo diferente em cada um dos copos.

INTEGRANDO CONCEITOS PARA ENTENDER O CONGELAMENTO DA ÁGUA

Nesta unidade vimos que a água apresenta um comportamento de dilatação térmica atípico que faz com que um lago se congele somente na superfície **(figura 2.20)**. Esse fato decorre de um fenômeno conhecido como "comportamento anômalo da água", que agora iremos entender melhor.



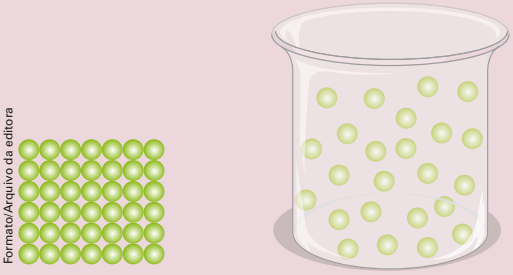
Ira Block/National Geographic Creative/Getty Images

Figura 2.20. A pesca no inverno em certas regiões é possível porque o lago se congela apenas na superfície.

A dilatação na mudança do estado sólido para líquido

Aprendemos que a dilatação térmica ocorre nos três estados da matéria. Mas e na mudança de estado, por exemplo, do sólido para o líquido? Também ocorre dilatação térmica?

De forma geral, no estado sólido as partículas estão mais próximas do que no estado líquido **(figura 2.21)**.



Formato/Arquivo da editora

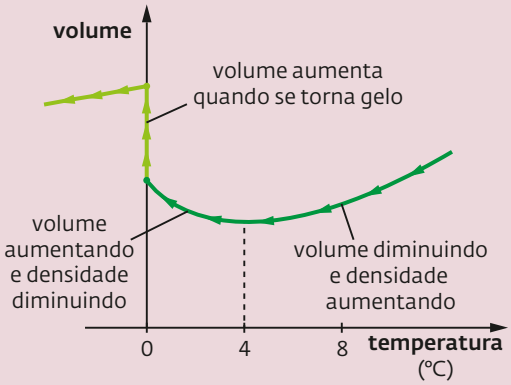
sólido líquido

Figura 2.21. O líquido ocupa maior espaço, pois suas partículas estão mais afastadas. Representação sem escala e em cores fantasia.

Assim, na fusão (transição do estado sólido para o líquido), o volume aumenta para a maioria das substâncias. Porém, em razão de seu comportamento anômalo, a água é uma exceção! Na fusão do gelo (que acontece a 0 °C na pressão de 1 atm), o volume diminui, ou seja, o volume ocupado pela água no estado sólido é maior do que o volume ocupado pela água no estado líquido.

Considerando que a massa não se altere, a **redução do volume implica o aumento da densidade** (lembre-se de que a densidade é dada pela razão da massa pelo volume).

A **figura 2.22** apresenta um gráfico que mostra como o volume e a densidade da água variam em função de sua temperatura entre 0 °C e 4 °C.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 2.22. Volume e densidade de uma porção de água em função da temperatura.

O comportamento anômalo da água, resumido no gráfico acima, explica o congelamento apenas na superfície do lago. De toda a água do lago, é a camada superior, em contato direto com o ar frio, a que primeiro se resfria com a chegada de uma frente fria. Vejamos como se dá a queda de temperatura da água até que ela se torne gelo a 0 °C.

- **De 20 °C até 4 °C:** a água da superfície, mais fria e mais densa, afunda. Em seu lugar, sobe a água menos fria que estava no fundo. Agora, é essa "nova" água que se resfria ainda mais do que a primeira, afundando. Esse ciclo se mantém até que **toda a água do lago atinja 4 °C**.
- **De 4 °C até 0 °C:** o ciclo de descida da água mais fria e subida da água menos fria cessa, pois agora a água da superfície diminui de densidade e, assim, se mantém na superfície. A água submersa continua a 4 °C.
- **De água a 0 °C para gelo a 0 °C:** quando a água a 0 °C torna-se gelo a 0 °C, o volume aumenta ainda mais, e a densidade do gelo é ainda menor. Portanto, o gelo flutua. Temos agora gelo a 0 °C flutuando sobre água a 4 °C **(figura 2.22)**.

Mas como a química explica esse comportamento curioso da água?

Na **molécula de água**, a tendência do oxigênio em receber elétrons é maior do que a do hidrogênio, portanto os elétrons compartilhados na ligação covalente que forma essa molécula ficam mais próximos do oxigênio. Desse modo, apesar de a molécula de água ser eletricamente neutra, o oxigênio apresenta um excesso de carga negativa, e os hidrogênios, de carga positiva **(figura 2.23)**.

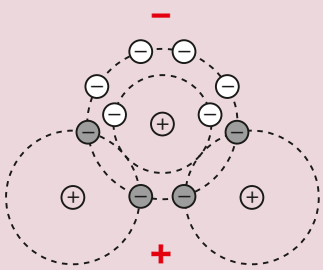


Figura 2.23. A região que está próxima do oxigênio é mais negativa; a que está próxima dos hidrogênios é mais positiva.

A molécula de água é **polar**, pois tem um polo positivo e outro negativo, e é comum representá-la como mostra a **figura 2.24**.

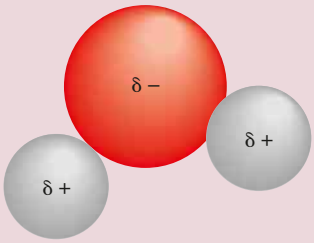


Figura 2.24. Representação das cargas da molécula de água: oxigênio negativo e hidrogênios positivos.

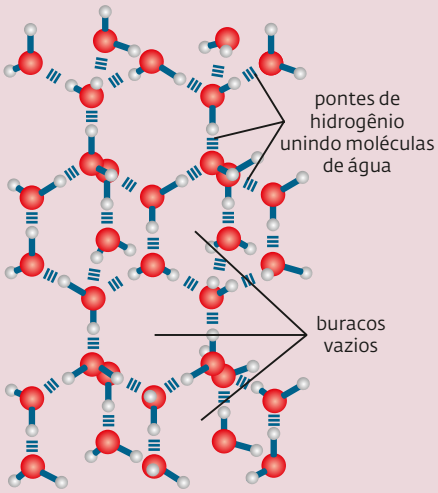
A atração elétrica entre a carga positiva do hidrogênio de uma molécula e a carga negativa do oxigênio de outra molécula é o que mantém as moléculas de água unidas. Essa atração intensa é chamada de **ponte de hidrogênio** e une as moléculas de água tanto no estado sólido quanto no líquido. Porém, no estado sólido a união das moléculas de água pelas pontes de hidrogênio, aliada ao fato de as moléculas estarem próximas e vibrando em torno de posições aproximadamente fixas, faz com que as moléculas se arranjem em "anéis" hexagonais, formando uma estrutura espacial organizada em uma **rede cristalina (figura 2.25)**.

Perceba que, nessa configuração de rede cristalina, existem "**buracos vazios**" (espaços onde não existem átomos).

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Mas como a estrutura molecular da água no estado sólido explica seu comportamento?

Imagine um pedaço de gelo a 0 °C recebendo calor. O aumento da temperatura provoca o aumento do grau de agitação das moléculas. Essa maior agitação das moléculas começa a desordenar a estrutura cristalina, fazendo com que as moléculas de água ocupem aqueles espaços vazios da rede. Quando isso acontece, ocorre uma redução do volume, pois as moléculas ficam mais próximas umas das outras e ocupam menos espaço. Essa diminuição de volume prevalece até 4 °C. Mas lembre-se de que a dilatação térmica também está presente. Os dois processos são concomitantes: o colapso da rede cristalina (que diminui o volume da água) e a dilatação térmica (que aumenta o volume da água). O efeito do colapso prevalece até 4 °C. A partir daí, a dilatação "vence" a contração, porque a maioria dos aglomerados cristalinos hexagonais já se desfez.



Ilustrações: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 2.25. Representação da estrutura cristalina do gelo.

Pesquise e responda

1. A ponte de hidrogênio, além de explicar esse comportamento atípico da dilatação da água, explica outras de suas propriedades, como sua tensão superficial. Pesquise o conceito de tensão superficial e sua relação com a vida de micro-organismos que vivem sobre a superfície da água de rios e lagos.

2. O texto explica que a água abaixo do gelo mantém a temperatura em 4 °C. Pesquise qual é a característica física do gelo que contribui para que a água submersa se mantenha nessa temperatura.

3. Dissemos que o gelo possui "buracos vazios" em sua rede cristalina. O que você acha que existe nesses espaços vazios? Pesquise e tente descobrir.

1. A superfície da água, em virtude dessa propriedade, torna-se mais rígida que o restante, funcionando como uma "membrana". Micro-organismos são sustentados por essa "membrana" e, assim, são capazes de viver sobre ela.

3. Caso o gelo fosse 100% puro, não haveria nada nesses espaços vazios, ou seja, haveria vácuo.

Veja no próximo *Integrando...*

A relação entre a primeira lei da Termodinâmica e o balanço energético do corpo humano.

2. O gelo não conduz bem o calor. Em outras palavras, o gelo é um isolante térmico que, na situação do lago, impede que a água submersa (mais quente) perca calor para o ambiente frio.

1. Uma bolha de ar, com volume de 2,5 cm^3, forma-se no fundo de um lago, a 30 m de profundidade, e sobe até atingir a superfície. A pressão atmosférica no local vale 1,0 atm e a temperatura do lago é a mesma em qualquer profundidade.

a) Como você classificaria a transformação sofrida pela bolha de ar ao se deslocar do fundo até a superfície? Isotérmica.

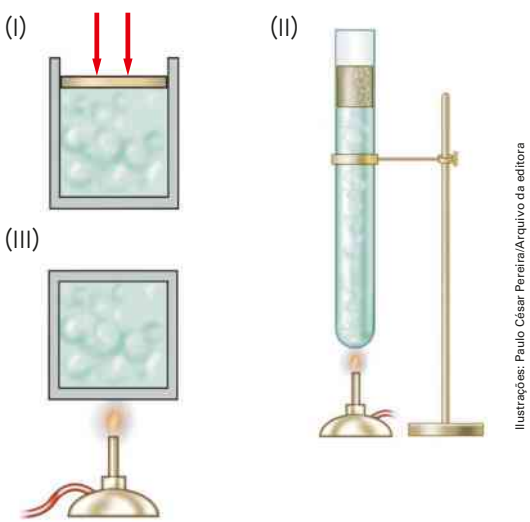
b) Qual é o valor da pressão, em atmosferas, sobre a bolha no fundo do lago? (Lembre-se de que uma coluna de água de 10 m de altura exerce uma pressão que corresponde aproximadamente a 1,0 atm.) 4,0 atm

c) Calcule o volume da bolha ao atingir a superfície. 10 cm^3

2. Ao comprimir um gás ideal em um cilindro, um estudante suspeitou que o êmbolo não estivesse bem ajustado, podendo permitir escapamento de gás. Realizando medidas, ele verificou que, em um estado inicial (1), a pressão do gás era $p_1 = 70$ cmHg e seu volume era $V_1 = 20\ cm^3$. Para outro estado (2), à mesma temperatura, ele encontrou $p_2 = 120$ cmHg e $V_2 = 10\ cm^3$. Essas medidas levam o estudante a confirmar sua suspeita? Explique. Sim, pois $p_1V_1 \neq p_2V_2$.

3. As figuras abaixo representam (sem escala e em cores fantasia):

- em I – um gás sendo comprimido lentamente, de modo que seu equilíbrio térmico com o ambiente se mantenha constante.
- em II – um gás sendo aquecido em um tubo vedado por uma pequena coluna de Hg.
- em III – um gás sendo aquecido em um recipiente que não se dilata.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

a) Que tipo de transformação está ocorrendo em cada caso? I é isotérmica; II é isobárica; III é isovolumétrica.

b) Dadas as equações $\frac{V}{T}$ = constante, $\frac{p}{T}$ = constante e pV = constante, qual delas se aplica a cada transformação apresentada na figura?
I: pV = constante; II: V/T = constante; III: p/T = constante.

4. Um recipiente, cujo volume é 8,2 L, contém 20 g de uma certa substância gasosa à temperatura de 47 °C e à pressão de 2,0 atm. Qual das substâncias seguintes poderá ser aquela contida no recipiente? c

a) H_2
b) CO_2
c) O_2
d) NH_3
e) N_2

5. (**Unicamp-SP**) Alguns experimentos muito importantes em física, tais como os realizados em grandes aceleradores de partículas, necessitam de um ambiente com uma atmosfera extremamente rarefeita, comumente denominada de ultra-alto-vácuo. Em tais ambientes a pressão é menor ou igual a 10^{-6} Pa.

a) Supondo que as moléculas que compõem uma atmosfera de ultra-alto-vácuo estão distribuídas uniformemente no espaço e se comportam como um gás ideal, qual e o número de moléculas por unidade de volume em uma atmosfera cuja pressão seja $P = 3{,}2 \cdot 10^{-8}$ Pa, a temperatura ambiente $T = 300$ K? Se necessário, use: $8 \cdot 10^{12}$ moléculas/m^3

Número de Avogadro $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ e a constante universal dos gases ideais $R = 8$ J/mol · K.

b) Sabe-se que a pressão atmosférica diminui com a altitude, de tal forma que, a centenas de quilômetros de altitude, ela se aproxima do vácuo absoluto. Por outro lado, pressões acima da encontrada na superfície terrestre podem ser atingidas facilmente em uma submersão aquática. Calcule a razão P_{sub}/P_{nave} entre as pressões que devem suportar a carcaça de uma nave espacial (P_{nave}) a centenas de quilômetros de altitude e a de um submarino (P_{sub}) a 100 m de profundidade, supondo que o interior de ambos os veículos se encontra a pressão de 1 atm. Considere a densidade da água como $\rho = 1\,000$ kg/m^3. 10

6. (**UFPE**) Um gás ideal passa por uma transformação termodinâmica em que sua pressão dobra, seu número de moléculas triplica e seu volume é multiplicado por um fator de 12. Nessa transformação qual a razão entre as temperaturas absolutas final e inicial do gás? $\frac{T_2}{T_1} = 8$

7. (**UFSC**) Calibrar os pneus de um carro consiste em colocar ou retirar ar atmosférico do pneu, e é uma prática que todos os motoristas devem fazer pelo menos a cada 15 dias, para garantir a segurança do veículo e de seus integrantes assim como para aumentar a vida útil do pneu. Em média, o pneu de um carro de passeio é calibrado com uma pressão que pode variar entre 28 e 30 psi (libras por polegada quadrada). Em situações de grande carga no veículo e viagens longas, orienta-se que se calibrem os pneus com duas libras a mais de pressão. (Não vamos considerar os pneus que são calibrados com nitrogênio)


Reprodução/UFSC, 2014

Considerando o ar atmosférico como um gás ideal e com base no que foi exposto, indique a(s) proposição(ões) CORRETA(S). 02, 08 e 32

01. Quando o carro está em movimento, os pneus aquecem; sendo assim, podemos considerar que o ar atmosférico dentro dos pneus sofre uma transformação isobárica.

02. Para uma correta calibragem da pressão, é necessário que ela seja feita com os pneus frios, pois a alta temperatura indicaria uma pressão maior.

04. Independentemente das medidas de um pneu, se o calibrarmos com 30,0 psi, o número de mols de ar é o mesmo.

08. A pressão de um gás confinado em um recipiente depende de alguns fatores: quantidade de gás, temperatura do gás e volume do recipiente. Estes fatores influenciam diretamente o número de colisões e a intensidade destas colisões com as paredes do recipiente.

16. Um pneu com as seguintes medidas: raio interno 14,0 cm, raio externo 19,0 cm e largura 18,0 cm, calibrado com 30,0 psi a 25 °C, possui um volume de ar atmosférico de 45 L.

32. A dilatação do pneu quando aquecido pode ser desprezada se comparada com a expansão que o gás pode sofrer quando é submetido à mesma variação de temperatura.

8. Um gás ideal, com uma pressão $p_A = 4{,}0$ atm e um volume $V_A = 3{,}0\ cm^3$, sofre as seguintes transformações sucessivas:

I. expande-se isotermicamente até um volume $V_B = 12\ cm^3$;

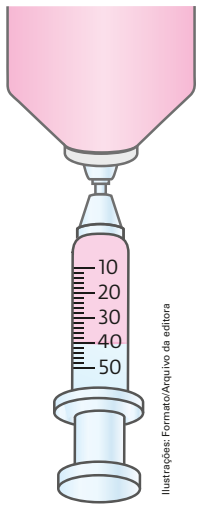
II. é comprimido, à pressão constante, até que seu volume atinja um valor $V_c = 3{,}0\ cm^3$;

III. é aquecido a um volume constante até voltar ao estado inicial.

Represente essas transformações em um gráfico $p \cdot V$.

9. (**FGV-SP**) Para garantir a dosagem precisa, um medicamento pediátrico é acompanhado de uma seringa. Depois de destampado o frasco de vidro que contém o remédio, a seringa é nele encaixada com seu êmbolo completamente recolhido. Em seguida, o frasco é posicionado de cabeça para baixo e o remédio é então sugado para o interior da seringa, enquanto o êmbolo é puxado para baixo. Como consequência da retirada do líquido, o ar que já se encontrava dentro do frasco expande-se isotermicamente, preenchendo o volume antes ocupado pelo remédio.

Ao retirar-se uma dose de 40 mL de líquido do frasco, que continha um volume ocupado pelo ar de 100 mL, o êmbolo encontra certa resistência, devido ao fato de a pressão no interior do frasco ter se tornado, aproximadamente, em Pa: c



Ilustrações: Formato/Arquivo da editora

a) 57 000.

b) 68 000.

c) 71 000.

d) 83 000.

e) 94 000.

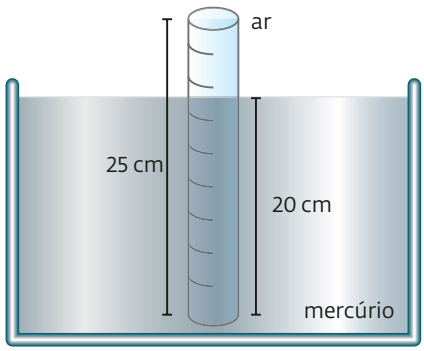
Dados:

Suponha que o ar dentro do frasco se comporte como um gás ideal.

Considere desprezível o atrito entre o êmbolo e a parede interna da seringa.

Pressão atmosférica $= 1 \cdot 10^5$ Pa.

10. (**ITA-SP**) Na figura, uma pipeta cilíndrica de 25 cm de altura, com ambas as extremidades abertas, tem 20 cm mergulhados em um recipiente com mercúrio. Com sua extremidade superior tapada, em seguida a pipeta é retirada lentamente do recipiente.



Considerando uma pressão atmosférica de 75 cmHg, calcule a altura da coluna de mercúrio remanescente no interior da pipeta. 18,4 cm.

11. (**UFRGS-RS**) Considere as afirmações a seguir, sobre gases ideais.

I. A constante R presente na equação de estado de gases $pV = nRT$ tem o mesmo valor para todos os gases ideais.

II. Volumes iguais de gases ideais diferentes, à mesma temperatura e pressão, contêm o mesmo número de moléculas.

III. A energia cinética média das moléculas de um gás ideal é diretamente proporcional à temperatura absoluta do gás.

Quais estão corretas? e

a) Apenas I

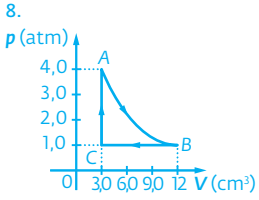
b) Apenas II

c) Apenas III

d) Apenas I e II

e) I, II e III

8.



INFOGRÁFICO

O infográfico desta unidade apresenta as principais informações sobre o funcionamento de um dirigível. Antes de responder às questões, faça a leitura deste infográfico observando como os textos e as imagens se relacionam e permitem a compreensão das informações referentes à temperatura e ao comportamento dos gases, dois temas abordados nesta unidade.

Antigamente, costumava-se usar o hidrogênio para encher o balão (ou envelope) dos dirigíveis, mas esse gás é inflamável, o que provocou vários acidentes. Com uma bomba, o envelope recebe gás hélio. Menos denso que o ar, o gás hélio tende a subir e puxar o dirigível para cima. Quanto mais pesado for o dirigível, mais gás é preciso. Alguns modelos têm 6 milhões de litros de hélio – ou uns 200 mil botijões de gás!

Existem vários tipos de dirigíveis, mas o modelo mais usado hoje é o chamado dirigível semirrígido. Ele tem uma estrutura de metal na qual o envelope de lona (o balão) se apoia. Apesar de estarem bem mais seguros, os dirigíveis ainda são pouco utilizados para o transporte de cargas e de passageiros. Isso porque são veículos lentos – voam a 80 km/h, contra os mais de 900 km/h de um Boeing 737-800 – e são muito vulneráveis a condições climáticas ruins.

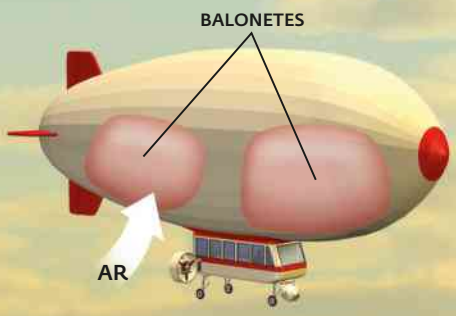
1. Qual era o gás utilizado antigamente nos dirigíveis e por que esse gás não é mais usado?
2. Por que os dirigíveis são pouco utilizados para o transporte de cargas e passageiros?
3. Qual é o tipo de dirigível mais usado atualmente e como é sua estrutura interna?
4. Qual é a altitude máxima praticada em um dirigível?
5. Como o dirigível controla a subida e a descida?
6. Como o dirigível se movimenta para a frente e realiza manobras, como virar à esquerda ou à direita?
7. Qual é a autonomia média de um dirigível?

Respostas no Manual do Professor.

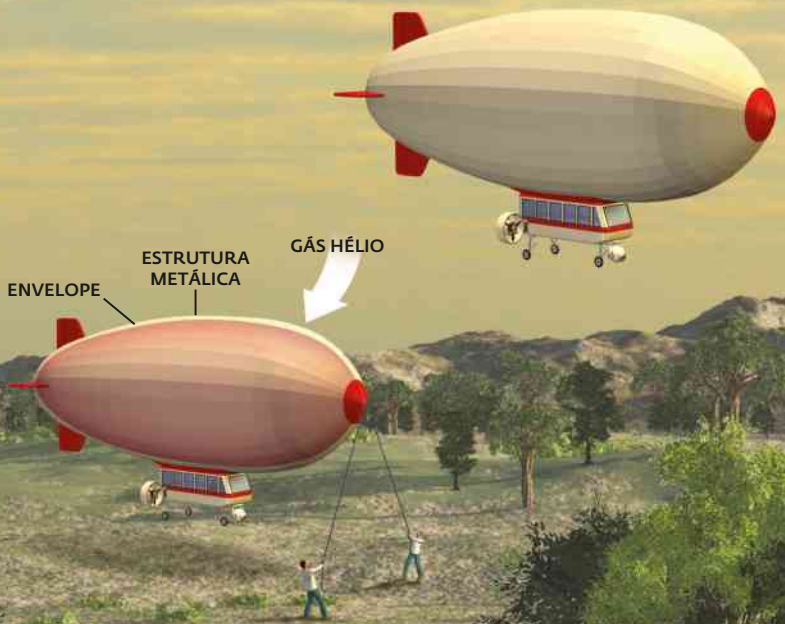
COMO FUNCIONA UM DIRIGÍVEL?

Para atingir a altitude desejada, o piloto controla os balonetes, e para andar para a frente ele aciona um **motor com hélices**, que fica acoplado à gôndola do dirigível. Sem motor, o veículo dependeria das correntes de ar para se deslocar.





Dentro do envelope existem pequenos balões, os **balonetes**, que têm ar em vez de hélio. Na decolagem, eles ficam meio cheios. Quando o veículo atinge a altitude ideal, o piloto libera a entrada de mais ar nos balonetes.
Assim, o dirigível ganha peso e para de subir.

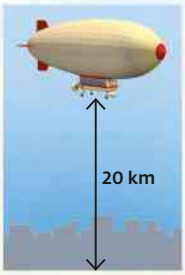


Fonte de dados. Como funciona um dirigível. Disponível em: <http://mundoestranho.abril.com.br/materia/como-funciona-um-dirigivel>. Acesso em: 12 jan. 2016.



Na hora de virar à esquerda ou à direita durante o voo, o piloto usa o **leme** – que fica na cauda. Existem ainda outros instrumentos que ajudam no controle do voo, como o profundor, que permite embicar o dirigível para baixo ou para cima.

ALTITUDE MÁXIMA

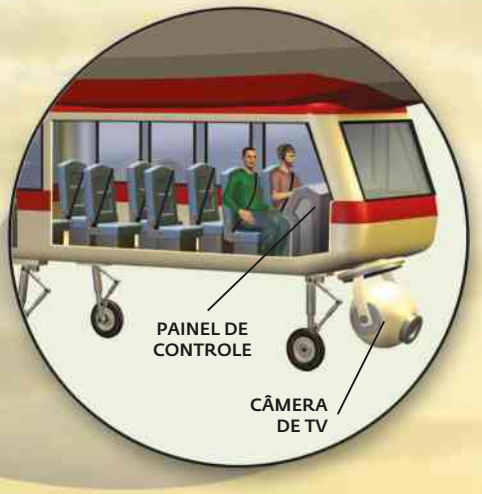


Paulo Manzi/Arquivo da editora

Cheio de gás hélio, um dirigível teoricamente poderia ultrapassar a atmosfera, atingindo 20 mil km de altitude! Na prática, porém, ele viaja no máximo a 20 km de altitude.

A autonomia de cada dirigível varia de acordo com o modelo e depende de fatores como o peso da aeronave. No Brasil, a **autonomia média** dos dirigíveis é de sete horas em altitude e velocidade constantes.





O piloto e os eventuais passageiros ficam na **gôndola**, uma espécie de cabine de avião. Além de ter os assentos e o painel de controle da aeronave, a gôndola é o local onde são instalados equipamentos de filmagem, como câmeras de TV.



Quando quer se **preparar para o pouso**, o piloto enche os balonetes com mais ar; assim, o dirigível fica bem mais pesado e começa, lentamente, a iniciar o trabalho de descida. É a parte final do voo.

UNIDADE

2 Calor

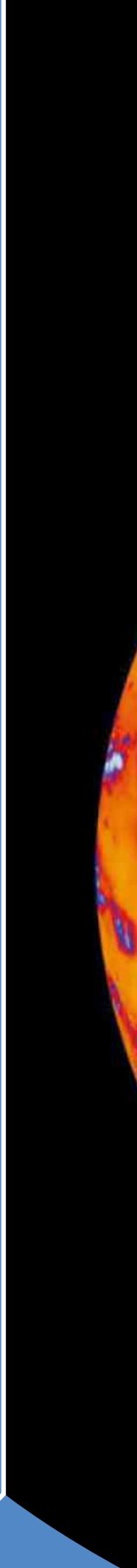
Segundo os astrônomos, as diferentes temperaturas dos planetas do Sistema Solar ocorrem em razão da atmosfera de cada um. Em Vênus, cuja atmosfera é profunda e densa, a temperatura chega a 485 °C; em Mercúrio, que não possui atmosfera, as temperaturas variam entre −173 °C e 470 °C.

Cientistas descobriram que, de maneira semelhante ao que acontece na Terra, a atmosfera de Vênus, rica em dióxido de carbono, proporciona o chamado efeito estufa.

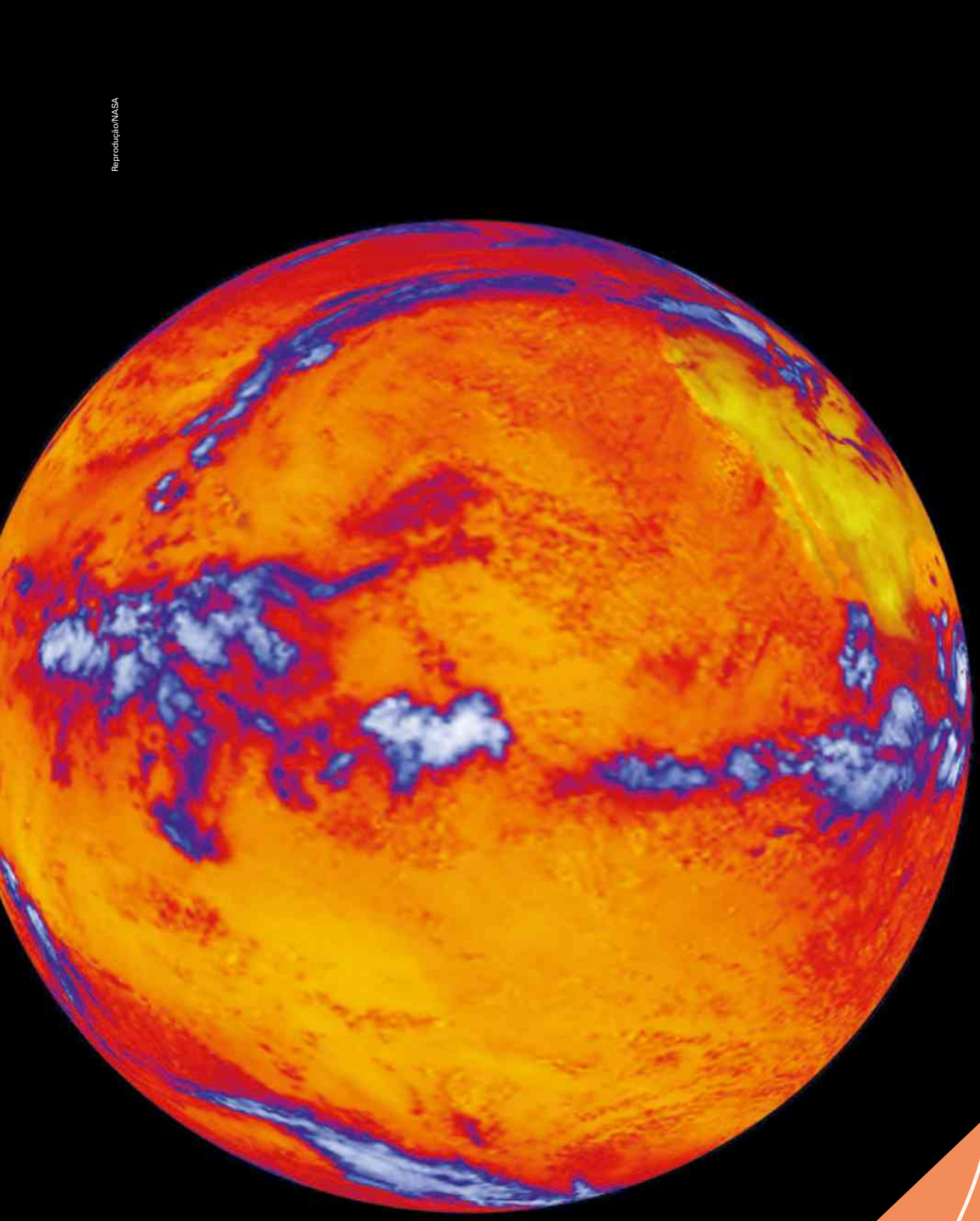
Pesquisas dessa natureza constituem uma contribuição relevante para dimensionar com mais precisão os impactos causados pela ação humana na atmosfera terrestre, permitindo ações mais decisivas que evitem a intensificação das mudanças climáticas que já ocorrem em nosso planeta.

CAPÍTULO 3
Termodinâmica

CAPÍTULO 4
Mudanças de fase



Vista parcial da Terra mostrando a radiação emitida pelo planeta na forma de calor. Gases da atmosfera terrestre, como o dióxido de carbono e o metano, retêm o calor no planeta, provocando o fenômeno conhecido como efeito estufa.



Reprodução/NASA



mtsyri/Shutterstock

No sistema solar fotovoltaico há transformação da radiação solar em energia elétrica pela produção de corrente elétrica, no sistema solar térmico a água é apenas aquecida pela radiação solar.

O sistema térmico solar utiliza um painel solar, também chamado de coletor solar, instalado no telhado para aquecer a água e mantê-la armazenada em um reservatório térmico (*boiler*) até o momento do consumo.

CAPÍTULO 3

O custo das células solares ou fotovoltaicas.

Termodinâmica

Sim, em comunidades rurais e/ou isoladas, com destaque para as regiões Norte e Nordeste. Utilizados em bombeamento de água para abastecimento doméstico, irrigação e piscicultura, iluminação pública, eletrificação de escolas, postos de saúde e centros comunitários.

O calor está sempre presente nos processos de transformação de energia. Ele pode ser tanto o agente transformador – como no caso das usinas termelétricas, nas quais o calor é empregado para gerar eletricidade – quanto o produto final da transformação – como no caso dos aquecedores de água, que transformam energia elétrica ou solar em energia térmica.

Existem diversos sistemas de aquecimento solar de água para utilização individual ou coletiva. Atualmente os que mais se destacam são o sistema solar térmico e o sistema solar fotovoltaico. No sistema solar térmico, conhecido como coletor solar, o calor é absorvido por placas solares e transferido para um reservatório (*boiler*) para ser utilizado como fonte de calor. O sistema solar fotovoltaico também utiliza um painel solar, mas neste caso as células fotovoltaicas, constituídas de materiais semicondutores, de alto custo, transformam energia solar em eletricidade (efeito fotovoltaico).

PARA INICIAR A CONVERSA

Qual é a principal diferença entre o sistema solar térmico e o sistema solar fotovoltaico?

Qual é o principal obstáculo para geração de eletricidade utilizando o sistema solar fotovoltaico em escala comercial?

Pesquise se há aproveitamento da energia solar com o sistema solar fotovoltaico no Brasil. Em caso positivo, cite sua utilização.

3.1 O calor como energia

A teoria do calórico

Quando analisamos o conceito de equilíbrio térmico, observamos que, se dois objetos a temperaturas diferentes são colocados em contato, eles atingem, após um certo tempo, a mesma temperatura. Até o início do século XIX os cientistas explicavam esse fato supondo que todos os objetos continham, em seu interior, uma substância fluida, invisível, de peso desprezível, denominada **calórico**. Quanto maior fosse a temperatura de um objeto, maior seria a quantidade de calórico em seu interior.

De acordo com esse modelo, quando dois objetos, a temperaturas diferentes, eram colocados em contato, haveria passagem de calórico do objeto mais quente para o mais frio, acarretando diminuição na temperatura do primeiro e aumento na temperatura do segundo. Quando os objetos atingiam a mesma temperatura, o fluxo de calórico era interrompido e eles permaneciam, a partir daquele instante, em equilíbrio térmico.

Apesar de esta teoria explicar satisfatoriamente muitos fenômenos, alguns físicos mostravam-se insatisfeitos com certos aspectos fundamentais da ideia do calórico, o que levou à sua substituição por outra, mais adequada, na qual o calor é considerado uma forma de energia.

Sugestão de leitura
BRAGA, M.; GUERRA, A.; REIS, J. C. *Breve história da física moderna – A belle-époque da ciência*, vol. 4. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor Ltda., 2008.

Calor é energia

A ideia de que o calor é energia foi introduzida por Rumford, um engenheiro militar que, em 1798, trabalhava na perfuração de canos de canhão. Observando o aquecimento das peças ao serem perfuradas, Rumford percebeu que era possível atribuir esse aquecimento ao **trabalho** que era realizado contra o atrito, na perfuração. Em outras palavras, a **energia** empregada na realização daquele trabalho era transferida para as peças, provocando a elevação de suas temperaturas. Portanto, a antiga ideia de que objetos mais aquecidos possuíam maior quantidade de **calórico** (substância fluida, invisível, de peso desprezível) começava a ser substituída pela concepção de que esses objetos possuem, realmente, maior quantidade de **energia**.

A divulgação dessa hipótese provocou muitas discussões entre os cientistas do século XIX. Alguns deles realizaram experiências que vieram a confirmar as suposições de Rumford. Entre eles, devemos destacar James P. Joule (1818-1889), pois foram experiências realizadas por ele que acabaram estabelecendo, definitivamente, que o calor é uma forma de energia.

Atualmente, considera-se que, quando a temperatura de um objeto é aumentada, a energia que ele possui em seu interior, denominada **energia interna**, também aumenta. Se esse objeto é colocado próximo ou em contato com outro, de temperatura mais baixa, haverá transferência de energia do primeiro para o segundo. Essa energia é denominada calor. Portanto, o conceito de calor passou a ser o seguinte:

Calor é a energia transferida de um objeto para outro em virtude, unicamente, de uma diferença de temperatura entre eles.

Comentários

1) O termo **calor** só deve ser usado para designar a energia em **trânsito**, isto é, enquanto está sendo transferida de um objeto para outro, em virtude de uma diferença de temperatura. A transferência de calor para um objeto acarreta aumento na energia de agitação de seus átomos e moléculas, ou seja, acarreta aumento da **energia interna** do objeto, o que, em geral, provoca elevação em sua temperatura.


North Wind picture Archives/Album/Akg-images/Latinstock

BENJAMIN THOMPSON – CONDE DE RUMFORD (1753-1814)
Engenheiro estadunidense que, durante a Revolução da Independência Americana, viu-se obrigado a se exilar na Inglaterra, onde trabalhou como alto funcionário do governo. Após ser sagrado cavalheiro pelo Rei George III, recebeu permissão para trabalhar em uma fábrica de armas em Munique. Nessa ocasião, ele iniciou estudos que o levaram a questionar a teoria do calórico, lançando as bases da moderna teoria do calor como uma forma de energia.

Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

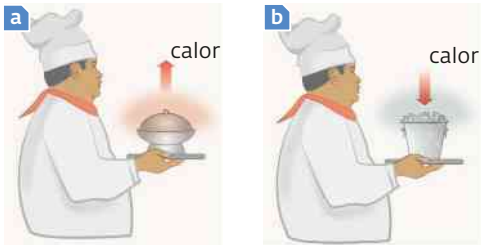


Figura 3.1. Calor é a energia que se transfere de um objeto para outro em virtude de uma diferença de temperatura entre eles.



Figura 3.2. 1 caloria é a quantidade de calor necessária para elevar de 1 °C a temperatura de 1 g de água.

A "caloria" (Cal) utilizada em nutrição, aquela que aparece no rótulo das informações nutricionais dos alimentos, na realidade equivale a 1 kcal, ou seja, 1 cal nutricional = = 1 000 cal = 1 kcal. Um jovem do sexo masculino, por exemplo, com 20 anos e 72 kg consome, em média, 2 900 kcal por dia quando está em repouso, enquanto uma jovem do sexo feminino, com mesma idade e 58 kg, consome 2 200 kcal por dia.

SABA, F. *Mexa-se*. Atividade física, saúde e bem-estar. São Paulo: Takano, 2003.

Não se pode, portanto, dizer que "um objeto possui calor" ou que "a temperatura é a medida do calor no objeto". Na realidade, o que os objetos possuem é **energia interna**, e quanto maior for sua temperatura, maior será essa energia. Naturalmente, se um objeto está a uma temperatura mais elevada do que outro, ele pode transferir parte de sua energia interna para esse outro. Tal energia transferida é o calor, que passa de um objeto para o outro **(figura 3.1)**.

2) É importante observar que a energia interna de um objeto pode aumentar sem que ele receba calor, desde que receba alguma outra forma de energia.

Por exemplo, quando agitamos uma garrafa contendo água, sua temperatura se eleva, apesar de a água não ter recebido calor. O aumento de energia interna, nesse caso, ocorreu em virtude da transferência da energia mecânica à água, ao realizarmos o trabalho de agitar a garrafa.

Unidades de calor

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Uma vez estabelecido que o calor é uma forma de energia, é necessário que uma certa quantidade de calor deva ser medida em unidades de energia. Então, no SI, mediremos o calor em **joule**, em homenagem a Joule, que descobriu as relações entre calor e trabalho mecânico.

Entretanto, na prática, outra unidade de calor é até hoje usada. Muito antiga (da época do calórico) e que não pertence ao SI, denomina-se cal. Por definição, 1 cal é a quantidade de calor que deve ser transferida a 1 g de água para que sua temperatura se eleve de 1 °C **(figura 3.2)**.

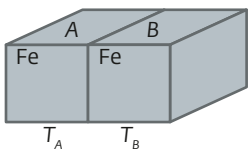
Na década de 1940, a comunidade científica decidiu que a relação entre essas duas unidades é:

$$1\ \text{cal} = 4{,}2\ \text{J}$$

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

Banco de imagens/ Arquivo da editora



1. Dois blocos idênticos, *A* e *B*, ambos de ferro, são colocados em contato e isolados de influências externas, como representado na figura ao lado. As temperaturas iniciais dos blocos são $T_A = 200\ °C$ e $T_B = 50\ °C$.

a) Depois de certo tempo, o que ocorreu com a temperatura T_A? E com T_B?

b) De acordo com os cientistas anteriores a Rumford e Joule, qual era a causa das variações das temperaturas T_A e T_B?

2. Considere, ainda, os blocos do exercício anterior. De acordo com o ponto de vista dos cientistas atuais:

a) Depois de certo tempo, o que ocorreu com a energia interna de *A*? E com a de *B*?

b) Houve transferência de energia de um bloco para outro? Em que sentido? Sim; de *A* para *B*.

c) Como se denomina essa energia transferida? Calor.

3. Uma pessoa, usando um martelo, golpeia repetidas vezes um bloco de chumbo. Verifica-se que a temperatura do bloco se eleva apreciavelmente. Lembrando-se do comentário 2, feito nesta seção, responda:

a) A energia interna do bloco de chumbo aumentou? Sim.

b) Houve alguma transferência de calor para o chumbo? Não.

c) Então, qual foi a causa do aumento da energia interna do bloco de chumbo?

4. a) No exercício 1, suponha que 100 cal foram transferidas de *A* para *B*. Qual é, em joules, o valor dessa quantidade de calor? 418 J

b) Suponha que o trabalho total realizado pelo martelo sobre o bloco de chumbo, no exercício anterior, tenha sido de 836 J. Qual quantidade de calor, em calorias, deveria ser fornecida ao bloco para provocar nele a mesma elevação de temperatura? 200 cal

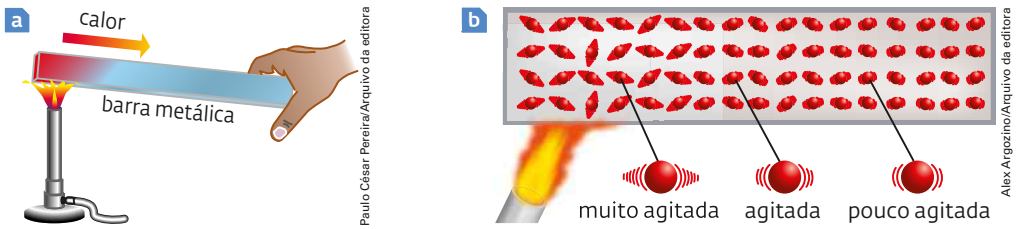
1. a) T_A diminuiu e T_B aumentou.
b) Havia passagem de calórico de *A* para *B*.
2. a) A energia interna de *A* diminuiu e a de *B* aumentou.
3.c) Trabalho realizado pelos golpes do martelo.

3.2 Transferência de calor

Condução

Suponha que uma pessoa esteja segurando uma das extremidades de uma barra metálica e que a outra extremidade seja colocada em contato com uma chama (figura 3.3.a). Os átomos ou as moléculas da extremidade aquecida pela chama adquirem maior energia de agitação. Parte dessa energia é transferida para as partículas da região vizinha a essa extremidade, e a temperatura dessa região também aumenta. Esse processo continua ao longo da barra (figura 3.3.b). Após certo tempo, a pessoa que segura a outra extremidade perceberá uma elevação de temperatura nesse local.

Sugestão de leitura: Grupo de reelaboração do ensino de Física. *Física 2*: Física térmica e óptica. São Paulo: Edusp, 1991.



As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Figura 3.3. Em uma situação como em **a**, rapidamente a extremidade da barra metálica, oposta à que está em contato com a chama, também fica aquecida. Em **b**, o calor se transfere, por condução, ao longo de um sólido, devido à agitação de seus átomos e moléculas.

Houve, portanto, transmissão de calor ao longo da barra. Esse fenômeno continuará enquanto existir uma diferença de temperatura entre as duas extremidades. Essa transmissão foi feita pela agitação dos átomos da barra, transferida sucessivamente de um átomo para outro, sem que esses átomos sofressem translação ao longo do objeto. Esse processo de transmissão de calor é denominado **condução**. A maior parte do calor transferido através dos objetos sólidos é transmitida, de um ponto a outro, por condução.

Dependendo da constituição atômica de uma substância, a agitação térmica poderá ser transmitida de um átomo para outro com maior ou menor facilidade, fazendo com que essa substância seja boa ou má condutora de calor. Assim, os metais, por exemplo, são bons condutores de calor, enquanto outras substâncias, como isopor, cortiça, porcelana, madeira, ar, gelo, lã, papel, etc., são isolantes térmicos, isto é, conduzem mal o calor.

Convecção

Quando um recipiente com água é colocado sobre uma chama, a camada de água do fundo do recipiente recebe calor, por condução. Consequentemente, o volume dessa camada aumenta e sua densidade diminui, fazendo com que ela se desloque para a parte superior do recipiente e seja substituída por água mais fria e mais densa, proveniente dessa região superior.

O processo continua, com uma circulação contínua de correntes de água mais quente para cima e mais fria para baixo, denominadas **correntes de convecção** (figura 3.4). Assim, o calor que é transmitido, por condução, às camadas inferiores, é distribuído, por convecção, a toda a massa do líquido, por meio desse movimento até que a temperatura de ebulição do líquido seja atingida. A transferência de calor nos líquidos e gases pode ocorrer por condução, mas o processo de convecção é o responsável pela maior parte do calor transferido através dos fluidos.

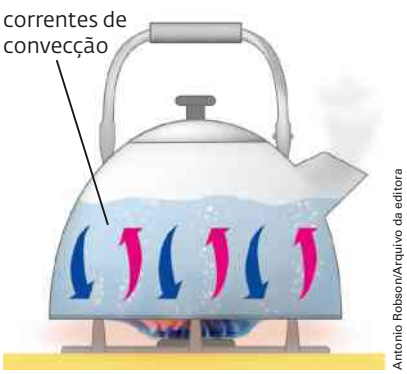


Figura 3.4. Em um líquido, o calor se transfere de um ponto a outro devido à formação de correntes de convecção.

FÍSICA NO CONTEXTO

Condução de calor



Wolfgang Kruck/Shutterstock

Figura 3.5. As lontras marinhas têm pelos mais densos que aprisionam uma fina camada de ar logo acima da pele do animal, o que é um bom isolante térmico.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

A temperatura de nosso corpo é geralmente mantida em torno de 36 °C, enquanto a do ambiente é, em geral, inferior. Por esse motivo, há uma contínua transmissão de calor de nosso corpo para o meio ambiente. Se a temperatura do ambiente for muito baixa, essa transmissão acontece com maior rapidez, aumentando a sensação de frio. Os agasalhos atenuam essa sensação porque são feitos de materiais isolantes térmicos (lã, por exemplo), reduzindo, assim, a rapidez com que a quantidade de calor é transmitida de nosso corpo para o exterior.

É também para obter esse efeito que, em dias frios, as aves eriçam suas penas, de modo a manter, entre elas, camadas de ar, que é um bom isolante térmico. Os mamíferos, como lontras marinhas, baleias, e ursos polares, também dispõem de pelo e/ou gordura que são excelentes isolantes térmicos **(figura 3.5)**. Para subir nas montanhas acima de 6 000 metros de altitude, é necessário vestir botas especiais com dupla proteção **(figura 3.6)**.

Quando tocamos em uma peça de metal e em um pedaço de madeira, ambos numa mesma temperatura mais baixa que a do nosso corpo, o metal nos dá a sensação de estar mais frio do que a madeira. Isto ocorre porque, sendo o metal melhor condutor térmico do que a madeira, haverá maior transferência de calor de nossa mão para a peça metálica do que para o pedaço de madeira.

Na verdade, nossa sensação térmica está relacionada com o fluxo de calor através da nossa pele.



Reprodução/<http://www.sunrisemountainsports.com/>

Figura 3.6. Botas utilizadas para caminhar em regiões onde a temperatura pode alcançar −15 °C.

FÍSICA NO CONTEXTO

Correntes de convecção

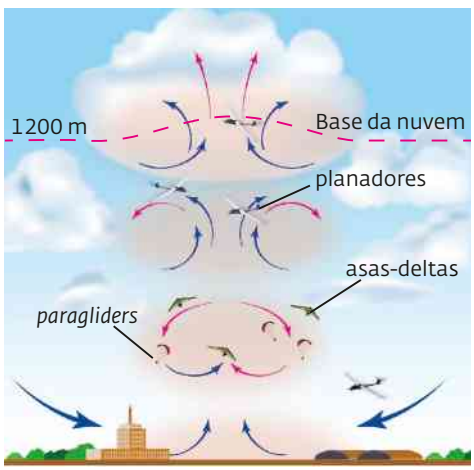


Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 3.7. No interior de uma geladeira formam-se correntes de convecção.

Podemos encontrar, em nossa vida diária, várias situações em que as correntes de convecção desempenham um papel importante. Na parte superior de algumas geladeiras, por exemplo, as camadas de ar, em contato com o congelador, cedem calor ao ar por condução. Por causa disso, o ar dessa região torna-se mais denso e dirige-se para a parte inferior da geladeira, enquanto as camadas de ar dessa parte se deslocam para cima **(figura 3.7)**. Essa circulação de ar, causada pela convecção, faz com que a temperatura seja, aproximadamente, a mesma em todo o interior da geladeira.

A formação de correntes térmicas se deve a variações da densidade do ar, que é o resultado de correntes de convecção que ocorrem na atmosfera **(figura 3.8)**. As correntes de convecção na atmosfera, ao se moverem para cima (ar mais quente), costumam ser aproveitadas por alguns pássaros, e também por pilotos de aviões planadores (sem motor) e de asas-deltas para ganhar altura, planando em seguida (perdendo altitude), até encontrar outra corrente de convecção ascendente. No caso dos dispositivos de voo, torna-se possível percorrer enormes distâncias sem consumo de combustível.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 3.8. Esquema da formação de nuvens através de correntes térmicas. O vapor de água presente na atmosfera, ao ser aquecido, vai se condensar, formando as nuvens. As correntes produzidas pela diferença de temperatura permitem o voo de planadores, *paragliders* e asas-deltas.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Radiação

Suponha que uma fonte de calor como uma lâmpada fluorescente, por exemplo, seja colocada no interior de uma campânula de vidro, onde se fez vácuo. Um termômetro, situado no exterior da campânula, acusará elevação de temperatura, mostrando que houve uma transmissão de calor através do vácuo existente entre a lâmpada acesa e o exterior **(figura 3.9)**.

Essa transmissão não pode ter sido feita por condução ou por convecção, pois esses processos só podem ocorrer quando há um meio material através do qual o calor é transmitido. Nesse caso, a transmissão de calor foi feita por outro processo, denominado **radiação térmica**. O calor que recebemos do Sol chega até nós por esse mesmo processo, uma vez que entre o Sol e a Terra existe vácuo.

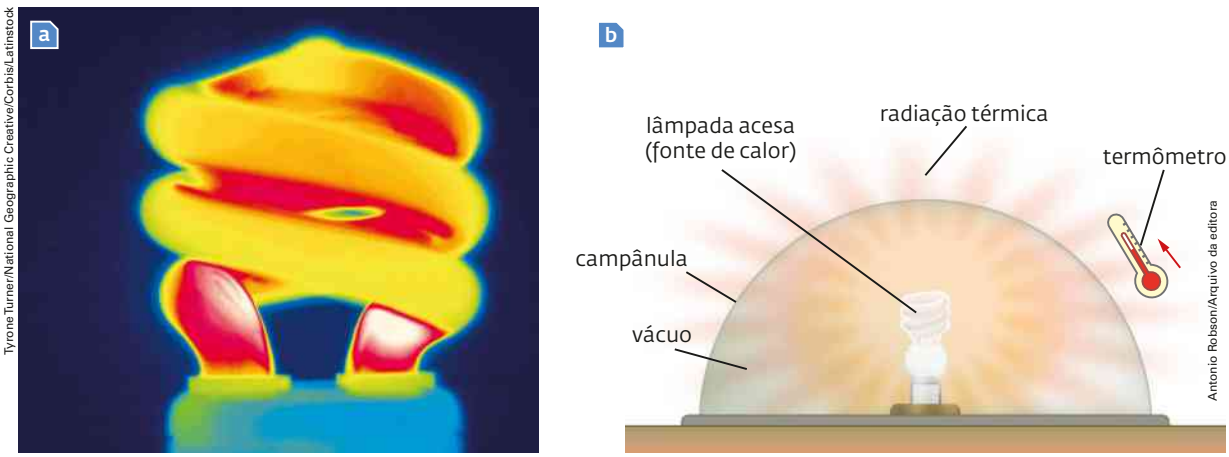


Figura 3.9. Em **a**, temos uma imagem térmica obtida por captação de radiação infravermelha de uma lâmpada fluorescente. Em **b**, a representação (sem escala e em cores fantasia) do calor emitido pela lâmpada, o qual se propaga, no vácuo, por radiação.

Todos os corpos aquecidos emitem radiações térmicas que, ao serem absorvidas por outro corpo, podem provocar, nele, uma elevação de temperatura. Quando um corpo está mais quente que o meio onde ele se encontra, ele vai esfriar até atingir o equilíbrio térmico, pois a taxa de emissão de energia é maior do que a taxa de absorção.

Em Física, radiação significa transferência de energia por ondas eletromagnéticas. Toda onda eletromagnética é capaz de se propagar no vácuo com a velocidade da luz. A luz que enxergamos é um exemplo de onda eletromagnética, assim como também o são as ondas de rádio, as micro-ondas, a radiação infravermelha, a radiação ultravioleta, os raios X e os raios gama.

O que diferencia esses vários tipos de onda eletromagnética é sua frequência de vibração. A frequência de uma onda eletromagnética se relaciona com o comprimento de onda por:

$$v = \lambda f$$

em que v é a velocidade de luz ($3 \cdot 10^8$ m/s), λ é o comprimento de onda e f é a frequência.

No caso da luz, as várias cores correspondem a frequências diferentes. A luz visível se situa no espectro eletromagnético na faixa que se estende da luz vermelha

(comprimento de onda de 700 nm) até a luz violeta (comprimento de onda de 400 nm). Veja a **figura 3.10**.

O tipo predominante da radiação que transporta o calor pode variar, dependendo da temperatura do corpo aquecido. Um objeto a uma temperatura próxima do zero kelvin emite radiação térmica predominantemente na região das micro-ondas. Na temperatura ambiente, cerca de 300 K (aproximadamente 27 °C), a emissão se situa praticamente no infravermelho. Um corpo a 1 000 K (aproximadamente 727 °C) irradia a maior parte da energia no infravermelho, mas já consegue emitir radiação visível, com uma tonalidade de luz avermelhada.

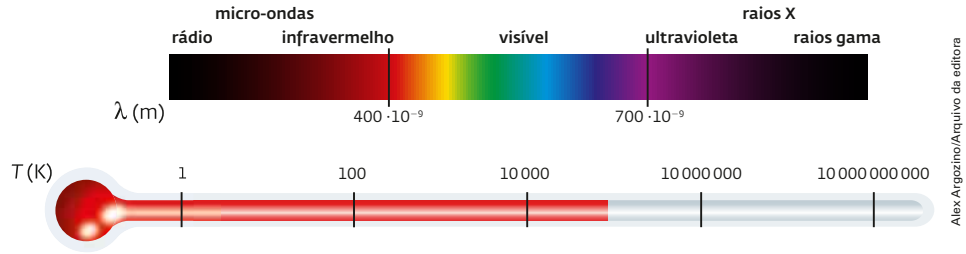


Figura 3.10. Espectro eletromagnético. Comprimento de onda relacionado com a temperatura. Representação sem escala e em cores fantasia.

O Sol, a 5 800 K (5 527 °C), emite luz branca (45% da energia irradiada) e irradia no infravermelho (45%) e no ultravioleta (10%). Em temperaturas muito altas os corpos, como as estrelas, têm luminosidade própria, logo podemos dizer que os corpos com luminosidade própria são muito quentes.

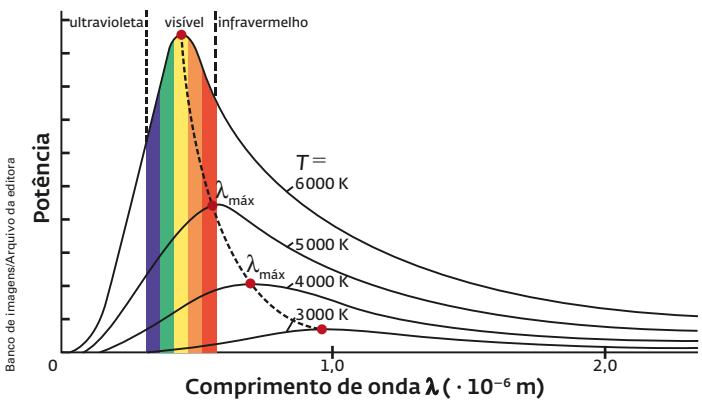
O espectro de emissão da superfície de uma estrela é similar ao espectro de um **corpo negro** (**figura 3.11**), que é um corpo opaco que emite radiação térmica. Um corpo negro perfeito pode ser definido como um corpo quente, cujas superfícies absorvem toda a radiação térmica que incide sobre ele, não podendo refleti-la. À temperatura ambiente, um corpo negro parecerá negro, o que lhe atribui o nome, mas, quando aquecido a alta temperatura, um corpo negro emitirá luz intensamente.

A **figura 3.11** representa um espectro contínuo emitido por corpos aquecidos desde 3 000 K até 6 000 K. Observe que quando a temperatura do corpo está em torno de 3 000 K a radiação emitida está na faixa do infravermelho. À medida que a temperatura do corpo aumenta, a radiação emitida vai do vermelho para o laranja até chegar ao violeta, faixa que corresponde à radiação visível percebida pelos humanos.

Podemos observar no gráfico que quanto maior a temperatura do corpo, mais radiação ultravioleta é emitida. E para cada curva de temperatura a maior quantidade de energia emitida pelo corpo ocorre no ponto de comprimento de onda máximo ($\lambda_{máximo}$).

Se considerarmos, por exemplo, o Sol (6 000 K), o pico de máximo ocorre na faixa da luz visível entre as cores amarela e verde. Mas, devido ao Sol emitir frequências em todo o espectro visível, sua cor é branco-amarelada. Observe que o espectro se desloca à medida que a temperatura (T) aumenta, esse deslocamento da curva é conhecido como lei do deslocamento de Wien.

Figura 3.11. Espectro de emissão de um corpo negro aquecido a diferentes temperaturas.



$$\lambda_{máx} \cdot T = 2{,}898 \cdot 10^{-3}\ \text{m} \cdot \text{K}$$

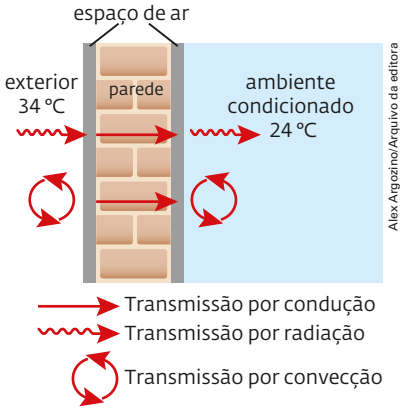
De modo geral, o calor que uma pessoa recebe quando está próxima de um corpo aquecido chega até ela pelos três processos: condução, convecção e radiação.

Quanto maior for a temperatura do corpo aquecido, maior será a quantidade de calor transmitida por radiação, como acontece quando você se encontra próximo a um forno. Uma casa, por exemplo, pode ser aquecida pela luz do sol quando os raios solares atingem a parede da residência.

Como a transmissão de calor acontece no sentido da maior temperatura para a menor, quando a luz do sol atinge uma parede a transmissão de calor acontece por radiação, condução e convecção **(figura 3.12)**. É possível isolar termicamente o ambiente interno de uma casa com relação ao meio externo. Para isso são construídas paredes duplas, ou seja, paredes constituídas por dois planos de alvenaria e um espaço com ar entre elas. Essa técnica é largamente empregada na construção civil.

Um material que tem sido utilizado para isolamento térmico é o aerogel **(figura 3.13)**. É um novo material extremamente leve porque sua estrutura interna é constituída de um grande número de cavidades muito pequenas. Sua densidade é cerca de 4 vezes a densidade do ar e, por esse motivo, é chamado de "fumaça congelada".

Além da leveza, outra propriedade notável do aerogel é aliar baixa condutividade térmica com uma boa capacidade de resistir a altas temperaturas. O aerogel pode vir a melhorar significativamente o isolamento térmico, como no caso de refrigeradores, fornos e residências em países de clima frio, contribuindo para a economia de energia.



Alex Argozino/Arquivo da editora

Figura 3.12. Representação (sem escala e em cores fantasia) da transferência de calor através de uma parede.


NREL/US Department of Energy/SPL/Latinstock

Figura 3.13. Foto de uma pessoa com sua mão encostada em uma amostra de aerogel mantida sobre a chama de um bico de Bunsen. A cena ilustra as propriedades que tornam esse material atrativo para diversas aplicações.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

5. Considere duas barras, sendo uma de metal e outra de madeira. Uma das extremidades de cada barra é introduzida em uma fornalha.
a) Você conseguiria ficar segurando, por muito tempo, a outra extremidade da barra de metal? Explique.
b) Por que seria possível segurar a extremidade livre da barra de madeira durante um tempo maior? A madeira não conduz bem o calor.

6. a) Uma pessoa afirma que seu agasalho é de boa qualidade "porque impede que o frio passe através dele". Essa afirmativa é correta? Explique.
b) Um menino descalço, em uma sala com piso cerâmico, coloca seu pé esquerdo diretamente sobre o piso e seu pé direito sobre um tapete. O tapete e o piso estão à mesma temperatura. Em qual dos dois pés o menino terá maior sensação de frio? Explique.

7. a) Quando estamos próximos a um forno muito aquecido, a quantidade de calor que recebemos por condução e convecção é relativamente pequena. Entretanto, sentimos que estamos recebendo grande quantidade de calor. Por quê? A maior parte do calor é transmitida por radiação.
b) Dois automóveis de modelos iguais, um claro e outro escuro, permanecem estacionados ao sol durante certo tempo. Qual dos dois você acha que aquecerá mais? Explique. O escuro, porque absorve mais radiação térmica solar.

8. a) Ao observar uma churrasqueira acesa, notamos que o brilho mais intenso acontece nas cavidades formadas entre os carvões em brasa. No entanto, essas são as regiões mais escuras, quando a churrasqueira está apagada. Relacione essa observação com o texto.
b) A cor de uma churrasqueira acesa varia à medida que sua temperatura aumenta. Descreva essa variação de cor.

9. Alguns gases presentes na atmosfera, como o gás carbônico e o metano, bloqueiam a radiação infravermelha emitida pela superfície da Terra, enquanto deixam passar a luz visível proveniente do Sol, que aquece a superfície terrestre ao ser por ela absorvida. Explique como isso contribui para o **efeito estufa** da Terra, tão comentado nos meios de comunicação.
Veja resposta no Manual do Professor.

Não escreva no livro!
5. a) Não; a extremidade se aquecerá porque o metal é bom condutor de valor.
6. a) Não; a maneira correta de dizer seria: o agasalho impede que o calor seja transmitido do corpo da pessoa para o exterior.
b) No pé esquerdo, porque o ladrilho é melhor condutor de calor.
8. a) As cavidades entre os pedaços de carvão possuem um comportamento de corpo negro.
b) As cores predominantes são tons de vermelho, além de tons de amarelo e branco.

FÍSICA NO CONTEXTO

ABSORÇÃO E REFLEXÃO DA RADIAÇÃO TÉRMICA

Quando a radiação térmica incide em um objeto, parte dela é absorvida, e parte é refletida por ele. Os objetos escuros absorvem a maior parte da radiação que neles incide. É por isso que um objeto negro, colocado ao sol, tem a sua temperatura sensivelmente elevada. Por outro lado, os objetos claros refletem quase totalmente a radiação térmica incidente. Por isso, nos climas quentes, as pessoas usam frequentemente roupas claras **(figura 3.14)**. Você já deve ter percebido, ao andar descalço em um dia ensolarado, que existe uma diferença de temperatura entre pisos claros e escuros, ainda que o material de ambos seja o mesmo – como a cerâmica. Essa é outra aplicação das ideias aqui discutidas.



Tyler Olson/Shutterstock

Figura 3.14. Uma pessoa com camiseta escura sob o sol absorve maior quantidade de radiação solar do que uma com camiseta clara.

SENSOR DE INFRAVERMELHO

Um dispositivo comum, o controle remoto, emite pulsos de luz infravermelha que representam códigos específicos para os comandos ligar, desligar, entre outros **(figura 3.15)**. O receptor na TV, aparelho de som ou outro aparelho eletrônico decodifica os pulsos e executa o comando solicitado. Para funcionar adequadamente, você deve apontar o controle remoto diretamente para o receptor do aparelho controlado.

Outros tipos de sensores infravermelhos funcionam por aproximação: quando um objeto se aproxima, o sensor manda um sinal para uma placa eletrônica, que aciona um dispositivo ativando a função programada **(figura 3.16)**.



Concept Photo/Shutterstock

Figura 3.15. A cada botão do controle remoto corresponde um código específico.



Aubord Dulac/Shutterstock

Figura 3.16. Torneiras acionadas com aproximação das mãos são utilizadas em locais públicos nos grandes centros urbanos.

APLICAÇÕES DA FÍSICA

Câmaras termográficas

Desde a sua descoberta, por William Herschel (1738-1822), em 1800, a radiação infravermelha foi utilizada nas mais diversas áreas da ciência. A termografia, por exemplo, é uma técnica que utiliza uma câmara termográfica **(figura 3.17)** para captar a radiação infravermelha que é emitida pelos objetos. Utilizam-se imagens termográficas na área militar desde a Segunda Guerra Mundial, quando surgiu o primeiro sistema de visão noturna **(figura 3.18)**.

No início do século XXI as câmaras termográficas começaram a ser empregadas em engenharia civil na inspeção e na manutenção de edifícios e residências. Uma das grandes vantagens da sua utilização deve-se à redução do tempo que é gasto no processo de identificação de infiltrações não visíveis **(figura 3.19)**, na detecção de fendas estruturais e na análise térmica das fugas de calor dos edifícios para melhorar o isolamento das residências em regiões frias.

Ivan Smuk/Alamy/Latinstock



Figura 3.17. Câmara termográfica mostrando a emissão de radiação infravermelha proveniente de uma residência.

Steven May/Alamy/Latinstock



Figura 3.18. Com os binóculos de visão noturna é possível identificar o movimento dos militares em treinamento durante a noite.

Fotos: Reprodução/<http://www.bdg-usa.com/>

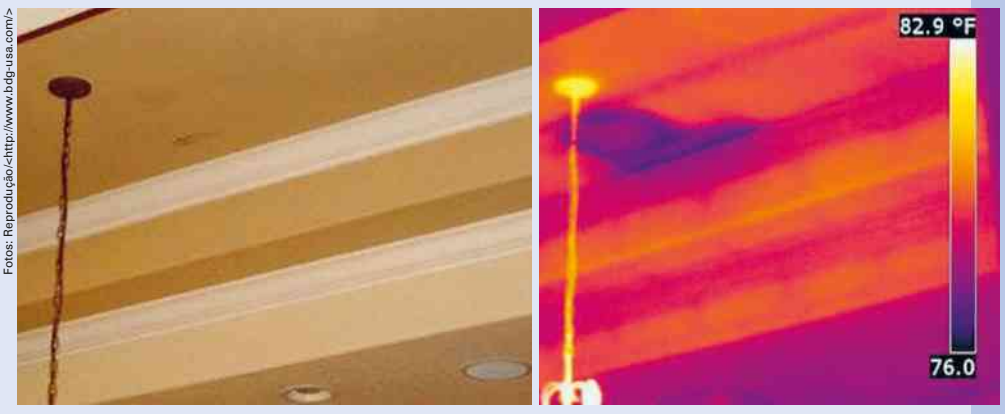


Figura 3.19. Detecção de infiltração de água nas paredes. À esquerda, as paredes e o teto parecem não ter problema algum; na foto da direita observam-se manchas escuras, que identificam infiltração.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

A termografia também tem utilização na área de saúde esportiva. Com ela é possível, por exemplo, diagnosticar lesões de forma não invasiva. Uma vez que o corpo humano emite radiação infravermelha, espera-se que os lados direito e esquerdo do corpo, em condições normais de saúde, tenham a mesma distribuição de temperatura. Assim, se uma região apresentar diferença de temperatura, o médico pode identificar a presença de lesões no músculo ou no tecido antes mesmo do processo inflamatório manifestar sintomas de dor e edema na região **(figura 3.20)**.

SPL/Latinstock

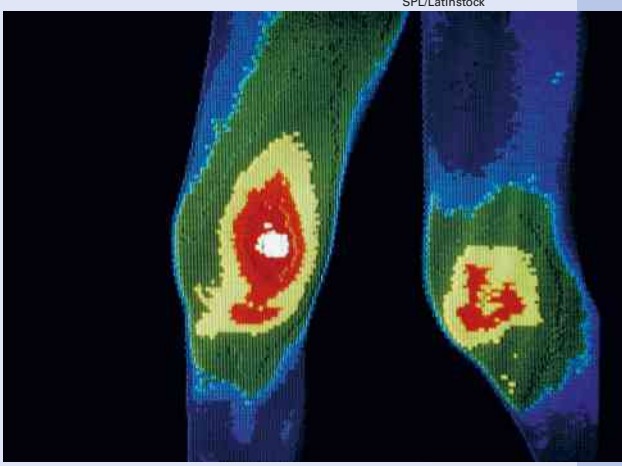


Figura 3.20. Imagem termográfica indicando diferenças de temperatura entre o joelho direito e o esquerdo de um atleta.

QUESTÕES

1. Pesquise sobre outras aplicações práticas da câmara termográfica.
   Inspeção de equipamentos elétricos e construções.
2. Nas aplicações médicas, quais são as vantagens do uso da câmara termográfica?
   É um método não invasivo de diagnóstico.

3.3 Capacidade térmica e calor específico

Capacidade térmica

Um fenômeno interessante relacionado à absorção do calor pelos corpos é o que ocorre quando objetos distintos recebem a mesma quantidade de calor. Nesses casos, é muito comum esses objetos apresentarem variações diferentes de temperatura. Observe a **figura 3.21**, que ilustra esse fato. Suponha, por exemplo, que um objeto *A* receba uma quantidade de calor igual a 100 cal e sua temperatura se eleve de 20 °C, enquanto outro objeto, *B*, ao receber a mesma quantidade de calor apresente uma elevação de apenas 10 °C em sua temperatura.

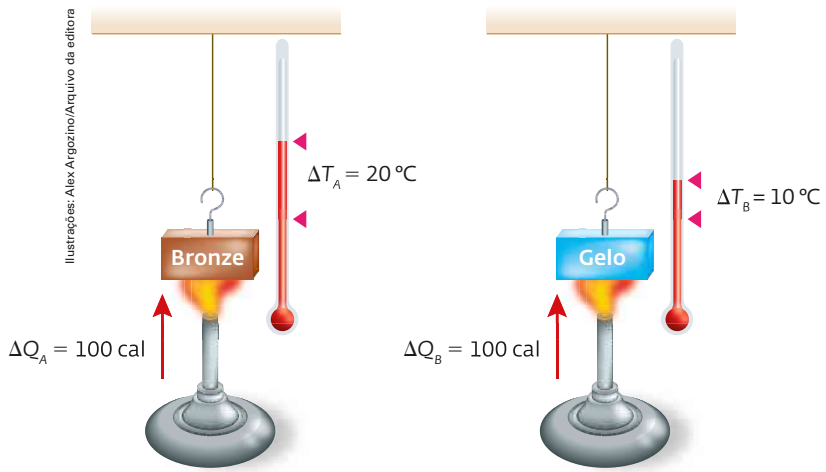


Figura 3.21. Objetos diferentes geralmente sofrem distintas variações de temperatura ao receber a mesma quantidade de calor. Representação sem escala e em cores fantasia.

Para caracterizar esse comportamento dos objetos, define-se uma grandeza, denominada **capacidade térmica**, do seguinte modo:

Se um objeto recebe uma quantidade de calor ΔQ e sua temperatura varia de ΔT, a capacidade térmica desse objeto é dada por:

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

Assim, calculando as capacidades térmicas dos objetos *A* e *B* **(figura 3.21)**, teremos:

$$C_A = \frac{\Delta Q_A}{\Delta T_A} = \frac{100\text{ cal}}{20\ °C} \quad \therefore \quad C_A = 5{,}0\text{ cal/°C}$$

$$C_B = \frac{\Delta Q_B}{\Delta T_B} = \frac{100\text{ cal}}{10\ °C} \quad \therefore \quad C_B = 10\text{ cal/°C}$$

Esses resultados indicam que devemos fornecer, ao objeto *A*, 5,0 cal para cada 1 °C de elevação em sua temperatura, enquanto, para o objeto *B*, são necessárias 10 cal para provocar esse mesmo efeito. Logo, quanto maior for a capacidade térmica de um objeto, maior será a quantidade de calor que devemos fornecer a ele para provocar determinada elevação em sua temperatura; do mesmo modo, maior será a quantidade de calor que ele cederá quando sua temperatura sofrer determinada redução.

Sendo a capacidade térmica de um objeto dada pela relação $C = \Delta Q/\Delta T$, que já usamos nesta seção, uma unidade para a medida dessa grandeza é cal/°C. O calor é uma forma de energia e pode, portanto, ser expresso em joules, e poderemos usar, também, como unidades de capacidade térmica, J/°C e J/K.

Calor específico

De modo geral, o valor da capacidade térmica varia de um objeto para outro. Mesmo que sejam feitos do mesmo material, dois objetos podem ter capacidades térmicas diferentes, desde que suas massas sejam diferentes.

Assim, se tomarmos blocos feitos do mesmo material, de massas m_1, m_2, m_3, etc. **(figura 3.22)**, suas capacidades térmicas C_1, C_2, C_3, etc. serão diferentes. Entretanto, verificou-se que, dividindo-se a capacidade térmica de cada bloco por sua massa, obtém-se o mesmo resultado, isto é:

$$\frac{C_1}{m_1} = \frac{C_2}{m_2} = \frac{C_3}{m_3} = \ldots \quad \text{(para o mesmo material)}$$

Então, o quociente C/m é constante para um dado material, variando, porém, de um material para outro. Esse quociente é denominado calor específico, c, do material.

Se um objeto de massa m tem uma capacidade térmica C, o calor específico, c, do material que o constitui é dado por:

$$c = \frac{C}{m}$$

Por exemplo, tomando-se um bloco de chumbo cuja massa é $m = 170$ g, verificamos que sua capacidade térmica é $C = 5{,}0$ cal/°C. Assim, o calor específico do chumbo vale:

$$c = \frac{C}{m} = \frac{5{,}0\ \text{cal/°C}}{170\ \text{g}} \quad \therefore \quad c \simeq 0{,}030\ \frac{\text{cal}}{\text{g °C}}$$

Observe a unidade para a medida do calor específico: cal/g °C. Poderíamos também expressá-lo em J/kg · °C ou em J/kg · K. O resultado obtido indica que, para elevar de 1 °C a temperatura de 1 g de chumbo, devemos fornecer-lhe aproximadamente 0,030 cal de calor.

Comentários

1) Sendo o calor específico característico de cada material, seus valores, para cada substância, são determinados em laboratórios, e seus números aproximados são apresentados em tabelas, como a **tabela 3.1**.

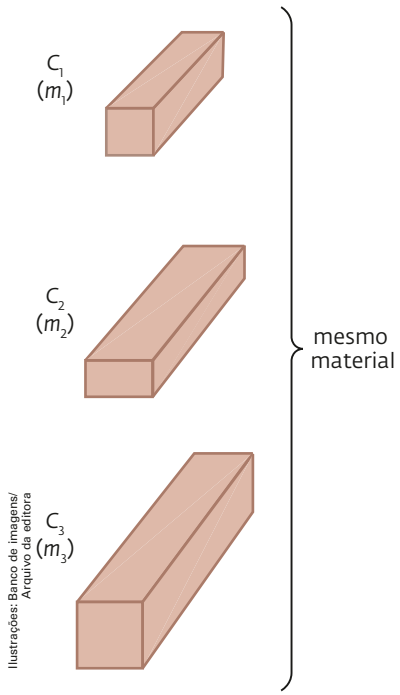


Figura 3.22. Objetos de mesmo material, mas de massas diferentes, têm capacidades térmicas diferentes. Representação sem escala e em cores fantasia.

Tabela 3.1

Calores específicos

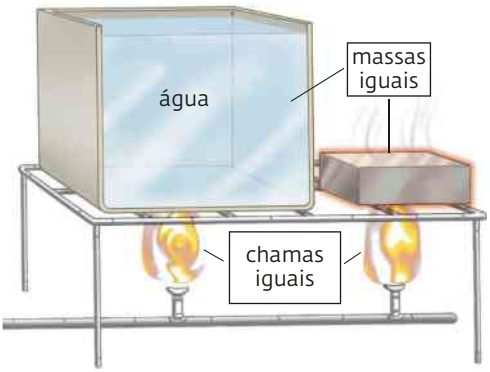
Substância	J/kg · K	cal/g · °C
Água	4 186	1,00
Gelo	2 302	0,55
Vapor de água	2 093	0,50
Etanol	2 428	0,58
Alumínio	921	0,22
Vidro	837	0,20
Ferro	449	0,11
Latão	385	0,092
Cobre	394	0,094
Prata	235	0,056
Mercúrio	140	0,033
Chumbo	129	0,031

2) Na seção 3.1 vimos que 1 cal é a quantidade de calor que deve ser fornecida a 1 g de água para que sua temperatura se eleve de 1 °C. Podemos concluir que o calor específico da água é:

$$c = 1 \frac{\text{cal}}{\text{g °C}}$$

O calor específico da água é bem maior do que os calores específicos de quase todas as demais substâncias (veja a **tabela 3.1**). Isso significa que, cedendo-se a mesma quantidade de calor a massas iguais de água e de outra substância, observa-se que a massa de água se aquece muito menos, ou seja, apresenta menor variação de temperatura **(figura 3.23)**.

3) Verifica-se que o calor específico de um material pode apresentar variações em determinadas circunstâncias. Assim, quando uma substância passa do estado sólido para o estado líquido (ou para o gasoso), seu calor específico é alterado. Por exemplo, na **tabela 3.1**, vemos que o calor específico da água (estado líquido) é 1,0 cal/g °C, enquanto o do gelo é 0,55 cal/g °C e o do vapor de água é 0,50 cal/g °C.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 3.23. Quando dois objetos de materiais diferentes e massas iguais recebem iguais quantidades de calor, o de menor calor específico sofrerá maior elevação de temperatura. Representação sem escala e em cores fantasia.

FÍSICA NO CONTEXTO

CALOR ESPECÍFICO E TEMPERATURA AMBIENTE

Acabamos de ver que, quanto maior o calor específico de uma substância, menos ela se aquece ao receber certa quantidade de calor. A água é uma das substâncias que apresenta calor específico de valor mais elevado. Por essa razão, certa massa de água (lago, rio, piscina, etc.), ao receber calor do Sol, sofre pequenas variações em sua temperatura, em comparação com outros objetos. Ainda pelo mesmo motivo, quando o Sol se põe, isto é, quando a água e os outros objetos liberam calor para o ambiente, o resfriamento da água é muito mais lento comparado aos demais objetos. Muitos organismos, que sobrevivem em uma faixa estreita de variação de temperatura, só estão vivos devido ao fato de a água possuir elevados valores de calor específico, o que faz com que ela não tenha variações bruscas de temperatura.

No deserto, por exemplo, pelo fato de a areia ter um calor específico muito pequeno, ela se aquece e se resfria com facilidade, embora os dias sejam excessivamente quentes, as noites costumam apresentar temperaturas muito baixas **(figura 3.24)**.



Blaine Harrington III/Alamy/Latinstock



Frans Lemmens/Alamy/Latinstock

Figura 3.24. Durante o dia, a temperatura no deserto é muito elevada e, durante a noite, sofre uma grande redução. Isso ocorre em virtude do pequeno calor específico da areia. Nessas regiões é indicado o uso de roupas longas e lenços para proteger a pele do sol e do vento.

Cálculo do calor absorvido por um objeto

A capacidade térmica de um objeto foi definida como sendo $C = \Delta Q/\Delta T$. Então, a quantidade de calor, ΔQ, que um objeto absorve (ou libera) quando sua temperatura varia de ΔT, é dada por:

$$\Delta Q = C \cdot \Delta T$$

Podemos, ainda, expressar ΔQ em função do calor específico, c, e da massa, m, do objeto, lembrando que $c = C/m$, ou seja, $C = m \cdot c$. Assim, teremos, para ΔQ:

$$\Delta Q = mc\Delta T$$

A quantidade de calor, ΔQ, absorvida ou liberada por um objeto de massa m e calor específico c, quando sua temperatura varia de ΔT, pode ser calculada pela relação:

$$\Delta Q = mc\Delta T$$

Exemplo

Uma barra de alumínio de 200 g, ao passar por um processo industrial, teve sua temperatura elevada de 20 °C para 140 °C. Qual foi a quantidade de calor cedida para a barra nesse processo?

Como já sabemos, essa quantidade de calor pode ser calculada por $\Delta Q = mc\Delta T$. Consultando a **tabela 3.1**, encontramos o valor do calor específico do alumínio: $c = 0{,}22$ cal/g °C. A variação de temperatura da barra foi $\Delta T = 140\,°C - 20\,°C = 120\,°C$. Assim:

$$\Delta Q = mc\Delta T = 200 \cdot 0{,}22 \cdot 120 \quad \therefore \quad \Delta Q = 5{,}3 \cdot 10^3 \text{ cal}$$

Observe que o valor de ΔQ foi expresso em calorias porque tomamos m em gramas, c em cal/g °C e ΔT em °C. Então:

$$\text{g} \cdot \frac{\text{cal}}{\text{g}\,^\circ\text{C}} \cdot {}^\circ\text{C} = \text{cal}$$

Se a temperatura da barra retornasse de 140 °C para 20 °C, ela liberaria $5{,}3 \cdot 10^3$ cal de calor, isto é, a mesma quantidade de calor que absorveu ao ser aquecida.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

10. Um bloco metálico está inicialmente à temperatura de 20 °C. Recebendo uma quantidade de calor $\Delta Q = 330$ cal, sua temperatura se eleva para 50 °C.

a) Qual é o valor da capacidade térmica do bloco? 11 cal/°C

b) Diga, com suas palavras, o significado do resultado que você encontrou em **a**.

11. Suponha que dois blocos, *A* e *B*, ambos de zinco, tenham massas m_A e m_B, tais que $m_A > m_B$.

a) O calor específico de *A* é maior, menor ou igual a *B*? Igual.

b) A capacidade térmica de *A* é maior, menor ou igual a *B*? Maior.

c) Se reduzirmos, igualmente, as temperaturas de *A* e *B*, qual deles liberará maior quantidade de calor? O bloco *A*.

12. Imagine duas conchas para sopa, de massas iguais, com o mesmo formato, uma de alumínio e outra de ferro. Ambas são mergulhadas em água em ebulição, na qual são deixadas por alguns minutos para ser esterilizadas. Em seguida, são retiradas e colocadas em recipientes diferentes contendo a mesma quantidade de água à temperatura ambiente para serem resfriadas. Consulte a **tabela 3.1** e responda:

a) Em qual dos recipientes, inicialmente à temperatura ambiente, a temperatura da água se elevará mais: no que contém a concha de ferro ou no que contém a concha de alumínio? Alumínio.

b) Explique a sua resposta, com base nos valores de calor específico dos dois metais. Veja resposta no Manual do Professor.

13. Um bloco de cobre, de massa $m = 200$ g, é aquecido de 30 °C até 80 °C.

a) Qual quantidade de calor foi cedida ao bloco? 940 cal

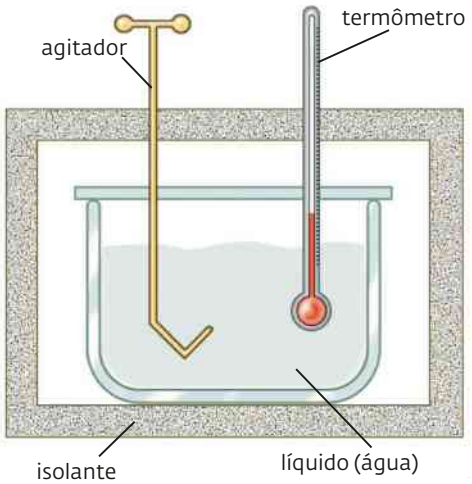
b) Se cedermos 186 cal de calor a esse bloco, quanto aumentará sua temperatura? 10 °C

Não escreva no livro!

10) b) Devemos fornecer ao bloco 11 cal para que sua temperatura se eleve 1 °C.

Calorímetro

O calorímetro é um aparelho que mede o calor trocado entre objetos colocados em seu interior, podendo-se obter, como resultado dessa medida, o calor específico de uma substância qualquer envolvida na experiência.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 3.25. Representação (sem escala e em cores fantasia) de um tipo comum de calorímetro.

A figura 3.25 representa um tipo comum de calorímetro. Ele consiste, essencialmente, em um recipiente interno, de paredes espelhadas, envolvido por outro recipiente fechado, de paredes isolantes. Com esses cuidados, consegue-se isolar termicamente o interior do calorímetro, impedindo a entrada ou a saída de calor (como em uma garrafa térmica). Comumente, o calorímetro contém um líquido (água, em geral) e é provido de dois acessórios: um termômetro e uma haste destinada a agitar o líquido, para se obter rapidamente o equilíbrio térmico da mistura colocada em seu interior.

Quando um ou mais objetos são colocados no interior de um calorímetro, sendo suas temperaturas diferentes haverá troca de calor entre eles, até que o equilíbrio térmico seja alcançado. Pelo princípio de conservação da energia, concluímos que, após ser atingido o equilíbrio térmico:

O calor total liberado pelos objetos que se esfriaram é igual ao calor total absorvido pelos objetos que se aqueceram.

$$\text{calor cedido} = \text{calor absorvido}$$

$$\Sigma Q = 0, \text{ ou seja: } Q_1 + Q_2 + Q_3 + \ldots + Q_n = 0$$

Exemplo

Um calorímetro, cuja capacidade térmica é 42 cal/°C, contém 90 g de água. A temperatura do conjunto é de 20 °C. Coloca-se em seu interior um bloco de ferro, cuja massa é de 100 g e a temperatura é de 85 °C. Após ser atingido o equilíbrio térmico, a temperatura da mistura é de 25 °C. Determine o calor específico do ferro.

Observe que o bloco de ferro se esfriou (de 85 °C para 25 °C) enquanto a água e o calorímetro se aqueceram (de 20 °C para 25 °C). Lembrando que, quando um objeto se aquece ou se esfria, o calor que ele absorve ou libera é dado por $\Delta Q = C\Delta T$ ou por $\Delta Q = mc\Delta T$, podemos escrever:

- calor cedido pelo ferro $= 100 \cdot c \cdot (85 - 25)$;
- calor absorvido pela água $= 90 \cdot 1 \cdot (25 - 20)$;
- calor absorvido pelo calorímetro $= C\Delta T = 42 \cdot (25 - 20)$.

Usando a igualdade

$$\textbf{calor cedido} = \textbf{calor absorvido}$$

teremos:

$$100 \cdot c \cdot (85 - 25) = 90 \cdot 1 \cdot (25 - 20) + 42 \cdot (25 - 20)$$

Resolvendo essa equação, obtemos, para o calor específico do ferro:

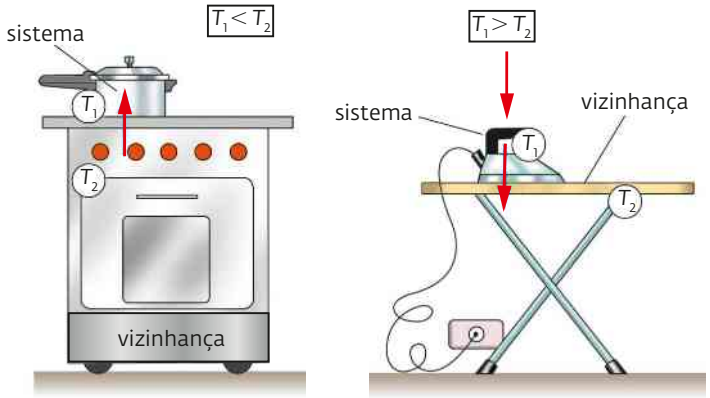
$$c = 0{,}11 \text{ cal/g °C}$$

3.4 Trabalho em uma variação de volume

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

O que é um sistema

A palavra **sistema** é usada, na Física, para designar um objeto, ou um conjunto de objetos, a serem analisados. Tudo aquilo que não pertencer ao sistema, isto é, o entorno denomina-se **vizinhança** do sistema. Um sistema pode trocar energia com a sua vizinhança sob a forma de calor ou pela realização de trabalho. Realmente, se há uma diferença de temperatura entre o sistema e a vizinhança, certa quantidade de calor Q poderá ser transferida de um para o outro (figura 3.26).



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 3.26. Um sistema pode trocar energia com a vizinhança sob a forma de calor. A seta vermelha indica o sentido em que ocorre a transferência de calor.

Além disso, o sistema pode se expandir, vencendo uma pressão externa e, portanto, realizando trabalho sobre a vizinhança (figura 3.27.a) ou, ainda, o sistema poderá ter o seu volume reduzido, com a realização de um trabalho da vizinhança sobre ele (figura 3.27.b).

Nas seções anteriores, já analisamos as trocas de calor entre um sistema e sua vizinhança. Nesta seção, analisaremos o trabalho realizado nas variações de volume do sistema e, na seção seguinte, estudaremos a 1ª lei da Termodinâmica, que estabelece uma relação entre as energias que um sistema pode trocar com sua vizinhança.

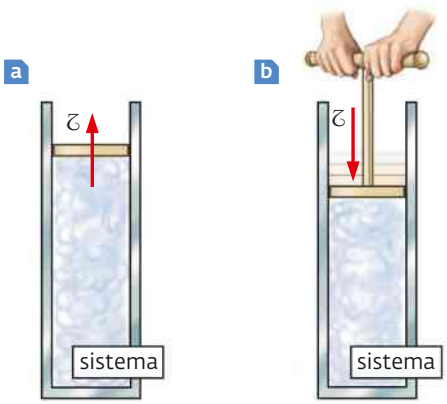


Figura 3.27. Um sistema pode trocar energia com a vizinhança por meio da realização de trabalho.

Trabalho realizado em uma expansão

Para simplificar nosso estudo, consideraremos como sistema um gás ideal, encerrado em um cilindro provido de um êmbolo (pistão) que pode se deslocar livremente.

Suponha que o gás se encontre em um estado inicial i, ocupando um volume V_i (figura 3.28). Em virtude da pressão do gás, ele exerce uma força $\vec{F}$ sobre o pistão, que, estando livre, percorre um espaço ΔS. Assim, o gás se expandiu até o estado final f, no qual o seu volume é V_f, e realizou um trabalho $\mathcal{C}$. Se a pressão, p, do gás permanecer constante (transformação isobárica), o valor da força $\vec{F}$ também será constante durante a expansão, e o trabalho, $\mathcal{C}$, realizado pelo gás, pode ser calculado. De fato, para esse caso (força constante e no mesmo sentido do deslocamento), temos:

$$\mathcal{C} = F \cdot \Delta S$$

Mas $F = pA$, em que A é a área do pistão (figura 3.28). Então:

$$\mathcal{C} = pA\Delta S$$

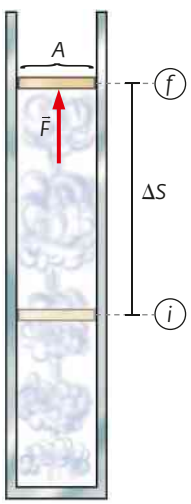


Figura 3.28. Quando um gás se expande isobaricamente, o trabalho que realiza é dado por $\mathcal{C} = p(V_f - V_i)$.

Observe, porém, que $A\Delta S$ é o volume "varrido" pelo pistão durante a expansão, que é igual à **variação** do volume do gás, isto é, $A\Delta S = V_f - V_i$. Logo:

$$\mathcal{C} = p(V_f - V_i)$$

Portanto, essa expressão nos permite calcular o trabalho que um gás realiza, ao sofrer uma variação de volume, **sob pressão constante**.

Exemplo

Suponha que, na figura 3.27, o gás se expandiu, exercendo uma pressão constante $p = 2{,}0$ atm, desde o volume $V_i = 200\ cm^3$ até o volume $V_f = 500\ cm^3$. Qual o trabalho realizado pelo gás nessa expansão?

Como se trata de uma expansão isobárica, esse trabalho é dado por:

$$\mathcal{C} = p(V_f - V_i)$$

Para obter o valor de $\mathcal{C}$ em joules, isto é, no Sistema Internacional, devemos expressar p em N/m^2 e os volumes em m^3. Seja $1\ atm = 1{,}01 \cdot 10^5\ Pa = 1{,}01 \cdot 10^5\ N/m^2$. Então:

$$p = 2{,}0\ atm = 2{,}02 \cdot 10^5\ N/m^2$$

Sendo $1\ cm^3 = 10^{-6}\ m^3$, obtemos:

$$V_i = 200\ cm^3 = 2{,}00 \cdot 10^{-4}\ m^3 \quad \text{e} \quad V_f = 500\ cm^3 = 5{,}00 \cdot 10^{-4}\ m^3$$

Logo:

$$\mathcal{C} = p(V_f - V_i) = 2{,}02 \cdot 10^5(5{,}00 \cdot 10^{-4} - 2{,}00 \cdot 10^{-4}) \text{ ou } \mathcal{C} = 60{,}6\ J$$

Trabalho positivo e trabalho negativo

A expressão $\mathcal{C} = p(V_f - V_i)$ pode ser usada, também, para calcular o trabalho realizado quando o gás é **comprimido** isobaricamente. Na expansão, como $V_f > V_i$, a diferença $V_f - V_i$ é positiva, e o trabalho realizado é positivo: dizemos que o **trabalho foi realizado pelo sistema**. Na compressão, como $V_f < V_i$, a diferença $V_f - V_i$ é negativa, e o trabalho realizado é negativo: dizemos que o **trabalho foi realizado sobre o sistema**. Assim, no exemplo que acabamos de resolver, o gás realizou um trabalho positivo, de 60,6 J, ao se expandir.

De maneira geral, sempre que um sistema aumenta de volume (trabalho positivo) dizemos que ele realiza trabalho; quando diminui de volume (trabalho negativo), dizemos que um trabalho foi realizado sobre ele. Assim, se o volume do sistema for mantido constante (transformação isovolumétrica), o sistema não realiza trabalho, nem trabalho é realizado sobre ele, isto é, $\mathcal{C} = 0$.

Verifique o que aprendeu

Não escreva no livro!

14. A figura 3.27.a representa um sistema de um gás em expansão. Observe essa figura e responda:

a) A variação de volume do gás foi positiva, negativa ou nula? Positiva.

b) O trabalho realizado foi positivo, negativo ou nulo? Positivo.

c) Nesse caso, dizemos que o trabalho foi realizado pelo sistema ou sobre ele? Pelo sistema.

15. Considere um gás dentro de um cilindro provido de um pistão. O gás é aquecido, mas seu volume permanece constante.

a) O gás está exercendo força sobre o pistão? Sim.

b) O que ocorre com o valor dessa força durante o aquecimento? Aumenta.

c) Há deslocamento do pistão? Não.

d) Qual é o valor do trabalho realizado? $\mathcal{C} = 0$

3.5 A 1ª lei da Termodinâmica

Energia interna

Na seção 3.1 nos referimos à **energia interna** de um objeto e vimos que ela representa a soma das diversas formas de energia que os átomos e as moléculas do objeto possuem. No estudo de um **sistema** qualquer, sua energia interna, representada por U, é a energia total existente em seu interior.

Quando um sistema vai de um estado inicial, i, a um estado final, f, ele geralmente troca energia com a vizinhança. Consequentemente, sua energia interna sofre variações, passando de um valor inicial U_i para um valor final U_f, ou seja, a energia interna varia de:

$$\Delta U = U_f - U_i$$

A primeira lei

Consideremos um sistema, como o gás da **figura 3.29.a**, ao qual cedemos uma quantidade de calor $Q = 100$ J. Essa energia será acrescentada ao interior do sistema e, pelo **princípio de conservação da energia**, tenderia a provocar um aumento $\Delta U = 100$ J na sua energia interna. Entretanto, suponha que o sistema, simultaneamente, tenha se expandido, realizando um trabalho $\mathcal{C} = 30$ J sobre a vizinhança **(figura 3.29.a)**.

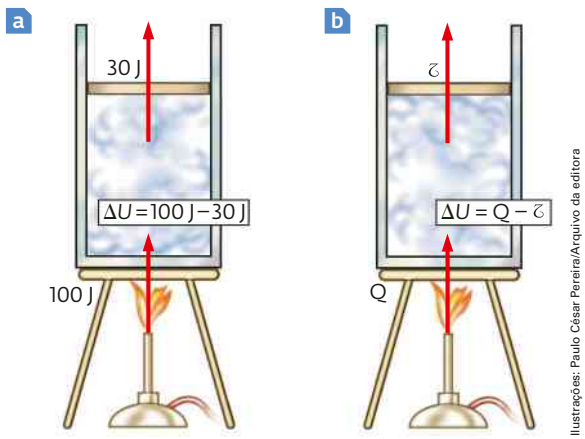
Esse trabalho será feito com a utilização da energia interna do sistema, que tende a diminuir 30 J. Assim, se a energia interna tende a aumentar de 100 J (calor absorvido) e a diminuir de 30 J (trabalho realizado), será observada uma variação, ΔU, da energia interna do sistema, cujo valor é:

$$\Delta U = 100\text{ J} - 30\text{ J} \quad \therefore \quad \Delta U = 70\text{ J}$$

Generalizando, se um sistema absorve uma quantidade de calor Q e realiza um trabalho $\mathcal{C}$ **(figura 3.29.b)**, o princípio de conservação da energia nos permite concluir que sua energia interna sofrerá uma variação ΔU dada por:

$$\Delta U = Q - \mathcal{C}$$

Essa expressão poderá ser usada mesmo quando o sistema ceder calor à vizinhança, mas, nesse caso, deve-se atribuir a Q um sinal negativo, pois a liberação de calor contribui para **diminuir** a energia interna do sistema. Ainda quando o trabalho é realizado **sobre** o sistema, a relação $\Delta U = Q - \mathcal{C}$ continua válida, devendo-se lembrar que, agora, $\mathcal{C}$ é negativo, como vimos na seção anterior.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 3.29. Quando um sistema absorve uma quantidade de calor Q e realiza um trabalho $\mathcal{C}$, a variação de sua energia interna é $\Delta U = Q - \mathcal{C}$. Representação sem escala e em cores fantasia.

1ª lei da Termodinâmica (Conservação da Energia)

Quando uma quantidade de calor Q é absorvida (Q positivo) ou cedida (Q negativo) por um sistema, e um trabalho $\mathcal{C}$ é realizado por esse sistema ($\mathcal{C}$ positivo) ou sobre ele ($\mathcal{C}$ negativo), a variação da energia interna, ΔU, do sistema é dada por:

$$\Delta U = Q - \mathcal{C}$$

Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

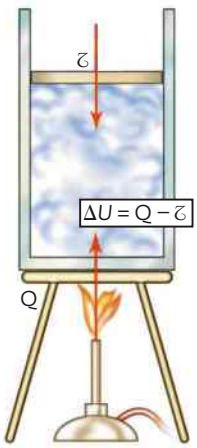


Figura 3.30. O sistema **absorve** calor e trabalho é realizado sobre ele.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

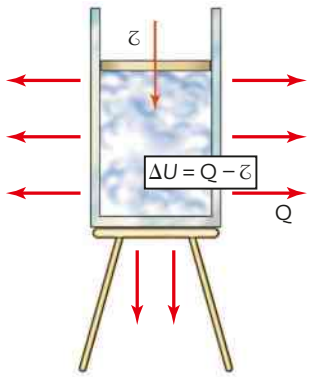


Figura 3.31. O sistema **cede** calor para o ambiente e um trabalho é realizado sobre ele.

Exemplo

Suponha que um sistema passe de um estado a outro, trocando energia com sua vizinhança. Calcule a variação de energia interna do sistema nos seguintes casos:

a) O sistema absorve 100 cal de calor e realiza um trabalho de 200 J. (Essa transformação é semelhante à representada na figura 3.29.)

A variação da energia interna é dada pela 1ª lei da Termodinâmica, isto é:

$$\Delta U = Q - \mathcal{E}$$

Nesse caso, temos $Q = 100 \text{ cal} = 418 \text{ J}$ (pois 1 cal = 4,18 J), cujo sinal é positivo, porque se trata de calor absorvido pelo sistema. O valor $\mathcal{E} = 200 \text{ J}$ também é positivo, porque o trabalho foi realizado pelo sistema. Então:

$$\Delta U = 418 - 200 \quad \therefore \quad \Delta U = 218 \text{ J}$$

Esse resultado nos diz que a energia interna do sistema aumentou de 218 J.

b) O sistema absorve 100 cal de calor e um trabalho de 200 J é realizado sobre ele (figura 3.30).

Como no caso anterior, $Q = 100 \text{ cal} = 418 \text{ J}$ e é positivo. Entretanto, temos agora $\mathcal{E} = -200 \text{ J}$, pois o trabalho foi realizado sobre o sistema. Assim:

$$\Delta U = Q - \mathcal{E} = 418 - (-200) \quad \therefore \quad \Delta U = 618 \text{ J}$$

Portanto, a energia interna sofreu um acréscimo de 618 J, uma vez que tanto o calor fornecido ao sistema (418 J) quanto o trabalho realizado sobre ele (200 J) representam quantidades de energia transferidas para o sistema.

c) O sistema libera 100 cal de calor para a vizinhança e um trabalho de 200 J é realizado sobre ele (figura 3.31).

Temos, nesse caso, $Q = -100 \text{ cal} = -418 \text{ J}$ e $\mathcal{E} = -200 \text{ J}$, pois o calor foi cedido pelo sistema e o trabalho foi realizado sobre ele. Logo:

$$\Delta U = Q - \mathcal{E} = -418 - (-200) \quad \therefore \quad \Delta U = -218 \text{ J}$$

A energia interna do sistema diminuiu de 218 J, pois o sistema perdeu 418 J sob a forma de calor e recebeu 200 J pelo trabalho realizado sobre ele.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

16. Suponha que um gás, mantido a volume constante, liberasse 170 cal de calor para sua vizinhança.
a) Qual foi o trabalho realizado pelo gás? Zero.
b) Qual foi, em calorias, a variação da energia interna do gás? $\Delta U = -170$ cal
c) A energia interna do gás aumentou, diminuiu ou não variou? Diminuiu.

17. Quando um sistema troca energia com sua vizinhança:
a) Se o sistema absorve calor, sua energia interna tenderá a aumentar ou a diminuir? Então, nesse caso, em $\Delta U = Q - \mathcal{E}$, Q deverá ser positivo ou negativo? Aumentar; positivo.
b) Se o sistema libera calor, sua energia interna tenderá a aumentar ou a diminuir? Então, em $\Delta U = Q - \mathcal{E}$, Q deverá ser positivo ou negativo? Diminuir; negativo.

18. Um sistema sofre uma transformação na qual ele absorve 50 cal de calor e se expande, realizando um trabalho de 320 J.
a) Qual é, em joules, o calor absorvido pelo sistema? (Considere 1 cal = 4,2 J.) 210 J
b) Calcule a variação de energia interna do sistema. $\Delta U = -110$ J
c) Interprete, como foi feito no exemplo desta seção, o significado da resposta da questão **b**.

18. c) A energia interna do sistema diminui 110 J, porque ele realiza um trabalho de 320 J, que é maior do que o calor de 210 J que foi absorvido.

3.6 Aplicações da 1ª lei da Termodinâmica

Após estudar a 1ª lei da Termodinâmica, vamos aplicá-la a algumas situações particulares, para obter informações sobre a energia interna de um sistema nessas ocasiões. Iniciaremos essa análise estudando a **transformação adiabática**.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Transformação adiabática

Considere um gás confinado em um cilindro, cujas paredes são feitas de um material isolante térmico **(figura 3.32)**. Em virtude disso, se esse gás se expandir (ou for comprimido), ele não poderá ceder nem receber calor da vizinhança. Uma transformação como essa, em que o sistema não troca calor com a vizinhança, isto é, $Q = 0$, é denominada **transformação adiabática**.

Quando um gás sofre uma expansão (ou compressão) rápida, mesmo que as paredes do recipiente não sejam isolantes, essa transformação pode ser considerada adiabática, $Q = 0$.

Aplicando a 1ª lei da Termodinâmica, $\Delta U = Q - \mathcal{C}$, a uma transformação adiabática, como temos $Q = 0$, obtemos:

$$\Delta U = -\mathcal{C}$$

Analisemos esse resultado. Supondo que o gás tenha se expandido, o trabalho $\mathcal{C}$ que ele realizou será positivo. Então, na expressão anterior obtemos um ΔU negativo, isto é, a energia interna do sistema diminuiu.

Uma diminuição na energia interna de um gás acarreta uma redução em sua temperatura. Logo, quando um gás se expande adiabaticamente, sua temperatura diminui. Podemos constatar esse fato deixando um gás comprimido expandir-se rapidamente (transformação adiabática) e observando que ele realmente se resfria **(figura 3.33)**.

Suponha, agora, que o sistema tenha sido comprimido. Nesse caso, $\mathcal{C}$ será negativo. Da expressão $\Delta U = -\mathcal{C}$, obtemos ΔU positivo, isto é, a energia interna do gás aumenta e, consequentemente, haverá um aumento em sua temperatura. Você poderá verificar esse efeito se tampar, com um de seus dedos, a saída de ar de uma bomba de encher pneu e comprimir rapidamente o pistão (compressão adiabática): com o dedo você perceberá a elevação de temperatura do ar que foi comprimido no interior da bomba **(figura 3.34)**.

Transformação isotérmica

A **figura 3.35** representa um gás absorvendo uma quantidade de calor Q e se expandindo, realizando um trabalho $\mathcal{C}$. Se o trabalho que o gás realiza for igual ao calor que ele absorve, isto é, se $Q = \mathcal{C}$, teremos, pela 1ª lei da Termodinâmica:

$$\Delta U = Q - \mathcal{C} \quad \therefore \quad \Delta U = 0$$

ou seja,

$$U = \text{constante}$$

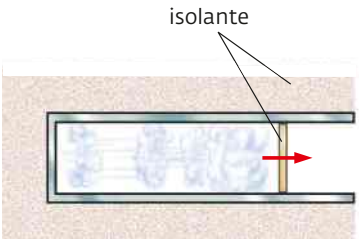


Figura 3.32. Quando um gás se expande adiabaticamente, ele realiza trabalho, mas não recebe nem libera calor.

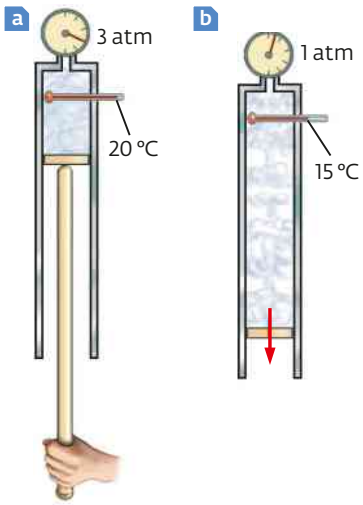
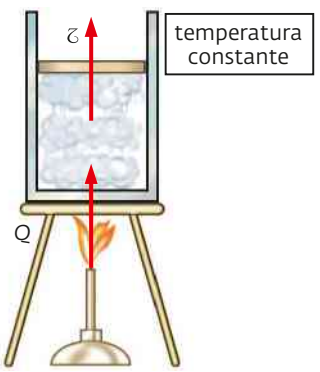


Figura 3.33. Em uma expansão adiabática, a energia interna do gás diminui e, portanto, há uma queda em sua temperatura.

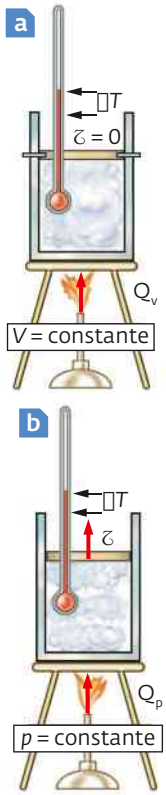


Figura 3.34. Em uma compressão rápida (adiabática), a energia interna do gás aumenta e há, portanto, uma elevação em sua temperatura.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 3.35. Quando um gás se expande isotermicamente, o trabalho que ele realiza é igual ao calor que ele absorve.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 3.36. Na experiência ilustrada na figura temos $Q_p > Q_V$. Representação sem escala e em cores fantasia.

O fato de a energia interna permanecer constante indica que a temperatura não sofreu alteração e, portanto, o gás se expandiu isotermicamente. Vimos que, para um gás se expandir isotermicamente, ele deve receber uma quantidade de calor igual ao trabalho que realiza na expansão. Do mesmo modo, para que um gás seja comprimido sem que a sua temperatura se eleve, ele deve liberar uma quantidade de calor igual ao trabalho realizado sobre ele.

Calor absorvido por um gás

Suponha que massas iguais de um mesmo gás sejam aquecidas, uma delas a volume constante e a outra a pressão constante **(figura 3.36)**. A experiência permite afirmar que, para ambas sofrerem a mesma elevação de temperatura, a quantidade de calor que devemos fornecer, a pressão constante, é maior do que aquela que devemos fornecer a volume constante ($Q_p > Q_V$ na **figura 3.36**).

O aumento da energia interna foi o mesmo para as duas massas gasosas, pois ambas experimentaram a mesma elevação de temperatura. Na **figura 3.36.a**, o gás não realizou trabalho, porque seu volume permaneceu constante. Então, pela 1ª lei da Termodinâmica, como $\mathcal{E} = 0$, teremos $\Delta U = Q_V$, isto é, todo o calor absorvido foi usado para provocar o aumento da energia interna.

Na transformação isobárica **(figura 3.36.b)**, o gás se expande e, portanto, realiza um trabalho $\mathcal{E}$. Então, o calor, Q_p, fornecido ao gás, é usado para provocar o aumento da energia interna e para realizar esse trabalho. Assim, explica-se por que, para provocar a mesma elevação de temperatura (mesma variação de energia interna), será necessário fornecer maior quantidade de calor a pressão constante do que a volume constante.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

19. b) Não (compressão adiabática).

19. Considere a compressão adiabática mostrada na **figura 3.34**.
a) A temperatura do gás aumentou? E sua energia interna? Ambas aumentaram.
b) Houve absorção de calor pelo gás?
c) Então, qual foi a causa do aumento de temperatura do gás? O trabalho realizado sobre ele.

20. Suponha que um gás, ao se expandir, absorva uma quantidade de calor $Q = 150$ cal e realize um trabalho $\mathcal{E} = 630$ J.
a) Expresse o valor de Q em joules. (Considere 1 cal = 4,2 J.) $Q = 630$ J
b) Qual é a variação da energia interna do gás? $\Delta U = 0$
c) Então, a energia interna do gás aumentou, diminuiu ou não variou? E sua temperatura? Ambas não sofreram variação.
d) Como se denomina essa transformação? Transformação isotérmica.

21. Um calorímetro, de capacidade térmica desprezível ($C = 0$), contém 50 g de água a 20 °C. Coloca-se, no interior dele, um bloco de chumbo de 200 g, à temperatura de 100 °C. Observa-se, depois de certo tempo, que a temperatura de equilíbrio é de 30 °C.
a) Sendo c o calor específico do chumbo, como podemos expressar o calor perdido por ele? $\Delta Q = 1\,400c$ cal
b) Qual foi o calor absorvido pelo calorímetro? Zero.
c) Qual foi o calor absorvido pela água? 500 cal
d) Usando suas respostas às questões anteriores, calcule o calor específico do chumbo. Aproximadamente 0,035 cal/g °C.

22. Considere um recipiente de isopor que contém 100 g de água a 20 °C. Derrama-se no interior do recipiente 200 g de água a 80 °C. Supondo que todo o calor perdido pela água quente tenha sido absorvido pela água fria, determine a temperatura final, T_f, da mistura. $T_f = 60$ °C

23. Suponha que um objeto de massa $m = 10$ kg esteja suspenso e caia de uma altura $h = 1{,}5$ m, com velocidade constante (considere $g = 10$ m/s²).
a) Qual é o valor da energia mecânica perdida por m durante a queda? 150 J
b) A energia potencial perdida por m durante a queda é transformada em energia cinética de m, em energia interna da água ou em ambas? Energia interna da água.

24. Considerando a situação descrita no exercício anterior, responda:
a) Houve transferência de calor para a água do recipiente durante a queda de m? Não.
b) Então, qual foi a causa da variação da energia interna da água? O trabalho realizado sobre a água.

3.7 Máquinas térmicas – a 2ª lei da Termodinâmica

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

O que é uma máquina térmica

Somente no século XIX os cientistas conseguiram estabelecer definitivamente que o calor é uma forma de energia. Entretanto, sabia-se, desde a Antiguidade, que o calor podia ser usado para produzir vapor, que poderia ser utilizado para realizar trabalho mecânico. Essa ideia foi usada por Heron, que no século I d.C. construiu o dispositivo representado na **figura 3.37**: o vapor formado pelo aquecimento da água, ao escapar pelos orifícios representados na imagem, colocava em rotação uma esfera de metal,ou seja, transforma calor em trabalho mecânico.

Em linguagem moderna, dizemos que esse aparelho de Heron é uma máquina térmica, isto é, um dispositivo que transforma calor em trabalho mecânico. Entretanto, essa máquina não foi usada com objetivo prático para produzir grandes quantidades de energia mecânica. Somente no século XVIII vieram a ser construídas as primeiras máquinas térmicas utilizadas em escala industrial.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 3.37. Modelo da primeira máquina térmica, projetada por Heron no século I d.C.

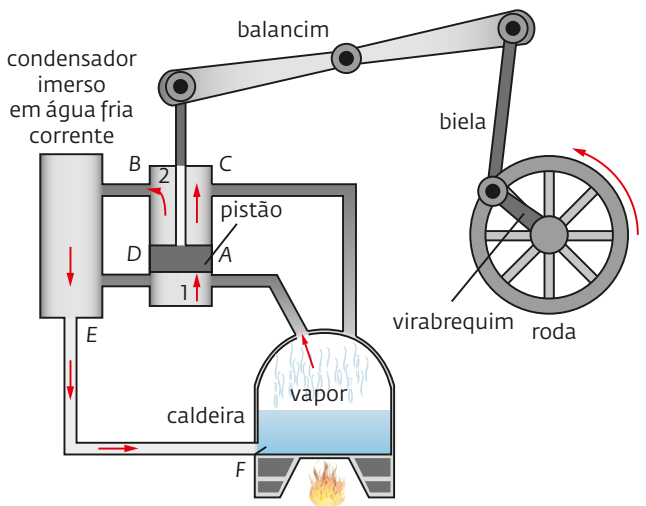
A máquina de Watt

As primeiras máquinas térmicas, construidas no século XVIII, além de precárias, apresentavam rendimentos muito baixos, isto é, consumiam grande quantidade de combustível para produzir pouco trabalho.

Por volta de 1770, o inventor escocês James Watt (1736-1819) apresentou um novo modelo de máquina térmica que substituiu, com enormes vantagens, as máquinas então existentes. A **figura 3.38** apresenta esquematicamente a máquina de Watt.

Nesta máquina o vapor é condensado, gera uma queda de pressão no interior do cilindro e faz com que o pistão retorne à posição inicial. A válvula *B* é fechada, enquanto *A* é aberta, permitindo nova admissão de vapor no cilindro, repetindo-se o ciclo. Dessa maneira, a roda acoplada ao pistão se mantém continuamente em rotação.

A máquina de Watt foi inicialmente empregada para movimentar moinhos e acionar as bombas que retiravam água de minas subterrâneas; posteriormente, em locomotivas e barcos a vapor. Além disso, a máquina a vapor passou a ser amplamente usada nas fábricas para acionar os mais diversos dispositivos industriais, sendo, por isso, considerada um dos fatores que provocaram a chamada Revolução Industrial no século XVIII, iniciada na Inglaterra.



Formato/Arquivo da editora

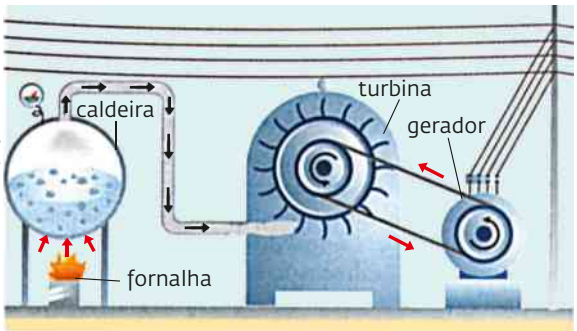
Figura 3.38. Máquina a vapor de Watt. O vapor entra no cilindro pela válvula *A* e empurra o pistão para cima. A haste do pistão aciona o balancim que, ligado à biela e ao virabrequim, transforma o movimento do pistão (na vertical) em movimento de rotação (a roda gira). Ao subir (válvula *B* aberta), o vapor que estava dentro do cilindro é empurrado para o condensador imerso em água fria corrente. Em seguida, as válvulas *A* e *B* se fecham e as *C* e *D* se abrem. O vapor é admitido no cilindro pela válvula *C*, empurrando o pistão para baixo. O balancim é obrigado a descer, continuando a mover a roda. Neste movimento do pistão, o vapor que estava na parte de baixo do cilindro é empurrado para o condensador pela válvula *D*.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Turbina a vapor

Os modelos de máquina a vapor, como a de Watt, são pouco utilizadas atualmente. Mas a energia térmica do vapor continua sendo empregada em larga escala, nas centrais termelétricas, para movimentar turbinas a vapor.

Em uma turbina a vapor, um jato de vapor, a altíssima pressão, é lançado contra um conjunto de lâminas presas a um eixo (rotor), colocando a turbina em rotação (figuras 3.39 e 3.40).



Artur Kenji Ogawa/Arquivo da editora

Figura 3.39. O vapor sob pressão, proveniente da caldeira, coloca a turbina em rotação, e esse movimento é transmitido ao gerador de energia elétrica.


Leandro Amaral/Fututra Press

Figura 3.40. Usina Euzébio Rocha, em Cubatão (SP). Devido à escassez de chuvas, os reservatórios que abastecem as usinas hidrelétricas ficam com níveis baixos de água, o que prejudica a geração de energia elétrica. Uma alternativa para amenizar o problema é o uso de usinas termelétricas, no entanto essas usinas funcionam por meio da queima de combustíveis fósseis como petróleo, gás natural ou carvão, tornando a matriz energética do país "suja" e menos renovável, além de encarecer as tarifas de energia elétrica.

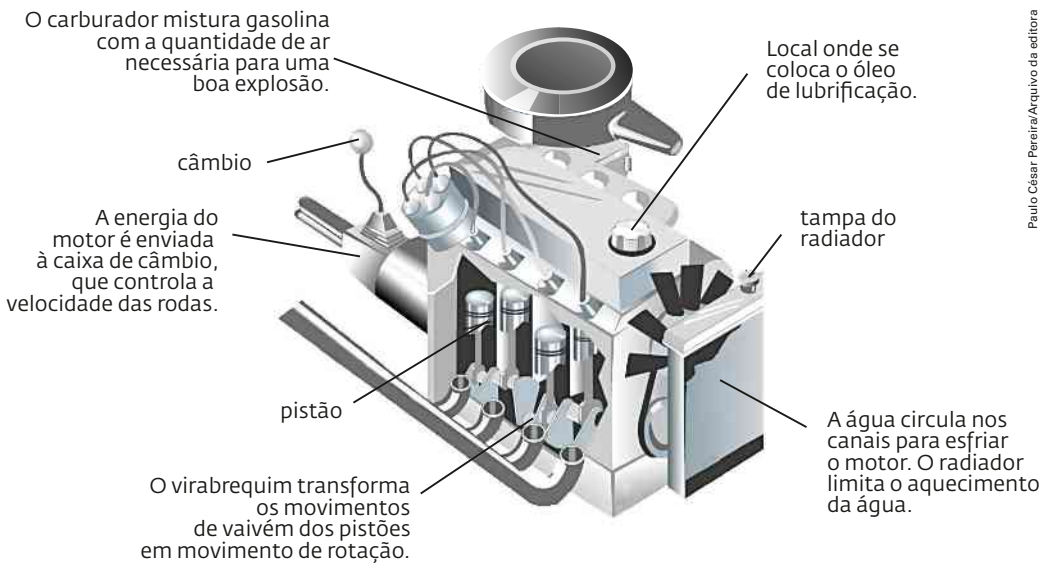
Sugestão de leitura: *Calor*: o motor das revoluções

Com um olhar voltado para o avanço da industrialização e as consequências sociais geradas nesse processo, o livro discute o desenvolvimento da termodinâmica, que está diretamente associado à evolução e ao aperfeiçoamento das máquinas térmicas.

SILVA, J. A.; PINTO, A. C.; LEITE, C. *Calor*: o motor das revoluções. São Paulo: Ed. do Brasil, 2000.

O motor de explosão

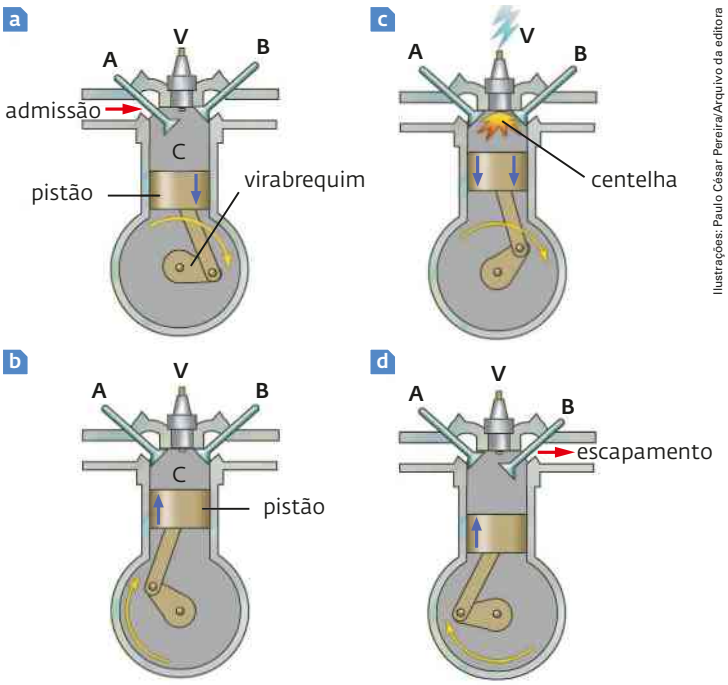
No decorrer do século XX, foram desenvolvidos vários outros tipos de máquina térmica, destacando-se os motores de explosão (combustão interna), as turbinas a vapor, os motores a jato, etc. Em particular, os motores de explosão que utilizam gasolina tornaram-se muito conhecidos em virtude de seu uso nos automóveis (figura 3.41).



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 3.41. Representação de motor de automóvel com quatro cilindros. Ao longo dos anos o carburador foi sendo substituído pelo sistema de injeção eletrônica.

Na figura 3.42 apresentamos um esquema do motor de explosão a quatro tempos, assim denominado porque seu funcionamento se faz em quatro etapas, as quais descreveremos a seguir: o cilindro possui uma válvula de admissão (*A*), uma de escapamento (*B*) e uma vela (*V*), um dispositivo destinado a produzir uma centelha (que provoca a ignição ou explosão) no momento oportuno. A mistura explosiva, constituída de gasolina, ou etanol, e ar, formada no carburador (não representado na figura), chega à câmara *C*, chamada câmara de explosão, através da válvula *A*, que é governada por um sistema de alavancas.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 3.42. Os quatro tempos do funcionamento de um motor de explosão.

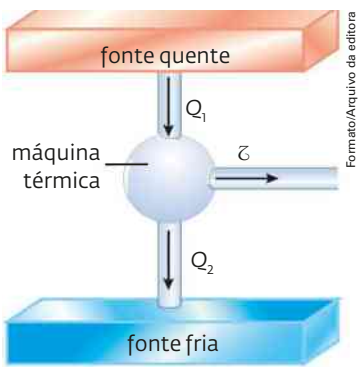
As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

- No primeiro tempo, denominado **admissão**, a válvula *A* se abre, permitindo a entrada da mistura explosiva, enquanto o pistão desce no cilindro (figura 3.42.a).
- No segundo tempo, denominado **compressão**, a mistura é comprimida na câmara *C* (o pistão sobe) e sua temperatura se eleva. Nesse tempo, as válvulas *A* e *B* permanecem fechadas (figura 3.42.b).
- No terceiro tempo, denominado **explosão** e **expansão**, a vela *V* produz uma centelha elétrica, causando a ignição da mistura explosiva. Esse é o único tempo no qual há produção de um trabalho efetivo, pois os gases quentes da combustão, por sua alta pressão, fazem o pistão descer, comunicando movimento de rotação a uma roda a ele acoplada (figura 3.42.c).
- No quarto tempo, denominado **exaustão** ou **escapamento**, a válvula *B* se abre, permitindo o escape dos gases, enquanto o pistão sobe no cilindro (figura 3.42.d).

Fechando-se a válvula *B*, uma nova descida do pistão e abertura da válvula *A* (primeiro tempo) dão início a outro ciclo.

Rendimento de uma máquina térmica

Analisando as máquinas térmicas, verificamos que existem alguns aspectos comuns ao funcionamento de todas elas. De fato, todas operam em ciclo, isto é, retornam periodicamente às condições iniciais, e cada ciclo pode ser representado, esquematicamente, como na figura 3.43. Essa figura indica que a máquina retira certa quantidade de calor Q_1 de um objeto aquecido, denominado fonte quente. Na máquina de Watt, por exemplo, a fonte quente é a fornalha que aquece a água da caldeira. A máquina utiliza parte desse calor para realizar um trabalho $\mathcal{T}$ e rejeita uma quantidade de calor Q_2 para a fonte fria. Esse calor Q_2 é transportado pelo vapor que sai ainda aquecido do cilindro e é liberado no condensador, o qual representa a fonte fria dessa máquina.



Formato/Arquivo da editora

Figura 3.43. Representação esquemática de uma máquina térmica qualquer. Na parte superior temos a fonte quente, Q_1; no centro a máquina térmica que está representada pela esfera; a parte inferior representa a fonte fria, Q_2. As setas indicam o sentido do fluxo de calor e o sentido do trabalho realizado.

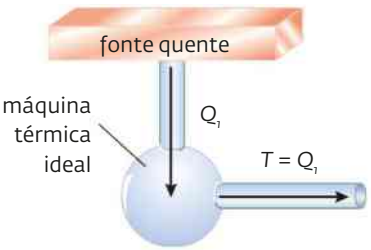
Denomina-se rendimento, R, de uma máquina térmica a relação entre o trabalho, $\mathcal{T}$, que ela realiza em cada ciclo, e o calor, Q_1, absorvido, durante o ciclo, da fonte quente, isto é:

$$R = \frac{\mathcal{T}}{Q_1}$$

Logo, o rendimento de uma máquina térmica será tanto maior quanto maior for o trabalho que ela realiza, para determinada quantidade de calor absorvido. Assim, se o rendimento de uma máquina for $R = 0{,}50$ (ou $R = 50\%$), isso significa que essa máquina transforma em trabalho a metade do calor que recebe da fonte quente.

Da **figura 3.43** e pela conservação da energia temos que $Q_1 = \mathcal{T} + Q_2$ ou $\mathcal{T} = Q_1 - Q_2$. Então, podemos expressar o rendimento de uma máquina térmica da seguinte maneira:

$$R = \frac{\mathcal{T}}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad \text{ou} \quad R = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$



Formato/Arquivo da editora

Figura 3.44. Diagrama de uma máquina térmica ideal. Representação sem escala e em cores fantasia.

A 2ª lei da Termodinâmica

Da expressão anterior podemos concluir que, se $Q_2 = 0$, isto é, se a máquina térmica, ao realizar um ciclo, não rejeitasse nenhum calor para a fonte fria, seu rendimento seria $R = 1$ (ou $R = 100\%$). Portanto, uma máquina como essa transformaria em trabalho todo o calor absorvido da fonte quente **(figura 3.44)**.

Entretanto, os cientistas perceberam que é impossível construir uma máquina como essa (com $R = 100\%$). Em outras palavras, qualquer dispositivo existente na natureza, ao efetuar um ciclo, não conseguirá transformar integralmente todo o calor que absorve de uma fonte quente em trabalho. Para completar o ciclo, o dispositivo deverá sempre rejeitar parte do calor absorvido para uma fonte fria, isto é, tem-se sempre, em qualquer máquina térmica, $Q_2 \neq 0$.

Essa conclusão constitui a 2ª lei da Termodinâmica, que foi enunciada por Kelvin, da seguinte maneira:

É impossível construir uma máquina térmica que, operando em ciclo, transforme em trabalho todo o calor a ela fornecido.


Philipus/Alamy/Other Imagens

Dessa maneira, o rendimento de qualquer máquina térmica é inferior a 100%. Na realidade, os rendimentos das máquinas térmicas mais comumente usadas estão situados muito abaixo desse limite. Por exemplo: nas locomotivas a vapor, o rendimento é cerca de apenas 10%; nos motores a diesel, nunca ultrapassa 40% **(figura 3.45)**.

Figura 3.45. Motores a *diesel*, que estão entre as máquinas mais eficientes, têm rendimento em torno de 40%.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

25. a) Explique sucintamente o que se entende por uma máquina térmica.
b) Procure descobrir qual é a fonte quente e qual é a fonte fria da máquina de Heron.

26. Observe o esquema de uma máquina térmica qualquer, mostrado na **figura 3.43**. Suponha que, em uma máquina a vapor com esse esquema, em cada ciclo a fonte quente ceda uma quantidade de calor igual a 100 calorias à máquina, e esta realize um trabalho de 84 J. Considerando 1 cal = 4,2 J, determine:
a) O rendimento da máquina térmica. 20%
b) A quantidade de calor que ela rejeita em cada ciclo para a fonte fria. 80 cal

27. Um motor a *diesel* apresenta um rendimento de 40%, realizando em cada ciclo um trabalho de 1 000 J. Calcule, em calorias, a quantidade de calor que, em cada ciclo, o motor (considere aproximadamente 1 cal = 4,2 J):
a) recebe da fonte quente; 625 cal
b) rejeita para a fonte fria. 375 cal

28. Sabe-se que o calor de combustão do óleo *diesel* é de $45 \cdot 10^3$ J/g, isto é, cada 1 g desse óleo libera $45 \cdot 10^3$ J de energia térmica, ao ser totalmente queimado. Considerando essa informação e supondo que o motor a *diesel*, referido no exercício anterior, consuma 10 g/s de combustível, determine a potência desenvolvida por ele. $1{,}8 \cdot 10^5$ W

29. Tendo em vista o que foi dito nesta seção sobre a 2ª lei da Termodinâmica, enuncie-a de três maneiras equivalentes.

30. Suponha que uma pessoa lhe informou que construiu uma máquina térmica, a qual, em cada ciclo, recebe 100 cal da fonte quente e realiza um trabalho de 418 J. Sabendo que 1 cal = 4,2 J, se essa máquina estará contrariando:
a) a 1ª lei da Termodinâmica. Não.
b) a 2ª lei da Termodinâmica. Sim.

Não escreva no livro!

25. a) Um dispositivo que transforma calor em trabalho mecânico.
b) Fonte quente: fornalha e a fonte fria: o ar ambiente.

29. É impossível construir uma máquina térmica que, operando em ciclo: 1ª) apresente rendimento igual a 100%; 2ª) transforme integralmente todo o calor que ela recebe da fonte quente em trabalho; 3ª) não rejeite calor para a fonte fria.

PRATIQUE FÍSICA EM EQUIPE

Veja comentários desta seção no Manual do Professor.

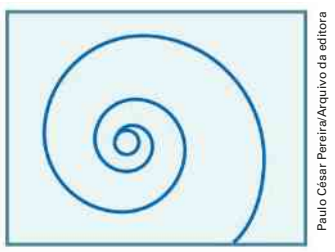
1. Realize o procedimento abaixo e observe o que acontece. Coloque uma de suas mãos nas proximidades de sua boca e, abrindo-a, sopre sobre a mão. Em seguida, sopre sobre a mão com a boca quase fechada. Você percebe a diferença de temperatura nas duas situações? Baseado nos conceitos apresentados procure explicar o observado.


João X. de Campos/Arquivo da editora

2. Tome dois recipientes idênticos, de vidro claro e transparente, como duas garrafas comuns de água. Usando uma substância escura (tinta preta, graxa de sapato, etc.), recubra totalmente a superfície externa de uma das garrafas.
Coloque a mesma quantidade de água nas duas garrafas e, em uma delas, adicione a substância escura, exponha-as ao sol (procure realizar a experiência em um dia bastante ensolarado). Depois de certo tempo, meça, com um termômetro, a temperatura da água em cada garrafa (um termômetro comum, de 0 °C a 100 °C, pode ser adquirido, por preço acessível, no comércio especializado e será útil em um grande número de experiências).
Em qual das duas garrafas a água se aqueceu mais? Explique esse resultado (lembre-se do que você aprendeu sobre absorção da radiação térmica).

3. Tome uma folha de papel (de caderno, por exemplo) e desenhe nela uma espiral, como mostra a **figura a** desta experiência. Recorte a espiral e suspenda-a por meio de uma linha fina, sobre a chama de uma vela, como mostra a **figura b**.
Observe o movimento de rotação da espiral e procure explicar por que isso ocorre (lembre-se das correntes de convecção estudadas na seção 3.2).

a


Paulo César Pereira/Arquivo da editora

b


Paulo César Pereira/Arquivo da editora

ATENÇÃO!
Realize esta atividade sob a supervisão do professor.
Tome cuidado para evitar queimadura.

Não escreva no livro!

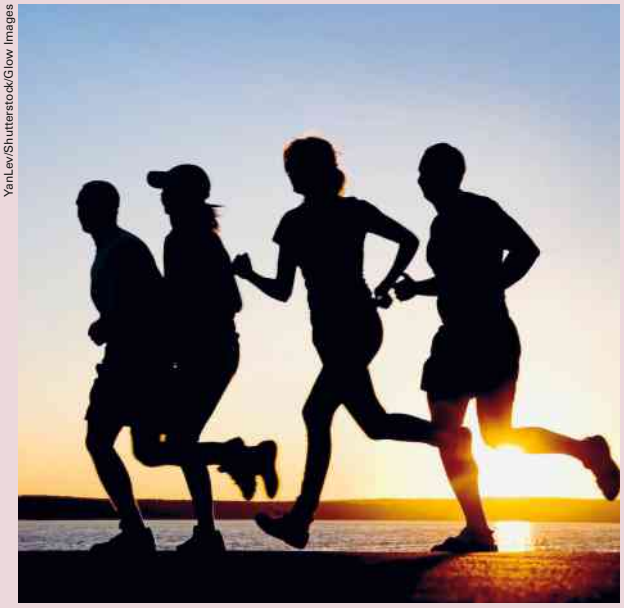
INTEGRANDO TERMODINÂMICA E CORPO HUMANO

No estudo da Termodinâmica, vimos que a primeira lei relaciona a variação de energia interna ΔU com a troca de calor Q e o trabalho τ, por meio da expressão:

$$\Delta U = Q - \tau$$

Aplicamos esta lei para sistemas gasosos, mas será que poderíamos aplicá-la aos processos energéticos do corpo humano **(figura 3.46)**?

Como dissemos, essa lei tem origem no princípio de conservação de energia. Esse princípio, por sua vez, tem validade universal, portanto inclui as trocas energéticas de nosso corpo. Nesse caso, precisamos associar a cada um dos três termos da lei um tipo diferente de energia envolvida em nossas funções biológicas. O mapa conceitual abaixo **(figura 3.47)** apresenta, de forma simplificada, as transformações de energia presentes nos processos biológicos do corpo humano.



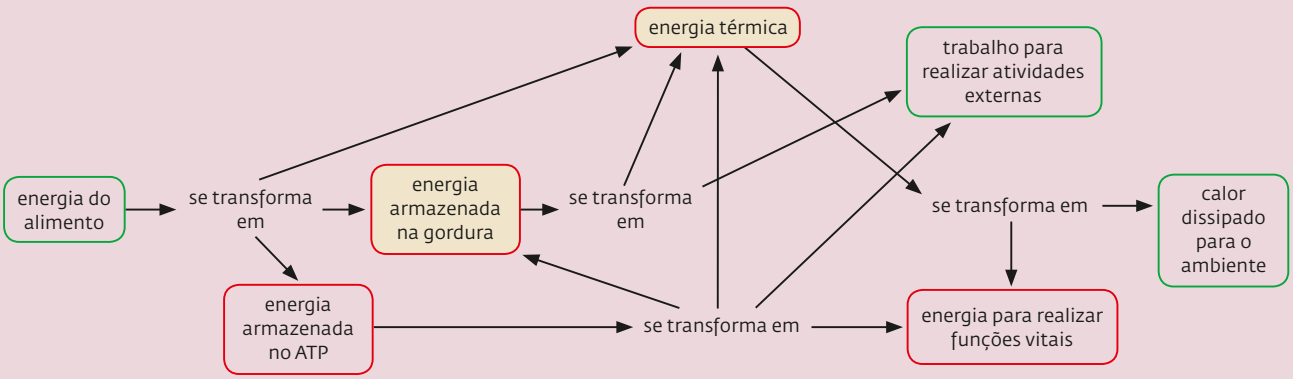
YanLev/Shutterstock/Glow Images



Spotmatik/Shutterstock/Glow Images

Figura 3.46. Algumas formas de trocas energéticas no corpo humano: prática esportiva e alimentação.

Transformações de energia no corpo humano



Legenda:

- Energia que tem origem ou destino externo ao corpo
- Energia usada ou transformada no interior do corpo

Figura 3.47. Fluxo de energia desde o seu "ingresso" até a "saída" no corpo humano.

Uma abordagem detalhada dessa aplicação seria muito complexa, mas podemos simplificá-la. Perceba que toda forma de energia destacada em vermelho é energia interna ao corpo (U). Aplicando a primeira lei da Termodinâmica para o corpo humano, assumiremos que essa energia interna varia somente pelo acréscimo ou decréscimo de energia armazenada na gordura: se houver depósito de gordura, a energia interna vai aumentar e, portanto, $\Delta U > 0$; se houver metabolização ("queima") de gordura, a energia interna vai diminuir e, nesse caso, $\Delta U < 0$.

Veja que essa simplificação é razoável se pensarmos que a energia térmica (ver mapa conceitual), que depende da temperatura do corpo e de sua massa, se mantém constante, variando apenas em situações adversas, como em caso de febre ou hipotermia. Além disso, vamos supor que a energia armazenada no ATP e usada para realizar funções vitais – como circulação do sangue, batimento cardíaco, respiração, funcionamento de órgãos, entre outras – também se mantém constante. Por fim, vamos desprezar a perda de energia com a eliminação de fezes e urina. Apesar de ser limitado, veremos que nosso modelo condiz, em muitos aspectos, com aquilo que observamos no dia a dia.

No nosso modelo, $\mathcal{C}$ representa o trabalho que realizamos (ou energia que gastamos) em atividades como andar, falar, praticar esporte, etc.

Finalmente, Q será positivo ($Q > 0$) quando representar o ingresso de energia obtida pelo alimento e será negativo ($Q < 0$) quando representar a dissipação (perda) de calor para o ambiente.

Aplicando a primeira lei da Termodinâmica ao nosso corpo

No exemplo a seguir usaremos a unidade de medida *quilocaloria* (1 kcal = 1 000 cal) quando nos referirmos ao valor calórico dos alimentos. Apesar de ainda hoje as pessoas usarem o termo *caloria* quando se referem à alimentação, uma caloria alimentar é, na verdade, um quilocaloria.

Veja a seguir como a primeira lei da Termodinâmica, quando aplicada ao corpo humano, está relacionada com o ganho ou a perda de massa corporal:

Imagine que, em um dia, você gaste, para realizar trabalho externo, um total de 3 000 kcal de energia (ou seja, $\mathcal{C} = 3\,000$ kcal) e dissipe mais 500 kcal para o ambiente na forma de calor. Nesse dia sua dieta alimentar foi de 2 000 kcal. Portanto:

$$Q = -500 \text{ kcal} + 2\,000 \text{ kcal}$$

Como usar a primeira lei nessa situação?

Pela primeira lei, teremos:

$\Delta U = Q - \mathcal{C} \Rightarrow \Delta U = -500 + 2\,000 - 3\,000 \Rightarrow$

$\Rightarrow \Delta U = -1\,500$ kcal

Uma vez que em nosso modelo a energia interna só varia por meio do depósito ou "queima" de gordura, nesse caso o seu corpo teve de queimar gordura correspondente a 1 500 kcal. Portanto, quando gastamos mais energia do que consumimos (3 500 kcal > 2 000 kcal), perdemos gordura, ou seja, emagrecemos!

Observação: É importante lembrar que não devemos gastar mais energia do que consumimos para nos manter saudáveis. As atividades físicas devem estar aliadas a uma alimentação equilibrada, ao acompanhamento médico-nutricional e de um profissional de Educação Física, que avalie não apenas a quantidade de exercícios físicos, mas principalmente a qualidade deles, levando em conta suas necessidades, as particularidades do seu corpo e as atividades com as quais você tem mais afinidade.

Pesquise e responda

1. Pesquise na internet a quantidade de:

a) energia disponível para utilizarmos quando "queimamos" 1 kg de gordura do nosso corpo. 1 kg de gordura metabolizada libera aproximadamente 8 000 kcal.

b) quilocalorias disponíveis quando ingerimos 200 gramas de carboidrato; 200 g de carboidrato contêm aproximadamente 800 kcal.

c) energia gasta quando nadamos (na modalidade *crawl*) por 1 hora. 1 h nadando *crawl* requer aproximadamente 500 kcal.

2. Considere uma pessoa que costuma consumir uma dieta calórica estável, porém, em determinado dia, exagerou e consumiu 200 gramas extras de carboidrato. Considerando a perda de calor do corpo dessa pessoa para o ambiente constante e que os pressupostos necessários para aplicação da primeira lei da Termodinâmica ao nosso corpo sejam válidos.

a) Quanto tempo essa pessoa precisará nadar *crawl* para compensar seu exagero? Um pouco mais de uma hora.

b) Qual é a altura da escada que ela deveria subir para compensar seu exagero, se não quisesse nadar? (Use $g = 10$ m/s^2.) 4 800 m

c) Caso não realize atividades físicas, como nadar ou subir escadas, quantos gramas de gordura o corpo dessa pessoa vai acumular? Aproximadamente 100 g de gordura.

Veja no próximo *Integrando...*

O conceito de imagem e o sentido da visão.

1. Considere uma massa de 200 kg de água, caindo do alto de uma catarata cuja altura é de 210 m.

a) Qual é a energia potencial dessa massa de água no alto da catarata? (Considere $g = 10\ m/s^2$.) $4{,}2 \cdot 10^5$ J

b) Desprezando o atrito com o ar, qual será a energia cinética dessa massa de água ao chegar ao solo? $4{,}2 \cdot 10^5$ J

c) Qual é, em calorias, a quantidade de calor equivalente a essa energia cinética? (Considere 1 cal = 4,2 J.) 10^5 cal

d) Quando a água colide com o solo, sua energia cinética é quase totalmente transformada em energia interna, provocando uma elevação de temperatura. Supondo que toda a energia cinética tenha sido usada para aquecer a água, de quanto se elevaria a sua temperatura? 0,5 °C

2. Certa massa gasosa sofre uma transformação, absorvendo uma quantidade de calor Q, realizando um trabalho $\mathcal{C}$ e sofrendo uma variação ΔU em sua energia interna. Indique, entre as afirmativas seguintes, aquelas que estão corretas: a, b, d

a) $\mathcal{C} = Q$ se a transformação for isotérmica.

b) $\Delta U = Q$ se a transformação for isovolumétrica.

c) $\Delta U = 0$ se a transformação for adiabática.

d) $Q > \mathcal{C}$ se a transformação for uma expansão isobárica.

e) $Q = 0$ se a transformação for isotérmica.

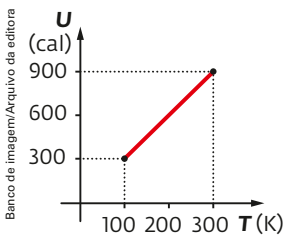
3. Um gás, com volume inicial V_i e pressão p, expande-se isobaricamente até um volume final V_f.

a) Desenhe no caderno o gráfico **pressão × volume** para essa transformação. Veja gráfico na seção *Respostas*.

b) Qual é a expressão do valor da área sob o gráfico que você desenhou? $p(V_f - V_i)$

c) Então, o que representa o valor dessa área? O trabalho realizado pelo gás.

4. O gráfico abaixo mostra como a energia interna de 1 mol de gás hélio, mantido a volume constante, varia com sua temperatura absoluta.



Banco de imagem/Arquivo da editora

a) Qual é o valor de ΔU no intervalo de temperatura mostrado? 600 cal

b) Qual foi o trabalho realizado pelo hélio nessa transformação? $\mathcal{C} = 0$

c) Qual quantidade de calor o gás absorveu? 600 cal

d) Calcule o calor específico, a volume constante, do hélio (lembre-se de que a massa de 1 mol desse gás é de 4 g). 0,75 cal/g · K

5. Um estudante construiu um calorímetro e procurou determinar o valor da capacidade térmica desse aparelho. Para isso, colocou em seu interior 300 g de água fria e, aguardando um certo tempo, verificou que o conjunto alcançou o equilíbrio térmico à temperatura de 20 °C. Em seguida, acrescentou ao calorímetro 100 g de água morna, a 45 °C. Fechando rapidamente o aparelho, esperou até que o equilíbrio térmico fosse refeito, verificando que a temperatura final era de 25 °C. Baseando-se nesses dados, calcule a capacidade térmica do calorímetro do estudante. 100 cal/°C

6. A garrafa térmica é um dispositivo que permite manter constante a temperatura de um objeto (quente ou frio) colocado em seu interior. Observando a figura (sem escala e em cores fantasia) deste problema, procure explicar como ela é construída e descreva como se tenta impedir que o calor entre ou saia de seu interior pelos três processos que estudamos neste capítulo (condução, convecção e radiação).

Veja resposta no Manual do Professor.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

7. Uma usina termonuclear utiliza 20% das águas de um rio para seu sistema de refrigeração. Uma vez utilizada, essa água sai da usina com uma temperatura 12 °C acima da temperatura média do rio no trecho anterior. De quanto se eleva a temperatura média das águas do rio logo após receber a água da usina? 2,4 °C

8. **(UFSM-RS)** Um dos métodos de obtenção de sal consiste em armazenar água do mar em grandes tanques abertos, de modo que a exposição ao sol promova a evaporação da água e o resíduo restante contendo sal possa ser, finalmente, processado. A respeito do processo de evaporação da água, analise as afirmações a seguir.

I. A água do tanque evapora porque sua temperatura alcança 100 °C.

II. Ao absorver radiação solar, a energia cinética de algumas moléculas de água aumenta, e parte delas escapa para a atmosfera.

III. Durante o processo, linhas de convecção se formam no tanque, garantindo a continuidade do processo até que toda a água seja evaporada.

Está(ão) correta(s)

a) apenas I.
c) apenas III.
e) I, II e III.
b) apenas II. b
d) apenas I e II.

9. **(PUCC-SP)** Um dispositivo mecânico usado para medir o equivalente mecânico do calor recebe 250 J de energia mecânica e agita, por meio de pás, 100 g de água que acabam por sofrer elevação de 0,50 °C de sua temperatura. Adote 1 cal = 4,2 J e $c_{água} = 1{,}0$ cal/g °C. O rendimento do dispositivo nesse processo de aquecimento é de

a) 16%.
c) 67%.
e) 84%. e
b) 19%.
d) 81%.

Apêndice D

Máquinas térmicas – Ciclo de Carnot

Diagrama $p \times V$ para um ciclo

Na seção 3.7 vimos que as máquinas térmicas operam sempre em ciclo, isto é, retornam periodicamente às condições iniciais. Veremos, agora, como as transformações que constituem um ciclo são representadas em um diagrama $p \times V$.

Consideremos um gás, no estado inicial i, com volume V_i, expandindo-se até atingir um estado final f, no qual ocupa um volume V_f. Suponha que a pressão p do gás tenha variado, durante a transformação, da maneira mostrada na **figura D.1**. Como a transformação não é isobárica, o trabalho $\mathcal{C}_{if}$, realizado pelo gás nessa expansão, não pode ser calculado pela expressão $\mathcal{C}_{if} = p\,(V_f - V_i)$, analisada na seção 3.4. Nesse caso (p variável), o valor do trabalho $\mathcal{C}_{if}$ é dado pela área sob a curva do gráfico $p \times V$, destacada na **figura D.1**.

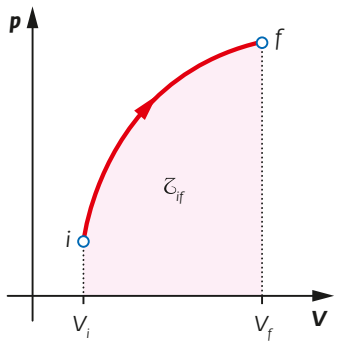


Figura D.1. O trabalho realizado por um gás, em uma variação de volume, é dado pela área sob o gráfico $p \times V$.

Considere, agora, que o sistema gasoso, a partir do estado f, retorne ao estado inicial, i, por meio de uma transformação diferente da primeira, como está representado na **figura D.2**. Nessa compressão, o gás realizará um trabalho negativo (um trabalho externo é realizado sobre o sistema) cujo valor (em módulo) é dado pela área sob a nova curva. O trabalho líquido, $\mathcal{C}$, realizado pelo sistema ao percorrer o ciclo, será dado pelas diferenças entre aqueles dois trabalhos realizados na expansão e na compressão que corresponde ao valor da área limitada pelas curvas que definem o ciclo **(figura D.2)**.

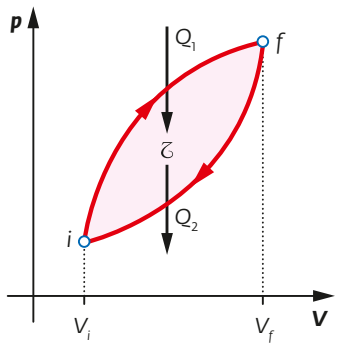


Figura D.2. O trabalho realizado pelo sistema, ao percorrer o ciclo, é fornecido pela área entre as curvas.

Deve-se observar que, durante a expansão, o gás absorveu uma quantidade de calor Q_1, cedendo, na compressão, uma quantidade de calor Q_2. Como o sistema, no ciclo, retorna às condições iniciais, sua energia interna não sofre variações, isto é, $\Delta U = 0$. Logo, pela 1ª lei da Termodinâmica, tem-se:

$$Q - \mathcal{C} = \Delta U \quad \therefore \quad (Q_1 - Q_2) - \mathcal{C} = 0$$

$$\text{ou} \quad \mathcal{C} = Q_1 - Q_2$$

Ciclo de Carnot

O **ciclo de Carnot** foi descrito e analisado por um jovem engenheiro francês, Sadi Carnot, em 1824. Consiste em duas transformações isotérmicas, alternadas com duas transformações adiabáticas, e está representado na **figura D.3** para um gás ideal.

Na transformação isotérmica, AB, o gás absorve o calor Q_1, enquanto se expande. Esse calor é absorvido de uma fonte à temperatura T_1. Isolando **termicamente** o sistema, deixamos que ele continue a se expandir. O sistema não troca calor com a vizinhança e sua temperatura cai para o valor T_2. Essa transformação adiabática é representada pela curva BC na **figura D.3**. De C para D temos uma compressão isotérmica na qual o gás cede calor para a

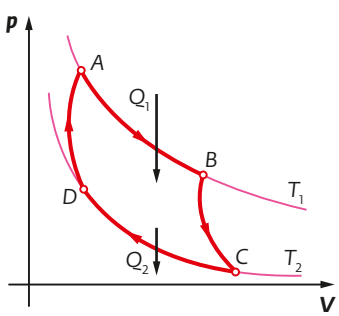


Figura D.3. Ciclo de Carnot para um gás ideal.

Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora


SPL/Latinstock

SADI CARNOT (1796-1832)

Físico e engenheiro do exército francês, mais conhecido por seu estudo sobre as condições ideais para a produção de energia mecânica, a partir do calor, nas máquinas térmicas. A maior contribuição que deixou para a Termodinâmica foi sua previsão de que o rendimento de uma máquina ideal depende apenas das temperaturas da fonte quente e da fonte fria, não sendo influenciado pela substância (vapor ou outro fluido qualquer) usada no mecanismo.

fonte fria à temperatura T_2 e, finalmente, com uma compressão adiabática (*DA*), retorna às condições iniciais. Quando um dispositivo opera segundo esse ciclo, dizemos que ele é uma **máquina de Carnot**.

Nenhuma máquina térmica que opere entre duas dadas fontes, às temperaturas T_1 e T_2, pode ter maior rendimento que uma máquina de Carnot operando entre essas mesmas fontes.

Assim, o ciclo de Carnot corresponde ao rendimento máximo que podemos obter com duas fontes térmicas.

E o rendimento de uma máquina de Carnot pode ser calculado por

$$R = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

em que T_2 e T_1 são as temperaturas em kelvin da fonte fria e da fonte quente, respectivamente. Assim, se uma máquina de Carnot operasse, por exemplo, entre duas fontes, tais que $T_1 = 800$ K e $T_2 = 200$ K, seu rendimento seria:

$$R = 1 - \frac{200}{800} = 1 - 0{,}25 = 0{,}75 \quad \text{ou} \quad R = 75\%$$

Qualquer máquina térmica, operando entre 800 K e 200 K e funcionando com um ciclo diferente desse, teria rendimento inferior a 75%.

Agora você pode entender por que o zero absoluto representa um limite inferior para a temperatura de um objeto. Se um sistema pudesse atingir essa temperatura, que faria com que todas as suas moléculas parassem de se mover, ele poderia ser usado como a fonte fria de uma máquina de Carnot. Com $T_2 = 0$, o rendimento da máquina seria $R = 1 = 100\%$, o que contraria a 2ª lei da Termodinâmica. Logo, o zero absoluto pode ser aproximado indefinidamente, mas não pode ser atingido. Os cientistas já conseguiram obter temperaturas extremamente baixas, chegando até 0,000 001 K, sem contudo chegar ao zero absoluto.

Exemplo

Um inventor afirma que criou uma máquina que extrai $25 \cdot 10^6$ cal de uma fonte à temperatura de 400 K e cede $10 \cdot 10^6$ cal para uma fonte a 200 K, realizando um trabalho de $54 \cdot 10^6$ J. Você investiria dinheiro na fabricação dessa máquina?

Temos:

$$Q_1 = 25 \cdot 10^6 \text{ cal}$$
$$Q_2 = 10 \cdot 10^6 \text{ cal}$$
$$\mathcal{C} = 54 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Logo:

$$\mathcal{C} = \left(\frac{54 \cdot 10^6}{4{,}2}\right) \text{cal} = 13 \cdot 10^6 \text{ cal}$$

Como $Q_1 - Q_2 = 15 \cdot 10^6$ cal, a máquina não está contrariando a 1ª lei da Termodinâmica (não contraria a conservação da energia), pois não realiza mais trabalho que o calor (total) que absorve. O fato de ela nos entregar apenas $13 \cdot 10^6$ cal, em vez de $15 \cdot 10^6$ cal, é perfeitamente razoável, pois $2 \cdot 10^6$ cal podem representar o trabalho que a máquina deve realizar contra o atrito. Logo, a máquina apresentada é perfeitamente possível, sob o ponto de vista da 1ª lei da Termodinâmica.

Vejamos, agora, se ela é compatível com a 2ª lei da Termodinâmica. O rendimento da máquina é:

$$R = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{10 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^6} = 0{,}6 = 60\%$$

Entretanto, uma máquina de Carnot, operando entre essas mesmas temperaturas, teria um rendimento:

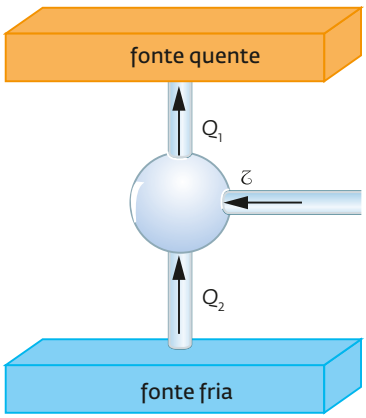
$$R = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{200}{800} = 50\%$$

A suposta máquina tem um rendimento maior que o da máquina de Carnot. Logo, você que acredita nos princípios básicos da Termodinâmica não seria capaz de acreditar no inventor. Mas apenas para dissipar dúvidas, você poderia verificar o funcionamento da máquina para então decidir sobre o investimento nela.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Refrigerador

O refrigerador é um aparelho que reduz a temperatura dos materiais colocados em seu interior e mantém nesse ambiente uma temperatura inferior à de suas vizinhanças. Para isso o refrigerador funciona como uma máquina térmica operando em sentido contrário, isto é, retira calor (Q_2) de uma fonte fria, à temperatura T_2, e, após realizar trabalho ($\mathcal{T}$), cede uma quantidade de calor (Q_1) para um ambiente (fonte quente) a uma temperatura T_1 tal que $T_1 > T_2$ **(figura D.4)**. Observe que o refrigerador cede para o ambiente uma quantidade de calor, Q_1, maior do que a quantidade de calor, Q_2, que ele retira do seu interior (fonte fria).

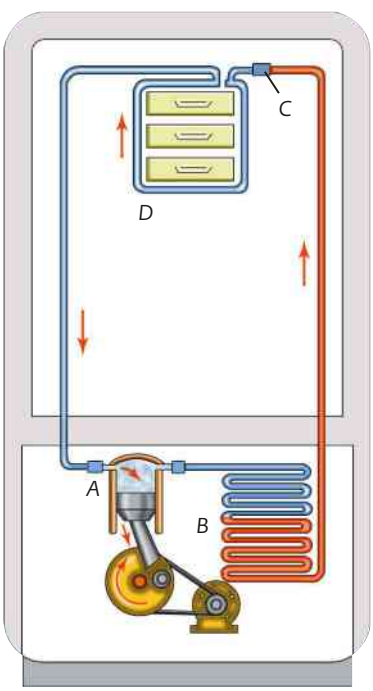


Formato/Arquivo da editora

Figura D.4. Diagrama do fluxo de um refrigerador.

O funcionamento de um refrigerador comum está esquematizado na **figura D.5**. Na serpentina, *B*, o fluido refrigerante que circula no refrigerador está liquefeito sob a pressão produzida pelo compressor, *A*. Em geral, o compressor localiza-se na parte inferior dos refrigeradores domésticos e são acionados por um motor.

O líquido refrigerante passa por um estrangulamento em *C* e sofre uma expansão, ao penetrar na tubulação do refrigerador, *D*, e resfria em virtude da expansão brusca (mudança de fase) na qual o gás realiza trabalho. Em contato com o ambiente do congelador, *D*, a tubulação absorve calor dele, o que leva o restante do líquido a evaporar. O gás passa de *D* para o compressor, onde é novamente liquefeito pelo trabalho da força de pressão que o pistão realiza sobre ele. Ao ser liquefeito, o gás libera calor, que é transferido para o ar ambiente na serpentina *B*. É por esse motivo que a parte posterior do refrigerador, onde está situada a serpentina *B*, deve estar voltada para um local onde haja circulação do ar **(figura D.5)**, para facilitar a transferência de calor da serpentina para o ambiente.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura D.5. Representação esquemática do funcionamento de um refrigerador. O gás é liquefeito no compressor e segue pela serpentina *B*, que libera o calor para o meio ambiente.

Em resumo, vemos que o refrigerador retira calor (Q_2) do congelador, em *D*, recebendo um trabalho ($\mathcal{T}$) no compressor e cede calor (Q_1) para o ambiente, em *B*.

O fluido refrigerante mais utilizado nos refrigeradores era o monoclorodifluormetano, conhecido como *freon* R-22. No entanto, ele tem deixado de ser empregado por ter efeitos nocivos ao meio ambiente, em particular para a camada de ozônio, e está sendo substituído pelo tetrafluoretano ou R–134a, por ser menos poluente comparado ao anterior.

Eficiência de um refrigerador

O refrigerador mais eficiente seria aquele que retirasse o máximo possível de calor, Q_2, da fonte fria, exigindo que o mínimo de trabalho, $\mathcal{C}$, fosse realizado sobre ele. Pode-se medir sua eficiência da seguinte maneira: ε

$$\varepsilon = -\frac{Q_2}{\tau},\ Q_1 = Q_2 + \mathcal{C}$$

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

Suponha que um sistema percorra o ciclo de Carnot, representado na **figura D.3**, em sentido inverso, isto é, no sentido *DCBA*. Nesse caso, em cada ciclo, ele retira um calor Q_2 da fonte fria e cede uma quantidade de calor Q_1 para a fonte quente. Esse sistema está funcionando como um refrigerador de Carnot, sendo possível mostrar que ele tem a maior eficiência possível entre quaisquer refrigeradores que operassem nas temperaturas T_1 e T_2. Essa eficiência máxima é dada por:

$$\varepsilon = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

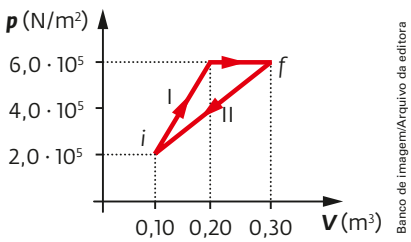
Não escreva no livro!

1. Um sistema sofre uma transformação I, representada na figura abaixo, passando de um estado inicial *i* para um estado final *f*.

a) O trabalho, $\mathcal{C}_{if}$, realizado pelo sistema nessa transformação, poderia ser calculado usando a expressão $\mathcal{C}_{if} = p_i(V_f - V_i)$? Por quê?

b) Calcule o valor de $\mathcal{C}_{if}$. $\mathcal{C}_{if} = 10{,}0 \cdot 10^4$ J

Não, pois a transformação não é isobárica.



Banco de imagem/Arquivo da editora

2. No exercício anterior, suponha que o sistema retorne de *f* para *i* seguindo a transformação II, mostrada na figura.

a) Calcule o trabalho do sistema nessa transformação.

b) Qual foi o trabalho $\mathcal{C}$ realizado pelo sistema no ciclo que ele percorreu?

c) Indique, na figura, a área que corresponde ao trabalho $\mathcal{C}$, no ciclo.

2. a) $\mathcal{C}_{fi} = -8{,}0 \cdot 10^4$ J
b) $\mathcal{C} = 2{,}0 \cdot 10^4$ J
c) Área limitada pelas curvas I e II do gráfico.

3. Suponha que o gráfico referente ao exercício 1 represente o ciclo de uma máquina térmica que retira da fonte quente uma quantidade de calor $Q_1 = 8{,}0 \cdot 10^4$ J. Determine:

a) o rendimento dessa máquina; 0,25 = 25%

b) a quantidade de calor que ela cede para a fonte fria. $6{,}0 \cdot 10^4$ J

4. Uma máquina de Carnot apresenta um rendimento de 30%, e a temperatura de sua fonte quente é 400 K. A potência dessa máquina é de 4,5 kW e ela efetua 10 ciclos/s.

a) Calcule a temperatura da fonte fria dessa máquina. 280 K

b) Qual é o trabalho que a máquina realiza em cada ciclo? 450 J

c) Quais são as quantidades de calor, Q_1 e Q_2, que a máquina absorve e cede? $Q_1 = 1\,500$ J e $Q_2 = 1\,050$ J

5. Um dos motores térmicos de maior rendimento já construídos trabalha nas temperaturas de 2000 K (fonte quente) e de 700 K (fonte fria), apresentando um rendimento de 40%. Esse rendimento está próximo do valor máximo que ele poderia alcançar entre aquelas temperaturas? Não; o rendimento máximo é de 65%.

6. Um refrigerador cede para o ambiente uma quantidade de calor $Q_1 = 800$ cal, durante certo intervalo de tempo.

a) Nesse intervalo, a quantidade de calor Q_2 que ele retira do seu interior é maior, menor ou igual a 800 cal? menor

b) Supondo que o refrigerador apresente uma eficiência $\gamma = 3{,}0$, calcule o valor de Q_2. 600 cal

7. Tendo em vista as respostas do exercício anterior, responda à seguinte questão: uma pessoa desejava esfriar uma sala na qual existia uma geladeira em funcionamento. Para isso, fechou as portas e as janelas da sala e abriu a porta da geladeira. Com esse procedimento a pessoa alcançou seu objetivo? Explique.

7. Não; a geladeira rejeitou para o ambiente maior quantidade de calor do que absorveu.

FÍSICA NO CONTEXTO

Entropia – Indisponibilidade da energia

Não escreva no livro!

Irreversibilidade e desordem em um processo natural

Suponha que certa massa de água quente seja misturada com uma porção de água fria. Esse sistema, resultante da mistura, termina por alcançar uma temperatura de equilíbrio que tem o mesmo valor em qualquer ponto do sistema.

Antes de ser efetuada a mistura, teria sido possível fazer uma máquina térmica operar usando as massas de água mencionadas como fonte quente e fria dessa máquina. E a energia que foi transferida da massa quente para a fria poderia ter sido usada para a realização de um trabalho (energia útil). Entretanto, após a mistura, sendo atingida a uniformidade da temperatura do sistema, embora a energia não tenha desaparecido, não é mais possível convertê-la em trabalho. Isto significa que uma parte da energia do sistema tornou-se **indisponível**, e não pode ser usada na realização de trabalho.

Para que aquela parte de energia continuasse disponível para realizar trabalho, seria necessário que o sistema (suposto isolado) voltasse espontaneamente às condições iniciais, isto é, a mistura se separasse nas duas porções quente e fria primitivas. De nossa experiência diária, sabemos que é altamente improvável que ocorra. Em outras palavras, o processo que levou à homogeneização da temperatura é **irreversível**[1].

Outra maneira de analisar esse processo consiste em observar que o sistema inicialmente se encontrava em condição mais organizada, isto é, de **maior ordem**, com as moléculas de maior energia cinética média (água quente) separadas das moléculas de menor energia cinética (água fria). Depois que ocorre a mistura, o sistema torna-se mais desordenado, havendo uniformidade da temperatura. As moléculas distribuem-se aleatoriamente e trocam energia cinética entre si nas colisões (figura D.6).



Ilustrações: João X. de Campos/Arquivo da editora

Figura D.6. Quando o recipiente é agitado, as bolas de cores diferentes se misturam. Esse processo conduz a um aumento da desordem do sistema, e seria altamente improvável a continuidade da agitação levar o sistema de volta às condições iniciais (processo irreversível). Semelhante ao que ocorre com as moléculas de água a diferentes temperaturas.

De maneira geral, ao analisarmos qualquer processo que ocorra na natureza vamos chegar às mesmas conclusões do representado na figura D.6. Assim, enquanto você caminha, estuda, cresce, se alimenta, dorme, acende uma lâmpada ou passeia de automóvel, certa quantidade de energia estará continuamente tornando-se indisponível para a realização de trabalho, embora a energia total não tenha sido alterada. Costuma-se dizer que a energia se **degrada** ao se transformar em energia térmica.

Entropia

Para expressar quantitativamente essas características dos processos irreversíveis, o físico alemão R. Clausius, por volta de 1860, introduziu uma nova grandeza, denominada **entropia**, S. O valor da entropia varia quando o sistema passa de um estado para outro. Essa variação, ΔS, é exatamente o que é importante conhecer (de maneira semelhante ao que ocorre com a energia potencial, da qual só nos interessa a variação).

Para um sistema que sofre uma transformação isotérmica, em uma temperatura absoluta, T, absorvendo ou cedendo uma quantidade de calor ΔQ, a variação da entropia do sistema é dada por:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \quad \text{ou} \quad S_f - S_i = \frac{\Delta Q}{T}$$

[1] O ramo da Física denominado Mecânica Estatística modifica a afirmativa "nunca ocorre" para "é altamente improvável que ocorra".

Princípio de aumento da entropia

Consideremos um sistema que sofra um processo irreversível qualquer. Nesse processo, em geral, o sistema interage com a vizinhança, e ambos sofrerão variações de entropia. Seja ΔS_s a variação da entropia do sistema, e ΔS_v a da vizinhança. A variação total de entropia, ΔS_t, ocorrida no processo será, evidentemente

$$\Delta S_t = \Delta S_s + \Delta S_v$$

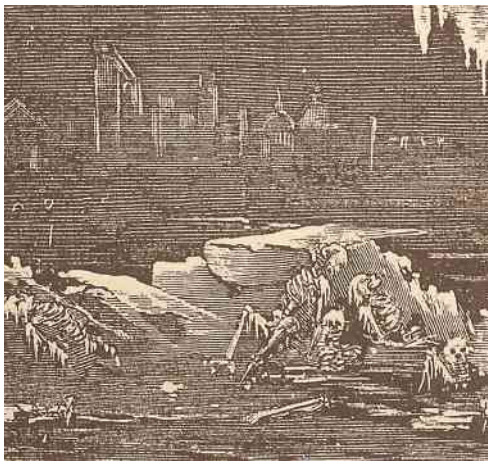
Observando os fenômenos irreversíveis, que ocorrem na natureza, foi possível concluir que nesses processos a entropia total sempre aumenta, isto é, temos seguramente $\Delta S_t > 0$. Portanto, a entropia está associada a um princípio de aumento denominado **Princípio de Aumento da Entropia**:

Em todos os processos naturais irreversíveis, a entropia total (do sistema e da vizinhança) sempre aumenta.

Fotos: Reprodução/Arquivo da editora



"La misérable race humaine périra par le froid."



"Ce sera la fin."

Figura D.7. Ilustrações e legendas que as acompanham, reproduzidas da obra do astrônomo francês Camille Flammarion: "A miserável raça humana morrerá pelo frio" e "Este será o fim".

A "morte térmica" do Universo

Qual seria o significado do aumento de entropia que acompanha todo e qualquer processo que ocorre na natureza?

O próprio Clausius já havia mostrado que esse aumento de entropia está relacionado com o aumento da desordem do sistema e com a falta de possibilidade de converter energia em trabalho. De fato, é possível mostrar que, quanto maior for o aumento total de entropia ΔS_t, que ocorre em um processo, maior será a quantidade de energia ΔE que se torna indisponível para ser convertida em energia útil, embora a energia total envolvida no processo permaneça constante. Portanto, a entropia é, de fato, uma grandeza apropriada para caracterizar o grau de desordem e de degradação da energia envolvidos nos processos irreversíveis. Podemos destacar:

A quantidade de energia ΔE que se torna indisponível em um processo natural é diretamente proporcional ao aumento total de entropia ΔS_t, que acompanha o processo.

A tendência de todos os processos naturais, tais como fluxo de calor, mistura, difusão, etc. é de acarretar uma uniformidade de temperatura, pressão, composição, etc. em todos os pontos dos sistemas que participam de tais processos.

Em cada um desses processos há um aumento de entropia e um aumento na indisponibilidade de energia. Assim, podemos visualizar um momento, em um futuro distante, no qual todo o Universo terá atingido um estado de uniformidade absoluta. Se essa situação for alcançada, ainda que não tenha havido nenhuma alteração no valor da sua energia total, todos os processos físicos, químicos e biológicos terão cessado. Esse fim para o qual parecemos caminhar é comumente conhecido como a **"morte térmica" do Universo**.

Essas ideias, que parecem ser uma consequência inevitável das bem estabelecidas leis da Termodinâmica, têm despertado grande interesse, até mesmo popular, e já foram tema de diversas obras literárias.

H. G. Wells, com sua obra ***A máquina do tempo***, de 1895, e o astrônomo francês Camille Flammarion (1842-1925) são exemplos de escritores que se envolveram com o assunto. Na figura D.7 apresentamos reproduções de ilustrações de uma das obras de Flammarion, na qual ele descreve várias maneiras pelas quais poderíamos chegar ao **fim do mundo**.

1. **(Enem)** Uma garrafa térmica tem como função evitar a troca de calor entre o líquido nela contido e o ambiente, mantendo a temperatura de seu conteúdo constante. Uma forma de orientar os consumidores na compra de uma garrafa térmica seria criar um selo de qualidade, como se faz atualmente para informar o consumo de energia de eletrodomésticos. O selo identificaria cinco categorias e informaria a variação de temperatura do conteúdo da garrafa, depois de decorridas seis horas de seu fechamento, por meio de uma porcentagem do valor inicial da temperatura de equilíbrio do líquido na garrafa.

O quadro apresenta as categorias e os intervalos de variação percentual da temperatura.

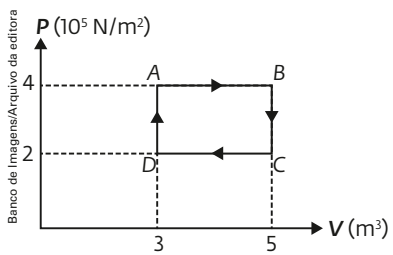
Tipo de selo	Variação de temperatura
A	menor que 10 %
B	entre 10% e 25%
C	entre 25% e 40%
D	entre 40% e 55%
E	maior que 55%

Para atribuir uma categoria a um modelo de garrafa térmica, são preparadas e misturadas, em uma garrafa, duas amostras de água, uma a 10 °C e outra a 40 °C, na proporção de um terço de água fria para dois terços de água quente. A garrafa é fechada. Seis horas depois, abre-se a garrafa e mede-se a temperatura da água, obtendo-se 16 °C.

Qual selo deveria ser posto na garrafa térmica testada?

a) A
b) B
c) C
d) D d
e) E

2. **(UFPB)** Uma máquina térmica opera usando um gás ideal monoatômico, de acordo com o ciclo representado na figura abaixo. V F F V V.



Sabendo que a temperatura de operação da máquina no ponto *B* é de 500 K, identifique as afirmativas corretas:

( ) O trabalho realizado pela máquina térmica em um ciclo é de $4 \cdot 10^5$ J.

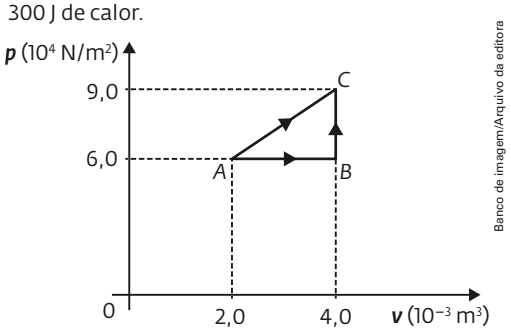
( ) A eficiência dessa máquina é igual à eficiência de uma máquina operando segundo o ciclo de Carnot.

( ) A menor temperatura atingida durante o ciclo de operação da máquina é de 100 K.

( ) Para uma máquina térmica ideal que trabalhe entre as temperaturas de operação do ciclo representado na figura, a maior eficiência possível é de 0,7.

( ) A variação de energia interna em um ciclo completo é nula.

3. Um gás contido em um cilindro com pistão é levado de um estado inicial *A* até um estado final *C*, seguindo dois processos distintos, *AC* ou *ABC* (veja a figura deste problema). No processo *AC*, o sistema absorve 300 J de calor.



a) Calcule o trabalho realizado pelo sistema nos dois processos. 120 J

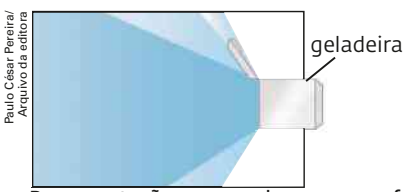
b) Qual é a variação da energia interna do sistema no processo *AC*? 150 J

c) Uma das leis básicas da termodinâmica afirma que a variação da energia interna do sistema não depende do processo que o leva de um estado inicial a um estado final. Tendo em vista essa informação, calcule o calor absorvido pelo gás no processo *ABC*. 270 J

4. Copie no caderno, entre as alternativas seguintes, aquela que se refere a uma característica importante do ciclo de Carnot:

a) É o ciclo da maioria das máquinas térmicas.
b) Tem um rendimento de 100%.
c) Tem sempre um rendimento próximo de 100%.
d) Determina o máximo rendimento de uma máquina térmica, entre duas temperaturas dadas. d

5. a) Uma pessoa deseja resfriar uma sala na qual existia uma geladeira em funcionamento. Supondo que ela colocasse a geladeira da maneira mostrada na figura abaixo (encaixada em uma abertura feita na parede com a serpentina voltada para o exterior da sala), ela teria êxito ao tentar resfriar a sala? Sim.



Representação sem escala e em cores fantasia.

b) Qual aparelho eletrodoméstico funciona de maneira semelhante à geladeira referida na questão **a**?
Aparelho de ar condicionado.



Gerson Gerloff/Pulsar Imagens

Formação de neve. São José dos Ausentes (RS), em 2013.

CAPÍTULO 4

Mudanças de fase

P É necessário que a temperatura do ar esteja muito baixa para que esse tipo de precipitação ocorra, e isso é muito difícil no nosso país, pelas suas médias de temperatura elevadas.

O Brasil é um país extenso e cada região tem características muito particulares. Por exemplo, durante o inverno na região Sul, mais especificamente nas áreas de planaltos de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul, é possível ver neve.

Os flocos de neve mais comuns possuem formato hexagonal e lembram uma pequena estrela. A formação do cristal de neve depende basicamente da temperatura e da pressão em que a nuvem está. É necessário que as camadas de ar entre as nuvens e a superfície estejam também com temperaturas baixas, caso contrário o cristal derrete e outro fenômeno aparece, o da chuva congelada. Não necessariamente a temperatura do ar atmosférico deve estar a 0 °C para que o floco de gelo se conserve: sabe-se que, à medida que a altitude aumenta, a temperatura do ponto de fusão do gelo também aumenta.

Uma fina camada de neve ou gelo pode prejudicar bastante o trânsito de veículos e pedestres nos lugares onde ocorrem as nevascas, pois o atrito entre os pneus e o asfalto, ou entre as solas de sapato e o calçamento, fica bastante reduzido. Para derreter a neve, basta colocar uma camada de sal sobre ela. O sal se dissolve e, nessa nova configuração, a água tem sua temperatura de fusão reduzida. Dessa forma, os cristais de gelo se desassociam e a neve volta ao estado líquido.

P Fusão, passagem do estado sólido para o líquido.

P O gelo boia, pois ocupa um volume maior, o que torna sua densidade menor, uma vez que densidade é a relação entre massa e volume.

PARA INICIAR A CONVERSA

Por que é tão difícil ocorrer neve no Brasil?

Qual o conceito físico associado ao derretimento da neve?

A maioria das substâncias, quando aquecidas, dilata-se; quando resfriadas, contrai-se. Com a água, isso não ocorre: seu volume aumenta quando resfriada. Explique por que o gelo boia.

4.1 Sólidos, líquidos e gases

É um fato conhecido que as substâncias se apresentam, na natureza, em três fases (ou estados) diferentes, denominadas **fase sólida**, **fase líquida** e **fase gasosa**. Recentemente foi acrescentado a esta relação o plasma, considerado o quarto estado da matéria. A pressão e a temperatura a que uma substância é submetida determinam a fase na qual ela se apresenta. Assim, o ferro, que nas condições ambientes se apresenta no estado sólido, poderá se tornar líquido quando sua temperatura for suficientemente elevada; a água, que normalmente é encontrada no estado líquido, poderá tornar-se um gás pela elevação de sua temperatura ou pela redução da pressão a que está submetida.

Em química, vimos que tudo que nos rodeia é formado de matéria e esta, por sua vez, é formada de átomos. Um conjunto de átomos iguais (ou diferentes) unidos por certas ligações químicas é chamado de molécula. A teoria cinético-molecular da matéria afirma que todas as substâncias são formadas por moléculas (menor porção da matéria com mesmas propriedades químicas) que estão em contínuo movimento desordenado e que, quando estão muito próximas, interagem entre si. Com base nesse modelo, a seguir estudaremos a matéria nos seus diferentes estados e as possíveis mudanças de um estado para outro, chamado de **mudança de fase**.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

Estado sólido

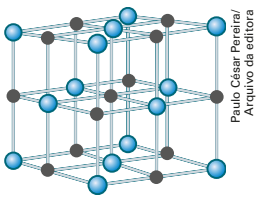
Nesse estado, os átomos (e, por consequência, as moléculas) de uma substância se encontram muito próximos uns dos outros e ligados por forças eletromagnéticas relativamente grandes dificultando a movimentação. Eles não sofrem translação ao longo do sólido, mas se encontram em constante movimento de vibração (agitação térmica) em torno de uma posição média de equilíbrio. Em virtude da forte ligação entre os átomos, os sólidos possuem forma própria e certa resistência a deformações.

Devido ao movimento térmico, as moléculas no estado sólido não estão fixas, mas seus átomos mantêm uma distância bem determinada entre si. Na natureza, as moléculas de quase todos os sólidos se organizam de maneira regular, em uma estrutura que se repete ordenadamente ao longo do sólido, denominada **rede cristalina**. Os físicos e químicos, usando métodos modernos de pesquisa, conseguiram determinar a organização dos átomos na estrutura cristalina de um grande número de substâncias sólidas. A figura 4.1.a, por exemplo, apresenta o modelo da estrutura cristalina do cloreto de sódio, mostrando a distribuição ordenada dos íons de sódio (esferas menores) e de cloro (esferas maiores).

O cloreto de sódio, ou sal de cozinha, é um dos temperos mais utilizados na culinária do mundo todo. O sal pode ser extraído a partir da evaporação da água do mar ou de lagos salgados represados, ou pode ser retirado de minas subterrâneas, antigos mares e lagos que secaram. Na figura 4.1.b temos como exemplo a extração dos cristais de cloreto de sódio do deserto Salar do Uyuni, na Bolívia.

A mesma substância pode se apresentar em estruturas cristalinas diferentes. O diamante (figura 4.2) e a grafite (figura 4.3), por exemplo, são ambos constituídos apenas de átomos de carbono, distribuídos de maneiras diferentes.

a



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

b



Acervo do autor/Arquivo da editora

Figura 4.1. Em **(a)**, modelo da estrutura cristalina do cloreto de sódio formada por átomos de sódio (Na^+) e átomos de cloro (Cl^-). Representação sem escala e em cores fantasia. Em **(b)**, o aspecto regular do cristal de cloreto de sódio é consequência da organização interna (rede cristalina) dessa substância. Extração do sal no maior deserto de sal do planeta, o Salar do Uyuni, na Bolívia.



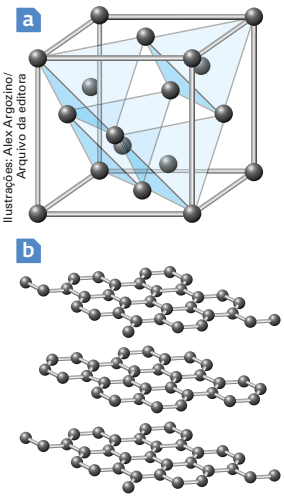
Henry Yukino.com.br

Figura 4.2. Além de uma bela formação rochosa, o diamante possui propriedades mecânicas invejáveis.



Eric Heller/SPL/Latinstock

Figura 4.3. Devido às suas propriedades mecânicas, a grafite é muito utilizada para a escrita.



Ilustrações: Alex Argozino/ Arquivo da editora

Figura 4.4. Modelos das estruturas do diamante (**a**) e da grafite (**b**). Apesar de serem ambos constituídos unicamente por átomos de carbono, apresentam propriedades diferentes em virtude de suas estruturas cristalinas diferentes. Representações sem escala e em cores fantasia.

Observe na **figura 4.4** que a estrutura molecular do diamante é tetraédrica com cinco carbonos, em que cada átomo se liga a outros quatro. Esse arranjo compacto torna o diamante duro e com capacidade para cortar ferro. Por outro lado, a grafite tem seus átomos de carbono em forma de anel, onde cada átomo é ligado apenas a outro átomo. Além da grafite e do diamante, o carbono tem mais três formas conhecidas: amorfa, fulerenos e nanotubos.

Estado líquido

Os átomos ou moléculas de uma substância líquida se apresentam mais afastados uns dos outros em comparação ao estado sólido e, consequentemente, as forças de ligação entre eles são mais fracas. Assim, o movimento de vibração dos átomos se faz mais livremente, permitindo que eles sofram pequenas translações, com troca de posições no interior do líquido quando são submetidas a forças externas.

A troca de posição na direção em que atua a força externa possibilita compreender por que os líquidos podem escoar com certa facilidade, não oferecem resistência à penetração e tomam a forma do recipiente onde são colocados.

Do mesmo modo que nos sólidos amorfos **(figura 4.5)**, os átomos nos líquidos não estão distribuídos ordenadamente. Portanto, quando um cristal se funde, passando para o estado líquido, a sua rede cristalina é desfeita.



Vlacheslav Lopatin/Shutterstock

Figura 4.5. Os sólidos amorfos, como o vidro, possuem estrutura interna semelhante à de um líquido; por isso, apresentam algumas propriedades típicas de um fluido. Por exemplo, nas antigas catedrais da Europa, os vitrais das janelas apresentam maior espessura em sua parte inferior e acreditava-se que isso acontecia em virtude de centenas de anos de escoamento. No entanto, se fosse verdade que o vidro escoa como um líquido a ponto de percebermos alteração na espessura das janelas, este processo levaria bilhões de anos. A explicação para os vitrais medievais mais espessos na parte inferior deve-se exclusivamente às falhas no processo de fabricação do vidro para o vitral. Catedral de Notre Dame, Paris, França. Fotografia de 2013.

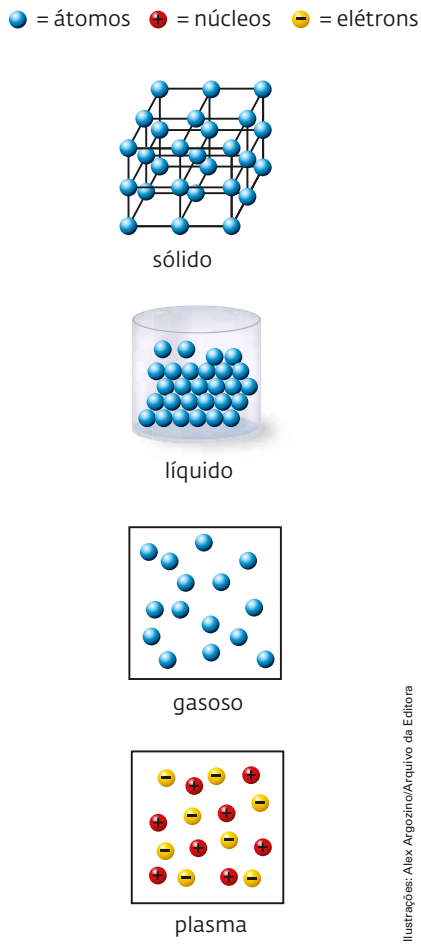
Estado gasoso

A separação entre os átomos ou moléculas de uma substância no estado gasoso é muito maior em comparação às moléculas dos sólidos e dos líquidos, sendo praticamente nula a força de ligação entre essas partículas. Por esse motivo, elas se movimentam livremente em todas as direções, fazendo com que os gases não apresentem forma definida e ocupem o volume total do recipiente em que estão contidos. A intensidade do movimento desordenado (movimento térmico) durante os choques das partículas entre si e com as paredes do recipiente depende da temperatura da substância.

Plasma

Além dos estados sólido, líquido e gasoso, um quarto estado da matéria costuma ser incorporado nas referências mais atualizadas. Trata-se do plasma, estado no qual as partículas que constituem o material se apresentam em forma de íons. Para que esse estado seja alcançado, um gás, por exemplo, deve ser superaquecido, o que rompe as ligações entre os elétrons e o núcleo. Esse processo fará com que uma fração significativa do material seja ionizado. O Sol e outras estrelas são constituídos por plasma. O plasma pode ser criado e confinado em laboratório, em reatores de fusão nuclear do tipo Tokamak.

Além das mudanças de estado que podem ocorrer com uma substância e que vamos estudar a seguir, na **figura 4.6** podemos comparar a distribuição e a separação dos átomos (ou moléculas) nos quatro estados. No estado sólido as moléculas estão muito próximas umas das outras e seu único movimento é o de vibração. No estado líquido as moléculas podem vibrar e trocar de lugar umas com as outras se aglomerando conforme a força externa aplicada. Já no estado gasoso, as moléculas estão muito distantes entre si e se movem em alta velocidade. No estado de plasma as moléculas estão separadas em íons e por isso há portadores de carga no material, o que o torna eletricamente condutor.



Ilustrações: Alex Argozino/Arquivo da Editora

Figura 4.6. Modelos da estrutura interna de um sólido, de um líquido, de um gás e do plasma. Observe a organização e a separação das moléculas em cada caso.

Mudanças de estado

Quando fornecemos calor a um objeto e sua temperatura se eleva, já sabemos que há um aumento na energia de agitação de seus átomos. Esse aumento de agitação faz com que a força de ligação entre os átomos seja alterada, podendo acarretar modificações na organização e separação desses átomos. Em outras palavras, a absorção de calor por um objeto pode provocar nele uma mudança de fase. Naturalmente, a retirada de energia térmica deverá provocar efeitos inversos aos que são observados quando calor é cedido à substância.

As mudanças de estado que podem ocorrer com uma substância recebem denominações especiais, como ilustra a **figura 4.7**, e que citaremos a seguir:

Fusão — passagem de sólido para líquido

Solidificação – passagem de líquido para sólido

Vaporização – passagem de líquido para gás

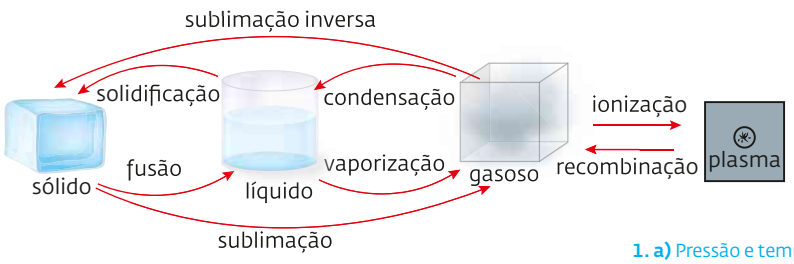
Condensação (ou liquefação) — passagem de gás para líquido

Sublimação – passagem direta de sólido para gás

Ressublimação ou sublimação inversa – passagem direta de gás para sólido (sem passar pelo estado líquido)

Ionização – passagem de um gás para plasma, por aquecimento

Recombinação – passagem do plasma para gás



As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Figura 4.7. Denominações que recebem as passagens de um estado físico para outro.

1. a) Pressão e temperatura.
b) Aumentando sua temperatura ou diminuindo a pressão sobre ele.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

1. Responda no caderno.
a) Quais são as grandezas que determinam em qual fase uma substância se apresenta?
b) Cite duas maneiras de fazer com que um líquido passe para o estado gasoso.

2. Responda no caderno.
a) Por que os sólidos apresentam forma própria, enquanto isso não ocorre com os líquidos?
b) O que ocorre com a estrutura de um sólido cristalino quando ele passa para o estado líquido?
c) Por que um gás tende a ocupar todo o volume do recipiente que o contém, enquanto isso não ocorre com um líquido?

Não escreva no livro!

2. a) As ligações entre os átomos de um líquido são mais fracas, comparadas às ligações dos sólidos.
b) A rede cristalina se desfaz.
c) Porque a força entre as moléculas de um gás é praticamente nula.

FÍSICA NO CONTEXTO

Materiais de estrutura pouco comum

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

Cristais líquidos

Os cristais líquidos são substâncias cujas moléculas se escoam, umas sobre as outras, como ocorre nos líquidos, mas que, em certas situações, o arranjo de suas moléculas permanece ordenado como nos cristais. Esse fato, embora aparente ser uma contradição, costuma ocorrer na própria natureza.

Há cerca de um século, um fato estranho foi observado por Friedrich Reinitzer com o benzoato de colesterol: ao ser aquecido e fundir-se, a 135 °C, observou-se um líquido viscoso e turvo. Ao atingir 178 °C, esse líquido tornava-se transparente e perdia a viscosidade. Ao se resfriar, as mesmas duas fases eram observadas até que a substância se solidificasse. Essa constatação permaneceu, durante muito tempo, como uma curiosidade de laboratório. Entretanto, um conhecimento mais profundo da estrutura de substâncias como o colesterol permitiu perceber que elas possuíam propriedades interessantes, que poderiam ser usadas em novas aplicações úteis.

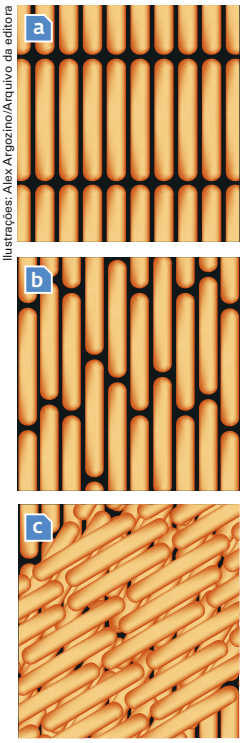
As forças moleculares que mantêm suas estruturas são muito fracas, sendo, então, facilmente afetadas por tensões mecânicas e campos eletromagnéticos aplicados ao material e por variações de temperatura. Esses conhecimentos só se fizeram possíveis nas décadas de 1940 e 1950.

Hoje em dia, são conhecidas centenas de materiais orgânicos sólidos, naturais ou produzidos sinteticamente, que, ao se fundir, apresentam duas ou mais fases intermediárias. Essas são chamadas **fases mesomórficas**, e as substâncias que as apresentam são denominadas **cristais mesomórficos** ou **cristais líquidos**.

Todas as substâncias que apresentam essas fases possuem moléculas em forma de um bastão alongado, que tendem a se colocar paralelamente entre si (sendo a espessura de cada bastão de uma ou duas moléculas apenas), formando camadas nas quais as moléculas podem apresentar-se ordenada ou desordenadamente. Isso faz com que os cristais líquidos, ao contrário dos líquidos comuns, sejam anisotrópicos, isto é, tenham propriedades que dependem da direção. A viscosidade, por exemplo, nos cristais líquidos é menor na direção paralela às moléculas fazendo com que seja mais fácil para as moléculas com forma de bastões moverem-se ao longo dos eixos principais do que perpendicularmente. Os arranjos das moléculas dos cristais líquidos podem ser classificados em **fase esmética** (figura 4.8.a), **fase nemática** (figura 4.8.b) e **fase colestérica** (figura 4.8.c). A agitação térmica tende a desorientar as moléculas e, assim, a estrutura real que o cristal líquido apresenta dependerá do equilíbrio entre a tendência natural de ordenação e a tendência à desordem, provocada por aquela agitação.

A baixas temperaturas predomina a ordenação, pois a agitação térmica é pequena e o material apresenta estrutura cristalina. Quando a temperatura aumenta (ou uma voltagem é aplicada ao cristal), as moléculas tendem à desordem, aproximando-se da estrutura líquida. Enquanto essa mudança ocorre, várias fases intermediárias são percebidas nos cristais líquidos, ao contrário do que ocorre com as substâncias comuns, como a água, que passam bruscamente da fase sólida para a líquida.

Os cristais líquidos tornaram-se populares quando começaram a ser utilizados nas telas de TV, computadores e telefones celulares, conhecidas como telas de LCD (*Liquid Crystal Display*). Atualmente, esse material tem se destacado como biossensor, sensor que permite a detecção e análise quantitativa direta de agentes biológicos, enzimas ou certos tipos de DNA em tempo real. Os biossensores permitem, por exemplo, o diagnóstico e o monitoramento intensivo de pacientes. Em 2014, pesquisadores da Universidade de Kent, no Reino Unido, criaram "sensores biológicos ativos", em que bactérias vivas interagem com moléculas de cristal líquido, chamados biossensores ativos (figura 4.9), que permitirão monitorar processos biológicos tais como o crescimento de cânceres ou infecções.



Ilustrações: Alex Argozino/Arquivo da editora

Figura 4.8. Representação (sem escala e em cores fantasia) de diferentes arranjos dos cristais líquidos. Na fase esmética as moléculas se alinham e formam camadas (**a**). Na fase nemática as moléculas ficam juntas e na mesma direção, com uma defasagem em relação às demais (**b**). Na fase colestérica as moléculas se apresentam como camadas ordenadas em ângulos diferentes (**c**).



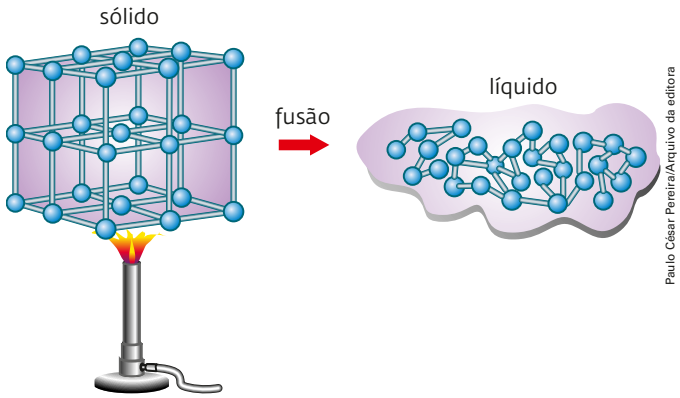
Reprodução/PNAS

Figura 4.9. Com um microscópio polarizador é possível visualizar a trilha deixada por uma única bactéria, com apenas 24 nanômetros de espessura.

4.2 Fusão e solidificação

Fusão

Consideremos um sólido cristalino, recebendo calor, cujo modelo é mostrado na figura 4.10. A energia recebida pelo sólido provoca um aumento na agitação dos átomos na rede cristalina, ou seja, provoca uma elevação na temperatura do objeto. Quando a temperatura alcança um determinado valor, a agitação térmica atinge um grau de intensidade que é suficiente para desfazer a rede cristalina. Então, a organização interna desaparece, a força entre átomos ou moléculas torna-se menor e, consequentemente, essas partículas terão maior liberdade de movimentação (figura 4.10). Em outras palavras, ao atingir aquela temperatura, o objeto passa para o estado líquido, isto é, ocorre a **fusão** do sólido.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 4.10. A estrutura cristalina de um sólido se desfaz quando ele passa para o estado líquido. Representação sem escala e em cores fantasia.

Regularidades da fusão

A experiência nos mostra que os cristais, ao se fundirem, apresentam comportamentos semelhantes, podendo-se, então, observar regularidades que caracterizam a fusão desses sólidos. Essas três regularidades são as seguintes:

1) **A uma dada pressão, a temperatura na qual ocorre a fusão (ponto de fusão) é bem determinada para cada substância.**

   Assim, quando submetidos à pressão de 1 atm, o gelo se funde a 0 °C, o chumbo a 327 °C, o mercúrio a −39 °C, etc.

2) **Se um sólido se encontra em sua temperatura de fusão, é necessário fornecer calor a ele para que ocorra a mudança de estado. A quantidade de calor que deve ser fornecida, por unidade de massa, é denominada calor latente de fusão, que é característico de cada substância.**

Na tabela 4.1, que apresenta calores latentes de fusão de algumas substâncias, vemos que o calor de fusão do chumbo, por exemplo, vale 5,8 cal/g. Isso significa que, para fundir um bloco de chumbo que se encontra no seu ponto de fusão (327 °C), devemos fornecer 5,8 cal de calor **a cada grama** do bloco.

Tabela 4.1

Pontos de fusão e calores de fusão (à pressão de 1 atm)			
Substância	**Ponto de fusão** (°C)	**Calor de fusão** (J/kg)	**Calor de fusão** (cal/g)
Platina	1 775	$114 \cdot 10^3$	27
Prata	961	$105 \cdot 10^3$	21
Chumbo	327	$23 \cdot 10^3$	5,8
Enxofre	119	$54 \cdot 10^3$	13
Água	0	$335 \cdot 10^3$	80
Mercúrio	−39	$11 \cdot 10^3$	2,8
Álcool etílico	−115	$105 \cdot 10^3$	25
Nitrogênio	−210	$26 \cdot 10^3$	6,1

Calor latente

O calor latente está relacionado com a quantidade de calor que é necessária para modificar o estado físico de um grama de uma substância. Então, podemos expressá-lo por

$$\Delta Q = mL.$$

em que L é o calor latente de uma substância, ΔQ a quantidade de calor fornecida ou cedida e m a massa da substância. Note que, quanto maior for a massa da substância, maior a quantidade de calor fornecida para que a mudança de estado ocorra.

3) Durante a fusão, a temperatura do sólido permanece constante.

Isso acontece porque o calor que é fornecido ao sólido para ele se fundir é usado para aumentar a separação entre seus átomos, o que rompe a rede cristalina, sem gerar variação na agitação térmica desses átomos. Assim, no exemplo da fusão de um bloco de chumbo, sua temperatura permanece em 327 °C, embora estejamos fornecendo 5,8 cal para cada grama que se funde. O líquido que resulta da fusão se encontra, também, a 327 °C.

Essas regularidades são observadas apenas nos sólidos cristalinos, que, ao se fundirem, passam diretamente do estado sólido para o líquido. Os sólidos amorfos, como o vidro, sofrem um processo diferente, pois sua fusão é gradual, passando por estados intermediários, nos quais ficam pastosos antes de se tornar líquidos.

Exemplo

Durante uma festa, um cubo de gelo, de massa $m = 10$ g, foi retirado do congelador à temperatura de −8 °C e colocado em um copo. Porém, foi esquecido lá, ficando em contato com o ar do meio ambiente (figura 4.11). Depois de algum tempo, alguém se lembrou do gelo e foi buscar o copo; havia 10 g de água a uma temperatura invariável de 20 °C. Descreva os processos que ocorreram com o gelo até ser atingida essa situação final.

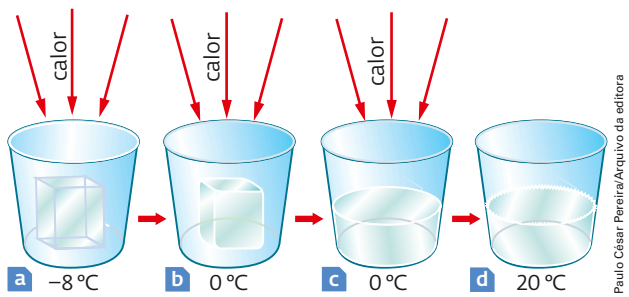


Figura 4.11. Para o exemplo da seção 4.2. Representação sem escala e em cores fantasia.

Como a temperatura final da água permanece invariável em 20 °C, concluímos que ela está em equilíbrio térmico com o ambiente, isto é, a temperatura do ambiente é de 20 °C. Então, na situação inicial **(figura 4.11.a)**, o ambiente está cedendo calor ao gelo, cuja temperatura se elevará até atingir 0 °C, que é seu ponto de fusão **(figura 4.11.b)**. Se, nesse momento, fosse interrompido o fluxo de calor para o gelo, ele não se fundiria, permanecendo sólido a 0 °C.

Entretanto, como o ambiente continua a fornecer calor, o gelo começa a se fundir. Na **tabela 4.1**, vemos que é necessário fornecer 80 cal para fundir 1 g de gelo. Portanto, após o bloco ter atingido 0 °C, como sua massa é de 10 g, ele terá de receber 800 cal do ambiente para fundir-se completamente. Recebendo essa quantidade de calor, o bloco se transforma em 10 g de água a 0 °C **(figura 4.11.c)**. Essa água, estando ainda em temperatura inferior à do ambiente, continuará a receber calor, e sua temperatura vai se elevando, até que seja atingido o equilíbrio térmico, a 20 °C **(figura 4.11.d)**.

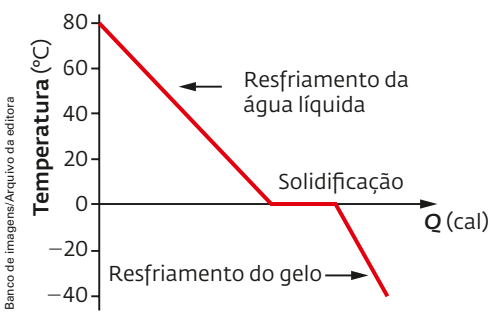


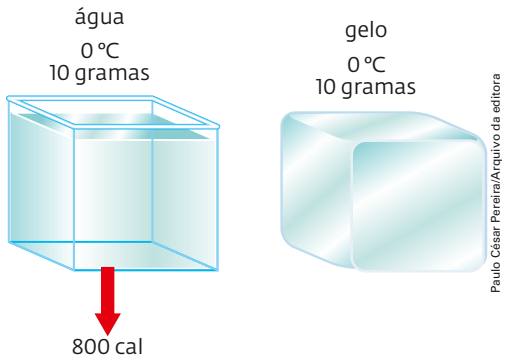
Figura 4.12. Curva de resfriamento da água a 1 atm.

Solidificação

Na solidificação, os processos ocorrem em sentido inverso ao da fusão. Então, se uma porção de água a temperatura de 80 °C, por exemplo, fosse colocada em um *freezer* até que o gelo atingisse a temperatura de −40 °C, os processos ocorreriam em sentido inverso, conforme estão representados no gráfico da **figura 4.12**.

Note que a água permanecerá no estado líquido até atingir 0 °C, onde ocorrerá o processo de solidificação (patamar do gráfico) até que não exista mais água no estado líquido. Quando tivermos apenas gelo, a temperatura começará a baixar até atingir −40 °C.

Durante a solidificação, a temperatura permanece constante e devemos retirar do líquido a mesma quantidade de calor, por unidade de massa, que fornecemos para que ocorra a fusão. Em outras palavras, o calor latente de solidificação é igual ao calor latente de fusão. Assim, no exemplo da **figura 4.13**, se a água fosse colocada no *freezer*, quando a temperatura atingisse 0 °C, a água ainda se encontraria no estado líquido e só depois de ceder 800 cal (80 cal por grama) ao ambiente ela se transformaria em gelo a 0 °C.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 4.13. Deve-se retirar 80 cal por grama da água no estado líquido, a 0 °C, para que ela se transforme em gelo, também a 0 °C. Representação sem escala e em cores fantasia.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

3. a) 2 100 cal
b) Permanece constante em 961 °C.

3. Considere uma moeda de prata de 100 g.
a) Ao ser atingido o ponto de fusão, qual a mínima quantidade de calor que deve ser cedida à moeda para que se funda totalmente?
b) Enquanto a moeda recebe calor, durante a fusão, o que ocorre com sua temperatura?
c) Logo após ser fornecido o calor calculado em **a**, qual será a temperatura da prata líquida resultante da fusão? 961 °C

4. Uma pedra de enxofre, de massa igual a 200 g, encontra-se à temperatura de 119 °C. Consulte a **tabela 4.1** e responda no caderno:
a) Se fornecermos 650 cal de calor a essa pedra, qual será a massa de enxofre que se fundirá? 50 g
b) Então, qual será a temperatura final do enxofre sólido? E do líquido? Ambos estarão a 119 °C.

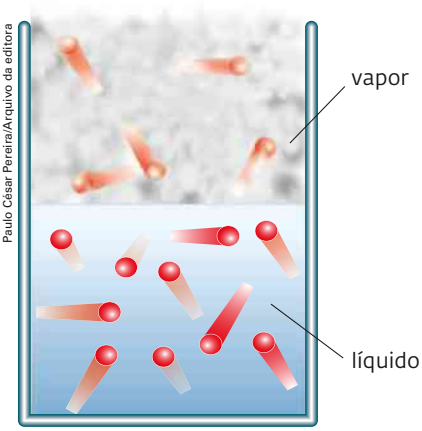
5. Um recipiente refratário, contendo 10 g de platina líquida, é retirado de um forno a 2 000 °C e colocado em contato com o ar ambiente, cuja temperatura é de 25 °C, passando, então, a perder calor.
a) Em qual temperatura a platina começará a se solidificar? 1 775 °C
b) Enquanto a platina está se solidificando, sua temperatura aumenta, diminui ou permanece constante? Permanece constante.
c) Enquanto a platina está se solidificando, ela continua a ceder calor para o ambiente? Sim.

4.3 Vaporização, condensação e calefação

Vaporização

A passagem do estado líquido para o estado gasoso pode ocorrer de três maneiras:

1) por **evaporação** — quando ocorre lentamente, a qualquer temperatura. Uma roupa molhada, por exemplo, torna-se seca em virtude da evaporação da água.
2) por **ebulição** — quando ocorre rapidamente, a uma temperatura bem determinada para cada líquido. A água em uma panela só começa a ferver, isto é, só entra em ebulição, quando sua temperatura atinge um determinado valor.
3) por **calefação** – quando a passagem se faz muito rapidamente a uma temperatura muito acima da temperatura de ebulição. Uma gota de água quando cai sobre a superfície aquecida do ferro de passar roupa, por exemplo, é convertida em vapor em poucos instantes.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 4.14. Grande número de moléculas de um líquido, em virtude de sua constante agitação, consegue escapar através da superfície do líquido, passando para o estado gasoso.

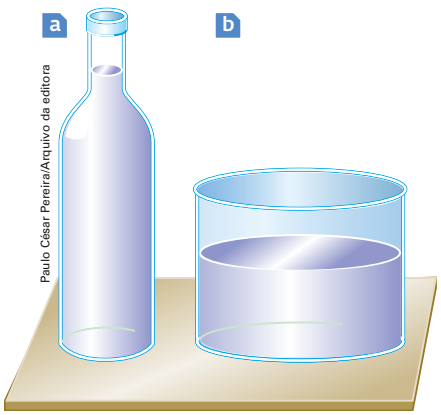
Evaporação

Sabemos que as moléculas de um líquido, a qualquer temperatura, encontram-se em constante agitação, movendo-se em todas as direções, com velocidades variáveis, desde zero até valores muito grandes. Algumas moléculas, com velocidades suficientemente elevadas, ao alcançarem a superfície, conseguem escapar do líquido. Após escaparem, elas passam a uma situação em que se encontram muito afastadas entre si, de modo que a força eletromagnética entre elas é praticamente nula, isto é, encontram-se no estado gasoso **(figura 4.14)**.

Velocidade de evaporação

A velocidade com que um líquido evapora depende de alguns fatores, que examinaremos a seguir:

1) **Temperatura**, pois, quando aumentamos a temperatura de um líquido, a energia cinética média de suas moléculas aumenta. Geralmente, ao sair de uma piscina (ou do mar), sentimos mais frio que dentro da água. Essa sensação é uma consequência da evaporação da água aderida à pele.
2) **Superfície de contato do líquido com o ambiente**. Na **figura 4.15**, observa-se que o líquido contido no recipiente representado em **b** evapora muito mais rapidamente do que o líquido contido no recipiente representado em **a**, pois, quanto maior for essa área, maior será o número de moléculas que poderão atingir a superfície e escapar. Assim, para que uma roupa molhada seque mais depressa, devemos colocá-la estendida, de modo que a área de evaporação da água seja aumentada.
3) **Número de moléculas no estado de vapor**, pois, se muitas moléculas voltarem para a fase líquida, a velocidade de evaporação será pequena. Por esse motivo, em um dia úmido (grande quantidade de vapor de água na atmosfera), roupas molhadas demoram mais tempo para secar. Por outro lado, removendo-se o vapor do líquido que vai se formando próximo à sua superfície (por exemplo, se soprarmos o ar nas proximidades do líquido), a velocidade de evaporação aumenta. Por isso, uma roupa molhada seca mais depressa se estiver ventando.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 4.15. A velocidade de evaporação de um líquido é tanto maior quanto maior for a área de sua superfície livre.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Ebulição

Conforme dissemos, quando a temperatura de um líquido atinge determinado valor, observa-se uma formação rápida e tumultuosa de vapores, isto é, o líquido entra em **ebulição**. Experimentalmente, verifica-se que o processo de ebulição apresenta regularidades semelhantes àquelas que estudamos para a fusão, que são as seguintes:

1) A uma dada pressão, a temperatura na qual ocorre a ebulição (ponto de ebulição) é bem determinada para cada substância.

2) Se um líquido se encontra em seu ponto de ebulição, é necessário fornecer calor a ele para que o processo seja mantido. A quantidade de calor que deve ser fornecida, por unidade de massa, é denominada calor latente de vaporização, característico de cada substância.

Para a água, por exemplo, à pressão de 1 atm, o ponto de ebulição é de 100 °C. A **tabela 4.2** apresenta os pontos de ebulição de várias substâncias.

Nela, vemos que o calor de vaporização da água é 540 cal/g, isto é, a cada 1 g de água que se encontra em seu ponto de ebulição, devemos fornecer 540 cal de calor para que ela se vaporize.

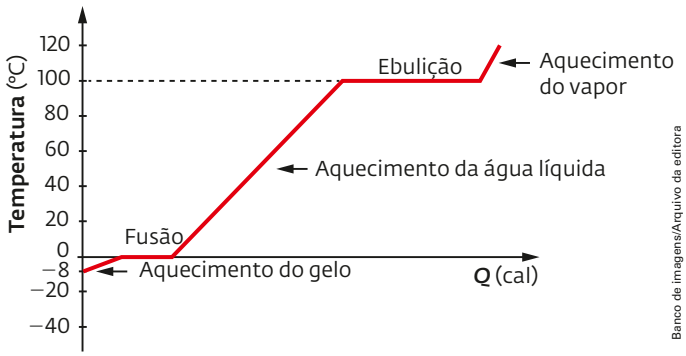
Tabela 4.2

Pontos de ebulição e calores de vaporização (à pressão de 1 atm)			
Substância	**Ponto de ebulição** (°C)	**Calor de vaporização** (J/kg)	**Calor de vaporização** (cal/g)
Mercúrio	357	$0{,}27 \cdot 10^6$	65
Iodo	184	$0{,}10 \cdot 10^6$	24
Água	100	$2{,}50 \cdot 10^6$	540
Álcool etílico	78	$0{,}85 \cdot 10^6$	204
Bromo	59	$0{,}18 \cdot 10^6$	44
Nitrogênio	−196	$0{,}20 \cdot 10^6$	48
Hélio	−269	$0{,}025 \cdot 10^6$	6

3) Durante a ebulição, apesar de se fornecer calor ao líquido, sua temperatura permanece constante e o vapor que se forma encontra-se à mesma temperatura do líquido.

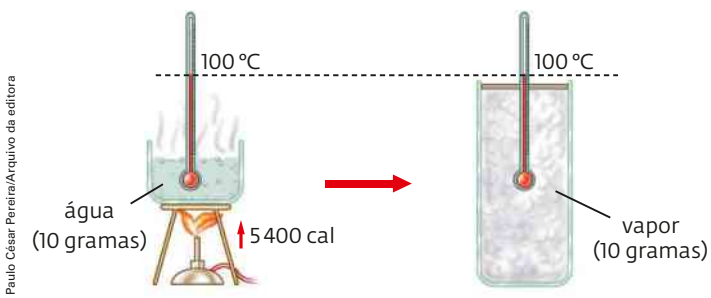
Retomemos o exemplo da seção anterior em que tínhamos um cubo de gelo que foi aquecido até se transformar em água a temperatura de 80 °C. Se continuarmos aquecendo a água até 120 °C, veremos que ao atingir 100 °C (ponto de ebulição) ela entrará em ebulição **(figura 4.16)**. Dessa forma, no patamar de 100 °C, a água estará tanto no estado líquido quanto no estado gasoso e a sua temperatura não aumentará até que toda ela se transforme em vapor. Quando tivermos apenas vapor, a temperatura continuará a subir (no nosso exemplo, até atingir 120 °C).

A **figura 4.17** ilustra a vaporização, por ebulição, de 10 g de água. Observe que os dados apresentados nessa figura estão de acordo com as regularidades que acabamos de estudar.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 4.16 Curva de aquecimento da água a 1 atm.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 4.17. Deve-se fornecer 540 cal a cada grama de água no estado líquido, a 100 °C, para que ela se transforme em vapor, também a 100 °C. Representação sem escala e em cores fantasia.

Condensação

Retirando-se calor do vapor de uma substância que esteja a uma temperatura superior ao seu ponto de ebulição, a temperatura do vapor diminuirá e, quando ela atingir o valor no qual ocorreu a ebulição, o vapor começará a se **condensar** (liquefazer), ou seja, o ponto de condensação é igual ao ponto de ebulição. Sendo a condensação um processo inverso à vaporização, o vapor deverá liberar calor para se liquefazer, sendo o calor latente de condensação igual ao calor latente de vaporização.

Assim, quando 1 g de vapor de água, que se encontra a 100 °C, condensa-se, libera 540 cal. A água que se origina da condensação estará também a 100 °C.

Exemplo

Qual é a quantidade de calor que devemos fornecer a 20 g de gelo a 0 °C para transformá-lo em vapor de água, superaquecido, a 200 °C?

No intervalo de 0 °C a 200 °C, teremos duas mudanças de estado: o gelo se funde a 0 °C, e a água entra em ebulição a 100 °C. Em virtude disso, o cálculo da quantidade de calor pedida deve ser feito em etapas, da seguinte maneira:

1) para fundir o gelo — como o calor de fusão do gelo é de 80 cal/g **(tabela 4.1)**, para fundir 20 g devemos fornecer uma quantidade de calor dada por:

$$\Delta Q_1 = 80 \cdot 20$$
$$\Delta Q_1 = 1{,}6 \cdot 10^3 \text{ cal}$$

2) para elevar a temperatura da água resultante da fusão de 0 °C para 100 °C — a quantidade de calor necessária, nesse processo, é dada por:

$$\Delta Q_2 = mc\Delta T = 20 \cdot 1{,}0 \cdot 100$$
$$\Delta Q_2 = 2{,}0 \cdot 10^3 \text{ cal}$$

3) para transformar a água a 100 °C em vapor a 100 °C — como o calor de vaporização da água é 540 cal/g **(tabela 4.2)**, para vaporizar 20 g devemos fornecer uma quantidade de calor:

$$\Delta Q_3 = 540 \cdot 20$$
$$\Delta Q_3 = 10{,}8 \cdot 10^3 \text{ cal}$$

4) para elevar a temperatura do vapor de 100 °C a 200 °C — tratando-se de um processo em que há apenas elevação de temperatura, teremos, como na etapa (2), $\Delta Q_4 = mc\Delta T$. O valor de c (calor específico do vapor de água) é fornecido pela **tabela 3.1**: $c = 0{,}50$ cal/g · °C. Então:

$$\Delta Q_4 = mc\Delta T = 20 \cdot 0{,}50 \cdot 100$$
$$\Delta Q_4 = 1{,}0 \cdot 10^3 \text{ cal}$$

Logo, a quantidade total de calor, ΔQ, necessária para transformar 20 g de gelo a 0 °C em vapor a 200 °C será:

$$\Delta Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \Delta Q_3 + \Delta Q_4$$
$$\Delta Q = 15{,}4 \cdot 10^3 \text{ cal}$$

6. b) As moléculas mais velozes escapam mais rapidamente do líquido.

7. b) Permanece constante.
c) 600 g

8. a) O vapor de água do ar, no interior do automóvel, condensa-se em contato com a superfície do vidro que está mais fria.
b) O movimento do ar faz com que o vapor de água condensada torne a evaporar.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

6. Costuma-se soprar sobre a superfície de um líquido quente para que ele esfrie mais rapidamente.

a) Quando se faz isso, o que acontece com a velocidade de evaporação do líquido? Aumenta.

b) Explique, então, por que, procedendo dessa maneira, conseguimos fazer com que o líquido esfrie mais depressa.

7. Certa quantidade de mercúrio, à temperatura ambiente, é aquecida por meio de uma chama. Consulte a **tabela 4.2** e responda, no caderno:

a) Em que temperatura o mercúrio entrará em ebulição? 357 °C

b) Continuando-se a fornecer calor ao mercúrio, o que ocorrerá com sua temperatura enquanto ele estiver em ebulição?

c) Verifica-se que foi necessário fornecer $3{,}9 \cdot 10^4$ cal de calor, durante a ebulição, para vaporizar totalmente o mercúrio. Calcule, então, o valor da massa desse líquido.

d) Logo após ser fornecido ao líquido o calor mencionado em **c**, qual será a temperatura do vapor de mercúrio resultante da vaporização? 357 °C

8. a) É comum observarmos que, em dias de chuva, ao fechar os vidros de um automóvel, eles se tornam embaçados. Explique.

b) Para desembaçar o para-brisa, alguns automóveis possuem um ventilador (desembaçador). Explique por que esse processo é eficaz.

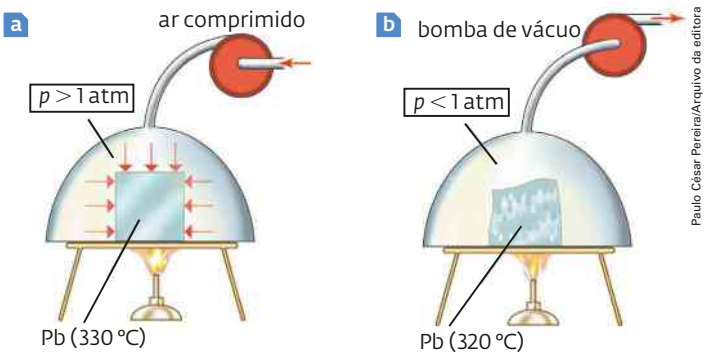
4.4 Influência da pressão

Verifica-se experimentalmente que, se variarmos a pressão exercida sobre uma substância, a temperatura na qual ela muda de fase sofrerá alterações. Assim, quando dissemos que o gelo se funde a 0 °C e a água entra em ebulição a 100 °C, destacamos que isso ocorre se a pressão for de 1 atm. Nesta seção, vamos analisar essa influência da variação de pressão nas temperaturas de mudanças de fase.

Influência da pressão na temperatura de fusão

Quando uma substância se funde, geralmente ela aumenta de volume. Para uma substância que tenha esse comportamento, observa-se que **um aumento na pressão exercida sobre ela acarreta aumento em sua temperatura de fusão** (e, consequentemente, em sua temperatura de solidificação).

Assim, o chumbo, por exemplo, que aumenta de volume ao se fundir, tem seu ponto de fusão em 327 °C à pressão de 1 atm. Submetendo-o a uma pressão mais elevada, ele vai se fundir a uma temperatura mais alta. A **figura 4.18.a** representa um bloco de chumbo que atinge uma temperatura superior a 327 °C, porque a pressão sobre ele é maior do que 1 atm. Reciprocamente, a uma pressão inferior a 1 atm o chumbo se fundirá abaixo de 327 °C **(figura 4.18.b)**.



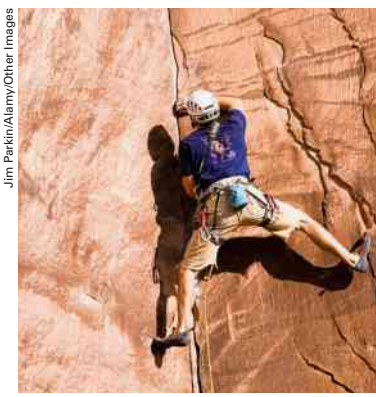
Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 4.18. Em **a** o aumento na pressão eleva o valor da temperatura de fusão do chumbo. Em **b** a diminuição da pressão baixa o valor desta temperatura. Representação sem escala e em cores fantasia.

A água é uma exceção

Algumas poucas substâncias, entre elas a água, fogem do comportamento geral, pois diminuem de volume ao se fundirem. Portanto, o volume de dada massa de água aumenta quando ela se transforma em gelo. É por esse motivo que uma porção de água submetida a baixa temperatura empurra a superfície quando a água se solidifica **(figura 4.19)**.

Para essas substâncias, **um aumento na pressão acarreta uma diminuição na temperatura de fusão**. O gelo se funde a 0 °C somente se a pressão sobre ele for de 1 atm. Se aumentarmos essa pressão, ele se fundirá a uma temperatura **inferior** a 0 °C; reciprocamente, a uma pressão inferior a 1 atm, seu ponto de fusão será superior a 0 °C. Uma ilustração para esse fênomeno é representada na **figura 4.20**: o gelo sob a lâmina da bota do patinador (pressão muito grande) se funde, apesar de sua temperatura ser inferior a 0 °C, permitindo que a pessoa deslize facilmente sobre a pista. Assim que o patinador acaba de passar, a pressão retorna a 1 atm e a água volta ao estado sólido, pois sua temperatura é inferior a 0 °C.



Jim Parkin/Alamy/Other Images

Figura 4.19. A água das chuvas penetra em frestas existentes nas rochas, ficando aí acumulada. Em países de clima frio, como o Canadá, é comum haver o rompimento dessas rochas, quando a água congela.

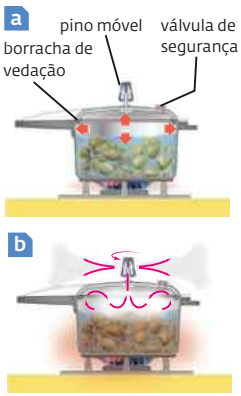


João X. de Campos/Arquivo da editora

Figura 4.20. Na prática de patinação no gelo, quando o patinador desliza as lâminas dos seus patins, provoca a fusão do gelo devido à pressão sobre ele. Assim, o gelo derrete no local em que há aumento da pressão, facilitando o deslizamento.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Influência da pressão na temperatura de ebulição



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

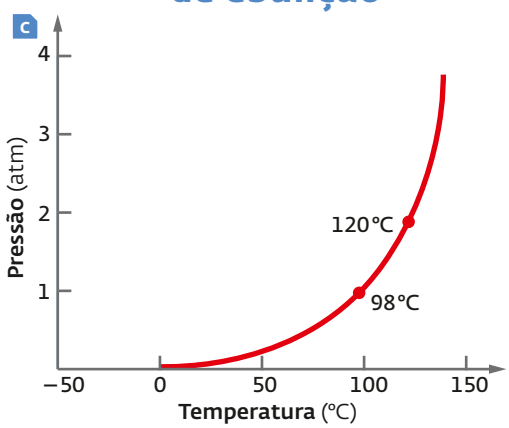
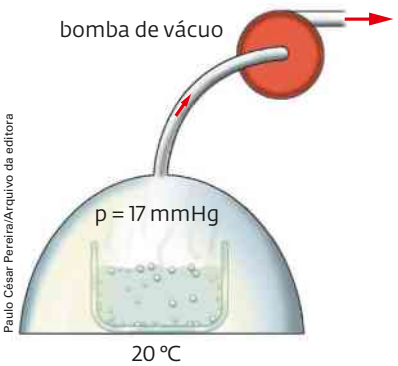


Figura 4.21. Em uma panela de pressão, a água atinge temperaturas superiores a 100 °C, permanecendo no estado líquido.

A maioria das substâncias, ao se vaporizar, aumenta de volume. Assim, por dificultar a vaporização, **um aumento na pressão acarreta um aumento na temperatura de ebulição**.

Esse fato pode ser verificado com o uso das panelas de pressão. Em uma panela aberta, com pressão de 1 atm, a água entra em ebulição a 100 °C, e sua temperatura não ultrapassa esse valor. Ao tamparmos uma panela de pressão, os vapores formados são impedidos de escapar devido ao pino, que é pesado e móvel, se manter para baixo. A movimentação do pino se dá quando a pressão do vapor da água no interior da panela aumenta, podendo a pressão total atingir cerca de 2 atm. Com isso, a água entrará em ebulição a uma temperatura próxima de 120 °C, fazendo com que os alimentos sejam cozidos mais rapidamente. Nesse momento, a pressão de 2 atm é suficiente para compensar a pressão externa e o peso do pino, permitindo que vapores sejam liberados pela válvula **(figura 4.21)**.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 4.22. É possível fazer a água entrar em ebulição a temperaturas relativamente baixas, reduzindo-se a pressão.

Por outro lado, uma diminuição na pressão provoca um abaixamento na temperatura de ebulição. Reduzindo-se gradualmente a pressão sobre a superfície da água, sua temperatura de ebulição torna-se cada vez menor, podendo-se obter água em ebulição mesmo a temperaturas muito baixas. Por exemplo, se com uma bomba de vácuo reduzirmos a pressão a 17 mmHg, poderemos fazer a água ferver a 20 °C **(figura 4.22)**.

Por isso, em locais situados acima do nível do mar, onde a pressão atmosférica é menor do que 76 cmHg, a água entra em ebulição a uma temperatura inferior a 100 °C **(figura 4.23)**. No alto do Monte Everest, por exemplo, cuja altitude é de 8 848 m, e a pressão atmosférica é de apenas 231 mmHg, a água entra em ebulição a 72 °C.



Paulo César/Arquivo da editora

Figura 4.23. Quanto maior a altitude (menor pressão atmosférica), menor é a temperatura de ebulição da água.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

9. Sabe-se que o ferro, como a maioria das substâncias, ao se fundir tem comportamento igual ao do chumbo. Baseando-se nessa informação, responda:

a) Uma barra de ferro, ao se fundir, aumenta ou diminui de volume? Aumenta.

b) Então, o ferro líquido tem densidade maior ou menor do que o ferro sólido? Menor.

c) Assim, uma barra de ferro sólido, colocada em ferro líquido, afunda ou flutua? Afunda.

10. O ponto de fusão do ferro é de 1 535 °C sob pressão de 1 atm. Aquecendo-se uma barra de ferro que está submetida à pressão de 5000 atm, a fusão vai ocorrer abaixo ou acima de 1 535 °C? Acima.

11. a) Em sua cidade, a pressão atmosférica é maior, menor ou igual a 76 cmHg?

b) Então, o ponto de fusão do gelo, em sua cidade, é maior, menor ou igual a 0 °C?

12. a) A **tabela 4.2** nos informa que o álcool entra em ebulição a 78 °C. Será possível aquecer uma quantidade de álcool até 100 °C sem que ele entre em ebulição? Como?

b) Verifica-se que, em uma cidade, a água colocada em uma panela aberta entra em ebulição a 96 °C. Qual é a altitude dessa cidade? (Consulte a **figura 4.21**.) 1 000 m

Não escreva no livro!

11. a) Igual se estiver no nível do mar e menor se estiver acima.
b) Igual se estiver no nível do mar e maior se estiver acima.
12. a) Sim; aumentando-se a pressão sobre ele.

4.5 Sublimação – Diagrama de fases

Sublimação

Há alguns anos as donas de casa colocavam uma bola de naftalina em armários e gavetas. Elas faziam isso porque sabiam que baratas e traças são repelidas pelos vapores exalados da naftalina. A naftalina, em estado sólido, passa para o estado gasoso sem passar pelo estado líquido, isto é, **sublima**. Pouco se utiliza a naftalina hoje em dia, pois os vapores exalados por ela são tóxicos tanto para os insetos quanto para os seres humanos.

A sublimação também ocorre com o CO_2 sólido e, por isso, ele é denominado **gelo-seco** (**figura 4.24**). Outro exemplo é o iodo. Embora sejam poucas as substâncias que se sublimam nas condições ambientes, verifica-se que esse fenômeno pode ocorrer com qualquer substância, dependendo da temperatura e da pressão a que ela for submetida.

O estudo do **diagrama de fases**, que faremos a seguir, nos permitirá definir em que condições a sublimação de uma substância poderá ocorrer.

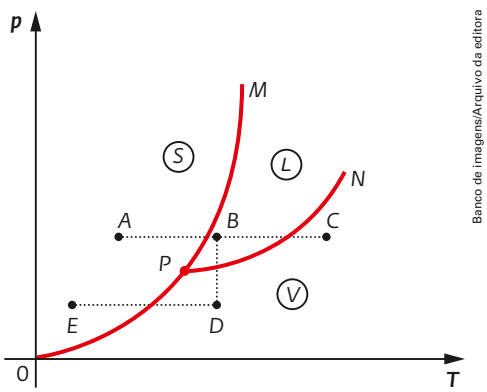


Eduardo Santaliestra/Estúdio Paulista

Figura 4.24. Uma porção de gelo-seco se sublima. Observe o vapor desprendendo diretamente do sólido.

Diagrama de fases

Como dissemos na seção 4.1, uma dada substância pode se apresentar em diferentes estados, dependendo de sua temperatura e da pressão exercida sobre ela. Em um laboratório é possível determinar, para cada substância, os valores de ***p*** e ***T*** correspondentes a cada um desses estados. Com base neles podemos construir um gráfico, denominado **diagrama de fases**, que tem aspecto semelhante ao da **figura 4.25**. Observe que esse diagrama está dividido em três regiões, indicadas por *S*, *L* e *V*. Se nos forem fornecidos os valores da pressão e da temperatura em que certa substância se encontra, o seu diagrama de fases nos permitirá determinar o estado que ela está. Para isso, devemos localizar, nesse diagrama, o ponto correspondente ao par de valores de *p* e *T* fornecidos. Se esse ponto estiver localizado na região *S*, a substância estará na fase sólida (por exemplo, o ponto *A* da **figura 4.25**); se estiver na região *L*, estará na fase líquida; e se estiver na região *V*, na fase gasosa.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 4.25. Diagrama de fases de uma substância. Conhecendo sua pressão e temperatura, esse diagrama nos permite determinar o estado em que ela se encontra.



Richard Megna/Fundamental Photographs

Figura 4.26. À pressão de 4,6 mmHg e à temperatura de 0,01 °C é possível encontrar a água nos estados sólido, líquido e gasoso, simultaneamente.

Ponto triplo

As linhas que aparecem no diagrama de fases e que o dividem nas regiões *S*, *L* e *V* correspondem a valores de *p* e *T* nos quais podemos encontrar a substância, simultaneamente, em dois estados. Assim, na **figura 4.25**, qualquer ponto da linha *PM* corresponde a um par de valores de *p* e *T* no qual a substância se apresenta, simultaneamente, nos estados sólido e líquido. A linha *PN* corresponde ao equilíbrio entre líquido e vapor, e a linha *OP*, entre sólido e vapor. O ponto de encontro dessas três linhas (ponto *P* da **figura 4.25**) nos fornece os valores da pressão e da temperatura nos quais a substância pode se apresentar, simultaneamente, nos três estados. Esse ponto é denominado **ponto triplo** da substância. A água, por exemplo, à pressão de 4,6 mmHg e à temperatura de 0,01 °C, pode ser encontrada, simultaneamente, nos estados sólido, líquido e gasoso **(figura 4.26)**; portanto, esses valores correspondem ao seu ponto triplo.

Comentário

Consideremos uma substância com pressão e temperatura correspondentes ao ponto *A* da **figura 4.25**. Essa substância se encontra no estado sólido. Já sabemos que, mantendo constante a pressão e aumentando a temperatura, ocorrerá a fusão desta substância em certo valor de *T*. No diagrama, esse processo corresponde a um deslocamento ao longo da linha *AB* e a fusão ocorre quando essa linha cruzar a curva *PM*.

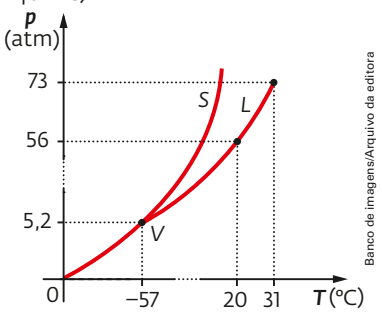
No ponto *B*, a substância está no estado líquido. Já vimos que temos duas maneiras principais para fazer um líquido se vaporizar (entrar em ebulição): aumentando sua temperatura a pressão constante ou reduzindo sua pressão a temperatura constante. Observe que, no diagrama, o primeiro processo corresponde a um deslocamento ao longo de *BC*, e o segundo, ao longo de *BD*. Em ambos os casos, a vaporização ocorre no cruzamento dessas linhas com a curva *PN*.

Consideremos, agora, uma substância no estado sólido, na situação correspondente ao ponto *E*, no qual sua pressão é inferior à pressão do ponto triplo. O diagrama nos mostra que, mantendo constante a pressão e aumentando a temperatura (deslocamento ao longo de *ED*), a substância passa diretamente do estado sólido para o estado de vapor, isto é, ela se sublima. Observe, então, no diagrama, que, se uma substância sólida estiver submetida a uma pressão inferior à pressão de seu ponto triplo, ela, ao ser aquecida, passará diretamente para o estado de vapor. Logo, um sólido só poderá se sublimar se a pressão a que ele estiver submetido for inferior à pressão de seu ponto triplo.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

Os exercícios de **13** a **15** se referem ao diagrama de fases do CO_2, que está representado na figura destes exercícios (o gráfico não foi construído em escala uniforme).



Banco de imagens/Arquivo da editora

13. a) Se o CO_2 estiver submetido à pressão de 50 atm e temperatura de −80 °C, em que fase ele se encontra? Sólida.

b) Certa massa de CO_2, nas condições de temperatura e pressão de sua sala de aula (aproximadamente 1 atm e 20 °C), em que fase se apresentará? Gasosa.

14. a) Em um tanque, tem-se CO_2 líquido, submetido à pressão de 56 atm. Aquecendo-se esse líquido e mantendo-se constante a pressão sobre ele, em que temperatura o CO_2 começará a se vaporizar? 20 °C

b) A que pressão e temperatura devemos submeter o CO_2 para que seja possível encontrá-lo, simultaneamente, nas três fases? 5,2 atm e −57 °C

15. Um recipiente contém uma mistura de CO_2 nos estados sólido, líquido e gasoso, em equilíbrio.

a) Mantém-se constante a temperatura e aumenta-se a pressão sobre a mistura. Em que fase, então, se apresentará toda a massa de CO_2? Sólida.

b) Responda à questão **a**, supondo que a pressão foi mantida constante, e a temperatura aumentada. Gasosa.

c) O que deveria ser feito para que o CO_2 passasse totalmente para o estado líquido? Aumentar a temperatura e a pressão.

APLICAÇÕES DA FÍSICA

Aquecimento global do planeta

Atualmente existe um esforço da comunidade científica para compreender melhor a elevação da temperatura média global do planeta, assim como suas consequências imediatas e a longo prazo. Estudos realizados por cientistas do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC), que reúne os maiores especialistas do mundo nesse ramo de pesquisa, consideram esse aquecimento consequência do acúmulo de gases-estufa com o advento da Revolução Industrial, no século XVIII. Como a atividade industrial vem se intensificando nos últimos dois séculos, cada vez mais dióxido de carbono (CO_2), metano e óxido nitroso (N_2O) são lançados na atmosfera anualmente. Para se ter uma ideia, antes da Revolução Industrial, as emissões de origem humana somavam 290 ppm (partes por milhão) de CO_2, agora chegam a cerca de 400 ppm.

O acompanhamento das alterações na temperatura média global do planeta é feito por instrumentos precisos, como satélites e sondas flutuantes nos oceanos, que fornecem dados em tempo real. Além das informações técnicas, a principal evidência da alteração da temperatura é o derretimento do gelo, especialmente na calota norte, no Ártico, junto com o degelo das camadas glaciais dos continentes. Em consequência disso, os cientistas apontam a elevação do nível dos mares e oceanos como a principal consequência a médio e a longo prazo.

a

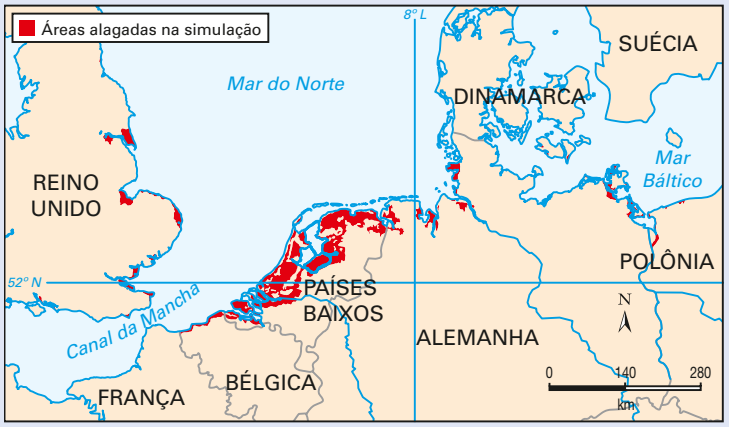
Regiões costeiras do mar do Norte e Báltico – 2011



Mapas: Mário Yoshida/Arquivo da editora

b

Regiões costeiras do mar do Norte e Báltico – simulação de aumento do nível do mar



Disponível em: <http://climate.nasa.gov/ClimateTimeMachine/climateTimeMachine.cfm>. Acesso em: 19 jan. 2016.

Figura 4.27. Em **a**, região próxima à costa ao sul do mar do Norte em 2011. Em **b**, simulação mostrando as regiões costeiras (em vermelho) que seriam alagadas considerando a elevação de 1 metro no nível dos mares e oceanos. Simulação elaborada com base em informações da Nasa.

Existem opiniões divergentes quanto ao valor exato que a elevação das águas pode atingir. A previsão mais pessimista considera que 2% de todas as geleiras derreterão até 2100, ocasionando um aumento de 1,2 metro no nível do mar. Se esse valor chegar ao limite máximo alguns países perderão parte de seu território. Um exemplo seriam os Países Baixos, pois 40% das suas áreas costeiras estão abaixo do nível do mar **(figura 4.27)**.

1. Diversos aspectos, como: deslocamento das cidades na direção do interior, repercussão na indústria, turismo e agricultura das cidades que podem vir a ser inundadas.
2. Veja resposta no Manual do Professor.

QUESTÕES

1. Em um país como o Brasil, cuja população concentrada no litoral é numerosa, o impacto do aumento do nível dos oceanos será extremamente grande. Supondo um aumento de 1,2 m, discuta quais seriam os impactos na economia do país e na vida da população brasileira.
2. Além da vida humana, a vida animal será fortemente afetada por essas alterações no meio ambiente. Pesquise sobre o possível impacto do aquecimento global no ciclo de vida dos ursos-polares e de peixes de regiões frias, como o salmão, e explique como essas alterações físicas podem impactar esses animais.

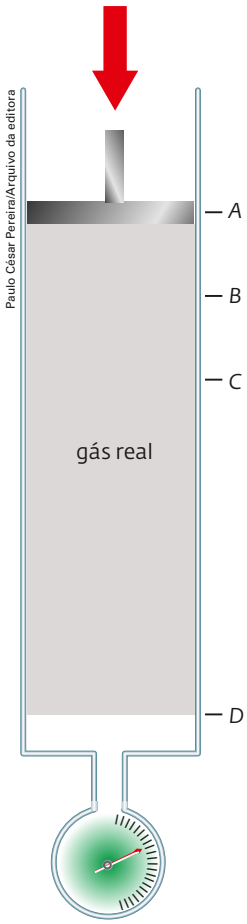


Figura 4.28. Representação (sem escala e em cores fantasia) de um gás real comprimido no interior de um cilindro provido de manômetro.

4.6 Pressão de vapor

No capítulo 2, ao estudarmos o comportamento de um gás ideal, vimos que ele obedece a lei de Boyle e a lei de Gay-Lussac, que podem ser sintetizadas pela equação $pV = nRT$. Vimos que os gases existentes na natureza, isto é, os gases reais (O_2, N_2, He, H_2, etc.), comportam-se como um gás ideal quando submetidos a pressões baixas e temperaturas elevadas, ou seja, quando sua densidade é pequena.

Vejamos como os gases reais podem, em determinadas condições, se afastar do comportamento ideal e se transformar em líquido.

Suponha que um gás real esteja confinado em um cilindro provido de pistão e de manômetro, permitindo-nos ler os valores de sua pressão, como mostra a **figura 4.28**.

Mantendo constante a temperatura do gás, vamos comprimi-lo a partir da posição *A* do pistão, quando sua pressão é, ainda, relativamente baixa. Durante a compressão, verifica-se que, inicialmente, o gás real se comporta como um gás ideal, isto é, seus valores de *p*, *V* e *T* satisfazem à equação $pV = nRT$.

Entretanto, após o pistão atingir certa posição (por exemplo, a posição *B* da **figura 4.28**), na qual a pressão é um pouco mais elevada, observa-se que o gás real deixa de se comportar como um gás ideal. Seu comportamento torna-se mais complexo, exigindo, para descrevê-lo, equações mais sofisticadas do que a equação de estado de um gás ideal.

Prosseguindo na compressão do gás, ao ser alcançado um determinado valor da pressão (quando o pistão atingir, por exemplo, a posição *C*), percebe-se que começam a se formar pequenas gotas de líquido no interior do cilindro, isto é, naquela pressão se inicia a condensação do gás. Tal pressão é denominada **pressão de vapor** do gás na temperatura da experiência.

A partir dessa posição, se continuarmos a empurrar o pistão, a pressão do gás não se altera, mas a quantidade de líquido condensado aumenta gradativamente, até que todo o gás tenha se liquefeito (posição *D*, por exemplo).

A pressão de vapor aumenta com a temperatura

Considere, agora, que essa mesma experiência seja repetida, estando, porém, o gás a uma temperatura um pouco mais elevada. Durante a compressão, verificaremos que todas as situações observadas na experiência anterior se repetirão. Entretanto, uma mudança importante será constatada: o valor da pressão na qual o gás começa a se condensar torna-se mais elevado. Em outras palavras, a pressão de vapor do gás apresenta, agora, um valor maior.

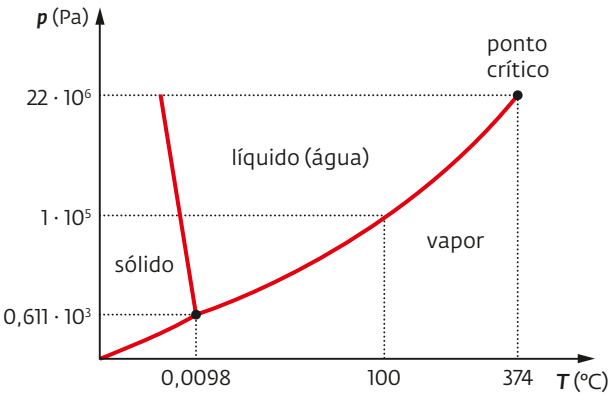
Realizando novas experiências, com o gás a diversas temperaturas, chegaremos à conclusão de que o resultado anterior é geral: a pressão de vapor de um gás é tanto maior quanto maior for a sua temperatura. Assim, quanto mais aquecido estiver um gás, maior deverá ser a pressão que teremos de exercer sobre ele para condensá-lo.

Temperatura crítica de um gás

O que acabamos de afirmar sobre a condensação de um gás é válido até que ele atinja certa temperatura. De fato, se o gás se encontrar nessa temperatura, ou em valores superiores a ela, não conseguiremos liquefazê-lo, por maior que seja a pressão exercida sobre ele.

Essa temperatura denomina-se **temperatura crítica**, T_c, do gás. Portanto, só é possível liquefazer um gás, por aumento de pressão, se ele estiver a uma temperatura inferior à sua temperatura crítica. Acima dessa temperatura só é possível encontrar a substância no estado gasoso.

É costume, entre certos autores, fazer distinção entre os termos **gás** e **vapor**. Quando uma substância se encontra no estado gasoso, em temperatura inferior a T_c, diz-se que ela é um **vapor**; se sua temperatura for superior a T_c, diz-se que ela é um **gás** (figura 4.29).



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 4.29. Diagrama de fase para a água. Destacamos o ponto crítico; após essa temperatura não é possível liquefazer o gás. Esse gráfico tem valores aproximados e não se encontra em escala.

Dois exemplos de temperaturas críticas: do oxigênio e do anidrido carbônico

O valor da temperatura crítica é característico de cada substância. Assim, a temperatura crítica do oxigênio (O_2) é $T_c = -118\,°C$. Então, para obter oxigênio líquido, devemos, antes de mais nada, reduzir sua temperatura para um valor inferior a $-118\,°C$ e, em seguida, exercer sobre ele uma pressão igual à sua pressão de vapor. Acima de $-118\,°C$ será impossível fazer o oxigênio se condensar. De acordo com a nomenclatura citada anteriormente, o oxigênio, no estado gasoso, em temperatura inferior a $-118\,°C$, seria um vapor; acima dessa temperatura, seria um gás.

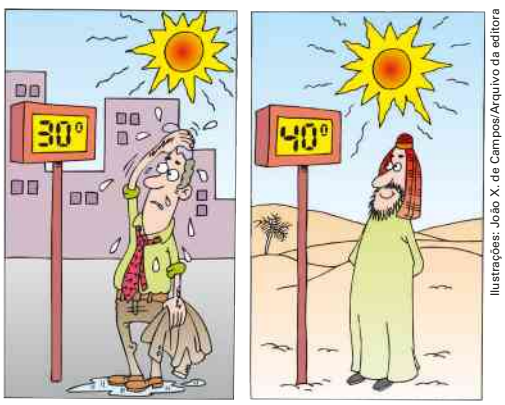
Para o anidrido carbônico (CO_2), a temperatura crítica é $T_c = 31\,°C$. Portanto, tomando-se uma certa quantidade de O_2 e CO_2 do ar ambiente, em um dia no qual a temperatura seja cerca de 20 °C, o CO_2 poderá ser condensado se o comprimirmos convenientemente (pressão de vapor), mas o O_2 permanecerá sempre no estado gasoso, qualquer que seja a pressão sobre ele. Em um dia muito quente (acima de 31 °C), nem mesmo o CO_2 poderá ser condensado, pelo aumento da pressão que atua sobre ele.

Vapor de água na atmosfera

O ar atmosférico é uma mistura de alguns gases, tais como o oxigênio, o nitrogênio, o anidrido carbônico e o vapor de água. A quantidade de vapor de água existente em um dado volume de ar é um fator importante para a nossa vida, pois está relacionada com a ocorrência das chuvas, com o clima em geral e até mesmo com a sensação de conforto que experimentamos em determinados ambientes (o desconforto é causado tanto por excesso quanto por baixo percentual de vapor na atmosfera). Para caracterizar a quantidade de vapor existente em uma dada massa de ar, define-se uma grandeza chamada **umidade absoluta**, u_a, da atmosfera (figura 4.30). Considerando m a massa de vapor presente em um volume V de ar, temos:

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

Essa grandeza é pouco usada, porque os técnicos e cientistas preferem trabalhar com o conceito de **umidade relativa**, que analisaremos a seguir.



Ilustrações: João X. de Campos/Arquivo da editora

Figura 4.30. Quando uma pessoa transpira, se seu suor evaporar, haverá absorção de calor de sua pele e ela sentirá mais conforto. Isso ocorre, por exemplo, em lugares de clima quente e seco (baixa umidade). Se a umidade do ar, entretanto, for elevada, a evaporação do suor será mais lenta, fazendo com que as pessoas tenham uma sensação mais desagradável, mesmo que o clima não seja muito quente.

A pressão atmosférica é a soma das pressões exercidas por todos os gases presentes no ar. A pressão que cada um desses gases exerce isoladamente é denominada pressão parcial do gás. A pressão parcial que o vapor de água exerce é, em geral, muito baixa, estando situada em torno de alguns mmHg.

Para uma dada temperatura, a pressão parcial do vapor de água não pode ser maior do que a sua pressão de vapor, pois, como vimos, nessas condições o vapor se condensaria. Quando a pressão parcial se iguala à pressão de vapor (ele está prestes a se condensar), dizemos que o vapor está **saturado** e, quando ela é inferior a esse valor, o vapor é denominado **vapor seco** ou **não saturado**. A **umidade relativa**, u_r, do ar é definida da seguinte maneira:

$$u_r = \frac{\text{pressão parcial do vapor de água}}{\text{pressão de vapor da água na mesma temperatura}}$$

Tabela 4.3

Pressão de vapor de água	
Temperatura (°C)	**Pressão de vapor** (mmHg)
0	4,6
5	6,5
10	8,9
15	12,6
20	17,5
40	55,1
60	150
80	355
100	760
120	1490
140	2710

Vejamos um exemplo: suponhamos que em um ambiente, à temperatura de 20 °C, a pressão parcial do vapor de água fosse de 10 mmHg. A **tabela 4.3** nos mostra que a pressão de vapor de água a essa temperatura é 17,5 mmHg (isto é, o vapor estaria saturado se sua pressão tivesse esse valor). Então, a umidade relativa do ambiente seria:

$$u_r = \frac{10}{17{,}5} = 0{,}57$$

Usualmente o valor de u_r é representado sob forma percentual, isto é:

$$u_r = 100 \cdot 0{,}57 \quad \text{ou} \quad u_r = 57\%$$

Se o vapor no ambiente estivesse saturado, sua umidade relativa seria $u_r = 100\%$ e se não houvesse vapor presente na atmosfera, teríamos $u_r = 0$. Como vimos na seção 4.3, nessa última situação a velocidade de evaporação da água colocada em um recipiente aberto seria muito alta e no primeiro caso ($u_r = 100\%$) a água não evaporaria.

A medida da umidade relativa do ar é feita por meio de aparelhos denominados **higrômetros** **(figura 4.31)**. Um modelo muito simples de higrômetro pode ser construído se dispusermos de um termômetro e de um recipiente metálico liso (ou até mesmo de um copo de vidro comum).

Colocando-se água no recipiente e acrescentando-se a ela, lentamente, pequenos pedaços de gelo, sua temperatura decrescerá gradualmente. Em certo momento observaremos que a superfície externa do recipiente ficará embaçada, em virtude da condensação, sobre essa superfície, do vapor de água existente na atmosfera. A temperatura em que isso ocorre é denominada **ponto de orvalho**.



Islandstock/Alamy/Latinstock

Figura 4.31. Higrômetro para medir a umidade relativa e a temperatura do ambiente.

Suponha que essa condensação tenha ocorrido quando a temperatura do recipiente atingiu 10 °C. A **tabela 4.3** nos fornece o valor da pressão de vapor de água a 10 °C, que é de 8,9 mmHg. Sabe-se que o vapor se condensa quando sua pressão parcial se iguala à pressão de vapor. Logo, a pressão parcial de vapor de água na atmosfera é igual a 8,9 mmHg. Outro termômetro nos fornece a temperatura do ar ambiente. Supondo que ela seja de 20 °C, obtemos a pressão de vapor a essa temperatura: 17,5 mmHg **(tabela 4.3)**. Temos assim os dados que nos permitem obter a umidade relativa do ar:

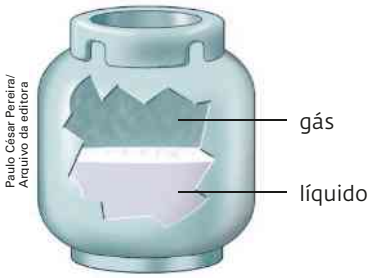
$$u_r = \frac{8{,}9}{17{,}5} = 0{,}51 \quad \text{ou} \quad u_r = 51\%$$

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

16. Um botijão de gás de cozinha, hermeticamente fechado, contém gás liquefeito em equilíbrio com seu vapor. Veja a seguir.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

a) A pressão do gás do botijão é maior, menor ou igual à sua pressão de vapor? Igual.

b) Abre-se a válvula do botijão e deixa-se escapar certa massa de gás. Fechando-se novamente a válvula, a pressão do gás no interior do botijão será maior, menor ou igual ao valor da pressão inicial? Explique o que ocorreu. Igual; parte do líquido se evapora até saturar novamente o ambiente.

17. Durante muitos anos, os cientistas tentaram liquefazer o gás hélio, sem sucesso. Procure apontar a causa dessa dificuldade, sabendo que a temperatura crítica do hélio é de −268 °C, ou seja, 5 K (a temperatura crítica mais baixa entre todas as substâncias).

17. Para liquefazer o hélio, sua temperatura deve ser reduzida abaixo de 5 K.

18. A temperatura crítica da água é de 374 °C. Se tivermos água em ebulição em uma panela aberta, devemos dizer que dela se desprende em **vapor de água** ou **gás de água**? Vapor de água.

19. Uma sala, a 40 °C, contém vapor de água à pressão parcial de 12,6 mmHg.

a) Para que valor deveria ser reduzida a temperatura da sala, a fim de que esse vapor se condensasse (ponto de orvalho)? 15 °C

b) Mantendo-se a temperatura a 40 °C e aumentando-se a umidade da sala, qual seria o valor da pressão parcial quando o ambiente estivesse saturado de vapor? 55,1 mmHg

20. Qual seria o valor da umidade relativa do ar na sala do exercício anterior, nas condições mencionadas na questão **a**? E na questão **b**? $u_r = 100\%$, em ambos os casos

21. Determine a umidade relativa do ar na sala do exercício 20, nas condições iniciais ali fornecidas. $u_r = 22{,}8\%$

PRATIQUE FÍSICA

EM EQUIPE

Não escreva no livro!

ATENÇÃO!
Realize esta atividade sob a supervisão do professor. Tome cuidado para evitar queimaduras.

Veja comentários desta seção no Manual do Professor.

1. De acordo com as teorias da Física, quando um sistema sofre uma transição de fase, mudando de um estado para outro da matéria, sua temperatura permanece constante. Neste experimento, vamos verificar esse fenômeno em duas situações: na fusão do gelo e na ebulição da água.

Cada grupo vai precisar de um termômetro que meça temperaturas num intervalo abaixo de 0 °C até pouco mais de 100 °C.

Enquanto estiver observando a fusão do gelo, responda às seguintes perguntas:

a) A temperatura da fusão do gelo permaneceu a 0 °C até todo o gelo ter derretido?

b) Na realização desse experimento é possível observar variações na temperatura, obtendo temperaturas ligeiramente mais altas na água derretida. Como você explica essa variação? E como fazer para evitar que isso aconteça?

Agora, enquanto estiver observando a ebulição da água, responda às seguintes perguntas:

c) A temperatura de ebulição da água permaneceu constante? Qual foi o valor que seu grupo encontrou durante a ebulição da água?

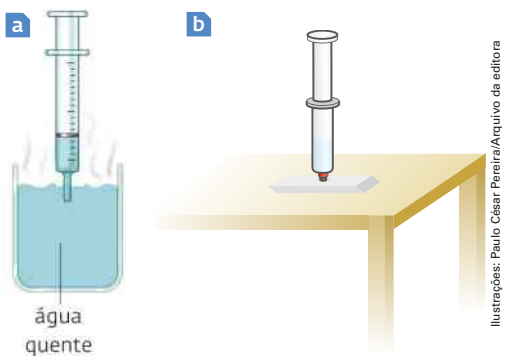
d) A partir da temperatura encontrada para a ebulição da água, estime a altitude aproximada de sua cidade e discuta por que acontece essa variação.

2. Coloque um pouco de água em um recipiente e aqueça-o até que a água entre em ebulição. Retire a fonte de calor e verifique que a ebulição se interrompe imediatamente.

Tome uma seringa de injeção e, puxando o êmbolo, deixe que um pouco dessa água quente penetre em seu interior, como mostra a figura (**a**) desta experiência.

Tampe perfeitamente o bico da seringa, para impedir qualquer entrada de ar (por exemplo, pressionando-o firmemente contra uma borracha, sobre uma mesa). Em seguida, puxe o êmbolo até a extremidade da seringa, como mostra a figura (**b**). Observe que, então, a água na seringa entrará novamente em ebulição.

Lembrando-se do que você estudou na seção 4.4, procure explicar por que isso acontece.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

3. Tome um bloco de gelo, apoiando-o sobre uma superfície horizontal. Passe sobre o gelo um arame bem fino e resistente (de preferência de aço). Puxe firme e lentamente as extremidades do arame, como mostra a figura desta experiência.



a) Em virtude da pressão exercida pelo arame, o gelo sob ele se funde, permitindo que o arame penetre no bloco. Por que o gelo se funde sob a pressão do arame?

b) Verifique que, embora o arame tenha penetrado no bloco, este não apresenta fenda, isto é, a água resultante da fusão torna a se congelar após a passagem do arame. Explique.

c) Continuando a puxar cuidadosamente o arame, você poderá conseguir fazer com que ele atravesse totalmente o bloco, sem parti-lo. Tente obter esse resultado.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

4. Despeje água mineral com gás em um copo e procure observar de onde saem as bolhas de gás. Após observar tente explicar as bolhas levando em conta as perguntas a seguir:
Surgem do interior do líquido ou da superfície do copo? A cada momento elas saem de um lugar diferente ou existem locais preferenciais? Se elas dão preferência por surgir em determinados lugares, o que esses lugares possuem em comum? Faz diferença o copo ser de vidro, de papel, de plástico ou de alumínio? E se esse copo possuir arranhões? Qual o efeito de impurezas como grãozinhos de açúcar, sal ou areia jogados no interior do copo?

PROBLEMAS E TESTES

Não escreva no livro!

1. Diga se cada uma das afirmativas seguintes está certa ou errada:

a) Sempre que uma substância absorve calor, sua temperatura aumenta. Errada.

b) Quando uma substância muda de fase, ela absorve ou cede calor. Certa.

c) Sempre que uma substância absorve calor, seu volume aumenta. Errada.

2. a) A quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de certa massa de gelo, de 0 °C até 10 °C, é maior, menor ou igual à quantidade de calor necessária para elevar a mesma massa de água também de 0 °C até 10 °C? Maior.

b) Baseando-se na resposta à questão **a**, responda: para esfriar uma bebida, seria mais eficaz colocar nela água a 0 °C ou uma massa igual de gelo também a 0 °C? Gelo a 0 °C.

3. Um bloco de chumbo, de massa igual a 100 g, encontra-se no estado sólido à temperatura de 327 °C (seu ponto de fusão), e fornece-se a ele 1 300 cal de calor.

a) Quantas calorias serão usadas para fundir completamente o bloco de chumbo? (Consulte a **tabela 4.1**.) 580 cal

b) Qual será a temperatura final do chumbo líquido formado? (O calor específico do chumbo líquido é 0,036 cal/g · °C.) 527 °C

Para resolver os problemas **4** a **6**, considere cinco barras de massas iguais, construídas, respectivamente, de platina, alumínio, ouro, prata e chumbo.

O quadro abaixo apresenta constantes físicas desses metais.

Metal	**Calor específico** (cal/g °C)	**Calor de fusão** (cal/g)	**Ponto de fusão** (°C)	**Coeficiente de dilatação linear** ($°C^{-1}$)
Platina (Pt)	0,032	27	1775	$9 \cdot 10^{-6}$
Alumínio (Al)	0,22	77	659	$23 \cdot 10^{-6}$
Ouro (Au)	0,031	16	1063	$13 \cdot 10^{-6}$
Prata (Ag)	0,056	21	961	$17 \cdot 10^{-6}$
Chumbo (Pb)	0,031	5,8	327	$29 \cdot 10^{-6}$

4. Aquecendo-se cada uma das barras de 20 °C até 700 °C, aquelas que não vão se fundir serão as construídas de: a, c, d

a) Pt. b) Al. c) Au. d) Ag. e) Pb.

5. Se todas as barras forem aquecidas de 20 °C até 300 °C, aquela que absorverá maior quantidade de calor será a de: b

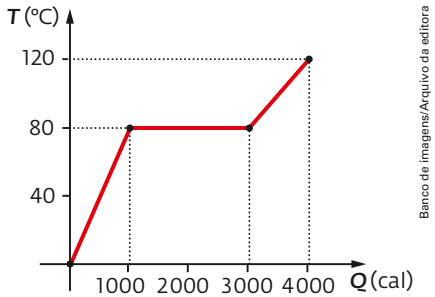
a) Pt. b) Al. c) Au. d) Ag. e) Pb.

6. Cada uma das barras, inicialmente a 120 °C, é colocada em contato com um grande bloco de gelo a 0 °C, provocando a fusão de parte do bloco, até entrar em equilíbrio térmico com ele. Qual das barras causará a fusão de maior quantidade de gelo? b

a) Pt. b) Al. c) Au. d) Ag. e) Pb.

7. O gráfico abaixo representa a temperatura de 50 g de uma substância, inicialmente no estado líquido, a 0 °C, em função do calor por ela absorvido.

Examine o diagrama e indique no caderno, entre as afirmativas seguintes, aquela que está errada: c



Banco de imagens/Arquivo da editora

a) A temperatura de ebulição do líquido é 80 °C.

b) O calor específico do líquido vale 0,25 cal/ g · °C.

c) O calor de vaporização da substância é igual a 1 000 cal.

d) O calor específico da substância, no estado gasoso, é 0,50 cal/g · °C.

e) A substância absorve 2 000 cal desde o início da ebulição até vaporizar-se totalmente.

8. **(UEG-GO)** DESCOBERTO SEXTO ESTADO DA MATÉRIA

Os três estados da matéria (sólido, líquido e gasoso) são bem conhecidos. O quarto, o plasma, já não é novidade e poucos conhecem o quinto estado: o Condensado de Bose-Einstein. Agora, pesquisadores da Universidade do Colorado e do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (Nist), nos EUA, acabam de descobrir o sexto estado da matéria: o condensado fermiônico. Os pesquisadores empregaram feixes de laser *para aprisionar uma pequena nuvem de átomos de potássio, aplicando um campo magnético e resfriando-os a uma temperatura de apenas 50 bilionésimos de um grau acima do zero absoluto (−273,16 °C). A nova descoberta será útil para entender melhor o fenômeno da supercondutividade.*

PHYSICAL REVIEW LETTERS, v. 92, n. 4, de 30 de janeiro, artigo número 040403 (http://prl.aps.org). Disponível em: <http://prl.aps.org >. Acesso em: 11 set. 2007. [Adaptado].

Com base na teoria dos estados da matéria, é **INCORRETO** afirmar: b

a) A luz *laser* consiste em ondas que apresentam um comprimento de onda específico que corresponde à distância entre dois máximos e dois mínimos, medida na direção em que a onda está se movimentando.

b) As substâncias podem mudar de estado físico (sólido, líquido, gasoso, etc.) e esse fenômeno depende exclusivamente da temperatura a que estão expostas.

c) O zero absoluto é um conceito no qual um corpo, classicamente, não conteria energia alguma. Todavia, as leis da Termodinâmica mostram que esta temperatura continua experimentalmente inatingível.

d) A supercondutividade é um fenômeno que se manifesta em alguns materiais que se tornam capazes de transportar corrente elétrica sem nenhuma resistência abaixo de certa temperatura.

9. **(UFF-RJ)** Quando se retira uma garrafa de vidro com água de uma geladeira, depois de ela ter ficado lá por algum tempo, veem-se gotas de água se formando na superfície externa da garrafa. a

Isso acontece graças, principalmente, à

a) condensação do vapor de água dissolvido no ar ao encontrar uma superfície à temperatura mais baixa.

b) diferença de pressão, que é maior no interior da garrafa e que empurra a água para seu exterior.

c) porosidade do vidro, que permite a passagem de água do interior da garrafa para sua superfície externa.

d) diferença de densidade entre a água no interior da garrafa e a água dissolvida no ar, que é provocada pela diferença de temperatura.

e) condução de calor através do vidro, facilitada por sua porosidade.

10. **(Vunesp-SP)** A liofilização é um processo de desidratação de alimentos que, além de evitar que seus nutrientes saiam junto com a água, diminui bastante sua massa e seu volume, facilitando o armazenamento e o transporte. Alimentos liofilizados também têm seus prazos de validade aumentados, sem perder características como aroma e sabor. c


Reprodução/UNESP, 2013

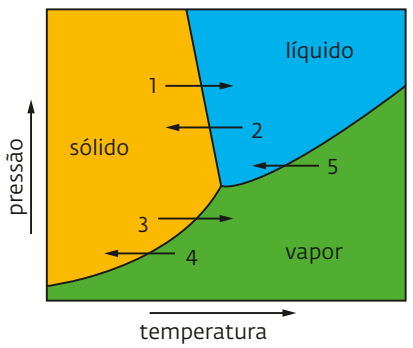

Reprodução/UNESP, 2013

O processo de liofilização segue as seguintes etapas:

I O alimento é resfriado até temperaturas abaixo e 0 °C para que a água contida nele seja solidificada.

II Em câmaras especiais, sob baixíssima pressão (menores do que 0,006 atm), a temperatura do alimento é elevada, fazendo com que a água sólida seja sublimada. Dessa forma, a água sai do alimento sem romper suas estruturas moleculares, evitando perdas de proteínas e vitaminas.

O gráfico mostra parte do diagrama de fases da água e cinco processos de mudança de fase, representados pelas setas numeradas de 1 a 5.



Banco de imagens/Arquivo da editora

A alternativa que melhor representa as etapas do processo de liofilização, na ordem descrita, é

a) 4 e 1. b) 2 e 1. c) 2 e 3. d) 1 e 3. e) 5 e 3.

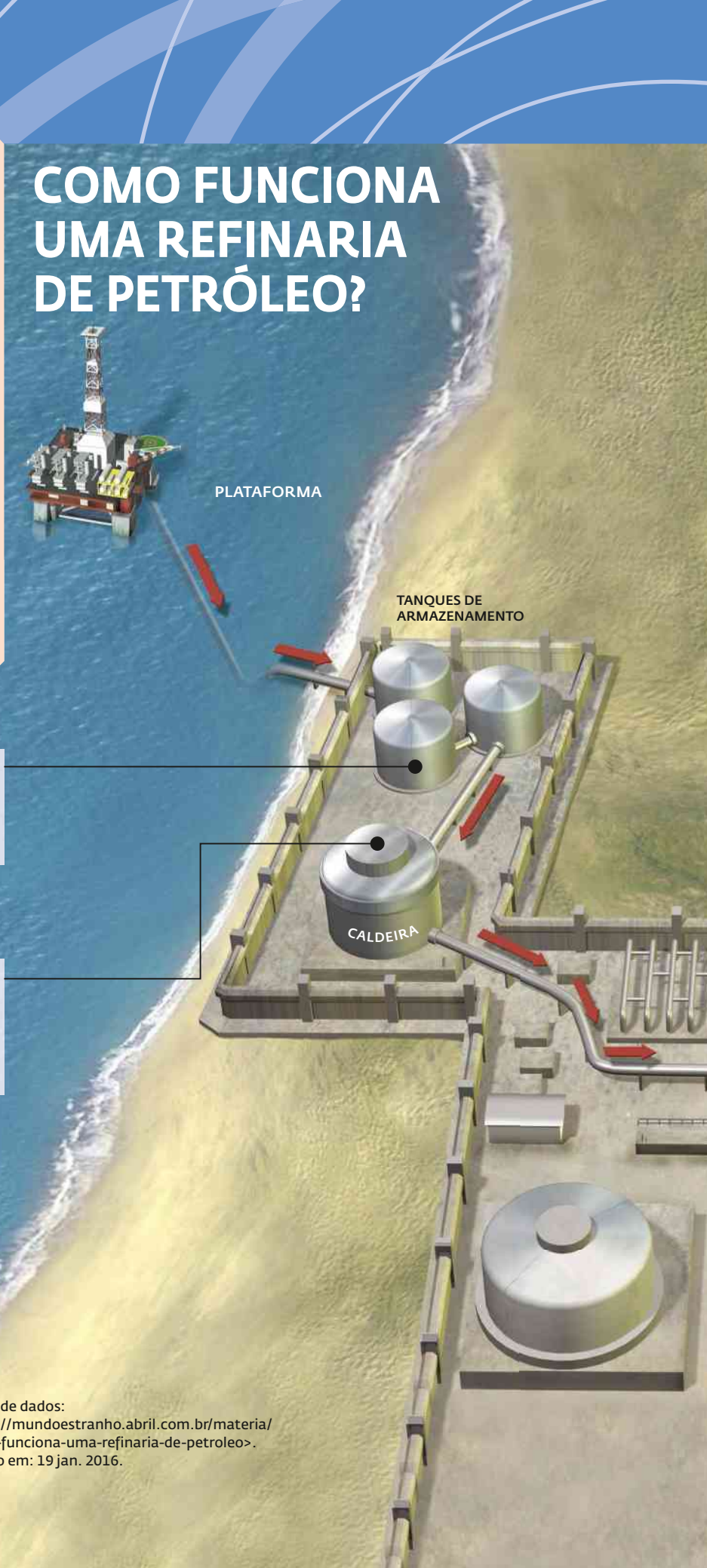
INFOGRÁFICO

O infográfico desta unidade apresenta as principais informações sobre o funcionamento de uma refinaria de petróleo. Antes de responder às questões, faça a leitura deste infográfico observando como os textos e as imagens se relacionam e permitem a compreensão das informações referentes à temperatura e ao calor, dois temas abordados nesta unidade.

1. Qual a função básica de uma refinaria de petróleo?
2. Qual o papel da destilação no processo de refinamento do petróleo?
3. Como o petróleo extraído chega às refinarias?
4. O que acontece com o petróleo ao chegar à caldeira?
5. Explique o que acontece com o petróleo na torre de destilação.
6. Como cada subproduto do petróleo é separado na torre de destilação?
7. Qual a função do tanque de purificação?

Veja respostas no Manual do Professor.

COMO FUNCIONA UMA REFINARIA DE PETRÓLEO?



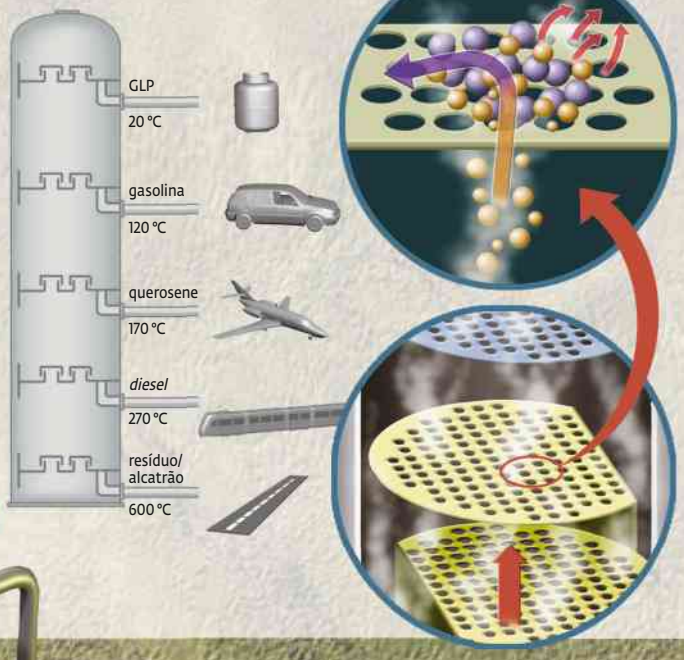
O petróleo extraído no Brasil segue até as refinarias quase sempre por meio de oleodutos. Ao chegar à refinaria, ele é guardado em **tanques de armazenamento**, de onde parte para ser processado.

O refino começa com o petróleo seguindo por dutos até uma espécie de **caldeira**. Lá, ele é aquecido a cerca de 370 °C e é parcialmente transformado em vapor. O que sai da caldeira é uma mistura de vapor com o que sobrou de petróleo na forma líquida.

Fonte de dados:
<http://mundoestranho.abril.com.br/materia/como-funciona-uma-refinaria-de-petroleo>.
Acesso em: 19 jan. 2016.

Ao longo da torre há vários "andares" com pratos, um tipo de grade perfurada. Ao subir, partes do vapor de petróleo esfriam e transformam-se em líquido de novo. Quando isso ocorre, as gotas caem em cima dos pratos, que represam parte do óleo.

O vapor de cada subproduto do petróleo, como a gasolina e o *diesel*, liquefazem numa certa temperatura, atingida em "andares" diferentes da torre. Ou seja, cada subproduto enche uma panela específica.



Os pratos só retêm uma pequena parte do líquido formado, o excesso transborda e escorre até um recipiente chamado panela. A parte do petróleo acumulada em cada panela é bombeada e segue para fora da torre por meio de dutos.

Os novos vapores que estão subindo passam pelos buracos dos pratos. Ao entrarem em contato com a parte do petróleo já líquida, eles perdem calor. Assim, mais moléculas gasosas resfriam-se e são condensadas.

Paulo Manzi/Arquivo da editora

TORRE DE DESTILAÇÃO

Essa mistura entra numa **torre de destilação**. A parte gasosa sobe e a líquida desce. As partes mais densas do petróleo líquido caem até o fundo da torre; já as menos densas podem até transformar-se em vapor durante a queda e começar a subir.

Os subprodutos obtidos ficam em outros **tanques de armazenagem**. Da refinaria, eles saem por oleodutos até as indústrias petroquímicas (que usam o GLP para fazer plásticos, por exemplo) ou rumo às distribuidoras de combustível.

Na base da torre fica outro aquecedor. Com ele a temperatura do petróleo aumenta ainda mais, fazendo com que uma parte do líquido que escorreu se transforme em vapor também. Mesmo assim, ainda sobra um **resíduo**, que nunca vaporiza. Ele é recolhido e usado para fazer asfalto.

Os subprodutos saem da torre ainda um pouco "contaminados" uns pelos outros. Todos vão para um processo de **purificação**; em **tanques**, passam por reações químicas para quebrar e recombinar suas moléculas até ficarem puros.

UNIDADE

3 Óptica e ondas

A escultura *Cloud Gate*, apelidada de "feijão", é uma obra do artista britânico Anish Kapoor e encontra-se no Millenium Park em Chicago, Estados Unidos. Inspirada em uma gota de mercúrio líquido, a parte de cima da escultura é praticamente um espelho convexo que possibilita ver uma imagem direita e com tamanho reduzido da cidade.

É uma obra que estabelece um diálogo entre os espelhos que a constituem e o entorno. Há uma interatividade com o espectador, que acaba se tornando parte da escultura ao ser refletido pelos espelhos, que jogam com a óptica e a percepção do observador.

Os fenômenos e os elementos envolvidos para obter efeitos como o visualizado na escultura fazem parte dos assuntos que serão apresentados nesta unidade.

CAPÍTULO 5
Reflexão da luz

CAPÍTULO 6
Refração da luz

CAPÍTULO 7
Movimento ondulatório



Parte central da *Cloud Gate*. A escultura que parece um "grande feijão" é composta de 168 placas de aço inoxidável, com dimensões de 10 m × 13 m × 20 m. Fotografia de 2014.



Zoonar GmbH/Alamy/Latinstock

Zoonar GmbH/Alamy/Latinstock



ruzanna/Shutterstock

Vista de uma cidade com destaque para os valores do albedo, o coeficiente de reflexão da luz. Uma superfície que reflete perfeitamente a luz solar terá um albedo próximo de 1,0 e quanto maior a reflexão, menor será o calor acumulado.

CAPÍTULO 5

Reflexão da luz

O telhado branco reflete mais, e o telhado vermelho esquentará mais.

Parte da luz recebida do Sol é refletida pela superfície da Terra; a parte absorvida é reemitida com outro comprimento de onda.

Veja resposta no Manual do Professor.

Desde 1984, o satélite americano Landsat-5 orbita a Terra. Sua função é recolher dados de impactos geológicos e mudanças ambientais por meio de sensoriamento remoto, isto é, adquirir informações a distância.

Para obter esses dados, o satélite se vale do fenômeno denominado "óptica da reflexão da luz". Ao receber luz do Sol, parte dela é refletida pela superfície da Terra, e outra parte é absorvida. A parte absorvida é reemitida em um novo comprimento de onda, e os sensores, avaliando os feixes de luz incidentes e refletidos, permitem a determinação de um índice de refletividade (albedo).

Por exemplo, no telhado das moradias ocorre incidência e reflexão de luz solar. Em valores aproximados, as telhas vermelhas ou marrons possuem albedo entre 0,10 e 0,35, enquanto nas coberturas brancas esse índice fica entre 0,5 e 0,9. Ou seja, as telhas vermelhas absorvem de 65% a 90% da luz incidente, enquanto as coberturas pintadas de branco absorvem de 10% a 50%. Isso ajuda a explicar os fenômenos climáticos de grandes cidades, conhecidos como "ilhas de calor".

PARA INICIAR A CONVERSA

Exposta à mesma quantidade de radiação, qual superfície reflete mais luz: um telhado vermelho ou um branco? Qual das superfícies esquenta mais?

Como se caracteriza a reflexão da luz?

Explique o que são "ilhas de calor", por que elas se formam e quais são suas principais consequências. Seria possível reduzir seus efeitos?

5.1 Conceitos iniciais

Neste capítulo, iniciaremos o estudo da Óptica, isto é, o estudo da luz e dos fenômenos luminosos em geral. Entre nossos sentidos, a visão é o que mais colabora para o conhecimento do mundo à nossa volta; provavelmente por isso, o campo de estudo da Óptica desperta o interesse dos pensadores desde a Antiguidade.

Filósofos gregos, como Platão e Aristóteles, já se preocupavam em responder a perguntas do tipo: Por que vemos um objeto? O que é a luz? Platão, por exemplo, supunha que nossos olhos emitiam pequenas partículas que, ao atingir um objeto, tornavam-no visível. Aristóteles considerava a luz um fluido imaterial que se propagava entre o olho e o objeto visto.

Além de Platão e Aristóteles, outros físicos notáveis como Newton **(figura 5.1)**, Huygens, Young e Maxwell, tentaram explicar a natureza da luz. Em nosso curso, teremos oportunidade de apresentar algumas dessas ideias, mas, antes disso, vamos estudar alguns fenômenos ópticos, as leis experimentais que descrevem o comportamento da luz e algumas de suas aplicações.



Everett Historical/Shutterstock

Figura 5.1. Isaac Newton observando a propagação retilínea de um feixe de luz que penetra por uma fresta da janela. Gravura do século XIX.

Propagação retilínea da luz

Observando os objetos que nos rodeiam, verificamos que alguns deles emitem luz, isto é, são fontes de luz, tais como o Sol, uma lâmpada acesa, a chama de uma vela, etc. Outros não emitem luz, mas podem ser vistos porque são iluminados pela luz proveniente de alguma fonte.

Um dos fatos que podemos observar sobre o comportamento da luz é que, quando ela se propaga em um meio homogêneo, sua propagação é retilínea. Isso pode ser constatado quando a luz do Sol passa através das árvores em uma floresta **(figura 5.2.a)**. Sabendo que a luz se propaga em linha reta, podemos determinar o tamanho e a posição da sombra de um objeto sobre um anteparo.

Na **figura 5.2.b**, por exemplo, o Sol emite luz, que se propaga em linha reta em todas as direções. Um objeto opaco interrompe a passagem de parte dessa luz, originando a sombra.

a



Slooff/Shutterstock/Glow Images

b



lazyllama/Shutterstock

Figura 5.2. (**a**) Imagem da luz penetrando em uma floresta. Sua difusão em partículas suspensas no ar permite que se averigue seu trajeto retilíneo. (**b**) Formação da sombra de pessoas, ao serem iluminadas por raios solares.

FÍSICA NO CONTEXTO

Eclipse do Sol e da Lua

Desde a Antiguidade existem, por todo o planeta, numerosos relatos de ocorrências de eclipses solares e lunares. O mais antigo relato é de 2137 a.C., na China.

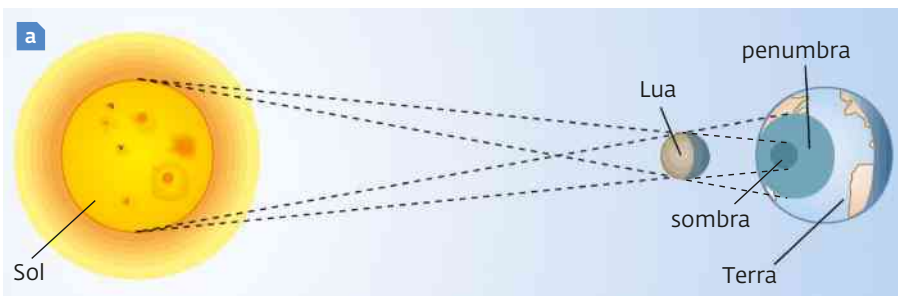
Os antigos gregos já conheciam o fenômeno e podiam prever os eclipses através do ciclo de Saros. Nesse ciclo, a cada 18 anos e 11,3 dias, a configuração Terra-Sol-Lua se repete de forma idêntica e os eclipses acontecem na mesma ordem que foram observados no ciclo anterior.

Os eclipses ao longo da história causaram temor e admiração em muitos povos, mas também possibilitaram grandes avanços da Ciência, em particular a Astronomia. O estudo dos eclipses possibilitou estimar as dimensões e as distâncias entre a Terra, a Lua e o Sol e determinar com precisão as datas dos equinócios.

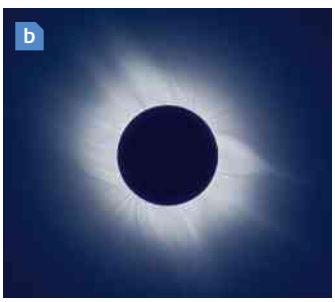
A configuração do eclipse, total ou parcial, depende das posições relativas entre a Terra, a Lua e o Sol.

Quando a Lua passa entre o Sol e a Terra, sua sombra é projetada sobre uma região da Terra que deixa, então, de receber a luz solar. Como o Sol é uma fonte extensa, a sombra da Lua não é bem definida, apresentando uma região totalmente escura, envolvida por uma penumbra, como vemos na **figura 5.3.a**. Para uma pessoa situada na região totalmente escura, ocorre um eclipse total do Sol (o disco solar é totalmente coberto pela Lua). A visão que essa pessoa tem do fenômeno é mostrada na **figura 5.3.b**. Outra pessoa, situada na região de penumbra, veria apenas parte do Sol eclipsada pela Lua (eclipse parcial do Sol). Na **figura 5.3.c** tem-se a combinação de fotos em momentos diferentes do eclipse solar.

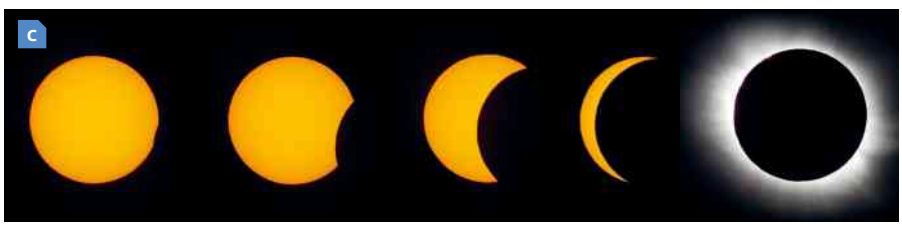
A **figura 5.3.d** representa o que ocorre quando a Terra se interpõe entre o Sol e a Lua: nesse caso a Lua não recebe diretamente a luz solar (está situada na sombra da Terra), isto é, acontece um eclipse da Lua. No entanto, a Lua pode ser vista por um observador na Terra devido aos raios solares que, ao tangenciarem a borda da Terra, são desviados pela atmosfera terrestre, atingindo a superfície lunar.



Ilustrações: Formato/Arquivo da editora



Laurent Laveder/Science Photo Library



Jon Olav Nesvold/NTB SCANPIX/Agência France-Presse

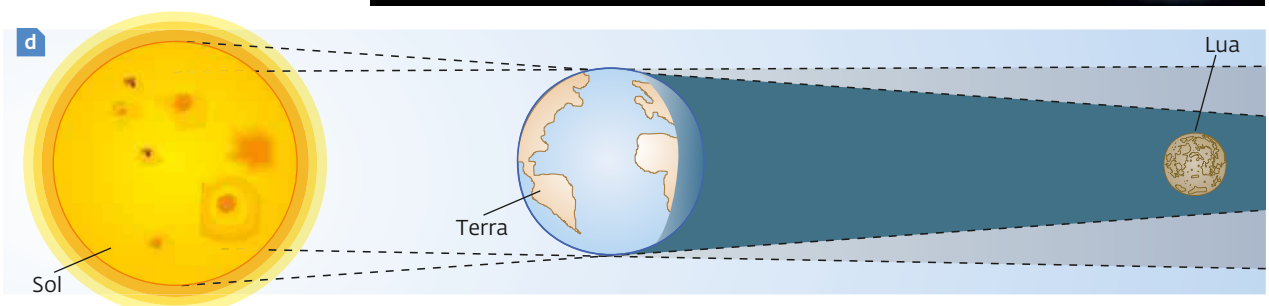


Figura 5.3. Observe as diferentes configurações que a Terra, o Sol e a Lua assumem em cada um dos eclipses. Representações sem escala e em cores fantasia (**a**) e (**d**).

Raios e feixes de luz

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Consideremos uma fonte que emite luz em todas as direções. As direções em que a luz se propaga podem ser indicadas por meio de linhas retas, como mostra a **figura 5.4**. Essas linhas são denominadas **raios de luz**.

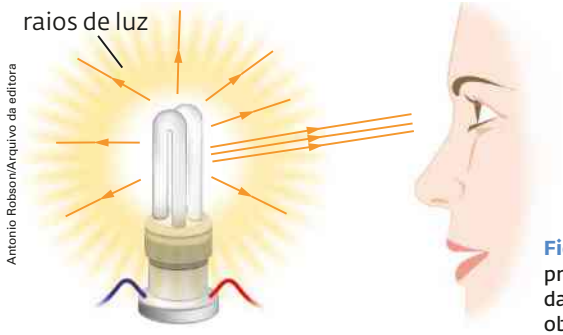


Figura 5.4. Raios de luz se propagando em linha reta, da lâmpada até os olhos do observador.

Na **figura 5.5.a** representamos uma parte dos raios de luz que são emitidos por uma fonte. Esse conjunto de raios constitui um **feixe luminoso divergente**. Esse feixe divergente, depois de passar por alguns processos (que veremos oportunamente), pode se transformar em um **feixe convergente**, como mostrado na **figura 5.5.b**, ou em um **feixe de raios paralelos**, como o da **figura 5.5.c**.

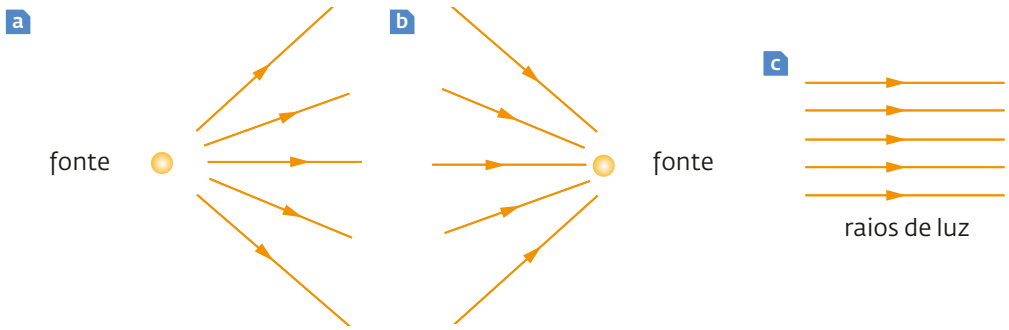


Figura 5.5. Os feixes luminosos podem ser constituídos por raios divergentes (**a**), convergentes (**b**) ou paralelos (**c**).

O feixe de luz emitido por um ponto luminoso é sempre divergente, mas, em um farol, por exemplo, o feixe que sai da lâmpada sofre modificações, transformando-se em um feixe de raios praticamente paralelos **(figura 5.6)**. O feixe que nos atinge, proveniente de uma fonte de luz muito afastada, é também constituído de raios praticamente paralelos (por exemplo, a luz do Sol que chega à Terra **(figura 5.7)**).

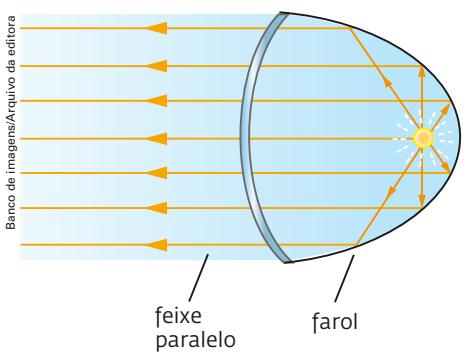


Figura 5.6. Em um farol, um feixe luminoso divergente se transforma em um feixe de raios paralelos.

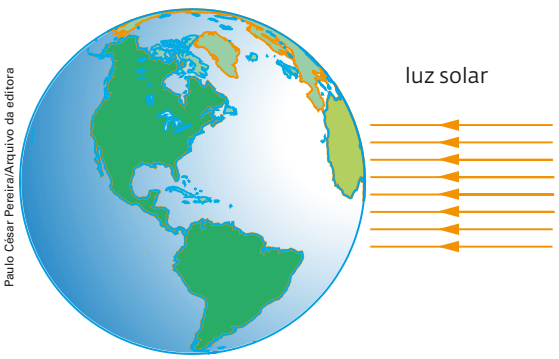


Figura 5.7. Um feixe de luz solar que atinge a Terra é constituído de raios luminosos praticamente paralelos.

Uma importante propriedade da luz é a independência que se observa na propagação dos raios ou feixes luminosos. Após dois feixes se cruzarem, eles seguem as mesmas trajetórias que iriam seguir se não tivessem se interceptado, isto é, um feixe não perturba a propagação do outro **(figura 5.8)**. Por esse motivo, vários observadores em uma sala enxergam nitidamente os objetos lá existentes, apesar de os raios luminosos que levam as imagens a seus olhos estarem se cruzando.



zhykova/Shutterstock

Figura 5.8. O fato de dois raios luminosos que se cruzam não afetar suas direções de propagação é comumente utilizado na iluminação do palco em *shows* e espetáculos.

A velocidade da luz

Durante muito tempo pensou-se que a luz se transmitia instantaneamente de um ponto a outro. Entretanto, experiências cuidadosas, realizadas durante os séculos XVIII e XIX, vieram mostrar que, na realidade, a velocidade de propagação da luz é muito grande, mas não infinita. Na seção 5.7, apresentada no final deste capítulo, estão descritas algumas experiências, realizadas por cientistas, nas quais foi obtido, com boa precisão, o valor da velocidade da luz. Esse valor desempenha um papel muito importante no desenvolvimento da Física e, em várias ocasiões, teremos oportunidade de trabalhar com ele.

De acordo com medidas atuais, o valor da velocidade da luz **no vácuo**, que é usualmente representado por c, é 299 792 458 m/s. Costuma-se aproximar por:

$$c = 3{,}00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

isto é, $c = 300\,000$ km/s. Para se ter uma ideia do significado desse valor, podemos ressaltar que, se um objeto possuísse tal velocidade, poderia dar cerca de 7,5 voltas ao redor da Terra em apenas 1 segundo. Aliás, devemos observar que, de acordo com a teoria da relatividade de Einstein, esse valor representa um limite superior para a velocidade.

A velocidade da luz foi medida, também, em vários meios materiais, encontrando-se sempre um valor **inferior** a c. Por exemplo, na água, a luz se propaga com uma velocidade $v = 220\,000$ km/s; no diamante, com $v = 120\,000$ km/s.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

1. b) Porque ela reflete a luz que recebe do Sol.

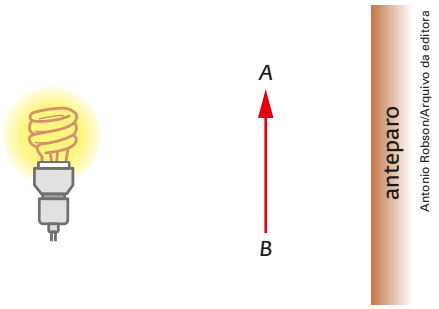
As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

1. Responda no caderno:

Não. a) É correto afirmar que a Lua é fonte de luz?

b) Então, por que podemos enxergar a Lua?

2. A figura abaixo mostra um objeto *AB*, colocado em frente a uma pequena lâmpada acesa. Atrás dele existe um anteparo opaco, situado paralelamente a *AB*.



Antonio Robson/Arquivo da editora

a) Desenhe, em uma cópia da figura ao caderno, a sombra *A'B'* do objeto, projetada sobre o anteparo.

Veja resposta no Manual do Professor.

b) Indique, na cópia da figura, a região do espaço que fica escura, isto é, que não recebe luz da fonte. *AA'B'B*

c) Se o objeto for aproximado da fonte, o tamanho de sua sombra aumentará, diminuirá ou não se modificará? Aumentará.

3. No exercício anterior, suponha que o objeto permanecesse na posição mostrada, mas a fonte fosse deslocada, para a esquerda, até uma posição muito afastada do objeto. Nessas condições:

a) Como seria o feixe de raios luminosos, provenientes da fonte, que alcançariam o objeto? Feixe de raios paralelos iguais.

b) Desenhe, na cópia da figura em seu caderno, a sombra do objeto sobre o anteparo. Ela é maior, menor ou igual ao objeto?

Veja resposta no Manual do Professor.

4. O **ano-luz** é uma unidade de comprimento muito usada em Astronomia. Seu valor é igual à distância que a luz percorre, no vácuo, durante o tempo de um ano.

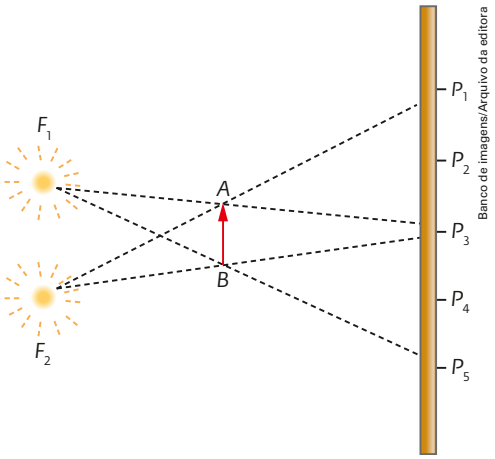
$9{,}6 \cdot 10^{15}$ m a) Sabendo-se que em um ano temos $3{,}2 \cdot 10^{7}$ s, calcule, em metros, o valor de 1 ano-luz.

20 anos b) Considere uma estrela situada a 20 anos-luz da Terra. Então, quantos anos a luz dessa estrela leva para chegar até nós?

c) Qual é, em quilômetros, a distância dessa estrela à Terra? $1{,}9 \cdot 10^{14}$ km

Maior. **5.** A luz do Sol gasta cerca de 8 minutos para chegar à Terra. Imaginando que o espaço entre o Sol e a Terra fosse totalmente cheio de água, o tempo que a luz solar gastaria para chegar até nós seria maior, menor ou igual a este tempo?

6. Duas pequenas fontes luminosas, F_1 e F_2, estão situadas em frente a um objeto opaco *AB*, como mostra a figura a seguir.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Lembrando-se da propagação retilínea da luz e considerando os pontos assinalados no anteparo, responda no caderno:

a) Quais deles estão recebendo luz das duas fontes? P_1 e P_5

b) Qual deles recebe luz apenas da fonte F_1? P_2

c) Qual deles recebe luz apenas da fonte F_2? P_4

d) Qual deles não recebe luz de nenhuma das duas fontes? P_3

7. A figura ilustra uma pessoa lendo um livro sob a luz de um abajur, única fonte de luz do ambiente. Reproduza a figura no caderno e, nesta cópia, desenhe um dos raios de luz que permite à pessoa enxergar o livro.

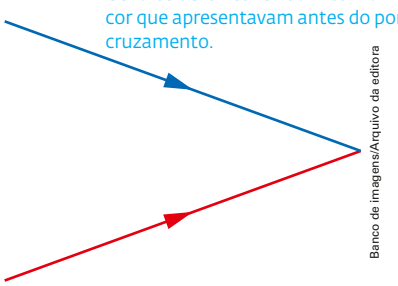
Veja resposta no Manual do Professor.



João Xavier de Campos/Arquivo da editora

8. A figura ilustra dois raios de luz correspondentes às cores vermelha e azul. Reproduza a figura em seu caderno e, nesta cópia, desenhe a continuidade destes raios de luz, em cores, após o ponto de cruzamento.

Os raios de luz continuam com a mesma cor que apresentavam antes do ponto de cruzamento.



Banco de imagens/Arquivo da editora

FÍSICA NO CONTEXTO

CÂMARA ESCURA DE ORIFÍCIO

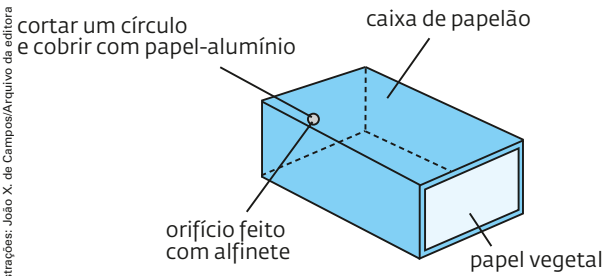
Na sociedade atual é comum uma pessoa fotografar e ser fotografada. Através da fotografia é possível registrar os momentos pessoais marcantes da vida de uma pessoa, bem como o desenvolvimento tecnológico de uma sociedade.

Na época em que a fotografia foi inventada, ela não era bem-aceita por parte da sociedade, pois era vista como uma ameaça à pintura, dado o grau de realismo das cenas fotografadas.

A fotografia foi oficialmente inventada no século XIX, por Joseph Nicéphore Niépce, e surgiu a partir do desenvolvimento das câmaras escuras de orifício. Essas câmaras foram estudadas desde a época de Aristóteles (300 a.C.), em que ele observava a imagem do Sol produzida pela passagem da luz em um orifício de uma planta. Entre os séculos XV e XVII, Leonardo da Vinci e Johannes Kepler descreveram detalhadamente a utilização de uma câmara escura.

Uma câmara escura de orifício, muito simples, consiste de uma caixa fechada na qual uma das faces laterais é feita de um papel semitransparente (papel vegetal ou de seda, por exemplo). Na face oposta é feito um pequeno orifício, com uma agulha ou alfinete (veja a **figura 5.9**). Com esse dispositivo, pode-se obter a imagem de um objeto, usando o fato de que a luz se propaga em linha reta.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.



Ilustrações: João X. de Campos/Arquivo da editora

Figura 5.9. Uma câmara escura de orifício pode ser facilmente construída.

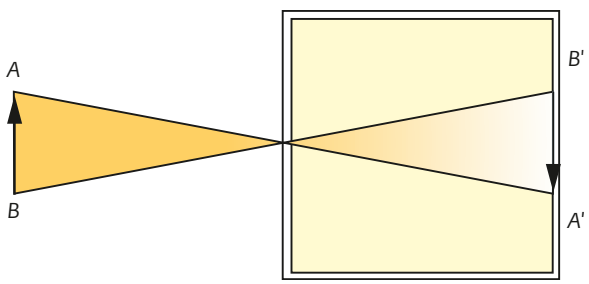


Figura 5.10. *A'B'* é a imagem do objeto *AB* fornecida por uma câmara escura de orifício muito pequeno.

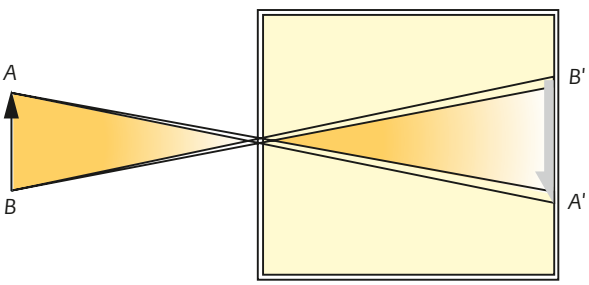


Figura 5.11. Aumentando-se o tamanho do orifício, a imagem apresenta-se com maior luminosidade, mas com menor nitidez.

Para que você entenda como isso ocorre, observe a **figura 5.10**, que representa um objeto *AB* colocado em frente ao orifício de uma câmara escura. Cada ponto do objeto, como o ponto *A*, emite luz em todas as direções. Um estreito feixe que parte de *A* passa através do orifício e incide na parede oposta, dando origem a uma pequena mancha luminosa *A'*. De modo semelhante, o feixe que sai do ponto *B* e passa pelo orifício dará origem à mancha *B'*. Qualquer outro ponto do objeto corresponderá sobre a parede semitransparente a uma pequena mancha luminosa. Assim, o objeto é reproduzido ponto por ponto, dando origem sobre aquela parede a uma imagem *A'B'* semelhante a ele.

Com uma caixa de papelão e orientando-se pela **figura 5.9**, você poderá construir uma câmara escura. Se usar como objeto a chama de uma vela e realizar a experiência em um quarto escurecido, a imagem projetada sobre a parede semitransparente será visível com clareza.

Quando o orifício da câmara é muito pequeno, a imagem obtida pode ser bastante nítida, mas como os feixes de luz que passam através dele são bastante estreitos, a imagem apresenta pouca luminosidade. Para que ela seja percebida, o objeto precisa estar fortemente iluminado.

Um recurso para aumentar a luminosidade da imagem seria aumentar a área do orifício. Entretanto, nesse caso, como vemos na **figura 5.11**, cada ponto do objeto dará origem a uma mancha luminosa de dimensões maiores (que não poderá ser assimilada a um ponto), prejudicando, então, a nitidez da imagem.

Nas câmaras que fornecem imagens nítidas e de luminosidade razoável, a parede semitransparente poderá ser fechada e em seu interior ser adaptado um filme fotográfico. Nessas condições e com um tempo suficiente de exposição, é possível obter boas fotos de um objeto. Tente!

5.2 Reflexão da luz

Reflexão

Consideremos um feixe luminoso que se propaga no ar e incide na superfície lisa de um bloco de vidro (figura 5.12.a). Em virtude de o vidro ser transparente, parte dessa luz penetra no bloco, mas outra parte volta a se propagar no ar. Dizemos que a porção do feixe que voltou a se propagar no ar sofreu **reflexão**, ou seja, parte da luz se **refletiu** ao encontrar a superfície lisa do vidro. O feixe de luz que se dirige para a superfície é denominado **feixe incidente** e o feixe devolvido pela superfície refletora é o **feixe refletido** (figura 5.12.a).

Quando o feixe incidente encontra uma superfície lisa, o feixe refletido é bem definido, como na figura 5.12.b. Quando isso ocorre, dizemos que a reflexão é **especular**, porque esse fenômeno é observado quando a luz é refletida em um espelho.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

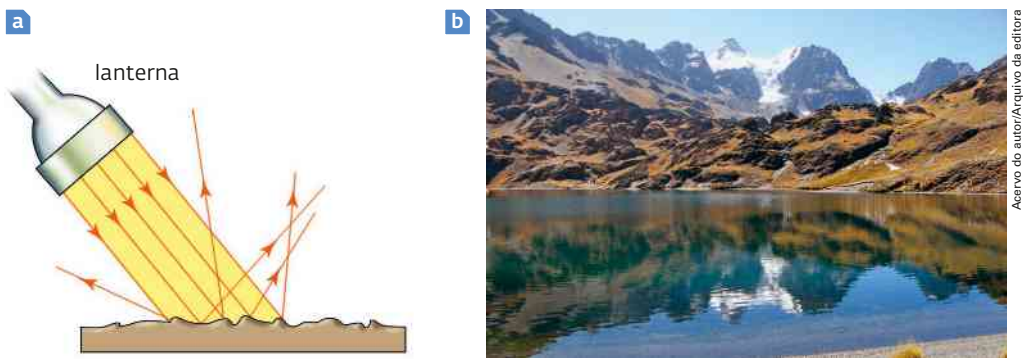
Acervo do autor/Arquivo da editora

Figura 5.12. **(a)** Representação de um feixe luminoso sofrendo reflexão ao encontrar uma superfície lisa. **(b)** Reflexão especular da vegetação nas águas paradas de um lago (Bonito-MT). Fotografia de 2011.

Difusão da luz

Suponha que um feixe de luz incida em uma superfície irregular (figura 5.13.a). Nesse caso, cada pequena porção da superfície reflete a luz em uma determinada direção e, consequentemente, o feixe refletido não é bem definido, observando-se o espalhamento da luz em todas as direções. Dizemos, então, que ocorreu uma **reflexão difusa** ou, em outras palavras, houve **difusão** da luz pela superfície (figura 5.13.b).

A maioria dos objetos reflete difusamente a luz que incide sobre eles. Assim, essa folha de papel, uma parede, um móvel de uma sala, etc. são objetos que difundem a luz que recebem, espalhando-a em todas as direções.



Acervo do autor/Arquivo da editora

Figura 5.13. **(a)** Representação de um feixe luminoso sofrendo reflexão ao encontrar uma superfície irregular. **(b)** Reflexão difusa do pico Cabeza del Condor (5648 m) nas águas de um lago no Vale do Condoriri, Bolívia (fotografia de 2010). Devido à rugosidade da superfície do lago, a luz é refletida em várias direções.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Quando essa luz penetra em nossos olhos, enxergamos o objeto **(figura 5.14.a)**. Se ele não difundisse a luz, não seria possível vê-lo. Como, na difusão, a luz se espalha em todas as direções, várias pessoas podem enxergar um objeto, mesmo se situadas em posições diferentes em torno dele **(figura 5.14.b)**.



João X. de Campos/Arquivo da editora



Acervo do autor/Arquivo da editora

Figura 5.14. (**a**) Um objeto só pode ser visto quando a luz que ele emite ou reflete atinge nossos olhos. (**b**) Formação rochosa no solo da Caverna Santana, Parque Estadual e Turístico do Alto Ribeira, Iporanga (SP), 2009. As rochas difundem a luz que recebem, podendo, então, ser vistas de várias posições diferentes.

Outro exemplo de difusão da luz pode ser mostrado quando acendemos uma lanterna em um quarto escuro. A trajetória do feixe luminoso, que sai da lanterna, não poderá ser percebida a não ser que haja partículas em suspensão no ar. Nesse caso, as partículas difundem a luz, permitindo que percebamos o feixe quando nossos olhos recebem a luz espalhada **(figura 5.15)**.

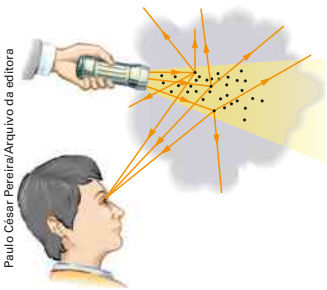
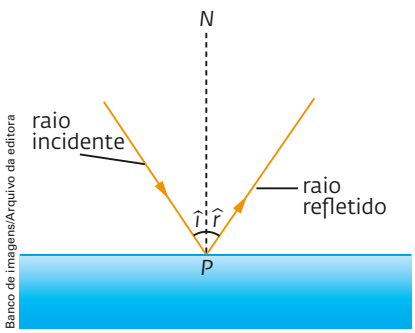

Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 5.15. As partículas presentes no ar difundem a luz, tornando visível o feixe luminoso.

Um fato semelhante ocorre com a luz solar, que é difundida pelas partículas da atmosfera terrestre. O céu apresenta-se totalmente claro, durante o dia, em virtude desse espalhamento. Se a Terra não possuísse atmosfera, o céu seria totalmente negro, exceto nas posições ocupadas pelo Sol e pelas estrelas. Como a Lua não possui atmosfera, é este o aspecto do "céu lunar" que será observado por um astronauta situado na superfície de nosso satélite **(figura 5.16)**.


SPL/Latinstock

Figura 5.16. "Céu" visto da superfície da Lua com a Terra ao fundo. Fotografia obtida pelos astronautas da Apollo 11, julho de 1969.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 5.17. Representação de um raio luminoso ao incidir e refletir sobre uma superfície lisa.

As leis da reflexão

Na **figura 5.17** representamos um raio de luz que incide no ponto *P* de uma superfície refletora. Traçando a normal, reta perpendicular a essa superfície no ponto *P* (*NP*), vemos que ela e o raio incidente determinam um plano. Nesse caso, o plano é o da folha de papel. A experiência nos mostra que a reflexão ocorre de tal maneira que o raio refletido está sempre contido nesse mesmo plano. Portanto, o raio refletido, assim como o raio incidente e a normal *NP*, estarão todos situados no plano da folha de papel. Essa observação experimental é conhecida como a **1ª lei da reflexão**.

O ângulo $\hat{i}$, que o raio incidente forma com a normal, é denominado **ângulo de incidência** e o ângulo $\hat{r}$, formado pela normal e pelo raio refletido, é o **ângulo de reflexão**. Foi possível verificar, por meio de experiências de reflexão, que as medidas desses ângulos são sempre iguais entre si. Esta conclusão de que, na reflexão da luz, tem-se $\hat{i} = \hat{r}$, é conhecida como a **2ª lei da reflexão**.

Temos, então, em resumo:

As leis da reflexão

1ª) o raio incidente, a normal à superfície refletora no ponto de incidência e o raio refletido estão situados em um mesmo plano.

2ª) o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão ($\hat{i} \times \hat{r}$).

Exemplo

Uma pessoa que está em frente a um espelho plano decide apontar uma lanterna na direção do espelho, de modo que um feixe luminoso incida perpendicularmente à superfície do espelho (figura 5.18).

a) Qual é o valor do ângulo de incidência?

Como o ângulo de incidência é formado pelo raio incidente e a normal, temos $\hat{i} = 0$, pois o feixe está incidindo ao longo da normal.

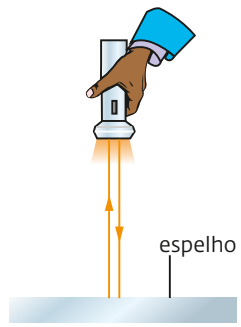
b) Qual é a direção do feixe refletido?

Na reflexão da luz, temos sempre $\hat{i} = \hat{r}$, portanto, nesse caso, $\hat{r} = 0$. Isso significa que o feixe refletido voltará dirigido também ao longo da normal.

c) Onde o feixe de luz é refletido?

O ângulo de incidência é igual ao de reflexão e a direção de propagação do feixe será ao longo da normal. Assim, o feixe voltará para a lanterna, atingindo-a no mesmo ponto em que foi emitido.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 5.18. Representação de um feixe luminoso incidindo perpendicularmente ao espelho; ele se reflete na mesma direção.

Verifique o que aprendeu

Não escreva no livro!

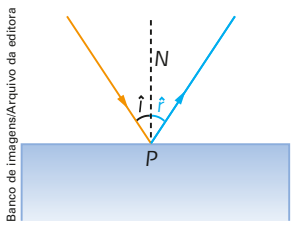
9. a) A maioria dos objetos que nos rodeiam (paredes, árvores, pessoas, etc.) não é fonte de luz. No entanto, podemos enxergá-los qualquer que seja nossa posição em torno deles. Por quê?

b) Um astronauta, na Lua, vê o céu escuro, mesmo com o Sol acima do horizonte (isto é, quando é "dia", na Lua). Na Terra, durante o dia o céu se apresenta totalmente claro. Explique a causa dessa diferença.

c) Mesmo não havendo atmosfera na Lua, a região próxima à Terra permanece iluminada, permitindo perceber sua superfície e outros objetos aí existentes. Explique.

9. a) Porque refletem difusamente (em todas as direções) a luz que recebem do Sol ou de uma lâmpada; e esta luz difundida alcança nossos olhos.
b) A atmosfera terrestre difunde a luz solar, espalhando-a em todas as direções. Na Lua isso não ocorre porque ela não possui atmosfera.
c) A superfície reflete a luz do Sol.

10. A figura abaixo mostra um raio de luz incidindo em uma superfície refletora (*NP* é normal à superfície).



Banco de imagens/Arquivo da editora

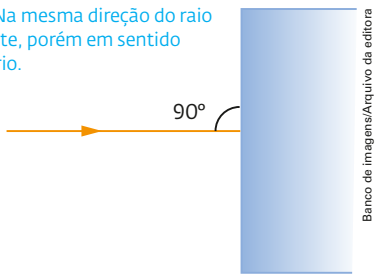
a) Trace, em seu caderno, uma cópia da figura e a posição aproximada do raio refletido.

b) Mostre, em seu desenho, o ângulo de reflexão $\hat{r}$.

c) Se $\hat{i} = 32°$, qual é o valor de $\hat{r}$? 32°

11. Considere um raio luminoso que incide sobre uma superfície refletora da maneira indicada na figura.

11. d) Na mesma direção do raio incidente, porém em sentido contrário.



Banco de imagens/Arquivo da editora

a) Trace, no caderno, uma cópia da figura e a normal à superfície no ponto de incidência.

b) Qual é o valor do ângulo de incidência? Zero.

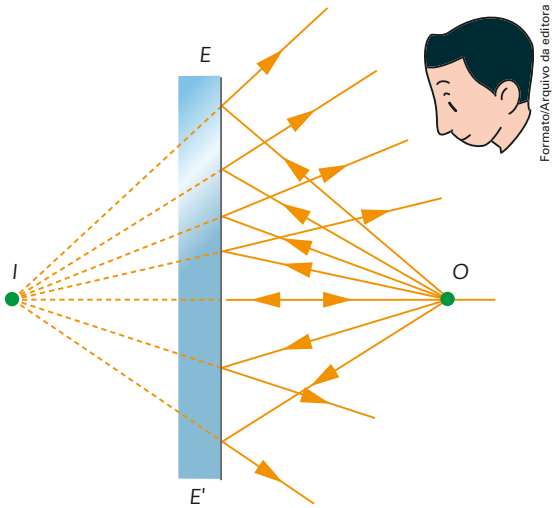
c) Qual será o valor do ângulo de reflexão? Zero.

d) Desenhe, então, na cópia da figura do caderno, a direção do raio refletido.

5.3 Espelho plano

Espelho plano

Uma superfície lisa e plana, que reflete especularmente a luz, é denominada **espelho plano**. Consideremos um pequeno objeto luminoso (ou um objeto que esteja difundindo luz), representado por *O* na figura 5.19, colocado em frente a um espelho plano *EE'*. A luz que sai do objeto e incide na superfície do espelho é refletida. Tracemos, a partir de *O*, alguns raios luminosos incidentes no espelho.



Formato/Arquivo da editora

Figura 5.19. Representação (sem escala e em cores fantasia) da formação da imagem virtual de um objeto em um espelho plano.

Usando as leis da reflexão, podemos desenhar os raios refletidos correspondentes, como foi feito na figura 5.19, verificando que esses raios formam um feixe divergente. Entretanto, traçando o prolongamento dos raios refletidos, veremos que todos eles passarão pelo mesmo ponto *I*. Assim, a luz, após ser refletida pelo espelho plano, diverge como se estivesse sendo emitida do ponto *I*, situado atrás do espelho.

Imagem virtual

Suponha um observador, situado em frente ao espelho, recebendo em seus olhos uma certa parte do feixe refletido (figura 5.19). Esse feixe, como vimos, parece ter sido emitido do ponto *I*, isto é, tudo se passa como se, em *I*, existisse um objeto emitindo aquele feixe[1]. Por esse motivo dizemos que o observador enxerga, naquele ponto, uma **imagem** do objeto *O*. Observe que a imagem *I* está situada atrás do espelho, no ponto de encontro dos **prolongamentos** dos raios refletidos. Dizemos que *I* é uma **imagem virtual** do objeto *O*.

Se formos para trás do espelho, a imagem não estará lá. Ela só existe no espaço virtual. Para vê-la, temos que nos situar em frente ao espelho, de modo a receber a luz refletida por ele. Assim, em resumo:

A luz emitida por um objeto e refletida em um espelho plano chega aos olhos de um observador como se estivesse vindo do ponto de encontro dos prolongamentos dos raios refletidos. Nesse ponto o observador vê uma imagem virtual do objeto (figura 5.19).

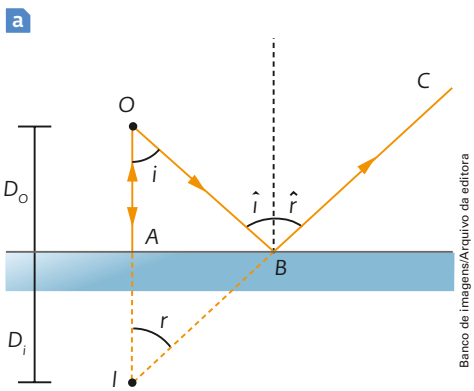
[1] O nosso cérebro, ao perceber que um ponto luminoso emite um feixe de luz divergente, ao receber o feixe refletido na superfície do espelho, tem a ilusão de que ele provém de um ponto situado atrás do espelho, no ponto onde esses raios refletidos se encontrariam, se não houvesse o espelho. A imagem fornecida é, pois, uma ilusão da ação conjunta dos nossos olhos e do nosso cérebro, que costuma ser denominada "ilusão de óptica". Toda imagem virtual que percebemos é consequência de um processo como esse, uma percepção ilusória do nosso cérebro.

Distância da imagem ao espelho

Para determinar a posição da imagem virtual de um pequeno objeto, colocado em frente a um espelho plano, será suficiente traçar apenas dois raios luminosos que partem do objeto e se refletem no espelho. Isso foi feito na **figura 5.20.a**, onde foram traçados os raios incidentes *OA*, perpendicular ao espelho, e *OB*, cujo ângulo de incidência é $\hat{i}$.

Os raios refletidos correspondentes, traçados de acordo com as leis da reflexão, são *AO* e *BC*. A posição da imagem virtual, *I*, é encontrada prolongando-se esses raios refletidos.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.



Banco de imagens/Arquivo da editora



Ari Lago/Arquivo da editora

Figura 5.20. **(a)** Em um espelho plano, a distância da imagem ao espelho é igual à distância do objeto a esse espelho. **(b)** Quando uma superfície refletora (no caso, a água) forma uma imagem virtual de um objeto, tudo se passa como se os raios que dão origem à imagem estivessem sendo emitidos dela, resultando no efeito mostrado nesta fotografia.

Sejam D_O e D_i, respectivamente, as distâncias do objeto e da imagem até o espelho **(figura 5.20.a)**. Como $\hat{r} = \hat{i}$, concluímos que os triângulos *OAB* e *IAB* são iguais entre si. Logo, teremos $D_i = D_O$. Então, a imagem de um pequeno objeto, em um espelho plano, é simétrica em relação ao espelho, isto é, está situada sobre a perpendicular do espelho, e as distâncias da imagem e do objeto até o espelho são iguais. Dessa maneira, se você colocar uma lâmpada a uma distância de 30 cm de um espelho plano, sua imagem se formará atrás do espelho e também a 30 cm de distância dele.

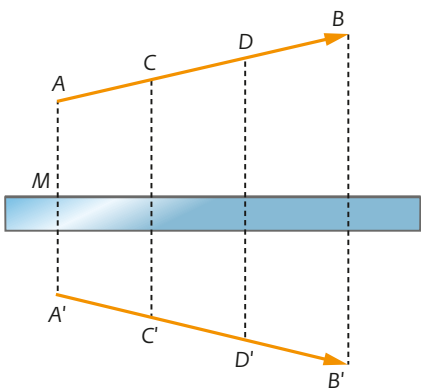
A formação de imagem dos objetos extensos, como o da **figura 5.20.b**, será estudada a seguir.

Outro exemplo ocorre quando uma superfície refletora, como a água, forma uma imagem virtual de um objeto **(figuras 5.12.b e 5.13.b)**. Neste caso, tudo se passa, para a pessoa que recebe a imagem, como se os raios que dão origem à imagem estivessem sendo emitidos dela.

Imagem de um objeto extenso

Suponhamos, agora, que se deseje determinar a imagem de um objeto extenso, como a seta *AB* da **figura 5.21**, situado em frente a um espelho plano. Essa imagem será obtida determinando-se a imagem de cada ponto do objeto.

Assim, a imagem *A'*, do ponto *A*, será localizada traçando-se, de *A*, a perpendicular ao espelho e tomando-se $A'M = AM$. Da mesma forma, podemos localizar as imagens dos demais pontos do objeto. A seta *A'B'* **(figura 5.21)** é, então, a imagem de *AB*. Observe que essa imagem é do mesmo tamanho que o objeto e simétrica a ele em relação ao espelho. Como o espelho plano é um objeto de nosso uso diário, esses fatos já devem ter sido observados por você.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 5.21. Em um espelho plano, a imagem tem o mesmo tamanho do objeto e é simétrica à dele em relação ao espelho.

Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

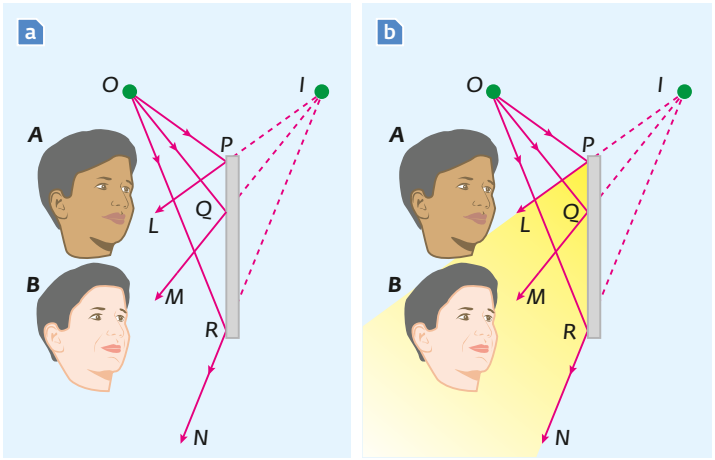


Figura 5.22. Em um espelho plano a distância do objeto *O* ao espelho é igual à distância da imagem *I* ao espelho (**a**). O campo visual é a região (em destaque) entre as retas que partem da imagem e tangenciam as bordas do espelho (**b**).

Exemplo

Um objeto *O* e dois observadores, *A* e *B*, estão situados nas proximidades de um espelho plano, como mostram as figuras 5.22.a e 5.22.b. Esses observadores poderão ver a imagem do objeto através do espelho?

Para que um observador possa ver a imagem de um objeto, ele deverá receber um feixe de luz, proveniente do objeto, depois de refletido pelo espelho e estar localizado na região do campo visual (figura 5.22.b). A distância do objeto *O* ao espelho é igual à distância da imagem *I* ao espelho. Para determinar o campo visual deve-se traçar retas que partem da imagem *I* e tangenciam as bordas do espelho, ou seja, as retas *PL* e *RN*. Observe que, traçando o raio *OP*, que atinge a extremidade do espelho, obteremos um raio refletido *PL*, que não atinge os olhos do observador *A*. O mesmo acontece com os raios *OQ* e *OR*, que incidem no espelho e refletem-se abaixo de *PL*. Assim, o observador *A* não poderá ver a imagem do objeto *O*, pois está fora do campo visual do espelho. Como o observador *B* está situado abaixo do raio limite *PL*, ou seja, está dentro do campo visual do espelho, haverá um feixe de luz refletido que atingirá o olho desse observador. Assim, *B* verá a imagem de *O*, localizada no ponto de encontro dos prolongamentos dos raios refletidos pelo espelho.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

12. d) A imagem virtual da lâmpada.

12. Suponha que você esteja em frente a um espelho plano, segurando uma pequena lâmpada acesa situada a 50 cm do espelho.

a) O que ocorre com o feixe de luz emitido pela lâmpada ao atingir o espelho? É refletido.

b) O feixe refletido é convergente ou divergente? Divergente.

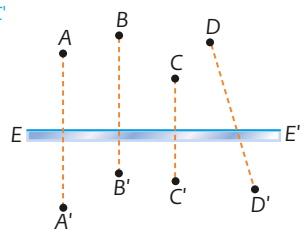
c) Ao chegar a seus olhos, de que ponto parece estar vindo o feixe refletido pelo espelho? De um ponto situado a 50 cm atrás do espelho.

d) Então, o que você vê nesse ponto?

e) Faça no caderno uma figura ilustrando suas respostas. Figura semelhante à 5.19.

13. A figura abaixo mostra um espelho plano *EE'* e os pares de pontos *AA'*, *BB'*, *CC'* e *DD'*. Entre esses pares de pontos, quais os que podem estar representando um pequeno objeto e sua imagem?

AA' e *CC'*

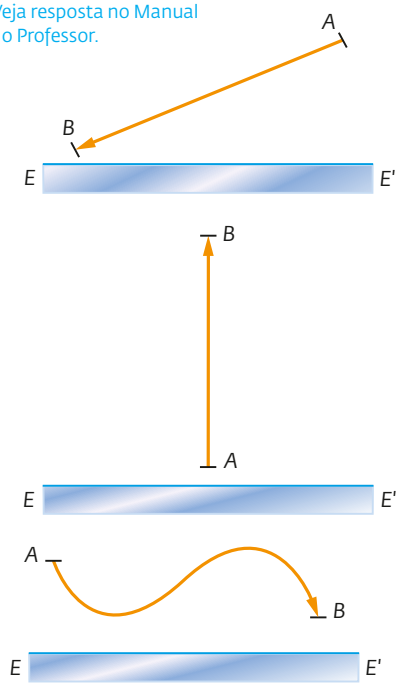


14. a) Uma pessoa está situada a uma distância de 2 m de um espelho plano. Qual é a distância da pessoa à sua imagem? 4 m

b) Se a pessoa se aproximar do espelho, o tamanho de sua imagem aumentará, diminuirá ou não variará? Não variará.

15. Faça uma cópia de cada uma das figuras abaixo no caderno e desenhe a imagem *A'B'* do objeto *AB*, fornecida pelo espelho *EE'*.

Veja resposta no Manual do Professor.



Ilustrações técnicas: Banco de imagens/Arquivo da editora

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

APLICAÇÕES DA FÍSICA

Reflexão em câmeras fotográficas

Um dos papéis da fotografia no século XX foi ser instrumento de conservação de fatos históricos de uma sociedade **(figura 5.23)**. Como consequência, os registros fotográficos tornaram-se uma forma de informação, principalmente em jornais e revistas. Esse papel central nos meios de comunicação foi facilitado pelo desenvolvimento de câmeras fotográficas mais leves, de fácil manuseio e transporte.

Um dos momentos mais importantes ao se tirar uma fotografia consiste em observar pela câmera aquilo que será fotografado. Para isso, é importante que o visor mostre com a maior fidelidade possível a imagem que será registrada, tanto do ponto de vista do enquadramento – aquilo que efetivamente será registrado – como as cores e o contraste.

Entre as câmeras fotográficas, encontramos as digitais e as analógicas. Nas câmeras digitais, que utilizam um visor de cristal líquido, o enquadramento é bem resolvido, mostrando exatamente o que será captado por um sensor. Todavia, como a reprodução das cores no visor não é totalmente fiel, isso se torna um problema **(figura 5.24)**. Nas câmeras analógicas mais simples utilizava-se um sensor óptico separado, que permitia uma fidelidade de cor e contraste muito grande, mas, como estava separada da lente que focalizava a imagem no filme, o enquadramento observado não era o mesmo que seria capturado pelo filme, especialmente quando a distância entre a câmera e o objeto era pequena.

Esses problemas não afetam de modo significativo quem fotografa por diversão. Todavia, para a fotografia profissional, utiliza-se outro tipo de câmera, conhecida por câmera SLR ou DSLR (do inglês *Single Lens Reflex* ou *Digital Single Lens Reflex*, reflexão em lente única). Nesse sistema, o visor óptico permite a observação da imagem pela mesma lente que tirará a fotografia. Para que isso seja possível, a luz precisa entrar na câmera pela lente e ser desviada até o visor, que se localiza acima do filme ou do sensor digital **(figura 5.25)**.

Ao passar pela lente, a luz é refletida inicialmente por um espelho móvel. Após essa reflexão, ela é direcionada para um pentaprisma – um prisma com cinco faces –, utilizado para desviar a luz de um ângulo de 90°. Neste, a luz sofre duas reflexões e então é direcionada para o olho do fotógrafo, permitindo que ele observe exatamente o que será captado pela câmera. No momento da fotografia, o espelho móvel é deslocado, permitindo a passagem da luz até o filme ou o sensor digital, que se encontram logo acima e atrás dele.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.



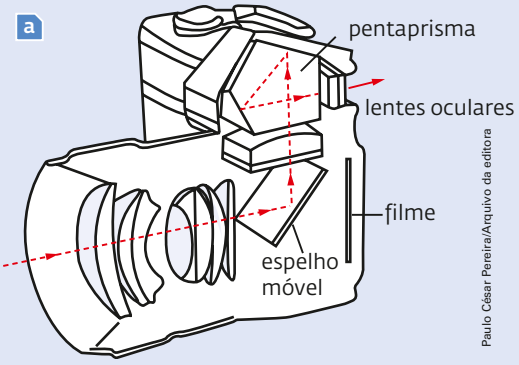
Arquivo/Agência Estado

Figura 5.23. Vista do viaduto do Chá e do vale do Anhangabaú, em São Paulo (SP), em 1918.



Digital Genetics/Shutterstock/Glow Images

Figura 5.24. Câmera digital comum.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora



Kletr/Shutterstock/Glow Images

Figura 5.25. **(a)** Representação esquemática (sem escala e em cores fantasia) do funcionamento de uma câmera SLR, indicando o caminho que a luz faz até chegar aos olhos do fotógrafo. **(b)** Câmara profissional SLR.

QUESTÕES

1. São diversas as aplicações da fotografia, inclusive na ciência. Entretanto, alguns detalhes técnicos melhoraram muito com a utilização da tecnologia digital. Pesquise quais características técnicas são fundamentais para auxiliar os pesquisadores a obterem imagens ricas em detalhes.
   Veja resposta no Manual do Professor.
2. Atualmente as pessoas utilizam o celular para fazer fotografias. É possível utilizar o celular para substituir uma câmera fotográfica profissional?

   Sim, é possível, mas depende exclusivamente do tipo de aparelho celular. Pode-se, por exemplo, encaixar lentes no celular para aproveitar melhor a luz ambiente.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

5.4 Espelhos esféricos



Robert Kneschke/Shutterstock/Glow Images



Olaru Radian-Alexandru/Shutterstock/Glow Images

Figura 5.26. (**a**) Espelho côncavo de dentistas. (**b**) Espelho convexo lateral de veículos.

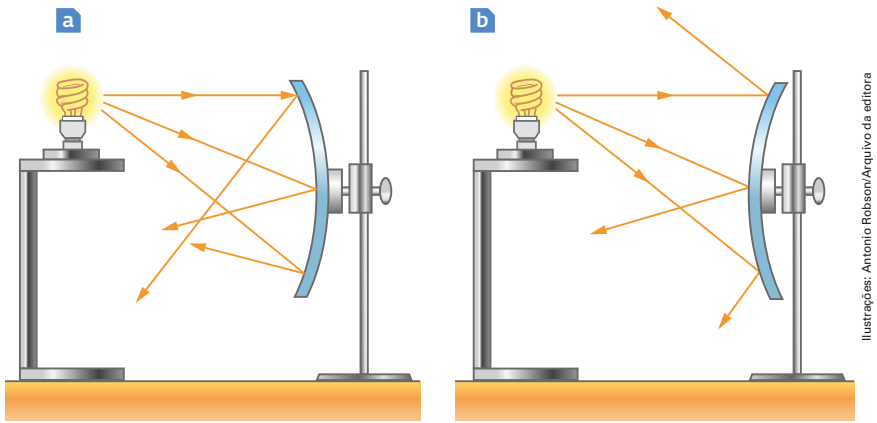
As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Introdução

Espelhos esféricos, côncavos e convexos, estão presentes em nosso cotidiano. O espelho utilizado pelo dentista **(figura 5.26.a)**, fornece imagens ampliadas dos dentes, auxiliando-o na localização de cáries. Já o retrovisor lateral dos automóveis **(figura 5.26.b)** nos fornece uma imagem diminuída dos veículos que estão vindo atrás, porém amplia o campo de visão do motorista.

Espelhos côncavos e convexos

Uma superfície lisa, de forma esférica, que reflete especularmente a luz, é um **espelho esférico**. Se a luz estiver se refletindo na superfície interna, como na **figura 5.27.a**, dizemos que o espelho é **côncavo**; se a reflexão ocorrer na superfície externa **(figura 5.27.b)**, dizemos que o espelho é **convexo**.

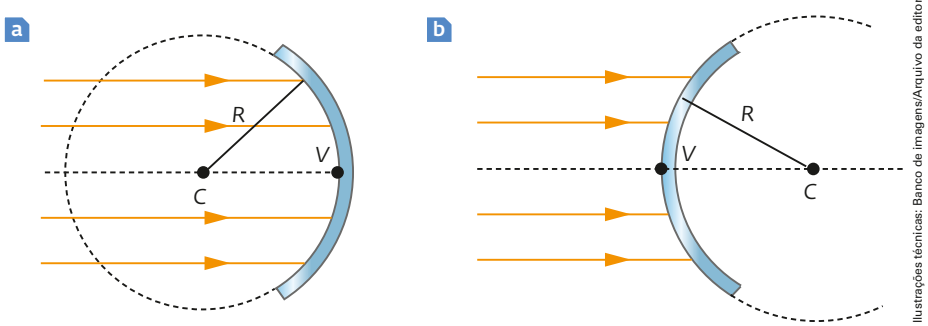


Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 5.27. Representação de raios luminosos se refletindo em um espelho côncavo (**a**) e em um espelho convexo (**b**).

Alguns elementos importantes dos espelhos esféricos estão mostrados nas **figuras 5.28.a** e **5.28.b**.

- o ponto *V* (centro da superfície refletora), denominado **vértice** do espelho;
- o ponto *C* (centro de curvatura da esfera), denominado **centro** do espelho;
- a reta *CV*, denominada **eixo** do espelho;
- o raio *R*, do espelho (raio de curvatura da esfera).



Ilustrações técnicas: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 5.28. Representação de vértice, *V*, centro de curvatura, *C*, e raio, *R*, de um espelho côncavo (**a**) e de um espelho convexo (**b**).

Imagem real

Suponha que um pequeno objeto *O* seja colocado sobre o eixo do espelho côncavo, como mostra a **figura 5.29**. Parte da luz que é emitida por *O* incide no espelho e será refletida por ele de acordo com as leis da reflexão.

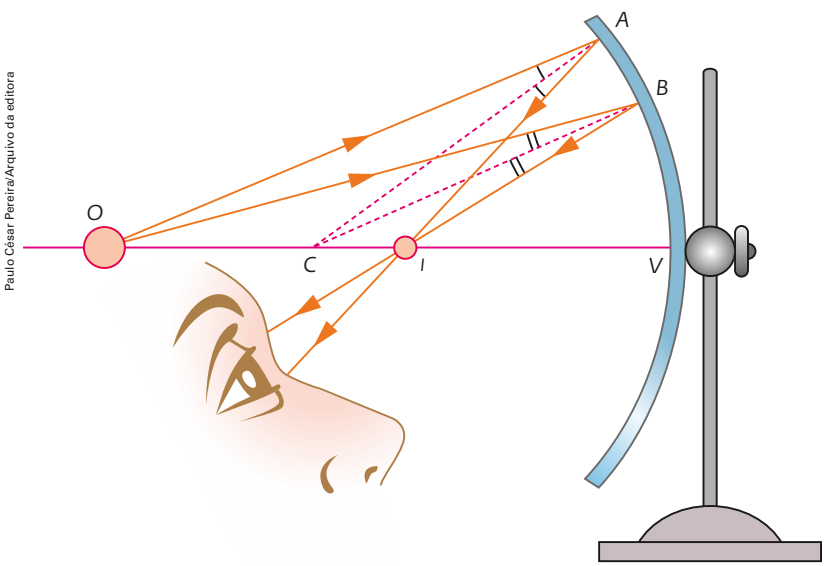
Tracemos um raio incidindo no espelho no ponto *A* (raio *OA* da **figura 5.29**). A normal ao espelho, nesse ponto, é *CA*, pois sabemos que o raio de uma superfície esférica é sempre perpendicular a ela.

Assim, determinamos o ângulo de incidência, $\hat{i}$, e podemos traçar o raio refletido *AI*, bastando lembrar que $\hat{r} = \hat{i}$. Repetindo esse procedimento com o raio incidente *OB*, verificamos que o raio refletido correspondente, *BI*, também passará pelo ponto *I*, e isto ocorrerá com qualquer outro raio que incida na região do espelho que obedeça às condições de Gauss (que veremos a seguir).

Se um observador se colocar em frente ao espelho, na posição mostrada na **figura 5.29**, os raios refletidos, após passarem todos por *I*, divergem e alcançam seus olhos. Tudo se passa, então, como se em *I* existisse um objeto enviando luz para os olhos do observador.

Por esse motivo, ele **verá** em *I* uma imagem do objeto *O*, fornecida pelo espelho côncavo. Lembre-se de que a imagem virtual é vista no ponto de encontro dos raios refletidos, enquanto a imagem *I* é vista, pelo observador, em um ponto onde realmente passam os raios refletidos. Por isso, essa imagem é denominada **imagem real**. Assim, podemos destacar:

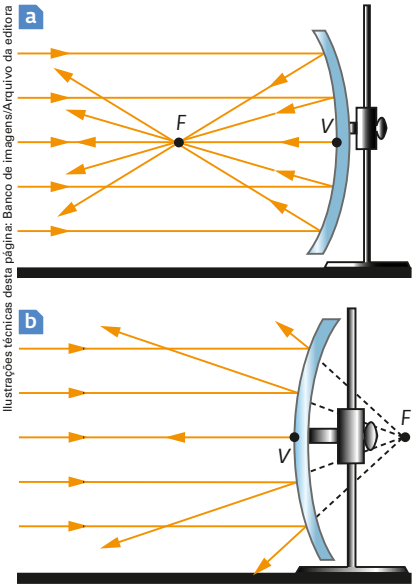
Quando um feixe de luz emitido por um objeto se reflete em um espelho côncavo, de modo a convergir para um ponto, teremos, nesse ponto, a formação de uma imagem real do objeto.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 5.29. Representação (sem escala e em cores fantasia) da formação de uma imagem real (*I*) de um objeto (*O*) por um espelho côncavo.

Como na posição onde se forma a imagem real passam raios luminosos, se colocarmos aí um anteparo, observaremos a imagem projetada sobre ele (o que não ocorre, com a imagem virtual). Entretanto, o observador poderá ver a imagem real mesmo sem se utilizar do anteparo. Basta, para tanto, que ele se coloque, como na **figura 5.29**, em uma posição tal que seus olhos recebam os raios refletidos após terem convergido no ponto *I*.



Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 5.30. Representação de foco de um espelho côncavo (**a**) e de um espelho convexo (**b**).

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Foco de um espelho

A figura 5.30.a ao lado mostra um feixe de raios luminosos incidindo em um espelho côncavo, paralelamente ao seu eixo. Usando as leis da reflexão, podemos traçar os raios refletidos, verificando, então, que eles convergem em um ponto *F*, denominado **foco do espelho**. Por esse motivo, é costume dizer que o espelho côncavo é um **espelho convergente**.

Por outro lado, fazendo um feixe de raios incidir paralelamente ao eixo de um espelho convexo, observamos que eles divergem após a reflexão (figura 5.30.b). Entretanto, os prolongamentos dos raios refletidos passam pelo ponto *F*, que é o foco do espelho convexo. Assim, tudo se passa como se o feixe divergente fosse emitido de *F*. O espelho convexo costuma, então, ser denominado **espelho divergente**.

Devemos notar que, no espelho côncavo, raios paralelos ao eixo, após se refletirem, passam realmente por *F* e, por isso, o foco do espelho côncavo é um **foco real** (encontra-se no espaço a que temos acesso). Já no espelho convexo, o foco é **virtual**, está situado no ponto de encontro dos prolongamentos dos raios refletidos, pois encontra-se em um espaço a que não temos acesso (figura 5.31).

Em resumo:

Um feixe de raios luminosos, incidindo paralelamente ao eixo de um espelho côncavo, é refletido convergindo para um foco real; incidindo em um espelho convexo, diverge, após a reflexão, como se fosse emitido de um foco virtual.



Andrew Lambert Photography/Science Photo Library

Sciencephotos/Alamy/Latinstock

Figura. 5.31. Em colheres de metal, a parte interna (**a**) é um espelho côncavo em que a imagem refletida é real, menor e invertida em relação ao objeto. O lado externo da colher (**b**) é um espelho convexo em que a imagem produzida é virtual, maior e direita.

Observa-se experimentalmente que essa afirmação é verdadeira quando se utilizam **feixes de raios paralelos ao eixo** de espelhos esféricos côncavos ou convexos que **incidem próximo ao vértice**. Isso quer dizer que o foco é bem definido quando o ângulo de abertura do espelho é pequeno, até cerca de 10° (figura 5.32). Quem primeiro observou esse fato foi o físico e matemático alemão Carl Friedrich Gauss (1777-1855). Por isso, dizemos que espelhos com até cerca de 10° de abertura obedecem às **condições de Gauss** e são chamados **espelhos de Gauss**.

À medida que nos afastamos dessas condições, fazendo incidir sobre espelhos esféricos feixes de raios relativamente afastados do vértice, o foco passa a ser uma mancha, não mais um ponto, e as imagens por eles formadas perdem a nitidez.



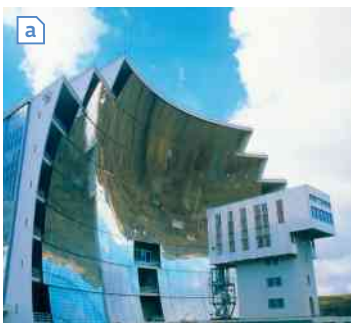
Figura 5.32. Os espelhos esféricos obedecem às condições de Gauss nas regiões próximas ao seu vértice, até uma abertura angular de 10°.

FÍSICA NO CONTEXTO

O FORNO SOLAR

No decorrer do século XX a demanda por energia elétrica cresceu devido à expansão demográfica e à industrialização dos centros urbanos. Esse cenário levou as civilizações a buscar novas fontes de energias renováveis, como o forno solar de Odeillo **(figura 5.33.a)** localizado em Perpignan, nos Pireneus Orientais (França). Esse equipamento tem potência térmica de 1 000 W/m², e é dotado de 63 espelhos planos (heliostatos) **(figura 5.33.b)** que acompanham, automaticamente, a inclinação dos raios solares concentrando a luz em um refletor. O refletor é formado por 9 500 espelhos planos individuais, distribuídos em um edifício de oito andares. Sua função é focalizar os raios solares no coletor que está localizado na torre em frente ao refletor, fazendo-o alcançar temperatura da ordem de 4 000 °C.

Como a distância do Sol à Terra é muito grande, o feixe de luz solar que nos atinge é constituído de raios praticamente paralelos. Então, ao se refletirem no espelho, os raios desse feixe convergem para seu foco. Nesse foco haverá uma grande concentração de energia, tanto luminosa quanto térmica (as radiações térmicas se comportam como a luz). Assim, no foco do espelho há uma considerável elevação de temperatura e, nesse ponto, é colocado o dispositivo que vai utilizar a energia concentrada.



Alex Bartel/SPL/Latinstock



Reprodução/<http://imeder.org/>

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

Figura 5.33. **(a)** Espelho convergente, construído na França, para ser usado como "forno solar". **(b)** Heliostatos automáticos que direcionam a luz para o refletor do forno solar de Odeillo.

O telescópio e o holofote

Os espelhos côncavos são utilizados em alguns telescópios, permitindo-nos observar (ou fotografar) estrelas e galáxias, mesmo aquelas que não podem ser vistas a olho nu. Como os corpos celestes se encontram mais afastados da Terra do que o Sol, a luz que chega até nós, emitida por eles, também é constituída de raios praticamente paralelos. Essa luz, sendo recebida pelo espelho côncavo de um telescópio, converge para o seu foco, formando-se aí uma imagem real do astro que está sendo observado. Embora seja muito pequena a intensidade da luz que chega à Terra, proveniente de uma estrela, por exemplo, a concentração de luz provocada pelo espelho côncavo torna possível observar ou fotografar sua imagem.

Quanto mais afastado se encontrar um corpo celeste, mais fraca será a luz que dele recebemos e maior deverá ser o tamanho do espelho, a fim de coletar luz suficiente para que ele possa ser observado.



Ou Dongqu/Xinhua/Agência France-Press

Figura 5.34. Telescópio FAST, em Pingtang, China. Fotografia de 2016.

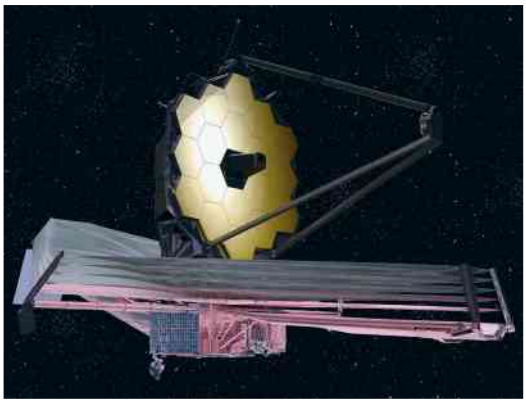
Na **figura 5.34** mostramos o espelho côncavo com 500 m^2 do telescópio chinês FAST (do inglês *Five hundred meter Aperture Spherical Telescope*). Os espelhos desse telescópio, bem como os espelhos côncavos de qualquer telescópio, não são esféricos, e sim parabólicos, pois com eles obtém-se maior nitidez nas imagens de objetos distantes. O FAST será o maior telescópio do mundo, sendo formado por 4 400 painéis de alumínio triangulares que juntos formam um espelho parabólico com aproximadamente 300 m. Um telescópio que ficou famoso é o telescópio espacial Hubble, que, apesar de possuir um espelho de apenas 2,40 m de diâmetro, permitiu uma grande melhoria na obtenção das imagens do espaço. Ele está em órbita a cerca de 600 quilômetros de altitude **(figura 5.35)**. O telescópio Hubble foi lançado para o espaço no dia 24 de abril de 1990, e sua substituição está prevista para 2018. O Hubble será substituído pelo telescópio espacial James Webb **(figura 5.36)**, que tem um espelho maior, com 6,5 m de diâmetro, e deverá ficar em uma órbita situada a cerca de 1,5 milhão de quilômetros da Terra.



Nasa/Science Photo Library/Latinstock

Figura 5.35. Telescópio espacial Hubble, em órbita a cerca de 600 km da superfície terrestre.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

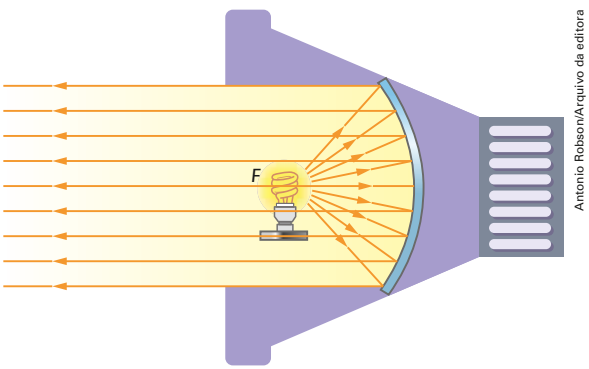


Reprodução/NASA

Figura 5.36. Concepção artística do telescópio James Webb.

Os holofotes são dispositivos capazes de nos fornecer um feixe de raios luminosos paralelos. Isso é possível porque um holofote é constituído, basicamente, de um espelho côncavo com uma lâmpada situada no seu foco **(figura 5.37)**.

Um feixe de luz que incide paralelamente ao eixo de um espelho côncavo converge em seu foco. No holofote, a luz segue o caminho inverso, isto é, o feixe divergente que sai do foco torna-se paralelo após ser refletido. O holofote permite melhor iluminação de objetos distantes porque os feixes de luz que ele emite são praticamente paralelos, não se espalhando em várias direções, como acontece com a luz emitida por uma fonte luminosa comum.



Antonio Robson/Arquivo da editora

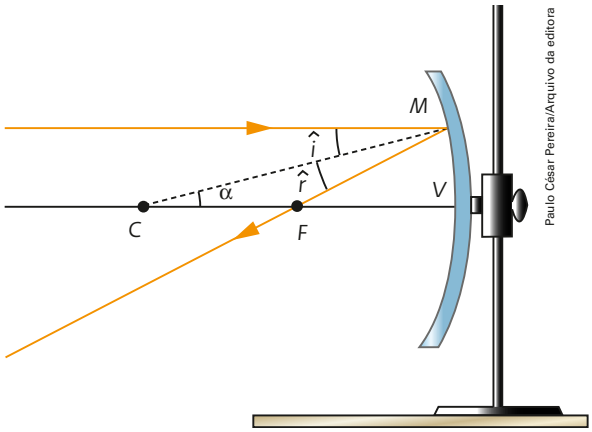
Figura 5.37. Em um holofote, a lâmpada deve ficar no foco do espelho côncavo, para que o feixe refletido seja constituído de raios paralelos.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Distância focal

Na figura 5.30 mostramos os focos de um espelho côncavo e de um espelho convexo. A distância *FV*, entre o foco e o vértice, é denominada **distância focal**, *f*, do espelho.

Vamos procurar obter uma relação entre a distância focal, *f*, e o raio, *R*, do espelho. Para isso, consideremos um raio luminoso, paralelo ao eixo de um espelho côncavo, incidindo nesse espelho no ponto *M* (figura 5.38).



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 5.38. A distância focal de um espelho esférico é igual à metade de seu raio de curvatura ($f = R/2$). Representação sem escala e em cores fantasia.

Sendo *C* o centro de curvatura, sabemos que *CM* é a normal ao espelho em *M*. Assim, podemos traçar o raio refletido, formando com a normal um angulo $\hat{r}$ igual ao ângulo de incidência $\hat{i}$. O ponto em que esse raio corta o eixo *CV* é o foco, *F*, do espelho. Analisando a figura, percebe-se que $\hat{\alpha} = \hat{i}$, porque são ângulos alternos internos. Assim, $\hat{r} = \hat{\alpha}$, levando à conclusão de que o triângulo *CFM* é isósceles. Logo, $CF = FM$.

Vamos considerar, daqui por diante, os raios luminosos que incidem no espelho próximos ao seu vértice. Como essas condições obedecem à condição de Gauss para ângulos pequenos, podemos considerar que $FM = FV$. Então $CF = FV$, ou seja, $FV = CV/2$. Mas *CV* é o raio, *R*, do espelho, e *FV* é a sua distância focal *f*. Logo, temos $f = R/2$. É possível demonstrar que esse resultado é válido, também, para um espelho convexo. Então, podemos destacar:

A distância focal, *f*, de um espelho esférico é aproximadamente igual à metade do seu raio de curvatura, *R*, isto é, $f = R/2$. Em outras palavras, o foco de um espelho esférico está situado no meio da distância entre o centro e o vértice do espelho.

Exemplo

O espelho côncavo do farol de um automóvel tem um raio de curvatura $R = 20$ cm. Qual é a distância entre o filamento da lâmpada do farol e o vértice desse espelho?

A lâmpada de um farol (holofote) deve estar situada no foco do espelho côncavo, para que o farol emita um feixe de raios luminosos paralelos. Então, a distância da lâmpada de um farol ao vértice do espelho deve ser igual à distância focal, *f*, desse espelho. Como vimos, $f = R/2$, e, em nosso caso,

$$f = \frac{R}{2} = \frac{20\text{ cm}}{2} = 10\text{ cm}$$

Assim, o filamento da lâmpada deve estar a 10 cm do vértice do espelho.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

16. Vários objetos que apresentam uma superfície polida podem se comportar como espelhos. Diga se cada um dos objetos seguintes se comporta como espelho côncavo, convexo, convergente ou divergente:

a) Superfície interna de uma colher. Côncavo, convergente.

b) Calota de um automóvel. Convexo, divergente.

c) Bola espelhada de árvore de Natal. Convexo, divergente.

d) Espelho do farol de um automóvel. Côncavo, convergente.

17. Desenhe, em seu caderno, um espelho côncavo de raio $R = 6{,}0$ cm. Nele, indique:

a) a posição do vértice V do espelho.

b) o eixo do espelho.

c) a posição do centro, C, do espelho.

d) onde está localizado o foco, F, do espelho. No meio do segmento CV.

18. Responda às questões do exercício anterior para o espelho convexo, de raio $R = 6{,}0$ cm.

19. Suponha que o espelho côncavo de um telescópio tenha um raio $R = 5{,}0$ m e que esteja sendo usado para fotografar uma certa estrela.

a) Como é o feixe de raios luminosos, proveniente da estrela, que chega ao telescópio? Paralelos.

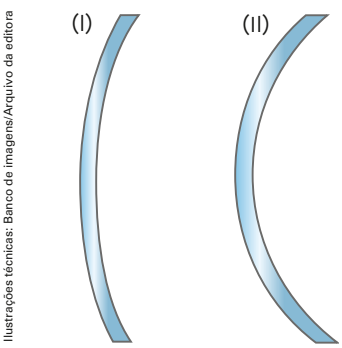
b) A que distância do vértice do espelho se forma a imagem da estrela? 2,5 m

c) Essa imagem é real ou virtual? Real.

20. Considere os espelhos côncavos, I e II, representados na figura a seguir.

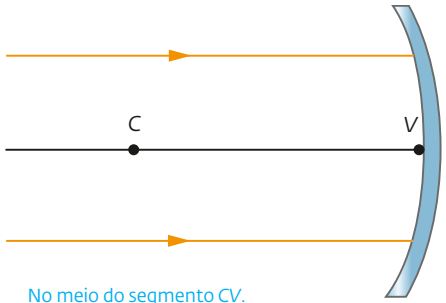
a) Para qual deles o valor do raio R é maior? I

b) Então, qual deles possui menor distância focal? II



Ilustrações técnicas: Banco de imagens/Arquivo da editora

21. A figura representa um espelho côncavo, o seu centro C e dois raios luminosos que incidem no espelho paralelamente ao eixo CV.



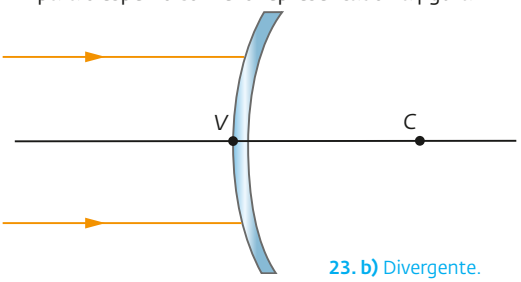
a) Mostre, em uma cópia da figura no caderno, onde se localiza o foco do espelho. No meio do segmento CV.

b) Esse foco é real ou virtual? Real.

c) Trace, em sua cópia do desenho no caderno, a trajetória dos raios após serem refletidos pelo espelho. Passam pelo foco.

d) Diga se o espelho é convergente ou divergente. Convergente.

22. Responda às questões do exercício anterior para o espelho convexo representado na figura:



23. Observando a figura 5.29, responda:

a) O feixe de luz, proveniente do objeto, logo após ser refletido pelo espelho, é convergente ou divergente? Convergente.

b) O feixe de luz que penetra no olho do observador é convergente ou divergente?

c) Para o observador, tudo se passa como se o feixe que penetra em seus olhos estivesse sendo emitido de que ponto? Do ponto I.

d) Então, o que o observador vê nesse ponto? A imagem real do objeto.

Não escreva no livro!

17. a) No meio do arco que representa a calota.
b) Reta passando por V, perpendicular ao espelho.
c) Sobre o eixo, a 6,0 cm de V, para o lado da concavidade.

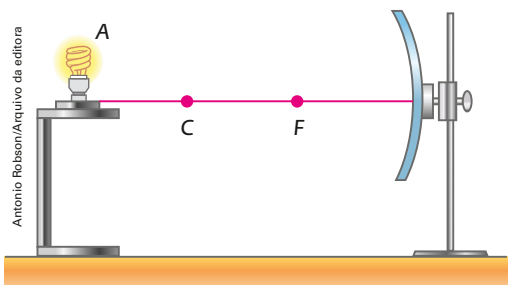
18. As mesmas posições do exercício 17.

22. a) No meio do segmento CV.
b) Virtual.
c) Os prolongamentos dos raios refletidos passam pelo foco.
d) Divergente.

23. b) Divergente.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

5.5 Imagem de um objeto extenso



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 5.39. Representação de um objeto extenso situado em frente a um espelho côncavo.

Até aqui analisamos apenas a formação de imagens de pequenos objetos (objetos puntuais) nos espelhos esféricos. Consideremos um objeto não puntual, como a lâmpada mostrada na figura 5.39, colocado em frente a um espelho esférico. Para localizar a imagem desse objeto, deveríamos determinar a posição da imagem de cada um de seus pontos. Entretanto, localizando-se apenas a imagem da extremidade A, será possível visualizar a imagem de todo o objeto, como vamos mostrar nesta seção.

Raios principais

Podemos localizar a posição da imagem de um ponto nos espelhos esféricos fazendo uso de determinados raios luminosos, denominados **raios principais**.

1º) Um raio luminoso que incide em um espelho côncavo, paralelamente ao seu eixo, reflete-se passando pelo foco **(figura 5.40.a)**.

Um raio luminoso que incide em um espelho convexo, paralelamente ao seu eixo, reflete-se de tal modo que seu prolongamento passa pelo foco **(figura 5.40.b)**.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

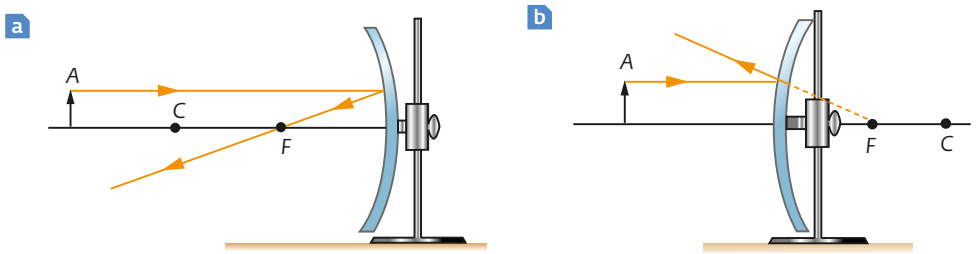


Figura 5.40. Representação da reflexão de um raio luminoso que incide paralelamente ao eixo em um espelho côncavo **(a)** e um espelho convexo **(b)**.

2º) Um raio luminoso que incide em um espelho côncavo, passando por seu foco, reflete-se paralelamente ao eixo do espelho **(figura 5.41.a)**.

Um raio luminoso que incide em um espelho convexo, de tal maneira que sua direção passe pelo foco, reflete-se paralelamente ao eixo do espelho **(figura 5.41.b)**.

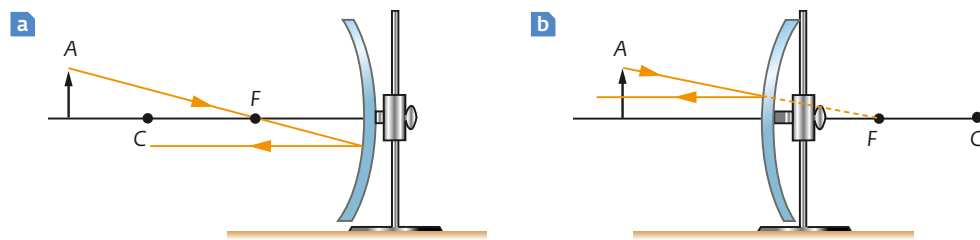
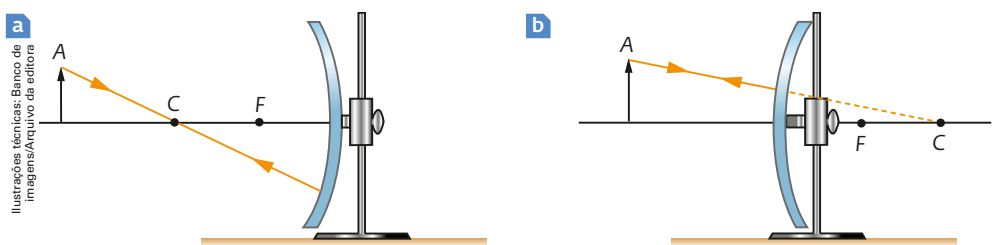


Figura 5.41. Representação da reflexão de um raio luminoso, que incide em um espelho côncavo **(a)** e em um espelho convexo **(b)**, de tal modo que sua direção passe pelo foco desses espelhos.

3º) Um raio luminoso que incide em um espelho côncavo, passando pelo seu centro de curvatura, reflete-se sobre si mesmo (esse raio incide perpendicularmente ao espelho – **figura 5.42.a**).

Um raio luminoso que incide em um espelho convexo, de tal maneira que sua direção passe pelo centro de curvatura do espelho, reflete-se sobre si mesmo **(figura 5.42.b)**.



Ilustrações técnicas: Banco de imagens/Arquivo da editora

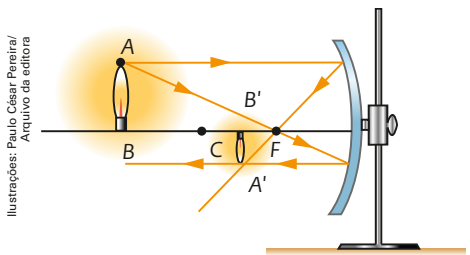
Figura 5.42. Representação da reflexão de um raio luminoso que incide em um espelho côncavo **(a)** e em um espelho convexo **(b)**, de tal modo que sua direção passe pelo centro de curvatura desses espelhos.

A partir de agora, sempre que quisermos localizar a posição da imagem de um ponto (situado fora do eixo do espelho), usaremos apenas os **dois** primeiros raios principais que são emitidos pelo ponto. Nos exemplos seguintes mostraremos o uso desse método para localizar a imagem de um ponto da extremidade de um objeto extenso. A localização da imagem desse ponto nos permitirá representar a imagem de todo o objeto.

Exemplo 1

O objeto *AB* da figura 5.43 encontra-se em frente a um espelho côncavo, a uma distância dele maior do que o seu raio. Localize a imagem desse objeto.

Como as posições do centro *C* e do foco *F* foram fornecidas na figura 5.43, podemos localizar a posição da imagem do ponto *A* usando dois dos raios principais. Observe que traçamos, a partir de *A*, um raio paralelo ao eixo do espelho, o qual se reflete passando pelo foco, e outro passando pelo foco, que se reflete paralelamente ao eixo do espelho. Os raios refletidos se cruzam em *A*'; nesse ponto, portanto, está localizada a imagem (real) de *A*. Como o objeto *AB* é perpendicular ao eixo do espelho, sua imagem também o será, de modo que a imagem de *B* estará em *B*' (sobre o eixo), determinando assim a imagem *A*'*B*', como representado na figura. Observe que, nesse caso, a imagem do objeto *AB*, fornecida pelo espelho côncavo, é real, menor do que o objeto e invertida em relação a ele (figura 5.44).



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 5.43. Para o exemplo 1.



Fotos: Eduardo Santaliestra/Estúdio Paulista

Figura 5.44. Imagem real e invertida de uma vela, colocada em frente a um espelho côncavo, a uma distância maior que o raio do espelho.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Exemplo 2

Suponha que o objeto *AB* do exemplo anterior fosse colocado entre o foco e o vértice do mesmo espelho, como mostra a figura 5.45. Localize a imagem do objeto.

Para localizar a imagem do ponto *A*, usaremos os mesmos raios principais do exemplo anterior. O raio que parte de *A*, paralelamente ao eixo, reflete-se passando pelo foco. O segundo raio que parte de *A* e incide no espelho tem sua direção passando pelo foco, como mostra a figura 5.45. Tudo se passa, então, como se ele tivesse sido emitido do foco e, portanto, será refletido paralelamente ao eixo do espelho. Observamos, agora, que os raios refletidos não se cruzam (a imagem de *A* não será real). Entretanto, os prolongamentos desses raios refletidos se cruzam em *A*' que será, então, a imagem virtual de *A*. Tirando uma perpendicular de *A*' sobre o eixo, determinamos a imagem *B*' do ponto *B* e, assim, teremos localizado a imagem *A*'*B*' do objeto *AB*. Vemos que, nesse caso, o espelho côncavo fornece uma imagem virtual, maior do que o objeto e direita (figura 5.46).

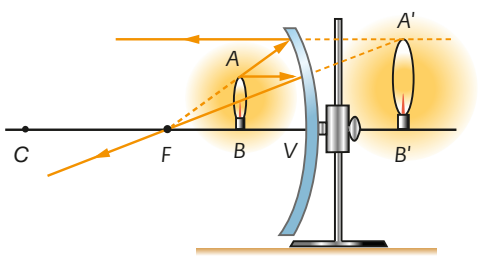


Figura 5.45. Para o exemplo 2.

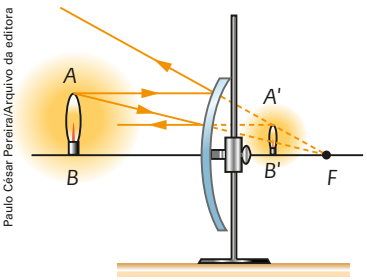


Figura 5.46. Imagem virtual de uma vela situada entre o foco e o vértice do espelho côncavo.

Exemplo 3

Consideremos um objeto *AB* diante de um espelho convexo, como mostra a figura 5.47. Como será a sua imagem?

Traçando a partir do ponto *A* dois raios principais: um paralelo ao eixo, que se reflete de tal modo que seu prolongamento passa pelo foco; o outro, que incide no espelho de tal maneira que sua direção passa pelo foco e se reflete paralelamente ao eixo. Vemos, pela figura 5.47, que, também nesse caso, os raios refletidos não se cruzam, mas os seus prolongamentos se encontram em *A'*. Em *A'B'* temos a imagem do objeto *AB*. Essa imagem é virtual, menor do que o objeto e direita (figura 5.48).



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 5.47. Para o exemplo 3.


Eduardo Santaliestra/Estudio Paulista

Figura 5.48. A imagem da vela, fornecida pelo espelho convexo, é virtual, direita e menor que o objeto.

Nos dois últimos exemplos, observe que a imagem fornecida pelos espelhos é virtual e direita. Isto é uma regularidade, tanto para os espelhos côncavos como para os convexos, ou seja, a imagem virtual é sempre direita.

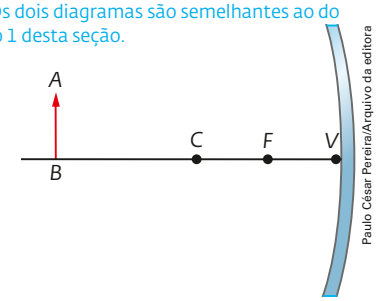
VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

24. a) Orientando-se pelos exemplos resolvidos nesta seção, faça um diagrama no caderno para localizar a imagem do objeto *AB*, colocado em frente a um espelho côncavo, na posição mostrada na figura abaixo.

a) e **b)** Os dois diagramas são semelhantes ao do exemplo 1 desta seção.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

b) Aproxime, do espelho, o objeto *AB* da questão **a**, colocando-o entre o centro e o foco. Faça um novo diagrama, no caderno, para localizar a imagem do objeto nessa nova posição.

25. Suponha que o objeto *AB* do exercício 24 seja colocado sobre o foco *F* do espelho. Nessas condições, não se formará uma imagem do objeto. Por quê?

Porque os raios refletidos serão paralelos entre si (costuma-se dizer que a imagem se forma no infinito).

26. Em uma das pinturas do holandês Maurits Cornelis Escher, mostrada na figura, o pintor se autorretrata como se estivesse olhando para um espelho esférico suspenso em sua mão.


Cordon Art B.V./ Baarn Holand

Mão com esfera refletora, litografia de M. C. Escher, 1935.

a) O espelho esférico desta pintura é côncavo ou convexo? Convexo.

b) A imagem que o espelho forma de Escher é real ou virtual? Virtual.

c) A mão que sustenta o espelho de Escher é a esquerda, porém a imagem "dentro" do espelho parece ser a mão direita. Trata-se de um erro do pintor? Não.

5.6 A equação dos espelhos esféricos

Aumento produzido pelos espelhos

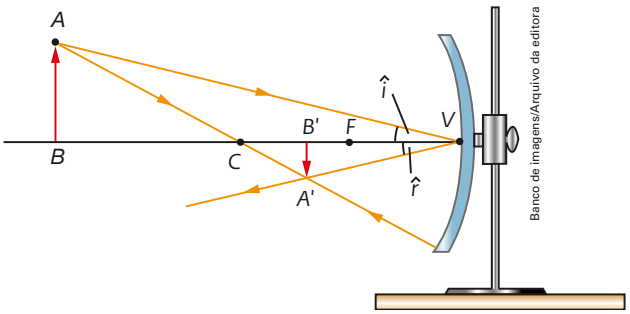


Figura 5.49. Nessa figura, o triângulo ***ABV*** é semelhante ao triângulo ***A'B'V*** e o triângulo ***ABC*** é semelhante ao triângulo ***A'B'C***. Representação sem escala e em cores fantasia.

Vimos, nos exemplos da seção anterior, que a imagem de um objeto pode ser maior ou menor do que ele, dependendo da posição do objeto e do tipo de espelho que produziu a imagem.

A relação entre o tamanho da imagem, *A'B'*, e o tamanho do objeto, *AB*, é denominada aumento ou ampliação obtida pelo espelho, isto é,

$$\text{aumento} = \frac{\text{tamanho da imagem}}{\text{tamanho do objeto}} = \frac{A'B'}{AB}$$

Note que um aumento menor do que 1 indica que a imagem é menor do que o objeto. Para obter uma maneira de calcular esse aumento, vamos analisar a **figura 5.49**.

Nessa figura, a imagem, *A'B'*, do objeto *AB* foi localizada usando o raio principal que passa pelo centro, sendo, então, refletido sobre si mesmo, e o raio *AV*, que incide no vértice do espelho, refletido de tal modo que $\hat{i} = \hat{r}$. Dessa maneira, os triângulos retângulos *ABV* e *A'B'V* são semelhantes, e podemos escrever:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{B'V}{BV}$$

Mas *B'V* é a distância da imagem ao espelho, que designaremos por D_i, e *BV* é a distância do objeto ao espelho, que vamos designar por D_O. Logo,

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{D_i}{D_O}$$

Assim, o aumento produzido por um espelho pode ser obtido dividindo-se a distância da imagem ao espelho pela distância do objeto ao espelho. Esse processo pode ser usado para calcular o aumento tanto no espelho côncavo quanto no convexo.

A equação dos espelhos esféricos

Analisando ainda a **figura 5.49**, poderemos obter uma equação muito importante, relacionando D_O, D_i e a distância focal, *f*, do espelho.

Os triângulos retângulos *ABC* e *A'B'C* são semelhantes, pois os ângulos opostos pelo vértice, em *C*, são iguais.

Assim, temos:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{B'C}{BC}$$

Mas, pela **figura 5.49**, vemos que:

$$B'C = CV - B'V = R - D_i = 2f - D_i$$

$$BC = BV - CV = D_O - R = D_O - 2f$$

Lembrando que $\frac{A'B'}{AB} = \frac{D_i}{D_O}$, virá:

$$\frac{D_i}{D_O} = \frac{2f - D_i}{D_O - 2f} \therefore D_iD_O - 2fD_i = 2fD_O - D_iD_O$$

ou

$$2D_iD_O = 2fD_i + 2fD_O$$

Dividindo todos os termos dessa igualdade por $2fD_iD_O$, obtemos:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{D_O} + \frac{1}{D_i}$$

Essa relação é denominada **equação dos espelhos esféricos**.

Ela nos permite calcular a que distância do espelho a imagem se formará quando conhecemos a distância focal do espelho e a distância do objeto a ele.

Exemplo

Um objeto é colocado a 10 cm do vértice de um espelho côncavo, cuja distância focal é de 20 cm.

a) A que distância do espelho se formará a imagem do objeto?

A equação $\frac{1}{f} = \frac{1}{D_O} + \frac{1}{D_i}$ nos permitirá calcular o valor de D_i, pois conhecemos os valores de D_O e f. Como sabemos, D_O é sempre positivo, isto é, $D_O = 10$ cm; como se trata de um espelho côncavo, f também é positivo, ou seja, $f = 20$ cm. Então, temos:

$$\frac{1}{20} = \frac{1}{10} + \frac{1}{D_i} \therefore \frac{1}{D_i} = \frac{1}{20} - \frac{1}{10} \therefore D_i = -20 \text{ cm}$$

Como encontramos, para D_i, um valor negativo, concluímos que a imagem é virtual e, portanto, não é invertida, estando situada a 20 cm atrás do espelho.

b) Mostre, em um diagrama, a formação da imagem do objeto.

A situação descrita no enunciado corresponde ao diagrama da figura 5.50. Observe que o diagrama confirma os resultados que encontramos algebricamente: a imagem é virtual, direita e está situada atrás do espelho. Em problemas como esse, o traçado do diagrama de formação da imagem nos ajuda a visualizar a solução algébrica; por isso, recomendamos que ele sempre seja feito.

c) Qual será o aumento produzido pelo espelho?

Como vimos, o aumento é dado por:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{D_i}{D_O},$$

Logo: $\frac{A'B'}{AB} = \frac{20}{10}$ ou $\frac{A'B'}{AB} = 2$

Esse resultado significa que a imagem é duas vezes maior do que o objeto, como pode ser confirmado pela figura 5.50. (Observe que, no cálculo do aumento, não é necessário considerar o sinal de D_i.)

Convenção de sinais

A equação $\frac{1}{f} = \frac{1}{D_O} + \frac{1}{D_i}$ foi deduzida para a situação mostrada na figura 5.49, isto é, um espelho côncavo formando uma imagem real de um objeto. Entretanto, ela poderá ser usada também quando a imagem for virtual ou quando o espelho for convexo, desde que seja obedecida a seguinte convenção de sinais para as distâncias D_O, D_i e f:

1ª) a distância D_O é sempre positiva;

2ª) a distância D_i será positiva se a imagem for real e negativa se for virtual;

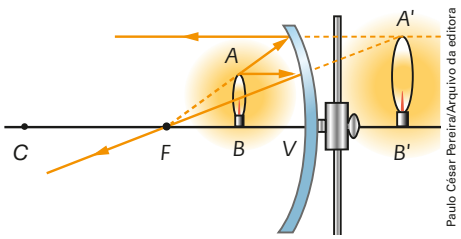
3ª) a distância focal será positiva quando o espelho for côncavo (foco real) e negativa quando for convexo (foco virtual).

Resumindo, podemos destacar que:

A imagem de um objeto colocado a uma distância D_O de um espelho esférico de distância focal f forma-se a uma distância D_i do espelho tal que:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{D_O} + \frac{1}{D_i}$$

Nessa equação, D_O é sempre positivo, f é positivo para o espelho côncavo e negativo para o convexo e D_i é positivo para uma imagem real e negativo para uma imagem virtual.



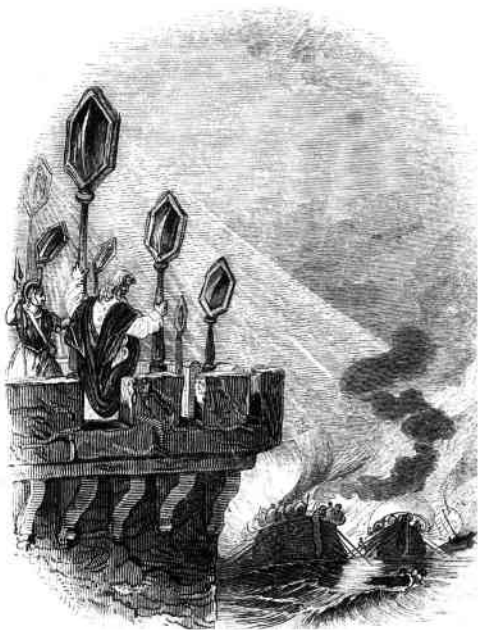
Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 5.50. Para o exemplo. Representação sem escala e em cores fantasia.

FÍSICA NO CONTEXTO

O ESPELHO DE ARQUIMEDES

O cientista e inventor grego Arquimedes viveu no século III a.C., na cidade de Siracusa, na Sicília (sul da Itália). Uma preocupação constante do rei de Siracusa era a proteção de sua cidade contra as ameaças de invasão pelas esquadras romanas. Por isso, ele contratou Arquimedes para projetar e construir dispositivos de guerra, destinados a defender e contra-atacar o inimigo.



Granger/Glow Images

Figura 5.51. Conta-se que Arquimedes incendiou uma esquadra romana usando espelhos côncavos para concentrar os raios solares sobre os navios. Gravura do século XIX.

Entre as armas que Arquimedes teria preparado para defender Siracusa, contam os historiadores que havia grandes espelhos côncavos para fazer convergir os raios solares sobre os navios da esquadra romana **(figura 5.51)**. A concentração da luz solar provoca uma grande elevação de temperatura e, assim, teria sido possível incendiar a esquadra inimiga.

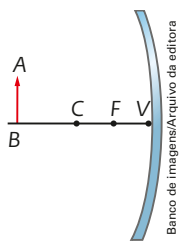
Alguns historiadores têm dúvidas sobre se realmente Arquimedes conseguiu realizar essa façanha. Tentando mostrar que haveria possibilidades práticas para que ela pudesse ter acontecido, um engenheiro grego, em 1973, procurou reproduzi-la. Colocou 70 espelhos planos (cada um com cerca de 1,5 m × 1 m) dispostos em um semicírculo, de modo que convergissem os raios solares sobre um barco de madeira, situado a 50 m da costa (o conjunto de espelhos planos atuava como um espelho convergente). Procedendo dessa maneira, em um dia ensolarado, o engenheiro conseguiu incendiar o barco, que em poucos segundos foi consumido pelas chamas!

Os espelhos de Arquimedes podem ter servido de inspiração para os fornos solares ou pirelióforos que surgiram na transição do século XIX e XX. O pirelióforo consistia em um conjunto de espelhos parabólicos refletores que convergiam a radiação solar para um ponto podendo atingir temperaturas da ordem de 3 500 °C. Apenas em 1976 os fornos solares seriam utilizados na produção de energia elétrica.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

27. Suponha que, na figura (sem escala e em cores fantasia), a distância focal do espelho côncavo seja $f = 10$ cm e que o objeto esteja situado a uma distância $D_o = 60$ cm do vértice do espelho.



Banco de imagens/Arquivo da editora

a) Usando a equação dos espelhos esféricos, determine a distância, D_i, da imagem ao espelho. $D_i = 12$ cm

b) Tendo em vista o resultado encontrado na questão **a**, você conclui que a imagem é real ou virtual? Real.

c) Calcule o aumento fornecido pelo espelho. Qual o significado desse resultado?

d) Os resultados que você encontrou neste exercício estão de acordo com o diagrama traçado no item **a** do exercício 24? Sim.

27. c) 1/5, isto é, a imagem é 5 vezes menor do que o objeto.

28. Um objeto é colocado à distância de 36 cm do vértice de um espelho convexo, cuja distância focal vale 12 cm.

a) Usando a equação dos espelhos esféricos (lembre-se da convenção de sinais), determine D_i. $D_i = -9{,}0$ cm

b) Tendo em vista o resultado encontrado na questão **a**, você conclui que a imagem é real ou virtual? Virtual.

c) Calcule o aumento fornecido pelo espelho.

d) Então, se o tamanho do objeto é $AB = 4$ cm, qual é o tamanho, $A'B'$, da imagem? $A'B' = 1$ cm

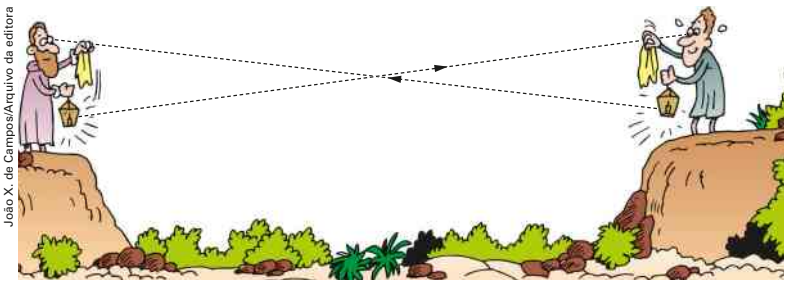
28. c) 1/4, a imagem é 4 vezes menor do que o objeto.

29. Trace, no caderno, o diagrama de formação da imagem na situação correspondente ao exercício anterior. Verifique se ele está em concordância com os resultados que você encontrou. Sim, diagrama semelhante ao da figura 5.47.

5.7 A velocidade da luz

Galileu tenta medir a velocidade da luz

Até meados do século XVII acreditava-se, de maneira geral, que a velocidade da luz era infinita, isto é, que ela se transmitia instantaneamente de um ponto a outro. Essa crença foi duramente criticada por Galileu, que julgava falhos os argumentos apresentados pelos defensores daquela ideia.



João X. de Campos/Arquivo da editora

Figura 5.52. Galileu tentou medir o valor da velocidade da luz, mas não foi bem-sucedido.

Procurando obter elementos para esclarecer a questão, Galileu realizou várias experiências, tentando obter o valor da velocidade da luz. Basicamente, seu procedimento consistia em se colocar, com um assistente, sobre duas colinas a uma distância de 2 km, cada um munido de uma lanterna **(figura 5.52)**. Galileu descobria sua lanterna e seu assistente, ao perceber a luz enviada por ela, descobria a própria lanterna. Então, Galileu tentava medir o intervalo de tempo decorrido entre o instante em que descobria sua lanterna e o instante em que percebia a luz proveniente da lanterna de seu assistente.

Em outras palavras, Galileu procurava medir o tempo que a luz gastava para efetuar o percurso de ida e volta entre as duas colinas. Conhecendo esse tempo e a distância entre as duas colinas, ele poderia determinar o valor da velocidade da luz.

Apesar de, em princípio, o método empregado por Galileu estar correto, ele não obteve êxito em sua experiência. Como sabemos atualmente, a velocidade da luz é muito grande ($c = 300\,000$ km/s) e, assim, nessa experiência, a luz gastava cerca de 10^{-5} s para efetuar o percurso de ida e volta entre as duas colinas. Esse tempo, extremamente pequeno, era impossível de ser medido com os aparelhos de que Galileu dispunha, sendo essa a causa do fracasso de sua experiência.

Este foi um dos exemplos em que Galileu preferiu o teste experimental a aceitar afirmações indiscutíveis. Galileu se tornou conhecido, também, por defender o teste experimental como passo fundamental para aceitação ou rejeição de hipóteses científicas.

A tentativa de se medir experimentalmente a velocidade da luz é apenas uma, entre muitas outras tentativas, ora fracassadas, ora bem-sucedidas, desse cientista, que sempre reforçou o caminho da experimentação como aliado ao raciocínio e à intuição.

A velocidade da luz não é infinita

A primeira evidência de que a luz não se propaga instantaneamente foi obtida por meio das observações do astrônomo dinamarquês Ole Roemer, alguns anos após a morte de Galileu. Roemer, ainda no século XVII, determinou um valor para a velocidade da luz ($c = 200\,000$ km/s) que difere do valor que conhecemos atualmente, mas a ordem de grandeza é a mesma. Entretanto, suas observações foram uma constatação experimental do que Galileu havia sugerido, de que a luz não tinha velocidade infinita. Outro cientista que mediu a velocidade da luz com bastante precisão ($c = 3{,}13 \cdot 10^8$ m/s) foi o francês Hippolyte Fizeau (1819-1896), em 1849.



Reprodução/ Arquivo da editora

OLE ROEMER (1644-1710)

Astrônomo dinamarquês que se tornou conhecido por suas observações dos eclipses de um dos satélites de Júpiter, com as quais foi possível concluir que a velocidade da luz não é infinita. Essas observações foram realizadas durante o período em que Roemer trabalhava no Observatório Real de Paris, onde viveu durante nove anos. Retornando à Dinamarca, além de continuar com suas atividades no campo da Astronomia, ele exerceu algumas funções públicas, chegando ao cargo de prefeito de Copenhague.



SPL/Latinstock

LÉON FOUCAULT (1819-1868)

Cientista francês e físico experimental. Um de seus trabalhos mais conhecidos foi demonstrar experimentalmente a rotação da Terra em torno de seu eixo (pêndulo de Foucault). Por esse trabalho, recebeu um prêmio da Real Academia de Ciências de Londres.



SPL/Latinstock

ALBERT MICHELSON (1852-1931)

Físico, especializou-se em métodos de medidas ópticas de alta precisão. As experiências que realizou com seu colega Edward Morley, além de fornecer valores altamente precisos para a velocidade da luz, serviram de base para a teoria da relatividade.

Além deles, Léon Foucault conseguiu medir a velocidade da luz com bastante precisão, medindo o tempo que um feixe luminoso levava para incidir em um espelho rotativo fixo em um determinado ângulo no qual ele era refletido, sendo dirigido para um espelho estacionário distante **(figura 5.53)**. Após se refletir, o raio voltava, passando novamente no espelho estacionário, e sua trajetória formava um ângulo θ com o raio incidente. Conhecendo-se o número de rotações que o espelho efetuava, Focault, em 1862, conseguiu medir o valor da velocidade da luz igual a $c = 2{,}98 \cdot 10^8$ m/s, bastante próximo do valor conhecido hoje.

Ainda com o método dos espelhos rotativos, Focault conseguiu medir a velocidade da luz em meios materiais. Ele verificou que a luz se desloca na água com velocidade $v = 2{,}23 \cdot 10^8$ m/s, valor este inferior a c.

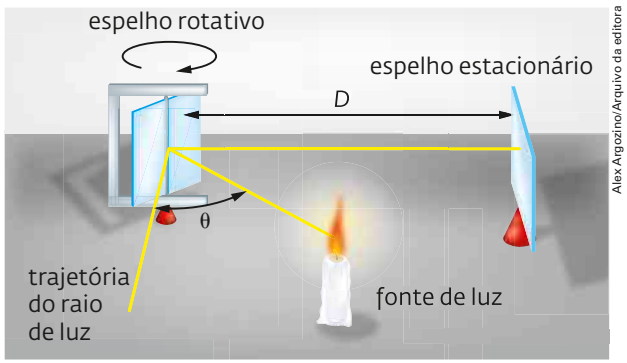


Figura 5.53. Representação esquemática (sem escala e em cores fantasia) do dispositivo utilizado por Foucault para medir a velocidade da luz.

Após os trabalhos de Foucault, vários cientistas, em diversos países, usando outras técnicas de medida, dedicaram-se à tarefa de determinar a velocidade da luz, procurando obter valores cada vez mais precisos. Entre eles devemos destacar o cientista americano A. Michelson, que, durante cerca de 50 anos, realizou as mais cuidadosas experiências com esse objetivo. O resultado das últimas medidas realizadas por Michelson, $c = 2{,}9977 \cdot 10^8$ m/s, publicado postumamente em 1932, mostra a grande precisão alcançada por ele em suas experiências.

Graças à continuidade desses trabalhos, a velocidade da luz é um dos valores que se conhece com maior precisão no campo da Física. Analisando cuidadosamente os trabalhos dos inúmeros cientistas que se dedicaram à medida dessa grandeza, os físicos chegaram à conclusão de que, atualmente, o melhor valor para representar a velocidade da luz é:

$$c = 2{,}997925 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Esses números são fornecidos a título de ilustração; não devemos nos preocupar em memorizá-los. Entretanto, para a maioria das situações em que o valor da velocidade da luz deve ser usado, é suficiente considerar $c = 3{,}00 \cdot 10^8$ m/s.

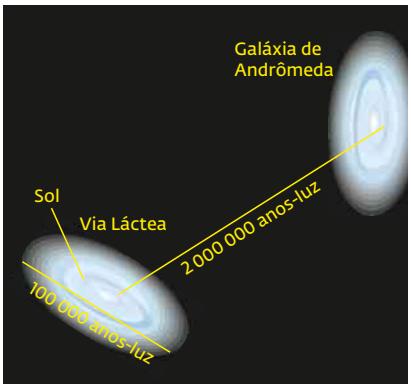
É importante ter em mente que todas as tentativas de medir a velocidade da luz desempenharam importante papel no entendimento dos conceitos de física da época, pois além dos resultados obtidos confirmarem a teoria ondulatória da luz (contrária à teoria proposta por Newton e vigente naquele momento), os resultados viriam a contribuir para o trabalho de Albert Einstein, afinal a velocidade da luz é essencial para o desenvolvimento da teoria da relatividade, que estudaremos mais adiante. E, sem a teoria da relatividade, o sistema de posicionamento global mais utilizado no mundo, conhecido como GPS (*Global Positioning System*), por exemplo, não indicaria com precisão a localização do usuário.

As enormes dimensões do Universo

A velocidade da luz é usada na definição de uma unidade de comprimento, denominada ano-luz, muito empregada na medida de distâncias astronômicas. O valor de 1 ano-luz é definido como sendo a distância que a luz percorre, no vácuo, em 1 ano (essa distância vale cerca de 10^{13} km).

Para que você tenha uma ideia das enormes dimensões do Universo conhecido pelo ser humano, vejamos alguns exemplos de distâncias entre corpos celestes:

- Para percorrer a distância da Lua até a Terra, a luz gasta praticamente 1 s; assim, podemos dizer que essa distância é cerca de 1 segundo-luz.
- Para vir do Sol à Terra, a luz gasta cerca de 8 minutos; podemos, então, dizer que a distância Terra-Sol é de 8 minutos-luz. Isso significa que, quando ocorre uma explosão na superfície do Sol, somente após 8 minutos os astrônomos podem observá-la aqui, na Terra.
- A estrela visível a olho nu **mais próxima** da Terra é a estrela Próxima do Centauro, assim chamada por estar localizada na constelação do Centauro. Sua distância até a Terra é de 4,2 anos-luz. Sendo assim, quando olhamos para essa estrela, nós a estamos vendo como ela era há 4,2 anos.
- Os astrônomos verificaram que as estrelas encontram-se agrupadas em enormes aglomerações, denominadas **galáxias**. Cada uma dessas galáxias é constituída por muitos bilhões de estrelas. O Sistema Solar, por exemplo, pertence à galáxia denominada **Via Láctea**, cujo diâmetro vale cerca de 100 mil anos-luz **(figura 5.54)**.
- O número de galáxias já observadas pelos cientistas é muito grande (avalia-se que existem mais galáxias no Universo que habitantes na Terra). A galáxia mais próxima da Via Láctea é a galáxia de Andrômeda **(figura 5.55)**, que fica a uma distância de, aproximadamente, 2 milhões de anos-luz. Portanto, se subitamente todas as estrelas dessa galáxia se extinguissem, somente após 2 milhões de anos esse fato seria percebido aqui da Terra.
- Usando aparelhagem e métodos atualizados, os astrônomos têm conseguido localizar novas galáxias, muito mais afastadas do que Andrômeda. Existem galáxias, como as mostradas nas **figuras 5.56** e **5.57**, que se encontram a uma distância de dezenas (ou centenas) de milhões de anos-luz. Galáxias afastadas de nós cerca de 13 bilhões de anos-luz já foram fotografadas pelo telescópio espacial Hubble, que está cerca de 600 km de distância da Terra, mostrando que o Universo tem dimensões extraordinariamente grandes.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 5.54. A galáxia mais próxima de nós está situada a uma distância de 2 milhões de anos-luz, isto é, a luz emitida por ela gasta 2 milhões de anos para chegar à Terra. Representação sem escala e em cores fantasia.


Robert Gendler/SPL/Latinstock

Figura 5.55. Galáxia de Andrômeda, a galáxia mais próxima da Terra.


Robert Gendler/SPL/Latinstock

Figura 5.56. A chamada Galáxia do Cata-vento situa-se a 22 milhões de anos-luz da Terra.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

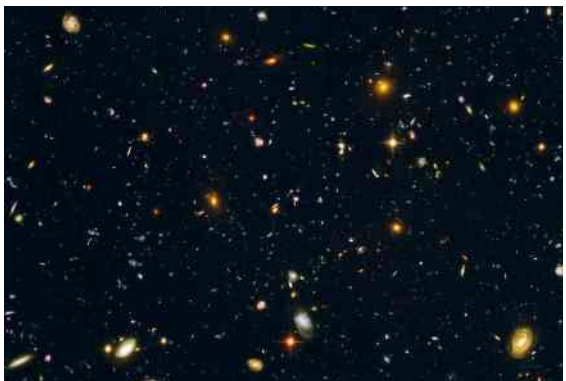

S. Beckwith & the HUDF Working Group/STScI/HST/ESA/Nasa

Figura 5.57. Imagem de campo profundo feita pelo telescópio espacial Hubble mostrando galáxias a cerca de 13 bilhões de anos-luz, formadas quando o Universo tinha apenas 5% da sua idade atual.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

30. Calcule a diferença percentual entre o valor obtido por Fizeau para a velocidade da luz e o valor $c = 3{,}00 \cdot 10^8$ m/s, obtido em medidas mais precisas, realizadas posteriormente. 4,3%

31. As experiências de Michelson, além de fornecer um valor muito preciso para c, estão relacionadas com um fato importante para o desenvolvimento da Física. Qual é esse fato? (Veja o quadro sobre Michelson no tópico 5.7.)

32. A galáxia de Andrômeda se encontra a 2 milhões de anos-luz da Terra. Todas as alternativas apresentam conclusões corretas a partir dessa informação, **exceto**: a

a) A idade da galáxia Andrômeda é de 2 milhões de anos.
b) A luz gasta 2 milhões de anos para percorrer a distância entre Andrômeda e a Terra.
c) Um foguete que partisse da Terra gastaria mais de 2 milhões de anos para chegar a Andrômeda.
d) Uma explosão que ocorra hoje, em Andrômeda, só será percebida na Terra daqui a 2 milhões de anos.
e) Uma fotografia de Andrômeda, hoje, forneceria informações sobre como era a galáxia há 2 milhões de anos.

33. Os quasares, objetos astronômicos semelhantes às estrelas, são os corpos celestes mais distantes já observados. A ordem de grandeza da distância da Terra a um quasar é 10^{26} m.

a) Qual é, em anos-luz, a ordem de grandeza dessa distância? (A ordem de grandeza de 1 ano-luz, em km, foi fornecida no texto.)
b) Escreva no caderno, na língua materna, a ordem de grandeza do tempo que a luz de um quasar gasta para chegar à Terra.

34. A luz possui velocidade elevada, possibilitando que as imagens observadas diariamente ao nosso redor cheguem quase instantaneamente aos nossos olhos. Mas, ao observarmos corpos celestes no espaço sideral, as imagens nos mostram o que aconteceu há muito tempo. Por exemplo, ao observar o Sol, a imagem é de oito minutos atrás, e a imagem de Alfa-Centauro é de 4,2 anos atrás. Apesar de parecer estranha, tal situação é comum. Procure identificar outras situações do cotidiano em que uma informação demora a ir de um ponto a outro por causa da velocidade com que viaja. Discuta com seus colegas e professor como os meios de comunicação se tornaram mais eficientes fazendo uso da velocidade da luz. Veja a resposta no Manual do Professor.

Não escreva no livro!

31. O estabelecimento da teoria da relatividade de Einstein.
33. a) 10^{10} anos-luz.
b) 10 bilhões de anos.

PRATIQUE FÍSICA

EM EQUIPE

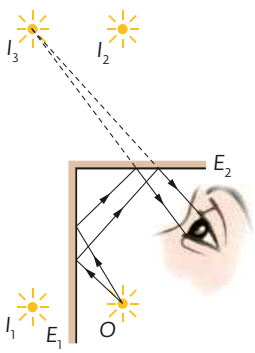
1. Siga as instruções abaixo e avalie a formação de imagens em superfícies planas e polidas.

1º) Tome um lápis ou uma caneta e desloque lentamente sua ponta em direção a uma superfície metálica plana e bem polida (fechadura, objetos de inox, etc.), observando a imagem da ponta fornecida pela superfície. Quando a ponta encostar na superfície, observe qual é a distância entre ela e sua imagem.

2º) Repita o procedimento anterior, deslocando agora a ponta em direção a um espelho plano de vidro (espelho comum). Observe a distância entre a ponta e sua imagem quando ela estiver encostada na superfície do vidro do espelho.

Baseando-se naquilo que você observou, responda:

a) Qual a causa da diferença entre as observações feitas nos dois espelhos?
b) Onde está localizada a superfície refletora em um espelho de vidro comum?
c) Se o vidro de um espelho tiver espessura de 2 mm, qual será a distância entre a imagem e a ponta quando essa estiver encostada no espelho?



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Representação do experimento 2.

2. Suponha que dois espelhos planos, E_1 e E_2, sejam colocados em ângulo reto e que um objeto O esteja situado entre eles, como mostra a figura desta experiência. Os raios luminosos, que partem do objeto, ao se refletirem em E_1, darão origem à imagem I_1 e, ao se refletirem em E_2, darão origem à imagem I_2. Entretanto, parte dos raios luminosos emitidos pelo objeto sofre duas reflexões, pois, após se refletirem em um dos espelhos, eles encontram o outro, sendo novamente refletidos. Para um observador que receba esses raios após a segunda reflexão, tudo se passa como se eles estivessem vindo do ponto I_3, isto é, o observador verá, em I_3, uma terceira imagem do objeto O (veja a figura à esquerda).

1º) Disponha dois espelhos planos em ângulo reto. Coloque entre eles um objeto qualquer (um lápis, por exemplo) e procure observar as três imagens fornecidas pelos dois espelhos.

2º) Reduza o valor do ângulo entre os espelhos e verifique que o número de imagens do objeto se torna cada vez maior. Quando os espelhos estiverem paralelos (o ângulo entre eles é nulo), observe as ima-

gens formadas. Você será capaz de contá-las?

3º) As múltiplas imagens fornecidas por espelhos planos que formam entre si um ângulo menor do que 90° são utilizadas na construção de caleidoscópios. Procure saber como é construído um caleidoscópio e verifique que sua montagem é muito simples. Construa um para observar as belas e interessantes figuras que neles se formam.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

3. Para determinarmos experimentalmente algumas características da imagem fornecida por um espelho plano, vamos fazer a experiência mostrada na figura abaixo.

Uma vela acesa é colocada em frente a uma placa de vidro semitransparente (ou semiescurecida), que funciona como um espelho plano, dando origem a uma imagem dessa vela.

Peça a um colega que desloque outra vela, apagada, igual à primeira, na região atrás da placa. Você verá, então, a imagem da vela acesa e também a vela apagada nas mãos de seu colega. Orientando-o, faça com que ele consiga colocar a vela apagada coincidindo com a imagem da vela acesa (nessa posição, você terá a impressão de que a vela apagada está acesa).

Realizando essa experiência, você poderá chegar a quais conclusões?

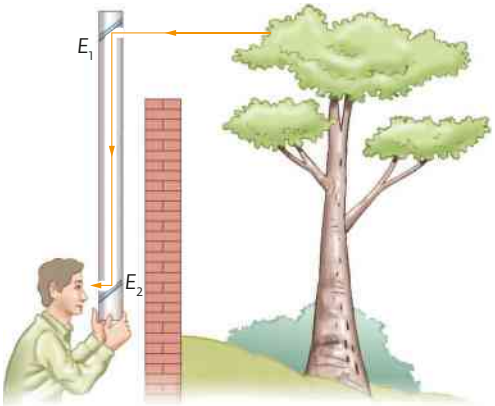


Eduardo Santaliestra/Estúdio Paulista

A imagem virtual, fornecida por um espelho plano, é do mesmo tamanho que o objeto e simétrica a ele em relação ao espelho.

4. A formação da imagem por reflexão em dois espelhos é utilizada na construção dos periscópios, amplamente empregados nos submarinos, quando submersos, para observar objetos na superfície da água.

Na figura mostramos o esquema de um periscópio simples, que poderá ser construído por você: basta fixar dois espelhos planos, E_1 e E_2, no interior de um tubo cilíndrico (de papelão, por exemplo), no qual são feitas duas aberturas, como mostra a figura. Com o aparelho que você construiu, tente observar alguns objetos não acessíveis diretamente à sua vista.



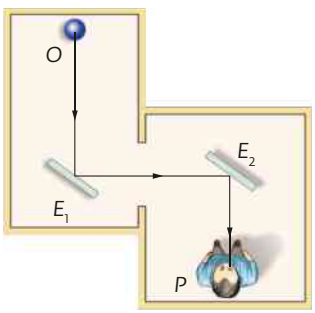
Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

5. Escreva, em uma folha de papel, a palavra AMBULÂNCIA e, colocando-a diante de um espelho plano vertical, observe como se apresenta no espelho a imagem da palavra (identifique as letras cujas imagens são iguais à própria letra).

Coloque, agora, diante do espelho, o diagrama mostrado na figura e leia a palavra formada por sua imagem. Você consegue, então, explicar por que esse diagrama é comumente visto na parte dianteira das ambulâncias?

AMBULÂNCIA

6. Suponha que uma pessoa, *P*, situada em uma sala, deseje ver um objeto, *O*, localizado em outra sala, em uma posição tal que não possa ser visto diretamente pela pessoa (veja a figura a seguir). Ela conseguirá seu intento usando dois espelhos planos, E_1 e E_2, dispostos da maneira mostrada na figura.



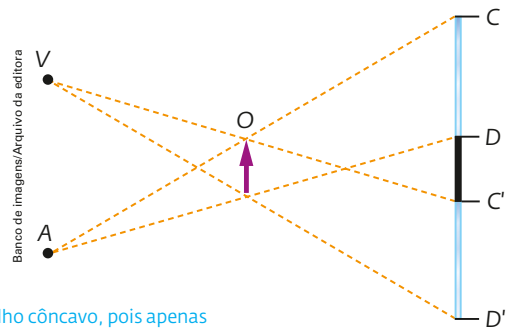
Responda no caderno:

a) A imagem obtida em E_2 é real ou virtual? Virtual.

b) Ela apresenta inversão da direita com a esquerda, como acontece em um espelho plano qualquer? Não.

1. Um objeto opaco *O* está colocado diante de duas pequenas lâmpadas, como mostra a figura abaixo. A lâmpada *V* é vermelha e a lâmpada *A* é azul. Sobre um anteparo situado atrás do objeto, formam-se duas regiões sombreadas coloridas, *CD* e *C'D'*, uma delas azul e a outra vermelha. Qual das sombras é vermelha? Qual é azul?

CD é vermelha e *C'D'* é azul.



Banco de imagens/Arquivo da editora

2. Espelho côncavo, pois apenas ele pode fornecer imagem virtual maior do que o objeto.

2. É desejável que, ao se barbear, uma pessoa possa perceber maiores detalhes em seu rosto. Para isso, ela deveria usar um espelho côncavo, convexo ou plano? Explique.

3. **(Unifesp)** Dentro de uma casa uma pessoa observa, por meio de um espelho plano *E*, uma placa com a inscrição VENDO colocada fora da casa, ao lado de uma janela aberta. A janela e o espelho têm as dimensões horizontais mínimas para que o observador consiga ver a placa em toda sua extensão lateral. A figura 1 representa o espelho e a janela vistos de dentro da casa. A figura 2 representa uma visão de cima da placa, do espelho plano *E*, do observador *O* e de dois raios de luz emitidos pela placa que atingem, depois de refletidos em *E*, os olhos do observador.

Figura 1

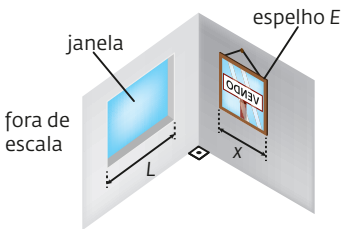
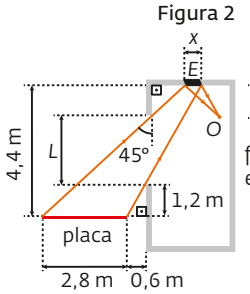


Figura 2



Alex Argozino/Arquivo da editora

Considerando as medidas indicadas na figura 2, calcule, em metros:

a) a largura (*L*) da janela. *L* = 2,2 m

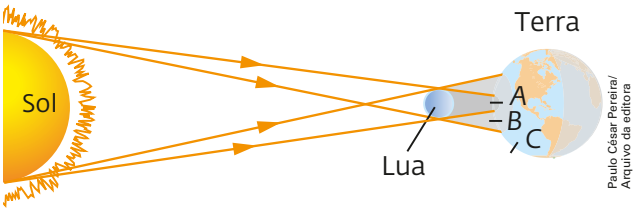
b) a largura mínima (*x*) do espelho *E* para que o observador possa ver por inteiro a imagem da placa conjugada por ele. *x* = 0,6 m

4. Quando a Lua se coloca entre o Sol e a Terra, ela intercepta parte da luz solar, projetando sobre a Terra um cone de sombra (veja a figura deste problema). Nessas condições, em certa região da Terra haverá eclipse total do Sol, isto é, para um observador nessa região o Sol ficará totalmente encoberto pela Lua. Em outras regiões haverá eclipse parcial do Sol (o observador verá a Lua encobrindo parte do Sol) e nas demais regiões da Terra não se observará nenhum tipo de eclipse do Sol. Considerando os observadores *A*, *B* e *C* na figura abaixo, responda:

a) Qual deles observará um eclipse total do Sol? *A*

b) Para qual deles o Sol será parcialmente eclipsado? *B*

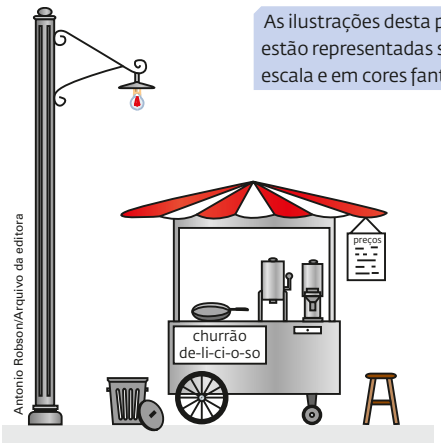
c) Qual deles poderá enxergar totalmente o disco solar? *C*



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

5. **(FGV-SP)** O vendedor de churros havia escolhido um local muito próximo a um poste de iluminação. Pendurado no interior do carrinho, um lampião aceso melhorava as condições de iluminação.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Admitindo que o centro de todos os elementos da figura, exceto as finas colunas que suportam o telhado do carrinho, estão no mesmo plano vertical, considerando apenas as luzes emitidas diretamente do poste e do lampião, e tratando-os como os extremos de uma única fonte extensa de luz, a base do poste, a lixeira e o banquinho, nessa ordem, estariam inseridos em regiões classificáveis como: a

a) luz, sombra e sombra.

b) luz, penumbra e sombra.

c) luz, penumbra e penumbra.

d) penumbra, sombra e sombra.

e) penumbra, penumbra e penumbra.

6. **(UPE)** Em relação aos espelhos esféricos, analise as proposições que se seguem:

(1) A reta definida pelo centro de curvatura e pelo vértice do espelho é denominada de eixo secundário.

(3) O ponto de encontro dos raios refletidos ou de seus prolongamentos, devido aos raios incidentes paralelos ao eixo principal, é denominado de foco principal.

(5) O espelho côncavo tem foco virtual, e o espelho convexo, foco real.

(7) Todo raio de luz que incide passando pelo foco, ao atingir o espelho, é refletido paralelo ao eixo principal.

(9) Quando o objeto é posicionado entre o centro de curvatura e o foco do espelho côncavo, conclui-se que a imagem é real, invertida e maior do que o objeto.

A soma dos números entre parênteses que correspondem aos itens corretos é igual a

a) 25

b) 18

c) 19 c

d) 10

e) 9

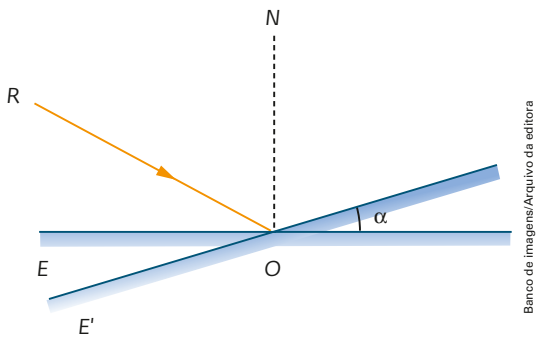
7. A imagem fornecida por um espelho convexo é sempre virtual e menor do que o objeto.

7. Considere um espelho convexo cujo valor da distância focal é de 5 cm. Um objeto é colocado diante desse espelho, sucessivamente, às seguintes distâncias dele: $D_O = 12$ cm, $D_O = 5$ cm e $D_O = 2$ cm.

a) Trace diagramas para localizar a imagem do objeto em cada uma das posições citadas.

b) Tendo em vista os diagramas traçados, qual a conclusão que você pode tirar sobre a natureza e o tamanho da imagem fornecida por um espelho convexo?

8. Um raio luminoso *RO* incide sobre um espelho plano colocado na posição *EO* mostrada na figura abaixo.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Sendo *ON* a normal a esse espelho:

a) Trace, cuidadosamente, em uma cópia da figura em seu caderno, o raio refletido *OR'* (use um transferidor para medir os ângulos).

b) O espelho foi girado de um ângulo $\alpha = 15°$, passando para a nova posição *E'O* (veja a figura). Desenhe a normal *ON'* nessa posição do espelho.

c) Considerando o mesmo raio incidente, trace o raio refletido, *OR"*, para a posição *E'O* do espelho.

d) Meça com o transferidor o ângulo β, formado pelo raio refletido ao passar da posição *OR'* para *OR"*. $\beta = 30°$

e) Pode-se demonstrar que $\beta = 2\alpha$, isto é, quando o espelho plano gira de um certo ângulo, o raio refletido gira de um ângulo duas vezes maior. Suas medidas estão de acordo com esse resultado? Sim. ($30° = 2 \cdot 15°$)

9. Vimos que o aumento da imagem produzido por um espelho é dado pela relação: aumento $= D_i / D_O$.

a) Usando-a, determine o aumento fornecido por um espelho plano. Aumento = 1.

b) O que significa o resultado encontrado na questão **a**?
A imagem e o objeto têm o mesmo tamanho.

c) Esse resultado está de acordo com o que você aprendeu ao estudar o espelho plano? Sim.

10. **(CPS-SP)** Um menino de 1,5 m de altura produz uma sombra de 50 cm. No mesmo instante, um prédio próximo ao menino produz uma sombra de 20 m. A altura do prédio, em metros, é: d

a) 20.

b) 30.

c) 50.

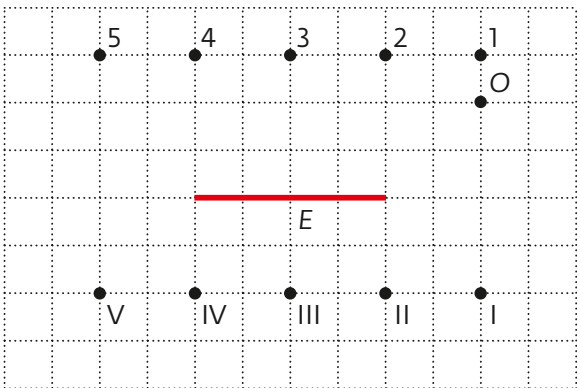
d) 60.

e) 80.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Texto para as questões 11 e 12

Na figura abaixo, *E* representa um espelho plano que corta perpendicularmente a página, e *O* representa um pequeno objeto colocado no plano da página.



Banco de imagens/Arquivo da editora

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.

11. **(UFRGS-RS)** Qual é o ponto que melhor representa a posição da imagem do objeto *O* formada pelo espelho plano *E*? a

a) I.

b) II.

c) III.

d) IV.

e) V.

12. **(UFRGS-RS)** Quais observadores podem ver a imagem do objeto *O* formada pelo espelho plano *E*? d

a) Apenas 1.

b) Apenas 4.

c) Apenas 1 e 2.

d) Apenas 4 e 5.

e) Apenas 2, 3 e 4.



Reprodução/Wikimedia Commons

Galileu com seu telescópio mostrou que a superfície da Lua era irregular, semelhante à da Terra, o que contrariava o modelo aristotélico, segundo o qual todos os corpos celestes eram esferas perfeitas. Obra de Henry-Julien Detouche, cerca de 1900.

CAPÍTULO 6

Refração da luz

Veja a resposta no Manual do Professor.

A lente convergente concentra os raios vindos dos astros, e a lente divergente espalha os raios para enviar a luz aos olhos do observador, ampliando a imagem.

A lente convergente.

Galileu Galilei (1564-1642), matemático e astrônomo italiano, é frequentemente lembrado por ter apontado uma luneta para o céu e contribuído para a defesa do sistema heliostático de Nicolau Copérnico (1473-1543) e a formulação de uma nova Física.

Em 1610, Galileu observou sistematicamente o céu e publicou suas conclusões na obra denominada *Sidereus Nuncius* (O mensageiro das estrelas). Ao observar a Lua, viu nela crateras e montanhas, concluindo que o relevo do nosso satélite lembrava o do planeta Terra. Viu também que Júpiter possuía luas (conseguindo identificar as quatro maiores) e que elas giravam ao redor daquele planeta. Entre suas realizações há ainda a constatação de manchas no Sol, das fases de Vênus, dos anéis de Saturno (que ele acreditou serem duas luas) e de que a Via Láctea era constituída por inúmeras estrelas.

Tudo isso utilizando apenas um simples instrumento formado por duas lentes de vidro e um tubo. Nas lentes, uma convergente e outra divergente, ocorre o fenômeno de refração, cujas leis só seriam descobertas dez anos mais tarde.

PARA INICIAR A CONVERSA

Por que o telescópio desenvolvido por Galileu revolucionou a Ciência?

Qual é a função das lentes convergente e divergente na luneta?

No desenvolvimento desse instrumento, Newton sugeriu a substituição, para a mesma função, de uma das lentes por um espelho côncavo. Qual das lentes foi substituída no telescópio newtoniano?

6.1 Refração da luz

O que é refração

No capítulo anterior, estudamos a reflexão de um feixe de luz que, propagando-se no ar, atinge a superfície de um bloco de vidro. Agora vamos analisar o que acontece quando parte desse feixe de luz é refletida e parte penetra no bloco e passa a se propagar no vidro. Alguns fenômenos, como o da figura 6.1, ocorrem quando a luz passa de um meio material para outro.

Verifica-se experimentalmente que esse feixe se propaga em uma direção diferente daquela do feixe incidente, isto é, a direção de propagação da luz é alterada quando ela passa do ar para o vidro, como mostra a figura 6.2. Quando isso acontece, dizemos que a luz sofreu uma **refração**, ou seja, a luz se **refrata** ao passar do ar para o vidro[1].

De modo geral, a refração ocorre quando a luz passa de um meio para outro, nos quais ela se propaga com velocidades diferentes. Assim, por exemplo, a luz se refrata ao passar da água para o vidro porque sua velocidade de propagação na água é diferente de sua velocidade de propagação no vidro.

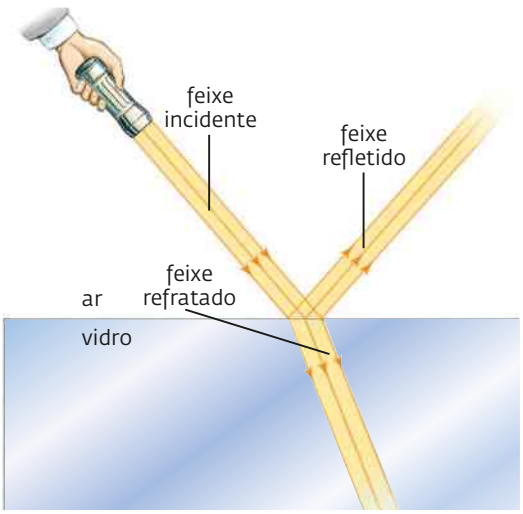
Resumindo:

O fenômeno da refração consiste na mudança da direção do feixe de luz em virtude da mudança da sua velocidade de propagação ao passar de um meio para outro.



Durk Gardenier/Alamy/Latinstock

Figura 6.1. Na imagem, o pato está parcialmente submerso aparentando estar dividido em duas partes. Na realidade, isto acontece porque os raios de luz mudam de direção quando passam da água para o ar, provocando a ilusão de ótica.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 6.2. Quando um feixe de luz, propagando-se no ar, incide em um bloco de vidro, parte dele é refletida e parte se refrata ao penetrar no vidro. Representação sem escala e em cores fantasia.

[1] Do latim *refractus*, que significa 'girado para o lado' ou 'quebrado'.

As leis da refração

Quando um raio luminoso atinge a superfície de separação entre dois meios materiais diferentes, parte da energia luminosa é refletida, enquanto parte penetra no segundo meio, conforme representado na figura 6.3. A normal é a reta perpendicular à superfície de separação no ponto de incidência. O ângulo θ_1, formado pelo raio incidente e a normal, é denominado **ângulo de incidência**, e o plano definido entre eles é chamado **plano de incidência**.

Os ângulos θ_1 e θ_2 não são iguais entre si. O ângulo de refração, θ_2, será menor que o ângulo de incidência, θ_1, se a velocidade da luz no meio 2 for menor do que no meio 1; nessa situação observa-se que o raio refratado se aproxima da reta normal.

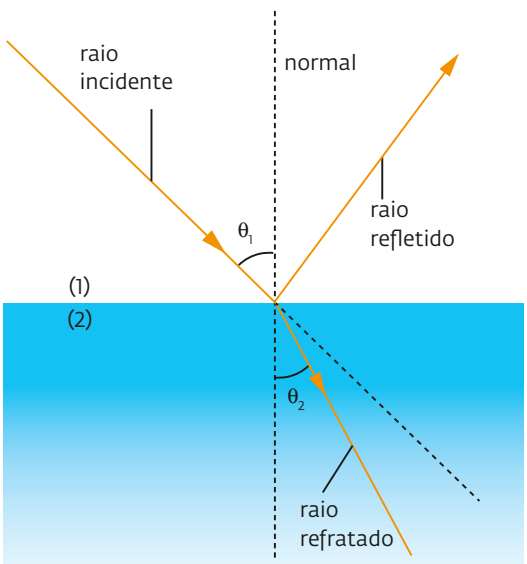


Figura 6.3. Raio incidente, que se propaga no meio 1, atingindo a interface plana entre os meios 1 e 2.



SPL/Latinstock

WILLEBRÖD SNELL (1591-1626)

Matemático e astrônomo holandês que, além de descobrir a lei da refração, desenvolveu um método para medir o raio da Terra. A lei de Snell da refração, apesar de ter sido descoberta em 1620, só veio a ser amplamente divulgada pela obra *Dioptrica*, publicada em 1703 pelo físico, também holandês, C. Huyghens.

Durante muitos séculos, tentou-se descobrir uma relação entre esses ângulos. Finalmente, em 1620, o matemático holandês Snell, analisando um grande número de medidas de ângulos de incidência e de refração, chegou à conclusão de que havia uma relação constante entre os senos desses ângulos. Em outras palavras, Snell verificou que, quando a luz se refrata ao passar de um meio (1) para um meio (2), tem-se:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \text{constante}$$

Essa constante é característica dos dois meios e, portanto, para cada par de meios ela tem um valor diferente. Usando conhecimentos do movimento ondulatório, podemos mostrar que o valor dessa constante é igual à razão, v_1/v_2, entre as velocidades da luz nos dois meios.

O ângulo refratado θ_2 depende da relação entre as velocidades de propagação nos meios 1 e 2 e do ângulo de incidência.

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Índice de refração

Consideremos um caso particular no qual um raio luminoso, propagando-se no vácuo, sofre refração ao penetrar em um meio material qualquer (figura 6.4). Para esse caso, teremos:

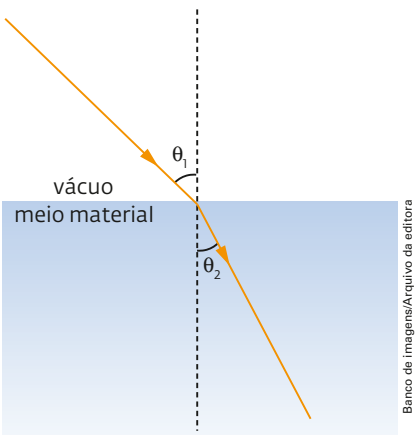
$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{c}{v}$$

em que c é a velocidade da luz no vácuo ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s) e v é a velocidade no meio material no qual ela penetra. O quociente $\frac{c}{v}$ denomina-se **índice de refração** do meio, isto é:

O índice de refração, *n*, de um meio é o quociente entre a velocidade da luz no vácuo, *c*, e a velocidade da luz, *v*, nesse meio, ou seja:

$$n = \frac{\text{velocidade da luz no vácuo}}{\text{velocidade da luz no meio}} \text{ ou } n = \frac{c}{v}$$

Todo meio transparente é caracterizado por um índice de refração. O valor de n é maior do que 1 para qualquer meio material, uma vez que a velocidade da luz no vácuo ($3{,}0 \cdot 10^8$ m/s) é maior do que em qualquer meio. Para o ar, podemos considerar $n = 1{,}0$, pois a velocidade da luz no ar é aproximadamente igual a $3{,}0 \cdot 10^8$ m/s.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 6.4. O índice de refração de um meio é o quociente entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no meio, isto é, $n = \frac{c}{v}$.

Tabela 6.1

ÍNDICES DE REFRAÇÃO	
Substância	***n***
Gelo	1,31
Sal de cozinha	1,54
Quartzo	1,54
Zircônio	1,92
Diamante	2,42
Rutilo	2,80
Vidro	1,50
Álcool etílico	1,36
Água	1,33
Glicerina	1,47
Bissulfeto de carbono	1,63

A tabela 6.1 apresenta os valores do índice de refração para diversos meios.

Retomando a expressão

$$\frac{\operatorname{sen}\theta_1}{\operatorname{sen}\theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

vamos escrevê-la da seguinte maneira:

$$\frac{1}{v_1}\operatorname{sen}\theta_1 = \frac{1}{v_2}\operatorname{sen}\theta_2$$

Multiplicando ambos os membros dessa igualdade por c, temos:

$$\frac{c}{v_1}\operatorname{sen}\theta_1 = \frac{c}{v_2}\operatorname{sen}\theta_2$$

Mas $\frac{c}{v_1}$ é n_1 (índice de refração do meio 1) e $\frac{c}{v_2}$ é n_2 (índice de refração do meio 2). Então:

$$n_1 \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \operatorname{sen}\theta_2$$

em que θ_1 é o ângulo de incidência e θ_2 é o ângulo de refração.

Essa equação é uma das formas mais comuns de se apresentar a lei de Snell e descreve matematicamente, de maneira geral, o fenômeno da refração. Devemos, então, destacar que:

Quando a luz passa de um meio, cujo índice de refração é n_1, para outro meio, cujo índice de refração é n_2, tem-se sempre:

$$n_1 \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \operatorname{sen}\theta_2$$

em que θ_1 é o ângulo de incidência e θ_2 é o ângulo de refração.

Comentário

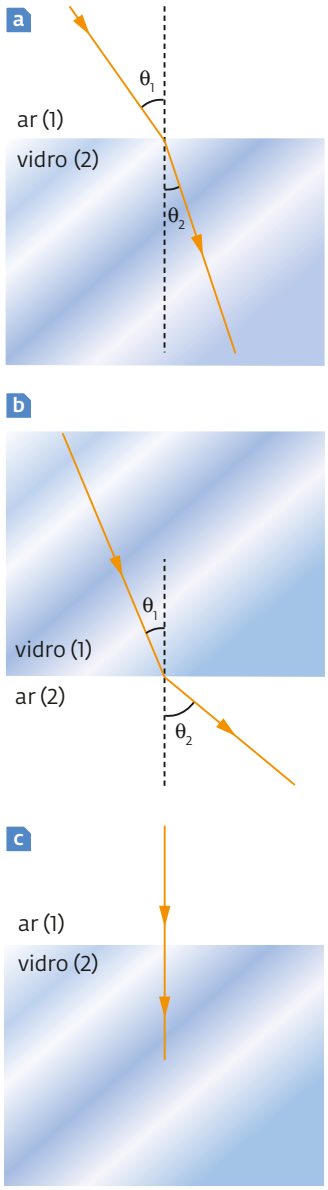
Consideremos um raio luminoso passando de um meio (1) para um meio (2) tal que o índice de refração do meio (1) seja menor do que o do meio (2), isto é, $n_1 < n_2$. Esses meios poderiam ser, por exemplo, o ar ($n_1 = 1{,}0$) e o vidro ($n_2 = 1{,}5$), como na figura 6.5.a. Então, como $n_1 < n_2$, e devemos ter $n_1 \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \operatorname{sen}\theta_2$, concluímos que:

$$\operatorname{sen}\theta_1 > \operatorname{sen}\theta_2 \quad \therefore \quad \theta_1 > \theta_2$$

Portanto, quando um raio luminoso se refrata, passando de um meio para outro, de maior índice de refração, o ângulo de refração é menor do que o de incidência; em outras palavras, o raio refrata-se aproximando-se da normal, como mostra a figura 6.5.a.

Um raciocínio análogo nos mostra que, ao passar de um meio para outro cujo índice de refração é menor, o raio luminoso se refrata, afastando-se da normal, como na figura 6.5.b.

Observe, entretanto, que, quaisquer que sejam os valores de n_1 e n_2, se um raio luminoso incidir com um ângulo $\theta_1 = 0°$, teremos, pela lei de Snell ($n_1 \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \operatorname{sen}\theta_2$), também $\theta_2 = 0°$. Ou seja, nesse caso o raio luminoso não sofre nenhum desvio ao passar de um meio para o outro (figura 6.5.c).



Ilustrações: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 6.5. Em **a**, dizemos que o raio refratado se aproximou da normal e, em **b**, que ele se afastou da normal. Em **c**, o raio luminoso não se desvia porque o ângulo de incidência é nulo.

Exemplo

Um estudante, sabendo que é possível medir a velocidade de propagação da luz em um meio a partir do desvio sofrido pelo feixe de luz incidente, decidiu tentar medir essa velocidade dentro de um bloco de vidro. Para isso, ele fez incidir um feixe de luz fino, com um ângulo de 30°, encontrando o ângulo de refração igual a 19° dentro do bloco de vidro, como mostra a figura 6.6.

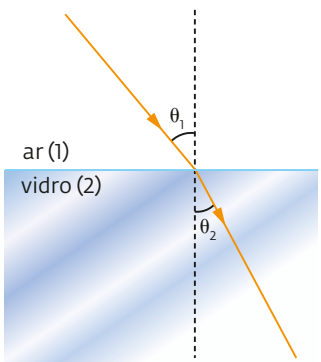


Figura 6.6. Para o exemplo da seção 6.1.

a) Qual é o valor do índice de refração do vidro usado na experiência?

Vimos que, na refração, $n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$. Como, em nosso caso, a luz está passando do ar para o vidro, n_1 será o índice de refração do ar, isto é, $n_1 = 1{,}0$, e n_2 será o índice de refração do vidro, que designaremos por n_v. Então:

$$1{,}0 \cdot \operatorname{sen} 30^\circ = n_v \cdot \operatorname{sen} 19^\circ$$

$$n_v = \frac{\operatorname{sen} 30^\circ}{\operatorname{sen} 19^\circ}$$

Consultando uma tabela de funções trigonométricas e efetuando os cálculos, encontramos $n_v = 1{,}5$.

b) Qual é o valor da velocidade de propagação da luz nesse vidro?

Pela definição de índice de refração, podemos escrever:

$$n_v = \frac{\text{velocidade da luz no vácuo}}{\text{velocidade da luz no vidro}} \quad \text{ou} \quad n_v = \frac{c}{v_v}$$

Logo:

$$v_v = \frac{c}{n_v} = \frac{3{,}0 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1{,}5}$$

$$v_v = 2{,}0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

1. a) $n = 2{,}0$
b) $1{,}24 \cdot 10^8$ m/s

Não escreva no livro!

1. Resolva em seu caderno.
a) Sabe-se que a luz se propaga em um certo cristal com velocidade $v = 1{,}5 \cdot 10^8$ m/s. Qual é o valor do índice de refração desse cristal?
b) Consultando a **tabela 6.1**, calcule a velocidade de propagação da luz no diamante.

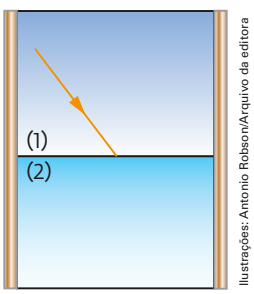
2. Observe os valores dos índices de refração da **tabela 6.1**. Em qual dos meios ali relacionados a luz se propaga:
a) com maior velocidade? Gelo.
b) com menor velocidade? Rutilo.

3. Um raio luminoso, propagando-se no ar, refrata-se ao passar desse meio para a glicerina. O ângulo de incidência do raio luminoso é de 30°.
a) Considere a lei de Snell e diga, para a situação descrita, quanto valem n_1, θ_1 e n_2. (Consulte a **tabela 6.1.**) $n_1 = 1{,}0$; $\theta_1 = 30^\circ$ e $n_2 = 1{,}47$
b) Determine o valor do ângulo de refração θ_2. (Consulte a tabela de funções trigonométricas no final deste volume.) $\theta_2 = 20^\circ$
c) Usando um transferidor, faça um desenho no caderno mostrando corretamente as direções do raio incidente e do raio refratado. Veja a resposta no Manual do Professor.

4. A figura a seguir mostra um raio luminoso incidindo na superfície de separação de dois meios (1) e (2). Mostre, em uma cópia da figura no caderno, a direção aproximada do raio refratado, supondo que:

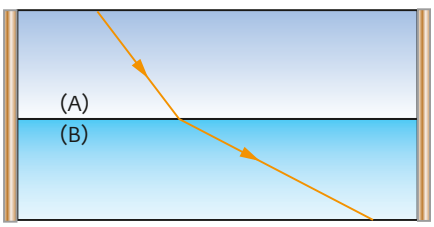
a) $n_2 > n_1$. b) $n_2 < n_1$.

Veja as respostas no Manual do Professor.



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

5. Um raio luminoso, ao passar de um meio *A* para um meio *B*, refrata-se da maneira mostrada na figura abaixo.



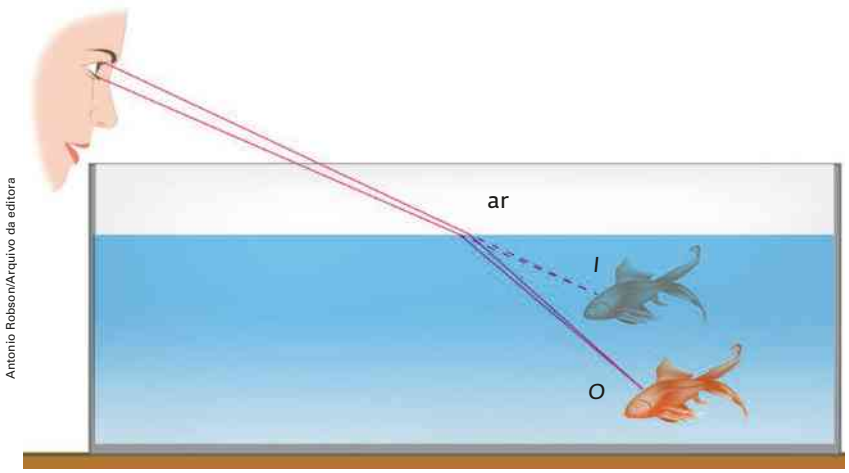
a) O raio, ao se refratar, aproxima-se ou afasta-se da normal? Afasta-se.
b) Então, o ângulo de incidência, θ_1, é maior ou menor do que o ângulo de refração θ_2? Menor.
c) Qual dos dois meios tem maior índice de refração? *A*
d) Em qual dos dois meios a luz se propaga mais rapidamente? *B*

6.2 Formação de imagem por refração

A refração da luz é responsável por muitos fenômenos que podem ser observados em nossa vivência diária. Vamos descrever alguns deles e procurar analisá-los tomando como base as leis da refração que estudamos na seção anterior.

Formação de imagem por refração

A figura 6.7 mostra um pequeno peixe *O*, colocado a certa profundidade, dentro da água. Os raios luminosos que são emitidos pelo peixe, ao passarem da água para o ar, sofrem refração, afastando-se da normal. Esses raios refratados constituem um feixe divergente e atingem o olho de um observador como se tivessem sido emitidos do ponto *I*. Por isso, o observador **não** verá o peixe. Na realidade, o que ele enxerga **é uma imagem do peixe**, na posição *I*, situada acima da posição ocupada pelo peixe. Essa imagem **é virtual**, porque está localizada no ponto de encontro dos **prolongamentos** dos raios refratados.



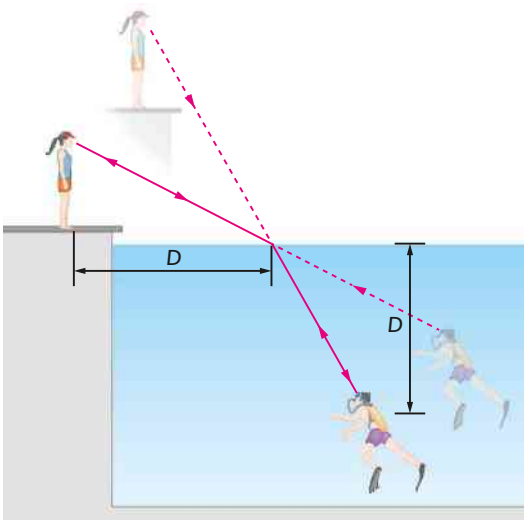
Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 6.7. Imagem virtual de um peixe situado dentro da água.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Fenômenos da refração

Quando estamos na beira de uma piscina de águas tranquilas, observando um mergulhador dentro da água, ele nos parece estar em uma posição mais rasa do que na realidade está (figura 6.8). Isso ocorre porque não estamos vendo o mergulhador, mas sua imagem, elevada em relação ao fundo, em virtude da refração dos raios luminosos (que saem do fundo da piscina) ao passarem para o ar. Da mesma forma, quando um mergulhador que está dentro da água observa uma pessoa na beira da piscina, ele vê sua imagem deslocada da posição original.



Antonnio Robson/Arquivo da editora

Figura 6.8. Imagem virtual de um mergulhador dentro da água.

Quando parte de um lápis é mergulhada, obliquamente, dentro da água, ele parece estar quebrado. A **figura 6.9** esclarece por que isso ocorre: a parte mergulhada não é vista por nós, mas sua imagem virtual, situada acima da posição real do objeto.

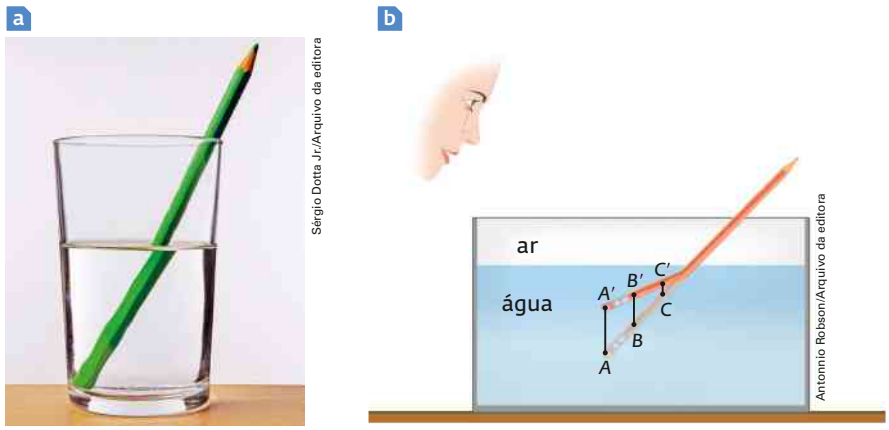
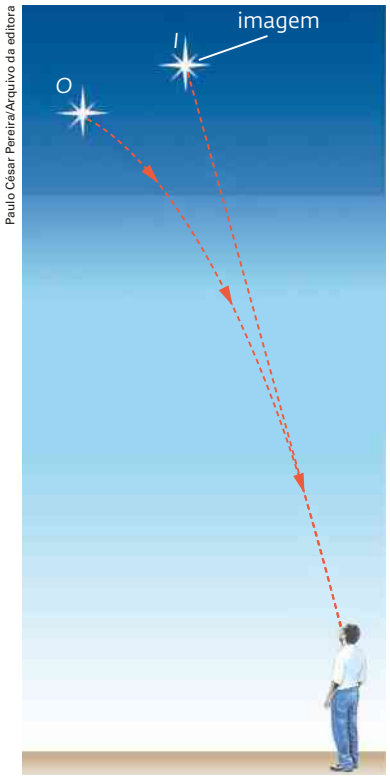


Figura 6.9. Em **a**, a refração da luz faz com que um lápis mergulhado na água pareça estar quebrado. Em **b**, a vista lateral (representação) demonstra a formação da imagem virtual em relação à posição de um lápis mergulhado na água.



Outra situação em que ocorre o fenômeno da refração é quando a luz proveniente de uma estrela penetra na atmosfera terrestre. Ela encontra camadas de ar cada vez mais densas e, consequentemente, com índices de refração cada vez maiores. Em virtude disso, essa luz sofre refrações sucessivas, aproximando-se da normal, como mostra a **figura 6.10**.

Então, quando um observador recebe a luz da estrela, tudo se passa como se tal luz fosse proveniente do ponto *I*, situado no prolongamento do raio refratado recebido pelo observador. Em outras palavras, o que o observador enxerga é uma imagem virtual da estrela, produzida pela refração da luz na atmosfera terrestre.

Um fenômeno idêntico a esse se passa com a luz solar. Ao anoitecer, mesmo depois que o Sol está abaixo da linha do horizonte, continuamos a ver a sua imagem (e a receber a sua luz) em virtude da refração na atmosfera, como mostra a **figura 6.11.a**. Da mesma forma, ao amanhecer, começamos a ver uma imagem do Sol antes que ele alcance a linha do horizonte. Dessa maneira, se não existisse atmosfera, o dia terrestre seria um pouco mais curto.

Figura 6.10. A luz proveniente de uma estrela se refrata ao atravessar a atmosfera terrestre.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

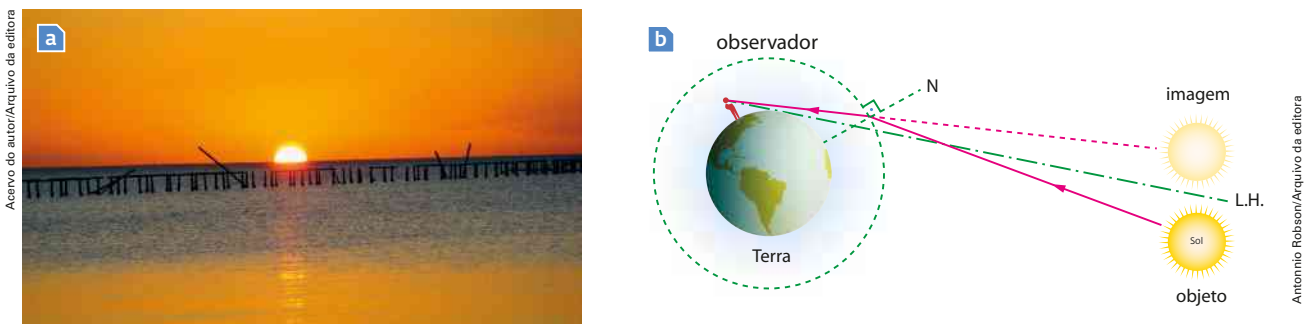


Figura 6.11. Em **a**, a aparência distorcida do Sol no pôr do sol sobre o mar é produzida pela refração da imagem do Sol na atmosfera quando a luz solar passa do vácuo (meio menos refringente) para a atmosfera (meio mais refringente). Em **b** (representação), o fenômeno de refração solar faz com que o observador veja o Sol deslocado.

Reflexão total

Consideremos dois meios, 1 e 2, tais que $n_1 > n_2$, como a água (meio 1) e o ar (meio 2) (figura 6.12). Um objeto luminoso, *O*, situado no meio 1, emite um raio *OA*, que, ao passar para o meio 2, refrata-se, afastando-se da normal, pois $n_1 > n_2$. Nessas condições, pela equação $n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$, temos que quanto maior for o ângulo de incidência, maior será o ângulo de refração.

Então, um raio como *OB*, após refratado, se afastará mais da normal do que *OA*. Como o ângulo de refração se mantém sempre maior do que o de incidência ($n_1 > n_2$), um determinado raio incidente *OC* apresentará um raio refratado tangente à superfície de separação dos dois meios, isto é, o ângulo de refração correspondente a esse raio é de 90°. O ângulo de incidência do raio que se refrata dessa maneira é denominado **ângulo-limite**, *L*, como está indicado na figura 6.12.

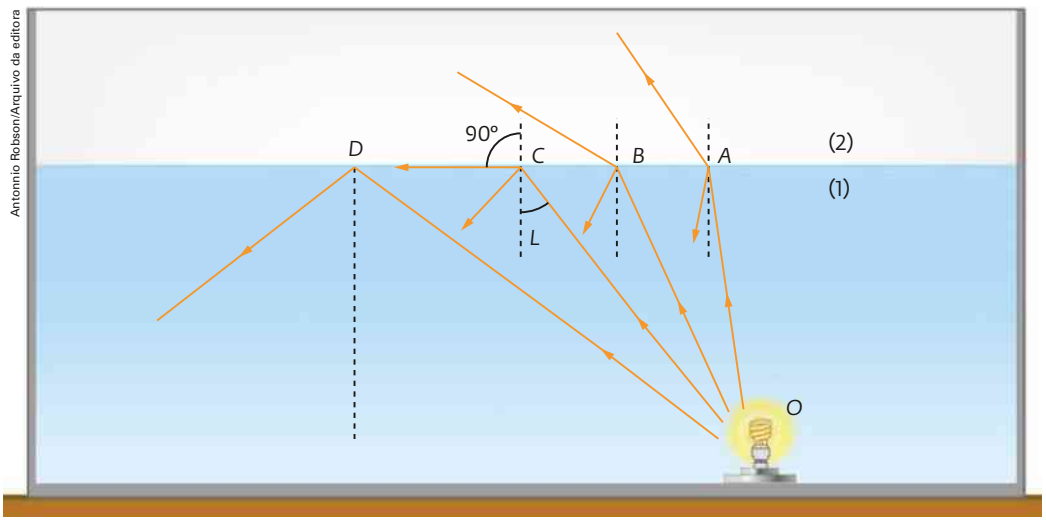


Figura 6.12. Os raios *OA*, *OB* e *OC* são parcialmente refletidos e parcialmente refratados. O raio *OC* é refratado tangente à superfície formando o ângulo-limite. O raio *OD* é totalmente refletido. Representação sem escala e em cores fantasia.

Para ângulos de incidência maiores do que *L*, não existe raio refratado. O raio é **totalmente refletido**, voltando a se propagar no meio 1. Esse fenômeno é denominado **reflexão total** porque, nessas condições, a totalidade da luz incidente é refletida, o que não acontece nem mesmo nos melhores espelhos, os quais, ao refletirem a luz, absorvem uma pequena fração do feixe incidente.

Usando a lei de Snell, $n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$, podemos calcular o valor do ângulo-limite *L*. A figura 6.12 nos mostra que, para o raio *OC*, temos $\theta_1 = L$ e $\theta_2 = 90°$. Logo:

$$n_1 \text{ sen } L = n_2 \text{ sen } 90° \quad \therefore \quad \text{sen } L = \frac{n_2}{n_1}$$

Assim, concluímos que:

Um raio luminoso, propagando-se em um meio 1 e incidindo na superfície de separação desse meio com um meio 2, tal que $n_1 > n_2$, sofrerá reflexão total se o seu ângulo de incidência for maior do que o ângulo-limite *L*. O valor de *L* é dado por:

$$\text{sen } L = \frac{n_2}{n_1}$$

FÍSICA NO CONTEXTO

APLICAÇÕES DA REFRAÇÃO

Não escreva no livro!

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Ilustrações: Banco de imagens/Arquivo da editora

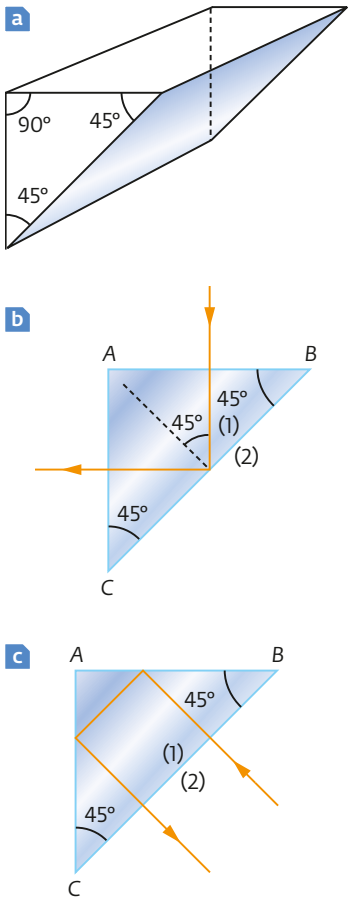


Figura 6.13. Em **a**, um prisma como o da figura pode ser usado para substituir, com vantagens, os espelhos, porque reflete totalmente a luz. Em **b**, o raio que incide em um dos catetos do prisma é totalmente refletido uma vez. E, em **c**, o raio que incide na hipotenusa do prisma é totalmente refletido duas vezes.

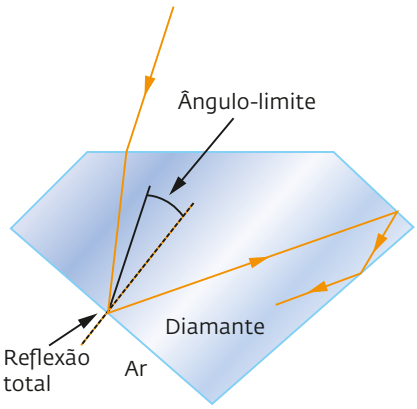


Figura 6.14. O brilho dos diamantes deve-se às várias reflexões sofridas pelos raios incidentes.

Prisma

Um prisma de vidro, como o da **figura 6.13.a**, cuja seção é um triângulo retângulo isósceles, é usado para refletir totalmente a luz, substituindo os espelhos em alguns instrumentos ópticos. A **figura 6.13.b** mostra, em corte, um raio de luz que penetra perpendicularmente à face *AB*, encontra a face *BC* com um ângulo de incidência de 45°, sofrendo reflexão total nessa face e saindo perpendicularmente à face *AC*, o que corresponde a uma rotação de 90°. Na **figura 6.13.c**, quando o raio incide perpendicularmente à face *BC* do prisma, a luz é totalmente refletida nas duas superfícies, *AB* e *AC*, o que corresponde a uma rotação de 180°.

Para calcular o ângulo-limite entre o vidro e o ar, usamos a equação $\text{sen } L = \frac{n_2}{n_1}$; daí temos: $n_2 = 1{,}0$ (ar) e $n_1 = 1{,}5$ (vidro). Assim:

$$\text{sen } L = \frac{1{,}0}{1{,}5} = 0{,}67 \quad \therefore \quad L = 42°$$

Então, para o ângulo de incidência na face *BC* (45°) superior ao valor do ângulo-limite (42°), o raio luminoso é totalmente refletido nessa face.

No caso do diamante **(figura 6.14)**, o índice de refração é muito maior do que o do vidro (ver a **tabela 6.1**). Consequentemente, o ângulo-limite entre o diamante e o ar (24°) é bem menor do que o do vidro (42°). Esse fato faz com que grande parte da luz que penetra em uma das faces do diamante seja totalmente refletida nas demais, retornando, então, à primeira face e emergindo através dela.

Por esse motivo, o diamante apresenta um brilho característico, que o torna de grande valor como joia.

Miragem

Em dias quentes, quando viajamos em uma estrada asfaltada, olhando ao longo do asfalto, temos às vezes a impressão de que ele está molhado. Isso ocorre porque, estando o asfalto muito aquecido, as camadas de ar próximas a ele apresentam densidade menor e, por causa disso, menor índice de refração do que as camadas situadas um pouco mais acima. Assim, a luz solar incidente sofre sucessivas refrações nas camadas de ar com índices de refração diferentes, alcançando as camadas mais baixas com incidência superior ao ângulo-limite e, portanto, sofrendo reflexão total antes de atingir o solo.

Essa luz refletida nos dá a impressão de que o asfalto está molhado. Esse mesmo fenômeno causa as miragens, vistas pelos viajantes nos desertos, quando julgam existir água sobre a areia aquecida **(figura 6.15)**.

Maksim Loskutnikov/Dreamstime/Isuzu Imagens



Figura 6.15. Em dias quentes, o observador tem a impressão de que o chão está molhado.

Fibra óptica

A fibra óptica é uma guia de luz feita de vidro ou polímero que transporta sinais ópticos de um local para outro. A propagação de luz no interior da fibra óptica deve-se ao fenômeno de reflexão total, que é possível devido ao núcleo ser revestido com uma capa de material de índice de refração menor do que o índice de refração do núcleo ($n_{núcleo} \geqslant n_{revestimento}$) **(figura 6.16.a)**.

Isso faz com que as diversas reflexões sofridas pelos raios luminosos dentro da fibra óptica permaneçam confinadas no núcleo da fibra óptica, pois formam ângulos maiores que o ângulo-limite **(figura 6.16.c)**. Para proteger da umidade e evitar que a fibra óptica sofra danos físicos, ao redor do núcleo e da casca há uma proteção plástica.

Os principais usos da fibra óptica são encontrados na Medicina e em comunicação (televisão e telefone). Na Medicina, é usada nos endoscópios, que são aparelhos que facilitam o exame de órgãos internos, ou em cirurgias **(figura 6.17.a)**. São usados dois feixes de fibras ópticas, introduzidos através da garganta do paciente. Um leva o sinal luminoso, e o outro traz a imagem do órgão para o médico, por meio de uma câmera. A fonte de luz utilizada nesses casos é a de *laser*, por sua grande potência mesmo quando transmitida por meio de feixes muito finos.

Na comunicação, a fibra óptica é usada para transmitir sinais por meio de pulsos de radiações eletromagnéticas (quase sempre luz ou radiação infravermelha), substituindo os cabos submarinos na transmissão telefônica a grandes distâncias, que costuma ser feita por corrente elétrica, através de fios de cobre. A fibra óptica permite transmitir informações com maior eficiência e maior economia do que os fios de cobre (pode, nas mesmas condições de espessura e comprimento, enviar 100 000 vezes mais informações) **(figura 6.17.b)**.

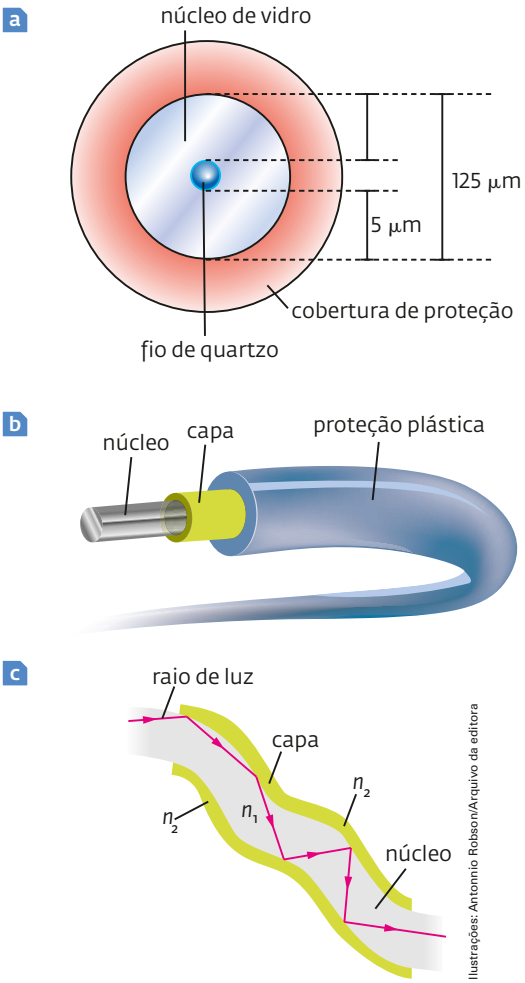


Figura 6.16. Em **a**, vista frontal da estrutura interna de uma fibra óptica. Em **b**, representação da vista lateral do interior da fibra. E, em **c**, o raio incidente atinge as paredes internas da fibra óptica com um ângulo maior do que o ângulo-limite, sofrendo reflexão total ao longo do comprimento da fibra óptica. Representação sem escala e em cores fantasia.



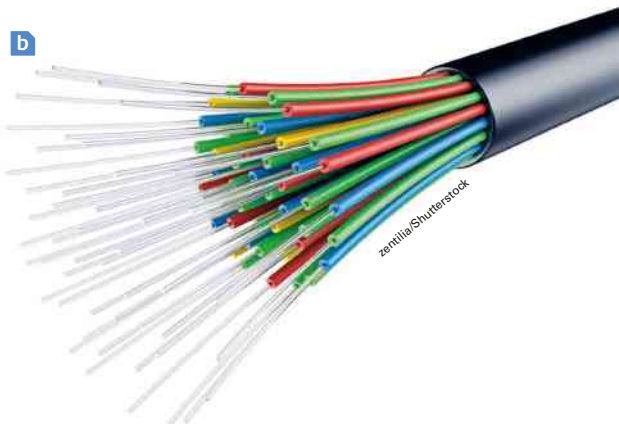


Figura 6.17. Em **a**, exame de endoscopia utilizando um par de fibras ópticas. Em **b**, feixe de fibras ópticas com vários fios para área de telecomunicação. Observe a proteção externa que envolve o cabo.

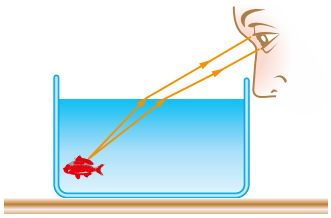
VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

6. Uma estrela é vista, no céu, em uma certa posição acima do horizonte. A estrela está realmente em uma posição mais afastada ou mais próxima do horizonte? Mais próxima.

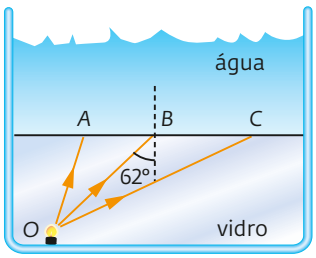
7. Um pequeno peixe encontra-se dentro de um aquário. A figura abaixo mostra raios luminosos que partem do peixe e se refratam ao passar da água para o ar.



a) Mostre, em uma cópia da figura no caderno, onde está situada a imagem do peixe vista pelo observador.
b) Essa imagem é real ou virtual? Explique.
c) Se o observador desejasse alvejar o peixe com um pequeno arpão, ele deveria apontá-lo para um ponto situado acima ou abaixo da posição onde ele vê o peixe? Abaixo.

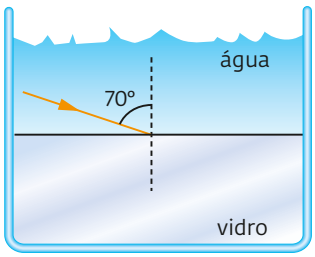
8. a) Consultando a **tabela 6.1**, determine o valor do ângulo-limite, *L*, para um raio de luz que passa do vidro para a água. 62°

b) Copie a figura abaixo no caderno e complete-a, mostrando o que ocorre com os raios *OA*, *OB* e *OC* após incidirem na superfície de separação entre o vidro e a água.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

9. Com base no valor do ângulo-limite calculado no exercício anterior, podemos afirmar que o raio luminoso, mostrado na figura abaixo, será totalmente refletido? Explique.



7. a) No encontro dos prolongamentos dos raios retratados.

7. b) Virtual, porque está situada no prolongamento dos raios.

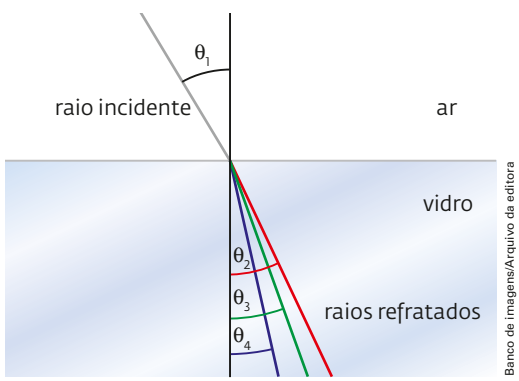
8. b) *OA*: parte se reflete e parte se refrata afastando-se da normal; *OB*: parte se reflete e parte se refrata tangenciando a superfície de separação; *OC*: não se refrata, pois é totalmente refletido.

9. Não, porque o índice de refração da água é menor do que o do vidro e, portanto, um raio luminoso sempre se aproxima da normal ao passar da água para o vidro.

6.3 Dispersão da luz

O índice de refração varia com a cor da luz

Em uma experiência, quando incidimos um raio de luz vermelha sobre um bloco de vidro com ângulo de incidência θ_1, obtemos um ângulo de refração θ_2 **(figura 6.18)**. Repetindo a experiência, fazendo incidir sobre o mesmo bloco, com o mesmo ângulo de incidência θ_1, um raio de luz verde, veremos que esse raio se refrata com um ângulo de refração θ_3 **ligeiramente menor** do que θ_2 **(figura 6.18)**. Repetindo novamente a experiência para um raio de luz azul, obtemos um raio refratado com um ângulo de refração θ_4.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 6.18. O índice de refração do vidro, para a luz azul, é maior do que para a luz vermelha e para a luz verde.

Podemos concluir que a luz azul, ao se refratar, sofre maior desvio, aproximando-se mais da normal do que a luz verde e a luz vermelha. Esse fato indica que o vidro apresenta um índice de refração maior para a luz azul do que para a luz verde e a luz vermelha. Essas diferenças, entretanto, são muito pequenas, como se pode ver pela **tabela 6.2**. Qualquer meio material (água, plástico, etc.) apresenta comportamento semelhante ao do vidro, isto é, tem um índice de refração diferente para cada cor.

Tabela 6.2

ÍNDICE DE REFRAÇÃO DO VIDRO "CROWN[1]" PARA DIVERSAS CORES

Cor	n
Vermelho	1,513
Amarelo	1,517
Verde	1,519
Azul	1,528
Violeta	1,532

[1] O vidro Crown possui sais de potássio ou bário em sua composição química, em vez de sais de sódio, que são comuns aos demais vidros.

Quando estudamos as formas de transferência de calor, vimos que a luz visível é um exemplo de onda eletromagnética que compõe o espectro eletromagnético e que existem outros tipos de onda que o compõem, como, por exemplo, os raios X. O que diferencia os vários tipos de onda eletromagnética é a frequência e o comprimento de onda.

A velocidade de uma onda eletromagnética propagando-se em um meio é dada por $v = \lambda f$, em que λ é o comprimento de onda e f a frequência. Cada cor no espectro de luz visível **(figura 6.19)** é caracterizada por uma frequência e um comprimento de onda específico.

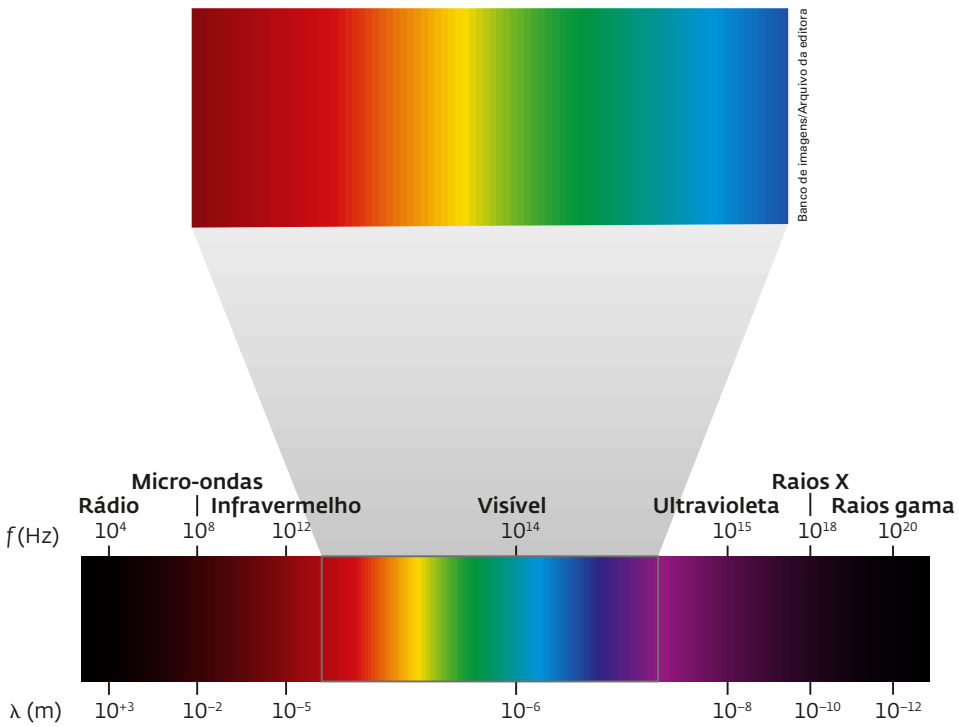


Figura 6.19. Espectro da luz visível.

De modo geral, podemos afirmar que o índice de refração, n, de um meio varia com o comprimento de onda (e, portanto, com a frequência):

$$n = \frac{c}{v}$$

$$n = \frac{c}{\lambda f}$$

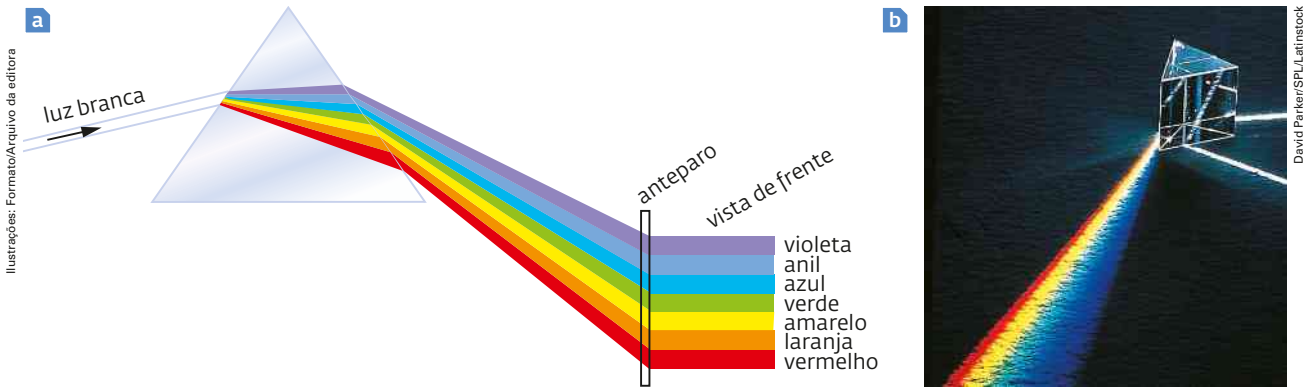
em que c é a velocidade da luz no vácuo ($3{,}0 \cdot 10^8$ m/s) e v a velocidade da luz no meio. A partir desta relação, podemos concluir, então, que o índice de refração diminui à medida que o comprimento de onda ou a frequência aumentam.

Dispersão da luz branca

Quando um estreito feixe de luz branca, como a luz solar, incide em um prisma de vidro, observa-se que essa luz branca refrata-se em várias cores, cada qual com uma frequência diferente. A cor vermelha é a que sofre menor desvio, e a violeta é a mais desviada de todas **(figura 6.20.a)**.

Essa experiência nos mostra que a luz branca, ao refratar, se dispersa nas cores que a constituem. Esse fenômeno deve-se ao fato de que a luz se propaga com velocidade diferente da velocidade da luz incidente quando está dentro do prisma. E, quando o índice de refração é maior, a velocidade da luz é menor, conforme discutimos anteriormente. Esse fenômeno, no qual a luz branca se separa em várias cores, é denominado **dispersão da luz**.

Podemos conseguir uma dispersão mais acentuada da luz branca se fizermos o feixe passar por duas refrações sucessivas. Isso ocorre quando se faz um feixe de luz branca incidir em um prisma de vidro, como mostra a **figura 6.20.b**. O feixe se refrata ao penetrar no prisma e, novamente, ao emergir dele, o que provoca maior separação das cores. Esse conjunto de cores, denominado espectro da luz branca, ou espectro visível, pode ser observado em um anteparo.



Ilustrações: Formato/Arquivo da editora

David Parker/SPL/Latinstock

Figura 6.20. Em **a**, representação esquemática da decomposição da luz branca ao atravessar um prisma de vidro, dando origem a um espectro colorido. Em **b**, o feixe de luz branca se decompõe no espectro de luz visível.

Recombinando todas as cores do espectro mostrado na **figura 6.20**, obteremos novamente a luz branca. A **figura 6.21** mostra uma maneira de se obter essa recomposição: o feixe colorido, que emerge de um prisma, atravessa um segundo prisma invertido, provocando a superposição das cores e regenerando a luz branca.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.



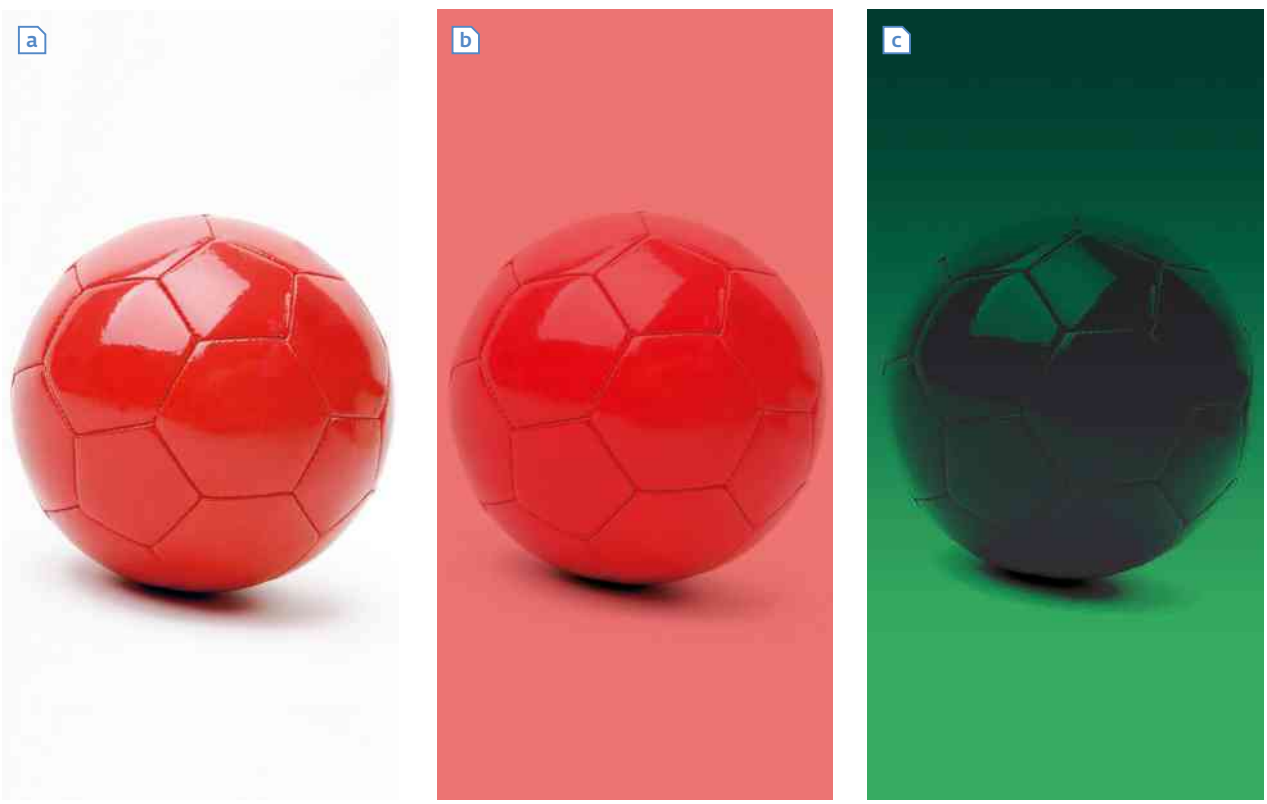
Figura 6.21. Podemos obter luz branca recombinando as cores do espectro.

Se a luz de uma determinada cor, obtida no espectro da luz branca, atravessar um prisma, ela **não** será decomposta em outras cores, isto é, cada cor do espectro é uma cor pura (ou simples). Por isso, dizemos que cada feixe colorido do espectro é constituído de luz **monocromática**, ou seja, de uma radiação que está na mesma frequência, manifestando assim a mesma cor.

A cor de um objeto

Ao nos referirmos à cor de um objeto, estamos supondo que ele esteja sendo iluminado com luz branca (luz solar ou luz de uma lâmpada comum). Lembrando que a luz branca é constituída pela superposição das cores do espectro, podemos concluir que um objeto se apresenta vermelho, por exemplo, porque reflete a luz vermelha, absorvendo quase totalmente as demais cores, ou seja, ele envia para nossos olhos apenas luz vermelha. Do mesmo modo, um objeto verde é aquele que reflete a luz verde e absorve todas as outras cores, podendo-se dizer o mesmo de um objeto azul, amarelo, etc. Quando a bola é iluminada por luz branca, que contém todas as cores do espectro visível, a bola reflete sua cor natural, o vermelho **(figura 6.22.a)**. Mas, quando a mesma bola vermelha é iluminada por uma luz vermelha **(figura 6.22.b)**, a bola vermelha parece vermelho-escuro, pois reflete toda a radiação vermelha incidente. E, quando a bola vermelha é iluminada por luz verde **(figura 6.22.c)**, ela se parece negra, pois não há reflexão de luz.

Um objeto é branco (quando iluminado com luz branca) porque reflete todas as cores que recebe, não absorvendo praticamente nenhuma luz; assim, envia a luz branca para nossos olhos. Por outro lado, um objeto preto absorve toda a luz (de todas as cores) que incide sobre ele, não enviando nenhuma luz para nossos olhos.



Fotos: marinomarini/Shutterstock

Figura 6.22. Quando um objeto é iluminado com luz branca, ele absorve algumas cores e reflete outras.

FÍSICA NO CONTEXTO

O ARCO-ÍRIS

A impressão em cores e as telas coloridas das TVs e computadores são aplicações que só foram possíveis após os cientistas aprenderem a separar a luz em suas cores constituintes. Na natureza, entretanto, essa separação acontece e é observada no fenômeno de dispersão da luz com a formação do arco-íris, que se forma quando a luz do Sol incide em gotículas de água em suspensão na atmosfera, durante ou após a chuva **(figura 6.23)**.

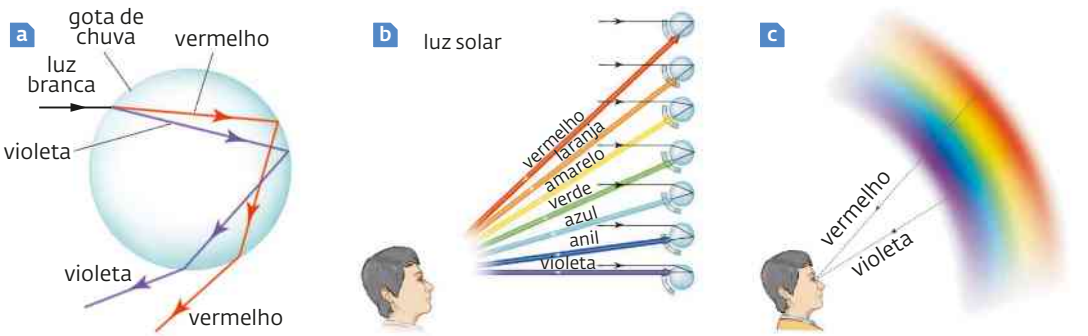
Quando um raio de luz solar (luz branca) penetra em uma gota, ele se refrata, sofrendo dispersão. O feixe colorido é refletido na superfície interna da gota, como mostra a **figura 6.24.a**, e, ao emergir, refrata-se novamente, o que causa maior separação das cores.

Evidentemente, essa dispersão ocorre em todas as gotas que estiverem recebendo a luz do Sol. Entretanto, um observador situado na superfície da Terra não recebe todas as cores provenientes de uma só gota, pois essas cores, ao atingir o solo, estão muito separadas umas das outras. Como se pode ver pelas **figuras 6.24.b** e **6.24.c**, a luz vermelha que chega ao observador é proveniente de gotas mais altas, e a luz violeta, de gotas mais baixas. As outras cores do espectro, naturalmente, provêm de gotas situadas entre esses extremos.



Salomon Cytrynowicz/Olhar Imagem

Figura 6.23. Arco-íris na cidade de Brasília, DF.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 6.24. O arco-íris se forma em virtude da refração e da reflexão da luz solar, ao encontrar gotículas de água na atmosfera. Representação sem escala e em cores fantasia.

Exemplo 1

Um objeto que se apresenta branco, quando exposto à luz solar, é colocado em um quarto escuro. Qual será a cor desse objeto:

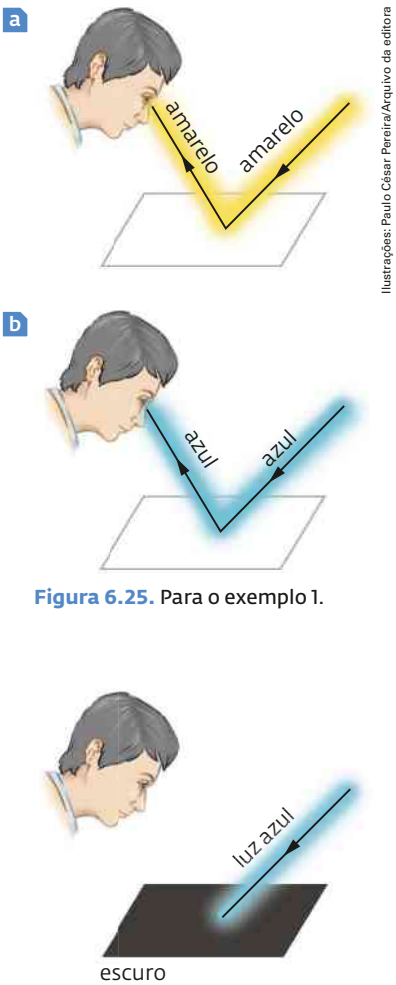
a) Se acendermos, no quarto, uma luz monocromática amarela?

Se o objeto é branco quando exposto à luz solar, isso indica que ele tem a propriedade de refletir todas as cores. No quarto, esse objeto estará recebendo apenas luz amarela e só poderá refletir essa cor **(figura 6.25.a)**. Então, nessas condições, o objeto será visto com cor amarela.

b) Se acendermos, no quarto, uma luz monocromática azul?

Se o objeto reflete todas as cores e está recebendo apenas o azul, ele refletirá essa cor e se apresentará com a cor azul **(figura 6.25.b)**.

Concluímos, assim, que a cor de um objeto depende não apenas dele (cores que ele é capaz de refletir), mas também da cor da luz que o ilumina. De fato, como vimos, um objeto branco (que reflete todas as cores) pode se apresentar com outras cores, conforme a cor da luz que incide sobre ele.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 6.25. Para o exemplo 1.

Exemplo 2

Um objeto que se apresenta amarelo quando exposto à luz solar é colocado em um quarto escuro. Qual será sua cor se acendermos, no quarto, uma luz monocromática azul?

Esse objeto tem a propriedade de refletir apenas a luz amarela e absorve as demais cores do espectro da luz branca. Ao receber apenas luz azul, ele a absorverá **(figura 6.26)**. Assim, o objeto não enviará nenhuma luz para nossos olhos, apresentando-se escuro.

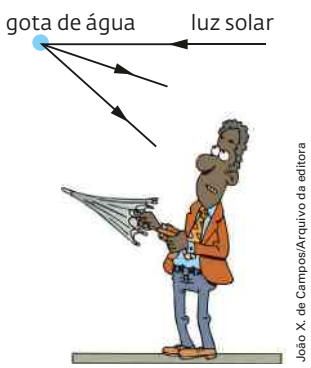
Figura 6.26. Para o exemplo 2.

Verifique o que aprendeu

Não escreva no livro!

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

10. Como vimos, a luz que incide em uma gota de água em suspensão na atmosfera sofre dispersão, emergindo dela um feixe colorido. Na figura abaixo estão mostrados os raios externos do feixe que emerge da gota de água.



João X. de Campos/Arquivo da editora

Orientando-se pela **figura 6.24**, responda:

a) Qual é a cor do raio luminoso que está incidindo no olho do observador? Vermelha.

b) Se o observador está vendo um arco-íris, a gota que envia luz violeta para seus olhos está situada abaixo ou acima da gota mostrada na figura? Abaixo.

11. Um feixe de luz branca, propagando-se no ar, incide obliquamente na superfície de um bloco de vidro, refratando-se e sofrendo dispersão. **11. b)** Vermelho.

a) Qual a cor que sofre maior desvio? Violeta.

b) Para qual cor o ângulo de refração é maior?

c) Para qual cor o índice de refração do vidro é maior? Violeta.

12. Suponha que a bandeira do Brasil seja colocada em um quarto escuro e iluminada com luz monocromática amarela. Diga a cor com a qual se apresentarão as seguintes partes da bandeira:

a) o círculo central; Preto.

b) o losango; Amarelo.

c) a faixa do círculo central e as estrelas; Amarelo.

d) o restante da bandeira. Preto.

6.4 Lentes esféricas

O que é uma lente

As lentes são dispositivos empregados em um grande número de instrumentos muito conhecidos, como óculos, máquinas fotográficas, microscópios, lunetas, entre outros. Uma lente é constituída por um meio transparente limitado por faces curvas, geralmente esféricas. Esse meio é, em geral, o vidro ou um plástico, mas poderia ser, até mesmo, a água, o ar, etc. As lentes esféricas possuem faces côncavas ou convexas, podendo uma delas ser plana, como representado na **figura 6.27**. Quando as duas faces de uma lente são convexas, dizemos que se trata de uma lente biconvexa; quando ambas são côncavas, a lente é bicôncava, e assim por diante.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

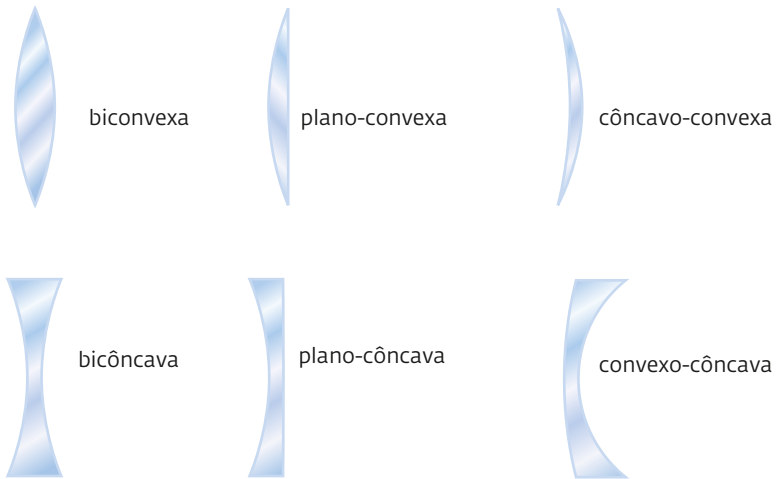
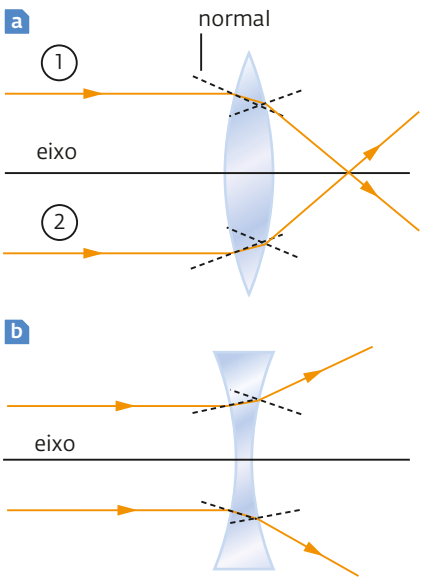


Figura 6.27. Diversos tipos de lentes.



Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 6.28. Em **a**, temos uma lente convergente e, em **b**, uma lente divergente. As lentes convergentes apresentam extremidades mais finas do que a parte central, e as divergentes, extremidades mais espessas.

Lentes convergentes e divergentes

Uma reta perpendicular a ambas as faces de uma lente é denominada **eixo da lente**. Na **figura 6.28.a**, representamos o eixo de uma lente biconvexa; na **figura 6.28.b**, o eixo de uma lente bicôncava.

Considere o raio 1, da **figura 6.28.a**, incidindo na lente biconvexa, paralelamente ao seu eixo. Ao penetrar na lente, esse raio se refrata, aproximando-se da normal; ao emergir dela, torna a se refratar, afastando-se da normal. Então, o raio se desvia cortando o eixo em um determinado ponto. O raio 2, também paralelo ao eixo, atravessa a lente de maneira semelhante ao raio 1, desviando-se de tal modo a cortar o eixo naquele mesmo ponto. Qualquer raio que incidir na lente paralelamente ao seu eixo terá um comportamento análogo e, portanto, essa lente **converge** para um ponto de seu eixo os raios luminosos que nela incidem paralelamente a ele. Por esse motivo, a lente mostrada na **figura 6.28.a** é denominada **lente convergente**.

A **figura 6.28.b** mostra o que acontece com os raios que incidem paralelamente ao eixo de uma lente bicôncava. Nesse caso, os raios são desviados de modo a se tornarem **divergentes**. Por isso mesmo, dizemos que a lente bicôncava é uma **lente divergente**.

De modo geral, é possível verificar que:

As lentes que apresentam as extremidades mais finas do que a parte central (como a lente biconvexa) são convergentes, e as que apresentam as extremidades mais espessas do que a parte central (como a lente bicôncava) são divergentes.

As lentes costumam ser representadas da maneira indicada na figura 6.29. Na figura 6.29.a, temos uma lente convergente, com as setas indicando que ela é mais fina nas extremidades. Na figura 6.29.b, as setas estão invertidas, representando que a lente é mais espessa nas extremidades (lente divergente).

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

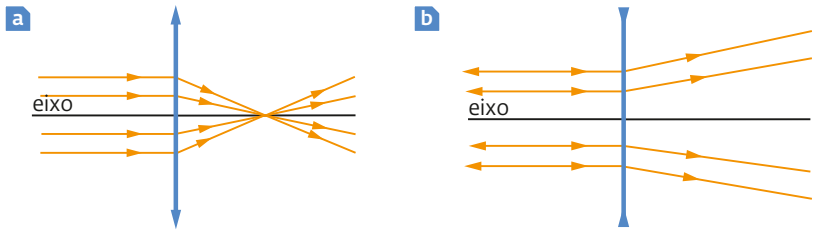


Figura 6.29. Representação esquemática de lentes convergentes e divergentes. Em **a**, as setas indicam que as lentes convergentes apresentam extremidades mais finas; nas divergentes, em **b**, as setas indicam extremidades mais espessas.

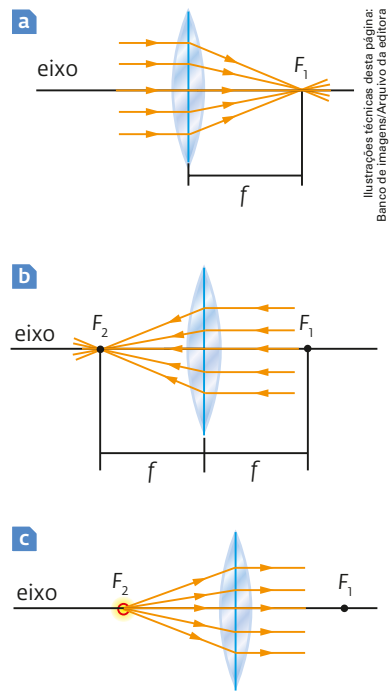
Focos de uma lente convergente

Em nosso estudo, vamos tratar apenas de lentes de pequena espessura, isto é, lentes finas ou delgadas. Assim, para simplificar o traçado dos diagramas, deixaremos de mostrar o trajeto real dos raios luminosos no interior da lente: traçaremos esses raios substituindo as duas refrações causadas pela lente por um único desvio em seu interior, como mostra a figura 6.30.

Na figura 6.30.a, mostramos um feixe de luz, paralelo ao eixo, incidindo em uma lente convergente. Esse feixe, após atravessá-la, converge para um ponto do eixo. Esse ponto, F_1, é denominado **1º foco da lente**. A distância de F_1 à lente (a qualquer uma de suas faces, pois ela é delgada) é denominada **distância focal**, f, da lente.

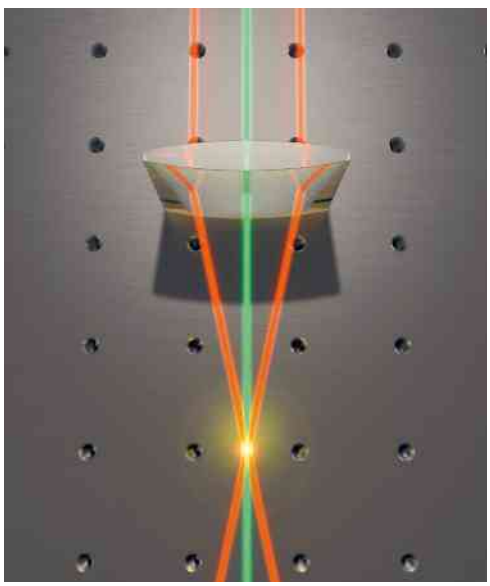
Se fizermos, agora, um feixe de raios paralelos incidir na outra face da lente, como mostra a figura 6.30.b, verificaremos que o feixe convergirá no ponto F_2, situado sobre o eixo, à mesma distância f da lente. O ponto F_2 é denominado **2º foco da lente**. Logo, uma lente convergente possui dois focos, ambos situados à mesma distância, f, da lente.

Se colocarmos uma fonte de luz em qualquer um dos focos da lente (figura 6.30.c), os raios luminosos seguirão o caminho inverso, isto é, partindo do foco, atravessarão a lente e emergirão paralelamente ao seu eixo. A figura 6.31 apresenta o caminho percorrido pelos raios de luz após passar em uma lente convergente.



Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 6.30. Raios paralelos ao eixo de uma lente convergente, após atravessá-la, convergem para o foco (F_1 em **a** e F_2 em **b**). Os raios luminosos provenientes de um foco, após atravessar a lente, tornam-se paralelos ao eixo (**c**).



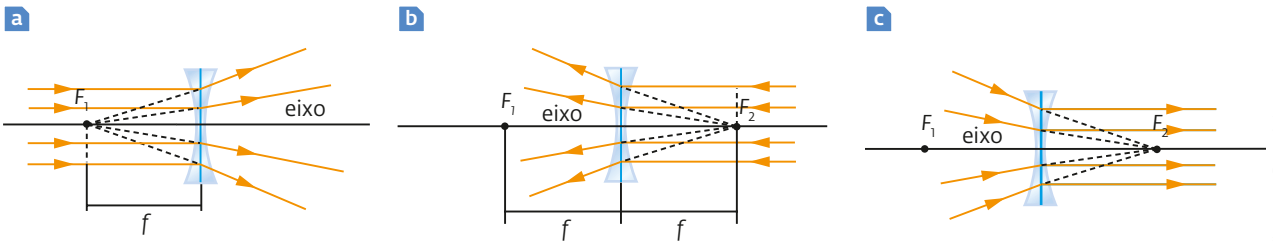
David Parker/SPL/Latinstock

Figura 6.31. Essa fotografia ilustra os diagramas da figura 6.30.

Focos de uma lente divergente

Quando um feixe de luz incide em uma lente divergente, paralelamente ao seu eixo, os raios luminosos, após atravessá-la, divergem, e seus prolongamentos se encontram sobre um ponto F_1 do eixo (figura 6.32.a). O ponto F_1 é o **1º foco da lente** divergente, e sua distância a ela é a **distância focal**, f, da lente. Se o feixe de raios paralelos incidir na outra face da lente (figura 6.32.b), teremos raios emergentes que divergem, e seus prolongamentos se encontram no ponto F_2. Esse ponto é o **2º foco da lente** divergente e está situado sobre o seu eixo a uma distância da lente também igual a f.

Na figura 6.32.c representamos um feixe luminoso incidindo em uma lente divergente, de tal modo que os prolongamentos dos raios incidentes passem pelo foco F_2. Esses raios estão seguindo um caminho inverso ao dos raios da figura 6.32.b. Portanto, após atravessar a lente, eles emergem paralelamente ao seu eixo. Esse mesmo resultado seria obtido se os prolongamentos dos raios incidentes passassem pelo foco F_1, caminho inverso ao dos raios da figura 6.32.a.

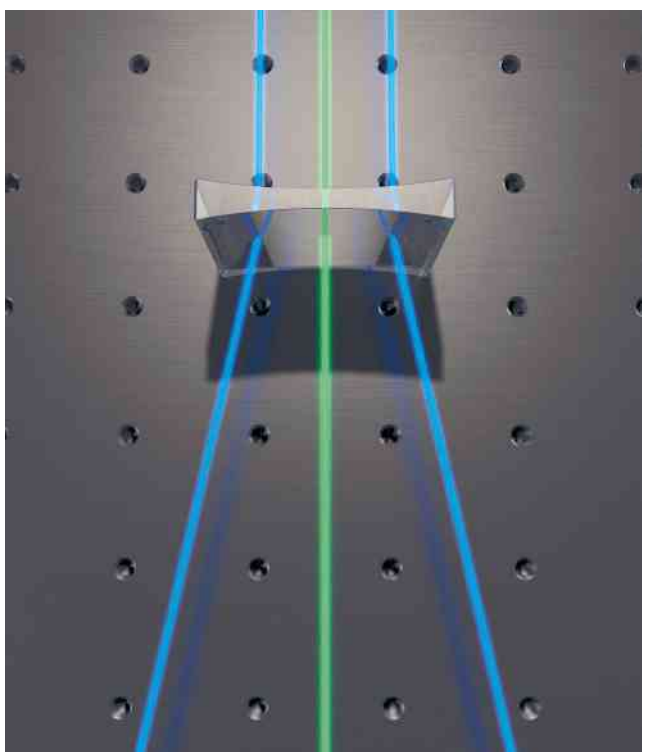


Ilustrações: Banco de imagens/ Arquivo da editora

Figura 6.32. Raios paralelos ao eixo de uma lente divergente, após atravessá-la, divergem de modo que seus prolongamentos passem pelo foco (F_1 em **a** e F_2 em **b**). Raios cujos prolongamentos passam por um foco, após atravessar a lente, tornam-se paralelos ao eixo (**c**).

A figura 6.33 apresenta o caminho percorrido pelos raios de luz após passar em uma lente divergente.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.



David Parker/SPL/Latinstock

Figura 6.33. Essa fotografia ilustra os diagramas da figura 6.32.

A distância focal depende do meio que envolve a lente

As lentes que estudamos, até agora, estavam imersas no ar. Vamos examinar, agora, o que ocorrerá quando a lente estiver mergulhada em outro meio material transparente qualquer.

Consideremos uma lente convergente, construída com um vidro de índice de refração $n = 1{,}5$ e que, mergulhada no ar ($n = 1{,}0$), apresenta uma distância focal f **(figura 6.34.a)**.

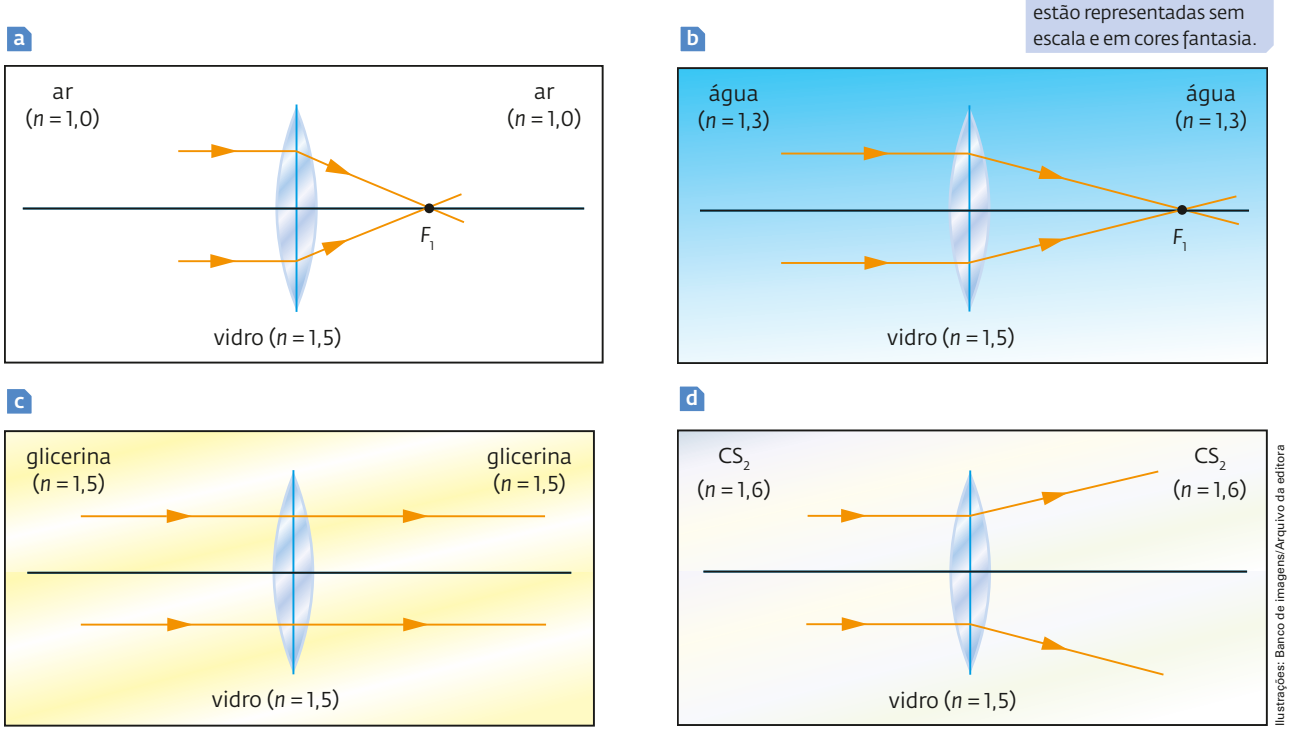
Suponha essa lente mergulhada em um meio cujo índice de refração é maior do que o do ar e menor do que o do vidro, como a água ($n = 1{,}3$). Nesse caso, os raios luminosos sofrerão menor desvio do que se a lente estivesse no ar, pois o índice de refração da água é mais próximo do índice de refração do vidro. Assim, os raios luminosos paralelos ao eixo vão convergir em um ponto mais afastado da lente, como mostra a **(figura 6.34.b)**. Em outras palavras, quando uma lente de vidro está mergulhada na água, sua distância focal é **maior** do que quando está no ar.

Se a lente estiver imersa em um meio de índice de refração igual ao do vidro (a glicerina, por exemplo), os raios luminosos não se refratam ao atravessar o vidro, pois tudo se passa como se eles estivessem se propagando em um mesmo meio. Logo, um feixe de raios paralelos ao eixo, que incide na lente, não sofre desvio **(figura 6.34.c)**, isto é, a distância focal da lente torna-se infinitamente grande.

Se a lente estiver envolvida por um outro meio com índice de refração **maior** do que o do vidro, como o bissulfeto de carbono ($n = 1{,}6$), observaremos, então, que um feixe de raios luminosos, paralelos ao eixo, irá divergir ao atravessar a lente **(figura 6.34.d)**. Portanto, uma lente que é convergente, quando imersa no ar, torna-se **divergente** ao ser mergulhada em um meio cujo índice de refração é **maior** do que o do material da lente.

Efeitos semelhantes são observados se uma lente divergente (no ar) for mergulhada em outros meios materiais.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.



Ilustrações: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 6.34. A distância focal de uma lente depende do meio no qual ela está mergulhada.

Exemplo

Suponha que, no interior de um bloco de vidro, exista uma bolha de ar, de faces convexas, como mostra a figura 6.35. Se fizermos um feixe de luz atravessar a bolha, ela se comportará como uma lente. Essa "lente de ar" biconvexa é convergente ou divergente?

Sabemos que uma lente biconvexa de vidro, no ar, é convergente. Em nosso caso, temos uma situação inversa: uma lente de ar envolvida por vidro, isto é, uma lente biconvexa mergulhada em um meio cujo índice de refração é maior do que o da própria lente. Nessas condições, a lente biconvexa se torna divergente. Assim, a bolha de ar, envolvida por vidro, se comportará como uma lente divergente (figura 6.35).

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

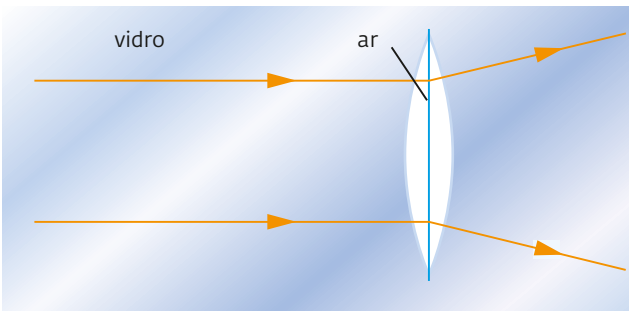


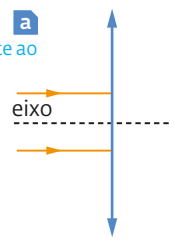
Figura 6.35. Para o exemplo da seção 6.4.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

13. Copie as figuras abaixo no caderno e complete-as, desenhando as trajetórias dos raios luminosos mostrados após atravessarem as lentes. A distância focal de ambas é igual a 5 cm.

a) Diagrama semelhante ao da figura 6.30.a.

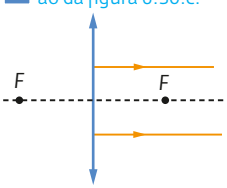


b) Diagrama semelhante ao da figura 6.32.a.

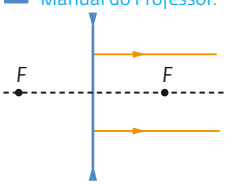


14. Na figura deste exercício mostramos duas lentes, as posições de seus focos e os raios luminosos que emergem delas. Desenhe, em uma cópia da figura no caderno, os raios incidentes que deram origem a esses raios emergentes.

a) Diagrama semelhante ao da figura 6.30.c.



b) Veja a resposta no Manual do Professor.



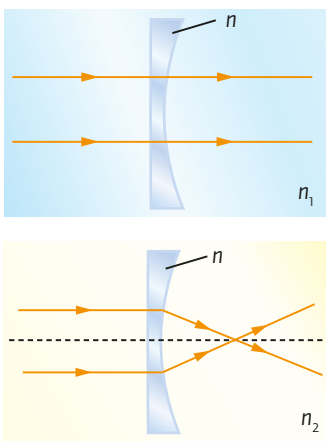
15. Mostre, com um desenho em seu caderno, o aspecto das lentes seguintes, dizendo se cada uma delas é convergente ou divergente:

a) lente plano-convexa Convergente.

b) lente bicôncava Divergente.

c) lente côncavo-convexa Convergente.

16. Na figura abaixo, mostramos uma lente de plástico, cujo índice de refração é $n = 1{,}7$, mergulhada em dois meios de índices de refração, n_1 e n_2.



Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

a) Essa lente, no ar, é convergente ou divergente? Divergente.

b) Observando as trajetórias dos raios luminosos mostrados na figura, diga se o valor de n_1 é maior, menor ou igual a 1,7. Igual.

c) E o valor de n_2 é maior, menor ou igual a 1,7? Maior.

6.5 Formação de imagens nas lentes

De modo semelhante aos espelhos, as lentes formam imagens reais ou virtuais de objetos que são colocados diante delas. O estudo da formação dessas imagens pode ser feito através de diagramas ou equações, como fizemos para os espelhos esféricos. Para a construção dos diagramas usaremos os raios principais, que nos permitem localizar com maior facilidade a posição da imagem de um ponto.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Raios principais nas lentes

Para localizar a imagem de um ponto precisamos conhecer a trajetória de apenas **dois** raios luminosos que são emitidos por ele.

1º) Um raio luminoso que incide em uma lente convergente, paralelamente ao seu eixo, refrata-se passando pelo 1º foco F_1 **(figura 6.36.a)**.
Um raio luminoso que incide em uma lente divergente, paralelamente ao seu eixo, refrata-se de tal modo que o seu prolongamento passa pelo 1º foco F_1 **(figura 6.36.b)**.

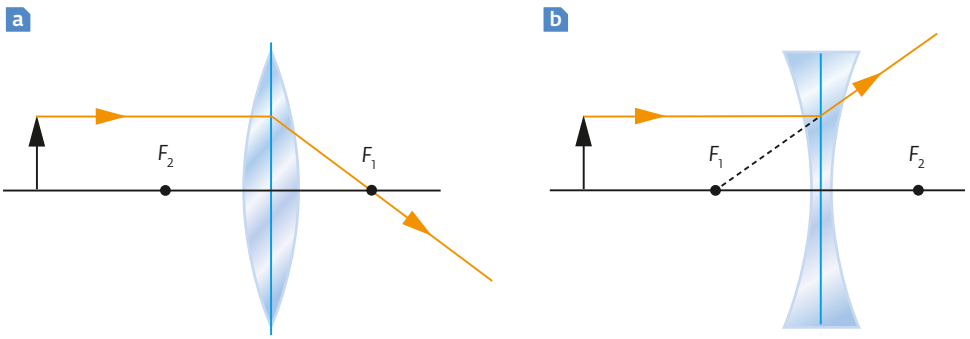


Figura 6.36. Raio luminoso, paralelo ao eixo, incidindo em uma lente convergente (**a**) e em uma lente divergente (**b**).

2º) Um raio luminoso que incide em uma lente convergente e cuja direção passa pelo 2º foco, F_2, emerge da lente paralelamente ao seu eixo **(figura 6.37.a)**.
Um raio luminoso que incide em uma lente divergente, de tal modo que o seu prolongamento passe pelo 2º foco, F_2, emerge da lente paralelamente ao seu eixo **(figura 6.37.b)**.

Nos exemplos seguintes, usaremos esses dois raios principais para localizar a imagem de um objeto fornecida por uma lente.

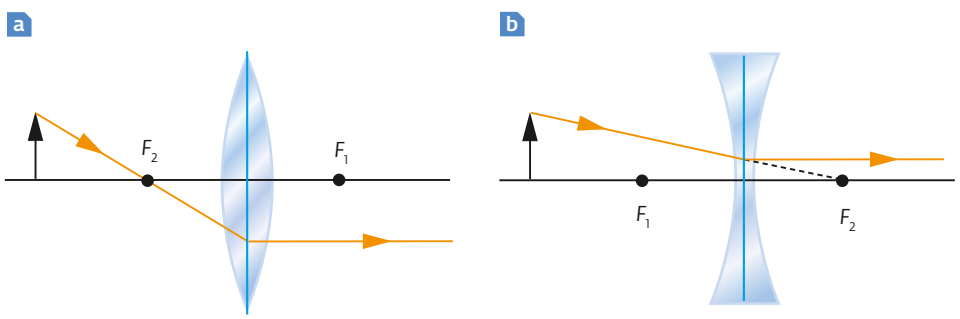


Figura 6.37. Raio luminoso que emerge paralelamente ao eixo, após atravessar uma lente convergente (**a**) e uma lente divergente (**b**).

Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Exemplo 1

O objeto *AB* da figura 6.38 encontra-se em frente a uma lente convergente, cujos focos estão localizados em F_1 e F_2. A distância do objeto à lente é maior do que o dobro de sua distância focal. Localize a imagem do objeto.

Para localizar a imagem do ponto *A* (extremidade do objeto) traçamos, a partir desse ponto, os dois raios principais: um deles, paralelo ao eixo da lente, que se refrata passando pelo foco F_1, e o outro, passando pelo foco F_2, que emerge da lente paralelamente ao seu eixo. Os dois raios refratados se encontram em *A'* e, então, para um observador situado na posição mostrada na figura 6.38, tudo se passa como se esses raios refratados estivessem sendo emitidos de *A'*. Assim, o observador enxerga, em *A'*, uma imagem real do ponto *A*. Estando o objeto *AB* colocado perpendicularmente ao eixo da lente, percebemos que sua imagem estará em *A'B'*, também perpendicular ao eixo. Concluímos, então, que a imagem do objeto *AB*, formada pela lente, é real, invertida e menor do que o objeto. Poderíamos receber essa imagem em um anteparo colocado na posição *A'B'*.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

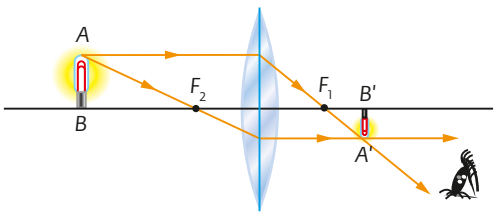
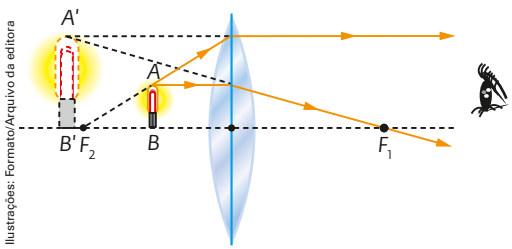


Figura 6.38. Para o exemplo 1.

Exemplo 2

Suponha que o objeto *AB* do exemplo anterior fosse colocado, agora, entre o foco e a lente, como mostra a figura 6.39. Localize a imagem do objeto.

Tracemos, a partir de *A*, os dois raios principais: o primeiro, paralelo ao eixo, que se refrata passando pelo foco F_1; o segundo, cuja direção passa por F_2 e, portanto, emerge da lente paralelamente ao seu eixo. Observe que esses raios refratados não se cruzam, mas seus prolongamentos se encontram em *A'*. Então, o observador que recebe o feixe refratado enxerga, em *A'*, a imagem virtual do ponto *A*. A imagem de todo o objeto *AB* se formará em *A'B'* (perpendicular ao eixo), sendo, portanto, virtual, direta e maior do que o objeto (figura 6.39).



Ilustrações: Formato/Arquivo da editora

Figura 6.39. Para o exemplo 2.

Exemplo 3

Considere o objeto *AB* diante de uma lente divergente, como mostra a figura 6.40. Como será a sua imagem?

Observe na figura 6.40 os raios principais que partem de *A*: o primeiro, paralelo ao eixo, refrata-se de modo que o seu prolongamento passe pelo foco F_1; o segundo, cujo prolongamento passa pelo foco F_2, emerge paralelamente ao eixo da lente. Vemos que, também nesse caso, os raios refratados não se cruzam. Seus prolongamentos se encontram em *A'*, onde o observador verá a imagem virtual do ponto *A*. A imagem de todo o objeto estará em *A'B'*, que, como mostra a figura 6.40, é virtual, direta e menor do que o objeto.

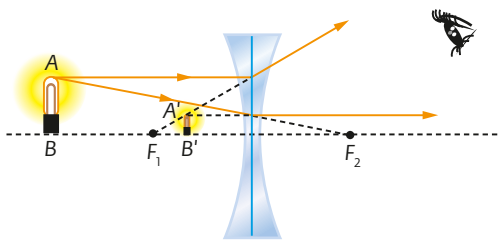


Figura 6.40. Para o exemplo 3.

A equação das lentes

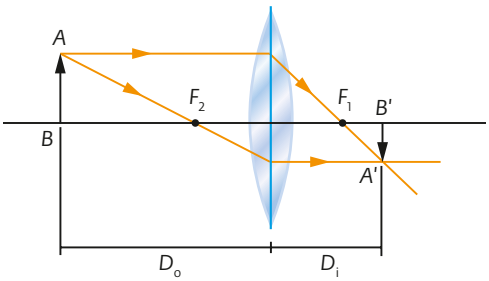
Com raciocínio semelhante ao desenvolvido no capítulo anterior, é possível demonstrar que as relações estabelecidas para os espelhos esféricos, na seção 5.6, são válidas também para as lentes. Portanto, podemos afirmar que:

Se um objeto de tamanho *AB* está situado a uma distância D_o de uma lente e se sua imagem, de tamanho *A'B'*, forma-se a uma distância D_i da lente (figura 6.41), o aumento produzido pela lente é dado por:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{D_i}{D_o}$$

Da mesma forma, D_o, D_i e *f* (distância focal da lente) estão relacionadas pela equação elaborada por Gauss:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i}$$



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 6.41. A equação $\frac{1}{f} = \frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i}$ é válida também para as lentes. Representação sem escala e em cores fantasia.

Essa equação poderá ser aplicada tanto para lentes convergentes como divergentes e para imagens reais e virtuais, desde que seja obedecida a seguinte convenção de sinais:

1º) a distância D_o é sempre positiva;

2º) a distância D_i será positiva se a imagem for real e negativa se for virtual;

3º) *f* será positiva quando a lente for convergente e negativa quando for divergente.

Exemplo 4

Suponha que o tamanho de um objeto seja *AB* = 15 cm e que ele esteja situado a uma distância D_o = 30 cm de uma lente. Verificando-se que a lente forma uma imagem virtual do objeto, cujo tamanho é *A'B'* = 3,0 cm, pergunta-se:

a) Qual é a distância, D_i, da imagem à lente?

Substituindo os valores de *A'B'*, *AB* e D_o na relação que nos fornece o aumento:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{D_i}{D_o} \text{ ou } \frac{3{,}0}{15} = \frac{D_i}{30} \quad \therefore \quad D_i = 6{,}0 \text{ cm}$$

Logo, a imagem está situada a 6,0 cm da lente.

b) Qual é a distância focal da lente?

A equação $\frac{1}{f} = \frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i}$ nos permitirá calcular *f*, pois conhecemos D_o e D_i. Ao substituir os valores numéricos nessa equação, não podemos nos esquecer de levar em conta a convenção de sinais: teremos, então, $D_o = 30$ cm (sempre positivo) e $D_i = -6{,}0$ cm (a imagem é virtual). Assim,

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i} \quad \therefore \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{30} + \frac{1}{(-6{,}0)} \quad \therefore \quad \frac{1}{f} = -\frac{4{,}0}{30}$$

$$f = -7{,}5 \text{ cm}$$

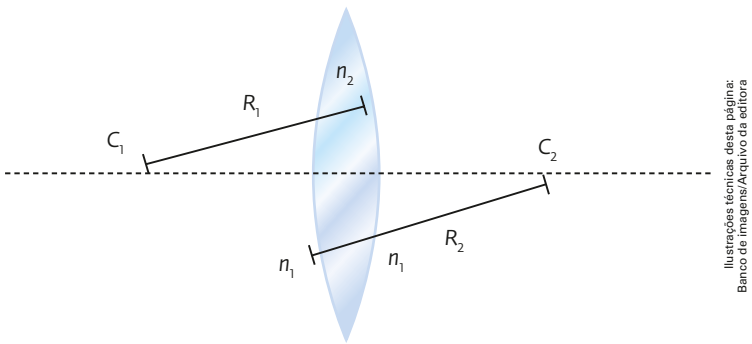
Como obtivemos uma distância focal negativa, concluímos que a lente é divergente. A situação desse exemplo corresponde, qualitativamente, ao diagrama da **figura 6.40**: uma lente divergente formando uma imagem virtual, menor do que o objeto.

Equação dos fabricantes de lentes

Na seção 6.4 analisamos, de maneira qualitativa, a influência do meio que envolve a lente no valor de sua distância focal. O estudo quantitativo dessa influência e do efeito dos raios de curvatura das superfícies que limitam a lente pode ser feito por meio de uma equação, denominada "equação dos fabricantes de lentes", que será apresentada a seguir.

Considere uma lente de faces esféricas, de raios R_1 e R_2, de índice de refração n_2, envolvida por um meio de índice de refração n_1 (veja a **figura 6.42**).

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.



Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 6.42. A "equação dos fabricantes de lentes" fornece a distância focal de uma lente.

Usando as leis da refração, é possível mostrar que a distância focal dessa lente é dada pela seguinte equação:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$

que é a equação mencionada. Ela pode ser usada para determinar a distância focal de qualquer tipo de lente esférica (bicôncava, plano-convexa, côncavo-convexa, etc.), desde que seja adotada a seguinte convenção de sinais:

- o sinal do raio de curvatura R será positivo quando a superfície externa que limita a lente for convexa e negativo quando ela for côncava;
- o sinal da distância focal, $\pm$, será positivo quando a lente for convergente e negativo quando ela for divergente.

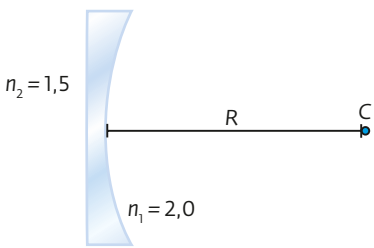


Figura 6.43. A distância focal dessa lente pode ser calculada pela "equação dos fabricantes de lentes".

Exemplo 5

Considere uma lente plano-côncava, de índice de refração $n_2 = 1{,}5$ e cuja face curva tenha raio $R = 50$ cm, mergulhada em um líquido de índice de refração $n_1 = 2{,}0$. Qual é a distância focal dessa lente?

Uma lente desse tipo está representada na **figura 6.43**. Como a face curva é côncava, devemos, ao usar a fórmula, considerar o valor de R negativo. Por outro lado, sendo a outra face plana, o seu raio é infinito. Então, teremos:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{1{,}5}{2{,}0} - 1\right)\left(\frac{1}{\infty} - \frac{1}{50}\right) = (0{,}75 - 1)(0 - 0{,}02)$$

$$\frac{1}{f} = 0{,}0050 \quad \therefore \quad f = 200 \text{ cm}$$

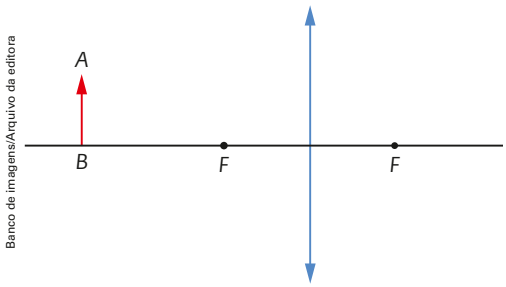
Observe que, apesar de essa lente ter as extremidades (os bordos) mais espessas do que sua parte central, ela é convergente (f é positivo). Isso ocorre porque seu índice de refração é menor do que o índice do meio que a envolve, conforme já havíamos mencionado ao fazer o estudo qualitativo desse assunto.

19. c) O tamanho da imagem é a metade do tamanho do objeto.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

17. A figura abaixo mostra um objeto *AB*, afastado de uma lente convergente, e as posições dos focos dessa lente.



Banco de imagens/Arquivo da editora

a) Trace, em uma cópia da figura no caderno, o diagrama que lhe permite localizar a imagem desse objeto fornecida pela lente.
Diagrama semelhante ao da figura 6.37.

b) A imagem obtida é real ou virtual? É direta ou invertida? É maior ou menor do que o objeto? Real, invertida e menor do que o objeto.

18. Suponha que o objeto do exercício anterior fosse aproximado da lente, sendo colocado a uma distância D_o, compreendida entre f e $2f$.

a) Trace o diagrama (no caderno), localizando a imagem do objeto. Veja a resposta no Manual do Professor.

b) Então, à medida que um objeto é aproximado de uma lente convergente (não ultrapassando o foco), sua imagem permanece real? Aproxima-se ou afasta-se da lente? Aumenta ou diminui de tamanho?

18. b) A imagem mantém-se real, afasta-se da lente e aumenta de tamanho.

19. No exercício 17, suponha que a distância focal da lente seja $f = 4$ cm e que o objeto *AB* esteja situado a uma distância $D_o = 12$ cm.

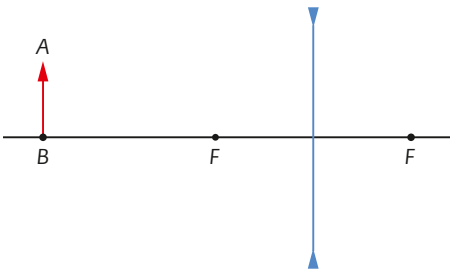
a) Usando a equação das lentes, determine a distância, D_i, da imagem à lente. $D_i = 6$ cm

b) Qual o aumento fornecido pela lente? 0,5

c) Qual o significado da resposta à questão **b**?

d) Suas respostas desse exercício concordam com o diagrama traçado no exercício 17? Sim.

20. Um objeto *AB* encontra-se diante de uma lente divergente, como mostra a figura.



Banco de imagens/Arquivo da editora

a) Construa um diagrama em seu caderno para obter a imagem desse objeto e descreva as características dessa imagem.

b) Aproxime o objeto, colocando-o entre o foco e a lente. Trace o diagrama, localize a imagem e descreva suas características.

c) Observando os diagramas que você traçou em **a** e **b**, qual a conclusão que pode ser tirada sobre a natureza e o tamanho da imagem fornecida por uma lente divergente?

20. a) Diagrama semelhante ao da figura 6.40; imagem virtual, direta e menor do que o objeto.
b) A imagem continua virtual, direta e menor do que o objeto.
c) A lente divergente fornece sempre imagem virtual e menor do que o objeto.

21. Na figura do exercício anterior, suponha que a distância focal da lente seja de 4 cm e que o objeto esteja a 12 cm dela.

a) Calcule a distância D_i da imagem à lente. $D_i = -3$cm

b) Determine o aumento fornecido pela lente. Aumento = 1/4

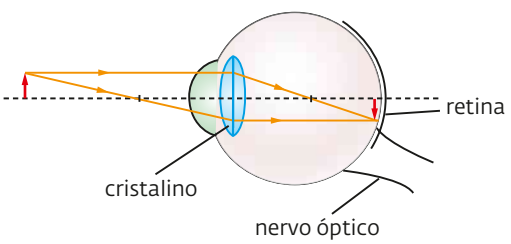
c) Se o tamanho do objeto é $AB = 10$ cm, qual é o tamanho da imagem $A'B'$? $A'B' = 2,5$ cm

6.6 Instrumentos ópticos

Nesta seção, vamos analisar o funcionamento de alguns instrumentos ópticos mais simples, usando os conhecimentos que adquirimos sobre a formação de imagens nas lentes. Iniciaremos com o estudo simplificado do olho humano, que é um instrumento óptico muito importante para nós.

O olho humano

De maneira simplificada, podemos considerar que o olho humano é constituído de uma lente biconvexa, denominada **cristalino** (ou lente) situada na região anterior do globo ocular **(figura 6.44)**. No fundo desse globo está localizada a retina, que funciona como um anteparo sensível à luz. As sensações luminosas recebidas pela retina são levadas ao cérebro pelo **nervo óptico**.



Paulo César/Arquivo da editora

Figura 6.44. Representação esquemática (sem escala e em cores fantasia) da formação da imagem no olho humano.

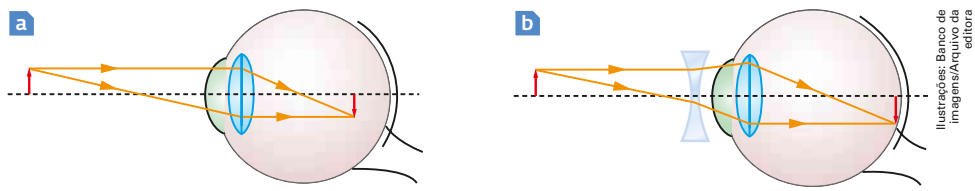
Quando olhamos para um objeto, o cristalino (lente convergente) forma uma imagem real e invertida desse objeto, localizada exatamente sobre a retina **(figura 6.44)**; nessas condições, enxergamos nitidamente o objeto. O cérebro interpretará a imagem invertida, obtida pelo cristalino, fazendo com que enxerguemos o objeto em sua posição correta.

Conseguimos enxergar nitidamente um objeto quer ele esteja mais próximo ou mais afastado de nosso olho. Isso acontece porque a imagem está se formando sempre sobre a retina, qualquer que seja a distância do objeto ao nosso olho. Em outras palavras, a distância, D_i, da imagem ao cristalino (lente) fica constante, enquanto varia a distância, D_o, do objeto a ele. Para que isso ocorra, a distância focal do cristalino deve ser diferente para cada posição do objeto. Esse efeito é produzido pela ação dos músculos do olho, que, atuando sobre o cristalino, provocam alterações em sua curvatura. Essa propriedade do olho é denominada **acomodação visual**.

Para muitas pessoas, a imagem de um objeto não se forma exatamente sobre a retina; assim, essas pessoas não enxergam nitidamente o objeto. Isso pode ocorrer devido a alguma deformação do globo ocular ou a uma acomodação defeituosa do cristalino. Pode-se resolver esse problema com o uso de óculos ou lentes de contato.

Em pessoas com miopia, a imagem se forma na frente da retina **(figura 6.45.a)**. Para que se tenha a imagem do objeto formada sobre a retina, a pessoa com miopia deve usar óculos com lentes **divergentes** **(figura 6.45.b)**.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.



Ilustrações: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 6.45. Representação esquemática da formação da imagem em um olho humano com miopia (**a**) e a correção por meio do uso de lentes divergentes (**b**).

Atualmente, há técnicas eficientes de procedimentos cirúrgicos para corrigir a miopia, utilizando *laser*, por exemplo, ao invés de bisturi como era feito na década de 1970. O procedimento Lasik (do inglês *Laser-assisted in situ keratomileusis*) é um dos tratamentos mais populares para correção ocular. Com um feixe de *laser*, o oftalmologista modela a lente da córnea modificando seu raio de curvatura, de modo que a imagem do olho míope passe a se formar na retina.

Em pessoas com hipermetropia os raios luminosos convergem depois da retina **(figura 6.46.a)**. Isso ocorre porque essas pessoas têm um globo ocular mais curto do que o normal ou uma perda da capacidade de acomodação do olho com a idade, também chamada de "vista cansada". Esse defeito é corrigido usando-se óculos com lentes **convergentes** **(figura 6.46.b)**.

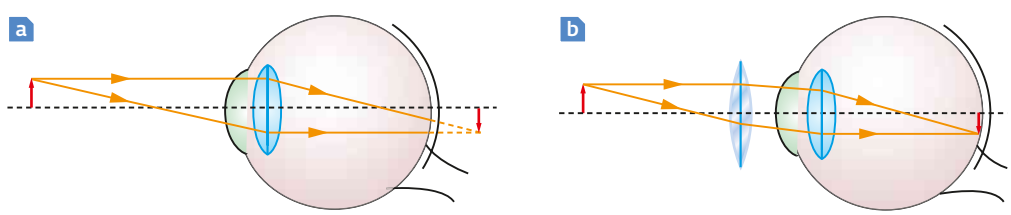
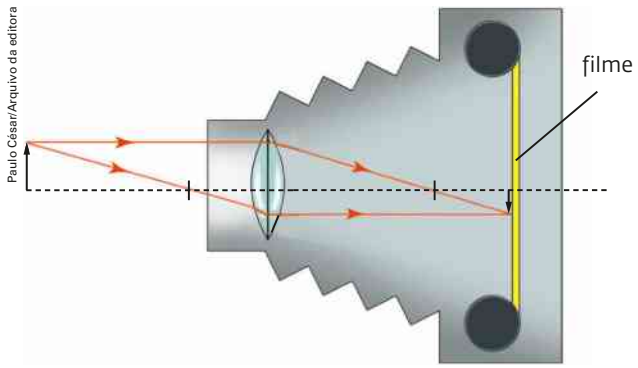


Figura 6.46. Representação esquemática da formação da imagem em um olho humano com hipermetropia (**a**) e a correção por meio do uso de lentes convergentes (**b**) .

A máquina fotográfica

A figura 6.47 mostra esquematicamente a formação da imagem em uma máquina fotográfica analógica, que faz uso de filme. Esse instrumento funciona de maneira muito semelhante ao olho humano. Um sistema de lentes, denominado **objetiva** da máquina, comporta-se como uma lente convergente formando uma imagem real e invertida do objeto a ser fotografado. Para focalizar um objeto, isto é, para que sua imagem se forme nitidamente sobre o filme, existem dispositivos especiais que nos permitem afastar ou aproximar a lente do filme, ou do sensor, no caso das máquinas digitais. Quando a focalização não é bem-feita, a imagem não se forma exatamente sobre o filme, ou sensor, e a fotografia obtida não é nítida.

A luz que vem do objeto, ao incidir no filme, provoca nele certas reações químicas que fazem com que a imagem fique aí gravada. Se você tiver a oportunidade de observar um filme fotográfico, após ter sido revelado, vai observar a imagem em negativo, isto é, as reações químicas são tais que as partes do filme que recebem mais luz (proveniente das partes mais claras do objeto) tornam-se escuras, e vice-versa.



Paulo César/Arquivo da editora

Figura 6.47. Na máquina fotográfica analógica, a imagem real de um objeto se forma sobre o filme. Representação sem escala e em cores fantasia.

A lupa

Quando um objeto é colocado entre uma lente convergente e o seu foco, obtém-se uma imagem virtual e maior do que o objeto (figura 6.39). Quanto menor for a distância focal da lente convergente, maior será a ampliação que é possível obter com ela. Quando uma lente convergente é usada nessas condições, produzindo uma imagem virtual aumentada, dizemos que ela é uma **lupa** ou, como se diz popularmente, uma **lente de aumento** (figura 6.48).



Design Pics Inc/Alamy/Latinstock

Figura 6.48. Usando uma lupa, podemos ver uma imagem virtual e aumentada dos objetos.

O microscópio

Para observar objetos muito pequenos, necessitando de um aumento maior do que o fornecido pelas lupas, usamos o **microscópio**. Apesar de serem aparelhos complexos, eles podem, simplificadamente, ser considerados constituídos de dois sistemas de lentes, que funcionam como duas lentes convergentes. A lente que fica mais próxima do objeto é denominada **objetiva** e aquela através da qual a pessoa observa a imagem ampliada é denominada **ocular** (figura 6.49).

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

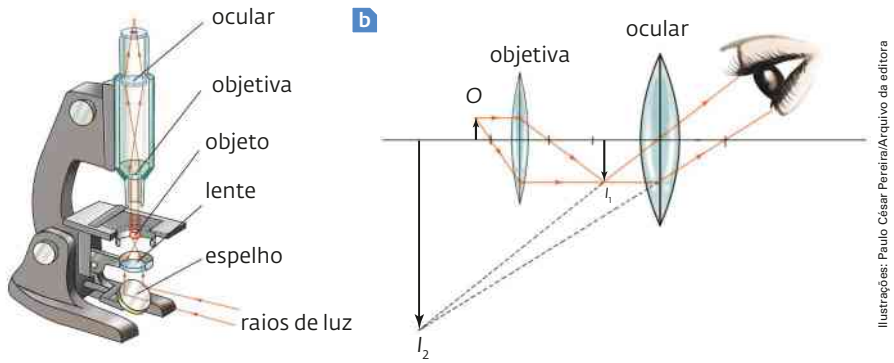


Figura 6.49. Em **a**, representação das principais partes de um microscópio e, em **b**, esquema da formação da imagem em um microscópio.

O objeto é colocado próximo ao foco da objetiva, que forma uma primeira imagem, I_1, real e ampliada, como mostra a figura 6.49.b. Essa imagem I_1 forma-se entre a ocular e o seu foco, funcionando como um objeto para essa lente. Então, a ocular fornece uma imagem final, I_2, virtual, ainda mais ampliada. A ocular atua como uma lupa, ampliando a imagem fornecida pela objetiva, que já era ampliada em relação ao objeto. Por exemplo, se a objetiva amplia 50 vezes o objeto, e a ocular provoca um aumento de 10 vezes, a ampliação total fornecida pelo microscópio será de $50 \times 10 = 500$ vezes.

O telescópio

Para observar objetos muito distantes usamos um telescópio. A imagem criada por um telescópio está mais próxima do observador do que o objeto. O telescópio é similar ao microscópio e possui duas lentes convergentes: uma objetiva, que forma uma imagem real, invertida; e uma ocular, utilizada como lente de aumento para observar a imagem que é formada pela objetiva. A imagem formada pela objetiva é menor do que o objeto porque a distância do objeto é maior do que a distância focal da objetiva (figura 6.50.a).

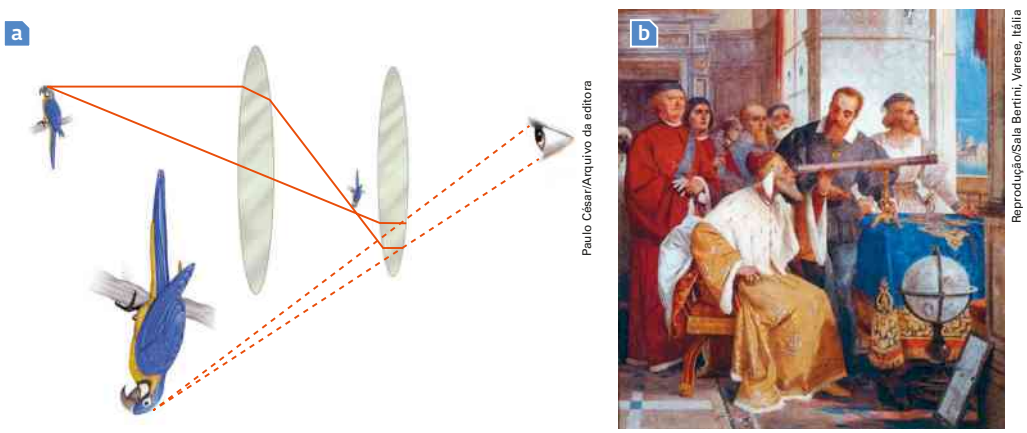


Figura 6.50. Em **a**, esquema de formação da imagem em um telescópio astronômico. Em **b**, o afresco de Giuseppe Bertini representa Galileu Galilei apresentando o telescópio ao duque Leonardo Donati (1858).

APLICAÇÕES DA FÍSICA

Microscopia moderna

Com o microscópio que acabamos de analisar, costumeiramente chamado de **microscópio óptico**, o máximo aumento que se consegue é cerca de 2 000 vezes. Consequentemente, não podemos usar esse tipo de microscópio para examinar, com nitidez, objetos de dimensões inferiores a 4 000 Å (1 Å = 1 angstrom = 0,0000000001 m = 10^{-10} m). Como a maioria das células vivas tem dimensões superiores a esse valor, o microscópio óptico pode ser usado para seu estudo.

Existem, entretanto, muitas estruturas que são bem menores que 4 000 Å, como as moléculas complexas que formam a matéria viva. Para tornar possível a observação dessas estruturas, os cientistas criaram um aparelho, denominado **microscópio eletrônico**, que utiliza feixes de elétrons (em lugar de feixes luminosos) para formar a imagem daquelas minúsculas estruturas. Esses feixes de elétrons são focalizados (desviados) por dispositivos que criam campos elétricos ou magnéticos, funcionando como uma espécie de lente. Com o microscópio eletrônico, é possível obter aumentos de até 1 milhão de vezes, permitindo, então, que sejam observadas estruturas da ordem de 10 Å, como um vírus, por exemplo o da Aids **(figura 6.51.a)**, ou uma grande molécula.

Uma tecnologia ainda mais recente de geração de imagens é o chamado **microscópio de tunelamento**. Utilizando uma propriedade da Física contemporânea, o chamado tunelamento de partículas, é dotado de uma ponta extremamente fina que troca elétrons com a amostra. Com isso, é possível ter acesso a átomos individuais, o que permite a manipulação de estruturas nanométricas, podendo se escrever ou desenhar utilizando os próprios átomos como tinta **(figura 6.51.b)**.

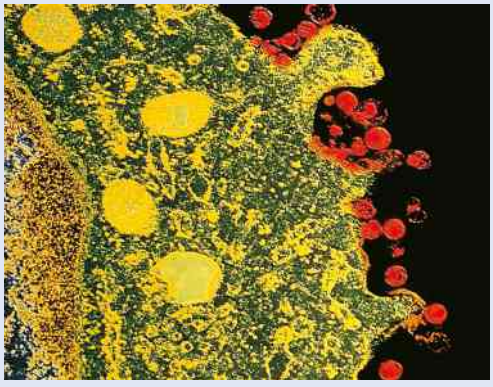
1 e **2.** Veja as respostas no Manual do Professor.

QUESTÕES

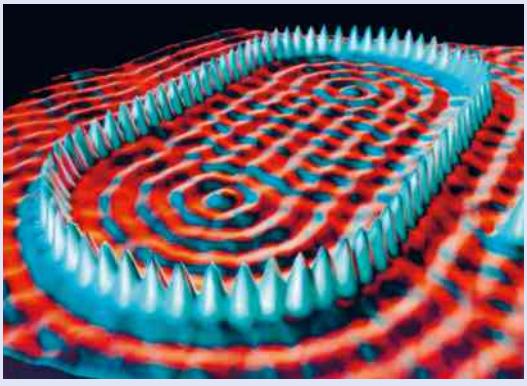
1. A Física muitas vezes aumentou a percepção da humanidade em relação ao mundo. Com o microscópio, foi possível compreender toda a riqueza de estruturas distintas que existiam nos materiais e nos objetos que já nos eram familiares, ampliando nossa compreensão do mundo vivo. Escreva sobre o quanto a Física influencia a nossa visão de mundo e discuta os pontos positivos e negativos dessa influência.

2. Uma das aplicações mais importantes dos microscópios hoje em dia é na Medicina forense, na investigação de crimes e acidentes, ajudando a compreender as circunstâncias nas quais eles aconteceram. Pesquise sobre a importância da microscopia nesse tipo de atividade e apresente suas conclusões.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.



University of Medicine & Dentrist of New Jersey/SPL/Latinstock



Reprodução/IBM Corporation

Figura 6.51. Em **a**, imagem do vírus da Aids (pequenas esferas vermelhas), fornecida por um microscópio eletrônico. A área verde é o citoplasma de um linfócito infectado pelo vírus. Em **b**, a imagem obtida em um microscópio de tunelamento (STM), chamada de currais quânticos, criados por meio da manipulação de átomos individuais de ferro (cones azuis) depositados sobre uma superfície de cobre (em vermelho). É uma técnica que desperta grande interesse para a fabricação de dispositivos eletrônicos na escala atômica.

25. a) Maior, porque a imagem fornecida pela objetiva deve ser real.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

22. Uma pessoa não consegue ver nitidamente os objetos porque suas imagens se formam entre o cristalino e a retina.
a) Como se chama o defeito de visão que essa pessoa tem? Miopia.
b) Para corrigir esse defeito, a pessoa deverá usar óculos com lentes convergentes ou divergentes? Divergentes.

23. Suponha que você esteja observando nitidamente um objeto distante. Logo depois, você passa a observar, também nitidamente, um objeto próximo. Na acomodação de seu olho, a distância focal do cristalino aumentou ou diminuiu? Diminuiu.

24. Considerando a **figura 6.48**, responda:
a) A lupa que a pessoa está usando é constituída de uma lente convergente ou divergente? Convergente.
b) O animal, observado através da lupa, está situado a uma distância da lente maior, menor ou igual a sua distância focal? Menor.
c) A imagem, vista pelo observador, é real ou virtual? Virtual.

25. a) No microscópio, o objeto é geralmente colocado muito próximo da objetiva **(figura 6.49)**. A distância do objeto a essa lente, entretanto, deve ser maior, menor ou igual a distância focal? Por quê?
b) Qual é o objeto para a ocular de um microscópio? A imagem real fornecida pela objetiva.
c) A imagem final, fornecida pela ocular do microscópio, é real ou virtual? Virtual.
d) A imagem final, vista por um observador em um microscópio, é direta ou invertida em relação ao objeto colocado diante da objetiva? Invertida.


Dynamic Graphics/Arquivo da editora


Pixtal/Arquivo da editora

CHRISTIAN HUYGHENS (1629-1695)
Filho de uma conhecida família holandesa, estudou na Universidade de Leiden, morou vários anos em Paris e foi membro fundador da Academia de Ciências da França. Astrônomo, matemático e físico, entre seus trabalhos podemos destacar o estabelecimento da teoria ondulatória da luz, uma série de observações astronômicas dos anéis de Saturno e várias contribuições à dinâmica dos objetos.

6.7 A natureza da luz

Embora os trabalhos de Newton relacionados com a Mecânica tenham sido aqueles que lhe deram renome, os estudos e as teorias que ele elaborou no campo da Óptica foram também muito importantes. Em sua obra, *Opticks*, publicada em 1704, Newton desenvolveu um estudo bastante amplo sobre os fenômenos luminosos. Duas das ideias defendidas por Newton nesse tratado serão apresentadas e comentadas a seguir: sua concepção sobre a natureza da luz e a teoria das cores dos objetos.

Origem da polêmica Newton × Huyghens

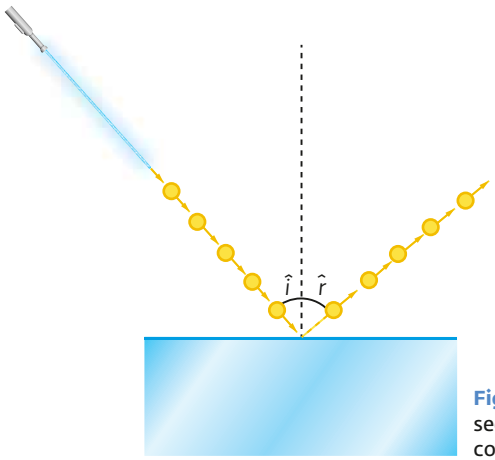
Desde a Antiguidade, alguns filósofos gregos acreditavam que a luz fosse constituída de pequenas partículas, propagando-se em linha reta com velocidade muito grande. Essas ideias prevaleceram durante vários séculos até que, por volta de 1500, Leonardo da Vinci, percebendo a semelhança entre a reflexão da luz e o fenômeno do eco, levantou a hipótese de que a luz, como o som, poderia ser um tipo de movimento ondulatório.

Essas duas concepções sobre a natureza da luz deram origem, no século XVII, a duas grandes correntes do pensamento científico: uma delas, liderada por Newton, favorável à ideia de que a luz era constituída de partículas (modelo corpuscular da luz), e a outra, tendo à frente o físico holandês C. Huyghens, defendendo a hipótese de que a luz seria uma onda (modelo ondulatório da luz). Essa divisão de opiniões provocou uma intensa polêmica entre esses dois eminentes cientistas. Um esclarecimento para essa disputa só veio a ser alcançado no século XIX, muitos anos após a morte de Huyghens e de Newton.

O modelo corpuscular da luz

Tentando justificar o seu modelo corpuscular, Newton chamou a atenção para o fato de que pequenas esferas, colidindo elasticamente contra uma superfície lisa, são refletidas de tal modo que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão, exatamente como acontece com a luz. Portanto, em relação ao fenômeno da reflexão, é válido considerar um feixe de luz como constituído por um conjunto de partículas que se refletem elasticamente ao encontrar uma superfície lisa **(figura 6.52)**.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.



Ilustrações: Alex Argozino/Arquivo da editora

Figura 6.52. Reflexão da luz segundo o modelo corpuscular de Newton.

Para descrever como Newton explicava o fenômeno da refração, consideremos a **figura 6.53**. Nessa figura, um feixe luminoso, propagando-se no ar (meio 1), refrata-se ao penetrar na água (meio 2), aproximando-se da normal. Segundo Newton, isso ocorre porque as partículas que constituem o feixe, ao se aproximarem da água, seriam solicitadas por uma força de atração, que provocaria uma mudança na direção do movimento delas **(figura 6.53)**. Portanto, a ação dessa força sobre as partículas seria responsável pela refração do feixe luminoso.

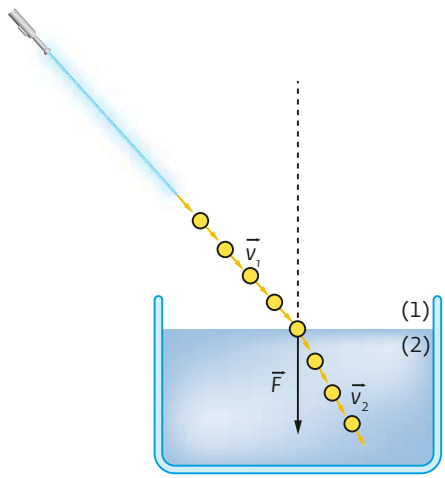


Figura 6.53. De acordo com a teoria corpuscular, a velocidade da luz na água deveria ser maior do que no ar.

Observe que, como consequência dessa ação, as partículas teriam sua velocidade aumentada ao penetrar na água, isto é, deve-se ter $v_2 > v_1$ na **figura 6.53**. Em outras palavras, de acordo com o modelo corpuscular de Newton, a velocidade da luz na água deveria ser maior do que no ar. Naquela época não foi possível verificar se essa conclusão era correta, pois não eram conhecidos métodos capazes de medir a velocidade da luz com precisão suficiente.

Newton observa a dispersão da luz branca

O primeiro trabalho científico publicado por Newton (em 1672) apresentava suas ideias sobre a natureza das cores. A interpretação dada por ele, nesse trabalho, sobre a dispersão da luz branca e sua teoria sobre as cores dos objetos permanecem aceitas até os dias atuais, ao contrário do que ocorreu com seu modelo corpuscular da luz.

Muito antes de Newton, já era conhecido o fato de que a luz branca, ao atravessar um prisma de vidro, dava origem a um feixe colorido. Acreditava-se, naquela época, que a luz branca (proveniente do Sol) era uma luz pura e que as cores apareciam em razão das impurezas que o feixe recebia ao atravessar o vidro.

Trabalhando no polimento de algumas peças de vidro para estudos de Óptica, Newton conseguiu obter um prisma triangular e interessou-se em realizar a famosa experiência da dispersão da luz branca **(figura 6.54)**.



Science Photo Library/Latinstock

Figura 6.54. Newton usou um prisma de vidro, construído por ele próprio, para observar a dispersão da luz branca.

Newton usou, então, pela primeira vez, a palavra latina *spectrum* para denominar esse conjunto de cores. Como não estivesse de acordo com a ideia de que as cores são produzidas por impurezas acrescentadas à luz branca, ele realizou uma experiência que mostrou ser falsa essa antiga teoria: deixando apenas uma das cores do espectro passar através de um segundo prisma, Newton verificou que esse feixe luminoso emergia do prisma sem sofrer qualquer alteração. Concluiu, então, que um prisma nada acrescenta a um feixe luminoso que passa através dele.

Procurando uma explicação adequada para o fenômeno, ele lançou a hipótese de não ser a luz branca uma cor pura, como se pensava até então. Ao contrário, ela seria o resultado da superposição ou mistura de todas as cores do espectro. Ao passar pelo prisma, a luz branca se decompõe, porque cada cor se refrata sob um ângulo diferente. Essas ideias de Newton são até hoje consideradas corretas. No mesmo trabalho em que apresentou essa ideia sobre a composição da luz branca, Newton desenvolveu um estudo sobre as cores dos objetos. A teoria proposta por ele é exatamente aquela que analisamos também na seção 6.3.

Ou seja, um objeto iluminado com luz branca se apresenta verde, por exemplo, porque absorve grande parte das demais cores que constituem a luz branca, refletindo preferencialmente a luz verde.

A teoria das cores de Newton encontrou violenta oposição por parte de vários cientistas da época, especialmente do físico inglês R. Hooke. Essas objeções causaram tamanhos dissabores a Newton que ele, para evitar envolver-se em outras polêmicas, resolveu não mais divulgar seus trabalhos. Isso fez com que permanecesse vários anos em quase completo isolamento. Somente catorze anos mais tarde, por insistência de seu amigo E. Halley, Newton decidiu publicar a sua famosa obra *Princípios matemáticos da Filosofia natural*. Entretanto, para publicar o seu tratado *Opticks*, com suas teorias sobre as propriedades da luz, ele aguardou a morte de Hooke. De fato, Hooke faleceu em 1703, e essa obra de Newton só veio a ser editada em 1704.

Observações experimentais favorecem o modelo ondulatório da luz

O modelo ondulatório, defendido por Huyghens, também conseguia explicar satisfatoriamente a reflexão e a refração da luz. Como veremos no capítulo seguinte, uma onda qualquer se reflete e se refrata seguindo as mesmas leis da reflexão e da refração de um feixe luminoso. Assim, as duas teorias sobre a natureza da luz apresentavam-se igualmente válidas, e era muito difícil optar por uma delas.

Entretanto, no início do século XIX, foi possível observar, com a luz, o fenômeno de **interferência**. Como a interferência é um fenômeno característico do movimento ondulatório, o fato de ser possível observá-lo com feixes luminosos apresenta-se como uma evidência extremamente favorável ao modelo ondulatório. Apesar disso, em virtude do grande prestígio de Newton, o modelo corpuscular continuava a ser aceito por uma significativa parcela da comunidade científica da época, principalmente na Inglaterra.

Em 1862, um acontecimento importante dava fim a essa disputa que vinha se prolongando por mais de 150 anos. Nesse ano o físico francês Foucault conseguiu medir a velocidade da luz na água, verificando que seu valor era menor do que no ar. A teoria corpuscular de Newton, ao explicar a refração, previa exatamente o contrário. Dessa maneira, as ideias de Newton sobre a natureza da luz tiveram de ser definitivamente abandonadas, pois elas levavam a conclusões que estavam em desacordo com os resultados experimentais.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

As respostas dos exercícios 32 e 33 dependem do aprofundamento das pesquisas dos alunos.

26. Qual foi a comparação feita por Leonardo da Vinci que o levou a sugerir que a luz poderia ter uma natureza ondulatória?

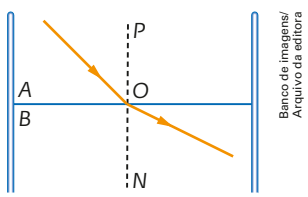
27. Explique, sucintamente, a origem da polêmica entre Newton e Huyghens.

28. De acordo com o modelo corpuscular, a velocidade da luz:

a) Na água deveria ser maior, menor ou igual a sua velocidade no ar? Maior.

b) No vidro deveria ser maior, menor ou igual a sua velocidade na água? Maior.

29. A figura abaixo representa um feixe de luz sofrendo refração ao passar do meio *A* para o meio *B*.



Banco de imagens/ Arquivo da editora

a) De acordo com o modelo corpuscular da luz, a força que atua nas partículas do feixe luminoso, ao passar de *A* para *B*, estaria dirigida de *O* para *P* ou de *O* para *N*? De *O* para *P*.

b) Tendo em vista a resposta da questão **a**, o modelo corpuscular iria prever que a velocidade da luz em *B* seria maior, menor ou igual à sua velocidade em *A*? Menor.

c) De acordo com o estudo feito neste capítulo, medidas experimentais da velocidade da luz em *A* e *B* confirmariam a resposta da questão **b**? Não.

30. Por que a experiência de Foucault, descrita no capítulo anterior, fez com que fosse definitivamente abandonado o modelo corpuscular da luz?

31. Descreva a experiência realizada por Newton, na qual ficou evidenciado que um prisma de vidro não acrescenta impurezas à luz que passa através dele.

32. Faça uma pesquisa procurando descobrir por que Newton usou a palavra "espectro" para designar o que observou ao realizar a experiência da dispersão da luz branca em um prisma (consulte um dicionário etimológico, por exemplo).

33. O modelo newtoniano para explicar as cores foi muito bem aceito, sofrendo críticas mais fortes somente cerca de um século depois, no período classificado romântico, com os trabalhos do filósofo alemão Johann Wolfgang von Goethe. Converse com o professor de História sobre esse período, em especial sobre como os filósofos e literatos românticos se sentiam em relação à Ciência. Essa percepção dos românticos tem alguma similaridade com nosso período atual?

Não escreva no livro!

26. A reflexão da luz foi comparada com a reflexão do som (eco).
27. Newton era adepto da teoria corpuscular da luz e Huyghens defendia o modelo ondulatório.

30. A experiência de Foucault mostrou que a velocidade da luz na água é menor do que no ar, ao contrário do que previa o modelo corpuscular.
31. Newton fez um feixe de luz monocromática passar por um prisma e verificou que o feixe não sofreu nenhuma alteração.

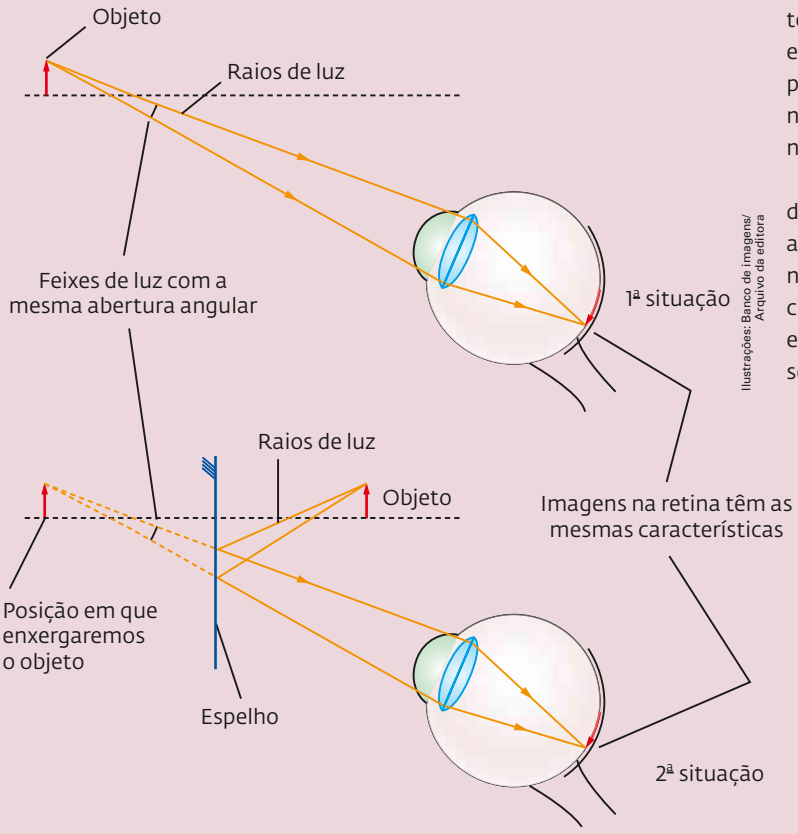
INTEGRANDO IMAGEM E O SENTIDO DA VISÃO

Dos nossos cinco sentidos, pode-se dizer que a visão é o que mais se destaca na nossa interação com o mundo. Afinal, é muito comum tomarmos decisões baseados em imagens que ela nos fornece (figura 6.55). Daí chegarmos a acreditar que até dependemos mais da visão do que dos outros sentidos. Mas será que realmente enxergamos o que olhamos?



Andre Dib/Pulsar Imagens

Figura 6.55. A visão nos fornece as imagens do mundo a nossa volta. Mirante no Baixão das Andorinhas, Parque Nacional da Serra da Capivara, São Raimundo Nonato (PI). Fotografia de 2013.



Ilustrações: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 6.56. Exemplo de situação em que os objetos vistos são iguais e estão no mesmo lugar. Representação sem escala e em cores fantasia.

Apesar de terem significados muito próximos, os verbos *olhar* e *enxergar* são distintos: *olhar* é "dirigir os olhos a"; e *enxergar* é "perceber pela visão, ver".

Nesta unidade aprendemos um pouco sobre a visão e a formação de imagens na retina (releia o tópico *O olho humano*). Dissemos que a "mensagem" da imagem projetada no fundo do olho (na retina) é levada ao cérebro para que enxerguemos o que estamos olhando. Chamaremos, então, de **objeto olhado** aquele para o qual dirigimos o nosso olhar e de **objeto visto** a imagem criada por nosso cérebro do objeto que olhamos.

Mas, para responder à questão inicial deste texto, precisamos nos aprofundar um pouco mais no assunto. Imagine duas situações: na primeira, o olho recebe a luz que saiu de um objeto, projetando a imagem desse objeto na retina; na segunda, *não há um objeto*, mas chega ao olho um feixe de luz com as mesmas características (intensidade, cor, etc.) e também com a mesma abertura angular do feixe de luz da primeira situação. Por mais surpreendente que possa parecer, nessa segunda situação, a imagem projetada na retina terá as mesmas características da primeira, fazendo com que os objetos vistos nos dois casos sejam iguais e pareçam estar posicionados no mesmo lugar. Um exemplo concreto desse fenômeno foi apresentado no capítulo 5, quando estudamos espelhos planos, e está representado na figura 6.56.

Esse fenômeno sugere que a imagem formada pelo sentido da visão (objeto visto) depende apenas das características da **luz** que chega aos nossos olhos: se, na ausência do objeto, a luz chega da mesma forma que chegaria se o objeto estivesse presente, enxergamos o objeto como se ele realmente estivesse presente.

Mas por que a imagem vista só depende da luz?

A luz que sai de um objeto transporta consigo as informações que caracterizam visualmente esse objeto: seu tamanho, seu formato, sua cor, etc. Como vimos, essa luz é focalizada para formar a imagem projetada no fundo do olho. Na retina estão presentes os cones e os bastonetes, dois tipos de células que contêm proteínas sensíveis à luz. Essas células costumam ser chamadas de *células fotorreceptoras*, ou simplesmente *fotorreceptores*. Nelas, o "aparato" bioquímico presente permite que a informação trazida pela luz seja transformada em um tipo de informação que pode ser transmitida por impulsos nervosos até o cérebro. Portanto, a função dos fotorreceptores é captar a informação codificada na luz e transformá-la em informação eletroquímica a ser transmitida por impulsos nervosos. Assim, podemos pensar nos fotorreceptores como "conversores", isto é, eles "convertem" as "mensagens" que recebem. Se receberem feixes idênticos de luz, farão a mesma "conversão". É por esse motivo que aquilo que enxergamos depende apenas da luz incidente em nossa retina.

Mas como o objeto visto se forma a partir da imagem projetada na retina?

As informações visuais captadas na retina são convertidas em impulsos nervosos até uma região posterior do cérebro (o córtex visual) por meio de um nervo chamado *nervo óptico*. O córtex visual é a região que recebe os impulsos nervosos dos olhos e os encaminha para outras regiões do cérebro. Finalmente, por mecanismos ainda não completamente compreendidos, o cérebro interpreta as informações transmitidas pelos impulsos nervosos e elabora a imagem do objeto olhado. Só então que tomamos consciência daquilo que olhamos, ou seja, nesse momento forma-se o objeto visto. A **figura 6.57** é um esquema simplificado dos estágios descritos acima.

Preste atenção a alguns pontos desse mecanismo que lhe ajudarão a responder à pergunta inicial:

- O único elemento que sai do objeto e que utilizamos para enxergá-lo é a luz.
- As informações que dizem respeito ao objeto, transmitidas pela luz, são transformadas pelos fotorreceptores na retina e transmitidas por impulsos nervosos até o cérebro.
- O cérebro é responsável por interpretar essas informações e recriar a imagem que havia sido projetada na retina.
- Essa é a imagem final, que tomamos consciência: o objeto visto.

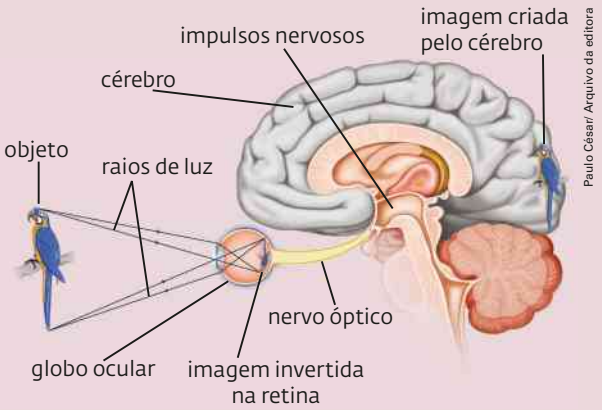


Figura 6.57. Mecanismo biofísico da visão. Representação sem escala e em cores fantasia.

Com isso, concluímos que:

- o objeto visto é resultado de um processo bastante complexo;
- quando as pessoas olham para o mesmo objeto, ainda que atribuam o mesmo nome àquilo que estão enxergando, não há como garantir que os objetos vistos sejam iguais, pois todo o sistema físico-químico de formação e interpretação de imagem – desde os componentes do olho aos fotorreceptores até o cérebro – é único para cada um de nós. Quando duas pessoas olham para uma mesma cadeira, por exemplo, o objeto olhado é o mesmo, mas o objeto visto é único para cada uma delas. Desse modo, apesar de as cadeiras olhadas serem iguais, não há como saber se as cadeiras vistas também são iguais.

Pesquise e responda

1. Pesquise na internet: **1)** e **2)** Veja as respostas no Manual do Professor.

- as diferenças entre cones e bastonetes;
- a cor predominantemente captada por cada um dos três tipos de cones.

2. No estudo sobre a radiação emitida por um corpo (capítulo 3), vimos que, à temperatura ambiente, qualquer objeto do nosso cotidiano emite radiação infravermelha. Vimos que essa radiação, assim como a luz visível, é formada por ondas eletromagnéticas. Com base no texto e na pesquisa feita, procure entender por que, dentre esses dois tipos de ondas eletromagnéticas que saem do objeto, apenas a faixa delimitada entre o vermelho e o violeta é chamada de *luz visível*.

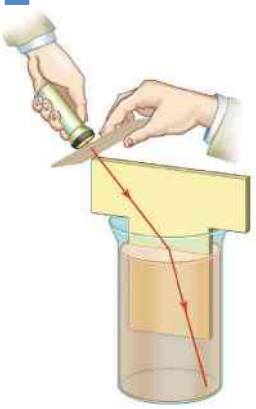
PRATIQUE FÍSICA

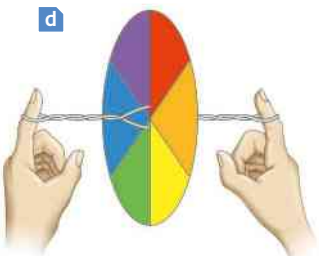
EM EQUIPE

Não escreva no livro!









Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

1. Como percebemos as três dimensões no espaço

Mesmo sem que percebamos, cada um de nossos olhos forma, em nossas retinas, imagens ligeiramente diferentes do mundo que nos rodeia. O cérebro superpõe a imagem formada pelo olho esquerdo à formada pelo olho direito e combina as duas imagens para nos dar a sensação tridimensional. Com isso, nosso cérebro consegue determinar o tamanho de um objeto e a distância a que ele se encontra de nós. Esse fenômeno é chamado de **visão binocular** ou **estereoscópica** (estéreo = relevo e escópio = = visão). Usando apenas um olho, perdemos a visão estereoscópica e, consequentemente, a tridimensionalidade das imagens, mas ainda é possível obter um alto nível de profundidade em razão das sombras, da geometria e da posição relativa entre os objetos.

As experiências seguintes são muito interessantes e lhe permitirão verificar esse fenômeno.

a) Feche um dos olhos e aponte com um dedo um objeto situado do outro lado da sala onde você está. Sem mexer a mão, feche o olho aberto e abra aquele que estava fechado.

b) Coloque sua mão verticalmente, a cerca de 10 cm de seu nariz, perpendicularmente a seu rosto. Feche o olho direito e observe que lado de sua mão você está vendo. Feche, então, o olho esquerdo e abra o direito. Que lado de sua mão você vê?

c) Enrole uma folha de papel, formando um tubo de aproximadamente 25 cm. Ponha o tubo diante de seu olho direito (veja a figura **b**). Coloque sua mão aberta, com a palma voltada para você, ao lado do tubo (encostada nele). Aproxime lentamente a mão de seus olhos. O que você vê?

2. Você poderá observar a refração de um feixe luminoso reproduzindo a montagem mostrada na figura dessa experiência. Encha um copo com água e introduza nele um cartão, ou uma cartolina branca, cortado e apoiado no recipiente da maneira mostrada na figura **c**.

Usando uma lanterna e, diante dela, um anteparo com uma fenda, você obterá um estreito feixe de luz. Faça esse feixe incidir ao longo do cartão, procurando torná-lo o mais bem definido possível (para isso, gire a lanterna, ajuste o anteparo até conseguir a melhor posição e realize a experiência em local escurecido). Observe, sobre o cartão, a trajetória do feixe luminoso antes e depois de penetrar na água. Faça variar o ângulo de incidência e verifique que, quando o feixe incide perpendicularmente à superfície da água, ele não muda a direção e que, quanto maior for o ângulo de incidência, mais acentuada será a refração.

Se você dispuser de um bloco de vidro ou de outros líquidos, procure repetir essa experiência usando esses materiais.

3. Nesta experiência você vai determinar a distância focal de uma lente convergente usando dois processos diferentes.

1º) Faça um feixe de luz solar (feixe de raios paralelos) passar através da lente e receba o feixe convergente sobre um anteparo. Desloque lentamente a lente (ou o anteparo) até que a mancha clara que se forma sobre o anteparo se reduza a um círculo de menor tamanho possível.

Nessas condições, o anteparo estará situado no foco da lente. Meça, então, a distância focal dessa lente e anote o seu valor.

2º) Em um ambiente escurecido, coloque uma vela acesa diante da lente de tal maneira que a imagem da chama possa ser recebida sobre um anteparo. Deslocando cuidadosamente a lente (ou o anteparo) procure obter, sobre o anteparo, uma imagem da chama o mais nítida possível.

Meça as distâncias da chama e de sua imagem à lente, isto é, os valores de D_o e D_i. Usando a equação das lentes e conhecendo esses valores, calcule o valor da distância focal, f, da lente.

Os dois processos de medida forneceram resultados razoavelmente concordantes para a distância focal dessa lente? Caso isso não aconteça, repita a experiência, procurando realizá-la com mais cuidado.

4. Nossos olhos, ao serem sensibilizados pela luz proveniente de um objeto, conservam essa imagem durante cerca de 0,1 s. Então, quando duas ou mais imagens se superpõem na retina, com intervalo igual ou inferior a esse, temos a sensação de continuidade (é graças a essa propriedade que, ao receber no cinema imagens sucessivas de um acontecimento, projetadas na tela, temos a sensação de que há movimento). A experiência seguinte está relacionada a isso.

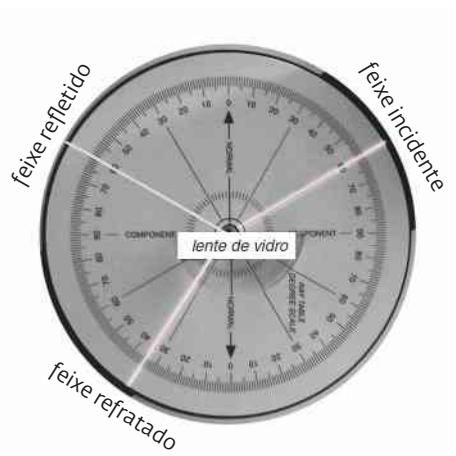
Para comprovar que a luz branca é uma mistura de várias cores, tome um disco de cartão branco, faça dois furos no cartão e enfie nele um cordão, formando um brinquedo denominado corrupio (veja a figura **d**). Colorindo os diversos setores do corrupio com cores diversas, como está mostrado (vermelho, alaranjado, amarelo, verde, azul e violeta) e girando-o, você verá o disco tornar-se praticamente branco. Tente analisar o que está acontecendo, baseando-se no fenômeno da retenção da imagem na retina.

1. Sabe-se que a luz do Sol gasta 500 s para chegar à Terra. Supondo que o espaço entre o Sol e a Terra fosse totalmente preenchido com um vidro de índice de refração $n = 1{,}5$, responda:

a) A velocidade da luz nesse vidro é quantas vezes menor do que a velocidade da luz no vácuo? 1,5 vez menor

b) Então, nesse caso, qual seria o tempo que a luz solar gastaria para chegar à Terra? 750 s

2. A figura abaixo mostra a fotografia de um estreito feixe de luz se refratando ao passar do ar para o vidro.



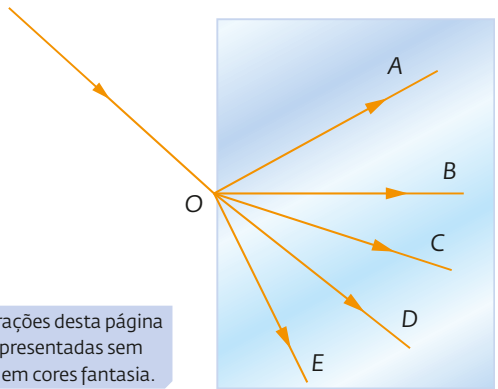
Profª Drª Marisa A. Cavalcante/Gopef/PUC-SP

a) Qual é o valor do ângulo de incidência, θ_1, para esse feixe? E do ângulo de refração θ_2? $\theta_1 = 60°$; $\theta_2 = 35°$

b) A partir dos valores obtidos em **a**, determine o índice de refração daquele vidro. $n = 1{,}5$

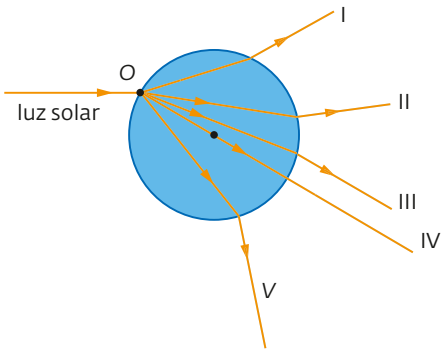
3. Um raio de luz, propagando-se no ar, incide no ponto *O* de um bloco de vidro, como mostra a figura. Esse raio, após se refratar, terá sua trajetória no interior do vidro mais bem representada pelo raio: c

a) *OA*.
b) *OB*.
c) *OC*.
d) *OD*.
e) *OE*.



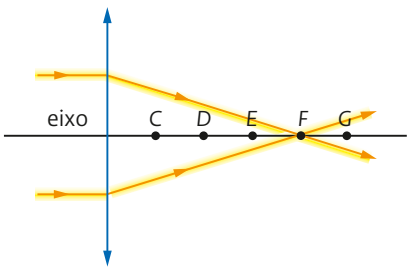
As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

4. Um raio de luz solar incide no ponto *O* de uma gota de chuva esférica, em suspensão no ar (o ponto *C* é o centro da gota). A figura a seguir mostra cinco trajetórias, desenhadas por um estudante, tentando representar o percurso seguido por esse raio luminoso ao atravessar a gota. Apenas uma dessas trajetórias está correta. Qual delas? Trajetória III.



Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

5. Um feixe luminoso, de raios paralelos, incide sobre uma lente, cuja distância focal vale 20 cm, convergindo no ponto *F* (veja a figura). Em qual dos pontos indicados na figura devemos colocar uma lente divergente, de 5,0 cm de distância focal, para que o feixe luminoso, após atravessá-la, seja paralelo ao eixo do sistema? (Sabe-se que $CD = DE = EF = FG = 5{,}0$ cm.) Ponto *E*.



6. (**Enem**) Alguns povos indígenas ainda preservam suas tradições realizando a pesca com lanças, demonstrando uma notável habilidade. Para fisgar um peixe em um lago com águas tranquilas o índio deve mirar abaixo da posição em que enxerga o peixe. Ele deve proceder dessa forma porque os raios de luz: e

a) refletidos pelo peixe não descrevem uma trajetória retilínea no interior da água.
b) emitidos pelos olhos do índio desviam sua trajetória quando passam do ar para a água.
c) espalhados pelo peixe são refletidos pela superfície da água.
d) emitidos pelos olhos são espalhados pela superfície da água.
e) refletidos pelo peixe desviam sua trajetória quando passam da água para o ar.

7. (**UFSM-RS**) Na pesca com lança, os índios sabem que, jogando a lança na direção do rabo de um peixe em repouso, podem acertar a cabeça. Por trás desse conhecimento empírico, está o conceito físico de: a

a) refração.
b) reflexão.
c) difração.
d) interferência.
e) polarização.



Éden Maia/Projeto Social Rei Davi

Músicos tocando violinos.
Manaus (AM). Fotografia de 2014.

CAPÍTULO 7

Movimento ondulatório

Som, vibração.

20 hertz a 20 000 hertz.

Aumentando a tensão da corda, aumentamos também a velocidade de propagação dessa onda na corda e, consequentemente, sua frequência.

Produzir som é simples, mas fazer música não é tão fácil. Uma nota musical não é um som qualquer. Para produzir som instrumental, por exemplo, o músico deve fazer as cordas, as membranas ou o ar do instrumento vibrar de forma bem específica.

Por isso, os instrumentos musicais devem ser constantemente afinados, para que não emitam sons que destoem da melodia. A essência da afinação de um instrumento é que ele seja capaz de reproduzir sons iguais ao padrão das notas musicais.

O sucesso de uma apresentação solo ou de uma orquestra se deve ao talento individual de cada músico, associado à intensidade, à altura e ao timbre do som que os instrumentos proporcionam.

PARA INICIAR A CONVERSA

Identifique no texto que acabou de ler palavras que se relacionam com o tema "ondas".

A audição humana está limitada a ouvir sons em quais valores de frequência?

Por que, na afinação de um violão, para tornar o som mais agudo, devemos apertar a tarraxa, aumentando assim a força tensora da corda?

7.1 Movimento harmônico simples

É comum observarmos fenômenos naturais ou situações do cotidiano em que objetos ficam oscilando ou balançando de um lado para o outro, como o movimento de um balanço no parque de diversões, galhos de árvores ou o vaivém do pêndulo de um relógio. Instrumentos musicais produzem sons pela vibração de cordas – como o violão e o violino –, de membranas ou lâminas e colunas de ar – como o tambor e a flauta. Neste capítulo, vamos nos dedicar a estudar esses fenômenos, caracterizando-os a partir de suas propriedades gerais.

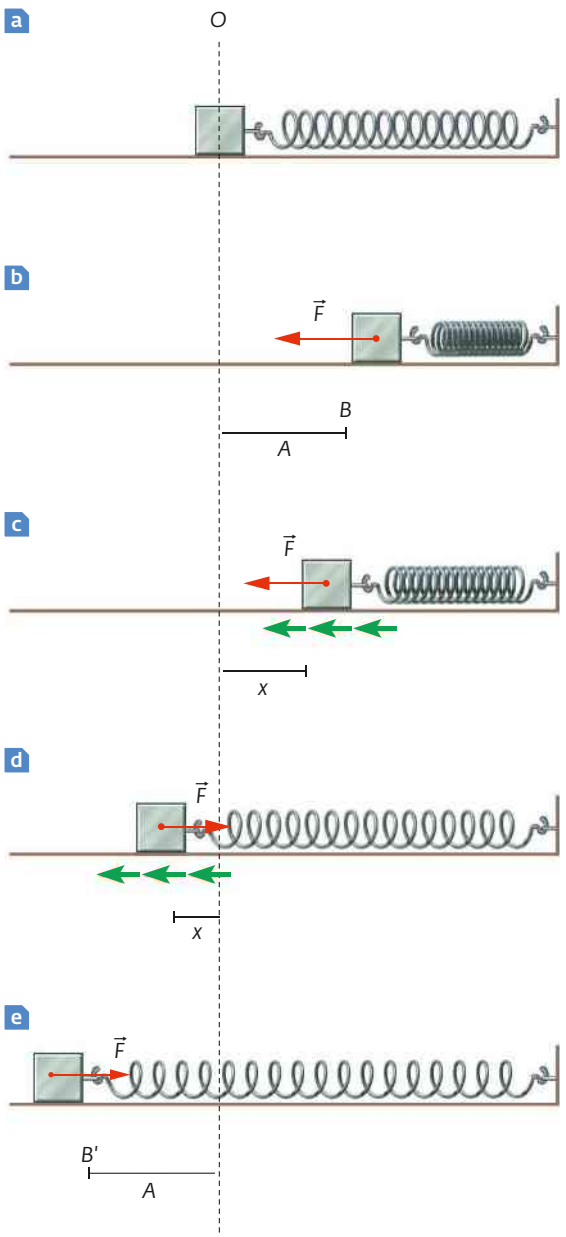
O que é um movimento harmônico simples

Vamos imaginar que um bloco, apoiado sobre uma superfície horizontal, sem atrito, esteja preso na extremidade de uma mola com constante elástica k, como mostra a **figura 7.1.a**. A outra extremidade da mola está fixada em uma parede, e o ponto O representa a posição de equilíbrio do bloco, isto é, nessa posição a mola não exerce força sobre ele, pois ela não está deformada, ou seja, nem comprimida ou esticada.

Ao começarmos a empurrar o bloco, comprimindo a mola de uma distância A até a posição B **(figura 7.1.b)**, a mola passará a exercer sobre o bloco uma força $\vec{F}$, dirigida para a posição de equilíbrio. Quando soltarmos o bloco, ele será acelerado por essa força, e sua velocidade crescerá à medida que ele se aproximar do ponto O **(figura 7.1.c)**. A força $\vec{F}$ é proporcional à deformação, x, da mola e dada pela lei de Hooke, $F = kx$, em que k é a constante elástica da mola. Assim, à medida que o bloco se afasta de B, o valor de $\vec{F}$ diminui, anulando-se quando ele atinge o ponto O.

Quando o bloco ultrapassa a posição de equilíbrio, a mola está esticada e passa a exercer uma força dirigida para o ponto O de sentido contrário à velocidade do bloco **(figura 7.1.d)**. O movimento é, então, retardado e, no ponto B', simétrico a B, a velocidade do bloco se anula **(figura 7.1.e)**. Partindo de B', o bloco é novamente acelerado para O, ultrapassa esse ponto, sendo, então, retardado pela mola até alcançar o ponto B. Como não há atrito nem resistência do ar, esse movimento, conhecido como oscilador massa-mola, mantém o movimento de vaivém, entre os pontos B e B', indefinidamente.

Quando um objeto executa um movimento como esse, indo e voltando sobre uma mesma trajetória, dizemos que ele está **vibrando** ou **oscilando** entre os pontos B e B'. No caso mostrado na **figura 7.1**, no qual a força que atua no objeto é proporcional a sua distância até a posição de equilíbrio ($F = kx$), o movimento oscilatório é denominado **movimento harmônico simples**.



Ilustrações: Formato/Arquivo da editora

Figura 7.1. Um bloco, preso à extremidade de uma mola, oscila executando um movimento harmônico simples. Representação sem escala e em cores fantasia.

Amplitude, frequência e período

No nosso dia a dia, podemos encontrar várias outras situações em que um objeto executa um movimento vibratório (ou oscilatório): uma pessoa sobre uma plataforma vibratória em uma academia (figura 7.2.a), um ponto de uma corda esticada posta a oscilar (figura 7.2.b), uma criança em um balanço (figura 7.2.c), etc. Em todos esses casos, o objeto que oscila, ao ser afastado de sua posição de equilíbrio, fica sujeito à ação de uma força que tende a trazê-lo de volta para essa posição. Por esse motivo, essa força que faz o objeto oscilar é denominada **força restauradora**.

A distância entre a posição de equilíbrio e a posição extrema ocupada por um objeto que oscila é denominada amplitude, *A*, do movimento.



Goran Bogicevic/Shutterstock



Andrii Muzyka/Shutterstock



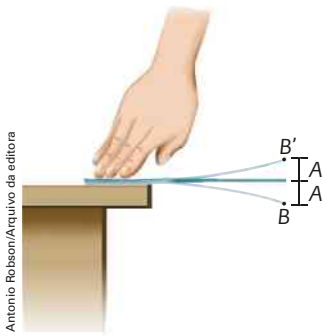
CroMary/Shutterstock

Figura 7.2. É comum encontrarmos situações em que um objeto executa movimento oscilatório.

Na figura 7.1, mostramos a amplitude, *A*, do bloco que oscila preso à mola. Quando não há atrito, a amplitude do movimento oscilatório se mantém constante, mas se o atrito não é desprezível, a amplitude diminui gradativamente até que o bloco pare. Nessas condições, o movimento é denominado **movimento harmônico amortecido**.

Quando o objeto vai de uma posição extrema a outra e retorna à posição inicial, dizemos que ele efetuou uma **oscilação completa** ou um **ciclo**.

O tempo que o objeto demora para efetuar uma oscilação completa é denominado período, *T*, do movimento. O número de oscilações completas que o objeto efetua por unidade de tempo é denominado frequência, *f*, do movimento.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 7.3. Representação (sem escala e em cores fantasia) de uma lâmina vibrando.

Por exemplo, considere uma lâmina muito fina sendo segura por uma pessoa na ponta de uma mesa conforme a figura 7.3. Sabendo que a extremidade da lâmina da figura vai de *B* a *B'* e retorna a *B* 5 vezes em 1 segundo, a frequência desse movimento é:

$$f = 5 \text{ oscilações/s} \quad \text{ou} \quad f = 5 \text{ ciclos/s}$$

Logo, a frequência da lâmina é $f = 5$ hertz.

Se a lâmina executa 5 oscilações em 1 segundo, o tempo que ela gasta para efetuar 1 oscilação é de 0,2 s, ou seja, seu período *T* é:

$$T = \frac{1}{5} \text{ s ou } T = 0{,}2 \text{ s}$$

Generalizando, podemos dizer que:

Se um objeto oscila com uma frequência *f*, o seu período de oscilação, *T*, é dado por:

$$T = \frac{1}{f}$$

Dessa relação, podemos concluir que, quanto maior for a frequência com que um objeto oscila, menor será o seu período e vice-versa.

Período do movimento harmônico simples

Aplicando-se a 2ª lei de Newton a um objeto que executa movimento harmônico simples, do tipo massa-mola, como o da **figura 7.4**, é possível estabelecer uma relação entre o período T, do movimento, a massa m, do objeto, e a constante elástica k, da mola. Por meio de cálculos matemáticos (os quais não vamos nos preocupar em desenvolver aqui), podemos chegar à seguinte relação:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

Essa equação nos permite calcular o período T do movimento harmônico simples quando conhecemos os valores de m e k. Analisando essa expressão, vemos que:

1) Quanto maior for a massa do objeto, maior será o seu período de oscilação, isto é, um objeto de maior massa oscila com menor frequência, mais lentamente.
2) Quanto maior for a constante da mola (mola mais dura), menor será o período de oscilação, ou seja, maior será a frequência com que o objeto oscila.
3) A amplitude A não aparece na expressão $T = 2\pi\sqrt{m/k}$. Logo, o período **não** depende da amplitude. Apesar de ser um resultado anti-intuitivo, ele pode ser verificado experimentalmente. Por exemplo, se prendermos um objeto em uma mola e colocarmos o sistema para oscilar com uma amplitude de $A = 5$ cm e, em seguida, com uma amplitude de $A = 10$ cm, verificaremos que o período de oscilação é o mesmo em ambos os casos.



Reprodução/<http://earthphysicsteaching.homestead.com/>

Figura 7.4. Pêndulo massa-mola.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

O pêndulo simples

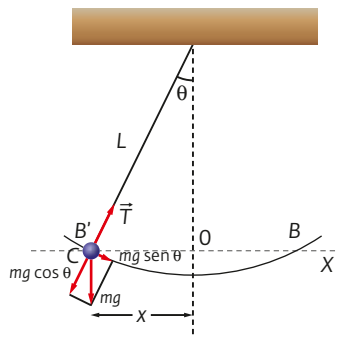
Suponha que uma pequena esfera, de massa m, esteja presa na extremidade de um fio de massa desprezível, cujo comprimento é L, oscilando em um plano vertical, como mostra a **figura 7.5**. Esse dispositivo constitui um **pêndulo simples** em oscilação. A força restauradora que mantém a esfera em oscilação é a componente de seu peso tangente à trajetória mg sen θ.

Para ângulo de oscilação (θ) pequeno a trajetória curva, BB', descrita pela esfera que oscila, pode ser considerada um segmento de reta horizontal. Com essa simplificação, é possível demonstrar que a força restauradora é proporcional à distância da esfera à posição de equilíbrio, isto é, para pequenas amplitudes o pêndulo executa um movimento harmônico simples. Nessas condições, podemos chegar à seguinte expressão, que permite calcular o período de oscilação do pêndulo simples:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

Essa expressão nos mostra que:

1) Quanto maior for o comprimento do pêndulo, maior será o seu período **(figura 7.6)**.
2) Quanto maior for o valor da aceleração da gravidade no local onde o pêndulo oscila, menor será o seu período.
3) O período do pêndulo **não** depende nem de sua massa nem da amplitude de oscilação (desde que ela seja pequena), por isso essas grandezas não aparecem na expressão de T **(figura 7.7)**.



Ilustrações: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 7.5. Uma esfera pendurada em um fio de comprimento L, oscilando com ângulo θ muito pequeno, executa um movimento harmônico simples.

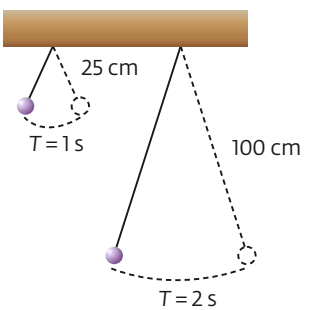


Figura 7.6. O período de um pêndulo é tanto maior quanto maior for seu comprimento. Na realidade, T é proporcional à raiz quadrada de L: quando o comprimento é multiplicado por 4, o período torna-se 2 vezes maior (pois $\sqrt{4} = 2$).

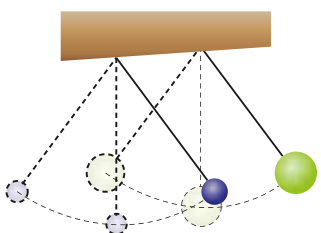


Figura 7.7. Os dois pêndulos da figura têm o mesmo comprimento, mas suas massas são diferentes. Procura-se ilustrar que, partindo juntos da mesma altura, eles oscilam juntos, isto é, ambos têm o mesmo período.

Exemplo

Em uma experiência com um pêndulo simples, como o da figura 7.5, verificou-se que a esfera suspensa, saindo de *B*, deslocava-se até *B'* e retornava a *B* 20 vezes em 10 s.

a) Qual é o período desse pêndulo?

O período do pêndulo é o tempo que ele leva para ir de *B* a *B'* e retornar a *B*, isto é, o tempo necessário para executar uma oscilação completa. Como o pêndulo executou 20 oscilações completas em 10 s, seu período vale:

$$T = \frac{10\text{ s}}{20} \quad \text{ou} \quad T = 0{,}50\text{ s}$$

b) Qual é a frequência de oscilação do pêndulo?

Tendo o pêndulo executado 20 oscilações em 10 s, o número de oscilações que ele executa em 1 s, ou seja, a sua frequência, será:

$$f = \frac{20\text{ oscilações}}{10\text{ s}} = 2{,}0\text{ oscilações/s} \quad \text{ou} \quad f = 2{,}0\text{ hertz}$$

Esse mesmo resultado pode ser obtido a partir da relação $T = 1/f$, da qual tiramos:

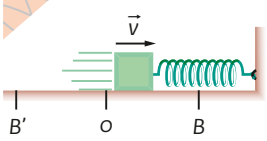
$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0{,}50} \quad \text{ou} \quad f = 2{,}0\text{ hertz}$$

c) Se a experiência fosse realizada com um pêndulo de comprimento 4 vezes maior, qual seria o seu período?

A expressão $T = 2\pi\sqrt{L/g}$ nos mostra que T é proporcional à raiz quadrada de L. Então, multiplicando L por 4, T fica multiplicado por $\sqrt{4} = 2$. Assim, o período desse pêndulo será 2 vezes maior do que o do pêndulo da primeira experiência, isto é:

$$T = 2 \cdot 0{,}50\text{ s} \quad \text{ou} \quad T = 1{,}0\text{ s}$$

VERIFIQUE O QUE APRENDEU



Formato/Arquivo da editora

Não escreva no livro!

1. Um bloco, preso a uma mola, oscila (sem atrito) entre os pontos *B* e *B'* mostrados na figura ao lado (sem escala e em cores fantasia). O ponto *O* representa a posição de equilíbrio do bloco. Para o instante em que ele passa pela posição indicada na figura, deslocando-se para a direita, responda no caderno:

a) Qual é o sentido da força restauradora que a mola exerce no bloco? Para a esquerda.

b) Então, qual é o sentido da aceleração que o bloco possui? Para a esquerda.

c) O movimento do bloco é acelerado ou retardado? Retardado.

2. Considerando o movimento do bloco do exercício anterior, diga em que ponto (ou quais pontos):

a) O módulo da força que atua no bloco é máximo. Nos pontos *B* e *B'*.

b) A força que atua no bloco é nula. No ponto *O*.

c) O módulo da velocidade do bloco é máximo. No ponto *O*.

d) A velocidade do bloco é nula. Nos pontos *B* e *B'*.

e) A força que atua no bloco muda de sentido. No ponto *O*.

3. a) Suponha que o bloco do exercício 1, em um dado instante, passasse por *O* dirigindo-se para *B*, voltasse a *B'* e retornasse a *O*. Poderíamos dizer que o bloco efetuou uma oscilação completa (1 ciclo)? Sim.

b) Um estudante, observando o movimento do bloco, verificou que ele, após passar pelo ponto *O*, em certo instante, tornou a passar 100 vezes consecutivas por esse mesmo ponto. Quantos ciclos o bloco completou? 50 ciclos.

c) Considerando que o bloco tivesse gasto 100 s para efetuar os ciclos mencionados no item anterior, qual seria a frequência desse movimento? 0,50 hertz.

d) Então, qual seria o valor do período do movimento do bloco? 2,0 s.

4. a) Suponha que, na figura 7.3, a distância *BB'* seja igual a 10 cm. Então, qual é o valor da amplitude de oscilação da extremidade da lâmina? 5,0 cm.

b) Qual é a distância que a extremidade da esfera percorre durante um intervalo de tempo igual a 2 períodos? 40 cm.

5. Um objeto executa um movimento harmônico simples, preso à extremidade de uma mola. Diga se o tempo que o objeto leva para efetuar uma oscilação completa aumentará, diminuirá ou não sofrerá alteração em cada um dos seguintes casos:

a) O objeto é substituído por outro, de massa menor. Diminuirá.

b) A mola é substituída por outra, mais macia. Aumentará.

c) O objeto é colocado em oscilação com uma amplitude menor. Não sofrerá alteração.

FÍSICA NO CONTEXTO

O pêndulo de Foucault

Em uma experiência, realizada em 1851, o cientista francês Léon Foucault utilizou um pêndulo para demonstrar, de modo convincente, que a Terra está em rotação.

Para você entender a experiência do "pêndulo de Foucault", considere a **figura 7.8**, que ilustra um pêndulo oscilando exatamente no polo norte da Terra. Sabe-se que um pêndulo, ao oscilar livremente, tende a se manter sempre no mesmo plano vertical no qual ele foi posto a oscilar. Foucault percebeu que, em virtude da rotação da Terra, para uma pessoa em repouso em sua superfície, o plano fixo no qual o pêndulo oscila estaria aparentemente girando em sentido contrário ao da rotação terrestre — o pêndulo deve ser suspenso de tal maneira que oscile livremente, isto é, que a rotação da Terra não seja transmitida a ele por meio da suspensão.

Suponha que o pêndulo da **figura 7.8** seja colocado a oscilar ao longo da linha BB' **(figura 7.9)**. A pessoa na Terra veria, portanto, essa linha de oscilação do pêndulo girar gradualmente, de modo que, após algumas horas, ele estaria oscilando ao longo da linha CC'. Depois de 6 horas, por exemplo, como a Terra efetuou 1/4 de volta em torno de seu eixo, a pessoa passaria a ver o pêndulo oscilar na direção DD' (perpendicularmente à direção inicial, BB'). Após 12 horas (a Terra completou 1/2 volta de sua rotação completa), o pêndulo estaria oscilando novamente na direção BB'.

Tendo essas ideias em mente, Foucault construiu um grande pêndulo sustentado por um fio de aço com cerca de 70 m de comprimento. Esse pêndulo foi suspenso na cúpula do famoso Panthéon de Paris **(figura 7.10)**. A altura do saguão desse prédio permitia a instalação de um pêndulo com comprimento tão grande. Consta que Foucault dirigiu um convite a autoridades e colegas cientistas para "presenciarem a Terra em rotação".

Foi com grande surpresa e admiração que os presentes constataram a alteração no plano de oscilação do pêndulo, no decorrer de algumas horas de observação.

Modernos museus de ciência em vários países do mundo apresentam réplicas da experiência de Foucault, que sempre atraem a atenção dos visitantes.

Paulo César Pereira/Arquivo da editora

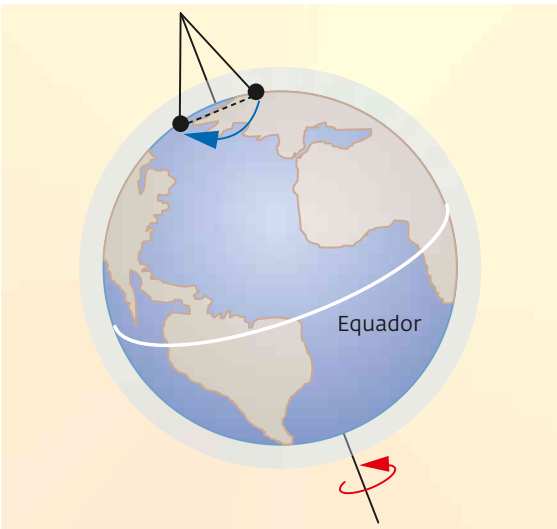


Figura 7.8. Representação (sem escala e em cores fantasia) de um pêndulo posto a oscilar no polo norte da Terra.

Banco de imagens/Arquivo da editora

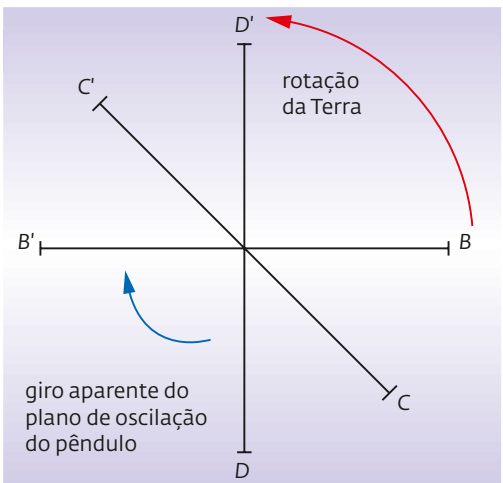


Figura 7.9. Em virtude da rotação da Terra, o plano de oscilação de um pêndulo parece girar em sentido contrário a essa rotação.

imageBROKER/Alamy/Latinstock



Figura 7.10. Pêndulo de Foucault no Panthéon em Paris.

7.2 Ondas

O que é uma onda

Imaginemos que uma pessoa, ao segurar uma corda, deslocasse sua mão continuamente para cima e para baixo da posição inicial. Nesse caso, teríamos uma série de pulsos, produzidos alternadamente para cima e para baixo, propagando-se ao longo da corda, como mostra a **figura 7.11**.

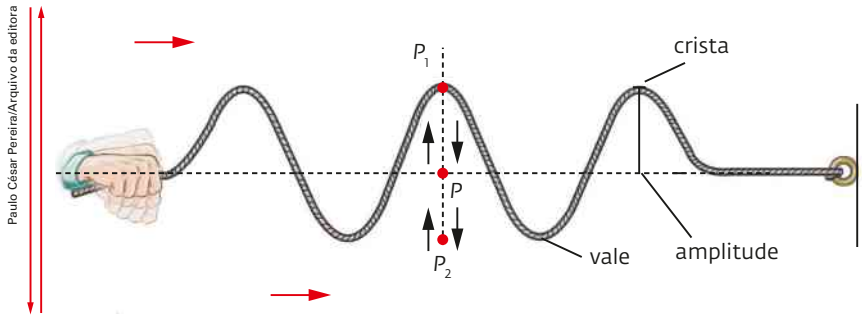


Figura 7.11. Uma onda é constituída de cristas e vales que se propagam ao longo da corda. Representação sem escala e em cores fantasia.

Dizemos que essa série de pulsos constitui uma **onda** propagando-se na corda.

Os pontos mais altos dos pulsos são denominados cristas da onda, e os pontos mais baixos são os vales da onda.

Um ponto qualquer do meio material (no caso, a corda), ao ser atingido pela onda, inicia um movimento oscilando enquanto a onda passa por ele.

Por exemplo, o ponto P da **figura 7.11** oscila, dirigindo-se de P a P_1, indo até P_2, retornando a P, e assim sucessivamente, enquanto passam por ele as cristas e os vales.

A amplitude e a frequência de oscilação desse ponto definem a amplitude e a frequência da onda, isto é:

A amplitude e a frequência de uma onda são a amplitude e a frequência das oscilações de um ponto do meio no qual ela se propaga.

Assim, na **figura 7.11**, a amplitude da onda é PP_1 (ou PP_2), e a frequência da onda é o número de oscilações que o ponto P executa em 1 segundo.

Deve-se observar que a amplitude e a frequência do movimento ondulatório são determinadas pelo movimento da mão da pessoa que deu origem à onda.

Isso significa que, se a pessoa desejar produzir uma onda de maior amplitude, ela deverá simplesmente aumentar a amplitude de oscilação de sua mão.

Do mesmo modo, ela pode fazer variar a frequência da onda alterando a frequência com que sua mão oscila.

Em qualquer situação, a frequência do movimento ondulatório será sempre igual à frequência com que a mão da pessoa está oscilando.

Sendo T o período da onda (período de oscilação de um ponto do meio) e f a sua frequência, é válida, também aqui, a relação $f = 1/T$.

Comentários

1) Vimos que qualquer ponto da corda da figura 7.11 executa um movimento oscilatório quando os pulsos passam por ele. No entanto, eles não são carregados pela onda, ou seja, uma onda não transporta matéria.
2) Um ponto da corda qua ainda não recebeu um pulso está em repouso, assim, não possui energia cinética. Contudo, quando o pulso o atinge, ele inicia um movimento oscilatório, o que mostra que recebeu energia do pulso.
3) Os dois fatos mencionados acima nos permitem afirmar que, para qualquer tipo de onda: uma onda transmite energia sem transportar matéria.

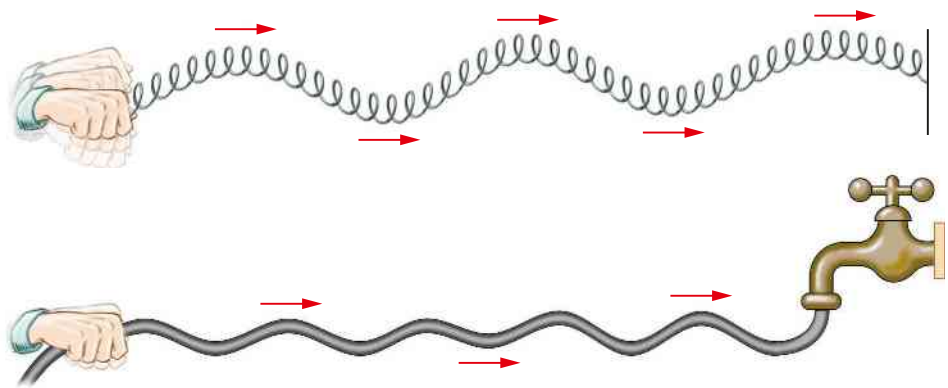
As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Onda transversal e onda longitudinal

No movimento ondulatório representado na figura 7.11, os pontos da corda oscilam para cima e para baixo enquanto a onda se propaga, para a direita, ao longo da corda.

Uma onda como essa, em que a oscilação dos pontos se faz em direção perpendicular à direção de propagação, é denominada **onda transversal**.

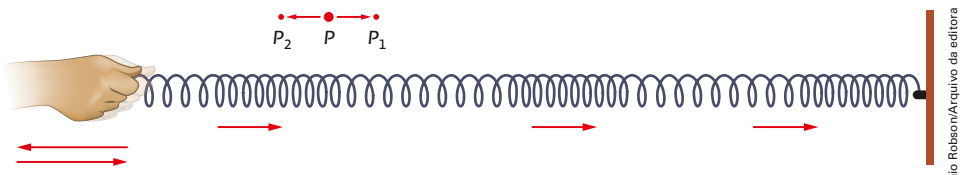
Podemos fazer uma onda como essa se propagar não apenas em uma corda, mas também em uma mola esticada, em uma mangueira, etc. (figura 7.12).



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 7.12. Onda transversal se propagando em uma mola e em uma mangueira. Suponha que a onda esteja atingindo o ponto fixo da direita no momento mostrado (a onda ainda não se refletiu).

Entretanto, se uma pessoa movimentar para a frente e para trás a extremidade de uma mola esticada, dando a essa extremidade um movimento oscilatório na direção da própria mola, verificaremos que um distúrbio, constituído por uma série de compressões e rarefações, propaga-se ao longo da mola (figura 7.13). Uma perturbação como essa propagando-se na mola é denominada **onda longitudinal**.



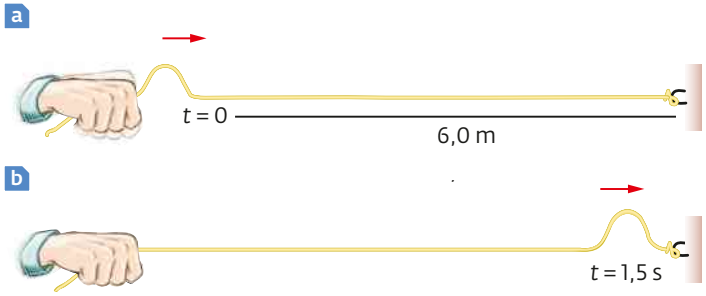
Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 7.13. Onda longitudinal propagando-se em uma mola.

Quando um ponto P da mola é atingido pela onda longitudinal, ele oscila entre P_1 e P_2 (figura 7.13), isto é, sua oscilação se faz na mesma direção em que a onda está se propagando. Em resumo:

Em uma onda transversal, os pontos do meio no qual ela se propaga oscilam perpendicularmente à direção de propagação da onda. Em uma onda longitudinal, os pontos do meio no qual ela se propaga oscilam paralelamente à direção de propagação da onda.

Velocidade de propagação de uma onda



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 7.14. Nessa corda, a velocidade de propagação do pulso foi $v = 4{,}0$ m/s.

A velocidade de uma onda em um meio é a velocidade com que os pulsos da onda se propagam nesse meio.

Para uma corda, por exemplo, verifica-se que quanto mais grossa ela for (maior massa por unidade de comprimento), menor será a velocidade do deslocamento de sua onda. Essa velocidade também depende da tensão a que a corda está submetida: quanto mais esticada estiver, maior será a velocidade de propagação da onda nessa corda.

Por exemplo, se uma pessoa produzir um pulso na extremidade de uma corda, cujo comprimento é de 6,0 m (figura 7.14.a), e o pulso atingir a outra extremidade, conforme figura 7.14.b, depois de 1,5 s a velocidade de propagação da onda nessa corda será de:

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{6{,}0\,\text{m}}{1{,}5\,\text{s}} \therefore v = 4\ \text{m/s}$$

Comprimento de onda

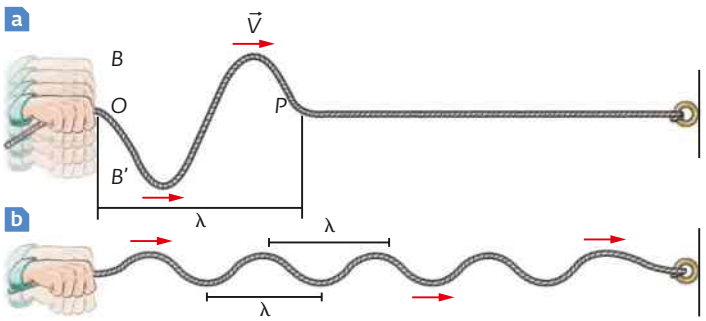


Figura 7.15. O comprimento de onda é a distância que a onda percorre durante o tempo de um período. Logo, temos $\lambda = vT$.

Suponha que uma pessoa, segurando a extremidade de uma corda esticada, faça sua mão executar uma oscilação completa; isto é, partindo de *O*, na figura 7.15.a, eleve sua mão até *B*, desça até *B'* e retorne a *O*. O intervalo de tempo dessa oscilação é o período *T* da onda. Durante esse tempo, a onda se propaga na corda, com uma velocidade constante *v*, percorrendo certa distância *OP*, como mostra a figura 7.15.a. Essa distância que a onda percorre durante um período *T* é denominada **comprimento de onda** e é representada pela letra grega λ (lambda), como na figura 7.15.

Como a onda se propaga com velocidade *v* constante, podemos escrever:

$$\lambda = vT,$$

$$\text{e como } T = \frac{1}{f}$$

$$\text{vem} \quad \lambda = \frac{v}{f}$$

Assim, podemos destacar que:

O comprimento de onda λ é a distância que a onda percorre durante um período *T*. Sendo *v* a velocidade de propagação da onda e *f* a sua frequência, tem-se $\lambda = vT$ ou $v = \lambda \cdot f$.

Se, na figura 7.15.a, a pessoa continuar a oscilar sua mão, uma série de cristas e vales se propagarão na corda. A distância entre duas cristas sucessivas, ou entre dois vales sucessivos, é também igual ao comprimento de onda, λ (figura 7.15.b).

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Em um meio qualquer, a velocidade de propagação de uma onda é constante e característica daquele meio. Por outro lado, a frequência da onda pode ser alterada arbitrariamente pela pessoa que produz o pulso. Então, na relação $v = \lambda f$, como v é fixo para o meio, e λ é inversamente proporcional a f, isto é, se a pessoa produzir uma onda de alta frequência, obterá uma onda com λ pequeno e vice-versa **(figura 7.16)**.

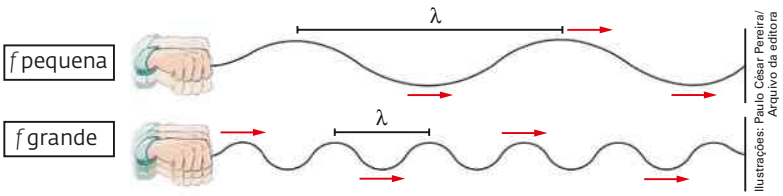


Figura 7.16. Em um dado meio, quanto maior for a frequência da onda produzida, menor será o seu comprimento de onda.

Ondas em uma dimensão

A **figura 7.17.a** representa uma corda presa em uma de suas extremidades e esticada horizontalmente por uma pessoa. Se essa pessoa movimentar sua mão para cima e, em seguida, para baixo, retornando à posição inicial, verifica-se que uma perturbação, ou **pulso**, propaga-se ao longo da corda, em uma dimensão, com certa velocidade, como procuramos representar na **figura 7.17.b**.

Fixando nossa atenção em um ponto qualquer da corda (marcando o ponto com tinta ou giz, por exemplo), poderemos perceber que ele se desloca para cima e para baixo, reproduzindo o movimento da mão enquanto o pulso passa por ele **(figura 7.17.d)**. Dessa forma, é apenas o pulso (a perturbação) que se desloca ao longo da corda, enquanto seus pontos sobem e descem à medida que o pulso passa por eles.

Os pulsos se propagam em um meio numa velocidade constante, transportando energia, sem haver o transporte da matéria que constitui o meio **(figura 7.18)**.

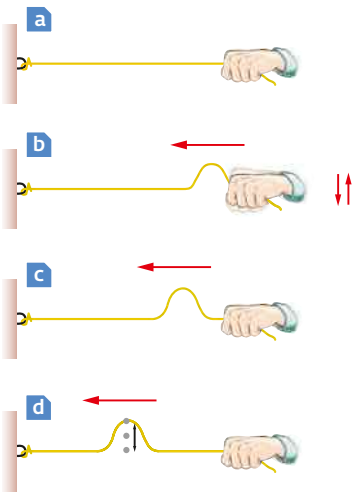


Figura 7.17. Propagação de um pulso ao longo de uma corda esticada.

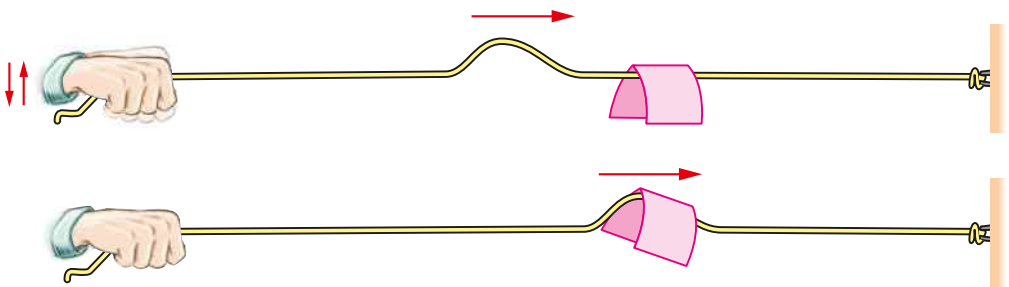
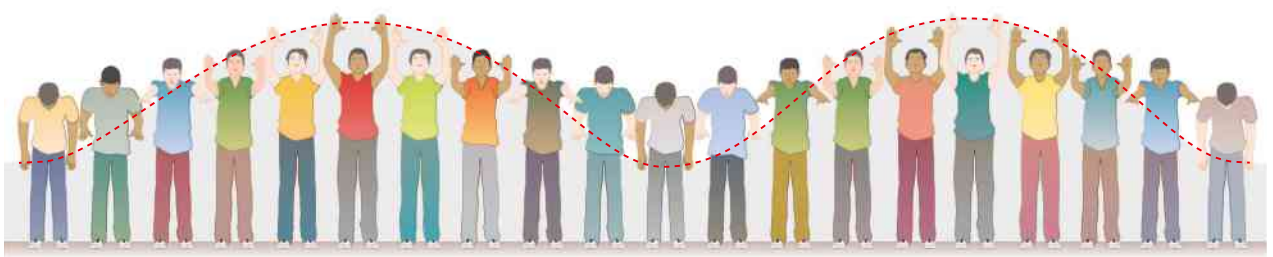


Figura 7.18. Um pulso produzido numa corda pode transportar energia e movimentar um papelzinho dobrado. No entanto não existe matéria sendo transportada ao longo da corda.

Quando os torcedores em um estádio de futebol, por exemplo, fazem a "ola", eles levantam e abaixam, simulando um pulso que se propaga ao longo da arquibancada **(figura 7.19)**.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 7.19. Propagação de uma onda, a "ola", comum nos estádios de futebol.

Ondas em duas dimensões

Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

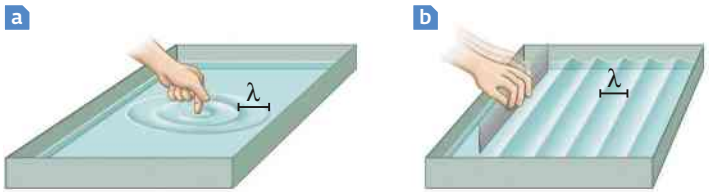


Figura 7.20. Batendo na superfície de um líquido, podemos produzir pulsos circulares ou pulsos retos.

Quando uma pessoa bate periodicamente em um ponto da superfície de um líquido, uma onda, constituída de pulsos circulares, passa a se propagar nessa superfície **(figura 7.20.a)**. De maneira semelhante, podemos produzir uma onda de pulsos retos, batendo periodicamente com uma régua na superfície do líquido, como mostra a **figura 7.20.b**. Essas ondas estão se propagando em duas dimensões na superfície do líquido. As cristas da onda da **figura 7.21** formam as frentes de ondas (círculos concêntricos) estudadas por Christian Huygens.

Julián Rovagnati/Dreamstime/Izusu Imagens



Figura 7.21. A onda propaga-se a partir do ponto onde caiu a gota.

Do mesmo modo que para as ondas de uma corda, temos:

1º) A velocidade de propagação v da onda na superfície de um líquido depende do meio. Assim, teremos, em líquidos diferentes (água, óleo, mercúrio, etc.), velocidades de propagação diferentes.

2º) A distância entre duas cristas sucessivas é o comprimento de onda λ **(figura 7.20)**.

3º) A frequência f da onda, isto é, a frequência de oscilação dos pontos da superfície do líquido, é igual à frequência da fonte que deu origem à onda.

4º) As grandezas v, f e λ estão relacionadas pela equação $\lambda = v/f$, e, portanto, como v é constante para um dado meio, quanto maior for f, menor será o valor de λ nesse meio.

Na **figura 7.22** representamos as ondas na superfície de um líquido. Observe que, nessa representação, são traçadas apenas as cristas da onda. Nessa figura estão também traçados os **raios da onda**, que são retas indicando as direções de propagação. Quando a onda é circular, os pulsos se propagam em todas as direções do plano, e cada raio indica uma delas **(figura 7.22.a)**. A onda de pulsos retos se propaga em uma única direção; consequentemente, seus raios são paralelos entre si, como mostra a **figura 7.22.b**.

Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

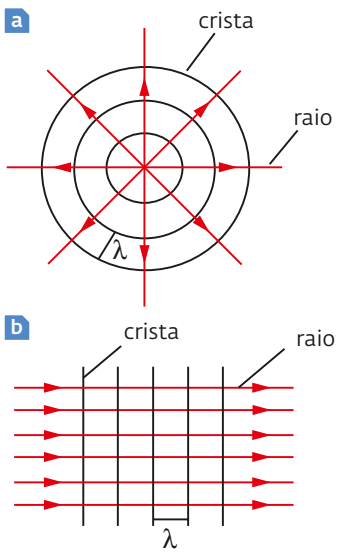
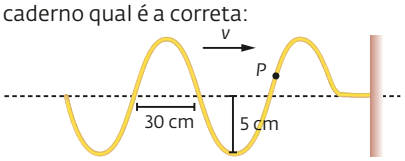


Figura 7.22. Representação esquemática de uma onda de pulsos circulares (**a**) e de pulsos retos (**b**).

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

6. A figura abaixo mostra uma onda se propagando para a direita ao longo de uma corda. No instante mostrado na figura, a velocidade do ponto P é mais bem representada por uma das alternativas abaixo. Indique em seu caderno qual é a correta:



a) → b) ↑ c) ↗ d) ↘ x e) ↓

7. Sabe-se que a frequência da onda do problema anterior é $f = 2{,}0$ hertz. Então, quais das afirmações seguintes estão corretas? Todas.

a) O período da onda é de 0,50 s.

b) A amplitude da onda é igual a 5 cm.

c) O comprimento de onda dessa onda vale 60 cm.

d) A velocidade de propagação da onda é de 120 cm/s.

Não escreva no livro!

7.3 Fenômenos de reflexão e refração em uma onda

Reflexão

Como vimos no estudo da reflexão da luz, o raio incidente é perpendicular à onda incidente e forma com a normal à barreira o ângulo de incidência ($\hat{i}$). Do mesmo modo, o raio refletido formará o ângulo de reflexão ($\hat{r}$) com a normal. Segundo a lei da reflexão, quando uma onda se reflete em uma barreira, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão (veja **figura 7.25**).

Foi a partir de coincidências como esta, que os físicos do século XVII começaram a suspeitar que a luz poderia ter um comportamento ondulatório.

Para o estudo desse fenômeno em ondas de uma dimensão, vamos supor que uma pessoa aplique um pulso em uma corda com uma de suas extremidades fixa, conforme **figura 7.23.a**. À medida que o pulso se propaga ao longo da corda, da esquerda para a direita, a corda se deforma e, em seguida, volta à posição inicial (deformação elástica). Quando o pulso encontrar o obstáculo na extremidade ocorrerá o fenômeno de reflexão da onda. Como a extremidade da corda está fixa, o pulso refletido será invertido em relação ao pulso incidente, conforme **figura 7.23.b**.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 7.23. **(a)** Pulso aplicado em uma corda com extremidade fixa; **(b)** ao encontrar o obstáculo, o pulso é refletido e invertido em relação ao pulso incidente.

Por outro lado, se um pulso for aplicado a uma corda com extremidade livre **(figura 7.24.a)**, o pulso se refletirá no obstáculo mantendo a mesma forma do pulso incidente, conforme **figura 7.24.b**.

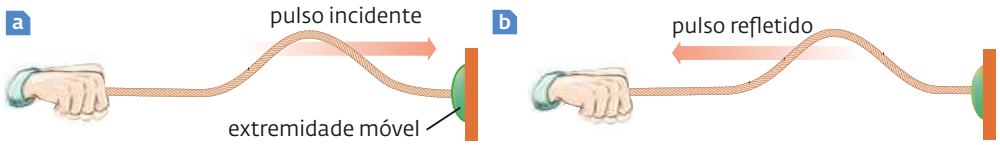
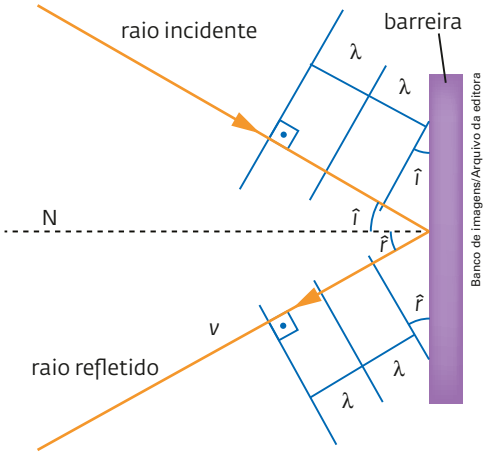


Figura 7.24. **(a)** Pulso aplicado em uma corda com extremidade fixa; **(b)** ao encontrar um obstáculo, o pulso é refletido e é igual ao pulso incidente.

Para observar a reflexão em onda de duas dimensões, vamos supor que, em um tanque de água, seja produzida uma onda de pulsos retos, que se propaga em direção a uma barreira (um pedaço de madeira, por exemplo) colocada no tanque **(figura 7.25)**. Verificamos que, quando essa onda atinge a barreira, ela se reflete, dando origem a uma onda refletida, também constituída de pulsos retos.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 7.25. Quando uma onda se reflete em uma barreira, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.

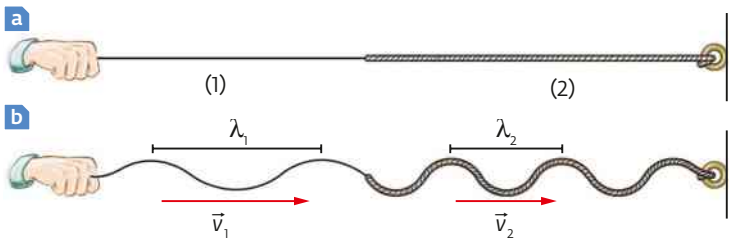
As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Refração

Uma onda sofre refração ao passar de um meio para outro, nos quais ela se propaga com velocidades diferentes.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Passagem de uma onda de um meio para outro



Ilustrações: Paulo César Pereira/ Arquivo da editora

Figura 7.26. Quando uma onda passa de um meio para outro, sua frequência não se altera.

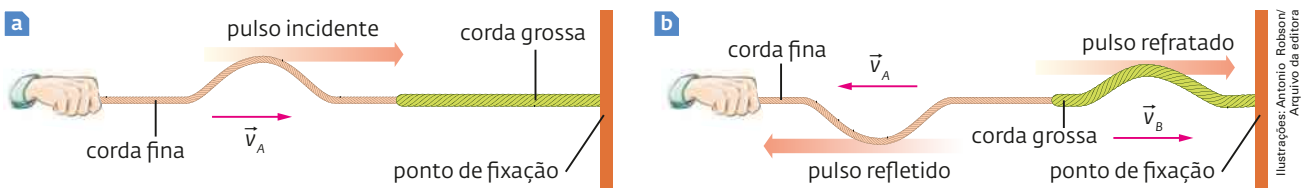
Consideremos a figura 7.26.a que representa uma corda esticada, constituída de uma parte mais fina ligada a outra, mais grossa. Temos então dois meios diferentes, (1) e (2); assim, a velocidade de propagação de uma onda na parte mais fina é maior do que na parte mais grossa ($v_1 > v_2$).

Fazendo oscilar a extremidade da corda fina, uma onda se propaga ao longo dela e, ao atingir a corda grossa, passa a se propagar também nessa corda, isto é, a onda é transmitida da corda fina para a corda grossa (figura 7.26.b).

Se a corda fina estiver oscilando, por exemplo, com uma frequência de 10 oscilações/s, teremos 10 pulsos por segundo, chegando ao ponto de união das duas cordas; consequentemente, 10 pulsos por segundo irão se propagar na corda grossa. Concluímos, então, que:

A frequência de uma onda não se altera quando ela é transmitida de um meio para outro.

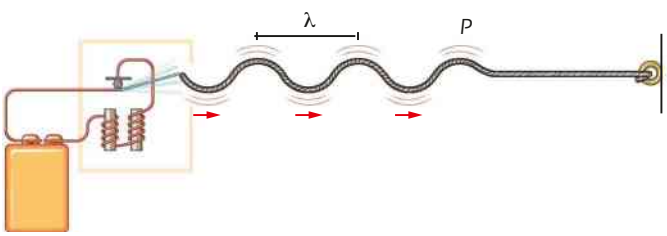
À medida que o pulso se propaga na corda, ocorrerá o fenômeno de refração (figura 7.27.a) no instante em que a onda passar da corda fina para a corda grossa. Parte do pulso é refratado ou transmitido e parte é refletido (figura 7.27.b).



Ilustrações: Antonio Robson/ Arquivo da editora

Figura 7.27. Pulso aplicado em duas cordas diferentes ligadas entre si.

Esse mesmo fenômeno pode ser observado em onda de duas dimensões em um tanque com água, onde se pode observar uma região (1) mais profunda e outra (2) mais rasa. Quando uma onda se propaga na superfície da água desse tanque, a velocidade da onda na região mais profunda é maior do que na região mais rasa ($v_1 > v_2$). Assim, essas duas regiões se comportam como dois meios diferentes para a propagação da onda.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 7.28. Para o exemplo 1.

Exemplo 1

A lâmina de oscilação de uma campainha elétrica está presa à extremidade de uma corda esticada. Ligando-se a campainha, a lâmina passa a se movimentar, executando 10 oscilações/s, dando origem a uma onda que se propaga na corda com uma velocidade de v = 5,0 m/s (figura 7.28).

a) Quanto tempo a onda demora para atingir um ponto *P*, situado à distância $\Delta S = 10$ m da lâmina?

Designando por t esse tempo, e sendo constante a velocidade de propagação da onda na corda, podemos escrever que:

$$\Delta S = vt \quad \Rightarrow \quad t = \frac{\Delta S}{v} = \frac{10}{5{,}0} \quad \therefore \quad t = 2{,}0 \text{ s}$$

b) Qual é a frequência com que o ponto *P* oscila enquanto a onda passa por ele?

A frequência de oscilação de cada ponto do meio onde uma onda se propaga é igual à frequência do dispositivo que deu origem a essa onda. Então, como a lâmina está executando 10 oscilações/s, o ponto *P* também oscilará com 10 oscilações/s, ou seja, a frequência da onda é $f = 10$ hertz.

c) Qual é a distância entre duas cristas sucessivas dessa onda?

Essa distância é o comprimento de onda λ **(figura 7.28)**, que é dado por:

$$v = \lambda f \quad \Rightarrow \quad 5 = \lambda \cdot 10 \quad \therefore \quad \lambda = 0{,}50 \text{ m} = 50 \text{ cm}$$

d) Se a frequência da lâmina for aumentada para $f = 20$ hertz, o que acontecerá com os valores da velocidade de propagação e do comprimento de onda?

Como não houve alterações no meio (a corda é a mesma e a tensão a que ela está submetida não foi alterada), a velocidade de propagação da onda não se modificará, continuando com o mesmo valor $v = 5{,}0$ m/s. Entretanto, o comprimento de onda será menor (porque f aumentou), passando a valer:

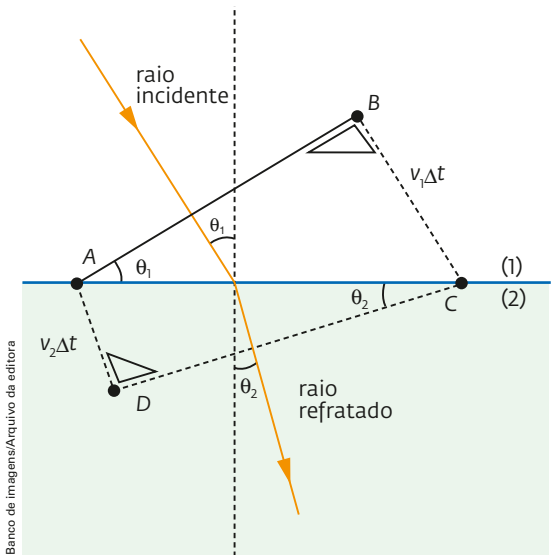
$$v = \lambda f \quad \Rightarrow \quad 5 = \lambda \cdot 2 \quad \therefore \quad \lambda = 0{,}25 \text{ m} = 25 \text{ cm}$$

A lei da refração de uma onda

A **figura 7.29** representa um pulso *AB* no instante em que sua extremidade *A* atinge a linha de separação dos meios (1) e (2) e esse mesmo pulso após um intervalo de tempo Δt, quando a extremidade *B* atinge essa linha de separação. Ou seja, nesse intervalo de tempo, *B* se deslocou para *C*, e *A* para *D*. Conclui-se, então, que:

$$AD = v_2 \Delta t \quad \text{e} \quad BC = v_1 \Delta t$$

Sabemos que θ_1 é o ângulo de incidência e θ_2 é o ângulo de refração da onda. Na **figura 7.29**, vemos que o ângulo $B\hat{A}C$ é igual a θ_1 (lados respectivamente perpendiculares) e o ângulo $A\hat{C}D$ é igual a θ_2 (pelo mesmo motivo). Assim, temos:



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 7.29. Analisando essa figura, podemos demonstrar que, na refração de uma onda, temos $\text{sen } \theta_1 / \text{sen } \theta_2 = v_1 / v_2$.

- no triângulo retângulo *ABC*: $\text{sen}\ \theta_1 = \frac{BC}{AC}$
- no triângulo retângulo *ADC*: $\text{sen}\ \theta_2 = \frac{AD}{AC}$

Dividindo membro a membro essas igualdades, teremos:

$$\frac{\text{sen}\ \theta_1}{\text{sen}\ \theta_2} = \frac{BC}{AC} \cdot \frac{AC}{AD} \quad \text{ou} \quad \frac{\text{sen}\ \theta_1}{\text{sen}\ \theta_2} = \frac{BC}{AD}$$

Lembrando que $BC = v_1 \Delta t$ e $AD = v_2 \Delta t$, obtemos:

$$\frac{\text{sen}\ \theta_1}{\text{sen}\ \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Para dois determinados meios, os valores de v_1 e v_2 são fixos. Logo, v_1/v_2 é constante e, assim, quando uma onda se refrata, passando de um desses meios para o outro, os ângulos de incidência e de refração são tais que:

$$\frac{\text{sen}\ \theta_1}{\text{sen}\ \theta_2} = \text{constante}$$

Snell foi o primeiro a chegar experimentalmente a esse resultado, estudando a refração da luz.

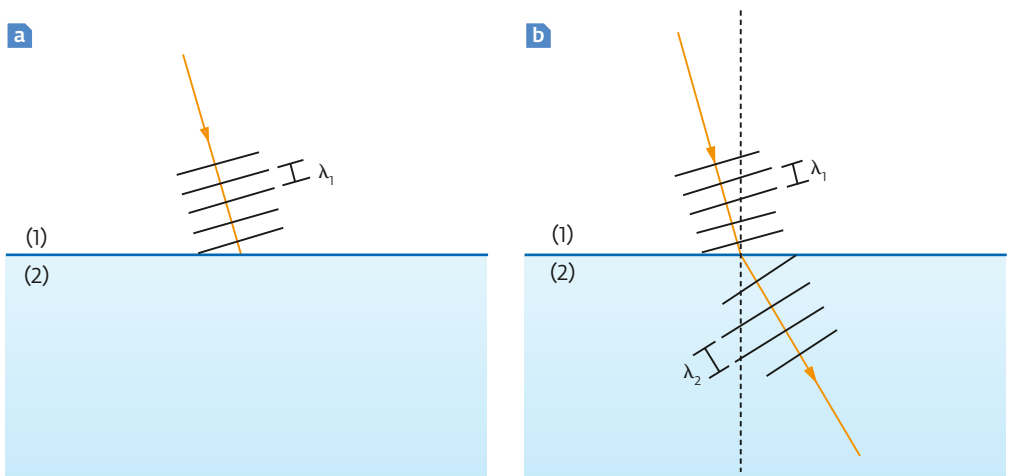
O estudo que fizemos da reflexão e da refração das ondas nos permite, então, dizer que:

O fato de uma onda se refletir e se refratar, obedecendo às mesmas leis observadas na reflexão e na refração da luz, são evidências de que a luz tem comportamento ondulatório.

Exemplo 2

Uma onda, propagando-se na superfície de um líquido, em uma região (1), com velocidade v_1, incide na linha de separação dessa região com uma região (2), na qual sua velocidade de propagação é v_2 (figura 7.30.a). Sabendo-se que $v_2 > v_1$, analise o que acontece com a onda quando ela passa a se propagar no meio (2).

Sendo $v_2 > v_1$, a equação $\text{sen}\ \theta_1/\text{sen}\ \theta_2 = v_1/v_2$ nos mostra que teremos $\theta_2 > \theta_1$. Portanto, os raios da onda vão se afastar da normal. Além disso, como a frequência é a mesma nas duas regiões, a relação $V = \lambda f$ nos permite concluir que teremos $\lambda_2 > \lambda_1$. Assim, a passagem da onda da região (1) para a região (2) pode ser representada, esquematicamente, da maneira mostrada na figura 7.30.b.



Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 7.30. Para o exemplo 2.

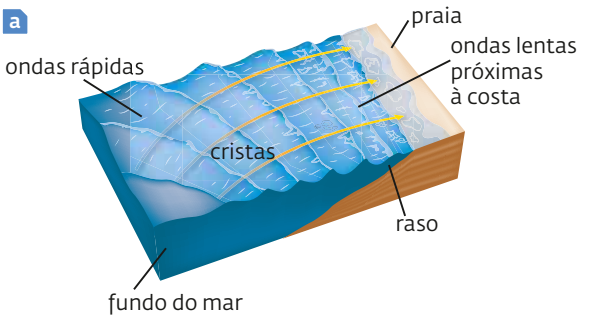
FÍSICA NO CONTEXTO

AS ONDAS DO MAR AO LONGO DA COSTA

A refração é a mudança da velocidade de uma onda causada pela troca do meio em que a onda se propaga. Quando as ondas do mar entram em águas rasas, elas ficam mais lentas e sofrem mudança de direção **(figura 7.31.a)** incidindo quase que paralelas à costa. Na **figura 7.31.a** vemos ondas do mar vindo com alta velocidade em direção à praia formando certa angulação com ela. À medida que as ondas vão se aproximando da praia, uma das extremidades da onda atinge águas rasas antes da outra. Isso faz com que a extremidade da onda que está em águas rasas desacelere, enquanto a extremidade que está em águas profundas continue viajando com a velocidade original. Note que esse fenômeno da refração faz com que a onda se curve, de forma a ficar mais paralela à costa. Como o litoral não é uma linha reta **(figura 7.31.b)**, a refração irá produzir padrões de ondas complexos, produzindo maior impacto das ondas nas penínsulas e menores em baías. O entendimento deste fenômeno permite escolher áreas seguras, como as baías, para a construção dos portos.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Alex Argozino/Arquivo da editora



Rubens Chaves/Pulsar Imagens



Figura 7.31. As ondas do mar sofrem refração até chegarem à costa (**a**). Note que isso acontece quando as ondas passam de um ponto mais profundo do oceano para um ponto mais raso (**b**) (Guarujá – SP, fotografia de 2014).

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Os exercícios 8 e 9 se referem à **figura 7.26**, que, como vimos, mostra uma onda se propagando em uma corda (1), mais fina, e sendo transmitida para uma corda (2), mais grossa.

8. Sabendo-se que na corda (1) a velocidade de propagação da onda é $v_1 = 1{,}5$ m/s e que o comprimento de onda vale $\lambda_1 = 30$ cm, responda:

a) Qual é a frequência com que um ponto qualquer da corda (1) está oscilando? 5,0 hertz.

b) Qual é o tempo que a mão da pessoa gasta para efetuar uma oscilação completa? 0,20 s.

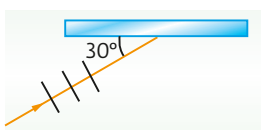
c) Quantas oscilações por segundo efetua o ponto de união das duas cordas? 5,0 oscilações/s.

d) Qual é a frequência da onda que se propaga na corda (2)? 5,0 hertz.

9. Sendo $v_2 = 1{,}0$ m/s a velocidade de propagação da onda na corda (2), determine a distância entre duas cristas consecutivas nessa corda. $\lambda_2 = 20$ cm.

10. A figura ao lado representa as cristas de uma onda propagando-se na superfície de um líquido em direção a uma barreira.

Banco de imagens/Arquivo da editora



10.d) Veja resposta no Manual do Professor.

a) Qual é o valor do ângulo de incidência dessa onda sobre a barreira? $\hat{i} = 60°$

b) E o valor do ângulo de reflexão? $r = 60°$

c) Desenhe, em uma cópia da figura, no caderno, o raio refletido correspondente ao raio incidente mostrado. Veja resposta no Manual do Professor.

d) Desenhe, no caderno, as cristas da onda refletida.

e) O comprimento de onda aumenta, diminui ou não varia após a reflexão? Explique.

10.e) Não varia, porque a onda continua a se propagar no mesmo meio.

11. Uma rolha de cortiça está flutuando na água contida em um tanque. Bate-se com uma régua, na superfície da água, de 0,20 s em 0,20 s, de modo a produzir uma onda de pulsos retos tais que a distância entre duas cristas consecutivas seja de 5,0 cm.

a) Qual é o período da onda? 0,20 s.

b) Descreva o movimento da rolha enquanto a onda passa por ela. Oscila para cima e para baixo.

c) Quantas oscilações por segundo a rolha efetua em seu movimento? 5,0 oscilações/s.

d) Qual é a velocidade de propagação da onda? 25 cm/s.

Não escreva no livro!

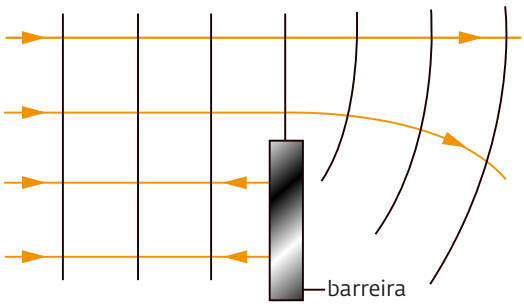


Figura 7.32. Quando uma onda plana encontra um obstáculo, ela o contorna e sua propagação deixa de ser retilínea.

7.4 Difração

Difração de uma onda

Consideremos que uma onda plana, propagando-se na superfície de um líquido, encontre uma barreira que afeta sua propagação, como mostra a figura 7.32. Parte da onda é absorvida e parte é refletida pelo obstáculo.

Observamos que a parte da onda que não foi interrompida não se mantém na direção inicial de propagação, pois os pulsos, ao passarem pela barreira, contornam o obstáculo, da maneira indicada. Quando isso acontece, dizemos que houve **difração** da onda em torno do obstáculo. Assim:

A difração é a propriedade que uma onda possui de contornar um obstáculo ao ser parcialmente interrompida por ele.



João X. de Campos/Arquivo da editora

Figura 7.33. Difração de uma onda sonora em torno de um muro.

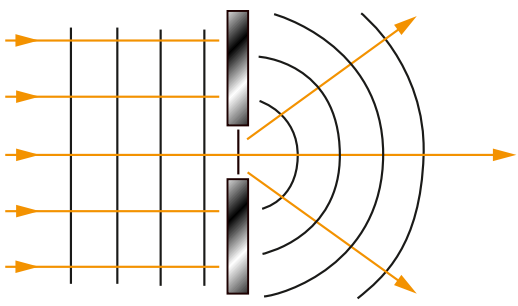
A difração é um fenômeno que ocorre com qualquer tipo de onda. Por exemplo: uma pessoa *A*, ao lado de um muro, pode ser ouvida por uma pessoa *B*, situada atrás do muro, porque as ondas sonoras, emitidas por *A*, em virtude da difração, contornam o obstáculo, alcançando a orelha de *B* (figura 7.33).

Difração por um orifício

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

O *Traité de la lumière* (Tratado sobre a Luz) é um dos trabalhos mais conhecido de Christiaan Huygens e foi apresentado pela primeira vez para a Academia de Ciências em 1678. Segundo Huygens, os pontos de uma frente de onda, em um instante inicial, comportam-se como fontes puntiformes que geram nova frente de onda em um instante seguinte, conforme representado na figura 7.34. Cada ponto da frente de onda tem mesma fase.

Para uma onda se propagando em direção a um orifício, constituído por duas barreiras, a difração é bastante acentuada, pois a onda, ao passar pelo orifício, contorna os dois obstáculos, espalhando-se visivelmente. A figura 7.35 é uma fotografia que mostra a difração de ondas ao atravessar um orifício formado por duas barreiras.



Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 7.34. Difração de uma onda ao atravessar um orifício.

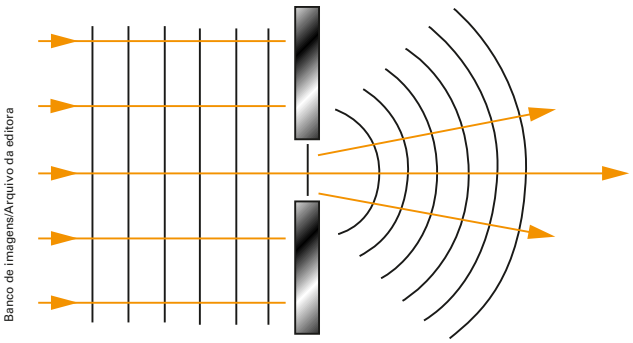


Reprodução/<http://www.spain-grancanaria.com/>

Figura 7.35. Fotografia mostrando uma onda, na superfície da água, sofrendo difração ao passar por um orifício. Ilhas Canárias, 2014.

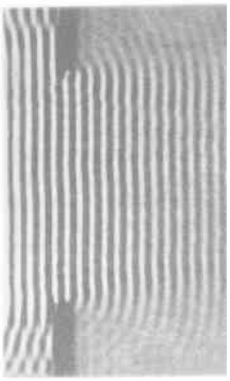
Os efeitos da difração podem ser mais ou menos acentuados de acordo com as dimensões do obstáculo que será contornado ou a largura do orifício que será atravessado pela onda. Se o comprimento de onda (λ) for grande em comparação ao tamanho da abertura do orifício, a difração será acentuada, conforme representado nas **figuras 7.34** e **7.35**.

Por outro lado, se o comprimento de onda for pequeno (maior frequência) em comparação às dimensões do orifício, a difração dessa onda será menos acentuada **(figuras 7.36** e **7.37)**.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 7.36. Quanto menor for o valor de λ, menos acentuada será a difração da onda. Representação sem escala e em cores fantasia.



Reprodução/Arquivo da editora

Figura 7.37. Uma onda praticamente não se difrata ao passar por um orifício cuja largura é muito maior que seu comprimento de onda.

Resumindo o que foi analisado, temos:

Pode-se acentuar a difração de uma onda, através de um orifício, aumentando-se o seu comprimento de onda ou diminuindo-se a largura do orifício.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

Difração da luz

Na seção anterior foram destacadas algumas evidências de que a luz tem um comportamento ondulatório, uma vez que a luz e uma onda se refletem e se refratam de maneiras semelhantes. Vamos analisar, agora, se a luz pode também se difratar, ao passar por um orifício, pois isso ocorre com qualquer tipo de onda.

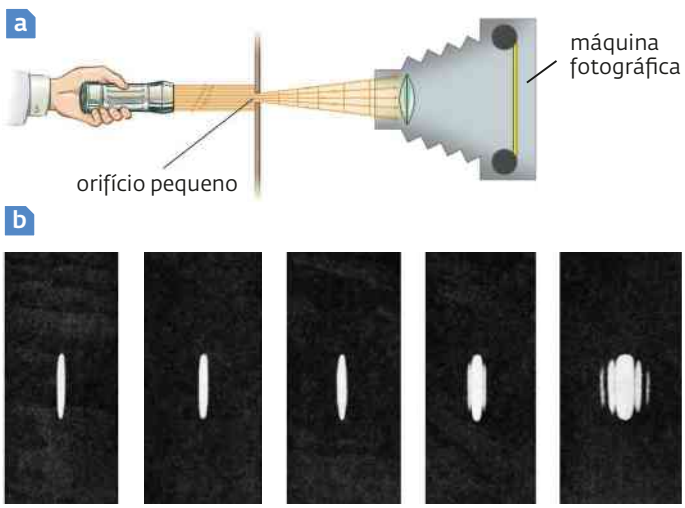
Quando a luz passa por um orifício, como o buraco de uma fechadura, observa-se que não há difração, pois ela continua a se propagar na mesma direção inicial, após atravessar o orifício **(figura 7.38)**. Da mesma forma, na **figura 7.33**, embora a pessoa *B* possa ouvir a pessoa *A* (em virtude da difração do som), ela não poderá ver essa pessoa, pois a luz emitida por *A* não contorna o muro, isto é, não se difrata, como acontece com a onda sonora.



nulinukas/Shutterstock

Figura 7.38. Não se percebe difração da luz quando ela passa através de orifícios, como, por exemplo, o buraco de uma fechadura.

A difração é mais perceptível nas ondas sonoras, porque elas têm comprimento de onda grande em relação às dimensões de grande parte dos orifícios. No ar, por exemplo, o λ das ondas sonoras varia entre 1,7 cm e 17 m, enquanto a ordem de grandeza do comprimento de onda da luz é 10^{-7} m. Logo, na situação apresentada na **figura 7.38**, o fenômeno de difração não é perceptível, devido ao comprimento de onda da luz ser muito menor do que o diâmetro do buraco da fechadura.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 7.39. Em **a**, representação da luz difratando-se quando passa através de orifícios muito pequenos. Em **b**, é possível observar na sequência de imagens que a difração é tanto mais acentuada quanto menor for a dimensão do orifício por onde passa a luz.

Isso é confirmado por meio da seguinte experiência: faz-se um feixe de luz paralelo passar por um pequeno orifício e registra-se o feixe emergente. Com a difração da luz, como está representado na **figura 7.39.a**, as dimensões do orifício no registro parecerão maiores do que são na realidade. Na **figura 7.39.b**, apresentamos figuras obtidas da maneira descrita. A primeira figura é de uma fenda cuja largura é de 1,5 mm. Nas seguintes, a abertura da fenda foi reduzida, sucessivamente, para 0,7 mm, 0,4 mm, 0,2 mm e 0,1 mm. Observando as imagens, vemos que **houve difração da luz**, pois as dimensões não correspondem às dimensões reais das fendas citadas. Justamente na última imagem, que corresponde à fenda mais estreita, a difração é mais acentuada.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

Assim, o fato de observarmos a difração da luz através de pequenos orifícios é mais uma evidência de que:

A luz tem um comportamento ondulatório e seu comprimento de onda é muito pequeno.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

12. Quando um feixe luminoso passa por um orifício de 1 cm de diâmetro, não se pode perceber qualquer evidência de que a luz esteja se difratando. Então, o comprimento de onda da luz deve ser muito maior, muito menor ou aproximadamente igual a 1 cm? Muito menor.

13. a) Copie a figura deste exercício no caderno e complete-a, desenhando a trajetória seguida pela onda após passar pela barreira, supondo que não existisse o fenômeno da difração.

Veja resposta no Manual do Professor.

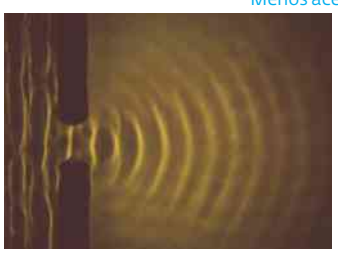

Banco de imagens/Arquivo da editora

b) Lembrando-se de que a onda se difrata, faça outro desenho no caderno mostrando o que ocorre quando ela passa pela barreira. Desenho semelhante ao da figura 7.32.

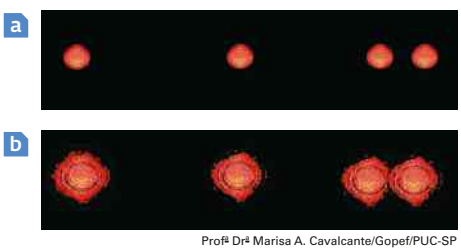
14. Considerando a difração da onda mostrada na fotografia a seguir, diga se essa difração seria mais acentuada ou menos acentuada nos seguintes casos:

a) Se a abertura do orifício fosse menor. Mais acentuada.

b) Se a frequência da onda fosse maior. Menos acentuada.


Thales Trigo/Arquivo da editora

15. As fotografias abaixo mostram feixes luminosos emergindo de quatro orifícios existentes em um anteparo opaco. Na fotografia **b**, os orifícios possuem diâmetros menores do que em **a**. Então, por que os tamanhos dos orifícios parecem ser maiores em **b**?



Profª Drª Marisa A. Cavalcante/Gopef/PUC-SP

15. Porque as ondas luminosas sofrem maior difração ao passar por orifícios menores.

7.5 Interferência

Interferência de ondas em uma dimensão

O fenômeno de interferência acontece quando, por exemplo, dois pulsos produzidos em extremidades opostas de uma corda se cruzam no ponto *P* **(figura 7.40.a)**. No cruzamento ocorre superposição entre os dois pulsos, ou seja, uma soma algébrica das amplitudes de cada onda.

Quando a crista de uma onda está em fase com a crista da outra onda, produzindo uma onda resultante com amplitude igual à soma das amplitudes das ondas combinadas, temos **interferência construtiva** **(figura 7.40.b)**. Após o cruzamento das ondas, cada pulso continua seu trajeto mantendo suas características originais **(figura 7.40.c)**.

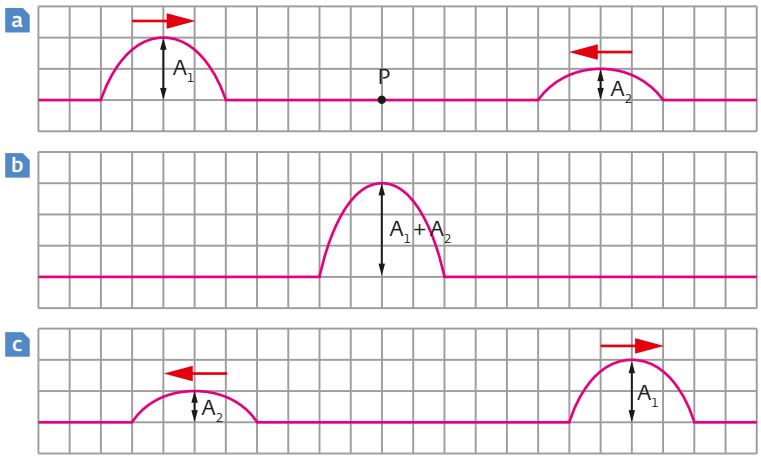


Figura 7.40. Dois pulsos em fase são aplicados em extremidades diferentes de uma mesma corda (**a**). Durante a intersecção das ondas temos sobreposição das cristas, que se somam aumentando a amplitude da onda (**b**). Após a intersecção, as ondas continuam seu trajeto com as características iniciais (**c**).

Quando são produzidos dois pulsos em oposição de fase a crista de uma onda cruza com o vale de outra onda no ponto *P* **(figura 7.41.a)** produzindo uma onda resultante com amplitude dada pela subtração das amplitudes das ondas superpostas. Neste caso, temos **interferência destrutiva** **(figura 7.41.b)**. Após o cruzamento, cada onda continua seu trajeto inicial mantendo as características iniciais **(figura 7.41.c)**.

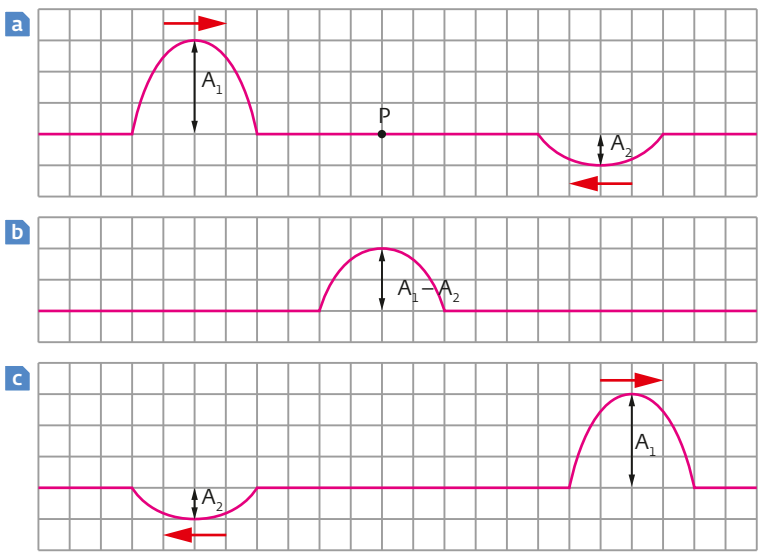


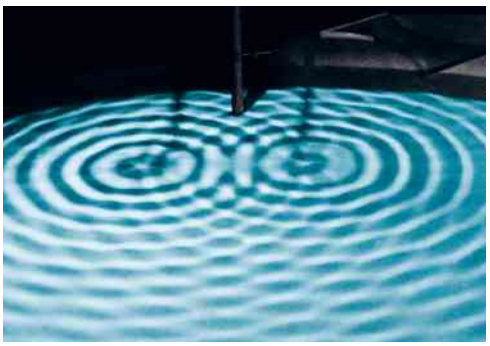
Figura 7.41. Dois pulsos em oposição de fase são aplicados em extremidades diferentes de uma mesma corda (**a**). Durante a intersecção das ondas temos sobreposição da crista de uma das ondas com o vale da outra onda no ponto *P*, onde ocorre a subtração das amplitudes das ondas (**b**). Após a intersecção, as ondas continuam seu trajeto com as características iniciais (**c**).

Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora



Reprodução/Arquivo da editora

Figura 7.42. Superposição de duas ondas num lago, produzidas balançando-se ritmicamente um rodo de limpeza com duas latinhas de alumínio.



Omikron/Photo Researchers, Inc./Latinstock

Figura 7.43. Fotografia da figura de interferência produzida pela superposição de duas ondas em fase se propagando na superfície da água.

Figura de interferência em duas dimensões

Batendo-se periodicamente com dois pequenos objetos na superfície de um líquido, duas ondas circulares se propagarão por ele, como mostra a figura 7.42. Vamos chamar de F_1 e F_2 as fontes que dão origem a essas ondas. Quando essas fontes oscilam com a mesma frequência e batem simultaneamente no líquido, isto é, no instante em que a fonte produz uma crista, a outra também gera uma crista; quando uma produz um vale, a outra também o faz. Nessas condições, dizemos que as duas fontes estão **em fase**. Além disso, vamos supor que as ondas produzidas pelas duas fontes tenham a mesma amplitude.

Ao se propagar, as duas ondas, originadas pelas fontes F_1 e F_2, irão se superpor na superfície do líquido. Em virtude dessa superposição, a superfície do líquido adquire o aspecto representado na figura 7.43. Essa configuração é o que denominamos **figura de interferência**, ou, em outras palavras, dizemos que as duas ondas **interferiram**, dando origem à configuração apresentada na figura 7.43.

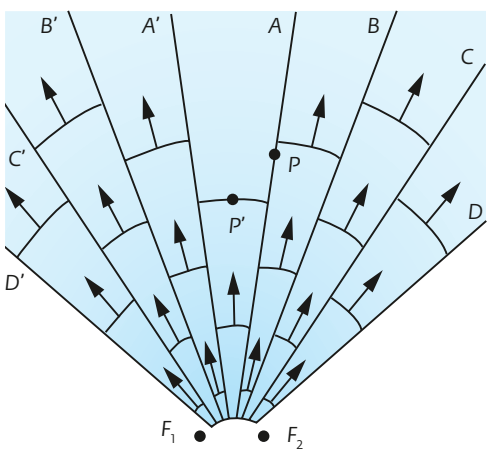
Podemos observar, na figura de interferência, algo parecido com linhas que divergem a partir do ponto médio entre as fontes, separando cristas e vales que se propagam, afastando-se dessas fontes.

Por que se forma uma figura de interferência

Analisemos as linhas divergentes que aparecem na figura de interferência. Se um pequeno objeto fosse colocado flutuando em um ponto qualquer dessas linhas, como o ponto *P* da figura 7.44, observaríamos que o objeto ficaria em repouso, mostrando que **esse ponto não está oscilando**. Isso ocorre porque as duas ondas alcançam o ponto *P* se opondo uma à outra (a crista de uma chega ao ponto junto com o vale da outra) e, assim, o ponto *P* não se movimenta. Dizemos, então, que as duas ondas **interferiram destrutivamente** em *P*, ponto que é denominado **nó**. Todos os pontos das linhas *A*, *A'*, *B*, *B'*, etc. são **nós** e, por esse motivo, essas linhas são denominadas **linhas nodais**[1].

Suponhamos, agora, que o pequeno objeto fosse colocado a flutuar em um ponto situado entre duas linhas nodais, como o ponto *P'* da figura 7.44. Nesse caso, verificaríamos que o objeto **oscila** com uma amplitude duas vezes maior do que se fosse atingido apenas por uma das ondas. Isso acontece porque as duas ondas chegam a *P'* reforçando-se mutuamente (a crista de uma onda chega a *P'* junto com a crista da outra, originando uma dupla crista e, logo depois, chegam a esse ponto os vales das duas ondas, originando um duplo vale, etc.).

[1] Essas linhas são, na verdade, curvas denominadas hipérboles, com focos em F_1 e F_2. Longe das fontes as hipérboles tendem a se tornar retilíneas, como ilustrado na figura 7.44.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 7.44. Uma figura de interferência apresenta linhas nodais e duplas cristas (e duplos vales) se propagando entre elas.

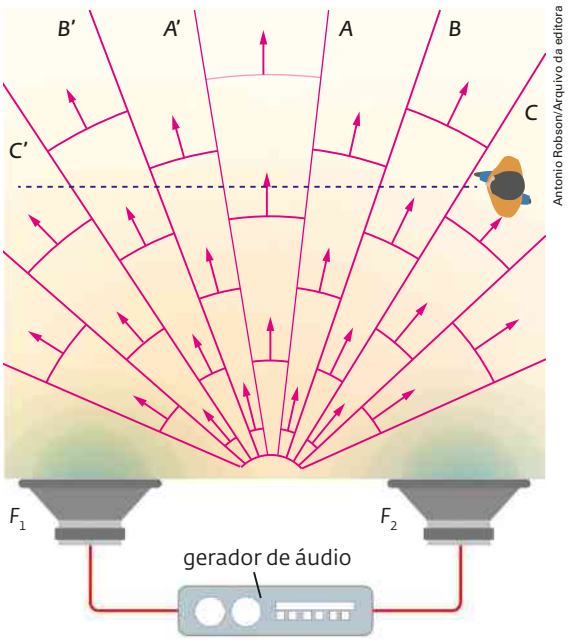
Dizemos que, em *P*', há uma **interferência construtiva** das duas ondas. Essa **interferência construtiva** ocorre em todos os pontos médios situados entre duas linhas nodais, observando-se a propagação de duplas cristas e duplos vales entre essas linhas. Em resumo, temos:

Em uma figura de interferência, observam-se linhas nodais, constituídas por pontos permanentemente em repouso (interferência destrutiva), e duplas cristas e duplos vales (interferência construtiva) propagando-se entre as linhas nodais.

Comentário

O fenômeno de interferência é típico dos movimentos ondulatórios. Assim, é possível obter a formação de linhas nodais com qualquer tipo de onda realizando-se uma experiência semelhante à que foi descrita.

Podemos obter interferência com ondas sonoras, por exemplo, da seguinte maneira: dois alto-falantes, F_1 e F_2, separados por certa distância, como mostra a **figura 7.45**, emitem ondas sonoras de mesma amplitude e em fase. Essas duas ondas, propagando-se no ar, vão se superpor, originando regiões onde há interferência destrutiva (linhas nodais) e regiões onde há interferência construtiva (duplas cristas e duplos vales). Assim, se uma pessoa deslocar-se através da configuração de interferência, da maneira mostrada na **figura 7.45** (linha pontilhada), ela não perceberá som algum ao cruzar as regiões nodais *C*, *B*, *A*, *A*', etc. Entretanto, ao passar entre essas regiões, a pessoa escutará um som que, no ponto médio, é muito intenso, pois aí estarão chegando duplas cristas e duplos vales em sua orelha.



Antonio Robson/Arquivo da editora

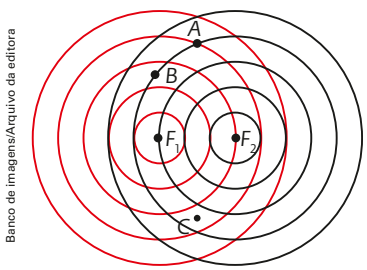
Figura 7.45. O fenômeno de interferência pode ser observado com qualquer tipo de onda, inclusive com as ondas sonoras.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

16. Os círculos mostrados na figura a seguir representam, em um certo instante, as cristas de duas ondas produzidas na superfície de um líquido pelas fontes F_1 e F_2. Considere os pontos *A*, *B* e C assinalados na figura.



Banco de imagens/Arquivo da editora

a) Ao ponto *A* estão chegando, naquele instante, duas cristas, dois vales ou uma crista e um vale? Duas cristas.

b) E ao ponto *B*? Uma crista e um vale.

c) E ao ponto C? Dois vales.

17. Considerando os pontos *A*, *B* e *C* do exercício anterior, diga em qual deles tem-se (no instante mostrado na figura):

a) Uma dupla crista. *A*

b) Um duplo vale. *C*

c) Um nó. *B*

18. Suponha que as ondas na superfície do líquido do exercício 16 se formem em um recipiente de profundidade constante. Suponha ainda que as ondas sejam idênticas e que tenham períodos de 0,2 s e comprimento de onda de 4 cm. Determine:

a) a velocidade de propagação dessas ondas; 20 cm/s

b) a frequência dessas ondas; 5 Hz

c) o período de oscilação do ponto *A*. 0,2 s

d) o período de oscilação do ponto *B*. Indefinido.

7.6 Interferência com a luz



Sheila Terry/SPL/Latinstock

THOMAS YOUNG (1773-1829)

Médico e físico inglês, conhecido sobretudo pelo fato de ter conseguido obter interferência com a luz. Enquanto exercia a Medicina, em Londres, conseguiu explicar o fenômeno da acomodação visual e a causa do astigmatismo, passando, então, a se interessar pelo estudo dos fenômenos luminosos. Foi ele o primeiro a propor que as ondas luminosas deviam ser transversais, e não longitudinais, como pensavam outros cientistas. Além de seus trabalhos no campo da Física, notabilizou-se como egiptólogo, tendo contribuído decisivamente para decifrar a antiga escrita dos egípcios (hieróglifos).

Podemos obter interferência com a luz

Na seção 7.4 vimos que a luz é uma onda cujo valor de λ é muito pequeno. Logo, como o fenômeno de interferência pode ser observado com qualquer tipo de onda, deve ser possível obter interferência com a luz.

Entretanto, ao tentarmos obter uma figura de interferência usando holofotes, como representado na **figura 7.46**, **não** teremos êxito em nossa experiência: colocando um anteparo em frente às fontes, ele se apresentará uniformemente iluminado, sem regiões claras e escuras.

Nas experiências de interferência analisadas anteriormente, as fontes utilizadas estavam oscilando **em fase**. Acrescentamos, agora, que figuras de interferência semelhantes podem também ser obtidas se as fontes mantiverem, entre si, uma diferença de fase constante. Acontece que os holofotes da **figura 7.46** **não** satisfazem nenhuma dessas condições, pois as ondas luminosas são emitidas aleatoriamente pelos átomos, do material do gás que as constitui, sendo impossível manter as duas fontes em fase, ou com uma diferença de fase constante e essas fontes não são puntiformes. Assim, para que seja possível obter uma figura de interferência com a luz, devemos conseguir duas fontes luminosas que possam ser mantidas em fase ou com uma diferença de fase constante entre si. A seguir, veremos como esse problema foi resolvido.



James Steidl/123RF/Easypix

Figura 7.46. Usando holofotes como fontes luminosas distintas, não se consegue obter uma figura de interferência com as ondas luminosas.

A experiência de Young

O cientista inglês Thomas Young, em 1801, apresentou seu trabalho com os resultados de experimentos sobre interferência para a Royal Society. Nessas experiências, Young fez um feixe de luz atravessar dois pequenos orifícios construídos em papel grosso e obteve, pela primeira vez, uma figura de interferência luminosa composta de faixas claras e escuras alternadamente.

A **figura 7.47** representa a luz de uma fonte monocromática se difratando ao passar pelo pequeno orifício *O*. A onda luminosa difratada se propaga em direção aos orifícios F_1 e F_2, equidistantes de *O*. Nesses orifícios, a luz se difrata novamente e tudo se passa como se tivéssemos duas fontes luminosas em F_1 e F_2. Qualquer modificação que ocorra na onda proveniente de *O* manifesta-se simultaneamente em F_1 e em F_2 e, assim, essas duas fontes permanecerão constantemente em fase.

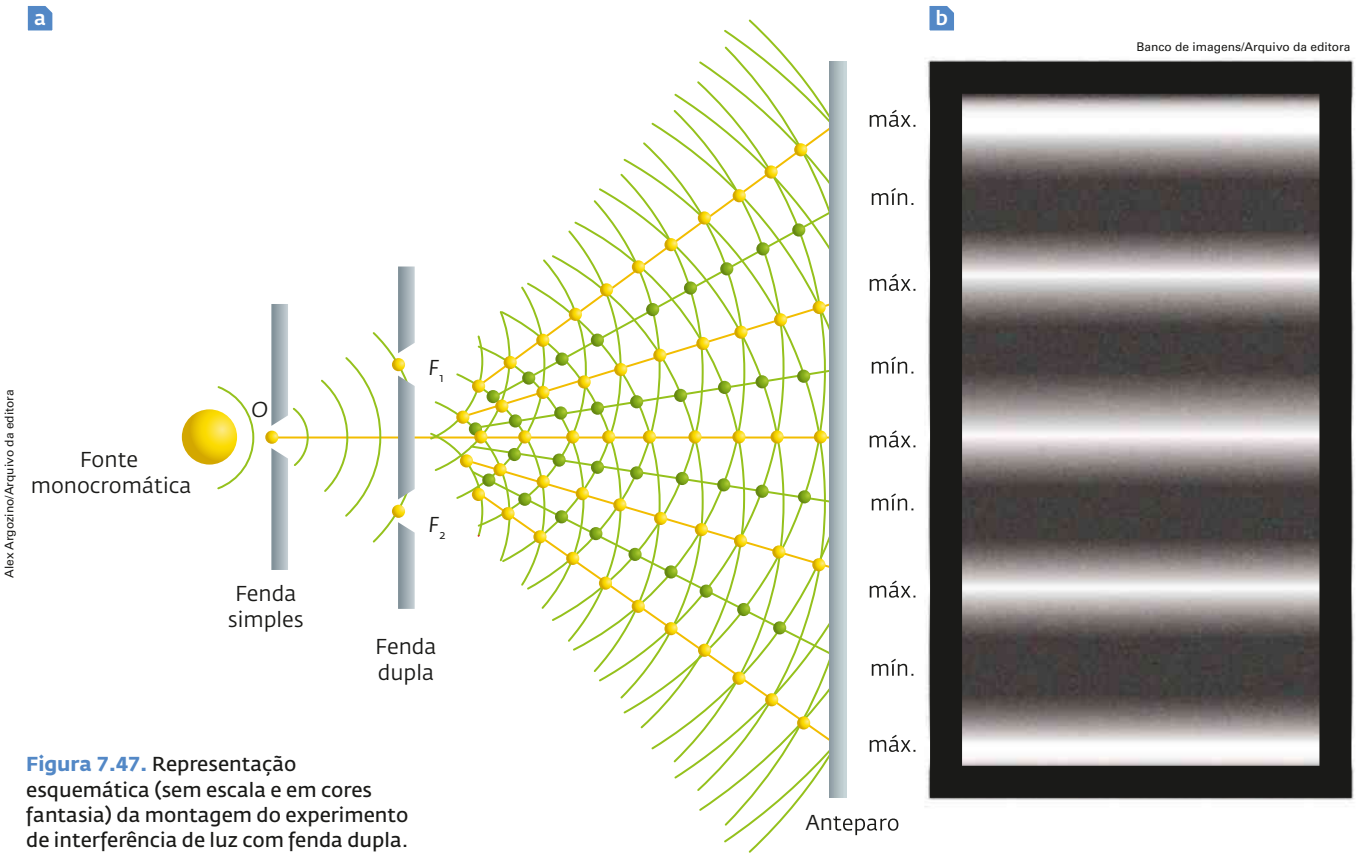


Figura 7.47. Representação esquemática (sem escala e em cores fantasia) da montagem do experimento de interferência de luz com fenda dupla.

Nessas condições, a superposição das ondas emitidas em F_1 e em F_2 dará origem a uma figura de interferência. De fato, colocando-se um anteparo para receber essas ondas luminosas, como na **figura 7.47.a**, observaremos, nesse anteparo, a existência de regiões claras e escuras, alternadas **(figura 7.47.b)**. As regiões escuras correspondem a regiões nodais da figura de interferência, isto é, regiões onde as ondas luminosas se interferem destrutivamente. As regiões claras são aquelas atingidas por duplas cristas e duplos vales, ou seja, regiões onde as ondas luminosas se interferem construtivamente. As faixas claras e escuras vistas nessa figura são denominadas **franjas de interferência**.

O resultado do experimento de Young foi bastante criticado pela comunidade científica, pois se opunha à ideia vigente na época, de que a luz teria um comportamento corpuscular. Pelo mesmo motivo, outro cientista que foi criticado pela comunidade científica por suas teorias foi Augustin Jean Fresnel. Fresnel formulou toda a matemática para os princípios de Huygens e o fenômeno da interferência, que atualmente é conhecido como **princípio de Huygens-Fresnel**. A teoria sobre o comportamento ondulatório da luz viria a ser reforçada, muitos anos depois, com o resultado das medições da velocidade da luz por Armand Hippolyte Louis Fizeau (1849) e por Jean Bernard Léon Foucault (1850).

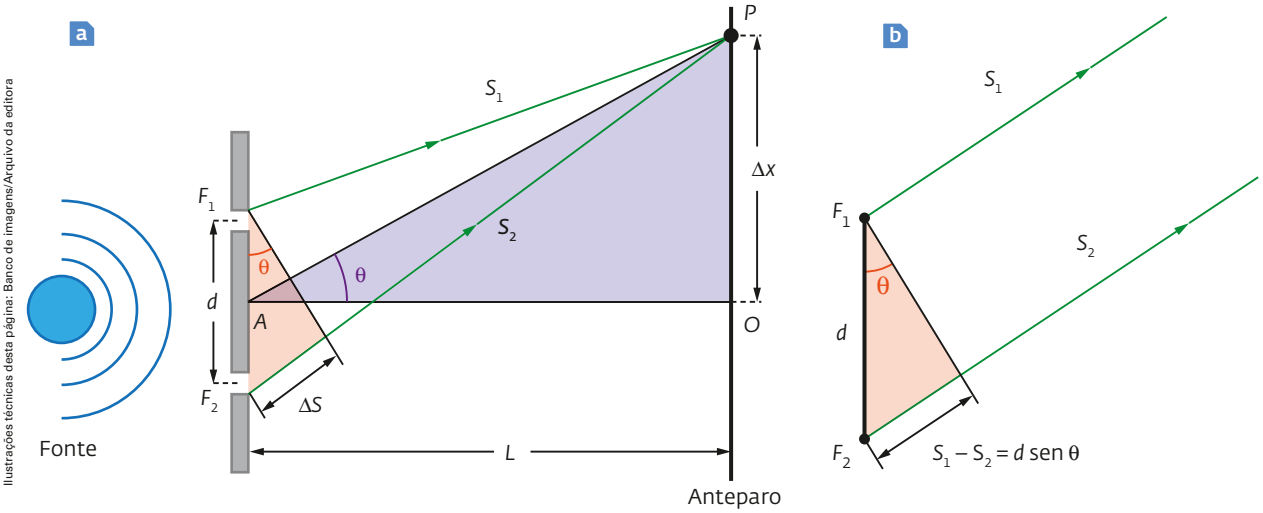
Interferência e a relação com o comprimento de onda

Repetindo a sua experiência, da fenda dupla, com luz de cores diferentes, Young verificou que a separação entre as franjas de interferência variava conforme a cor utilizada.

Consideremos um feixe luminoso que incide em um ponto P, localizado a uma altura Δx, fazendo um ângulo θ em relação à horizontal **(figura 7.48.a)**. Esse feixe parte da fenda F_1 e percorrerá um espaço S_1, enquanto o feixe luminoso que chega nesse mesmo ponto, partindo da fenda F_2, percorrerá o espaço S_2, que é maior que S_1.

Dada a distância d entre as duas fontes F_1 e F_2, muito menor do que a distância entre o anteparo e as duas fendas, ou seja, $d << L$, os feixes S_1 e S_2 podem ser considerados paralelos entre si **(figura 7.48.b)**. Neste caso, a diferença ΔS entre os dois feixes é dada por:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = d \operatorname{sen} \theta$$



Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 7.48. Em **a**, interferência da experiência de Young para determinar o comprimento de onda de luz utilizada como fonte. Em **b**, detalhe da geometria do arranjo considerando $d << L$, ou seja, S_1 e S_2 são paralelos entre si.

No triângulo AOP da **figura 7.48.a**, se considerarmos Δx menor que L, teremos que o ângulo θ também será muito pequeno. Neste caso, o sen θ pode ser aproximado por:

$$\operatorname{sen} \theta \approx \operatorname{tg} \theta = \frac{\Delta x}{L}$$

e

$$\frac{\Delta S}{d} = \frac{\Delta x}{L}$$

Medindo, cuidadosamente, em suas experiências, os valores de Δx, L e d, Young pôde determinar a relação entre a separação Δx de duas linhas nodais consecutivas **(figura 7.48.a)** e o comprimento de onda, λ, utilizado no experimento.

$$\Delta x = \frac{L\lambda}{d}$$

A partir dos experimentos que realizou, Young concluiu que as franjas claras (valores de máximo na **figura 7.47**) aparecerão no anteparo quando as duas ondas estiverem em fase ao chegar no anteparo, somando-se construtivamente, ou seja, $\Delta S = n\lambda$ ($n = 0, 1, 2, 3, 4, \ldots$). Por outro lado, as franjas escuras (valores de mínimo na **figura 7.47**) aparecerão quando as ondas estiverem em oposição de fase ao chegar no anteparo, subtraindo-se, ou seja, $\Delta S = (2n + 1)\frac{\lambda}{d}$ ($n = 0, 1, 2, 3, 4, \ldots$).

A **tabela 7.1** apresenta o comprimento de onda das cores no ar. A luz vermelha é aquela que possui maior comprimento de onda e o menor valor de λ corresponde à luz violeta. Esses valores são:

$$\lambda\,(\text{vermelho}) = 6{,}5 \cdot 10^{-7}\ \text{m} \quad \text{e} \quad \lambda\,(\text{violeta}) = 4{,}5 \cdot 10^{-7}\ \text{m}$$

As luzes das demais cores têm comprimentos de onda compreendidos entre esses extremos. Observe que esses valores encontrados para λ são muito pequenos.

Tabela 7.1

COMPRIMENTO DE ONDA DA LUZ PARA DIFERENTES CORES (NO AR)

Cor	λ (m)
Vermelho	$6{,}5 \cdot 10^{-7}$
Amarelo	$5{,}7 \cdot 10^{-7}$
Verde	$5{,}4 \cdot 10^{-7}$
Azul	$4{,}8 \cdot 10^{-7}$
Violeta	$4{,}5 \cdot 10^{-7}$

Cor e frequência da luz

As experiências de Young foram feitas no ar, portanto, os valores de λ a que nos referimos correspondem à luz se propagando nesse meio. Como conhecemos a velocidade de propagação da luz no ar, aproximadamente o mesmo valor da sua velocidade no vácuo ($v = 3{,}0 \times 10^8$ m/s), podemos usar a relação conhecida, $v = \lambda f$, para calcular as frequências correspondentes a cada cor. Para o vermelho e o violeta obtemos:

$$f\,(\text{vermelho}) = 4{,}6 \cdot 10^{14}\ \text{hertz}$$
$$f\,(\text{violeta}) = 6{,}7 \cdot 10^{14}\ \text{hertz}$$

Tabela 7.2

FREQUÊNCIA DA LUZ PARA DIFERENTES CORES

Cor	f (Hz)
Vermelho	$4{,}6 \cdot 10^{14}$
Amarelo	$5{,}3 \cdot 10^{14}$
Verde	$5{,}6 \cdot 10^{14}$
Azul	$6{,}3 \cdot 10^{14}$
Violeta	$6{,}7 \cdot 10^{14}$

Ao violeta corresponde a maior frequência (menor λ) e, ao vermelho, a menor frequência (maior λ). A **tabela 7.2** apresenta os valores das frequências para as mesmas cores da **tabela 7.1** (observe que são bem elevados).

A cor de um feixe de luz monocromática não se altera quando esse feixe passa de um meio transparente para outro. Por exemplo: um feixe de luz vermelha, no ar, continua com essa cor ao penetrar na água ou no vidro. Quando isso acontece, o comprimento de onda e a velocidade da onda se modificam, mas sua frequência permanece a mesma. Por isso, a cor de um feixe de luz é caracterizada por sua frequência, não por seu comprimento de onda, pois o valor de λ varia quando a luz passa de um meio para outro, enquanto a cor da luz e sua frequência não se modificam nessas condições.

Podemos, pois, destacar que:

A luz é um fenômeno ondulatório cujas frequências são muito elevadas (compreendidas entre 10^{14} hertz e 10^{15} hertz). A cada cor do espectro da luz branca corresponde uma frequência diferente, e a ordem crescente dessas frequências é a mesma ordem de distribuição das cores no espectro eletromagnético (capítulo 6): vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil e violeta.

Após conhecermos as evidências do caráter ondulatório da luz, vamos aprender sobre a natureza de uma onda luminosa. Em outras palavras, vamos responder à seguinte pergunta: o que está oscilando quando uma onda luminosa se propaga?

Young e os físicos de sua época não souberam dar uma resposta satisfatória para essa questão, porém, posteriormente, com o desenvolvimento do eletromagnetismo, foi possível compreender o comportamento da luz. Com a síntese desenvolvida pelo físico escocês James C. Maxwell, no final do século XIX, foi possível determinar que a luz é uma onda eletromagnética, da mesma natureza de outras que conhecemos hoje em dia, como as ondas de rádio, de TV, de celulares, de micro-ondas e diversas outras.

Exemplo

Um estudante repetiu a experiência de Young usando luz monocromática. Verificou que a separação entre os orifícios F_1 e F_2 era $d = 0{,}02$ cm e que a distância deles ao anteparo era $L = 130$ cm. Medindo a separação entre duas franjas escuras, ele encontrou $\Delta x = 0{,}35$ cm.

a) Qual o comprimento de onda da luz usada na experiência?

Da expressão $\Delta x = L\lambda/d$, obtemos:

$$\lambda = \frac{d \cdot \Delta x}{L} = \frac{0{,}02 \cdot 0{,}35}{130} \quad \therefore \quad \lambda = 5{,}4 \cdot 10^{-5}\ \text{cm} \quad \text{ou} \quad \lambda = 5{,}4 \cdot 10^{-7}\ \text{m}$$

b) Calcule a frequência dessa luz e identifique a sua cor.

A relação $v = \lambda f$ nos fornece $f = v/\lambda$. Em nosso caso, temos $v = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s (velocidade da luz no ar) e $\lambda = 5{,}4 \cdot 10^{-7}$ m. Assim:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{3{,}0 \cdot 10^8}{5{,}4 \cdot 10^{-7}} \quad \therefore \quad f = 5{,}6 \cdot 10^{14}\ \text{hertz}$$

Consultando a **tabela 7.2**, verificamos que essa frequência corresponde à cor verde, isto é, o estudante realizou sua experiência usando luz verde.

c) Se a luz usada pelo estudante, propagando-se no ar, penetrasse em um bloco de vidro, quais seriam sua frequência e sua cor no interior do bloco?

Quando um feixe de luz monocromática passa de um meio para outro, tanto a sua frequência quanto a sua cor permanecem inalteradas. Então, dentro do bloco de vidro, a luz será ainda verde e com uma frequência $f = 5{,}6 \cdot 10^{14}$ hertz.

d) Sabendo-se que, no bloco de vidro, a velocidade de propagação da luz é $v = 2{,}0 \cdot 10^8$ m/s, qual será o comprimento de onda da luz verde no interior do bloco?

Conhecendo os valores de v e f para a luz verde ao se propagar no vidro, a relação $v = \lambda f$ nos fornecerá:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{2{,}0 \cdot 10^8}{5{,}6 \cdot 10^{14}} \quad \therefore \quad \lambda = 3{,}6 \cdot 10^{-7}\ \text{m}$$

Observe que o comprimento de onda diminui quando a luz passa do ar para o vidro.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

19. Responda no caderno:

a) Em uma sala existem duas lâmpadas, ambas projetando luz sobre uma mesma parede. Observaremos franjas de interferência sobre essa parede? Por quê?

b) Por que Young conseguiu obter franjas de interferência em sua experiência?

20. Sabe-se que a velocidade de propagação da luz, no vácuo, tem o mesmo valor para qualquer cor. Considere dois feixes luminosos, sendo um amarelo e o outro azul, propagando-se no vácuo.

a) Qual deles tem maior comprimento de onda? O amarelo.

b) Então, qual dos dois feixes tem maior frequência? Por quê? O azul; porque $f = v/\lambda$ (menor λ, maior f).

21. Considere feixes luminosos monocromáticos com as seguintes cores: verde, amarelo, azul, violeta e vermelho. Coloque-os em ordem crescente de frequência. Vermelho, amarelo, verde, azul e violeta.

22. Em uma repetição da experiência de Young, usando luz monocromática, os dois orifícios estão separados de $d = 0{,}10$ mm, e as franjas de interferência são observadas em um anteparo situado a uma distância $L = 20$ cm dos orifícios. Observa-se que a separação entre duas franjas escuras consecutivas é $\Delta x = 1{,}3$ mm.

a) Calcule o comprimento de onda da luz usada na experiência. $6{,}5 \cdot 10^{-7}$ m

b) Determine a frequência dessa luz. $4{,}6 \cdot 10^{14}$ hertz

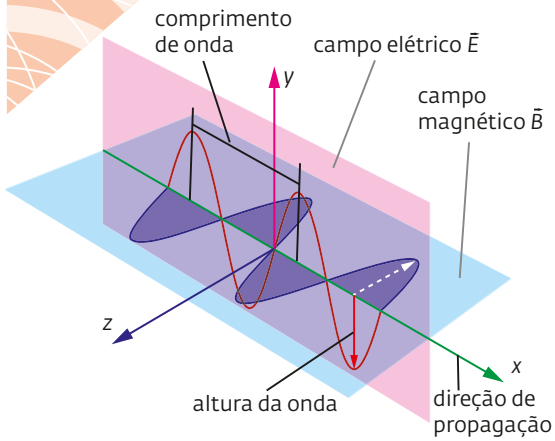
c) Usando uma das tabelas apresentadas nesta seção, identifique a cor dessa luz. Vermelha.

19. a) Não; porque as duas lâmpadas não são fontes luminosas em fase e não mantêm uma diferença de fase constante.
b) Porque usou um artifício para obter duas fontes luminosas em fase.

FÍSICA NO CONTEXTO

Polarização da Luz

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 7.49. Onda eletromagnética composta por campos elétricos e magnéticos que oscilam perpendicularmente entre si.

Quando estudamos as formas de transferência de calor e o fenômeno de refração vimos que a luz visível é um exemplo de onda que compõe o espectro eletromagnético. Uma onda eletromagnética é, por definição, uma onda transversal constituída por campos elétricos ($\vec{E}$) e magnéticos ($\vec{B}$), que oscilam perpendicularmente entre si na direção de propagação da onda **(figura 7.49)**.

Na maioria dos casos, a luz não está polarizada, mas é composta por ondas que se propagam em diversas direções. Na **figura 7.50.a** estão representados alguns planos de propagação de uma fonte de luz não polarizada. A luz solar e as lâmpadas fluorescentes podem ser citadas como exemplos de fontes de luz não polarizadas.

A polarização da luz ocorre quando os campos oscilam em uma única direção. Dizemos que, neste caso, a luz está polarizada em um determinado plano. Dessa forma, na **figura 7.50.b**, vemos que a luz está polarizada no plano vertical.



Figura 7.50. Luz não polarizada em **a** e luz polarizada em **b**.

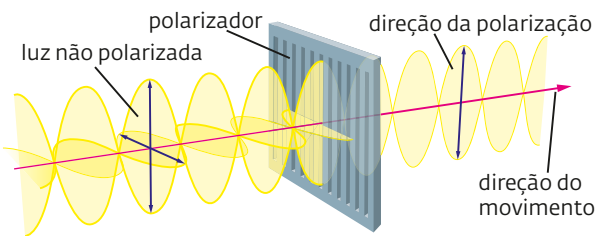
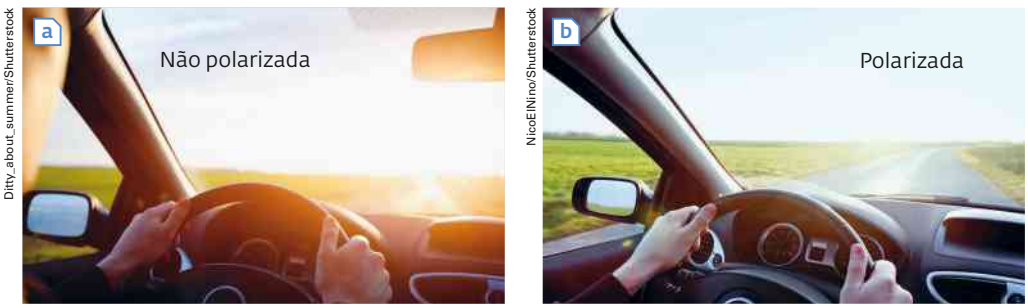


Figura 7.51. O filtro polarizador impede que a luz oscile em todas as direções. Neste exemplo, o polarizador seleciona deixando passar apenas a luz que oscila paralelamente às suas fendas.

Quando se quer selecionar uma determinada direção da luz, pode-se empregar um polarizador **(figura 7.51)**. Os polarizadores são filtros que, quando aplicados em câmeras fotográficas **(figura 7.52)**, por exemplo, removem o excesso de luz provocado pelo espalhamento dos raios solares. Outros dispositivos, como telas de celulares, monitores LCD e lentes de óculos, empregam a polarização para melhorar a qualidade da imagem.



Ditty_about_summer/Shutterstock

NicoElNino/Shutterstock

Figura 7.52. Na fotografia **a** foi usada uma lente comum; a fotografia **b** foi feita com um filtro polarizador.

7.7 Ondas sonoras

O que é o som

Os fenômenos sonoros estão relacionados com as oscilações dos "objetos materiais". Sempre que escutamos um som, há um "objeto material" que oscila, produzindo esse som. Por exemplo: quando uma pessoa fala, o som que ela emite é produzido pelas oscilações de suas pregas vocais; quando batemos na pele de um tambor, em um pedaço de madeira ou de metal, esses "objetos" oscilam e emitem som; as cordas de um piano ou de um violoncelo também emitem som quando estão oscilando; a palheta fixa na boquilha de um clarinete ou de um saxofone oscila e emite som quando o músico sopra através dela.

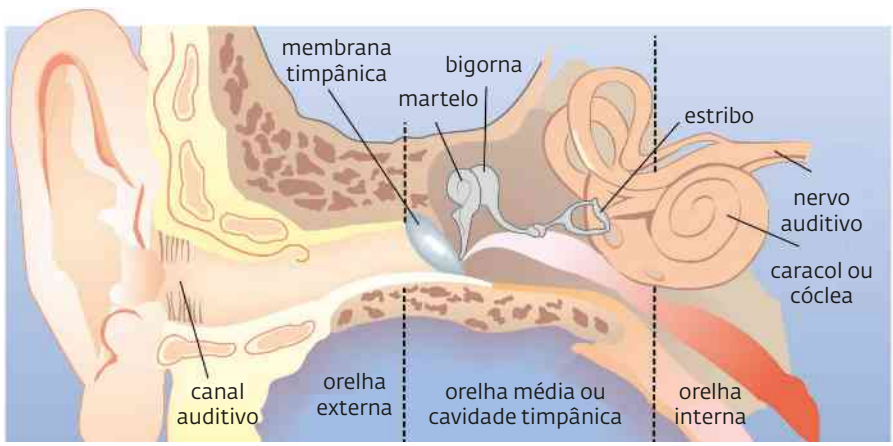
No caso da fala, a caixa craniana amplifica as oscilações das pregas vocais e o som emitido pela boca propaga-se de forma mais intensa. Quanto aos instrumentos musicais apenas acústicos (não eletrônicos), suas "caixas" ou "tubos" são os amplificadores das oscilações, produzidas em cordas, membranas ou lâminas.

Todos esses "objetos" são fontes sonoras que, ao oscilar, produzem ondas que se propagam no meio material (sólido, líquido ou gasoso) situado entre elas e a nossa orelha. Ao penetrar na orelha externa, essas ondas provocam oscilações que nos causam as sensações sonoras.

Como vemos na **figura 7.53**, a maior parte do aparelho auditivo está localizada no interior da cabeça.

As ondas sonoras, ao atingir a orelha, são dirigidas para o interior do canal auditivo, na extremidade do qual existe uma membrana denominada membrana timpânica. A membrana é tão delicada e sensível que pequenas variações de pressão da onda sonora são suficientes para colocá-la em vibração.

Essas vibrações são comunicadas a um pequeno osso chamado martelo, que, por sua vez, aciona outro osso (a bigorna), o qual, finalmente, faz oscilar um terceiro osso, denominado estribo (observe, na **figura 7.53**, sua forma). Com esse processo, as oscilações são sucessivamente ampliadas (ou amplificadas), tornando nossa orelha capaz de perceber sons de intensidade muito baixa.

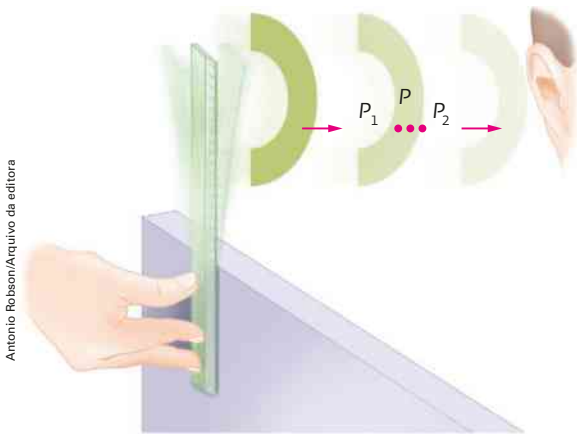


Osni de Oliveira/Arquivo da editora

Figura 7.53. A orelha humana é subdividida em três partes: orelha externa, orelha média e orelha interna. Representação sem escala e em cores fantasia.

Finalmente, as oscilações amplificadas chegam à orelha interna. A cóclea é revestida por pelos muito pequenos e, em seu interior, existe um líquido que facilita a propagação do som. As ondas sonoras, na cóclea, colocam os pequenos pelos em movimento, estimulando células nervosas que, por meio do nervo auditivo, enviam os sinais ao cérebro. Dessa maneira, a pessoa tem a percepção do som.

Analisemos a situação representada na **figura 7.54**. Uma lâmina, colocada em oscilação, provoca no ar compressões e rarefações sucessivas que se propagam nesse meio, de maneira semelhante ao que acontece em uma mola quando ela oscila longitudinalmente (como foi mostrado na **figura 7.13**). Quando uma molécula do ar, situada em *P* **(figura 7.54)**, é atingida por essa onda de compressões e rarefações, ela oscila entre os pontos P_1 e P_2 na mesma direção em que a onda se propaga. Logo, somos levados a concluir que a onda emitida pela lâmina em oscilação é uma **onda longitudinal**.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 7.54. As ondas sonoras são ondas longitudinais que se propagam em um meio material. Representação sem escala e em cores fantasia.

Se a lâmina estiver oscilando com uma frequência menor do que 20 hertz, ou maior do que 20 000 hertz, verifica-se que, ao atingir a orelha de uma pessoa, a onda não provocará nenhuma sensação sonora. Para que a pessoa perceba a sensação sonora, é necessário que a frequência da onda esteja compreendida entre aqueles limites.

Para sermos mais precisos, as frequências audíveis não estão situadas rigorosamente entre 20 hertz e 20 000 hertz, pois esses limites variam um pouco de uma pessoa para outra. Chegamos, então, à conclusão seguinte:

O som é uma onda longitudinal que se propaga em um meio material (sólido, líquido ou gasoso), cuja frequência está compreendida, aproximadamente, entre 20 hertz e 20000 hertz.

Observe que o som pode se propagar em um meio material qualquer: ar, água, ferro, etc. Entretanto, ao contrário do que acontece com a luz, o som não se propaga no vácuo, isto é, uma pessoa não perceberá som algum se não existir um meio material entre o objeto em oscilação e sua orelha **(figura 7.55)**.


Reprodução/Warner Bros. Pictures

Figura 7.55. No vácuo o som não se propaga. Cena do filme *Gravidade*, direção de Alfonso Cuarón, 2013.

Infrassom e ultrassom

Uma onda longitudinal propagando-se em um meio material, com frequência inferior a 20 hertz, é denominada **infrassom** e, se sua frequência for superior a 20 000 hertz, ela é denominada **ultrassom**. Essas ondas **não** provocam sensação sonora ao atingir a orelha de uma pessoa. Entretanto, sabe-se que alguns animais são capazes de perceber os ultrassons. Na figura 7.56 estão apresentados os intervalos de frequência sonora percebidos por alguns animais.

As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

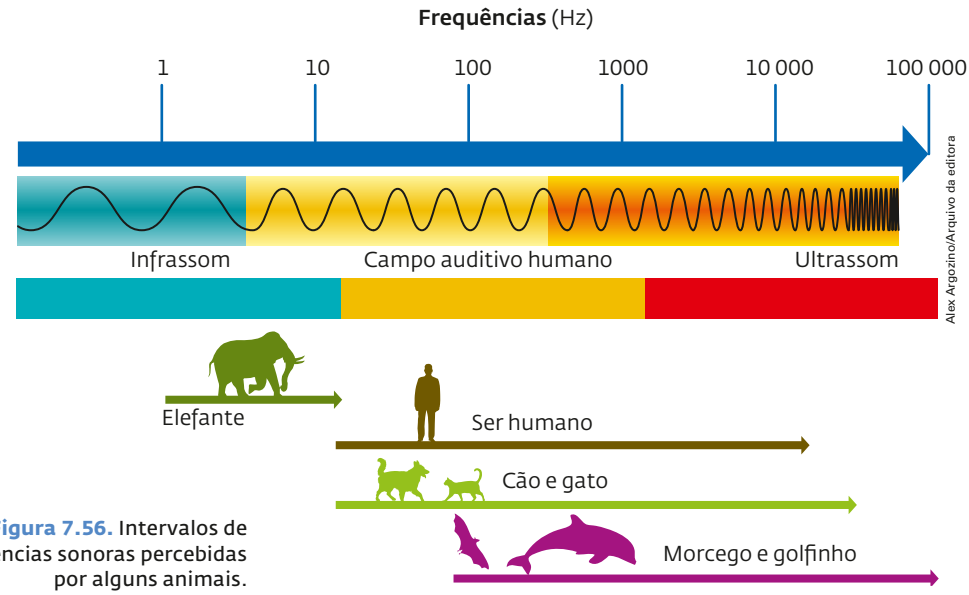
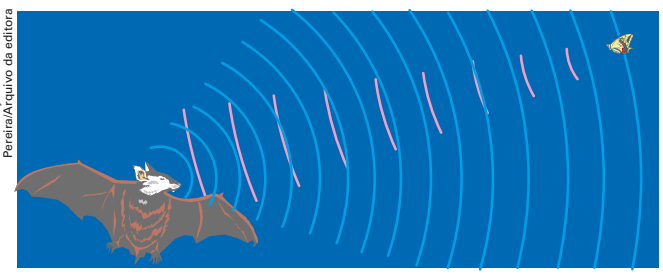


Figura 7.56. Intervalos de frequências sonoras percebidas por alguns animais.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 7.57. O morcego emite uma onda de ultrassom que, após ser refletida por um inseto e voltar para ele, possibilita a localização desse inseto.

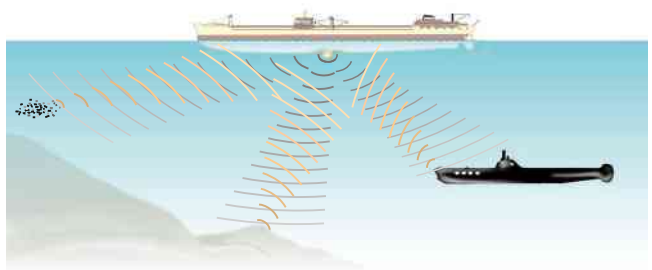


Figura 7.58. O sonar é um dispositivo que utiliza os ultrassons para localizar a posição de objetos e conhecer o relevo do fundo do mar.

Experiências recentes mostraram que cachorros, por exemplo, são capazes de perceber ultrassons cujas frequências alcancem até 50 000 hertz. É por isso que cães adestrados atendem a apitos de ultrassom que uma pessoa não consegue perceber. Os morcegos, mesmo no escuro, podem voar sem colidir com obstáculos, porque emitem ultrassons que são captados por suas orelhas após se refletir nesses obstáculos (eco) (figura 7.57). As frequências do ultrassom que os morcegos emitem e ouvem podem chegar a 120 000 hertz.

Para que os morcegos percebam o eco eles devem estar a uma distância do obstáculo tal que o tempo de ida e volta da onda sonora seja maior do que a duração dela. Caso o intervalo de tempo não seja suficiente para distinguir entre o eco e o som emitido, temos um efeito chamado de **reverberação**.

Em um dispositivo denominado **sonar**, os ultrassons são utilizados para localizar objetos e medir a distância até eles, de modo semelhante ao que é feito pelos morcegos. Por exemplo: um cardume de peixes, um submarino ou um objeto no fundo do mar podem ser localizados ao refletir os ultrassons emitidos pelo sonar de um navio (figura 7.58).

Velocidade do som

Durante uma tempestade, embora o relâmpago e o trovão sejam produzidos no mesmo instante, só ouvimos o trovão certo tempo após termos visto o relâmpago. Isso ocorre devido à velocidade de propagação da luz no ar ser muito grande (300 000 km/s) comparada à velocidade de propagação do som (340 m/s). O intervalo entre a percepção do relâmpago e a do trovão representa o tempo que a onda sonora leva para chegar até nós.

Um experimento que reproduz um fenômeno semelhante a esse foi realizado por cientistas do século XVII para determinar a velocidade do som no ar: uma pessoa detonava um canhão e, à distância de aproximadamente 20 km, outra pessoa media o tempo entre a percepção do clarão e a do som produzidos pelo tiro. Com este procedimento, Pierre Gassendi, em 1685, obteve o valor de 450 m/s para velocidade do som no ar.

Medidas mais recentes, realizadas com maior precisão, mostram que essa velocidade é de 340 m/s, se o ar estiver a 20 °C. Essa especificação é necessária porque se verifica que, quanto maior for a temperatura de um gás, maior a velocidade com que a onda sonora se propaga nele. De fato, a agitação das moléculas de um gás aumenta com a temperatura, fazendo com que a propagação da onda sonora seja mais rápida.

Assim, a velocidade de propagação de uma onda depende do meio no qual ela está se propagando, o que ocorre também com o som. A **tabela 7.3** apresenta a velocidade do som em diferentes meios, em estados físicos diversos.

Comentário

Com exceção da polarização, que é um fenômeno exclusivo das ondas transversais e, consequentemente, não pode ocorrer para ondas sonoras, que são ondas longitudinais, todos os fenômenos que estudamos para as ondas em geral acontecem também com as ondas sonoras (inclusive os infrassons e os ultrassons). Assim, uma onda sonora se **reflete** de tal modo que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão, o que explica, por exemplo, fenômenos como o eco. O fenômeno da **refração** também ocorre com o som, isto é, quando uma onda sonora passa obliquamente de um meio para outro, ela tem sua direção de propagação alterada, sendo válida, também aqui, a lei de Snell. Como já vimos, a **difração** e a **interferência** são fenômenos observados com as ondas sonoras, assim como acontece com qualquer tipo de onda. Além disso, a relação $v = \lambda f$ é válida para as ondas sonoras, e a frequência de um som não se altera quando ele passa de um meio para outro.

Observando a **tabela 7.3**, temos que a velocidade de propagação do som é maior nos meios sólidos, seguido dos meios líquidos e, por último, nos meios gasosos. Pode-se concluir, então, que para ondas sonoras se propagando: $v_{sólido} > v_{líquido} > v_{gás}$.

Tabela 7.3

Velocidade do som	
Meio	***v*** **(m/s)**
Borracha	54
O_2 (0 °C)	317
Ar (20 °C)	340
H_2 (0 °C)	1 300
Água	1 450
Ferro	5 100
Granito	6 000

Intensidade do som

Quando um rádio está ligado com seu volume máximo, dizemos que o som emitido por ele é de alta **intensidade**. Por outro lado, o tique-taque de um relógio é um som de baixa intensidade.

A intensidade é uma propriedade do som que está relacionada com a energia de oscilação da fonte que emite a onda sonora. Ao se propagar, a onda transporta essa energia, distribuindo-a em todas as direções. Quanto maior for a quantidade de energia (por unidade de tempo) que a onda sonora transportar até nossa orelha, maior será a intensidade do som que perceberemos.

Mas, para todos os fenômenos ondulatórios, quanto maior a quantidade de energia transportada pela onda, maior sua **amplitude**. Então, podemos concluir que:

A intensidade de um som é tanto maior quanto maior for a amplitude da onda sonora.



Hulton Archive/Getty Images

GRAHAM BELL (1847-1922)

Cientista escocês que desenvolveu trabalhos no campo da telegrafia. Seus estudos culminaram com a invenção do telefone, que ele patenteou em 1876. Em 1877, D. Pedro II instalou uma linha telefônica no palácio da Quinta da Boa Vista. Nos anos seguintes, várias outras linhas telefônicas foram instaladas, incluindo linhas interurbanas, o que levou o Brasil a ser um país pioneiro nesse setor.

Nível de intensidade sonora

Vimos que a intensidade do som está relacionada com a energia que é transportada pela onda sonora. Quantitativamente, define-se intensidade I de uma onda da seguinte maneira:

Seja ΔE a energia que essa onda transporta através de uma área A, em um intervalo de tempo Δt. Tem-se, por definição,

$$I = \frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t}$$

No Sistema Internacional, a unidade para a medida de I será:

$$1\ \frac{J}{m^2 \cdot s} = \frac{J/s}{m^2} = 1\ W/m^2$$

Existe um valor mínimo da intensidade sonora capaz de sensibilizar o aparelho auditivo. Esse valor depende da frequência do som, variando também de uma pessoa para outra. Para uma frequência aproximada de 1 000 hertz e para uma orelha normal, esse limite mínimo é cerca de $10^{-12}\ W/m^2$. Para você perceber como esse valor é muito pequeno, saiba que essa intensidade corresponde a uma amplitude de vibração de 10^{-9} cm (menor do que o raio de um átomo). Vemos, então, que nossa orelha é um detector extraordinariamente sensível, capaz de perceber um deslocamento dessa ordem de grandeza.

Por outro lado, ondas sonoras cujas intensidades têm valores próximos de $1\ W/m^2$ podem chegar a causar dores e danos à orelha interna. Essa intensidade corresponde a uma amplitude de oscilação da ordem de 0,01 mm.

O valor $10^{-12}\ W/m^2$ é usualmente representado por I_0 e tomado como referência para comparações da intensidade dos diversos sons, como veremos a seguir ($I_0 = 10^{-12}\ W/m^2$).

Os pesquisadores que estudaram os fenômenos relacionados com a intensidade do som perceberam que a "sensação" produzida em nossa orelha, pelo som de certa intensidade I, **não** varia proporcionalmente a essa intensidade. Por exemplo, um som de intensidade $I_2 = 2I_1$ **não** produz, em nossa orelha, uma "sensação" duas vezes mais intensa do que aquela produzida por I_1. Na realidade, os cientistas verificaram que essa sensação varia **com o logaritmo** da intensidade sonora.

Por essa razão, para medir essa característica da nossa orelha, foi definida uma grandeza, β, denominada **nível de intensidade**, da seguinte maneira:

$$\beta = \log \frac{I}{I_0}$$

em que I é a intensidade da onda sonora e $I_0 = 10^{-12}\ W/m^2$.

A unidade para medida dessa grandeza foi denominada 1 bel = 1 B em homenagem a Graham Bell. Observe, então, que:

- Se $I = I_0$, temos $\beta = \log \frac{I_0}{I_0} = \log 1 \quad \therefore \quad \beta = 0$
- Se $I = 10I_0$, temos $\beta = \log \frac{10I_0}{I_0} = \log 10 \quad \therefore \quad \beta = 1\ B$
- Se $I = 100I_0$, temos $\beta = \log \frac{100I_0}{I_0} = \log 100 \quad \therefore \quad \beta = 2\ B$
- Se $I = 1\,000I_0$, temos $\beta = \log \frac{1\,000I_0}{I_0} = \log 1\,000 \quad \therefore \quad \beta = 3\ B$ e assim sucessivamente.

Logo, o som de 1 B possui intensidade 10 vezes maior do que o som de intensidade I_0; o de 2 B possui intensidade 100 vezes maior do que o de I_0, etc.

Como dissemos, a unidade mais usada para a medida de β é 1 dB = 0,1 B. Assim, os valores acima seriam $\beta = 1\ B = 10\ dB$, $\beta = 2\ B = 20\ dB$ e $\beta = 3\ B = 30\ dB$.

Uma pessoa com audição normal é capaz de perceber sons de frequências compreendidas entre 20 hertz e 20 000 hertz. Deve-se observar, entretanto, que para cada uma dessas frequências há um nível mínimo de intensidade, abaixo do qual o som não é percebido. No gráfico da **figura 7.59**, a curva denominada **limiar de audição** nos mostra esses valores mínimos. Por exemplo, se um som de 100 hertz tiver um nível de intensidade de 20 dB, ele não será audível, pois o ponto correspondente a esses valores está abaixo da curva mencionada, que fornece os limites da audição.

O gráfico mostra que o som com essa frequência só se torna audível com um nível de intensidade superior a, aproximadamente, 30 dB. Já um som de 2 000 hertz pode ser ouvido (observe o gráfico) mesmo que seu nível de intensidade seja negativo ($\beta < 0$ ou $I < 10^{-12}\ W/m^2$).

Na **figura 7.59**, vemos ainda a curva que indica o limiar da sensação dolorosa para as diversas frequências audíveis. Observe que esse limiar é aproximadamente constante e vale cerca de 120 dB para qualquer frequência. A **tabela 7.4** mostra os limites de exposição a ruído contínuo.

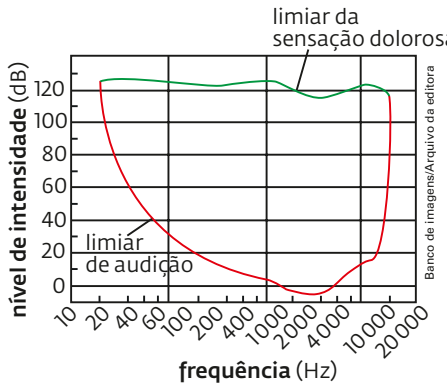


Figura 7.59. Níveis de intensidade necessários para a percepção das diversas frequências audíveis, para uma pessoa com audição normal.

Conforme dissemos, o gráfico da **figura 7.59** refere-se à orelha normal. Entretanto, as curvas ali apresentadas podem variar bastante de uma pessoa para outra, principalmente em função da idade.

Na **figura 7.60** apresentamos a intensidade de alguns sons, em decibéis.

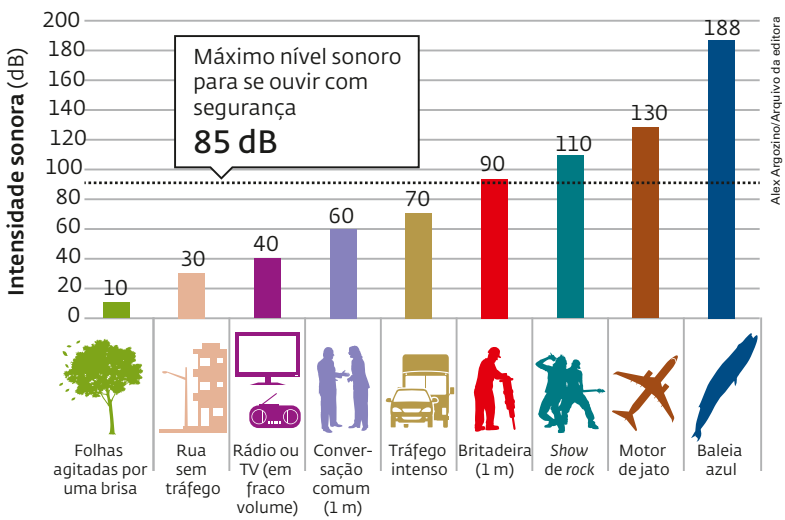


Figura 7.60. Intensidade sonora. Ilustrações representadas sem escala e em cores fantasia.

[1] (Norma Regulamentadora nº 15 (NR-15), da Portaria do Ministério do Trabalho nº 3.214/1978, Brasil, 1978).

Tabela 7.4

LIMITES DE EXPOSIÇÃO A RUÍDO CONTÍNUO[1]

Nível de ruído (dB)	Máxima exposição diária permitida
85	8 horas
86	7 horas
87	6 horas
88	5 horas
89	4 horas e 30 minutos
90	4 horas
91	3 horas e 30 minutos
92	3 horas
93	2 horas e 30 minutos
94	2 horas
95	1 horas e 45 minutos
98	1 hora e 15 minutos
100	1 hora
102	45 minutos
104	35 minutos
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos
112	10 minutos
114	8 minutos
115	7 minutos

Fonte de dados: Ministério da Saúde, Secretaria de Atenção à Saúde, Departamento de Ações Programáticas Estratégicas. Brasília: Editora do Ministério da Saúde, 2006

Altura do som

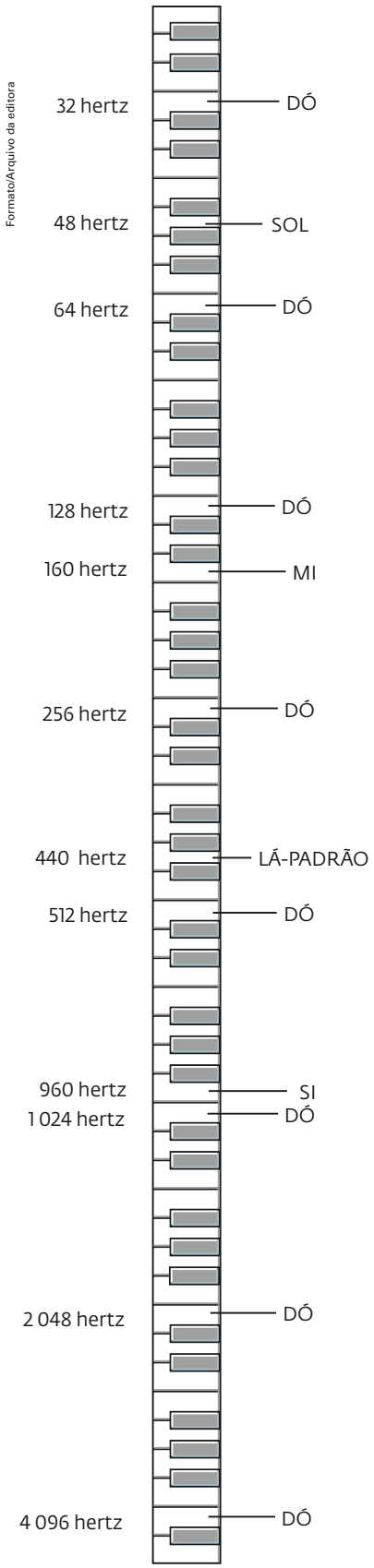
Altura é a qualidade do som que nos permite classificá-lo como **grave** (baixa frequência) ou **agudo** (frequência elevada). De modo geral, os homens têm voz grave ("grossa") e as mulheres têm voz aguda ("fina"). Em linguagem musical, diz-se também que um som agudo é **alto** e um som grave é **baixo**. Observe que, na linguagem comum, os termos "alto" e "baixo" costumam ser usados referindo-se à intensidade do som, portanto, com um significado diferente do explicado neste tópico, o que implica adequar o significado ao contexto no qual os termos estão sendo empregados.

Analisando como um som está relacionado com a **frequência** *f* da onda sonora, quanto mais agudo ele for, maior será sua **frequência**. Assim, podemos concluir que a frequência da voz masculina é, em geral, menor do que a frequência da voz feminina (as pregas vocais dos homens oscilam com frequência menor do que as das mulheres). Em resumo, temos:

A frequência de um som caracteriza sua percepção como grave ou agudo. Um som de pequena frequência é grave (baixo), e um som de grande frequência é agudo (alto).

As notas musicais também são caracterizadas por sua frequência, isto é, quando um instrumento musical emite notas diferentes, ele está emitindo sons de **frequências diferentes**. Em um piano (figura 7.62), por exemplo, cada tecla corresponde a um som de uma dada frequência. As teclas à esquerda do pianista correspondem às notas de frequências menores (sons graves), e as da direita, às notas de frequências mais elevadas (sons agudos). Observe, na figura 7.61, a representação do teclado de um piano, no qual estão indicadas as frequências de algumas notas.

Os cantores de música clássica são classificados de acordo com as frequências das notas que são capazes de emitir: os **baixos** (voz grave – homem), os **tenores** (voz aguda – homem), as **contraltos** (voz grave – mulher), as **sopranos** (voz aguda – mulher), etc. As frequências das notas que esses cantores são capazes de emitir variam desde cerca de 100 hertz (baixo) até cerca de 1 200 hertz (soprano).



Formato/Arquivo da editora

Figura 7.61. Frequências de algumas notas da escala musical.


Bob Orsillo/Shutterstock/Glow Images

Figura 7.62. As teclas de um piano são ligadas a cordas de tamanhos diferentes que, ao vibrarem, emitem frequências também diferentes.

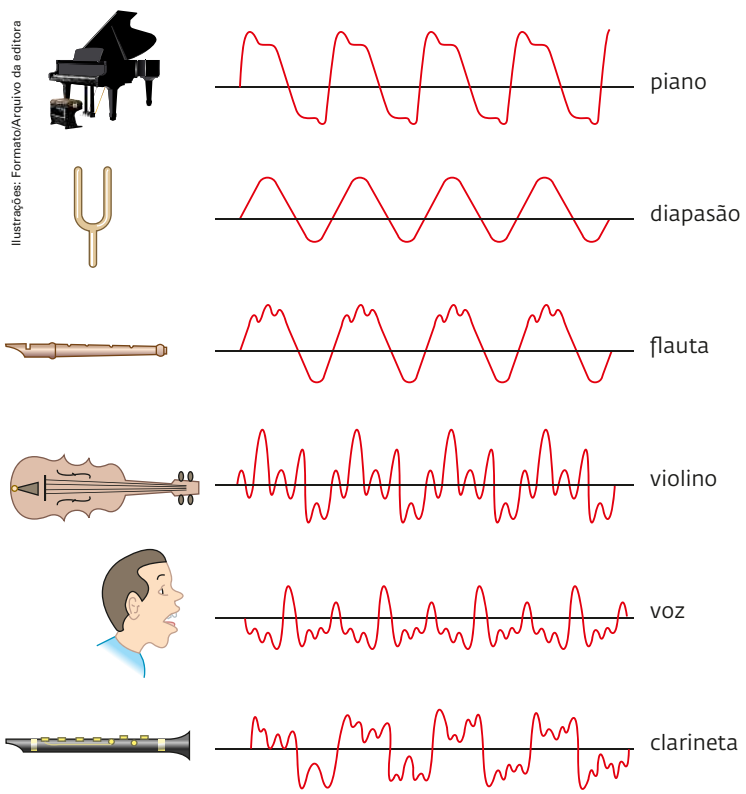
Timbre

Se tocarmos certa nota de um piano e se essa mesma nota (mesma frequência) for emitida, com a mesma intensidade, por um violino, seremos capazes de distinguir uma da outra, isto é, saberemos dizer qual nota foi emitida pelo piano e qual foi emitida pelo violino. Dizemos que elas têm **timbres** diferentes.

Isso acontece porque a nota emitida pelo piano resulta da superposição das oscilações não só da corda acionada, mas também de várias outras partes do instrumento (madeira, colunas de ar, outras cordas, etc.), que vibram com ela. Dizemos, então, que a onda sonora emitida terá uma forma própria, característica do piano. De modo semelhante, a onda emitida pelo violino é o resultado das oscilações características desse instrumento, apresentando, por isso, uma **forma diferente** da onda emitida pelo piano. Observando a forma resultante de uma onda sonora, cuja frequência é 440 hertz, emitida por um violino e, a mesma nota (440 hertz) emitida pelo piano, vemos que representam sons diferentes, porque sons de mesma frequência, mas de timbres diferentes, correspondem a ondas sonoras cujas formas são diferentes. Portanto, podemos dizer que:

Nossa orelha é capaz de distinguir dois sons, de mesma frequência e mesma intensidade, desde que as formas das ondas sonoras correspondentes a eles sejam diferentes. Dizemos que os dois sons têm timbres diferentes.

O que dissemos para o violino e o piano se aplica aos demais instrumentos musicais: a onda sonora resultante que cada um emite, correspondente a uma dada nota, tem uma forma própria, característica do instrumento. Isto é, cada um possui o seu próprio timbre (figura 7.63). A voz de uma pessoa também tem um timbre próprio, porque a forma da onda sonora que a pessoa emite é determinada por características pessoais. É por esse motivo que podemos identificar as pessoas por sua voz.



Ilustrações: Formato/Arquivo da editora

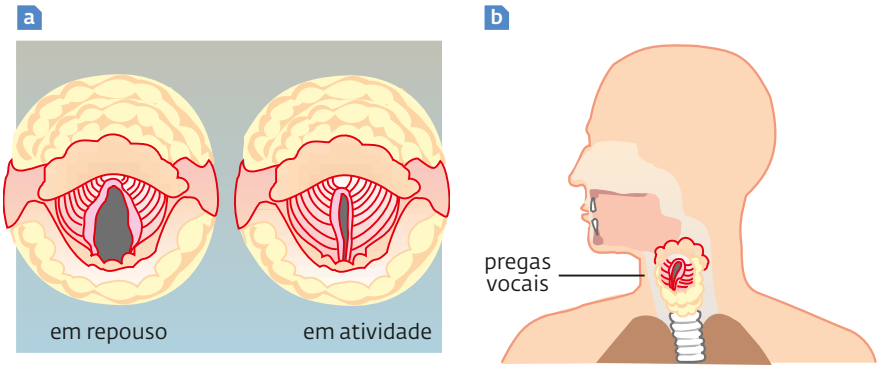
Figura 7.63. A forma das ondas sonoras é característica de cada instrumento. Representação sem escala e em cores fantasia.

FÍSICA NO CONTEXTO

A Fala Humana

A voz emitida pelo ser humano tem sua origem nas oscilações de duas membranas, denominadas pregas vocais **(figura 7.64.a)**, localizadas na posição mostrada na **figura 7.64.b**.

As pregas vocais entram em oscilação quando o ar, proveniente dos pulmões, é forçado a passar pela fenda existente entre elas. Podemos controlar a frequência do som que emitimos modificando a tensão nas pregas vocais. As oscilações dessas cordas são comunicadas ao ar existente nas diversas cavidades da boca, da garganta e do nariz, e aos músculos próximos a elas. A combinação de todas essas oscilações determina o timbre da voz, que é característico de cada pessoa.



Ilustrações: Osni de Oliveira/Arquivo da editora

Figura 7.64. Em **a**, vista superior das duas pregas vocais. Em **b**, um esquema do aparelho vocal humano. Representação sem escala e em cores fantasia.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

23. a) Qual é, no ar, o comprimento de onda do som mais agudo que a orelha humana pode perceber? 17 mm.
b) E o do som mais grave? 17 m.
c) Uma onda longitudinal, no ar, com $\lambda = 10$ mm, seria um infrassom, um som ou um ultrassom? Ultrassom.

24. Uma pessoa pressiona a tecla de um piano que corresponde ao **lá** padrão. Consultando a **figura 7.62** e a **tabela 7.3**, responda às questões a seguir, no caderno.
a) Qual é o comprimento de onda desse som no ar? 77 cm.
b) Qual é a frequência desse som ao atingir a orelha de uma pessoa mergulhada em uma piscina próxima ao piano? 440 hertz.
c) Qual é o comprimento de onda desse som na água? 3,3 m.

25. a) A sucessão das notas **dó**, **ré**, **mi**, **fá**, **sol**, **lá**, **si** constitui uma escala musical. Observando a **figura 7.62**, diga quantas vezes a frequência da nota **dó** de uma escala é maior do que a frequência da nota **dó** da escala imediatamente anterior. 2 vezes.
b) Sabe-se que o resultado encontrado em **a** é válido para qualquer outra nota. Então, qual é a frequência da nota lá imediatamente anterior ao lá padrão? E a frequência da nota lá da escala seguinte? 220 hertz; 880 hertz.

26. Em uma orquestra, a flauta está emitindo um som bastante agudo, enquanto a tuba está emitindo um som grave.
a) Qual desses instrumentos está emitindo som de menor comprimento de onda? Flauta.
b) Então, qual das duas ondas sonoras sofrerá difração mais acentuada ao contornar um obstáculo? A onda proveniente da tuba.
c) Portanto, qual dos dois instrumentos será mais bem ouvido por uma pessoa situada atrás do obstáculo? A tuba.

27. Uma flauta e uma clarineta estão emitindo sons de mesma altura, sendo a amplitude do som da clarineta maior do que a amplitude do som da flauta. Considere uma pessoa situada à mesma distância dos dois instrumentos.
a) Qual dos dois sons será percebido, pela pessoa, com maior intensidade? Da clarineta.
b) A frequência do som emitido pela flauta é maior, menor ou igual à frequência do som emitido pela clarineta? Igual.
c) Os dois instrumentos estão emitindo a mesma nota musical ou notas diferentes?
d) As formas das ondas sonoras emitidas pelos dois instrumentos são iguais ou diferentes? Diferentes.
e) A pessoa perceberá sons de mesmo timbre ou de timbres diferentes? Timbres diferentes.

27. c) A mesma nota (a mesma frequência).

7.8 O efeito Doppler

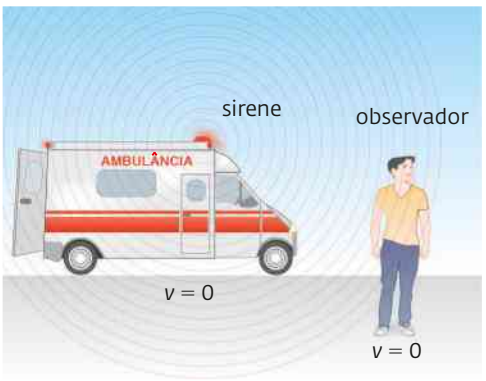
O que é o efeito Doppler

Considere uma pessoa nas proximidades de uma ambulância parada, cuja sirene esteja emitindo um som de frequência f_0. Essa pessoa, estando também parada, perceberá um som de certa altura, caracterizado pela frequência f_0. Em outras palavras, o número de pulsos sonoros, por segundo, que chegará à orelha da pessoa será igual a f_0 **(figura 7.65)**.

Suponha, agora, que a pessoa passe a se movimentar em direção a ela, que continua parada e com a sirene ligada, como mostra a **figura 7.66**. Nessas condições, o número de pulsos que irá chegar à orelha da pessoa, por segundo, será maior do que f_0. Então, a pessoa perceberá um som de frequência maior do que f_0, isto é, ela terá a sensação de que o som da sirene tornou-se mais agudo.

Caso a pessoa estivesse se afastando do veículo, o número de pulsos que iria chegar a sua orelha, por segundo, seria menor do que f_0, e, assim, a pessoa perceberia um som mais grave (frequência menor).

Essa variação da frequência de uma onda, causada pelo movimento da pessoa que a recebe (ou da fonte, como veremos a seguir), foi analisada, no século XIX, pelo físico austríaco Christian Doppler e, por isso, esse fenômeno é denominado **efeito Doppler**. Esse efeito pode ser percebido quando ouvimos a sirene de uma ambulância em movimento, aproximando-se e, em seguida, afastando-se.



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 7.65. Representação das ondas sonoras emitidas por uma ambulância em repouso ($v = 0$) e um observador também em repouso ($v = 0$).

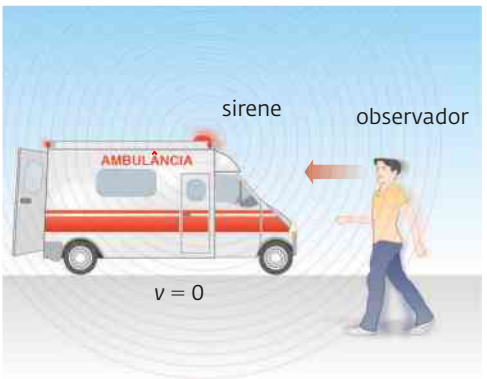
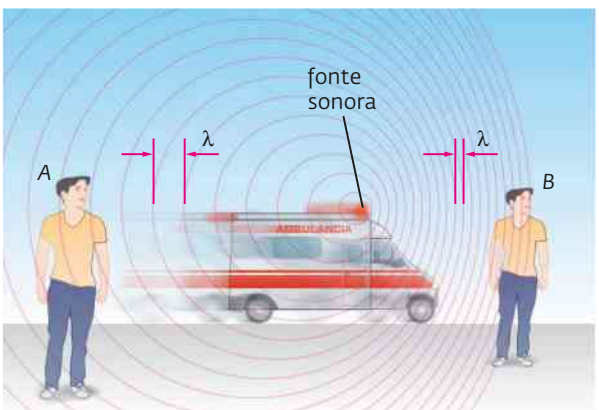


Figura 7.66. O som de uma fonte sonora parece mais agudo para um observador que se movimenta em direção a ela.

Fonte em movimento e observador em repouso

O efeito Doppler pode também ser causado pelo movimento da fonte que emite a onda sonora, enquanto o observador permanece em repouso. No caso, por exemplo, de uma ambulância com a sirene ligada e em movimento, os pulsos da onda sonora que ela emite tornam-se mais próximos uns dos outros à frente do veículo, e mais separados na região situada atrás do veículo **(figura 7.67)**.



As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Figura 7.67. Quando uma fonte sonora se movimenta, a frequência do som percebida pelo observador é diferente da frequência real emitida pela fonte.



David Lyons/Alamy/Lantistock

Figura 7.68. Efeito Doppler nas ondas que se propagam na superfície de um líquido. Flórida, EUA.

Analisando a figura 7.67 concluímos, então, que se um observador estiver à frente do veículo, ele receberá uma onda sonora de menor comprimento de onda (maior frequência), isto é, um som mais agudo. E, se estiver situado atrás do veículo, receberá uma onda sonora de maior comprimento de onda – portanto, um som mais grave (menor frequência).

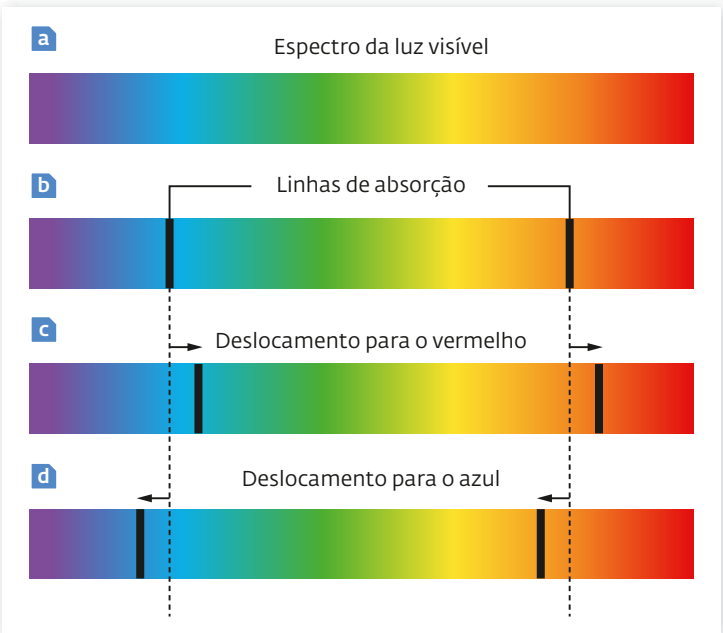
A figura 7.68 representa esse fato, mostrando embarcações em movimento provocando ondas na superfície de um líquido.

O efeito Doppler ocorre também com a luz

É possível perceber o efeito Doppler não apenas com o som, mas também com qualquer outro tipo de onda, como uma onda na superfície de um líquido.

É de esperar, então, que o efeito Doppler possa ser percebido com a luz, que é também um fenômeno ondulatório. Nesse caso, o efeito Doppler, consistindo em uma variação de frequência, manifestar-se-ia como uma mudança na cor da luz recebida pelo observador.

Cabe lembrar que, como a velocidade da luz é muito elevada ($3 \cdot 10^8$ m/s), o efeito só seria perceptível se a fonte de luz tivesse uma velocidade muito grande, como é o caso de estrelas ou galáxias que se afastam da Terra. Quando a fonte de luz se aproxima, a frequência da luz recebida pelo observador é aparentemente maior que a frequência emitida e este fenômeno é conhecido como *blue shift* ou desvio para o azul ou violeta (no espectro eletromagnético visível a luz violeta é a de maior frequência). Quando a fonte de luz se afasta, a luz recebida pelo observador tem frequência aparentemente menor que a frequência emitida. Nesse caso, temos um *red shift* ou um desvio para o vermelho (no espectro visível a luz vermelha é a de menor frequência). Na figura 7.69 temos um espectro de linhas de absorção (figura 7.69.b) que permite identificar quando uma estrela, por exemplo, se afasta (figura 7.69.c) ou se aproxima (figura 7.69.d) da Terra. Nesse caso as linhas do espectro terão comprimentos de onda diferentes da posição em que estariam se o objeto estivesse parado em relação à Terra (figura 7.69.a).



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 7.69. Espectro de linhas de absorção.

FÍSICA NO CONTEXTO

A EXPANSÃO DO UNIVERSO

Em certas observações astronômicas, os cientistas encontraram uma das mais notáveis situações na qual foi possível detectar o efeito Doppler com a luz. Analisando o espectro da luz emitida pelas estrelas, os astrônomos conseguem identificar as substâncias que fazem parte da constituição dessas estrelas (veja os espectros de alguns gases no exercício 30 da seção *Verifique o que aprendeu* e observe o espectro de algumas fontes de luz, construindo você mesmo um espectroscópio, como na atividade 5 do *Pratique física*.

No entanto, ao analisar os espectros da luz proveniente de estrelas situadas em galáxias distantes, emitida por uma dada substância, em um certo estado de excitação térmica, eles verificaram que sua frequência era menor do que a frequência emitida pela mesma substância aqui na Terra, no mesmo estado de excitação. Concluíram que essa variação de frequência só poderia ser causada pelo efeito Doppler. E, uma vez que era constatada uma diminuição na frequência, a fonte de luz, isto é, a galáxia, devia estar se afastando de nós.

O astrônomo Edwin Hubble (1889-1953) observou esse fenômeno para várias galáxias cujas distâncias eram conhecidas e descobriu, em 1929, que, quanto mais distante estava a galáxia, mais rápida, proporcionalmente, era sua velocidade de afastamento. Esse resultado levou os cientistas a concluir que o Universo está em expansão, isto é, as galáxias estão se afastando de nós (ou melhor, umas das outras) com velocidades muito grandes, sendo tais velocidades tanto maiores quanto mais distantes elas se encontrarem.

Para compreender por que um universo em expansão leva determinado observador a achar que as galáxias ao seu redor estão se afastando com uma velocidade proporcional à distância, veja a **figura 7.70**. Nela, para facilitar, substituímos o espaço tridimensional em que vivemos pelo espaço bidimensional da superfície de um balão. Cada pinta na superfície do balão representa uma galáxia. Escolha o observador numa determinada galáxia (pinta), seu universo estando restrito à superfície bidimensional do balão. Se o balão estiver sendo inflado, o observador achará que as galáxias (outras pintas) em sua volta estão se afastando dele. Para entender melhor, considere, por exemplo, uma primeira pinta, afastada 1 cm do observador, e uma segunda, afastada 2 cm. Se, depois de determinado intervalo de tempo, o balão esticar em 10%, a primeira pinta sofrerá um afastamento de 0,1 cm, enquanto a segunda pinta afastará 0,2 cm, por intervalo de tempo. Ou seja, a velocidade de afastamento é proporcional à distância, como observou Edwin Hubble no caso das galáxias.



Ilustrações: João X. de Campos/Arquivo da editora

Figura 7.70. Um modelo simples, em que o espaço tridimensional em que vivemos é representado pela superfície bidimensional de um balão sendo continuamente inflado. Ele pode auxiliar na compreensão do afastamento das galáxias em relação a nós. Para cada pinta no balão, são as outras pintas que dela se afastam. Além disso, extrapolando para o passado, esse modelo sugere ter havido um instante em que todas as pintas estavam juntas.

Outra conclusão que se pode tirar dessa expansão é que, se voltarmos no tempo, existiu um momento em que todas as galáxias estavam juntas, quando houve algo como uma grande explosão. A partir das velocidades de afastamento, estima-se hoje que esse momento aconteceu há cerca de 14 bilhões de anos. Esse acontecimento primordial, em que todo o Universo estava extremamente comprimido – e, em consequência, extremamente quente –, é conhecido pelo nome inglês *big-bang*. A partir do *big-bang*, o Universo se expandiu violentamente, esfriou e, aos poucos, a gravidade juntou a matéria em nuvens de gás e poeira, formando as estrelas, que constituíram as galáxias, as quais ainda mantêm o movimento de afastamento, originado naquele acontecimento primordial.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

28. Um carro está parado a certa distância de um sinal luminoso de trânsito (semáforo), que, em certo instante, torna-se verde. O motorista arranca rapidamente, mas não consegue perceber nenhuma alteração na cor verde do sinal, em razão do efeito Doppler. Por quê?

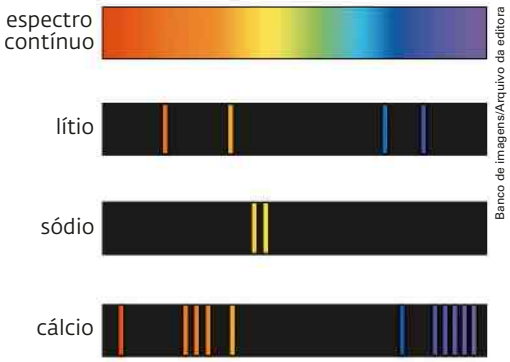
29. Você sabe que é possível observar, na Terra, o efeito Doppler com a luz emitida por uma galáxia. A velocidade dessa galáxia poderia ser cerca de:

a) 300 m/s (velocidade do som)? Não.

b) 30 000 km/h (velocidade de um foguete moderno)? Não.

c) 30 000 km/s (10% da velocidade da luz)? Sim.

30. O espectro da luz emitida por uma substância gasosa, a alta temperatura, é constituído por várias linhas coloridas, como as mostradas na figura a seguir. Supondo que a substância estivesse emitindo aquela luz em uma galáxia distante, as linhas de seu espectro, quando sua luz é recebida aqui na Terra, estariam na mesma posição da figura, deslocadas para a direita ou deslocadas para a esquerda? Para a esquerda.



Banco de imagens/Arquivo da editora

31. Analisando a luz emitida pelas galáxias, os astrônomos costumam dizer que se observa, no espectro dessa luz, um "deslocamento para o vermelho". Por que os astrônomos usam essa expressão?

32. Observa-se que a luz emitida por certas estrelas da Via Láctea apresenta um "deslocamento para o violeta".

a) Que conclusão se pode tirar acerca do movimento dessas estrelas em relação à Terra?

b) Essas estrelas poderiam pertencer a outra galáxia? Explique.

Não escreva no livro!

28. A velocidade do carro é desprezível comparada com a da luz.

31. Como a frequência da luz recebida é menor, as linhas do espectro passam a se situar mais próximas da região vermelha.

32. a) Estão se aproximando da Terra.

32. b) Não, porque todas as galáxias estão se afastando da Terra e por isso apresentam um deslocamento para o vermelho.

PRATIQUE FÍSICA

EM EQUIPE

Não escreva no livro!

1. O pêndulo simples que vocês irão montar foi um instrumento muito importante na história da ciência, permitindo realizar as primeiras medidas da aceleração da gravidade. Utilizando um barbante fino e resistente e objetos pesados e de pequenas dimensões, cada grupo estudará o comportamento de um pêndulo, medindo seu período de oscilação e utilizando três comprimentos distintos e duas massas diferentes. Os grupos devem apresentar seu trabalho em sala de aula, respondendo às seguintes perguntas:

a) Como você construiu seu pêndulo? E como fez para realizar as medidas do período de oscilação?

b) Quando você variou o comprimento do barbante, como variou o período de oscilação do pêndulo? Essa variação está de acordo com a expressão $T = 2\pi \sqrt{L/g}$?

c) A variação da massa causou alguma variação no período de oscilação? Por quê?

d) A partir dos dados obtidos, calcule o valor da aceleração da gravidade no local onde o experimento foi realizado. Como você poderia melhorar o valor dessa medida?

2. Como vimos na seção 7.1, o período de um objeto em movimento harmônico simples em um sistema massa-mola é dado por $T = 2\pi \sqrt{m/k}$, e, dessa forma, não depende da amplitude de oscilação. Para testar se de fato um sistema massa-mola se comporta de acordo com essa equação, vocês deverão providenciar dois ou mais objetos e algumas molas de plástico, daquelas utilizadas para encadernar papéis, desde as mais finas até aquelas de maior espessura. Cada grupo deve realizar as seguintes atividades:

a) Prendam a mola de plástico no teto ou embaixo de uma mesa, com fita adesiva, e coloquem um objeto na outra extremidade, de modo que ele possa oscilar na direção vertical. Observem quanto tempo leva para ele completar um ciclo (período). Agora aumentem a amplitude utilizada anteriormente. O período sofreu alguma alteração?

b) Substituam o objeto por outro, mais pesado, e coloquem o sistema para oscilar novamente na direção vertical. A variação que vocês observaram no período está de acordo com o que foi dito no começo do enunciado deste experimento?

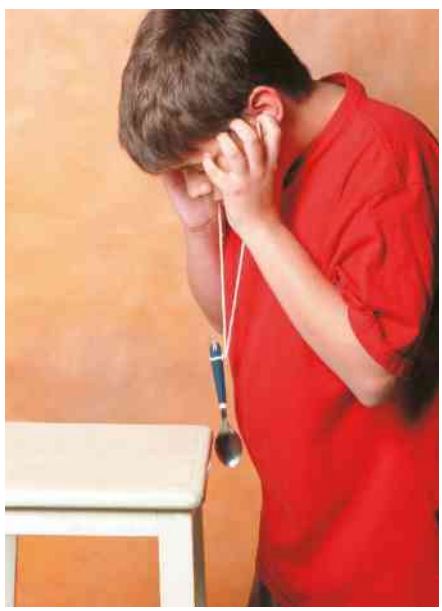
As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

c) Utilizando o mesmo objeto, troquem a mola por uma de espessura diferente e observem o que acontece com o período de oscilação. A seguir, diminuam pela metade o comprimento da mola e observem o que acontece com o período de oscilação. Com base nessas observações, digam se houve alteração na constante elástica *k* das molas. Se houve, foi para mais ou para menos?

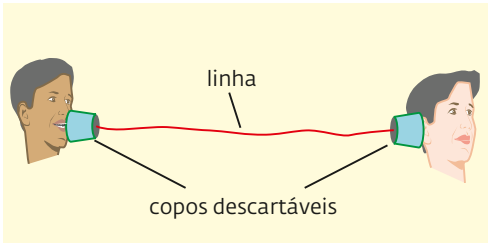
3. Suspendam um objeto metálico – uma colher ou um cabide, por exemplo – por meio de um cordão. Coloquem cuidadosamente as duas extremidades do cordão em suas orelhas, mantendo-as nessa posição com seus dedos. Curvando-se para a frente, deixem o objeto metálico colidir várias vezes contra um obstáculo rígido, como uma parede ou uma mesa. As oscilações do metal, geradas nas colisões, propagam-se até suas orelhas através do cordão, produzindo ondas sonoras no ar existente no canal de suas orelhas externas.

Vocês ouvirão, então, belos sons, semelhantes ao badalar de um sino distante. Repitam a experiência sem colocar o cordão em suas orelhas e comparem os sons que vocês percebem nas duas situações. Procurem uma explicação para a diferença percebida.

Eduardo Santaliestra/Estúdio Paulista



4. Façam um "telefone" com dois copos descartáveis, unidos por uma linha esticada, como ilustrado na figura. A função da linha é direcionar a onda sonora do primeiro copo para o segundo. Caso essa onda estivesse se propagando no ar, sua energia seria espalhada por uma área cada vez maior, reduzindo muito a intensidade percebida pelo ouvinte. Um copo capta as vibrações sonoras no ar, produzidas pela pessoa que fala, e as transmite para a linha. O outro copo faz o inverso, gerando o som escutado pelo ouvinte.

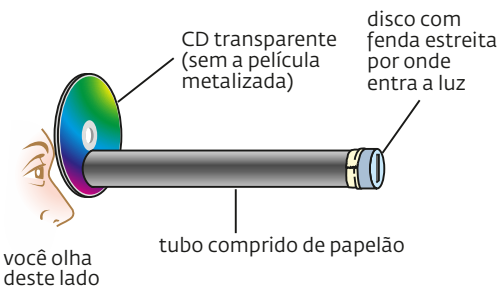


Antonio Robson/Arquivo da editora

5. Construam um espectroscópio, nome que se dá a um instrumento que permite analisar as cores do espectro da luz emitida por uma fonte qualquer. Com ele, vocês poderão visualizar espectros como os mostrados no exercício 30 da seção *Verifique o que aprendeu*. Em especial, sugerimos que analisem o espectro de uma lâmpada incandescente, de uma lâmpada fluorescente e de lâmpadas de vapor de mercúrio e de vapor de sódio, usadas na iluminação pública. Analisem também o espectro de linha emitido pela luz amarelada, resultante da queima de sal de cozinha ao ser polvilhado sobre a chama de fogão a gás, à noite, com a luz apagada.

O espectroscópio pode ser facilmente construído usando-se um disco de CD sem a cobertura metálica, que propicia uma excelente rede de difração, capaz de decompor a luz de maneira mais eficiente que um prisma. Com cuidado vocês podem retirar a cobertura metálica de um CD regravável ou utilizar os dois CDs transparentes que costumam vir protegendo as duas extremidades dos estojos de CDs regraváveis. Além disso, vocês vão necessitar de um tubo comprido de papelão, fechado numa extremidade por um disco de papelão com uma fenda estreita. O objetivo do tubo é colimar o feixe de luz. A fenda deve estar na mesma orientação das trilhas do CD, como mostrado na figura abaixo. É conveniente que o interior do tubo seja pintado de negro fosco, para evitar reflexos. Quanto mais estreita a fenda e mais comprido o tubo, maior será a capacidade do espectroscópio em distinguir as linhas de um espectro descontínuo.

Espectroscópio



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

1. Um objeto de massa $m = 400$ g está oscilando, sem atrito, preso à extremidade de uma mola cuja constante elástica vale $k = 160$ N/m. A amplitude do movimento é $A = 10$ cm.

a) Calcule o período de oscilação do objeto. $T = 0{,}314$ s

b) Determine a frequência desse movimento. $f = 3{,}18$ Hz

c) Qual seria o período do movimento se sua amplitude fosse reduzida para 5 cm? Permaneceria igual a 0,314 s.

2. (UFRGS-RS) Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas do enunciado abaixo, na ordem em que aparecem. d

A luz é uma onda eletromagnética formada por campos elétricos e magnéticos que variam no tempo e no espaço e que, no vácuo, são ..... entre si. Em um feixe de luz polarizada, a direção da polarização é definida como a direção ..... da onda.

a) paralelos – do campo elétrico

b) paralelos – do campo magnético

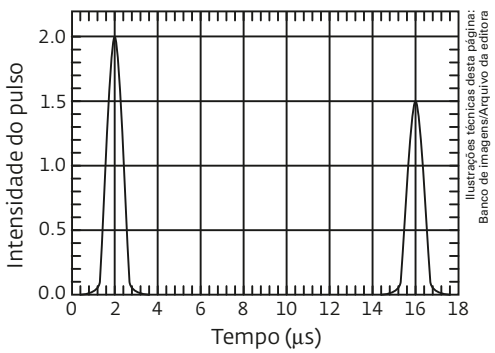
c) perpendiculares – de propagação

d) perpendiculares – do campo elétrico

e) perpendiculares – do campo magnético

3. Uma estação de rádio emite uma onda eletromagnética de frequência $f = 1\,500$ kHz. Sabe-se que a velocidade de propagação dessa onda, no ar, é igual à velocidade da luz. Calcule o valor de λ para essa onda de rádio. 200 m.

4. (UFG-GO) Baseado nas propriedades ondulatórias de transmissão e reflexão, as ondas de ultrassom podem ser empregadas para medir a espessura de vasos sanguíneos. A figura a seguir representa um exame de ultrassonografia obtido de um homem adulto, onde os pulsos representam os ecos provenientes das reflexões nas paredes anterior e posterior da artéria carótida.



Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Suponha que a velocidade de propagação do ultrassom seja de 1 500 m/s. Nesse sentido, a espessura e a função dessa artéria são, respectivamente: b

a) 1,05 cm – transportar sangue da aorta para a cabeça.

b) 1,05 cm – transportar sangue dos pulmões para o coração.

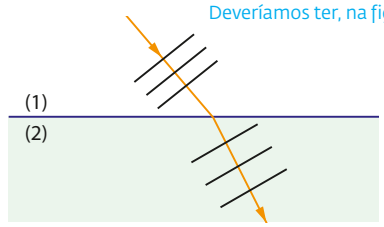
c) 1,20 cm – transportar sangue dos pulmões para o coração.

d) 2,10 cm – transportar sangue da cabeça para o pulmão.

e) 2,10 cm – transportar sangue da aorta para a cabeça.

5. Uma onda, ao passar de uma região (1) para outra região, (2), sofreu refração, aproximando-se da normal. Para representar essa refração, um estudante traçou o diagrama mostrado na figura abaixo. Há um erro nesse diagrama. Analise a figura e diga qual é o erro.

Deveríamos ter, na figura, $\lambda_2 < \lambda_1$.



6. Uma onda de pulsos retos se propaga, na superfície de um líquido, em direção a um orifício formado por duas barreiras (veja a figura).

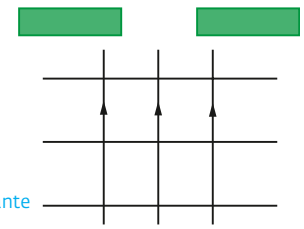


Diagrama semelhante à figura 7.37.

a) Sabendo-se que o comprimento de onda e a largura do orifício são aproximadamente iguais, complete a figura, mostrando os pulsos e os raios da onda após passar pelo orifício (desenhe no caderno uma cópia da figura).

b) Suponha, agora, que o comprimento de onda seja muito menor do que a largura do orifício e faça outro diagrama no caderno, mostrando o que ocorre quando a onda passa por ele. Praticamente não há difração da onda.

7. (Fuvest-SP) O nível de intensidade sonora β, em decibéis (dB), é definido pela expressão $\beta = 10 \log_{10} (I / I_0)$, na qual I é a intensidade do som em W/m² e $I_0 = 10^{-12}$ W/m² é um valor de referência. Os valores de nível de intensidade sonora $\beta = 0$ e $\beta = 120$ dB correspondem, respectivamente, aos limiares de audição e de dor para o ser humano. Como exposições prolongadas a níveis de intensidade sonora elevados podem acarretar danos auditivos, há uma norma regulamentadora (NR–15) do Ministério do Trabalho e Emprego do Brasil, que estabelece o tempo máximo de 8 horas para exposição ininterrupta a sons de 85 dB e especifica que, a cada acréscimo de 5 dB no nível da intensidade sonora, deve-se dividir por dois o tempo máximo de exposição. A partir dessas informações, determine:

a) a intensidade sonora I correspondente ao limiar de dor para o ser humano; $I = 1$ W/m²

b) o valor máximo do nível de intensidade sonora β, em dB, a que um trabalhador pode permanecer exposto por 4 horas seguidas; 90 dB.

c) os valores da intensidade I e da potência P do som no tímpano de um trabalhador quando o nível de intensidade sonora é 100 dB. $I = 10^{-2}$ W/m² e $P = 7{,}5 \cdot 10^{-7}$ W

Note e adote:

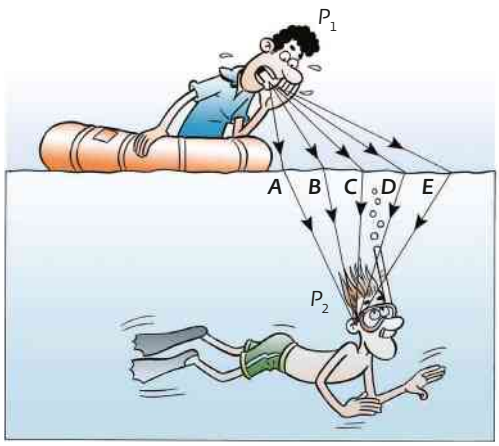
$\pi = 3$

Diâmetro do tímpano = 1 cm

8. a) No ar, dois sons que chegam a uma pessoa só podem ser percebidos distintamente se alcançarem a sua orelha separados por um intervalo de tempo de, no mínimo, 0,1 s. Então, se uma pessoa consegue perceber o eco de um som que ela emitiu, qual é a mínima distância que deve existir entre a pessoa e o anteparo que produziu o eco? 17 m.

b) Um pulso de sonar é emitido verticalmente, de um submarino, em direção ao fundo do mar. Se o eco desse pulso é recebido após um intervalo de 2 s, a que distância o submarino se encontra do fundo do mar? (A velocidade de propagação dos ultrassons é igual à do som e, na água do mar, vale cerca de 1 500 m/s.) 1 450 m.

9. Uma pessoa em P_1 emite um som que alcança a orelha de outra pessoa, situada em P_2, no fundo de uma piscina. Indique no seu caderno qual dos caminhos mostrados na figura poderia representar a trajetória seguida pela onda sonora de P_1 até P_2. d



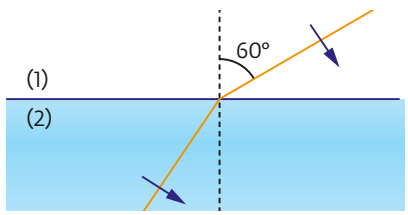
João X. de Campos/Arquivo da editora

a) P_1AP_2
b) P_1BP_2
c) P_1CP_2
d) P_1DP_2
e) P_1EP_2

10. A figura abaixo representa o pulso de uma onda (frente de onda) refratando-se ao passar de um meio (1) para um meio (2). Sabe-se que os comprimentos de onda nos dois meios são $\lambda_1 = 6{,}0$ cm e $\lambda_2 = 10{,}0$ cm.

a) Qual é o ângulo de incidência da onda? 30°

b) Calcule o ângulo de refração da onda no meio (2). 57°



11. A figura a seguir mostra um feixe luminoso se refratando ao passar do meio *A* para o meio *B*. Indique em seu caderno quais das afirmativas seguintes estão corretas.

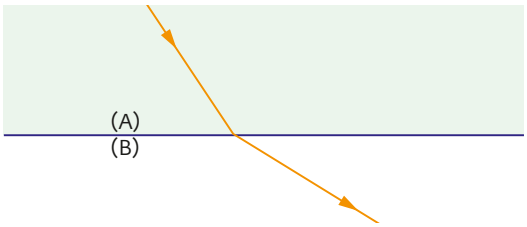
a) O índice de refração de *A* é maior do que o de *B*.

b) A frequência da onda luminosa tem o mesmo valor nos dois meios.

c) A velocidade da luz é menor em *A* do que em *B*.

d) O comprimento de onda da luz é menor em *A* do que em *B*.

11. Todas estão corretas.



12. Um objeto de massa *m* executa um movimento harmônico simples preso à extremidade de uma mola cuja constante elástica é *k*. Qual deve ser o comprimento *L* de um pêndulo simples para que ele oscile com um período igual ao do objeto preso à mola? $L = mg/k$

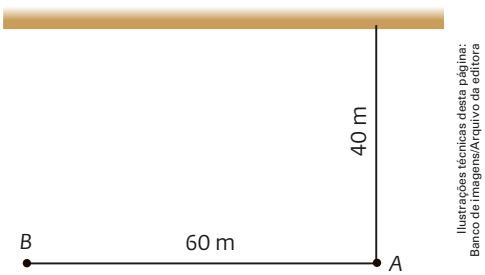
13. Dois pequenos objetos, F_1 e F_2, batem em fase na superfície de um líquido, produzindo ondas de mesmo comprimento de onda λ. Considerando um ponto *P* qualquer na superfície do líquido, diga se nesse ponto haverá interferência construtiva ou destrutiva em cada um dos seguintes casos:

a) $PF_1 = PF_2$ Construtiva.

b) $PF_1 - PF_2 = \lambda$ Construtiva.

c) $PF_1 - PF_2 = \lambda/2$ Destrutiva.

14. Duas pessoas, *A* e *B*, estavam interessadas em medir a velocidade do som no ar. Elas se colocaram a 40 m de um paredão e a 60 m uma da outra (veja a figura). O observador *B* ouviu um monossílabo emitido por *A* e 1/8 s depois ouviu o seu eco produzido pelo paredão. Baseando-se nessas medidas, qual o valor que as pessoas obtiveram para a velocidade do som? 320 m/s.



Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

15. Uma mola, de comprimento igual a 10,0 cm, está suspensa verticalmente, em um ponto fixo, por uma de suas extremidades. Prende-se, em sua extremidade livre, um objeto de massa $m = 100$ g, verificando-se que, na posição de equilíbrio, seu comprimento atinge 15,0 cm. Puxando em seguida o objeto, até que o comprimento da mola seja de 20,0 cm, e abandonando-o, ele passa a executar um movimento harmônico simples. Determine (tome $g = 10$ m/s²):

a) O valor da constante elástica da mola. 20 N/m.

b) A amplitude do movimento efetuado pelo objeto. 5,0 cm.

c) O período e a frequência desse movimento. 0,44 s; 2,27 hertz.

16. Um bloco, de massa $m = 180$ g, está executando um movimento harmônico simples sobre uma superfície horizontal sem atrito, preso a uma mola, também horizontal, cuja constante elástica é $k = 50$ N/m. Sabendo-se que a energia total do bloco vale $E = 0{,}36$ J, calcule:

a) A amplitude do movimento harmônico simples executado pelo bloco. 12 cm.

b) A velocidade máxima do bloco e onde ela ocorre. 2,0 m/s em $X = 0$

Apêndice E

E.1 Cordas vibrantes e tubos sonoros

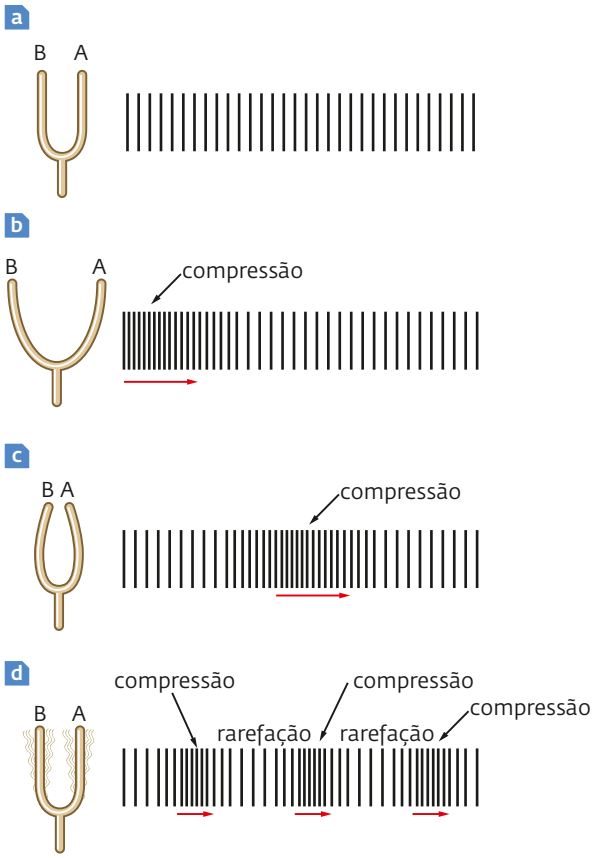
Velocidade de propagação da onda em uma corda

Ao estudarmos a propagação de ondas em cordas esticadas, dissemos que sua velocidade depende de dois fatores: da tensão, T, na corda e de sua massa por unidade de comprimento, μ. Assim, se m é a massa total da corda e L, seu comprimento, temos $\mu = m/L$.

É possível mostrar, por meio de cálculos, que não vamos aqui desenvolver, que

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Essa expressão mostra que v é tanto maior quanto maior for T e tanto menor quanto maior for μ, em concordância com a informação fornecida na seção 7.2.



Ilustrações: Banco de imagens/Arquivo da editora

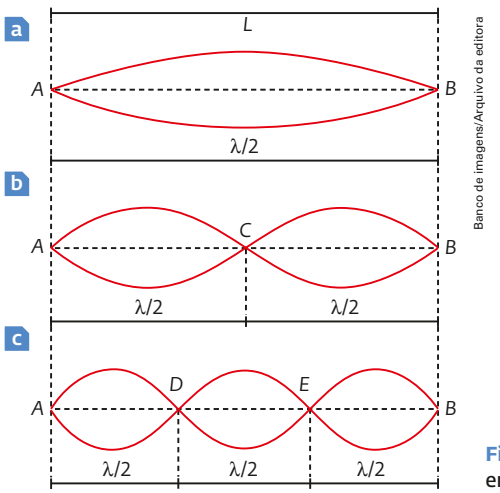
Figura E.1. Propagação de ondas longitudinais no ar provocadas por um diapasão oscilando. Representação sem escala e em cores fantasia.

Emissão de som por uma corda oscilando

Cordas esticadas, como as de um violão ou de um violino, emitem sons quando são postas em oscilação. Isso ocorre porque a corda, ao oscilar, provoca compressões e rarefações no ar similares as que um diapasão exerce sobre o ar ao seu redor. Na **figura E.1.a** temos um diapasão no ar. O diapasão é um dispositivo utilizado para auxiliar na afinação de instrumentos musicais. Quando o diapasão é posto a oscilar, sua forquilha se movimenta abrindo **(figura E.1.b)** e fechando **(figura E.1.c)** formando regiões de baixa e alta pressão, ou seja, regiões de rarefação e compressão do ar **(figura E.1.d)**. Essas rarefações e compressões se propagam no ar constituindo-se em uma onda longitudinal que, conforme o valor de sua frequência, poderá sensibilizar a nossa orelha.

Suponha, agora, uma corda em repouso de comprimento L que está fixa em ambas as extremidades, como as cordas de um violão. Se esta corda for posta para oscilar, a propagação e reflexão dessas ondas formam **ondas estacionárias** com nós (pontos que não oscilam) nas extremidades. Essas ondas são chamadas de estacionárias porque a energia de oscilação delas fica sempre confinada no espaço entre dois nós, não se propagando através desses pontos. A frequência da onda sonora é determinada pela frequência da corda, sendo igual a ela. Portanto, a corda oscilante é a fonte geradora do som produzido.

Os modos de vibração da corda, representados na **figura E.2**, ocorrem em virtude da superposição das ondas incidentes e refletidas nas extremidades fixas *A* e *B* da corda. Ela pode oscilar tanto da maneira apresentada na **figura E.2.a** quanto na **figura E.2.b** ou na **figura E.2.c**, etc., apresentando alguns pontos que não oscilam e que constituem os chamados **nós** das ondas. Esses pontos, além dos pontos fixos da corda *A* e *B*, que não poderiam oscilar, são indicados na **figura E.2** por *C*, *D* e *E*. O ponto médio entre dois nós oscila sempre com amplitude máxima (em relação à amplitude dos demais pontos da corda) e é denominado **ventre** (ou **antinó**).



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura E.2. Modos de oscilação de uma corda fixa em suas extremidades (1º, 2º e 3º harmônicos).

Frequências dos sons emitidos pela corda oscilante

Quando a corda oscila do modo representado na **figura E.2.a**, ela está oscilando com a menor frequência entre os modos possíveis que pode apresentar. Essa frequência, que vamos designar por f_1, é denominada **frequência fundamental** da corda, e esse modo de oscilação é chamado **1º harmônico**.

Sendo λ_1 o comprimento de onda correspondente a esse modo, temos, na **figura E.2.a**:

$$\frac{\lambda_1}{2} = L \quad \therefore \quad \lambda_1 = 2L$$

Como $f_1 = v/\lambda_1$, vem:

$$f_1 = \frac{v}{2L} \quad \text{ou} \quad f_1 = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

O modo de oscilação representado na **figura E.2.b** é denominado **2º harmônico**. Para esse caso, temos $\lambda_2 = L$. Então:

$$f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{v}{L} \quad \text{ou} \quad f_2 = 2f_1$$

De maneira semelhante, dizemos que o modo de oscilação da **figura E.2.c** é o **3º harmônico**. Temos:

$$3\left(\frac{\lambda_3}{2}\right) = L \text{ ou } \lambda_3 = \frac{2L}{3}$$

Então,

$$f_3 = \frac{v}{\lambda_3} = 3\left(\frac{v}{2L}\right) \quad \therefore \quad f_3 = 3f_1$$

A corda pode apresentar, também, outros modos, denominados **4º harmônico**, **5º harmônico**, etc., cujas frequências são $f_4 = 4f_1$, $f_5 = 5f_1$, etc.



Jeff Cadge/Getty Images

Figura E.3. As cordas de uma harpa possuem comprimentos diferentes para emitir notas diferentes.



Eduardo Santaliestra/Estúdio Paulista

Figura E.4. Na fotografia podem ser identificados os três fatores que fazem variar a frequência dos sons emitidos pelas cordas de um violão.

Comentários

1) Observando a expressão que fornece a frequência f_1 do som fundamental emitido por uma corda, vemos que ela depende de três fatores: T, μ e L. Podemos, assim, entender como um instrumento de corda (violão, violino, piano, etc.) pode emitir sons de diferentes frequências, isto é, diferentes notas musicais **(figura E.3)**. No violão, por exemplo, ao girarmos uma cravelha, estamos procurando variar a tensão T na corda, de modo que ela emita um som de determinada altura. Diferentes cordas **(figura E.4)** apresentam diâmetros diferentes, o que leva a diferentes valores de μ; portanto, mesmo que elas tenham comprimentos iguais e estejam sob a mesma tensão, emitirão notas diferentes (frequências diferentes).

Quanto mais fina for a corda, mais agudo será o som, pois a densidade será menor neste caso. Isso ocorre, pois, a frequência é inversamente proporcional à raiz quadrada da densidade, conforme a expressão:

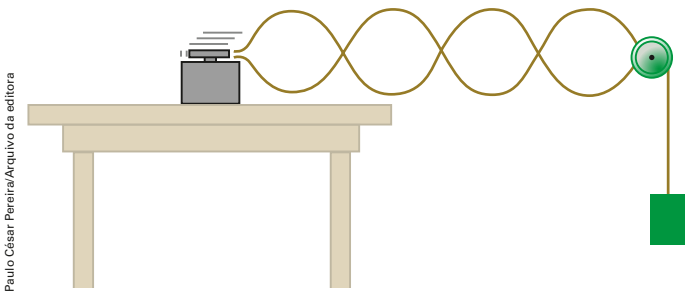
$$f_1 = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

em que L, T e μ correspondem, respectivamente, ao comprimento da corda, à força de tração e à densidade. Observe que, com uma mesma corda, o músico consegue obter notas diferentes, prendendo-a em pontos diferentes do seu comprimento, de modo a fazê-la oscilar com diferentes valores de L.

2) De maneira geral, quando uma corda é posta em oscilação, ela oscila com uma forma determinada, que é o resultado da superposição dos diversos harmônicos que pode emitir. A forma da onda é característica do timbre do som emitido. Assim, o timbre do som é também caracterizado pelos harmônicos presentes na oscilação.

Exemplo 1

A montagem mostrada na figura E.5 costuma ser usada para se obter a medida da velocidade de propagação da onda em uma corda, pela formação de ondas estacionárias. Em uma das extremidades da corda é adaptado um oscilador cuja frequência f é conhecida. Na outra extremidade é suspenso um peso cujo valor pode variar até que uma onda estacionária seja estabelecida na corda. Suponha que a frequência do oscilador seja $f = 36$ hertz e que, ao ser estabelecida a onda estacionária, verificou-se que a distância entre dois nós consecutivos era de 5,0 cm. Qual é a velocidade da onda na corda?



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura E.5. Para o exemplo 1.

A distância entre dois nós consecutivos é $\boldsymbol{\lambda}/2$.

Logo:

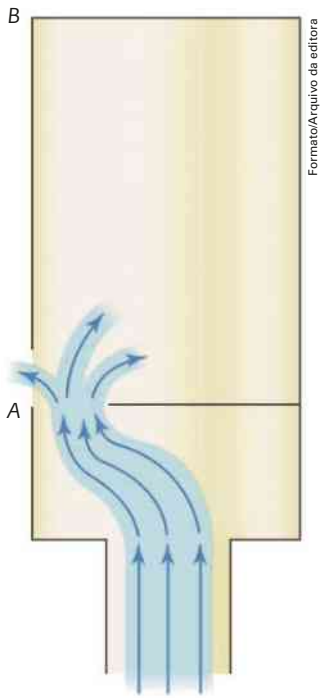
$$\frac{\lambda}{2} = 5{,}0 \Rightarrow \lambda = 10 \text{ cm}$$

Então:

$$v = f\lambda = 36 \cdot 10 \quad \text{ou} \quad v = 360 \text{ cm/s}$$

Tubo sonoro fechado

De maneira semelhante ao que acontece em uma corda, é possível estabelecer ondas estacionárias longitudinais no ar contido no interior de um tubo qualquer. Por isso, os tubos podem ser usados como fontes sonoras em instrumentos musicais, como: órgão, flauta, clarineta, etc. Esses tubos possuem sempre uma de suas extremidades aberta, na qual um jato de ar é introduzido (soprado), provocando oscilações que se propagam na coluna de ar, no interior do tubo. A **figura E.6** representa um modelo usado em certos tipos de órgão, em que *A* é a extremidade aberta do tubo. Vamos supor que a outra extremidade, *B*, esteja fechada. Então, nessa extremidade, as partículas de ar não podem oscilar e, assim, *B* é sempre um nó da onda estacionária que se forma no interior do tubo. A extremidade aberta, em que o ar é soprado, será um ventre.



Formato/Arquivo da editora

Figura E.6. Fluxo de ar que origina ondas estacionárias em um tubo sonoro fechado. Representação sem escala e em cores fantasia.

Na **figura E.7** estão representados modos de oscilação possíveis da coluna de ar no interior do tubo. Observe que na extremidade fechada temos sempre um nó e, na extremidade aberta, sempre um ventre. É importante ressaltar que, para melhor visualizar os modos de oscilação, representamos as ondas estacionárias que se formam no ar contido no tubo **(figura E.7)** estabelecendo uma analogia com uma corda em oscilação. Trata-se de um modelo geral para estudar esse tipo de fenômeno, uma vez que não há corda alguma no interior do tubo e as oscilações que ali estão presentes são longitudinais, executadas pelas partículas de ar dentro do tubo.

A frequência fundamental emitida por um tubo sonoro fechado, de comprimento *L*, correspondente ao 1º harmônico, é tal que **(figura E.7.a)**:

$$L = \frac{\lambda_1}{4} \quad \therefore \quad \lambda_1 = 4L$$

Então, sendo *v* a velocidade do som no ar, temos:

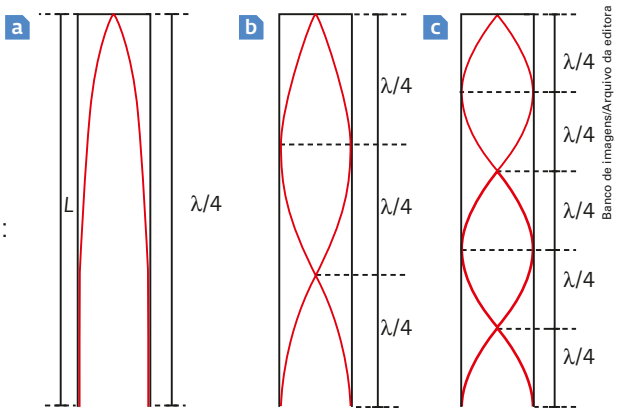
$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} \quad \text{ou} \quad f_1 = \frac{v}{4L}$$

Para o harmônico representado na **figura E.7.b**, temos:

$$L = 3\left(\frac{\lambda_2}{4}\right) \quad \therefore \quad \lambda_2 = \frac{4L}{3}$$

Então:

$$f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = 3\left(\frac{v}{4L}\right) \quad \text{ou} \quad f_2 = 3f_1$$



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura E.7. Modos de oscilação da coluna de ar em um tubo sonoro fechado.

De modo semelhante, para o harmônico representado na **figura E.7.c**, vem:

$$L = 5\left(\frac{\lambda_3}{4}\right) \quad \therefore \quad \lambda_3 = \frac{4L}{5}$$

Então:

$$f_3 = \frac{v}{\lambda_3} = 5\left(\frac{v}{4L}\right) \quad \text{ou} \quad f_3 = 5f_1$$

O tubo poderá apresentar, também, outros modos de oscilação, cujas frequências são $f_4 = 7f_1$, $f_5 = 9f_1$, etc. Observe, então, que no som emitido por um tubo sonoro fechado não aparecem os harmônicos de frequências $2f_1$, $4f_1$, $6f_1$, etc., isto é, esse tubo só pode emitir os harmônicos de ordem ímpar.

Tubo sonoro aberto

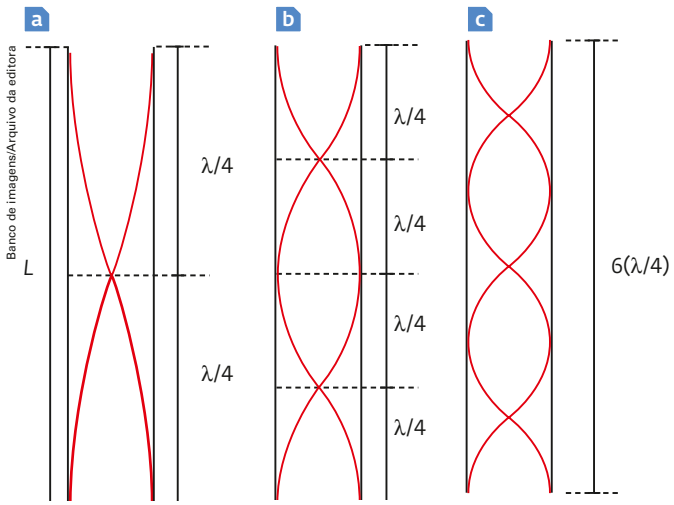


Figura E.8. Modos de oscilação da coluna de ar em um tubo sonoro aberto.

Esse tipo de tubo apresenta ambas as extremidades abertas. Assim, quando o ar é soprado no tubo, as ondas estacionárias que se formam devem apresentar ventres em ambas as extremidades, como representado na **figura E.8**. Na **figura E.8.a** está representado o 1º harmônico, no qual a coluna de ar está oscilando com a frequência fundamental f_1. Temos, observando a figura:

$$L = 2\left(\frac{\lambda_1}{4}\right) \quad \therefore \quad \lambda_1 = 2L$$

Então:

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} \quad \text{ou} \quad f_1 = \frac{v}{2L}$$

Para o 2º harmônico **(figura E.8.b)**, temos:

$$L = 4\left(\frac{\lambda_2}{4}\right) \quad \therefore \quad \lambda_2 = L$$

Então:

$$f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{v}{L} \text{ ou } f_2 = 2f_1$$

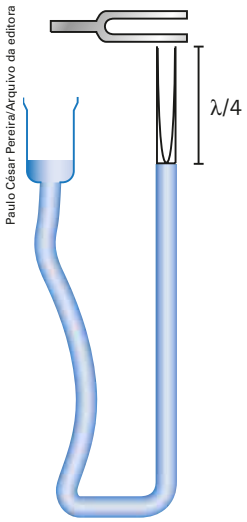


Figura E.9. Para o exemplo 2. Representação sem escala e em cores fantasia.

De maneira semelhante, para o 3º harmônico **(figura E.8.c)**, vem:

$$L = 6\left(\frac{\lambda_3}{4}\right) \quad \therefore \quad \lambda_3 = \frac{2L}{3}$$

Então:

$$f_3 = \frac{v}{\lambda_3} = 3\left(\frac{v}{2L}\right) \quad \text{ou} \quad f_3 = 3f_1$$

O tubo poderá apresentar, também, outros modos de oscilação (4º harmônico, 5º harmônico, etc.), cujas frequências são $f_4 = 4f_1$, $f_5 = 5f_1$, etc. Vimos, assim, que todos os harmônicos podem ser emitidos por um tubo aberto.

Exemplo 2

Na figura E.9 representamos um dispositivo que permite medir a velocidade do som no ar: um diapasão em oscilação, colocado próximo a um tubo ligado a um reservatório com água. Pode-se variar o nível da água no tubo suspendendo ou abaixando o reservatório. Suponha que, com o diapasão oscilando com uma frequência $f = 245$ hertz, o nível da água no tubo foi abaixado gradualmente, a partir da extremidade superior do tubo, até que se observasse um reforço na intensidade do som. Nesse momento, a distância entre a extremidade aberta do tubo e o nível da água foi medida, encontrando-se o valor $L = 35$ cm[1]. Qual é o valor da velocidade do som no ar que se obtém com esses dados?

O reforço na intensidade do som se deve ao fato de ter sido possível a formação de uma onda estacionária no ar existente no trecho L do tubo. Esse trecho funciona como um tubo sonoro fechado, cuja coluna de ar entra em oscilação pela ação das oscilações do diapasão. Sendo assim, a onda estacionária tem a mesma frequência do diapasão. Como se trata do primeiro reforço observado no som, concluímos que a coluna de ar está oscilando com a menor frequência possível, isto é, com a frequência fundamental f_1, como representado na **figura E.9**. Para o tubo fechado tem-se $f_1 = v/4L$. Então:

$$v = 4L\,f_1 = 4 \cdot 0{,}35 \cdot 245 \quad \therefore \quad v = 343 \text{ m/s}$$

Essa é a velocidade do som obtida na experiência descrita.

[1] Neste valor estamos supondo incluída a pequena correção devida ao fato de se observar, experimentalmente, que o ventre da onda estacionária está localizado um pouco acima da extremidade aberta do tubo.

Instrumentos de percussão

Os instrumentos de percussão estão presentes em orquestras ou em conjuntos musicais e sempre foram usados, desde as culturas ancestrais. Os sons por eles emitidos podem ter sua origem na oscilação de membranas (diversos tipos de tambores), hastes e superfícies metálicas (címbalos, marimbas, xilofones, triângulos, sinos, gongos, etc.).

Esses instrumentos se comportam de maneira muito diferente uns dos outros, não sendo possível, geralmente, estabelecer um padrão para eles, como pôde ser feito para os instrumentos de corda e de sopro. Por isso, não serão estudados em nosso curso.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

1. a) $7{,}5 \cdot 10^{-3}$ g/cm = $7{,}5 \cdot 10^{-4}$ kg/m.

1. Uma corda, de 60 cm de comprimento e massa de 0,45 g, está submetida a uma tensão de 15 N.
a) Qual é a densidade linear dessa corda, em g/cm e em kg/m?
b) Qual é a frequência do som que ela está emitindo, supondo que esteja vibrando no modo correspondente ao seu 1º harmônico? 117 hertz
c) Qual é a frequência de vibração correspondente ao seu 2º harmônico? E ao seu 5º harmônico? 234 hertz; 585 hertz.

2. Suponha que uma das cordas de um piano esteja vibrando e emitindo a nota **dó**, de 512 hertz (veja a **figura 7.61**). Para essa corda emitir a nota **dó** da escala imediatamente superior:
a) variando-se apenas o seu comprimento, ele deverá ser aumentado ou diminuído? Quantas vezes? Reduzido à metade.
b) variando-se apenas a tensão à qual ela está submetida, essa tensão deve ser aumentada ou diminuída? Quantas vezes? Multiplicado por 4.

3. Duas cordas de violão têm o mesmo comprimento e estão submetidas à mesma tensão, mas a frequência do som emitido por uma delas é o dobro da frequência emitida pela outra. Sabendo-se que cada uma está oscilando com sua frequência fundamental e que são feitas do mesmo material, responda:
a) A corda que emite o som mais grave é a mais grossa ou a mais fina? Explique.
b) Quantas vezes a área da seção reta de uma das cordas é maior que a da outra? 4 vezes.

4. Para a corda apresentada na **figura E.2**:
a) Faça no caderno um desenho mostrando o modo de vibração correspondente ao 5º harmônico. Veja resposta no Manual do Professor.
b) Analisando o desenho feito em **a**, determine o valor de λ_5 em função de L para o 5º harmônico. $\lambda_5 = 2L/5$.
c) Usando a resposta da questão **b**, obtenha a relação entre a frequência f_5 e a frequência fundamental f_1. $f_5 = 5f_1$.

5. b) 250 hertz, 1 000 hertz e 2 000 hertz.

5. Um tubo sonoro fechado emite um som fundamental de 500 hertz à temperatura de 20 °C.
a) Qual é o comprimento desse tubo? 17 cm.
b) Entre as frequências seguintes, assinale aquelas que esse tubo não é capaz de emitir: 250 hertz, 1 000 hertz, 1 500 hertz, 2 000 hertz e 2 500 hertz.

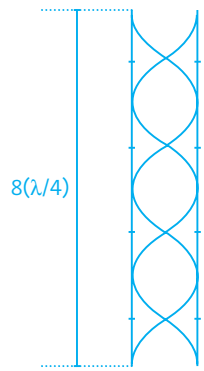
6. Para o tubo da **figura E.8**:
a) Faça um desenho mostrando o modo de vibração correspondente ao 4º harmônico.
b) Analisando o desenho feito em **a**, determine o valor de λ_4, em função de L, para o 4º harmônico.
c) Usando a resposta da questão **b**, obtenha a relação entre a frequência f_4 e a frequência fundamental f_1.

7. Suponha que na **figura E.9** (exemplo 2, resolvido nesta seção), o nível da água no tubo continuasse a ser abaixado, lentamente, a partir da posição em que houve o primeiro reforço do som emitido pelo diapasão. De quanto deve ser abaixado o nível da água para que ocorra o segundo reforço nesse som? 70 cm.

8. Dois tubos sonoros, em um órgão, têm o mesmo comprimento, sendo um deles aberto e o outro fechado. Se ambos estão emitindo o som fundamental, qual deles emite a nota mais aguda? O tubo aberto.

9. Um dispositivo, denominado **apito de Galton**, consiste em um tubo fechado em uma de suas extremidades, podendo essa ser deslocada, de modo a variar o comprimento, L, do tubo. Assim, usando esse apito, é possível a emissão de sons de diversas frequências (alturas). Para responder às questões **a** e **b**, suponha que o som referido em cada caso seja o de frequência fundamental.
a) Diminuindo continuamente o comprimento de um apito de Galton, à medida que se está soprando nele, determine o valor aproximado de L, para o qual uma pessoa de audição normal deixa de escutar o som emitido. 4,25 mm.
b) Suponha que esse apito tivesse sido acionado com um comprimento de 2,5 mm. Ele seria ouvido por uma pessoa? E por um cachorro? Não; sim.

6. a) Veja a figura.



b) $\lambda_4 = L/2$
c) $f_4 = 4f_1$

3. a) Mais grossa, pois temos $f_1 \propto 1/\mu$. Então, o som mais grave (menor f_1) é emitido pela corda de maior μ (mais grossa).

E.2 As equações do efeito Doppler

Na seção 7.8 analisamos o efeito Doppler, isto é, as variações da frequência de uma onda qualquer (sonora, luminosa, na água, etc.) causadas pelo movimento da fonte emissora ou do receptor da onda. Mostraremos aqui como é possível obter equações que nos permitem calcular essas variações de frequência para o caso de ondas mecânicas.

Fonte em repouso e receptor em movimento

Consideremos a situação representada na **figura 7.66**, na qual uma fonte, emitindo um som de frequência f_0, está em repouso, e o receptor (uma pessoa, por exemplo) se aproxima dela com velocidade v_R. Se o receptor estivesse em repouso, ele iria receber, por segundo, um número de pulsos igual a f_0, sendo $f_0 = v/\lambda$, em que v é a velocidade da onda e λ é o seu comprimento de onda. Em virtude de seu movimento, o receptor percorre, em um segundo, uma distância numericamente igual a v_R, e uma análise da situação descrita pode mostrar que o número de pulsos da onda contido nessa distância é v_R/λ. Então, o número de pulsos por segundo que o receptor irá receber, isto é, a frequência f que será detectada por ele, será:

$$f = f_0 + \frac{v_R}{\lambda} = f_0 + \frac{v_R}{v/f_0} = f_0\left(1 + \frac{v_R}{v}\right) \quad \text{ou} \quad f = f_0\left(\frac{v + v_R}{v}\right)$$

Vemos, então, que a frequência recebida, f, é maior do que f_0, em concordância com o que havíamos salientado na seção 7.8. Se o receptor estiver se afastando da fonte, com raciocínio semelhante, pode-se mostrar que:

$$f = f_0\left(\frac{v - v_R}{v}\right)$$

isto é, nesse caso, f será menor do que f_0.

Essas duas equações podem ser apresentadas sob a forma única seguinte:

$$f = f_0\left(\frac{v \pm v_R}{v}\right)$$

em que o sinal $+$ corresponde à situação em que o receptor se aproxima da fonte, e o sinal $-$, ao seu afastamento da fonte.

Fonte em movimento e receptor em repouso

Na **figura 7.67** temos uma fonte em movimento, com velocidade v_F, aproximando-se de um receptor em repouso. Sendo f_0 a frequência da fonte, em um segundo ela emite f_0 pulsos. Se a fonte estivesse em repouso, esses pulsos estariam distribuídos em uma distância numericamente igual a v, e o comprimento de onda (de cada pulso) seria $\lambda = v/f_0$. Como a fonte possui uma velocidade v_F, em um segundo teremos os f_0 pulsos distribuídos, no sentido do movimento, em uma distância numericamente igual a $v - v_F$. O comprimento de onda será então menor e dado por $\lambda' = (v - v_F)/f_0$. Esse comprimento de onda, λ', corresponderá, então, a uma frequência f, que será aquela a ser detectada pelo receptor e cujo valor será $f = v/\lambda'$ ou $\lambda' = v/f$. Assim:

$$\frac{v}{f} = \frac{v - v_F}{f_0} \quad \therefore \quad f = f_0\left(\frac{v}{v - v_F}\right)$$

Observe que temos f maior que f_0, resultado que está de acordo com o que já havíamos visto, para o caso em que a fonte se aproxima do receptor parado.

Para o caso em que a fonte está se afastando de um receptor em repouso, a frequência por ele detectada será menor e dada por $f = f_0\left(\frac{v}{v + v_F}\right)$.

As duas equações obtidas podem também ser colocadas sob uma forma única:

$$f = f_0\left(\frac{v}{v \pm v_F}\right)$$

Quando o receptor e a fonte sonora se movimentam simultaneamente (ao longo de uma mesma reta), a frequência que será detectada pelo receptor dependerá das velocidades de ambos; e, nesse caso, ela será dada por:

$$f = f_0\left(\frac{v \pm v_R}{v \pm v_F}\right)$$

Observe que os sinais + no numerador e – no denominador correspondem a um aumento de frequência (aproximação entre a fonte e o receptor). Por outro lado, os sinais – no numerador e + no denominador correspondem a uma diminuição da frequência (afastamento entre a fonte e o receptor).

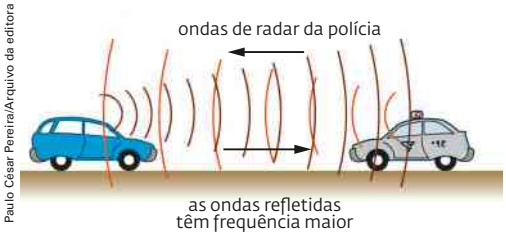
As equações anteriores, embora tenham sido deduzidas para ondas mecânicas, podem ser aplicadas também para ondas luminosas, desde que as velocidades da fonte e do receptor sejam muito menores do que a velocidade da luz no vácuo. Se a fonte e/ou receptor apresentarem velocidades próximas à da luz, as equações sofrem alterações em virtude de efeitos relativísticos.

FÍSICA NO CONTEXTO

Medidas de Velocidade por Efeito Doppler

As medidas de frequência, em geral, podem ser realizadas com grande precisão. Em virtude disso é possível, usando-se o efeito Doppler, detectar velocidades muito pequenas de fontes ou receptores sonoros em movimento. Um exemplo de aplicação dessas ideias é a medida da velocidade do sangue nas artérias, cujo valor máximo é de apenas 0,4 m/s. Essa medida é feita dirigindo-se um feixe de ultrassom, de frequência conhecida, para uma artéria e medindo-se a frequência desse feixe após ser refletido pelas células sanguíneas em movimento. Observe que tais células, por estarem em movimento, recebem o feixe de ultrassom com uma frequência alterada. Por sua vez, ao refletir o ultrassom, o sangue comporta-se como uma fonte em movimento, introduzindo uma nova alteração na frequência do feixe. Comparando-se o valor da frequência emitida com a do feixe refletido, obtém-se a velocidade do sangue na artéria.

Outra aplicação importante do efeito Doppler na medicina é a técnica auxiliar de diagnóstico de problemas cardíacos denominada Eco-Doppler. Um feixe de ultrassom de frequência conhecida é direcionado ao coração do paciente, detectando o eco refletido por suas paredes. De modo semelhante ao que foi discutido no item anterior, a velocidade com que as paredes do coração se movem, aproximando-se ou afastando-se, fazem com que a frequência do sinal de ultrassom recebida aumente ou diminua. Assim, a partir da determinação das velocidades, pode-se descrever precisamente o movimento do coração.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura E.10. O radar utilizado pela polícia determina a velocidade de um automóvel por meio do efeito Doppler. Representação sem escala e em cores fantasia.

A medida da velocidade de um automóvel, usualmente feita pela polícia de trânsito, utilizando o radar, baseia-se em método semelhante ao que acabamos de descrever. Entretanto, nesse caso, a onda usada é de natureza eletromagnética (micro-onda). Essas ondas são emitidas por aparelhagem especial e detectadas após serem refletidas pelo automóvel em movimento. Observe que também aqui teremos duas alterações no valor da frequência emitida (veja a **figura E.10**).

Exemplo 3

A frequência do apito de uma locomotiva é de 1 000 hertz.

a) A locomotiva, apitando, está se aproximando, com velocidade de 40 m/s, de uma pessoa parada na estação. Qual a frequência do apito que a pessoa ouvirá?

Trata-se do efeito Doppler correspondente à situação em que a fonte se aproxima de um receptor em repouso. Temos, então, considerando a velocidade do som $v = 340$ m/s:

$$f = f_0\left(\frac{v}{v - v_F}\right) = 1\,000\left(\frac{340}{340 - 40}\right) \quad \therefore \quad f = 1\,132 \text{ hertz}$$

b) Suponha, agora, que a locomotiva, ainda apitando, esteja parada e que a pessoa, em um automóvel, se aproxime dela com velocidade de 40 m/s. Qual será, nesse caso, a frequência que a pessoa escutará?

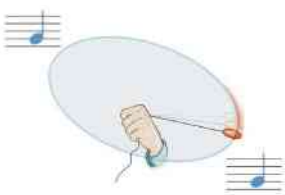
Temos, para esse caso, em que a fonte está em repouso e o receptor se aproxima dela, a seguinte expressão para a frequência detectada:

$$f = f_0\left(\frac{v + v_R}{v}\right) = 1\,000\left(\frac{340 + 40}{340}\right) \quad \therefore \quad f = 1\,117 \text{ hertz}$$

Observe que, em ambos os casos, a pessoa ouvirá sons de frequências superiores a 1 000 hertz. Entretanto, a alteração na frequência é diferente para cada caso. Embora as velocidades relativas entre a fonte e o receptor sejam iguais, para os dois casos, as situações físicas correspondentes são diferentes, como se pode observar analisando as **figuras 7.66** e **7.67**.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!



Paulo César Pereira/ Arquivo da editora

10. No exemplo 3, resolvido nesta seção, determine a frequência que seria ouvida pela pessoa supondo que:

a) Na questão **a**, a locomotiva esteja se afastando dela. 894 hertz.

b) Na questão **b**, a pessoa esteja se afastando da locomotiva. 882 hertz.

11. Um apito, que emite um som de 500 hertz (quando em repouso), é colocado em rotação em um círculo horizontal de 1,0 m de raio (veja a figura ao lado). Uma pessoa, situada a certa distância do apito, ouve o som por ele emitido com uma frequência variável, ora superior, ora inferior a 500 hertz.

a) Sabendo-se que a frequência máxima que a pessoa escuta é de 515 hertz, determine o número de voltas por segundo que o apito está efetuando. 1,5 volta/s.

b) Qual é o valor da frequência mínima que a pessoa irá detectar? 486 hertz.

12. Consultando a **tabela 7.2**, determine a velocidade que um automóvel deveria estar desenvolvendo para que seu motorista pudesse justificar o avanço de um sinal vermelho, dizendo que o enxergou com a cor verde. Expresse sua resposta em porcentagem da velocidade da luz (considere válidas, para esse caso, as equações deduzidas nesta seção para as ondas mecânicas).

12. 21% da velocidade da luz.

13. Analisando o espectro da luz proveniente de certa galáxia distante, os cientistas mediram o comprimento de onda de uma dada radiação desse espectro, encontrando o valor $\lambda = 4\,360 \cdot 10^{-8}$ cm.

Sabendo que o comprimento de onda da radiação, se a galáxia estivesse em repouso em relação à Terra, seria $\lambda_0 = 4\,340 \cdot 10^{-8}$ cm, eles puderam calcular a velocidade da galáxia. Responda:

a) Tendo em vista as informações fornecidas, você pode concluir que a galáxia está se afastando ou se aproximando da Terra? Explique.

b) Qual é o valor da velocidade da galáxia em relação à Terra? (Use as equações obtidas nesta seção.) 1 380 km/s.

c) A que porcentagem da velocidade da luz corresponde o valor calculado em **b**? Você acha, então, razoável usar as equações obtidas para ondas mecânicas, nesse caso de efeito Doppler, com a luz? 0,46%; sim.

13. a) Afastando-se, porque a $f < f_0$.

14. Imagine que a locomotiva de um trem-bala japonês passe apitando pela plataforma de uma estação. Uma pessoa, nessa plataforma, ouve o apito do trem se aproximando com frequência de 450 hertz. Após a passagem do trem, a frequência do apito parece cair para 300 hertz. Determine:

a) A velocidade do trem-bala. 68 m/s (= 244 km/h).

b) A frequência do apito que a pessoa escutaria se o trem estivesse parado. 360 hertz.

Não escreva no livro!

1. (Udesc) Dois tubos sonoros de um órgão têm o mesmo comprimento, um deles é aberto e o outro fechado. O tubo fechado emite o som fundamental de 500 Hz à temperatura de 20 °C e à pressão atmosférica. Dentre as frequências abaixo, indique a que esse tubo não é capaz de emitir.

a) 1 500 Hz

b) 4 500 Hz

x c) 1 000 Hz

d) 2 500 Hz

e) 3 500 Hz

2. (UFSM-RS) Um concertista, ao tocar seu violão, executa as notas musicais com as durações e frequências que caracterizam a música tocada. As pessoas que estão na plateia, tanto as mais próximas quanto as mais distantes, escutam as mesmas notas, com as mesmas durações e frequências, ou seja, a mesma música. Esse fato pode ser atribuído

a) à qualidade acústica da sala de concertos.

b) à afinação do instrumento.

x c) ao fato de a velocidade do som ter o mesmo módulo para todas as frequências sonoras.

d) ao fenômeno da reverberação.

e) ao fenômeno da ressonância.

3. (UFPR) Um instrumento musical de cordas possui cordas metálicas de comprimento L. Uma das cordas possui diâmetro d, densidade ρ e, quando sujeita a uma tensão T, vibra com uma frequência fundamental de 420 Hz. Suponha que um músico troque essa corda por outra de mesmo material e comprimento, mas com a metade do diâmetro da corda original. Considere que as cordas estão fixas nas suas extremidades. Faça o que se pede, justificando suas respostas.

a) Encontre a expressão para a velocidade de propagação da onda na corda em função das grandezas T, d e ρ.

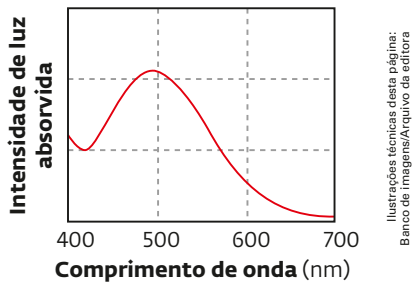
b) Determine a velocidade da onda na nova corda, quando sujeita a uma tensão quatro vezes superior à primeira, em função da velocidade na corda original.

c) Calcule a frequência fundamental nessa nova situação.

4. (Enem) Para que uma substância seja colorida ela deve absorver luz na região do visível. Quando uma amostra absorve luz visível, a cor que percebemos é a soma das cores restantes que são refletidas ou transmitidas pelo objeto. A figura 1 mostra o espectro de absorção para uma substância e é possível observar que há um comprimento de onda em que a intensidade de absorção é máxima. Um observador pode prever a cor dessa substância pelo uso da roda de cores (figura 2): o comprimento de onda correspondente à cor do objeto é encontrado no lado oposto ao comprimento de onda da absorção máxima.

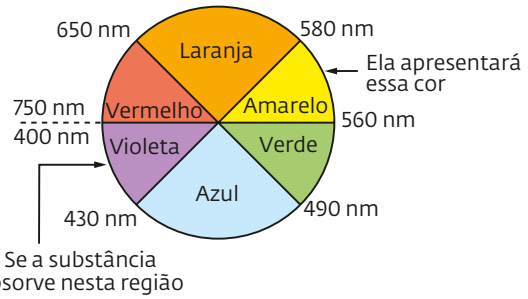
Brown, T. *Química: a ciência central*. 2005 (adaptado).

Figura 1



Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 2



Qual a cor da substância que deu origem ao espectro da figura 1?

a) Azul.

b) Verde.

c) Violeta.

d) Laranja.

x e) Vermelho.

5. (Enem) Sabe-se que o olho humano não consegue diferenciar componentes de cores e vê apenas a cor resultante, diferentemente do ouvido, que consegue distinguir, por exemplo, dois instrumentos diferentes tocados simultaneamente. Os raios luminosos do espectro visível, que têm comprimento de onda entre 380 nm e 780 nm, incidem na córnea, passam pelo cristalino e são projetados na retina. Na retina, encontram-se dois tipos de fotorreceptores, os cones e os bastonetes, que convertem a cor e a intensidade da luz recebida em impulsos nervosos. Os cones distinguem as cores primárias: vermelho, verde e azul, e os bastonetes diferenciam apenas níveis de intensidade, sem separar comprimentos de onda. Os impulsos nervosos produzidos são enviados ao cérebro por meio do nervo óptico, para que se dê a percepção da imagem. Um indivíduo que, por alguma deficiência, não consegue captar as informações transmitidas pelos cones, perceberá um objeto branco, iluminado apenas por luz vermelha, como:

a) um objeto indefinido, pois as células que captam a luz estão inativas.

b) um objeto rosa, pois haverá mistura da luz vermelha com o branco do objeto.

c) um objeto verde, pois o olho não consegue diferenciar componentes de cores.

x d) um objeto cinza, pois os bastonetes captam luminosidade, porém não diferenciam cor.

e) um objeto vermelho, pois a retina capta a luz refletida pelo objeto, transformando-a em vermelho.

3. a) $v = \frac{2}{d}\sqrt{\frac{T}{\pi\rho}}$ **3. b)** $v' = 4\left(\frac{2}{d}\sqrt{\frac{T}{\pi\rho}}\right)$ **3. c)** $f'_1 = 1\,640$ Hz

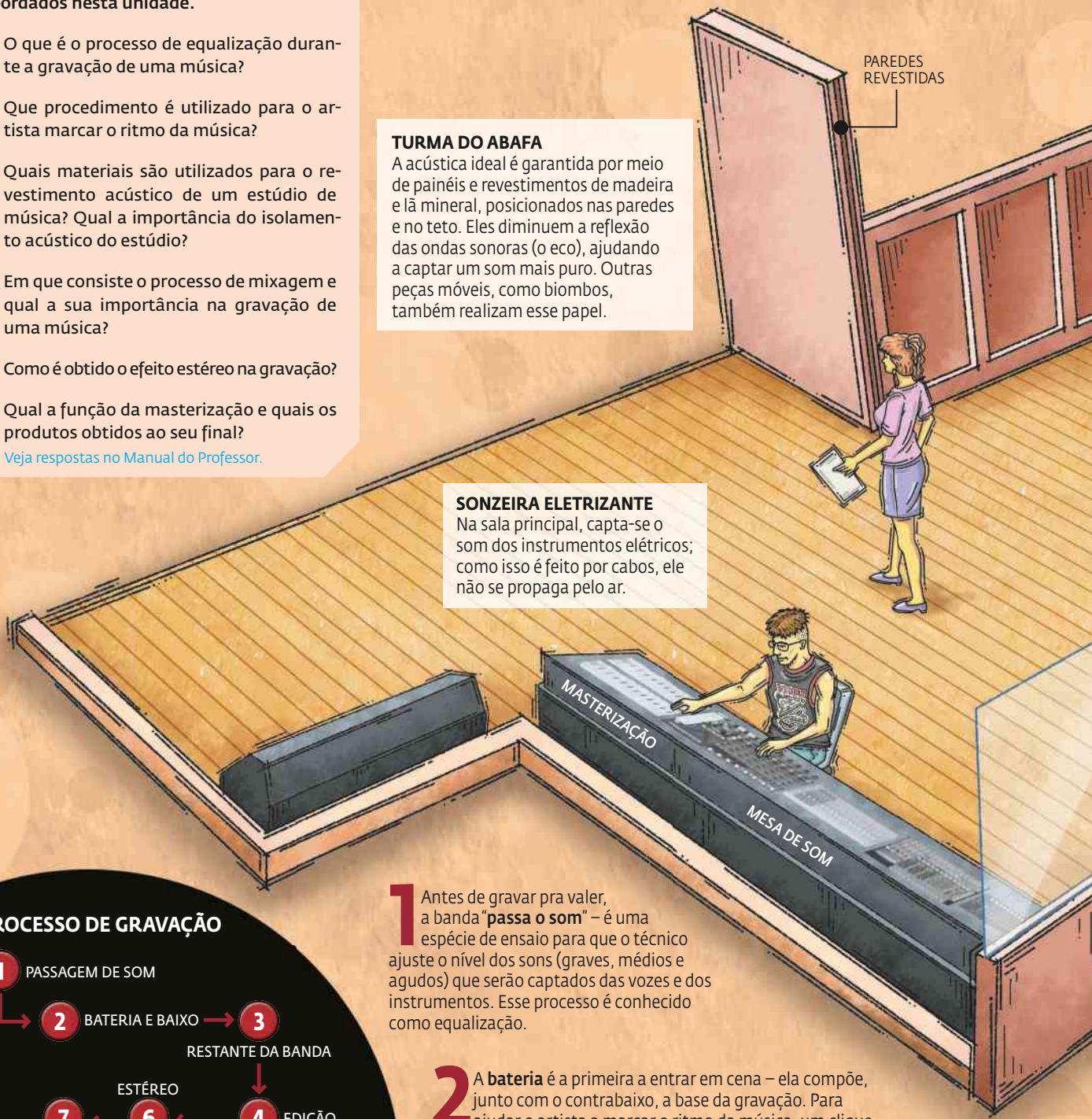
INFOGRÁFICO

O infográfico desta unidade apresenta como é realizada a gravação de uma música. Antes de responder às questões, faça a leitura deste infográfico observando como os textos e as imagens se relacionam e permitem a compreensão das informações referentes ao som e à música, dois temas abordados nesta unidade.

1. O que é o processo de equalização durante a gravação de uma música?
2. Que procedimento é utilizado para o artista marcar o ritmo da música?
3. Quais materiais são utilizados para o revestimento acústico de um estúdio de música? Qual a importância do isolamento acústico do estúdio?
4. Em que consiste o processo de mixagem e qual a sua importância na gravação de uma música?
5. Como é obtido o efeito estéreo na gravação?
6. Qual a função da masterização e quais os produtos obtidos ao seu final?

Veja respostas no Manual do Professor.

COMO É FEITA A GRAVAÇÃO DE UMA MÚSICA?



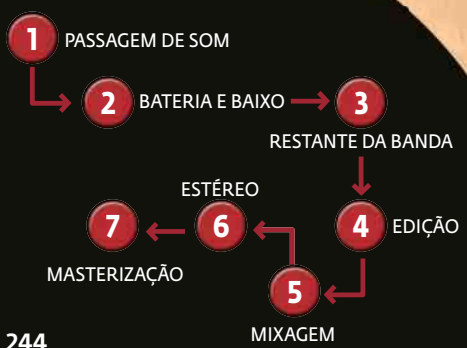
TURMA DO ABAFA
A acústica ideal é garantida por meio de painéis e revestimentos de madeira e lã mineral, posicionados nas paredes e no teto. Eles diminuem a reflexão das ondas sonoras (o eco), ajudando a captar um som mais puro. Outras peças móveis, como biombos, também realizam esse papel.

SONZEIRA ELETRIZANTE
Na sala principal, capta-se o som dos instrumentos elétricos; como isso é feito por cabos, ele não se propaga pelo ar.

1 Antes de gravar pra valer, a banda "**passa o som**" – é uma espécie de ensaio para que o técnico ajuste o nível dos sons (graves, médios e agudos) que serão captados das vozes e dos instrumentos. Esse processo é conhecido como equalização.

2 A **bateria** é a primeira a entrar em cena – ela compõe, junto com o contrabaixo, a base da gravação. Para ajudar o artista a marcar o ritmo da música, um clique fica pulsando constantemente no retorno (fone de ouvido pelo qual os músicos ouvem o que todos estão tocando).

PROCESSO DE GRAVAÇÃO

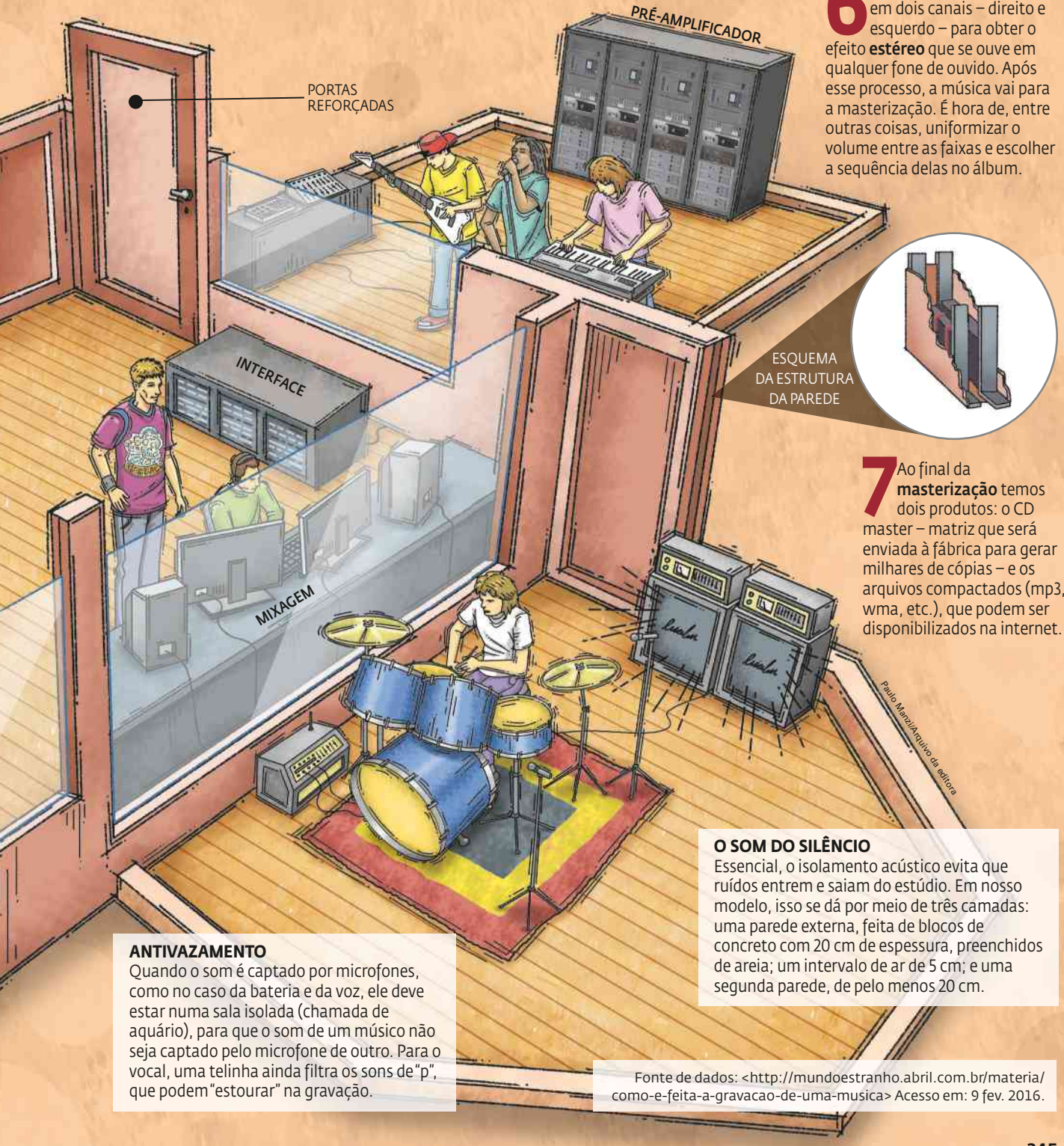


3 O **resto da banda** pode gravar junto ou após a base. Depois de captado, o som passa por um pré-amplificador e chega à interface, aparelho que faz a digitalização da música antes de mandá-la ao computador.

4 No processo de **edição**, o produtor e o técnico podem manipular o som graficamente por meio de *softwares*, fazendo ajustes de afinação, além de "recortar" e juntar os melhores trechos de cada sessão para, assim, montar uma versão ideal da música.

5 O som chega separadamente a cada um dos mais de 90 canais da mesa de som. Na **mixagem**, são programados, canal por canal, efeitos e variações de volume que dão mais dinâmica à música (isso é feito com a ajuda de equalizadores e outros aparelhos).

6 A música toda é condensada em dois canais – direito e esquerdo – para obter o efeito **estéreo** que se ouve em qualquer fone de ouvido. Após esse processo, a música vai para a masterização. É hora de, entre outras coisas, uniformizar o volume entre as faixas e escolher a sequência delas no álbum.



7 Ao final da **masterização** temos dois produtos: o CD master – matriz que será enviada à fábrica para gerar milhares de cópias – e os arquivos compactados (mp3, wma, etc.), que podem ser disponibilizados na internet.

Paulo Manzi/Arquivo da editora

ANTIVAZAMENTO
Quando o som é captado por microfones, como no caso da bateria e da voz, ele deve estar numa sala isolada (chamada de aquário), para que o som de um músico não seja captado pelo microfone de outro. Para o vocal, uma telinha ainda filtra os sons de "p", que podem "estourar" na gravação.

O SOM DO SILÊNCIO
Essencial, o isolamento acústico evita que ruídos entrem e saiam do estúdio. Em nosso modelo, isso se dá por meio de três camadas: uma parede externa, feita de blocos de concreto com 20 cm de espessura, preenchidos de areia; um intervalo de ar de 5 cm; e uma segunda parede, de pelo menos 20 cm.

Fonte de dados: <http://mundoestranho.abril.com.br/materia/como-e-feita-a-gravacao-de-uma-musica> Acesso em: 9 fev. 2016.

Respostas

Capítulo 1
Temperatura e dilatação

Verifique o que aprendeu

1. **a)** T_A diminui e T_B aumenta.
b) estado de equilíbrio térmico
c) $T_A = T_B$
2. Para que o termômetro entre em equilíbrio térmico com a pessoa.
3. −253 °C, pois os outros dois são inferiores ao zero absoluto.
4. **a)** errado
b) correto
5. Porque ele não permite medir temperaturas.
6. **a)** Não, pois os valores atribuídos àquelas temperaturas são arbitrários.
b) O fato de ela ser centígrada (centesimal).
7. −40 °C ou −40 °F.
9. **a)** Porque apenas a parte do copo em contato com a água se aquece e se dilata.
b) Porque todo o copo se aquece e se dilata igualmente por inteiro.
c) Porque o coeficiente de dilatação do vidro refratário é pequeno.
10. **a)** 1 °C **b)** 1 °C **c)** $29 \cdot 10^{-6}$ cm
11. **a)** Sim, se seus coeficientes de dilatação forem diferentes (materiais diferentes).
b) Sim, se tiverem comprimentos iniciais diferentes.
12. **a)** Diminuirá.
b) Diminuirá.
13. O coeficiente de dilatação do tungstênio é menor do que o dos outros metais mencionados.
14. **a)** Maior, pois a dilatação é proporcional ao comprimento inicial.
b) Porque, sendo muito grande a elevação de temperatura, a dilatação de cada trilho é maior do que a largura das juntas.
15. **a)** sim
b) Não; representa a dilatação aparente.
c) maior
d) maior
16. **a)** 1,5 cm^3
b) 1,5 cm^3
c) zero
17. **a)** $\gamma_{AR} - 6{,}9 \cdot 10^{-5}\ °C^{-1}$
b) Não sofrerá alteração.
c) zero
18. **a)** diminuirá
b) aumentará
c) diminuirá

Problemas e testes

1. d
2. b
3. Ao se resfriarem, os rebites exercem fortes compressões sobre as peças.
4. e
5. **a)** A criança *A*.
b) 0,55 mm
6. Fahrenheit, pois em Celsius ou Kelvin não é possível atingir uma temperatura tão baixa.
7. b
8. d
9. e
10. **a)** maior
b) prejuízo
11. **a)** $T_c/5 = T_R/4$
b) $T_c = 25$ °C
12. d
13. d

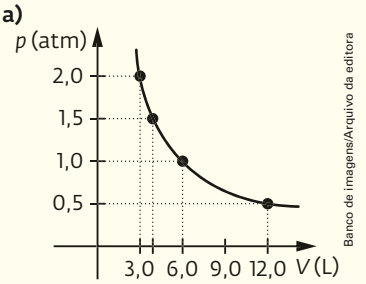
Capítulo 2
Comportamento dos gases

Verifique o que aprendeu

1. **a)** Pressão *p*, volume *V*, massa *m* e temperatura *T*.
b) Pelo menos duas das grandezas *p*, *V*, *m* e *T* variaram.
2. **a)** Aqueles que existem na natureza.
b) Gás cujo comportamento obedece rigorosamente às leis estudadas neste capítulo.
c) a pressões baixas e temperaturas altas
3. **a)** *m* e *T* **b)** *p* e *V*
4.

Estado	*p* (atm)	*V* (L)	*pV* (atm · litro)
I	0,50	12	6,0
II	1,0	6,0	6,0
III	1,5	4,0	6,0
IV	2,0	3,0	6,0

5. **a)**



Banco de imagens/Arquivo da editora

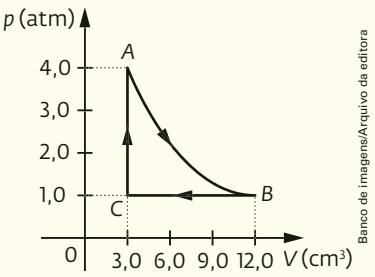
b) isoterma de um gás ideal
6. 4,0 gL; 6,0 gL; 8,0 gL
7. **a)** *p* e *m* **b)** *V* e *T*
8. **I:** −73; 200; 150.
II: 127; 400; 300.
III: 327; 600; 450.
IV: 527; 800; 600.
9. **a)** 26 atm · L
b) 13 L
10. **a)** 15 mols

b) $R = 8{,}31$ J/mol · K
c) 241 K
d) -32 °C

11. Não, pois $pV \neq nRT$.
12. Porque suas moléculas colidem com as paredes do recipiente.
13. **a)** 2,4 atm
b) 1,2 atm
c) 2,4 atm
14. **a)** $2{,}07 \cdot 10^{-20}$ J
b) por 2
c) zero absoluto
15. **a)** Aumenta 5 vezes.
b) Aumenta 5 vezes.
c) 5 vezes
d) sim
16. **a)** 480 m/s
b) cerca de 37%
17. falsa
18. **a)** Movimento caótico de pequenas partículas, em suspensão no interior de um fluido.
b) Colisões das moléculas do fluido contra uma partícula em suspensão.
c) Foi determinante para a aceitação da existência de átomos e moléculas.

Problemas e testes

1. **a)** isotérmica
b) 4,0 atm
c) 10 cm^3
2. Sim, pois $p_1V_1 \neq p_2V_2$.
3. **a)** I é isotérmica; II é isobárica; III é isovolumétrica.
b) I: p/V = constante; II: V/T = constante; III: p/T = constante.
4. c
5. **a)** $8 \cdot 10^{12}$ moléculas/m^3
b) 10
6. $\frac{T_2}{T_1} = 8$
7. 02, 08 e 32
8.



Banco de imagens/Arquivo da editora

9. c
10. 18,4 cm
11. e

Capítulo 3
Termodinâmica

Verifique o que aprendeu

1. **a)** T_A diminuiu e T_B aumentou.
b) Havia passagem de calórico de *A* para *B*.
2. **a)** A energia interna de *A* diminuiu e a de *B* aumentou.
b) Sim; de *A* para *B*.
c) calor
3. **a)** sim
b) não
c) Trabalho realizado pelos golpes do martelo.
4. **a)** 418 J **b)** 200 cal
5. **a)** Não; a extremidade se aqueceria muito porque o metal é bom condutor de calor.
b) A madeira não conduz bem o calor.
6. **a)** Não; a maneira correta de dizer seria: o agasalho impede que o calor seja transmitido do corpo da pessoa para o exterior.
b) No pé esquerdo, porque o ladrilho é melhor condutor de calor.
7. **a)** A maior parte do calor é transmitida por radiação.
b) O escuro, porque absorve mais radiação térmica solar.
8. **a)** As cavidades entre os pedaços de carvão possuem um comportamento de corpo negro.
b) As cores predominantes são tons de vermelho, além de tons de amarelo e branco.
10. **a)** 11 cal/°C
b) Devemos fornecer ao bloco 11 cal para que sua temperatura se eleve 1 °C.
11. **a)** igual **b)** maior **c)** o bloco *A*
12. **a)** alumínio
13. **a)** 940 cal **b)** 10 °C
14. **a)** positiva
b) positivo
c) pelo sistema
15. **a)** sim
b) Aumenta.
c) não
d) $\bar{c} = 0$
16. **a)** zero
b) $\Delta U = -170$ cal
c) Diminuiu.
17. **a)** Aumentar; positivo.
b) Diminuir; negativo.
18. **a)** 210 J
b) $\Delta U = -110$ J
c) A energia interna do sistema diminui 110 J, porque ele realiza um trabalho de 320 J que é maior do que o calor de 210 J que foi absorvido.
19. **a)** Ambas aumentaram.
b) não (compressão adiabática)
c) O trabalho realizado sobre ele.
20. **a)** $Q = 630$ J

b) $\Delta U = 0$
c) Ambas não sofreram variação.
d) transformação isotérmica

21. a) $\Delta Q = 1400c$ cal
b) zero
c) 500 cal
d) aproximadamente 0,035 cal/g °C

22. $T_f = 60$ °C

23. a) 150 J
b) energia interna da água

24. a) não
b) O trabalho realizado sobre a água.

25. a) Um dispositivo que transforma calor em trabalho mecânico.
b) Fonte quente: fornalha; fonte fria: ar ambiente.

26. a) 20%
b) 80 cal

27. a) 625 cal
b) 375 cal

28. $1{,}8 \cdot 10^5$ W

29. É impossível construir uma máquina térmica que, operando em ciclo: 1º) apresente rendimento igual a 100%; 2º) transforme integralmente todo o calor que ela recebe da fonte quente em trabalho; 3º) não rejeite calor para a fonte fria.

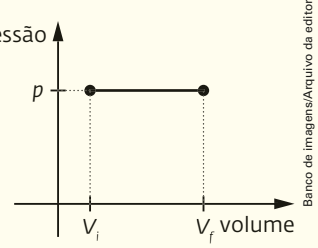
30. a) não
b) sim

Problemas e testes

1. a) $4{,}2 \cdot 10^5$ J
b) $4{,}2 \cdot 10^5$ J
c) 10^5 cal
d) 0,5 °C

2. a, b, d.

3. a)



Banco de imagens/Arquivo da editora

b) $p(V_f - V_i)$
c) O trabalho realizado pelo gás.

4. a) 600 cal
b) $\mathcal{C} = 0$
c) 600 cal
d) 0,75 cal/g · K

5. 100 cal/°C

7. 2,4 °C

8. b

9. e

Apêndice D

Verifique o que aprendeu

1. a) Não, pois a transformação não é isobárica.
b) $\mathcal{C}_{if} = 10{,}0 \cdot 10^4$ J

2. a) $\mathcal{C}_{if} = -8{,}0 \cdot 10^4$ J
b) $\mathcal{C} = 2{,}0 \cdot 10^4$ J
c) área limitada pelas curvas I e II do gráfico

3. a) 0,25 = 25% **b)** $6{,}0 \cdot 10^4$ J

4. a) 280 K
b) 450 J
c) $Q_1 = 1\,500$ J e $Q_2 = 1\,050$ J

5. Não; o rendimento máximo é de 65%.

6. a) menor **b)** 600 cal

7. Não; a geladeira liberou para o ambiente maior quantidade de calor do que absorveu.

Problemas e testes

1. d

2. V, F, F, V, V.

3. a) 120 J
b) 150 J
c) 270 J

4. d

5. a) sim
b) aparelho de ar condicionado

Capítulo 4
Mudanças de fase

Verifique o que aprendeu

1. a) pressão e temperatura
b) Aumentando sua temperatura ou diminuindo a pressão sobre ele.

2. a) As ligações entre os átomos de um líquido são mais fracas, comparadas às ligações dos sólidos.
b) A rede cristalina se desfaz.
c) Porque a força entre as moléculas de um gás é praticamente nula.

3. a) 2 100 cal
b) Permanece constante em 961 °C.
c) 961 °C

4. a) 50 g
b) Ambos estarão a 119 °C.

5. a) 1 775 °C
b) Permanece constante.
c) sim

6. a) Aumenta.
b) As moléculas mais velozes escapam mais rapidamente do líquido.

7. **a)** 357 °C
b) Permanece constante.
c) 600 g
d) 357 °C

8. **a)** O vapor de água do ar, no interior do automóvel, condensa-se em contato com a superfície do vidro que está mais fria.
b) O movimento do ar faz com que o vapor de água condensada torne a se evaporar.

9. **a)** aumenta
b) menor
c) afunda.

10. acima

11. **a)** Igual se estiver no nível do mar e menor se estiver acima.
b) Igual se estiver no nível do mar e maior se estiver acima.

12. **a)** Sim; aumentando-se a pressão sobre ele.
b) 1 500 m

13. **a)** sólida
b) gasosa

14. **a)** 20 °C
b) 5,2 atm e −57 °C

15. **a)** sólida
b) gasosa
c) Aumentar a temperatura e a pressão.

16. **a)** igual
b) Igual; parte do líquido se evapora até saturar novamente o ambiente.

17. Para liquefazer o hélio, sua temperatura deve ser reduzida abaixo de 5 K.

18. vapor de água

19. **a)** 15 °C
b) 55,1 mmHg

20. $u_r = 100\%$, em ambos os casos.

21. $u_r = 22{,}8\%$

Problemas e testes

1. **a)** errada
b) certa
c) errada

2. **a)** maior
b) gelo a 0 °C

3. **a)** 580 cal
b) 527 °C

4. a, c, d

5. b

6. b

7. c

8. b

9. a

10. c

Capítulo 5
Reflexão da luz

Verifique o que aprendeu

1. **a)** não
b) Porque ela envia para nossos olhos a luz que recebe do Sol.

2. **b)** *AA'B'B* **c)** Aumentará.

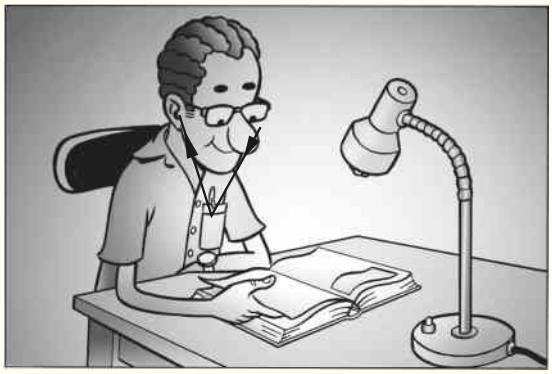
3. **a)** Feixe de raios paralelos iguais.

4. **a)** $9{,}6 \cdot 10^{15}$ m
b) 20 anos
c) $1{,}9 \cdot 10^{14}$ km

5. maior

6. **a)** P_1 e P_5 **c)** P_4
b) P_2 **d)** P_3

7.



João Xavier de Campos/Arquivo da editora

8. Os raios de luz continuam com a mesma cor que apresentavam antes do ponto de cruzamento.

9. **a)** Porque refletem difusamente (em todas as direções) a luz que recebem do Sol ou de uma lâmpada, e esta luz difundida alcança nossos olhos.
b) A atmosfera terrestre difunde a luz solar, espalhando-a em todas as direções. Na Lua isso não ocorre porque ela não possui atmosfera.
c) A superfície reflete a luz do Sol.

10. **b)** ângulo entre *NP* e o raio refletido
c) 32°

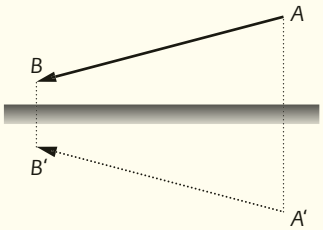
11. **b)** zero
c) zero
d) Na mesma direção do raio incidente, porém em sentido contrário.

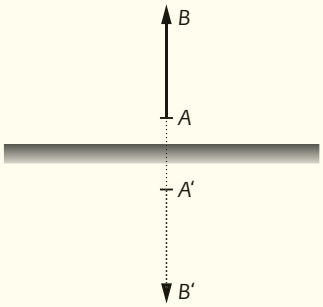
12. **a)** É refletido.
b) divergente
c) de um ponto situado a 50 cm atrás do espelho
d) a imagem virtual da lâmpada
e) figura semelhante à 5.19

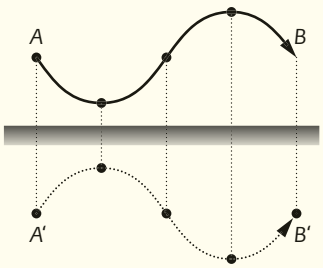
13. *AA'* e *CC'*

14. **a)** 4 m
b) Não variará.

15. Veja as figuras.







Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

16. a) côncavo, convergente
b) convexo, divergente
c) convexo, divergente
d) côncavo, convergente

17. a) No meio do arco que representa a calota.
b) Reta passando por *V*, perpendicular ao espelho.
c) Sobre o eixo, a 6,0 cm de *V*, para o lado da concavidade.
d) no meio do segmento *CV*

18. As mesmas posições do exercício 17.

19. a) paralelos **b)** 2,5 m **c)** real

20. a) I **b)** II

21. a) no meio do segmento *CV*
b) real
c) Passam pelo foco.
d) convergente

22. a) No meio do segmento *CV*.
b) Virtual.
c) Os prolongamentos dos raios refletidos passam pelo foco.
d) Divergente.

23. a) Convergente.
b) Divergente.
c) Do ponto I.
d) A imagem real do objeto.

24. a) e b) Os dois diagramas são semelhantes ao do exemplo **1** desta seção.

25. Porque os raios refletidos serão paralelos entre si (costuma-se dizer que a imagem se forma no infinito).

26. a) convexo
b) virtual
c) não

27. a) $D_i = 12$ cm
b) real
c) $\frac{1}{5}$, isto é, a imagem é 5 vezes menor do que o objeto.
d) sim

28. a) $D_i = -9{,}0$ cm
b) virtual
c) $\frac{1}{4}$, isto é, a imagem é 4 vezes menor do que o objeto.
d) $A'B' = 1$ cm

29. Sim, diagrama semelhante ao da figura 5.47.

30. 4,3%

31. O estabelecimento da teoria da relatividade de Einstein.

32. a

33. a) 10^{10} anos-luz
b) 10 bilhões de anos

Problemas e testes

1. *CD* é vermelha e *C'D'* é azul.

2. Espelho côncavo, pois apenas ele pode fornecer imagem virtual maior do que o objeto.

3. a) $L = 2{,}2$ m
b) $x = 0{,}6$ m

4. a) *A*
b) *B*
c) *C*

5. a

6. c

7. A imagem fornecida por um espelho convexo é sempre virtual e menor do que o objeto.

8. d) $\beta = 30°$
e) Sim. ($30° = 2 \cdot 15°$).

9. a) Aumento = 1
b) A imagem e o objeto têm o mesmo tamanho.
c) Sim.

10. a

11. a

12. d

Capítulo 6
Refração da luz

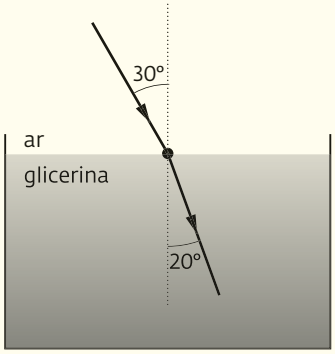
Verifique o que aprendeu

1. a) $n = 2{,}0$ **b)** $1{,}24 \cdot 10°$ m/s

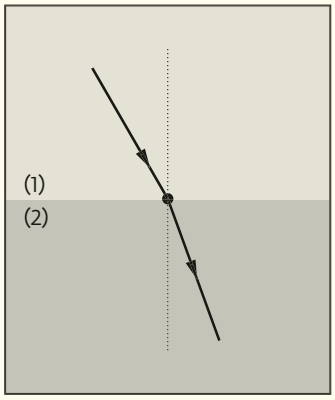
2. a) Gelo.
b) Rutilo

3. a) $n_1 = 1{,}0$; $\theta_1 = 30°$ e $n_2 = 1{,}47$
b) $\theta_2 = 20°$

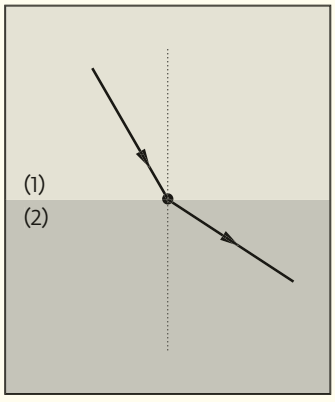
c) Veja a figura.



4. a) Veja a figura.



b) Veja a figura.



Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

5. a) Afasta-se.
b) menor
c) *A*
d) *B*

6. Mais próxima

7. a) no encontro dos prolongamentos dos raios retratados
b) Virtual, porque está situada no prolongamento dos raios.
c) abaixo

8. a) 62°
b) *OA*: parte se reflete e parte se refrata afastando-se da normal; *OB*: parte se reflete e parte se refrata tangenciando a superfície de separação; *OC*: não se refrata, pois é totalmente refletido.

9. Não, porque o índice de refração da água é menor do que o do vidro e, portanto, um raio luminoso sempre se aproxima da normal ao passar da água para o vidro.

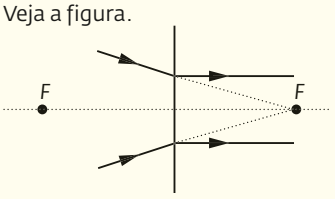
10. a) vermelha **b)** abaixo

11. a) violeta **b)** vermelho **c)** violeta

12. a) preto **c)** amarelo
b) amarelo **d)** preto

13. a) Diagrama semelhante ao da figura 6.30.a.
b) Diagrama semelhante ao da figura 6.32.a.

14. a) Diagrama semelhante ao da figura 6.30.c.
b) Veja a figura.



15. a) Convergente.
b) Divergente.
c) Convergente.

16. a) divergente
b) igual
c) maior

17. a) Diagrama semelhante ao da figura 6.37.
b) Real, invertida e menor do que o objeto.

18. b) A imagem mantém-se real, afasta-se da lente e aumenta de tamanho.

19. a) $D_i = 6$ cm
b) 0,5
c) O tamanho da imagem é a metade do tamanho do objeto.
d) sim

20. a) Diagrama semelhante ao da figura 6.40; imagem virtual, direta e menor do que o objeto.
b) A imagem continua virtual, direta e menor do que o objeto.
c) A lente divergente fornece sempre imagem virtual e menor do que o objeto.

21. a) $D_i = -3$ cm.
b) Aumento $= \frac{1}{4}$.
c) $A'B' = 2{,}5$ m

22. a) miopia
b) divergentes

23. Diminuiu.

24. a) convergente
b) menor
c) virtual

25. a) Maior, porque a imagem fornecida pela objetiva deve ser real.
b) A imagem real fornecida pela objetiva.
c) virtual
d) invertida

26. A reflexão da luz foi comparada com a reflexão do som (eco).

27. Newton era adepto da teoria corpuscular da luz e Huyghens defendia o modelo ondulatório.

28. **a)** maior **b)** maior
29. **a)** de *O* para *P*
b) menor
c) não
30. A experiência de Foucault mostrou que a velocidade da luz na água é menor do que no ar, ao contrário do que previa o modelo corpuscular.
31. Newton fez um feixe de luz monocromática passar por um prisma e verificou que o feixe não sofreu nenhuma alteração.

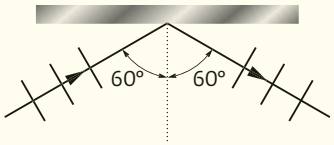
Problemas e testes

1. **a)** 1,5 vez menor **b)** 750 s
2. **a)** $\theta_1 = 60°$; $\theta_2 = 35°$.
b) $n = 1,5$
3. c
4. trajetória **III**
5. ponto *E*
6. e
7. a

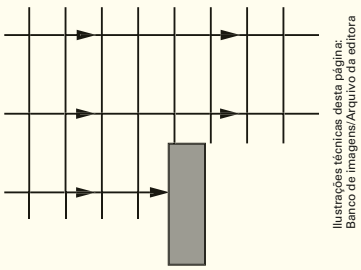
Capítulo 7
Movimento ondulatório

Verifique o que aprendeu

1. **a)** para a esquerda
b) para a esquerda
c) retardado
2. **a)** nos pontos *B* e *B'*
b) no ponto *O*
c) no ponto *O*
d) nos pontos *B* e *B'*
e) no ponto *O*
3. **a)** sim
b) 50 ciclos
c) 0,50 hertz
d) 2,0 s
4. **a)** 5,0 cm
b) 40 cm
5. **a)** Diminuirá.
b) Aumentará.
c) Não sofrerá alteração.
6. e
7. todas
8. **a)** 5,0 hertz
b) 0,20 s
c) 5,0 oscilações/s
d) 5,0 hertz
9. $\lambda_2 = 20$ cm
10. **a)** $\hat{i} = 60°$
b) $r = 60°$
c) Veja a figura abaixo.
d) Veja a figura abaixo.
e) Não varia, porque a onda continua a se propagar no mesmo meio.



11. **a)** 0,20 s
b) Oscila para cima e para baixo.
c) 5,0 oscilações/s
d) 25 cm/s
12. muito menor
13. **a)** Veja a figura.



Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

b) desenho semelhante ao da figura 7.32
14. **a)** mais acentuada
b) menos acentuada
15. Porque as ondas luminosas sofrem maior difração ao passar por orifícios menores.
16. **a)** duas cristas
b) uma crista e um vale
c) dois vales
17. **a)** *A* **b)** *C* **c)** *B*
18. **a)** 20 cm/s
b) 5 Hz
c) 0,2 s
d) indefinido
19. **a)** Não; porque as duas lâmpadas não são fontes luminosas em fase e não mantêm uma diferença de fase constante.
b) Porque usou um artifício para obter duas fontes luminosas em fase.
20. **a)** o amarelo
b) O azul; porque $f = v/\lambda$ (menor λ, maior f).
21. vermelho, amarelo, verde, azul e violeta
22. **a)** $6,5 \cdot 10^{-7}$ m
b) $4,6 \cdot 10^{14}$ hertz
c) vermelha
23. **a)** 17 mm **b)** 17 m **c)** ultrassom
24. **a)** 77 cm **b)** 440 hertz **c)** 3,3 m
25. **a)** 2 vezes
b) 220 hertz; 880 hertz
26. **a)** flauta
b) a onda proveniente da tuba
c) a tuba

27. **a)** da clarineta
b) igual
c) a mesma nota (a mesma frequência)
d) diferentes
e) timbres diferentes
28. A velocidade do carro é desprezível comparada com a da luz.
29. **a)** não **b)** não **c)** sim
30. para a esquerda
31. Como a frequência da luz recebida é menor, as linhas do espectro passam a se situar mais próximas da região vermelha.
32. **a)** Estão se aproximando da Terra.
b) Não, porque todas as galáxias estão se afastando da Terra e por isso apresentam um deslocamento para o vermelho.

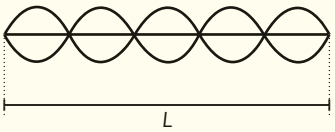
Problemas e testes

1. **a)** $T = 0{,}314$ s
b) $f = 3{,}18$ Hz
c) Permaneceria igual a 0,314 s.
2. d
3. 200 m
4. b
5. Deveríamos ter, na figura, $\lambda_2 \leq \lambda_1$.
6. **a)** diagrama semelhante à figura 7.37
b) Praticamente não há difração da onda.
7. **a)** $I = 1\,W/m^2$
b) 90 dB
c) $I = 10^{-2}\,W/m^2$ e $P = 7{,}5 \cdot 10^{-7}\,W$
8. **a)** 17 m
b) 1 450 m
9. d
10. **a)** 30° **b)** 57°
11. Todas estão corretas.
12. $L = mg/k$
13. **a)** Construtiva.
b) Construtiva.
c) Destrutiva.
14. 320 m/s
15. **a)** 20 N/m
b) 5,0 cm
c) 0,44 s; 2,27 hertz.
16. **a)** 12 cm **b)** 2,0 m/s em $X = 0$

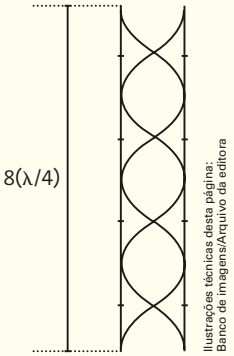
Apêndice E

Verifique o que aprendeu

1. **a)** $7{,}5 \cdot 10^{-3}$ g/cm $= 7{,}5 \cdot 10^{-4}$ kg/m
b) 117 hertz
c) 234 hertz; 585 hertz
2. **a)** reduzido à metade
b) multiplicado por 4
3. **a)** Mais grossa, pois temos $f_1 \propto 1/\mu$. Então, o som mais grave (menor f_1) é emitido pela corda de maior μ (mais grossa).
b) 4 vezes
4. **a)** Veja a figura.



b) $\lambda_5 = 2L/5$
c) $f_5 = 5\,f_1$
5. **a)** 17 cm
b) 250 hertz, 1 000 hertz e 2 000 hertz.
6. **a)** Veja a figura.



Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

b) $\lambda_4 = L/2$
c) $f_4 = 4f_1$
7. 70 cm
8. o tubo aberto
9. **a)** 4,25 mm
b) Não; sim
10. **a)** 894 hertz
b) 882 hertz
11. **a)** 1,5 volta/s
b) 486 hertz
12. 21% da velocidade da luz
13. **a)** Afastando-se, porque a $f < f_0$.
b) 1 380 km/s
c) 0,46%; sim
14. **a)** 68 m/s (= 244 km/h)
b) 360 hertz

Problemas e testes

1. c
2. c
3. **a)** $v = \frac{2}{d}\sqrt{\frac{T}{\pi\rho}}$
b) $v' = 4\left(\frac{2}{d}\sqrt{\frac{T}{\pi\rho}}\right)$
c) $f'_1 = 1640$ Hz
4. e
5. d

Sugestões de leitura

A lista apresentada a seguir é sugerida para tentar ampliar seus conhecimentos e incentivá-lo a fazer outras leituras além do livro didático. Seu professor poderá orientá-lo por onde começar, como ir adquirindo cada obra, como incorporá-las à biblioteca de sua escola e como desenvolver o hábito de ler. Boa leitura!

ARRIBAS, S. D. *Experiências de Física ao alcance da escola*. Passo Fundo: UPF, 1987.

BERNAL, J. D. *Ciência na História*. Lisboa: Livros Horizonte, 1969. v. 1 a 7.

CAMPOS, C. A. S. *Brasil 3D*: estereogramas tupiniquins. São Paulo: Imagica, 1995.

CARVALHO, R. P. *Física do dia a dia*. Belo Horizonte: Autêntica, 2011.

CHILDRESS, D. H. *As fantásticas invenções de Nikola Tesla*. São Paulo: Madras, 2004.

DAOU, L.; CARUSO, F. *Tirinhas de Física*. Rio de Janeiro: Centro Brasileiro de Ensino de Física, 2001. v. 1 a 4.

DAWKINS, R. *Desvendando o arco-íris*. São Paulo: Companhia das Letras, 2000.

ECO, U. et.al. *Entrevista sobre o fim dos tempos*. Rio de Janeiro: Rocco, 1998.

EINSTEIN, A.; INFELD,L. *A evolução da Física*. Rio de Janeiro: Nacional, 1941.

FEYNMAN, R. P. *Está a brincar, Sr. Feynman?* Rio de Janeiro: Campus, 2006.

FIOLHAIS, C. *Física divertida*. Lisboa: Gradiva, 2007.

GILMORE, R. *Alice no país do* quantum. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1998.

_____. *O mágico dos* quarks. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2002.

GLEISER, M. *O fim da terra e do céu*. São Paulo: Schwarcz, 2001.

GONICK, L.; HUFFMAN, A. *Introdução ilustrada à Física*. São Paulo: Harbra, 1994.

HEWITT, P. G. *Física conceitual*. Porto Alegre: Artmed, 2002.

INGRAM, J. *As ilusões da vida*: a estranha ciência do extremamente comum. Rio de Janeiro: Ediouro, 2005.

KAKU, M. *Física do impossível*. Rio de Janeiro: Rocco, 2010.

LIVINGSTON, J. D. *Rising Force: The Magic of Magnet*. Cambridge: Harvard, 2011.

MARINHO, F. C.; DORIA, M. M. *Temas atuais de Física*: ondas e bits. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

MENEZES, L. C. *Vale a pena ser físico?* São Paulo: Moderna, 1998.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. *Algumas razões para ser um cientista*. Rio de Janeiro: CBPF, 2005.

OSTERMANN, F.; PUREUR, P. *Temas atuais de Física*: supercondutividade. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

PANZERA, Á. C. *Estrelas e planetas*. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2008.

PAULINO, J. O. S. *Raios e trovões*. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 1997.

PERELMAN, I. *Física recreativa*. Moscou: Mir, 1980.

PRICE, D. S. *O homem e a ciência*: a ciência desde a Babilônia. Belo Horizonte: Itatiaia, 1976.

QUINN, S. *Marie Curie*: uma vida. São Paulo: Scipione, 1997.

SAGAN, C. *O mundo assombrado pelos demônios*. São Paulo: Companhia das Letras, 1997.

STRATHERN, P. *Aristóteles em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.

_____. *Arquimedes e a alavanca em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1998.

_____. *Böhr e a teoria quântica em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1999.

_____. *Galileu e o Sistema Solar em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1999.

_____. *Hawking e os buracos negros em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1998.

VALADARES, E. C. *Física mais que divertida*. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2012.

WALKER, J. *O grande circo da Física*. Lisboa: Gradiva, 1990.

ZIMAN, J. *A força do conhecimento*. São Paulo: Edusp, 1981.

Bibliografia

BARTHEM, R. *Temas atuais de Física:* a luz. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

BENSON, H. *University Physics.* New York: Wiley, 1991.

BOLTON, L. *Hidden pictures.* New York: Penguin, 1993.

CARVALHO, R. P. *Física do dia a dia.* Belo Horizonte: Autêntica, 2011.

_____. *Temas atuais de Física:* micro-ondas. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

CHALMERS, A. F. *O que é Ciência afinal?* São Paulo: Brasiliense, 2011.

CHILDRESS, D. H. *As fantásticas invenções de Nikola Tesla*. São Paulo: Madras, 2004.

DAWKINS, R. *Desvendando o arco-íris.* São Paulo: Companhia das Letras, 2000.

DURAN, J. E. R. *Biofísica:* conceitos e aplicações. São Paulo: Pearson, 2011.

EISBERG, R.; RESNICK, R. *Física quântica:* átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas. Rio de Janeiro: Elsevier, 1979.

ERNST, B. *Adventure with Impossible Figures.* Norfolk: Taschen, 2000.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. *Lectures on Physics:* the New Millennium Edition. London: Addison Wesley, 2011. 3 v.

GENNES, P. G. *Os objetos frágeis*. Campinas: Ed. da Unicamp, 1997.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. *Energy, Environment and Development*. London: Earthscan, 2010.

GRIBBIN, J. *História da Ciência*. Porto: Europa América, 2005.

HALLIDAY, D.; RESNIC, R.; WALKER, J. *Fundamentals of Physics.* New York: Wiley, 2010.

HAWKING, S. *Os gênios da ciência*: sobre os ombros de gigantes. Rio de Janeiro: Campus, 2005.

HEWITT, P. G. *Fundamentos de Física conceitual.* Porto Alegre: Bookman, 2009.

HOUAISS, A.; VILLAR, M. S. *Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa.* Rio de Janeiro: Objetiva, 2011.

INGRAM, J. *As ilusões da vida: a estranha ciência do extremamente comum*. Rio de Janeiro: Ediouro, 2005.

KAKU, M. *Física do impossível.* Rio de Janeiro: Rocco, 2010.

LIVINGSTON, J. D. *Rising force: the Magic of Magnet*. Cambridge: Harvard, 2011.

MARINHO, F. C.; DORIA, M. M. *Temas atuais de Física:* ondas e *bits*. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. *Algumas razões para ser um cientista.* Rio de Janeiro: CBPF, 2005.

MOSCOVICH, I. *Magic Cylinder Book.* Stradbroke: Tarquin, 1991.

NASSAU, K. *The Physics and Chemistry of Color:* the Fifteen Causes of Color. Hoboken: Wiley Inter-Science, 2001.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física básica.* São Paulo: Edgar Blücher, 1983. 3 v.

OKUNO, E.; CALDAS, I. L.; CHOW, C. *Física para Ciências Biológicas e Biomédicas*. São Paulo: Harbra, 1982.

OSTERMANN, F.; PUREUR, P. *Temas atuais de Física:* supercondutividade. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

PAULA, H. F.; MATEUS, A. L.; ALVES, E. G. *Quântica para iniciantes*. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2011.

PIRES, A. S. T. *Evolução das ideias da Física*. São Paulo: Livraria da Física, 2011.

RETONDO, F. *Química das sensações*. Campinas: Átomo, 2009.

SMITH, A. *The Usborne Big Book of Experiments.* London: Usborne, 1996.

TIPPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. *Física moderna*. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

VALADARES, E. C. *Física mais que divertida*. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2012.

_____; CHAVES, A.; ALVES, E. G. *Temas atuais de Física:* aplicações da Física quântica – do transistor à nanotecnologia. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

Índice remissivo

Absorção, **61, 95, 109, 228**
aceleração da gravidade, **193**
amplitude, **192–196, 209–211**
Aristóteles, **119**
Arquimedes, **144**

Bomba de vácuo, **103, 104**
Boyle, Robert, **32**

Calor específico, **66–70**
calórico, **32, 57, 58, 83**
calorímetro, **70**
capacidade térmica, **26, 66–70**
Celsius, Anders, **13–16**
coeficiente de dilatação, **10–24, 34**
comprimento de onda, **61, 118, 198–208, 214–217, 240,**
condução, **59–63**
constante,
    de Boltzmann, **45**
    de proporcionalidade, **18, 40**
convecção, **59–63**
Copérnico, Nicolau, **152**

Difração, **206–208, 221**
dilatação,
    aparente, **23, 24**
    linear, **18–24**
    superficial, **19**
    volumétrica, **19–24, 34**

Eclipse,
    da Lua, **120**
    do Sol, **120**
efeito Doppler, **227–229, 240–242**
empuxo, **36**
energia,
    cinética, **15, 44–46, 100, 197**
    elétrica, **57, 78, 135, 144**
    mecânica, **58, 77, 86**
    térmica, **56, 78, 83–95**
equilíbrio térmico, **11–14, 31, 57–61, 70, 98**
espectro da luz branca, **164, 167, 215**

Feixe de luz, **119–136, 153, 155, 164–186, 208–216**
fibra óptica, **161**
fonte, **56–89, 119, 121, 146, 161, 169, 200–229, 234–242**
força,
    de atração, **183**
    de ligação, **94, 95**
Foucault, Leon, **146, 185, 195, 213**
frequência, **61, 164, 190–210, 215–229, 234–242**

Galilei, Galileu, **12, 152**
Gay-Lussac, **34, 35**

Hooke, Robert, **42, 43**

Imagem,
    real, **133, 135, 140, 143, 174–180**
    virtual, **128, 129, 133, 140–143, 157, 174**
índice de refração, **154–164, 171–176**

Kelvin, Lorde, **14, 42**

Lei,
    da Termodinâmica, primeira, **83**
    de Boyle, **32, 33, 40, 43, 108**
    de Snell, **154–159, 221**
lupa, **179, 180**

Máquina,
    térmica, **77–80, 86–89**
massa, **13, 23, 31–48, 59, 67–70, 76, 191, 234**
Michelson, Albert, **146**
microscópio,
    eletrônico, **181**
    óptico, **181**
mol, **38, 41, 44**
mola, **18, 191–197, 219**
movimento,
    de rotação, **77–79**
    ondulatório, **152, 185, 190, 199**
    oscilatório, **191, 192, 197**
    vibratório, **192**

Ondas,
    de rádio, **61, 215**
    sonoras, **206–211, 218–225, 244**
órbita, **118, 136**

Partícula, **10, 42–48, 94, 97, 126, 181-184, 237**
período, **192–200, 211–230–233**
Platão, **119**
pressão atmosférica, **12, 34, 51, 105, 110, 243**
prisma, **131, 160, 185, 231**

Radiação térmica, **62–64, 81**
refrigerador, **63, 87–88**
rendimento, **77–81, 86–91**

Satélite, **25, 107, 126, 145, 152**

Teoria da relatividade, **122, 146**
termômetro, **10–17, 26–29, 61, 70, 110**
timbre, **190, 225, 226, 236**
trabalho, **16, 46, 53–58, 71–80, 85–91, 146, 206, 212**
transmissão, **59–63, 161**

Unidade de medida, **19, 83**

Velocidade,
    constante, **53, 198–199**
    da luz, **61, 122, 145–156, 183, 213, 228, 241**
    do som, **27, 221, 238, 242**
    média, **44, 45**

Watt, James, **77**

Young, Thomas, **212**

Física 2

MANUAL DO PROFESSOR

SUMÁRIO

1. **Apresentação** 258
2. **O Ensino Médio e esta Coleção** 259
   - Ensino Médio: breve histórico e cenário atual 259
   - O Novo Enem 260
   - Concepção da obra 262
3. **A Física no Ensino Médio** 264
   - Por que ensinar/aprender Física 264
   - A história sobre o ensino da Física 264
   - O ensino de Física, os desafios atuais e os PCNEM 265
4. **O papel da experimentação** 268
5. **O ensino com OED** 269
6. **Como a obra está organizada** 270
   - Aspectos gerais da obra 270
7. **Painel da Coleção** 273
8. **Referências de apoio e aprofundamento** 276
9. **Projeto integrador** 285
   - O que são projetos 285
   - Etapas de um projeto 285
   - Princípios norteadores de um projeto 285
   - Vantagens e resultados obtidos 285
   - Proposta de projeto 285
10. **Orientações específicas de cada capítulo e resoluções das atividades** 287

1. Apresentação

O livro didático é um importante auxiliar do trabalho do professor. Por essa razão, há muitos anos nos dedicamos a fornecer ao professor de Física um material acessível e rico em atividades e exemplos diferenciados. Ao mesmo tempo, procuramos acompanhar as mudanças educacionais que se processam no país, atualizando e reformulando nossas obras para atender às novas demandas e realidades.

O objetivo deste Manual é auxiliá-lo no uso desta Coleção, no planejamento e no desenvolvimento de sua prática educacional, nas escolhas e nos caminhos a seguir durante o curso, bem como nas reflexões acerca de sua atividade docente.

Em nossa atividade cotidiana, imersos no trabalho de educar e ensinar, muitas vezes somos questionados tanto pelos estudantes quanto pela sociedade. Um desses questionamentos é: por que ensinar/aprender Física? Certamente as respostas a essa e a outras inquietações da sociedade não são óbvias nem únicas, mas poderão ser mais bem compreendidas se tivermos acesso a referências e documentos diversos que vêm tratando dessa problemática há décadas.

Nessa perspectiva, na primeira parte deste Manual procuramos tratar de algumas questões mais abrangentes sobre o Ensino Médio atual e, em particular, sobre aspectos que consideramos relevantes ao ensino de Física. Principalmente em um momento de grandes e rápidas transformações, precisamos estar atentos e acompanhar novas propostas e reflexões sobre questões que são relevantes em nosso trabalho.

Ainda nesta primeira parte, descrevemos aspectos gerais da obra, como estrutura, linguagem, desenvolvimento conceitual e proposta pedagógica, destacando suas características que contemplam orientações dos PCN e dos PCN+. No final desta primeira parte, trazemos um conjunto de referências que poderão auxiliá-lo em seu trabalho.

Na segunda parte do Manual, apresentamos orientações específicas para cada volume da Coleção. Sugerimos propostas e complementações que são fruto de reflexões da prática docente e procuram um diálogo constante com a sala de aula e com os problemas que dela provêm, como administração do tempo e desafios trazidos pelos alunos. Fazemos também sugestões de debates e práticas que contribuem para dar sentido ao aprendizado da Física. Apresentamos orientações de conteúdos e abordagens para cada capítulo dos três volumes e sugerimos atividades para a sala de aula, explorando recursos textuais e práticos presentes na Coleção. Tais indicações podem ser utilizadas com finalidades diversas, a exemplo de avaliações, atividades em grupo, atividades de encerramento de conteúdo e de reforço entre conteúdos de diferentes unidades e capítulos do livro.

Esperamos que essas orientações subsidiem o seu trabalho, no preparo e na realização das práticas em sala de aula, e incentivamos todos os colegas a nos enviar suas colaborações com comentários, críticas e sugestões, com o objetivo de aperfeiçoar o ensino de Física e fazer com que ele seja instigante e significativo para os alunos.

2. O Ensino Médio e esta Coleção

Ensino Médio: breve histórico e cenário atual

Os objetivos da educação no Ensino Médio vêm sofrendo mudanças que decorrem não apenas da ineficácia do ensino tradicionalmente praticado nas escolas, mas também das profundas transformações sociais, econômicas e ambientais que vivenciamos no século XXI.

Nas décadas de 1980 e 1990 o sistema escolar sofreu críticas de diferentes setores da sociedade, assim como de pesquisadores, educadores, professores e estudantes. Essas críticas se referiam ao fato de o Ensino Básico não estar cumprindo objetivos formativos amplos necessários ao ingresso no Ensino Superior e no mercado de trabalho. Fato que, é importante destacar, não se limita ao ensino das ciências, mas a áreas de conhecimento distintas, como indicam avaliações institucionais, a exemplo das levadas a efeito pelo Saeb[1].

No fim dos anos 1990, diversas medidas buscaram alterar esse quadro. Entre elas ganhou especial destaque a Lei de Diretrizes e Bases (LDB), promulgada em 20 de dezembro de 1996, que mudou o caráter formativo do Ensino Médio após um longo período em que o objetivo desse nível de ensino era tão somente preparar o estudante para o ingresso no Ensino Superior ou para funções técnicas do mercado de trabalho. Com a nova LDB, essa etapa da Educação Básica passou a ser concebida de modo mais amplo, visando à formação cidadã do educando.

Nos termos da LDB:

> *Art. 35. O Ensino Médio, etapa final da Educação Básica, com duração mínima de três anos, terá como finalidades:*
>
> *I. a consolidação e o aprofundamento dos conhecimentos adquiridos no Ensino Fundamental, possibilitando o prosseguimento de estudos;*
>
> *II. a preparação básica para o trabalho e a cidadania do educando, para continuar aprendendo, de modo a ser capaz de se adaptar com flexibilidade a novas condições de ocupação ou aperfeiçoamento posteriores;*
>
> *III. o aprimoramento do educando como pessoa humana, incluindo a formação ética e o desenvolvimento da autonomia intelectual e do pensamento crítico;*
>
> *IV. a compreensão dos fundamentos científico-tecnológicos dos processos produtivos, relacionando a teoria com a prática, no ensino de cada disciplina.*

Nessa concepção, o Ensino Médio passa a ser etapa final da formação básica, visando capacitar o estudante a ser um cidadão inserido no mundo, preparado para lidar com desafios pessoais e sociais, e possibilitando sua atuação na prática social e no mundo do trabalho.

Pouco tempo depois da promulgação da LDB, novos documentos foram publicados pelo Ministério da Educação (MEC), com o objetivo de adequar a organização pedagógica e curricular do sistema escolar à legislação e fornecer orientações, propostas e material de apoio à implementação das reformas educacionais. Destacam-se, entre esses documentos, as Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (DCNEM/1998), os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN/1998) e as Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+/2002).

As DCNEM sistematizam os princípios gerais da LDB, explicitam desdobramentos desses princípios e dispõem sobre a organização curricular da formação básica nacional e suas relações com a formação para o mercado de trabalho.

Os PCNEM e os PCN+ tiveram como objetivo esclarecer e orientar educadores na implementação da LDB e das DCNEM, dada a dificuldade de realizar, na prática, o que a legislação preconizava, como, por exemplo, "desbastar o currículo enciclopédico", "(res)significar os conteúdos disciplinares como meio para a constituição de competências e valores, e não como objetivos do ensino em si mesmos" (Parecer CEB/CNA nº 15, de 1º de junho de 1998).

Esse conjunto de documentos, bem como os sistemas avaliativos então implantados no país (Saeb e Enem), trouxe uma concepção de educação muito diversa da até então vigente, que enxergava o Ensino Médio apenas como fase de preparação para o Ensino Superior. O Enem ganhou especial destaque como avaliação que viria a sinalizar mais concretamente essas novas orientações educacionais.

[1] O Sistema Nacional de Avaliação da Educação Básica (Saeb) é atualmente composto de duas avaliações diagnósticas, com o objetivo de aferir a qualidade do ensino oferecido pelo sistema educacional brasileiro. A primeira, denominada Avaliação Nacional da Educação Básica (Aneb), abrange de maneira amostral os estudantes das redes públicas e privadas do país, matriculados no 5º e no 9º ano do Ensino Fundamental e no 3º ano do Ensino Médio. A segunda, denominada Avaliação Nacional do Rendimento Escolar (Anresc), também conhecida como Prova Brasil, é aplicada censitariamente a alunos do 5º e do 9º ano do Ensino Fundamental público, nas redes estaduais, municipais e federal. Ambas são realizadas a cada dois anos, com aplicação de provas de Língua Portuguesa e de Matemática, além de questionários socioeconômicos.

O Novo Enem

O Exame Nacional do Ensino Médio (Enem), criado pelo Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais (Inep/MEC) em 1998, é parte do conjunto de reformas e propostas educacionais do final da década de 1990. Fundamentado na LDB/1996, nas DCNEM, nos PCN, bem como nas Matrizes Curriculares de Referência para o Saeb, o Enem foi criado originariamente com o objetivo de "avaliar o desempenho do aluno ao término da escolaridade básica, para aferir o desenvolvimento de competências fundamentais ao exercício pleno da cidadania" (Enem, Documento Básico, 1998).

No entanto, diferentemente do Saeb, que pretende avaliar o sistema de ensino em diferentes níveis e estágios, o Enem foi criado para avaliar o aluno na saída do Ensino Médio, individualmente e em caráter voluntário.

Com isso, o Enem visava alcançar os seguintes objetivos específicos:

a) oferecer uma referência para que cada cidadão possa proceder a sua autoavaliação com vistas às suas escolhas futuras, tanto em relação ao mercado de trabalho quanto em relação à continuidade de estudos;

b) estruturar uma avaliação da Educação Básica que sirva como modalidade alternativa ou complementar aos processos de seleção nos diferentes setores do mundo do trabalho;

c) estruturar uma avaliação da Educação Básica que sirva como modalidade alternativa ou complementar aos exames de acesso aos cursos profissionalizantes pós-médios e ao Ensino Superior.

Exame Nacional do Ensino Médio, Documento Básico, Inep, 2001.

Nessa concepção original, o exame era constituído por uma prova única contendo 63 questões objetivas de múltipla escolha e uma proposta para redação. A Matriz de Referência tinha por base cinco competências e 26 habilidades, sem uma divisão formal em áreas de conhecimento.

Ao longo de suas edições, o Enem ganhou reconhecimento e passou a ser cada vez mais uma forma de sinalização de metas para a escola básica e para os concursos vestibulares. Também se tornou referência para professores e estudantes, que começaram a se empenhar em compreender e utilizar novas abordagens de ensino, como a problematização, a interdisciplinaridade e a contextualização, pouco compreendidas e pouco praticadas até então.

Esse modelo do Enem perdurou durante quase uma década, quando algumas mudanças importantes foram introduzidas. Na fase de transição da concepção original para o Novo Enem, destaca-se sua crescente utilização como instrumento de seleção para ingresso no Ensino Superior. Muitas instituições públicas, principalmente as universidades federais, aderiram amplamente ao exame após a implantação do Sisu[2]. Mais tarde, com o Prouni[3], o Novo Enem também passa a constituir meio de acesso ao Ensino Superior privado.

A proposta de reformulação que introduz o Novo Enem, a partir de 2009, traz alterações não somente em sua utilização como processo seletivo para ingresso no Ensino Superior, mas também no próprio conteúdo do exame. A matriz de habilidades que embasa o exame é reelaborada, e o conteúdo da prova passa a contemplar mais diretamente o currículo do Ensino Médio praticado nas redes escolares do país.

Segundo o MEC:

Com o Novo Enem, o MEC busca reformular o currículo do Ensino Médio e mudar o acúmulo excessivo de conteúdo hoje cobrado nos vestibulares. A proposta é oferecer outro tipo de formação, voltada para a solução de problemas. Além disso, um exame unificado pode promover a mobilidade dos alunos pelo país. Centralizar os exames seletivos é mais uma forma de democratizar o acesso a todas as universidades.

Disponível em: <www.brasil.gov.br/educacao/2009/10/bom-desempenho-do-enem-pode-garantir-vaga-na-faculdade>. Acesso em: 12 abr. 2016.

Utilização do Novo Enem no processo seletivo

As universidades possuem autonomia e poderão optar entre quatro possibilidades de utilização do novo exame como processo seletivo:

- como fase única, com o sistema de seleção unificada, informatizado e *on-line*;
- como primeira fase;
- combinado com o vestibular da instituição;
- como fase única para as vagas remanescentes do vestibular.

De acordo com o MEC:

A alternativa à descentralização dos processos seria, então, a unificação da seleção às vagas das Ifes por meio de uma única prova. A racionalização da disputa por essas vagas, de forma a democratizar a participação nos processos de seleção para vagas em diferentes regiões do país, é uma responsabilidade social tanto do Ministério da Educação quanto das instituições de Ensino Superior, em especial as Ifes.

Proposta à Associação Nacional dos Dirigentes das Instituições Federais de Ensino Superior.

---

[2] O Sistema de Seleção Unificada (Sisu) foi desenvolvido pelo Ministério da Educação para selecionar os candidatos às vagas das instituições públicas de Ensino Superior que utilizarão a nota do Exame Nacional do Ensino Médio (Enem) como única fase de seu processo seletivo. (Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=16185&Itemid=1101>. Acesso em: 12 abr. 2016.)

[3] O Programa Universidade para Todos (Prouni) foi criado em 2004 e tem como finalidade a concessão de bolsas de estudos integrais e parciais a estudantes de cursos de graduação e de cursos sequenciais de formação específica em instituições privadas de Educação Superior. As instituições que aderem ao programa recebem isenção de tributos. (Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=205&Itemid=298>. Acesso em: 12 abr. 2016.)

Estrutura da prova

O novo exame foi dividido nas quatro áreas do conhecimento que estruturam o novo Ensino Médio: Linguagens, Códigos e suas Tecnologias (incluindo redação); Ciências Humanas e suas Tecnologias; Ciências da Natureza e suas Tecnologias; Matemática e suas Tecnologias.

Cada área é contemplada com 45 itens de múltipla escolha, totalizando 180 itens aplicados em dois dias de prova.

A Matriz de Referência

Na nova matriz, as cinco competências de caráter geral do antigo Enem passam a ser denominadas "eixos cognitivos", as competências e habilidades são redefinidas por área de conhecimento, e a cada uma delas é associado um conjunto de ementas de conteúdos disciplinares específicos.

Seguem abaixo tanto os eixos cognitivos, comuns a todas as áreas do conhecimento, como as competências e habilidades que compõem a Matriz de Referência das Ciências da Natureza.

Eixos cognitivos (comuns a todas as áreas de conhecimento)

I. **Dominar linguagens (DL)**: dominar as normas urbanas de prestígio da Língua Portuguesa e fazer uso das linguagens matemática, artística e científica e das línguas espanhola e inglesa.

II. **Compreender fenômenos (CF)**: construir e aplicar conceitos das várias áreas do conhecimento para a compreensão de fenômenos naturais, de processos histórico-geográficos, da produção tecnológica e das manifestações artísticas.

III. **Enfrentar situações-problema (SP)**: selecionar, organizar, relacionar e interpretar dados e informações representados de diferentes formas, para tomar decisões e enfrentar situações-problema.

IV. **Construir argumentação (CA)**: relacionar informações, representadas em diferentes formas, e conhecimentos disponíveis em situações concretas para construir argumentação consistente.

V. **Elaborar propostas (EP)**: recorrer aos conhecimentos desenvolvidos na escola para elaboração de propostas de intervenção solidária na realidade, respeitando os valores humanos e considerando a diversidade sociocultural.

Habilidades — Área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias

Competência de área 1 — Compreender as ciências naturais e as tecnologias a elas associadas como construções humanas, percebendo seus papéis nos processos de produção e no desenvolvimento econômico e social da humanidade.

H1 — Reconhecer características ou propriedades de fenômenos ondulatórios ou oscilatórios, relacionando-os a seus usos em diferentes contextos.

H2 — Associar a solução de problemas de comunicação, transporte, saúde ou outro com o correspondente desenvolvimento científico e tecnológico.

H3 — Confrontar interpretações científicas com interpretações baseadas no senso comum ao longo do tempo ou em diferentes culturas.

H4 — Avaliar propostas de intervenção no ambiente, considerando a qualidade da vida humana ou medidas de conservação, recuperação ou utilização sustentável da biodiversidade.

Competência de área 2 — Identificar a presença e aplicar as tecnologias associadas às ciências naturais em diferentes contextos.

H5 — Dimensionar circuitos ou dispositivos elétricos de uso cotidiano.

H6 — Relacionar informações para compreender manuais de instalação ou utilização de aparelhos ou sistemas tecnológicos de uso comum.

H7 — Selecionar testes de controle, parâmetros ou critérios para a comparação de materiais e produtos tendo em vista a defesa do consumidor, a saúde do trabalhador ou a qualidade de vida.

Competência de área 3 — Associar intervenções que resultam em degradação ou conservação ambiental a processos produtivos e sociais e a instrumentos ou ações científico-tecnológicos.

H8 — Identificar etapas em processos de obtenção, transformação, utilização ou reciclagem de recursos naturais, energéticos ou matérias-primas, considerando processos biológicos, químicos ou físicos neles envolvidos.

H9 — Compreender a importância dos ciclos biogeoquímicos ou do fluxo de energia para a vida, ou da ação de agentes ou fenômenos que podem causar alterações nesses processos.

H10 — Analisar perturbações ambientais, identificando fontes, transporte e/ou destino dos poluentes ou prevendo efeitos em sistemas naturais, produtivos ou sociais.

H11 — Reconhecer benefícios, limitações e aspectos éticos da biotecnologia, considerando estruturas e processos biológicos envolvidos em produtos biotecnológicos.

H12 — Avaliar impactos em ambientes naturais decorrentes de atividades sociais ou econômicas, considerando interesses contraditórios.

Competência de área 4 — Compreender interações entre organismos e ambiente, em particular aquelas relacionadas à saúde humana, relacionando conhecimentos científicos, aspectos culturais e características individuais.

H13 — Reconhecer mecanismos de transmissão da vida, prevendo ou explicando a manifestação de características dos seres vivos.

H14 — Identificar padrões em fenômenos e processos vitais dos organismos, como manutenção do equilíbrio interno, defesa, relações com o ambiente, sexualidade, entre outros.

H15 — Interpretar modelos e experimentos para explicar fenômenos ou processos biológicos em qualquer nível de organização dos sistemas biológicos.

H16 — Compreender o papel da evolução na produção de padrões, processos biológicos ou na organização taxonômica dos seres vivos.

Competência de área 5 — Entender métodos e procedimentos próprios das ciências naturais e aplicá-los em diferentes contextos.

H17 — Relacionar informações apresentadas em diferentes formas de linguagem e representação usadas nas ciências físicas, químicas ou biológicas, como texto discursivo, gráficos, tabelas, relações matemáticas ou linguagem simbólica.

H18 — Relacionar propriedades físicas, químicas ou biológicas de produtos, sistemas ou procedimentos tecnológicos às finalidades a que se destinam.

H19 — Avaliar métodos, processos ou procedimentos das ciências naturais que contribuam para diagnosticar ou solucionar problemas de ordem social, econômica ou ambiental.

Competência de área 6 — Apropriar-se de conhecimentos da Física para, em situações-problema, interpretar, avaliar ou planejar intervenções científico-tecnológicas.

H20 — Caracterizar causas ou efeitos dos movimentos de partículas, substâncias, objetos ou corpos celestes.

H21 — Utilizar leis físicas e/ou químicas para interpretar processos naturais ou tecnológicos inseridos no contexto da Termodinâmica e/ou do Eletromagnetismo.

H22 — Compreender fenômenos decorrentes da interação entre a radiação e a matéria em suas manifestações em processos naturais ou tecnológicos, ou em suas implicações biológicas, sociais, econômicas ou ambientais.

H23 — Avaliar possibilidades de geração, uso ou transformação de energia em ambientes específicos, considerando implicações éticas, ambientais, sociais e/ou econômicas.

Competência de área 7 — Apropriar-se de conhecimentos da Química para, em situações-problema, interpretar, avaliar ou planejar intervenções científico-tecnológicas.

H24 — Utilizar códigos e nomenclatura da Química para caracterizar materiais, substâncias ou transformações químicas.

H25 — Caracterizar materiais ou substâncias, identificando etapas, rendimentos ou implicações biológicas, sociais, econômicas ou ambientais de sua obtenção ou produção.

H26 — Avaliar implicações sociais, ambientais e/ou econômicas na produção ou no consumo de recursos energéticos ou minerais, identificando transformações químicas ou de energia envolvidas nesses processos.

H27 — Avaliar propostas de intervenção no meio ambiente aplicando conhecimentos químicos, observando riscos ou benefícios.

Competência de área 8 — Apropriar-se de conhecimentos da Biologia para, em situações-problema, interpretar, avaliar ou planejar intervenções científico-tecnológicas.

H28 — Associar características adaptativas dos organismos com seu modo de vida ou com seus limites de distribuição em diferentes ambientes, principalmente em ambientes brasileiros.

H29 — Interpretar experimentos ou técnicas que utilizam seres vivos, analisando implicações para o ambiente, a saúde, a produção de alimentos, matérias-primas ou produtos industriais.

H30 — Avaliar propostas de alcance individual ou coletivo, identificando aquelas que visam à preservação e à implementação da saúde individual, coletiva ou do ambiente.

Concepção da obra

> *O problema de "ensinar Física na América Latina" é apenas parte de um problema maior, que é o de "ensinar Física em qualquer lugar", que, aliás, está incluído num problema mais amplo, que é o de "ensinar qualquer coisa em qualquer lugar" e para o qual não é conhecida uma solução satisfatória.*
>
> Richard Feynman[4].

[4] Durante a 1ª Conferência Interamericana de Ensino de Física, na década de 1950, em sua estada no Brasil.

Todos nós que estamos envolvidos de diferentes maneiras com o trabalho educacional sabemos da enorme quantidade de problemas presentes na educação dos jovens de nosso país. Sabemos que as questões relacionadas a esse cenário são muitas, complexas e de naturezas distintas, tais como estrutura escolar precária, falta de incentivo familiar, formação inicial insuficiente, entre tantos outros problemas. A bibliografia referente a esses temas é razoavelmente extensa e abrange diversos aspectos de estudos já desenvolvidos sobre educação, ensino e aprendizagem. Entretanto, nem todos os professores conhecem e/ou têm acesso a essas publicações. Cabe ressaltar, ainda, que sua leitura e compreensão exigem conhecimentos e competências que nem sempre os professores adquirem em sua formação inicial e que, para muitos deles, são raras as oportunidades de fazer cursos de aperfeiçoamento em formação continuada.

Como professores e autores de livros didáticos de Física há muitos anos, esses fatos nos preocupam, pois eles atingem de maneira particular o ensino dessa área do conhecimento. As palavras do físico e professor Richard Feynman que encabeçam essas considerações não constituem propriamente um consolo, mas talvez uma explicação, dada a complexidade e a abrangência dos problemas envolvidos na arte de educar.

Ainda que ancorada na legislação e com uma grande diversidade de propostas e orientações, a atividade docente não deixou de prescindir do livro didático como um instrumento de grande ajuda para o professor. Por isso, o livro ganhou uma responsabilidade ainda maior diante desse panorama educacional: além de fortalecer os conhecimentos fundamentais das diferentes disciplinas, cabe ao livro didático subsidiar uma formação mais abrangente dos jovens, voltada à cidadania e ao mundo atual.

Embora nossos textos tenham sido publicados, em suas edições mais antigas, apoiados quase totalmente nas ideias que adquirimos em nossa prática docente, nas edições mais recentes, e nesta Coleção, nos inspiramos também em trabalhos de pesquisadores na área de ensino de Física, procurando incorporá-los para realinhar e atualizar as atividades docentes às questões e aos resultados de estudos que vêm sendo acumulados ao longo dos últimos anos.

Dentre os temas relacionados à educação que consideramos importante inserir no desenvolvimento de nossa obra, destaca-se a interdisciplinaridade, cuja relevância vem se tornando cada vez mais evidente nas pesquisas em ensino. Além de maior atenção a essa característica durante a apresentação dos conceitos e dos exemplos, criamos uma seção dedicada exclusivamente para esse fim, seção que será descrita mais adiante neste Manual.

Não temos a pretensão de que nossa proposta seja válida em qualquer situação. "Panaceias" e receitas não são possíveis nem desejáveis. Acreditamos, porém, que você, professor, poderá utilizar esta Coleção fazendo suas escolhas na seleção de conteúdos e acrescentando leituras e outras atividades quando julgar necessário.

A participação do professor na seleção dos conteúdos e na escolha das atividades que serão realizadas é essencial para o bom andamento do curso, não apenas porque o professor é aquele que melhor conhece a necessidade de aprendizado de seu aluno, mas também porque o envolvimento do professor com seu projeto de ensino favorece um envolvimento maior do aluno com seu projeto de aprendizagem.

Pretendemos que esta obra ofereça aos estudantes uma compreensão mais abrangente dos conhecimentos físicos, despertando-os para saberes relevantes à educação do cidadão de nossos dias, atenuando dificuldades e resistências que frequentemente demonstram. Com o olhar atento a esses problemas, esta obra procura enfatizar abordagens conceituais da Física, contextualizando os significados de teorias, leis e modelos, sem abandonar a linguagem e o formalismo sempre que necessário. Não se trata, portanto, de privilegiar nomenclaturas, a memorização ou a mera aplicação de fórmulas destituídas de significados. Definições, fórmulas, equações e exercícios são necessários e fazem parte da aprendizagem de Física, mas devem sempre ser tratados de modo que os alunos tenham compreensão de seus sentidos, tanto na Física como em sua relação com outros saberes.

Finalmente, procuramos empregar uma linguagem clara, ter cuidado especial com a sequência e a relação de conteúdos e tornar acessíveis atividades e textos, sem, contudo, abrir mão do rigor conceitual e de um princípio de honestidade científica condizente com uma formação básica adequada a diferentes perfis de estudantes.

Os aspectos destacados a seguir poderão ajudá-lo a construir situações de ensino que incorporam algumas das características apontadas por professores e por especialistas em educação como fundamentais para um ensino de qualidade. Esperamos que o caminho proposto auxilie o estudante a enriquecer e aprimorar suas formas espontâneas de interpretar a natureza e a vencer os obstáculos que surgem na jornada de estudar e aprender.

3. A Física no Ensino Médio

Por que ensinar/aprender Física

Retomemos as palavras de Feynman. Certamente "ensinar qualquer coisa em qualquer lugar" é um problema para o qual não se conhece uma solução satisfatória. No nosso caso, a tarefa de ensinar Física frequentemente é tida como um problema ainda maior, diante de algumas restrições pelas quais o professor passa. Faz parte do senso comum a ideia de que é uma disciplina difícil, abstrata, e que se faz muito uso da Matemática. Quase todo professor de Física já deve ter ouvido, ao menos uma vez, algum aluno questionar: "Por que tenho que estudar Física se no futuro não farei nenhum uso desse aprendizado?". Ou, ainda, depoimentos de que, para aprender Física ou para ser um "físico", é preciso estudar muito.

Isso nos faz refletir sobre a origem dessas ideias. É certo que estudar e aprender requer dedicação. Mas por que a Geografia, a Língua Portuguesa ou a Arte, por exemplo, seriam diferentes das Ciências? Por que exigiriam menos dedicação ou seriam mais fáceis? Por que seriam mais palatáveis ou mais necessárias à formação de todos? Por que demandariam menos inteligência? Seriam as dificuldades de aprendizagem um "privilégio" das Ciências?

Durante muito tempo, a Física ensinada era, de fato, "formulística" e distante do dia a dia dos alunos. Ainda que haja, em alguns casos, um maior aprofundamento e extensão de tópicos, ou uma dedicação ao desenvolvimento de raciocínios lógicos, em geral o único sentido do aprendizado dessa ciência era aplicá-la em provas e exames. De fato, nessa concepção essa "disciplina" não motivava, não era interessante nem havia utilidade teórica ou prática, a não ser ingressar no nível superior. Nesses moldes, o ensino de Física não formava nem educava, no sentido mais abrangente do que seja educar e do que a LDB prescreve: formar para a vida, para o mundo do trabalho, aprimorar o educando como pessoa.

Nem todo jovem vai precisar usar conhecimentos físicos em sua futura profissão, mas sua formação, como cidadão do mundo, não pode prescindir de conhecimentos científicos e tecnológicos, ou mesmo de uma visão da Ciência, de sua linguagem, suas metodologias e sua construção histórica. Assim como ocorre com as outras disciplinas, ensinamos/aprendemos Física para melhor nos colocarmos e atuarmos no mundo. Precisamos entender o conhecimento físico como cultura para uma formação geral. A inclusão da Física na escola básica não tem mais a função que um dia teve; como estava, a função era limitar-se à preparação para o Ensino Superior nas "carreiras científicas". Vivemos uma nova configuração do mundo social, do mundo do trabalho, com uma grande sofisticação e demandas nas comunicações, nos transportes, no suprimento de alimentos e de energia, no lazer e na vida pessoal. Estamos rodeados de aparelhos e equipamentos "impregnados" de conhecimentos científicos e tecnológicos. Observamos um mundo com mudanças climáticas, novas doenças e novas formas de controlar a saúde e obter curas. Em todos esses âmbitos, o conhecimento físico está presente. Dessa forma, acreditamos que o ensino de Física deve estar atrelado à conscientização de que nossa compreensão e atuação no mundo ficariam limitadas sem conhecimentos científicos e tecnológicos, da mesma forma que ficaria limitada caso não conhecêssemos nossa língua, nossa história ou a geografia de nosso país e do mundo.

A história sobre o ensino da Física

Uma crença generalizada e aceita durante muito tempo era a de que bons professores não precisavam ser formados: qualquer pessoa com certo conhecimento, ou que dispusesse de um bom livro sobre um dado assunto, poderia ensinar. Pouco era conhecido ou pesquisado sobre o ato de aprender, de ensinar, de compreender, de memorizar, de generalizar, de aplicar e de contextualizar conhecimentos que eram ensinados nas diversas etapas da educação escolar. Ainda nos dias de hoje perdura em alguns setores a ideia de que ter bom domínio sobre um assunto é necessário e suficiente para ensiná-lo.

Tais concepções começaram a mudar no início da segunda década do século passado, quando o psicólogo suíço Jean Piaget, que também se interessava por estudos de Biologia e Epistemologia, lançou as primeiras ideias sobre o que viria a ser sua teoria do conhecimento, principalmente sobre o desenvolvimento cognitivo das crianças, sugerindo que o ato de pensar e aprender não poderiam ser entendidos como um simples processo, ainda que refinado, de "tentativas e erros". Com a sua colaboração e a de outros pesquisadores, novas concepções envolvendo o pensamento e a linguagem foram sendo elaboradas, e hoje contamos com inúmeras pesquisas sobre o assunto.

Além de pesquisas e teorias modernas sobre cognição e aprendizagem, alguns acontecimentos do século XX contribuíram para a modificação da ideia que se tinha sobre ensinar e aprender as disciplinas das Ciências Naturais. Após a Guerra Fria, por exemplo, o conhecimento científico passou a ser elemento estratégico para a superação do subdesenvolvimento e para

a formação de pessoas que dessem suporte ao desenvolvimento tecnológico e industrial. Nesse cenário, a formação de cientistas passou a ser meta mundial, e o conhecimento científico foi considerado fundamental para os planos de desenvolvimento.

Nas décadas de 1980 e 1990, entram em cena novas concepções e orientações educacionais, segundo as quais a educação científica deveria ser direcionada a todos os estudantes, e não apenas a futuros cientistas. Essas ideias impulsionaram pesquisas e mudanças curriculares que convergiram, ainda na década de 1990, às legislações e orientações curriculares mencionadas. Trouxeram também questões mais complexas, como "Para que ensinar Ciências?" e, em nosso caso, "Para que ensinar Física?" ou, ainda, "O que ensinar?". É nesse quadro que os PCNEM e outras propostas curriculares estaduais e/ou municipais vêm sendo apresentados.

Acreditamos que é nessa linha e nesse contexto que estamos nos orientando e produzindo subsídios para os professores. Não se trata mais de conceber a educação como se fosse possível desenvolvê-la baseada no senso comum. Também foi abandonada a ideia de ensinar Física apenas para futuros físicos. Com esses novos pressupostos, não é fácil apontar, com segurança e objetividade, os processos, os contextos, os conteúdos e as competências que precisam ser observadas no desenvolvimento dos princípios que embasam o ensino de Física hoje. Assim como nas Ciências, qualquer teoria ou concepção educacional que surja deverá sempre ser admitida em caráter provisório e dinâmico. Pensamos que nós, autores, ao escrever nosso livro, procuramos cumprir a tarefa a nosso modo. Acreditamos ter construído caminhos que auxiliem professores e estudantes a encontrar respostas diversas, tendo em vista objetivos e realidades também diversos.

O ensino de Física, os desafios atuais e os PCNEM

Diante do quadro até aqui apresentado, entendemos os PCNEM como uma orientação que pode nos auxiliar na reflexão e na busca de caminhos diante dos tantos desafios que se colocam hoje para nós. Também entendemos esses parâmetros como uma sinalização para guiar nossas práticas, quer como educadores, quer como professores, pesquisadores e autores de materiais didáticos. Sem dúvida, temos de considerar que se trata de um enorme desafio dar conta de tantas inquietações, de tantos objetivos, competências e habilidades a serem desenvolvidos no ensino de Física. Para exemplificar algumas articulações desta Coleção com as orientações desses documentos oficiais, retomamos os três grandes campos de competências dos PCN+ com os quais nos preocupamos.

Representar e comunicar

As Ciências em geral, e a Física em particular, têm uma linguagem própria para representar e comunicar seus conhecimentos, composta de nomenclatura, símbolos, equações, representações de grandezas e unidades e representações gráficas.

Faz parte do aprender Física dominar essa linguagem, utilizar essa nomenclatura; representar e relacionar grandezas de diferentes formas, em textos, diagramas, tabelas, gráficos e equações; ler e interpretar textos diversos, como problemas e exercícios, o próprio texto didático, notícias científicas, informações e manuais técnicos, entre outros. Mais do que isso, dominar essa linguagem faz parte da formação cultural ampla, para o mundo social e do trabalho.

Nesse campo de competências, são habilidades propostas nos PCN+:

- reconhecer e utilizar adequadamente na forma oral e escrita símbolos, códigos e nomenclatura da linguagem científica;
- ler, articular e interpretar símbolos e códigos em diferentes linguagens e representações: sentenças, equações, esquemas, diagramas, tabelas, gráficos e representações geométricas;
- consultar, analisar e interpretar textos e comunicações de ciência e tecnologia veiculados por diferentes meios;
- elaborar comunicações orais ou escritas para relatar, analisar e sistematizar eventos, fenômenos, experimentos, questões, entrevistas, visitas, correspondências;
- analisar, argumentar e posicionar-se criticamente em relação a temas de ciência e tecnologia.

Nesta obra a representação e o uso de símbolos e nomenclaturas científicas são trabalhados ao longo de todos os capítulos, seja no texto, seja nas verificações de aprendizagem. Procuramos, sempre que necessário, aproximar e articular a linguagem da Física à do mundo cotidiano. Desse modo, acreditamos que a Coleção fornece elementos para que o aluno consiga se expressar utilizando o vocabulário, as nomenclaturas, os códigos e os símbolos da Física, para que possa compreender informações científicas que surgem em sua vivência diária, como em contas de energia elétrica, manuais e instruções de dispositivos tecnológicos, notícias, reportagens, etc.

Com as atividades investigativas e as questões conceituais dissertativas, o estudante desenvolve e exercita a habilidade de expressar esses conceitos de forma escrita, preparando-se para usar a linguagem científica e suas notações formais nas mais diversas formas e expressões.

Ao mesmo tempo, a leitura e a interpretação de textos, em diferentes formas e linguagens, é uma constante nesta Coleção, particularmente nas seções *Aplicações da Física*, *Física no contexto* e *Integrando...* . Em algumas dessas leituras, o aluno é chamado a responder a questões ou elaborar novos textos com base na compreensão dos textos apresentados. Destacam-se, ainda, os *Infográficos*, que promovem a leitura, a interpretação e a articulação de diferentes linguagens — esquemas, tabelas, gráficos, ilustrações e textos.

A elaboração de textos, a análise crítica e o posicionamento diante de questões científicas também são contemplados nessas seções e nas atividades de verificação de aprendizagem.

Investigar e compreender

A compreensão de fenômenos, conceitos e teorias físicas constituem um campo abrangente de habilidades e saberes, possivelmente o mais explorado no ensino da Física. No entanto, muito frequentemente limitam-se à memorização e à aplicação de fórmulas em exercícios repetitivos que não exigem do estudante a compreensão conceitual ou a solução de problemas reais.

A compreensão, na Física, envolve o reconhecimento de fenômenos e a sua interpretação científica, o entendimento de conceitos e modelos, a identificação de dados e informações relevantes em um problema, além de estratégias para solucioná-lo.

A investigação, por sua vez, é caminho para a compreensão e dela necessita; é parte do aprendizado, assim como do próprio fazer científico.

Observar, elaborar hipóteses, fazer estimativas, medir, dimensionar, comparar e avaliar resultados de medidas e observações, tudo isso é essencial na aprendizagem das Ciências e envolve habilidades que não se limitam à experimentação, no sentido estrito do termo. Antes, elaboram estratégias para responder a questões, resolver problemas e realizar pesquisas para buscar informações e aprofundamento de temas.

Nesse campo de competências, são habilidades propostas nos PCN+:

- identificar, em dada situação-problema, as informações ou variáveis relevantes e possíveis estratégias para resolvê-la;
- identificar fenômenos naturais ou grandezas em dado domínio do conhecimento científico, estabelecer relações e identificar regularidades, invariantes e transformações;
- selecionar e utilizar instrumentos de medição e de cálculo, representar dados e utilizar escalas, fazer estimativas, elaborar hipóteses e interpretar resultados;
- reconhecer, utilizar, interpretar e propor modelos explicativos para fenômenos ou sistemas naturais ou tecnológicos;
- articular, integrar e sistematizar fenômenos e teorias dentro de uma ciência e entre as várias ciências e áreas de conhecimento.

Nesta obra buscamos contemplar atividades investigativas de diferentes formas e em diferentes momentos, ao longo de todos os capítulos, seja no desenvolvimento e na apresentação conceituais, seja nas atividades práticas ou em avaliações propostas.

No campo conceitual, a Coleção enfatiza a apresentação de leis gerais em detrimento de casos particulares, o que possibilita ao aluno, em situações diversas, identificar variáveis a considerar para explicar um fenômeno ou resolver um problema, mesmo que não tenha tido contato com aquela situação específica.

No campo da investigação prática, uma seção específica, *Pratique Física*, procura dar conta dos aspectos com vocação propriamente experimentais, no sentido mais tradicional do termo, mas tratando de diversificar a natureza do experimento, desde as demonstrações qualitativas para ilustrar fenômenos até a realização de medidas, passando por habilidades como fazer previsões e estimativas, usar e associar escalas, construir e interpretar gráficos e propor soluções a desafios práticos. Ainda nesse campo de competências, a busca de informações e a realização de pesquisas sobre assuntos diversos são incentivadas nessa e em outras seções, a exemplo de *Aplicações da Física e Infográficos*.

Contextualizar

Para além do domínio da linguagem científica, da compreensão e da investigação, a construção do conhecimento científico pelo aluno envolve a contextualização da Ciência, de seus problemas, de seus desdobramentos tecnológicos e sociais e de sua construção histórica.

Não faz sentido, hoje, ensinar/aprender Física sem que se lide com situações reais. Estamos imersos em um mundo de equipamentos e aparatos tecnológicos, desde os mais simples aos mais sofisticados, cujo uso prático, criativo ou crítico requer um mínimo de compreensão de seu funcionamento, de suas funções e de seus impactos.

Também vivemos problemas de ordem social e ambiental e, para que possamos compreendê-los e nos posicionar diante dos debates que os cercam, precisamos fazer uso do conhecimento físico.

Os exemplos são muitos e vão desde situações do dia a dia, ligadas aos transportes, à localização de endereços e regiões de uma cidade, a medidas associadas a condições meteorológicas, a instalações elétricas residenciais e ao uso de dispositivos em diagnósticos e tratamentos de saúde, ou ainda a problemas de maior alcance, como a geração de energia elétrica em uma região ou país, os benefícios, riscos e impactos envolvidos no uso de fontes de energia, ou questões de natu-

reza cosmológica, como evolução e vida no Universo e, finalmente, temas com impactos científicos e tecnológicos, como, por exemplo, o funcionamento de aceleradores de partículas.

Ao lado disso, a ciência como atividade humana e influenciada por interesses sociais e econômicos, cuja construção tem uma história que é parte da história do ser humano, é essencial para desmistificar a ideia de uma ciência neutra ou de um cientista que vive às margens da sociedade.

Nesse campo de competências, são habilidades propostas nos PCN+:

- compreender o conhecimento científico e o tecnológico como resultados de uma construção humana, inseridos em um processo histórico e social;
- entender a ciência e a tecnologia como partes integrantes da cultura humana contemporânea;
- reconhecer e avaliar o desenvolvimento tecnológico contemporâneo, suas relações com as ciências, seu papel na vida humana, sua presença no mundo cotidiano e seus impactos na vida social;
- reconhecer e avaliar o caráter ético do conhecimento científico e do conhecimento tecnológico e utilizar esses conhecimentos no exercício da cidadania.

Nesta obra demos especial atenção à contextualização da Física em situações ou fenômenos cotidianos e a aplicações sociais e tecnológicas nas seções *Aplicação da Física* e *Física no contexto*. Assim, procuramos dar um caráter ao conhecimento físico não justificado por si só, mas vinculado a temáticas e problemas sociais e tecnológicos. Ao apresentar tópicos de Física e tecnologias da atualidade, como nanociência e cosmologia, diagnósticos por imagem e impactos de usinas geradoras de eletricidade, a Coleção visa contribuir para a formação mais ampla do aluno, de modo que ele possa se posicionar com mais responsabilidade em relação às pesquisas científicas modernas e seus desdobramentos sociais e econômicos.

Também apresentamos elementos de caráter histórico relativos a diferentes campos da Física e à construção dessa ciência, com destaque para questões polêmicas e controversas ou mudanças de paradigmas, como ocorreu com as ideias sobre gravitação e cosmologia, com o conceito de calor, com o desenvolvimento do Eletromagnetismo, assim como com os estudos que levaram aos modelos atuais da Física moderna e contemporânea.

Interdisciplinaridade

A necessidade de articular conhecimentos disciplinares surge do fato de que os processos naturais extrapolam os saberes de uma única disciplina escolar. Além disso, algumas situações profissionais do mundo do trabalho exigem do especialista competências e conhecimentos próprios de mais de uma disciplina. Um ensino atualizado, portanto, deve ser aquele que propicia conexões entre as diferentes áreas do saber durante a busca por explicações sobre o mundo, destacando e significando conceitos e problemas comuns a todas elas.

A interdisciplinaridade nos PCN+:

> *A despeito de todas estas convergências, para se compor um programa de trabalho articulado em uma área, há difíceis obstáculos que precisam ser transpostos. Primeiro, é preciso encontrar os pontos de contato reais entre as disciplinas da área, a exemplo dos acima enumerados. Em seguida, a partir desses pontos, é preciso estabelecer as pontes e o trânsito entre as disciplinas, que nem sempre interligarão todas elas da mesma forma. Finalmente, é preciso identificar, analisar e desfazer falsas semelhanças, traduzir linguagens diferentes usadas para o mesmo objeto ou distinguir linguagens iguais usadas para identificar conceitos diferentes. Em suma, há que se compreender e trabalhar convergências e divergências, reais ou aparentes, determinar e desenvolver temáticas e métodos comuns e, com esse conhecimento, preparar o trabalho de cada disciplina e de seu conjunto.*

Nesta obra, o modo como a Coleção apresenta o conteúdo da disciplina — contextualizado, relacionado ao cotidiano, voltado à formação do cidadão, com contribuições da História e da Filosofia da Ciência — torna a relação da Física com as outras áreas do conhecimento algo natural e desejável. A proposta geral da Coleção se torna mais completa quando desenvolvida no diálogo com outras disciplinas, reforçando a sintonia com a concepção geral de ensino indicada pelos documentos oficiais.

Além da articulação com outras disciplinas da área de Ciências Naturais, Matemática e suas Tecnologias, o uso intenso da linguagem escrita nos textos e nas atividades propostas permite uma forte relação com a área de Linguagem, Códigos e suas Tecnologias.

Ao longo do desenvolvimento dos tópicos, tomamos o cuidado de apresentar aos alunos o processo humano e histórico do desenvolvimento da Física como ciência, o que permite uma interação com as Ciências Humanas e suas Tecnologias. Além da articulação implícita com outras disciplinas, a seção *Integrando...* evidencia, por meio da relação entre leis e conceitos, a conexão existente entre campos diferentes do conhecimento. Os textos dessa seção, ao mostrar pontos comuns entre as disciplinas e ao utilizar conceitos e métodos de uma delas para explicar fenômenos de outra, serve de ponto de partida para que o aluno desenvolva uma visão abrangente da natureza.

4. O papel da experimentação

As atividades experimentais, quando usadas para o ensino de Física, podem apresentar funções essenciais na construção do conhecimento, não apenas como meio de promover a compreensão de fenômenos ou "demonstrar" teorias, mas também para desenvolver competências e habilidades de investigação. Observar, elaborar hipóteses, estimar, medir, avaliar, comparar e interpretar dados e resultados são ações fundamentais para a apropriação de conhecimentos e procedimentos científicos. Essa necessidade também está claramente expressa nos PCN+:

> *É indispensável que a experimentação esteja sempre presente ao longo de todo o processo de desenvolvimento das competências em Física, privilegiando-se o fazer, manusear, operar, agir, em diferentes formas e níveis. É dessa forma que se pode garantir a construção do conhecimento pelo próprio aluno, desenvolvendo sua curiosidade e o hábito de sempre indagar, evitando a aquisição do conhecimento científico como uma verdade estabelecida e inquestionável.*
>
> PCN+ — Ensino Médio.

Sabemos da dificuldade que muitas escolas têm para realizar experimentos em sala de aula e, sobretudo, em laboratório. Grande parte de nossa rede escolar não dispõe de materiais e espaços físicos adequados. Mesmo as escolas que possuem laboratórios e equipamentos muitas vezes não os utilizam por razões diversas, tais como a falta de tempo do professor para o planejamento e a execução das atividades, a ausência de manutenção do espaço e dos equipamentos e a falta de recursos para manter e repor materiais. Entendemos, porém, que uma das maiores dificuldades esteja no preparo pedagógico do professor para que essas práticas sejam realizadas. A falta de preparo acaba por desmotivar o uso de um recurso que entendemos como fundamental para que o ensino de Física seja de qualidade. Assim, este manual, tanto na primeira quanto na segunda parte, poderá suprir um pouco dessa necessidade de formação, trazendo algumas orientações gerais e específicas sobre o uso de atividades experimentais.

É bastante comum que a "experimentação" nos processos de ensino e aprendizagem das Ciências seja entendida e praticada apenas como execução de manuais e receitas visando à "comprovação" de leis e teorias. Ou, ainda, como forma de ilustrar o chamado "método científico". No entanto, entendemos que o papel da experimentação é *mais* e *menos* do que isso. *Mais* porque essa prática didática não se limita à reprodução de experimentos com a finalidade única de comprovação de leis. *Menos* porque nem sempre essas atividades requerem espaço físico e equipamentos sofisticados.

Os meios e os tipos de experimentação podem ser diversos, desde a mera observação de fenômenos em situações do cotidiano até experimentos mais requintados. Além disso, as atividades experimentais para o ensino passam por muitas modalidades, a exemplo de experimentos com materiais de baixo custo, demonstrações, execução de medidas simples, leitura e compreensão de experimentos científicos históricos, interpretação de dados, entre outras possibilidades.

As atividades experimentais podem ser realizadas em sala de aula ou fora dela, em casa, no trajeto de casa para a escola, em um espaço ao redor da escola, em suas quadras, pátios e outros espaços. O mundo em que vivemos é, em si, um grande laboratório, pleno de possibilidades e desafios. Obviamente esse potencial todo deve ser explicado e planejado com o aluno para que seja explorado de forma que atenda às expectativas de aprendizagem, sempre com o monitoramento do docente alertando para os perigos de algum experimento.

Finalmente, outra característica importante da experimentação em ensino é sua abertura natural para o trabalho em equipe, com divisão de tarefas e troca de ideias e discussões, o que possibilita uma oportunidade de maior engajamento e protagonismo dos alunos no processo de ensino e aprendizagem.

Acreditamos e temos vivências positivas de que, mesmo diante de dificuldades relacionadas a tempo, infraestrutura e outras condições materiais e/ou humanas, é possível, em dados momentos do curso, "experimentar" experimentações. Se bem planejadas, é provável que o professor perceba a parceria dos alunos, que costumam encarar essas atividades como algo que entretém e intriga. Convidamos vocês a experimentar! Na segunda parte deste manual, apresentamos propostas nesse sentido.

Nesta obra há diferentes momentos e tópicos em que atividades investigativas podem ser praticadas. Além da própria seção *Pratique a Física*, em que sugerimos diferentes tipos de prática experimental — algumas demonstrativas, outras de verificação de conceitos, outras ainda em que habilidades de observação, medidas, organização de dados e interpretação de resultados são o foco —, há outras seções em que as atividades experimentais podem ser exploradas. Esse é o caso dos textos encontrados nas seções *Aplicações da Física*, *Integrando...*, *Infográficos*, além de alguns problemas e questões em *Verifique o que aprendeu*. Em algumas dessas passagens, há questões e sugestões de observação e de pesquisa para as quais os alunos necessitam desenvolver habilidades investigativas diversas, complementando as atividades do tipo experimental apresentadas em *Pratique a Física*.

5. O ensino com OED

O uso do computador na educação é defendido por muitos pesquisadores em todo o mundo desde a década de 1950. Pesquisadores brasileiros e documentos oficiais do MEC corroboram essa opinião enfatizando que essa prática pode contribuir positivamente com o processo de ensino e aprendizagem e que ela deve estar atrelada a uma ação conjunta entre a escola e o professor.

O uso do computador na educação está, geralmente, relacionado a situações complementares às atividades tradicionais de ensino e aprendizagem.

Um dos termos mais abrangentes para se referir ao uso de computadores e suas tecnologias na educação escolar é *Tecnologia Educativa*. Esse termo não se limita aos recursos técnicos usados no ensino; antes, considera todos os processos de concepção, desenvolvimento e avaliação da aprendizagem. Também admite o uso de computadores conectados à internet, mais particularmente à World Wide Web, sua mais forte expressão.

A aplicação da Tecnologia Educativa por meio de conteúdos digitais pode ampliar a visão do aluno para diferentes campos do saber, facilitando a execução de atividades experimentais antes consideradas de risco ou de custo elevado, mas que agora podem ser realizadas com o auxílio de aplicativos que fornecem som, imagens e interatividade com o usuário, o que torna a aula mais prazerosa e dinâmica.

As Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) constituem hoje uma área de pesquisa na educação. Esse campo de estudos ocupa grande parte dos trabalhos de pesquisa, das publicações, das comunicações em eventos e dos cursos de formação de professores e de pós-graduação em ensino de Ciências e Física. As TIC envolvem o uso da internet e de *softwares* educacionais de vários tipos, com numerosas aplicações, para diferentes segmentos do ensino, e vêm sendo usadas em nosso sistema educacional há anos, cada vez em maior escala, com múltiplas aplicações e concepções.

Entre as motivações e justificativas para o uso das TIC destacam-se sua contribuição para a modernização do ensino e o auxílio no desenvolvimento de habilidades essenciais para a formação do cidadão.

Entre os recursos das TIC utilizados para o ensino, os Objetos Educacionais Digitais (OEDs) vêm ganhando reconhecimento por sua simplicidade e sua adaptabilidade a diferentes meios e processos de ensino. Em termos gerais, o OED é um recurso digital a ser utilizado como auxiliar nos processos de ensino e aprendizagem, complementando atividades didático-pedagógicas.

Os OEDs podem ser apresentados e veiculados em diferentes formatos (simulações, animações, audiovisuais, áudios, hipertextos, hipermídia, infográficos, textos e jogos digitais) e aplicados em diferentes níveis e segmentos do ensino. Os OEDs podem ser inseridos e realocados em momentos distintos de um curso, são facilmente atualizados e podem ser usados em diferentes plataformas.

Além disso, trata-se de um recurso aplicável tanto na modalidade de ensino a distância como na presencial. Seu uso didático é justificado por requisitar do aluno a utilização de linguagens e formas distintas de representação, tais como textos discursivos, tabelas, gráficos e ilustrações.

Um dos tipos de OED em particular, a simulação, desempenha um papel que vem sendo reconhecido como de alto valor didático para o caso do ensino de Física, pois possibilita a visualização e a interação com determinados fenômenos e modelos abstratos a que, geralmente, o aluno tem acesso apenas pela representação estática dos livros impressos.

Além disso, diferentemente de vídeos e animações, as simulações permitem que o aluno, ao mudar parâmetros e variáveis pelo teclado, verifique as respectivas alterações ocorridas no fenômeno visualizado, o que auxilia na compreensão do significado das grandezas que descrevem tal fenômeno.

Por fim, a aprendizagem por meio de recursos digitais ainda traz uma vantagem pedagógica importante: a consulta a diversas fontes de leitura sobre um mesmo tema. Quando o estudante utiliza o OED de forma *on-line*, ele tem a sua disposição toda a informação que a internet pode oferecer. Obviamente, a orientação do professor nesse ponto é de fundamental importância para que o aluno não navegue por *sites* de pouca credibilidade autoral. No entanto, se bem orientado, o aluno pode acessar inúmeras fontes de pesquisa que tratam dos conceitos relacionados ao assunto do OED que ele está utilizando. Ele tem a possibilidade de parar para procurar outros exemplos daquilo que está estudando, ou ainda descobrir outras formas de explicar aquele mesmo conceito ou fenômeno abordado no OED, o que poderá contribuir sobremaneira para um aprendizado mais abrangente e aprofundado do conteúdo.

Em nossas sugestões de aprofundamento no final desta primeira parte do manual, o professor encontrará alguns *sites* que disponibilizam, gratuitamente, simulações e outros OEDs destinados ao ensino de Física.

6. Como a obra está organizada

Aspectos gerais da obra

Linguagem

No desenvolvimento de toda a nossa obra tivemos especial cuidado com a linguagem utilizada, procurando desenvolver os textos com correção gramatical, sintática e linguística, atentando também para um aspecto que julgamos imprescindível em livros didáticos: uma redação prática para professores e também que seja uma linguagem adequada aos alunos desta faixa etária.

Ainda quanto à leitura e compreensão dos textos, sugerimos ao professor que:

- peça aos alunos que façam leituras sistemáticas dos textos do livro em casa ou na sala de aula, principalmente das seções em que a habilidade de leitura é relevante, como é o caso de *Aplicações da Física*, *Física no contexto*, *Integrando...* e *Infográficos*;
- peça aos alunos que anotem termos que desconheçam ou sobre os quais tenham dúvidas quanto ao significado, sejam elas de natureza científico-conceitual ou não, para serem discutidos na sala de aula;
- ao iniciar um assunto ou um tópico de Física, faça levantamentos em sala de aula a respeito do que os alunos sabem e compreendem sobre o tema ou o conceito introduzido. Muitos termos usados nas Ciências e na Física têm outros usos na linguagem coloquial, e é importante estabelecer relações entre os diversos significados, aproximando o conhecimento científico daquele do senso comum ou do sentido que certas palavras têm em outros contextos. O levantamento pode ser feito também com o auxílio das três questões que abrem cada capítulo, na seção *Para iniciar a conversa*. Feitos esses levantamentos, procure debater os diferentes entendimentos e concepções dos alunos;
- peça aos alunos que respondam às questões propostas no livro e elaborem as próprias questões para posterior debate em sala de aula.

Desenvolvimento conceitual

De maneira geral, procuramos salientar a natureza física dos princípios e dos fenômenos em estudo, enfatizando a origem e a evolução dos conceitos, dos modelos e das teorias, ressaltando, em particular, seus aspectos históricos. Seguindo essa linha, temos observado que não só tornamos a compreensão da Física menos árida, levando os alunos a se entusiasmar pelos estudos dela, como a aprendizagem torna-se mais eficaz e significativa. Os alunos, muitas vezes, ao tomarem contato com concepções históricas de conceitos ou modelos físicos, os identificam com as próprias concepções, o que pode auxiliar na compreensão dos modelos atuais. Além disso, esse processo de identificação com a forma de pensamento de outras épocas contribui para que o aluno desenvolva uma visão dinâmica e social da construção da ciência, superando a concepção comum de uma ciência neutra e desvinculada de interesses sociais e econômicos.

Recomendamos ao professor fugir de abordagens com excesso de formalismo. Por esse motivo, sugerimos que ele evite enunciar os princípios como se fossem "postulados", enunciar suas consequências como "teoremas" e restringir suas explicações à solução de problemas numéricos.

Também evitamos a apresentação extremamente sucinta dos conhecimentos, pois isso impede que os estudantes alcancem uma compreensão satisfatória deles, confundindo a aprendizagem com a simples memorização. Nesse sentido, cabe a cada professor avaliar a extensão e a profundidade com que pode trabalhar o livro, fazendo escolhas adequadas ao tempo de que dispõe, aos conhecimentos prévios dos estudantes e aos objetivos a serem alcançados.

Estrutura

Como discutimos no início dessas orientações, tanto o Ensino Fundamental como o Ensino Médio em nosso país têm passado por várias mudanças nos últimos anos. E, como não poderia deixar de ser, o ensino da Física é parte dessas mudanças. Por meio de contato direto com um grande número de professores e escolas e de um grande número de pesquisas na área, detectamos alguns aspectos dessas mudanças que dificultam a tarefa dos professores e o aprendizado dos estudantes e procuramos atenuá-los. A diversidade de carga horária destinada ao ensino de Física em cada escola leva os professores a enfrentar conteúdos programáticos muito distintos. Nessas circunstâncias, a escolha de um livro-texto que se adapte a essa diversidade torna-se necessária.

Os volumes desta Coleção foram desenvolvidos com o propósito de levar os conceitos fundamentais dessa ciência a todos os estudantes — nosso sonho de uma "Física para todos". Estamos convencidos de que mesmo aqueles que não necessitam diretamente de conhecimentos físicos em suas profissões ou em outras atividades devem ter acesso a eles e deles se apropriar. Em razão desse encaminhamento, os textos foram elaborados seguindo alguns critérios:

- no início de todos os capítulos, apresentamos o boxe *Para iniciar a conversa* com o objetivo de problematizar o assunto a ser tratado no capítulo e promover uma aproximação desse assunto com os conhecimentos prévios dos alunos. Recomendamos ao professor que trabalhe as ideias apresentadas nessa seção e acrescente exemplos e questões que considerar relevantes;

- em cada seção, procuramos ressaltar a Física presente no cotidiano dos estudantes, focalizando fenômenos e processos interessantes e úteis. Essa preocupação tem especial destaque nas seções *Física no contexto*, *Aplicações da Física*, *Integrando* e *Infográficos*. Em todas elas são apresentados aspectos diversos de aplicações ou contextualizações dos conhecimentos trabalhados no capítulo, com questões ou sugestões de pesquisas a serem desenvolvidas tanto em casa como em sala de aula. É importante destacar que tais seções são muito importantes na condução do aprendizado, não devendo, portanto, ser entendidas como suplementos extras ou dispensáveis;
- preocupamo-nos em dar ênfase às leis gerais, reduzindo substancialmente as informações de caráter específico, evitando ao máximo a pura memorização dessas leis e ressaltando seu poder explicativo dos fenômenos em estudo. Para isso, recorremos ao uso de linguagem usual e redação concisa, de maneira a torná-la acessível e a não enfadar os estudantes;
- todos os conceitos, resultados ou conclusões considerados relevantes estão apresentados em destaque para que os estudantes possam perceber os aspectos fundamentais de cada assunto tratado. Muitas vezes, constituem uma síntese da seção, auxiliando em sua compreensão. Memorizar o que está sendo estudado, em algumas situações, pode ser importante, desde que não seja a única habilidade desenvolvida na aprendizagem;
- praticamente em todas as seções estão incluídos exemplos, com questões ou problemas resolvidos detalhadamente. O objetivo aqui é consolidar o entendimento das ideias apresentadas e o processo sequencial que foi seguido;
- as atividades de avaliação (exercícios, testes, questões e problemas) estão presentes em diversos níveis e em duas seções: *Verifique o que aprendeu* e *Problemas e testes*. Essa variedade de atividades dá condições ao professor de planejar a análise e a discussão dos exercícios de acordo com a realidade da escola e dos alunos. Além disso, os diferentes níveis de dificuldade lhe permitem trabalhar com a diversidade de cognição dos estudantes, fato comum em classes com elevado número de alunos.

A seguir apresentamos comentários específicos de algumas seções da obra.

Verifique o que aprendeu

Esta série de exercícios está presente no final de cada seção e é indispensável para a aprendizagem do conteúdo estudado. Nesta seção, os alunos poderão dominar as ideias apresentadas antes de serem introduzidos a novos conceitos ou informações.

Os exercícios desta seção contribuem significativamente para desmistificar a dificuldade que alguns estudantes costumam associar ao estudo da Física.

Além disso, esses exercícios criam uma passagem para a resolução de problemas mais elaborados, propostos posteriormente, estabelecendo transições suaves entre os níveis de dificuldade. É recomendável resolver os exercícios relativos a uma dada seção antes de iniciar o estudo da seção seguinte.

Problemas e testes

Os problemas e testes propostos estão apresentados em número suficiente para que o professor possa selecionar aqueles que julgar mais significativos para o curso e mais adequados ao desenvolvimento da classe.

Em todas as atividades avaliativas, mas principalmente na resolução de problemas, é importante incentivar os alunos a ler cuidadosamente o enunciado para identificar as informações e os dados relevantes da situação proposta (o problema propriamente dito), para que estabeleçam estratégias de solução. Também é essencial que, ao chegarem a um resultado, os alunos avaliem sua pertinência, comparem seu resultado com os resultados de colegas e discutam as suas respostas. Nem sempre essa prática é frequente nas aulas de Física, e muitas vezes os alunos chegam a resultados descabidos (como valores e dimensões fora da realidade) e não se preocupam em rever suas soluções.

Pratique Física

Como já destacamos, um dos pontos de preocupação dos educadores que se dedicam ao ensino de Ciências é a ausência quase total de atividades experimentais oferecidas ao longo dos cursos. Também já observamos que em muitas de nossas escolas a falta de laboratórios, materiais, tempo e estímulo aos professores para o preparo das aulas práticas é um fato.

Considerando esse quadro, na seção *Pratique Física* propomos algumas experiências simples que possibilitam aos professores dar caráter experimental ao curso sem necessidade de salas especiais. Reforçamos que as atividades experimentais são indispensáveis a qualquer curso de Física, mesmo que a escola não disponha de laboratórios apropriados. Muitos dos experimentos propostos na obra requerem material simples e podem, eventualmente, ser propostos como tarefas a serem feitas em casa.

Relembramos que o trabalho experimental pode ser usado sempre como um recurso poderoso para auxiliar na compreensão e na aprendizagem significativa dos assuntos em estudo, lembrando-se sempre dos cuidados a serem tomados e também de que esses experimentos devem ser realizados sob a orientação do professor. Por isso, as experiências devem ser consideradas atividades obrigatórias, devidamente valorizadas e incluídas nas avaliações.

Em situações em que os alunos possam fazer as atividades em casa, sempre sob a orientação do responsável, sugerimos que o professor peça a eles que elaborem breves relatórios da prática realizada e troquem seus resultados ou dúvidas. No entanto, sempre que possível, recomendamos que os experimentos sejam desenvolvidos na sala de aula, em equipe, ou, quando for mais adequado, sob a forma de demonstrações pelo professor.

Nessas atividades é desejável incentivar os alunos a elaborar hipóteses e previsões acerca do fenômeno ou da situação proposta, a estimar ordens de grandeza e dimensões, a escolher instrumentos de medida apropriados, a usar escalas e unidades de medidas adequadas para apresentar dados e a construir tabelas, gráficos ou outras formas de organização de dados e resultados. Conforme a natureza da atividade, desde as mais simples até as mais complexas, uma ou mais dessas habilidades são essenciais para que a prática não seja apenas uma tarefa "burocrática", mas sim que desperte a vontade de aprender e de investigar e faça sentido no contexto do conhecimento que está sendo tratado.

As demonstrações geralmente são recebidas com entusiasmo pelos estudantes e podem ser realizadas utilizando-se diversos tipos de material encontrado na própria escola ou em casa, em lojas de brinquedos, em armarinhos, em oficinas e outros estabelecimentos. Também nesse caso sugerimos que sejam propostas questões e desafios para os alunos, incentivando-os a fazer previsões e apresentar suas próprias explicações sobre o que observaram.

Ainda como parte do "praticar", as visitas a museus e centros de ciências ou outros espaços similares são importantes e motivam os jovens a conhecer e aprender. Sempre que possível, esse tipo de atividade é recomendável. Se na cidade onde a escola se localiza não houver espaços como esses, outras visitas que complementam e enriquecem o aprendizado, ampliando o sentido do ensino, podem ser feitas. É o caso, por exemplo, de uma usina geradora de eletricidade (hidrelétrica, termelétrica ou outra), de uma oficina mecânica, de uma assistência técnica de eletrodomésticos, de indústrias diversas, de uma estação de tratamento de água, etc. Na bibliografia recomendada aos alunos e nas referências apresentadas neste manual são citados livros com sugestões referentes a atividades experimentais, assim como sugestões de *sites* na internet, de museus e centros de ciências, parques e visitas diversas.

Como a carga horária dos cursos de Física varia muito de uma escola para outra, sugerimos ao professor que selecione e planeje previamente todas as atividades propostas na seção *Pratique Física*, para que possa avaliar se são compatíveis com a duração e o perfil de seu curso.

Aplicações da Física

A seção *Aplicações da Física* apresenta textos que permitem ao aluno relacionar o que está estudando com o que vê em casa, na rua, no céu, na TV, ou seja, em sua vida. Podem tratar de aspectos práticos, como situações de risco e de controle de velocidade, do funcionamento de aparatos tecnológicos, como uma câmera fotográfica, um medidor de energia elétrica residencial, a formação da imagem em um aparelho de TV ou o funcionamento de um GPS, da radiação *laser* ou de um coletor solar ou, ainda, de aspectos socioambientais, como o destino do lixo nuclear no Brasil.

Tão importantes quanto a leitura são as discussões das questões propostas, que problematizam os temas em questão. Sugerimos que sejam feitas de preferência na sala de aula, individualmente ou em grupos. No caso de não dispor de tempo para isso, sugerimos ao professor que, em seu planejamento, escolha pelo menos alguns dos textos que considera interessantes para serem trabalhados em sala de aula no semestre ou no ano letivo, indicando a leitura de outros como atividade para casa, se for o caso.

Física no contexto

Esta seção apresenta textos complementares aos assuntos tratados no capítulo que contextualizam o assunto em estudo, desenvolvem aspectos históricos ou apresentam exemplos do cotidiano, tecnologias atuais ou curiosidades da Física.

Sugerimos que a leitura desta seção seja feita em conjunto, na sala de aula. Os assuntos abordados nela devem ser considerados como parte integrante do capítulo, e acreditamos que sua omissão reduz consideravelmente o conhecimento de que o aluno pode se apropriar. Assim, recomendamos que esta seção seja valorizada pelo professor, trabalhada pelos alunos e incluída nas avaliações.

Integrando

Esta seção tem como objetivo fornecer subsídios para que o aluno perceba a relação entre os assuntos estudados nas diferentes disciplinas escolares e, a partir da integração desses assuntos, desenvolva uma visão abrangente e unificada da natureza e de seus fenômenos. Para tanto, ela traz textos que evidenciam as conexões entre conceitos e temas de diferentes áreas do conhecimento, chamando atenção para convergências e divergências entre eles. Os textos são sempre acompanhados de sugestões de pesquisas e orientações gerais relacionadas ao assunto.

A despeito de todo problema que a fragmentação da ciência em disciplinas escolares possa acarretar, sua unificação não é de forma alguma uma tarefa simples. Assim, tendo em vista um uso mais proveitoso da seção, recomendamos a participação conjunta de professores das diferentes disciplinas em foco no texto. Caso essa articulação não seja possível, ainda assim acreditamos que os textos, quando lidos e debatidos em sala de aula sob a orientação do professor de Física, constituem um recurso favorável à ampliação do entendimento de conceitos e fenômenos.

Infográficos

Esta seção, apresentada no final de cada unidade, em páginas duplas, promove o exercício da leitura e interpretação de diferentes formas de linguagem. Utiliza a contextualização e a aplicação do conhecimento físico em sistemas, processos e aparatos tecnológicos atuais, tais como plantas de geração de energia, funcionamento de um submarino nuclear e do metrô, etc.

7. Painel da Coleção

No quadro a seguir apresentamos a sequência dos tópicos abordados em cada volume, bem como as respectivas seções de leitura de cada capítulo.

Volume	Unidade	Capítulos
1	**1 — A abrangência da Física**	**1.** MEDIDAS *Aplicações da Física*: A nanorrevolução. *Integrando*: Ciências Naturais. *Infográfico*: Ultraman Triatlo.
	2 — Cinemática	**2.** MOVIMENTO RETILÍNEO *Física no contexto*: Galileu Galilei. *Aplicações da Física*: Medindo a velocidade no trânsito. *Integrando*: Ciências Naturais. **3.** VETORES — MOVIMENTO CURVILÍNEO *Aplicações da Física*: Mapas de ruas e a tecnologia GPS. *Infográfico*: Como funciona a energia eólica?
	3 — Leis de Newton	**4.** PRIMEIRA E TERCEIRA LEIS DE NEWTON *Física no contexto*: Isaac Newton. *Aplicações da Física*: O atrito pode ser útil. **5.** SEGUNDA LEI DE NEWTON *Física no contexto*: Queda dos objetos com resistência do ar. *Integrando*: Força e contração muscular. **6.** GRAVITAÇÃO UNIVERSAL *Aplicações da Física*: A atração da Terra está dirigida para seu centro. *Infográfico*: Como funciona o metrô?
	4 — Leis da Conservação	**7.** CONSERVAÇÃO DE ENERGIA *Física no contexto*: Economizando energia elétrica; A casa sustentável: o futuro que já chegou. *Aplicações da Física*: Ao dirigir, mantenha distância, pois E_c é proporcional a V^2. *Integrando*: Força muscular e energia. **8.** CONSERVAÇÃO DE QUANTIDADE DE MOVIMENTO *Física no contexto*: Estabelecimento do conceito de quantidade de movimento. *Aplicações da Física*: O impulso e a quantidade de movimento no nosso dia a dia. **9.** HIDROSTÁTICA E HIDRODINÂMICA *Física no contexto*: O problema de Arquimedes; A sustentação das aeronaves; O gol olímpico. *Aplicações da Física*: Dispositivos para observar o fundo dos oceanos; Densímetros. *Infográfico*: Submarino nuclear.

Volume	Unidade	Capítulos
2	**1 — Temperatura — Dilatação**	**1.** TEMPERATURA E DILATAÇÃO *Física no contexto*: Fenômeno de dilatação; Congelamento da água. *Aplicações da Física*: A lâmina bimetálica; Avanços na tecnologia da medida e do controle da temperatura. **2.** COMPORTAMENTO DOS GASES *Física no contexto*: Por que o balão sobe na atmosfera? *Aplicações da Física*: O planeta como uma grande estufa. *Integrando:* Conceitos para entender o congelamento da água. *Infográfico*: Como funciona um dirigível?
	2 — Calor	**3.** TERMODINÂMICA *Física no contexto:* Condução de calor; Correntes de convecção; Absorção e reflexão da radiação térmica; Calor específico e temperatura ambiente; Entropia – Indisponibilidade da energia. *Aplicações da Física*: Câmaras termográficas. *Integrando:* Termodinâmica e o corpo humano. **4.** MUDANÇAS DE FASE *Física no contexto*: Materiais de estrutura pouco comum. *Aplicações da Física*: Aquecimento global do planeta. *Infográfico*: Como funciona uma refinaria de petróleo?
	3 — Óptica e ondas	**5.** REFLEXÃO DA LUZ *Física no contexto*: Eclipse do Sol e da luz; Câmara escura de orifício; O forno solar; O espelho de Arquimedes. *Aplicações da Física*: Reflexão em câmeras fotográficas. **6.** REFRAÇÃO DA LUZ *Física no contexto*: Aplicações da refração; O arco-íris. *Aplicações da Física*: Microscopia moderna. *Integrando:* Imagem e o sentido da visão. **7.** MOVIMENTO ONDULATÓRIO *Física no contexto*: O pêndulo de Foucault; As ondas do mar ao longo da costa; Polarização da luz; A fala humana; A expansão do Universo; Medidas de velocidade por efeito Doppler. *Infográfico*: Como é feita a gravação de uma música?

Volume	Unidade	Capítulos
3	**1 — Campo e potencial elétrico**	**1.** CARGA ELÉTRICA *Física no contexto*: As experiências de Coulomb com a balança de torção. *Aplicações da Física*: Pintura eletrostática a pó. *Integrando:* A força elétrica e a matéria. **2.** CAMPO ELÉTRICO *Aplicações da Física*: Como funcionam os para-raios. **3.** POTENCIAL ELÉTRICO *Física no contexto*: Napoleão Bonaparte e o conde Alessandro Volta; Por que os pássaros não tomam choque ao pousar nos fios? *Aplicações da Física*: Diferença de potencial na Medicina. *Infográfico*: Como funciona o carro elétrico?
	2 — Circuitos elétricos de corrente contínua	**4.** CORRENTE ELÉTRICA *Física no contexto*: Efeitos da corrente elétrica; O efeito joule no cotidiano do ser humano; Analogia mecânica para a primeira lei de Ohm; Curto-circuito; Riscos e cuidados nas instalações elétricas; Supercondutividade a altas temperaturas. *Aplicações da Física*: Medida da energia elétrica usada em uma residência. **5.** FORÇA ELETROMOTRIZ — EQUAÇÃO DO CIRCUITO *Integrando:* A pilha de Daniell e o gerador. *Infográfico*: Como funciona o computador?
	3 — Eletromagnetismo	**6.** O CAMPO MAGNÉTICO *Física no contexto*: Recursos de inclusão social para deficientes auditivos; Os cíclotrons. *Aplicações da Física*: O motor de corrente contínua. **7.** ALTERAÇÕES DO CAMPO MAGNÉTICO *Física no contexto*: A magnetosfera. *Aplicações da Física*: Como se forma a imagem em um tubo de TV. *Integrando:* A Física e a forma como os seres vivos se orientam no espaço. **8.** INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA — ONDAS ELETROMAGNÉTICAS *Física no contexto*: Usinas geradoras de energia elétrica; As unificações das teorias físicas. *Aplicações da Física*: Densitometria óssea. *Infográfico*: Qual o impacto ambiental da instalação de uma hidrelétrica?
	4 — Física contemporânea	**9.** TEORIA DA RELATIVIDADE E FÍSICA QUÂNTICA *Física no contexto*: Matéria e antimatéria. *Aplicações da Física*: GPS — Sistema de Posicionamento Global; Amplificação da luz por emissão estimulada de radiação — *Laser.* *Integrando:* O fazer ciência ao mundo moderno. *Infográfico*: Destino do rejeito radioativo das usinas brasileiras.

8. Referências de apoio e aprofundamento

Documentos oficiais

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. *Parâmetros Curriculares Nacionais:* Ensino Médio. Área de Ciências Naturais, Matemática e suas Tecnologias. Brasília, 1999.

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. *PCN+ Ensino Médio:* Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília, 2002.

_____. Ministério da Educação. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais (Inep). *Exame Nacional do Ensino Médio (Enem):* documento básico, 2002. Brasília, 2001.

_____. Ministério da Educação. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais (Inep). *Exame Nacional para Certificação de Competências de Jovens e Adultos (Encceja)*. Brasília, 2002.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Estado da Educação. *Caderno do professor, Física, Ensino Médio*. São Paulo, 2008.

Educação e currículo

AQUINO, Júlio Groppa (Org.). *Erro e fracasso na escola.* Alternativas teóricas e práticas. 2. ed. São Paulo: Summus, 1997.

BAGNO, Marcos. *A pesquisa na escola:* o que é e como se faz. 5. ed. São Paulo: Loyola, 2000.

BOGDAN, R.; BIKLEN, S. *Investigação qualitativa em Educação:* uma introdução à teoria e aos métodos. Porto: Porto Editora, 1994. (Colecção Ciências da Educação, v. 12).

BRANSFORD, J. D.; BROWN, A. L.; COCKING, R. R. *Como as pessoas aprendem:* cérebro, mente, experiência e escola. Tradução de Carlos David Szlac. São Paulo: Senac, 2007.

BUSQUETS, Maria Dolores et al. *Temas transversais em educação:* bases para uma formação integral. Tradução de Cláudia Schilling. 5. ed. São Paulo: Ática, 1999.

CONTENTE, M. *A leitura e a escrita:* estratégia de ensino para todas as disciplinas. Lisboa: Editorial Presença, 2000.

DEFFUNE, Deisi; DEPRESBITTERIS, Léa. *Competências, habilidades e currículos da educação profissinal:* crônicas e reflexões. São Paulo: Senac São Paulo, 2000.

DELORS, Jacques. *Educação:* um tesouro a descobrir. Brasília: Unesco; São Paulo: Cortez, 1998.

DEMO, Pedro. *A nova LDB:* ranços e avanços. 6. ed. Campinas: Papirus, 1997. (Coleção Magistério: formação e trabalho pedagógico).

FAZENDA, I. C. A. *Interdisciplinaridade:* história, teoria e pesquisa. 10. ed. Campinas: Papirus, 2002.

FORQUIN, J.-C. *Escola e cultura:* as bases epistemológicas do conhecimento escolar. Porto Alegre: Artes Médicas, 1993.

FREIRE, Paulo. *Educação como prática da liberdade*. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1971.

_____. *Pedagogia da autonomia*. São Paulo: Paz e Terra, 1996.

GADOTTI, Moacir. *Escola cidadã*. 4. ed. São Paulo: Cortez, 1997. (Questões da nossa época).

GOODSON, I. F. *As políticas de currículo e de escolarização*. Petrópolis: Vozes, 2008.

JAPIASSU, H. *Interdisciplinaridade e patologia do saber*. Rio de Janeiro: Imago, 1976. (Logoteca).

LEWIS, John L. *O ensino da Física escolar*. São Paulo: Martins Fontes, 1972. 3 v.

LOPES, A. C. *Políticas de integração curricular*. Rio de Janeiro: Editora da Uerj, 2008.

MACEDO, L. de. Situação-problema: forma e recurso de avaliação, desenvolvimento de competências e aprendizagem escolar. In: PERRENOUD, P. et al. *As competências para ensinar no século XXI*. Porto Alegre: Artmed, 2002.

MORIN, Edgar. *A religação dos saberes.* O desafio do século XXI. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002.

_____. *Os sete saberes necessários à educação do futuro*. São Paulo: Cortez, 2000.

NEVES, I. C. B. et al. *Ler e escrever:* compromisso de todas as áreas. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2001.

PERRENOUD, Philippe. *Construir as competências desde a escola*. Porto Alegre: Artmed, 1999.

_____. *Ensinar:* agir na urgência, decidir na incerteza. Porto Alegre: Artmed, 2001.

_____. et al. *As competências para ensinar no século XXI*. Porto Alegre: Artmed, 1999.

PINSKY, Jaime. *Cidadania e educação*. 4. ed. São Paulo: Contexto, 2000.

SAVIANI, Dermeval. *Educação:* do senso comum à consciência filosófica. São Paulo: Cortez, 1980.

VENTURA, Fernando H. Monserrat. *A organização do currículo por projetos de trabalho.* O conhecimento é um caleidoscópio. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 1998.

Formação de professores

ABIB, M. L. V. S. *Construção de conhecimentos sobre ensino na formação inicial do professor de Física*. Tese (Doutorado em Educação) — Faculdade de Educação da USP, São Paulo, 1997.

BARBE, J. et al. Didactic restrictions on the teacher's practice: the case of limits of functions in spanish high schools. *Educational Studies in Mathematics*, v. 59, n. 1-3, p. 235-268, 2005.

BROUSSEAU, G. Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. *Reserches en Didactique des mathématiques*, Grenoble, v. 7, n. 2, p. 33-115, 1986.

CARVALHO, Anna Maria P. de. Reformas nas licenciaturas: a necessidade de uma mudança de paradigma mais do que de mudança curricular. *Em Aberto*, Brasília, ano 12, n. 54, abr./jun. 1992.

_____; GIL-PEREZ, D. *Formação de professores de Ciências*. São Paulo: Cortez, 1995.

CHEVALLARD, Y. El análisis de las prácticas docentes en la teoría antropológica de lo didáctico. *Reserches en Didactique des mathématiques*, Grenoble, v. 19, n. 2, p. 221-266, 1999.

_____. *La Transposición Didáctica:* Del saber sabio al saber enseñado. Buenos Aires: Aique Grupo Editor, 1991.

_____. Readjusting Didactics to a Changing Epistemology. *European Educational Research Journal*. Marseilles, v. 6, n. 2, p. 131-134, 2007.

_____; BOSCH, M.; GASCON, J. *Estudar matemáticas:* o elo perdido entre o ensino e a aprendizagem. Tradução de Dayse Vaz de Moraes. Porto Alegre: Artmed Editora, 2001.

CONTRERAS, J. *Autonomia de professores*. São Paulo: Cortez, 2002.

DIOGO, R. C.; OSÓRIO, A. S.; SILVA, D. R. R. *A teoria antropológica do didático*: possibilidades de contribuição ao ensino de Física. In: VI ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 2007, Florianópolis — SC. Anais do VI Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências. Belo Horizonte: Abrapec, 2007.

LABURÚ, C. E.; ARRUDA, S. M.; NARDI, R. Pluralismo metodológico no ensino de ciências. *Ciência & Educação*. Bauru, v. 9, n. 2, p. 247-260, 2003.

MACHADO, S. D. A. Contrato didático. In: MACHADO, S. D. A. *Educação matemática:* uma introdução. São Paulo: Educ, 1999. p. 43-64.

MACHADO, V. M. *Prática de estudo de ciências:* formação inicial docente na unidade pedagógica sobre a digestão humana. 2011. 268 f. Tese (Programa de pós-graduação em educação) — Centro de Ciências Humanas e Sociais, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2011.

MENEZES, L. C. (Org.). *Formação continuada de professores de Ciências:* no âmbito ibero-americano. São Paulo: Autores Associados/Nupes, 1996. (Coleção Formação de professores).

MOREIRA, M. A. A teoria dos campos conceituais de Vergnaud, o ensino de Ciências e a pesquisa nesta área. *Investigações em ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 7-29, 2002.

RICARDO, E. C. *As Relações com os saberes nas situações didáticas e os obstáculos à aprendizagem*. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 15, 2003, Curitiba. Atas do XV SNEF, 2003, p. 586-592.

_____. *Competências, interdisciplinaridade e contextualização:* dos Parâmetros Curriculares Nacionais a uma compreensão para o ensino das ciências. 2005. 257 f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SAVIANI, D. Formação de professores: aspectos históricos e teóricos do problema no contexto brasileiro. *Revista Brasileira de Educação*, v. 14, n. 40, p. 143-155, jan./abr. 2009.

SCHIVANI, M.; PIETROCOLA, M. *Robótica educacional no ensino de Física*: estudo preliminar sob uma perspectiva praxeológica. In: XIV ENCONTRO DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA, 2012, Maresias, SP. Anais do XIV Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. Maresias, 2012.

TARDIF, M. *Saberes docentes e atuação profissional*. São Paulo: Vozes, 2010.

ZIMMERMANN, E.; BERTANI, J. A. Um novo olhar sobre os cursos de formação de professores. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 20, n. 1, p. 43-62, abr. 2003.

O livro didático

CRUZ, E.S. *A noção de variável em livros didáticos de ensino fundamental:* um estudo sob a ótica da organização praxeológica. 2005. 105 F. Dissertação (Mestrado em Educação Matemática) — Pontifícia Universidade Católica, São Paulo, 2005.

FREITAG, Bárbara et al. *O livro didático em questão*. São Paulo: Cortez, 1989.

KURNAZ, M. A.; ARSLAN, A. S. Praxeological Analysis of the Teaching Conditions of the Energy Concept. *Cypriot Journal of Education Sciences*, Kyrenia, v. 5, n. 4, p. 233-242, 2010.

OLGA, Molina. *Quem engana quem? Professor × livro didático*. Campinas: Papirus, 1987.

POISSON, C. *Mathematical and Didactic Organization of Calculus Textbooks:* an extended project in the department of mathematics and statistics. 2011. 83 f. Dissertação de Mestrado em ensino de matemática. Universidade de Concordia, Montreal, Canadá, 2011.

VALENZUELA, S. T. F. *O uso de dispositivos didáticos para o estudo de técnicas relativas a sistema de equações lineares no Ensino Fundamental*. 2007. 152 f. Dissertação (Programa de Pós-graduação — Mestrado em Educação) — Centro de Ciências Humanas e Sociais, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2007.

WUO, Wagner. *A Física e os livros:* uma análise do saber físico nos livros didáticos adotados para o Ensino Médio. São Paulo: Educ/Fapesp, 2000.

Informática de informação e comunicação no ensino e OED

ALMEIDA, Fernando José de. *Educação e informática:* os computadores na escola. São Paulo: Cortez/Autores Associados, 1998. (Coleção Polêmicas do nosso tempo).

BULEGON, Ana Marli. *Contribuições dos objetos de aprendizagem, no ensino de Física, como recursos didáticos para a construção e/ou desenvolvimento do pensamento crítico e da aprendizagem significativa*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

CARVALHO NETO, C. Z. *Educação digital*: paradigmas, tecnologias e complexmedia dedicada à gestão do conhecimento. Tese (Doutorado) — defendida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão do Conhecimento da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2011.

FERRÉS, Joan. *Vídeo e educação*. Tradução de Juan Acuña Liorens. Porto Alegre: Artes Médicas, 1996.

LOLLINI, Paolo. *Didática & computador:* quando e como a informática na escola. Tradução de Antonio Vietti e Marcos J. Marcionilo. São Paulo: Loyola, 1991.

PAPERT, Seymor. *A máquina das crianças:* repensando a escola na era da informática. Tradução de Sandra Costa. Porto Alegre: Artes Médicas, 1994.

Ensino e aprendizagem de Ciências/Física

ASTOLFI, P.; DEVELAY, M. *A didática das ciências*. São Paulo: Papirus, 1995.

CARVALHO JÚNIOR, G. D. *Aula de Física:* do planejamento à avaliação. São Paulo: Livraria da Física, 2011.

CASTRO, Amélia Domingues de; CARVALHO, Anna Maria Pessoa de (Org.). *Ensinar a ensinar:* didática para a escola fundamental e média. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2001.

DELIZOICOV, Demétrio; ANGOTTI, J. A.; PERNANBUCO, M. M. *Ensino de Ciências:* fundamentos e métodos. São Paulo: Cortez, 2002.

_____; ANGOTTI, José André. *Física*. São Paulo: Cortez, 1991. (Coleção Magistério 2º grau. Série Formação Geral).

_____. et al. *Pesquisa em ensino de Ciências:* abordagem social. São Paulo: Cortez, 2002.

GARCIA, Nilson Marcos Dias et al. (Org.). *A pesquisa em ensino de Física e a sala de aula:* articulações necessárias. São Paulo: Livraria da Física, 2012.

HAMBURGER, Ernst W.; MATOS, Cauê (Org.). *O desafio de ensinar Ciências no século XXI*. São Paulo: Imprensa Oficial/ Estação Ciência, 2000.

_____; SMOLKA, A. L. B. (Org.). *Linguagem, cultura e cognição*. Belo Horizonte: Autêntica, 2001.

NARDI, Roberto. *Pesquisas em ensino de Física*. São Paulo: Escrituras, 2001.

_____. (Org.). *Pesquisa em ensino de Ciências e Matemática*. Bauru: Unesp, 1996. (Ciências e Educação).

_____. (Org.). *Questões atuais no ensino de Ciências*. São Paulo: Escrituras, 1998. (Educação para a Ciência). v. 2.

PIAGET, Jean. *Seis estudos de Psicologia*. Tradução de Maria Alice Magalhães D'Amorim e Paulo Sérgio Lima Silva. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 1997.

PIETROCOLLA, Maurício (Org.). *Ensino de Física:* conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integrada. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2001.

VIGOTSKI, L. S. et al. *Linguagem, desenvolvimento e aprendizagem*. São Paulo: Ícone, 2001.

Experimentação

ALVES FILHO, J. P. *Atividades experimentais:* do método à prática construtivista. 2000. 302 f. Tese (Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Educação) — Centro de Ciências da Educação, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2000.

ARAÚJO, M. S. T. D.; ABIB, M. L. V. D. S. Atividades experimentais no ensino de Física: diferentes enfoques, diferentes finalidades. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 25, n. 2, p. 176-194, jun. 2003.

ARRIBAS, Santos Diez. *Experiências de Física ao alcance da escola*. Passo Fundo: UFP, 1987.

BORGES, A. T. Novos rumos para o laboratório escolar de Ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. Florianópolis, v. 19, n. 3, p. 291-313, dez. 2002.

BROSS, Ana Maria Marques. *Recuperação da memória do ensino experimental de Física na escola secundária brasileira:* produção, utilização, evolução e preservação dos equipamentos. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Física e Faculdade de Educação da USP, São Paulo, 1990.

CADERNO BRASILEIRO DE ENSINO DE FÍSICA. v. 21. Edição Especial. Nov. 2004.

CASH, Terry et al. *175 More Science Experiments*. New York: Random House, 1999.

CERBARO, B. Q.; ROCHA FILHO, J. B. *Experimentos para Ensino Médio de Física:* compilando e testando experimentos didáticos no contexto curricular. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 10, 2009, Porto Alegre. Anais do X Salão de Iniciação Científica. Porto Alegre, 2009, p. 1118-1120.

CRESTANA, Silverio; CASTRO, Miriam Goldman de; PEREIRA, Gilson R. de M. (Org.). *Centros e museus de Ciência*: visões e experiências; subsídios para um programa nacional de popularização da Ciência. São Paulo: Saraiva/Estação Ciência, 1998.

GASPAR, A.; MONTEIRO, I. C. C. Atividades experimentais de demonstração em sala de aula: uma análise segundo o referencial da teoria de Vygotsky. *Investigação em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 227-254, 2005.

LABURÚ, C. E.; BARROS, M. A.; KANBACH, B. G. A relação com o saber profissional do professor de Física e o fracasso da implementação de atividades experimentais no ensino médio. *Investigação em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 305-320, 2007.

MORTENSEN, M. F. Analysis of the Educational Potential of a Science Museum Learning Environment: Visitors' experience with and understanding of an immersion exhibit. *International Journal of Science Education*, v. 33, n. 4, p. 517-545, 2011.

PSSC (Physical Science Study Committee). *Física*. Brasília: Universidade de Brasília, 1966.

SMITH, A. *The Usborne Big Book of Experiments*. London: Usborne, 1996.

VALADARES, Eduardo Campos de. *Física mais que divertida:* inventos eletrizantes baseados em materiais reciclados e de baixo custo. Belo Horizonte: Ed. da UFMG/Inep, 2000.

História e Filosofia da Ciência

ALVES, Rubem. *Filosofia da Ciência:* introdução ao jogo e suas regras. São Paulo: Brasiliense, 1982.

BACHELARD, Gaston. *O novo espírito científico*. Rio de Janeiro: Tempo Brasileiro, 1968.

_____. *Epistemologia*. Trechos escolhidos por D. Lecourt. Rio de Janeiro: Zahar, 1977.

BAKHTIN, Mikhail (V. N. Volochinov). *Marxismo e filosofia da linguagem*. São Paulo: Hucitec/Anna Blume, 2002.

BERNAL, J. D. *Ciência na História*. Lisboa: Livros Horizonte, 1969. 7 v.

BUNGE, Mário. *Filosofia da Física*. São Paulo: Martins Fontes, 1973.

CHALMERS, A. F. *O que é Ciência, afinal?* Tradução de Raul Fiker. São Paulo: Brasiliense, 1993.

CHASSOT, Attico Inácio. *A Ciência através dos tempos*. São Paulo: Moderna, 1995.

DEUS, J. D. (Org.). *A crítica da ciência*. Rio de Janeiro: Zahar, 1974.

EINSTEIN, Albert. *Como vejo o mundo*. Tradução de H. P. de Andrade. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1983.

GRIBBIN, J. *História da ciência*. Porto: Europa América, 2005.

HAWKING, S. *Os gênios da ciência*: sobre os ombros de gigantes. Rio de Janeiro: Campus, 2005.

KUHN, Thomas S. *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo: Perspectiva, 1975.

MARTINS, Roberto de Andrade. Que tipo de história da ciência esperamos ter nas próximas décadas? *Episteme*, Porto Alegre, v. 10, n. 10, p. 39-56, 2000.

NEVES, M. C. D. O uso da história da ciência no ensino de Física. *Ciência e Educação*, Bauru, 1998, v. 5, n. 1, p. 73-82.

NEWTON, Isaac. *Principia:* princípios matemáticos de filosofia natural. São Paulo: Nova Stella/Edusp, 1990.

PAIS, A. *"Sutil é o senhor..."* A ciência e a vida de Albert Einstein. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.

_____. *Einstein viveu aqui*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1997.

PEDUZZI, Luiz; MARTINS, André Ferrer; FERREIRA, Juliana (Org.). *Temas de história e filosofia da ciência no ensino*. Natal: Ed. da UFRN, 2012.

PIETROCOLA, Maurício; MARTINS, Roberto de Andrade. Historiografia e natureza da ciência na sala de aula. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 28, p. 27-59, 2011.

PIRES, A. S. T. *Evolução das ideias da Física*. São Paulo: Livraria da Física, 2011.

POPPER, Karl. *A lógica da pesquisa científica*. São Paulo: Edusp, 1974.

_____. *Conjecturas e refutações.* 2. ed. Brasília: Ed. da UnB, 1982.

PRIGOGYNE, Ilya. *O fim das certezas.* Lisboa: Gradiva, 1996.

ROCHA, José Fernando (Org.). *Origens e evolução das ideias da Física*. Salvador: Edufba, 2002.

ROSMORDUC, Jean. *Uma história da Física e da Química:* de Tales a Einstein. Tradução de Leila Velho C. Faria. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1988.

SEGRE, Emilio. *Dos raios X aos* quarks. Brasília: Ed. da UnB, 1987.

THUILLIER, Pierre. *De Arquimedes a Einstein:* a face oculta da invenção científica. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1994. (Coleção Ciência e Cultura).

Ciência, tecnologia e sociedade

AIKENHEAD, G. What is STS Science Teaching? In: SOLOMON, J.; AIKENHEAD, G. *STS Education:* International Perspectives on Reform. New York: Teacher College Press, 1994.

ANGOTTI, J. A.; AUTH, M. Ciência e tecnologia: implicações sociais e o papel da educação. *Ciência & Educação*, v. 7, n. 1, 2001.

AULER, D.; BAZZO, W. A. Reflexões para a implementação do movimento CTS no contexto educacional brasileiro. *Ciência & Educação*, v. 7, n. 1, 2001.

HAZEN & TREFIL. *Saber Ciência.* São Paulo: Cultura Editores Associados, 1995.

KUPSTAS, Marcia (Org.). *Ciência e tecnologia em debate*. São Paulo: Moderna, 1998. (Debate na escola).

MION, R.; BASTOS, F.; ANGOTTI, J. A. Educação em Física: discutindo Ciência-Tecnologia e Sociedade. *Ciência & Educação*, v. 7, n. 2, 2001.

MORAES, José Uibson Pereira; ARAÚJO, Mauro Sérgio Teixeira de. *O ensino de Física e o enfoque CTSA:* caminhos para uma educação cidadã. São Paulo: Livraria da Física, 2012.

PINHEIRO, N. A. M.; SILVEIRA, R. M.; BAZZO, W. A. Ciência, tecnologia e sociedade: a relevância do enfoque CTS para o contexto do Ensino Médio. *Ciência & Educação*, v. 13, n. 1, 2001.

SANTOS, M. E. V. M. dos. *A cidadania na voz dos manuais escolares*. Lisboa: Livros Horizonte, 2001.

SANTOS, W.; AULER, D. (Org.). *CTS e educação científica:* desafios, tendências e resultados de pesquisas. Brasília: Ed. da UnB, 2011.

Energia, meio ambiente e sociedade

BERMANN, Célio. *Energia no Brasil:* para quê? para quem? Crise e alternativas para um país sustentável. São Paulo: Livraria da Física/Fase, 2001.

BRANCO, Samuel M. *Energia e meio ambiente.* 5. ed. São Paulo: Moderna, 1990. (Polêmica).

GOLDENBERG, José. *Energia, meio ambiente & desenvolvimento*. São Paulo: Edusp, 1998.

HEMERY, Daniel; DEBIER, Jean-Claude; MOURÃO, Ronaldo Rogério de Freitas. *Sol e energia no terceiro milênio*. São Paulo: Scipione, 2000. (Ponto de Apoio).

KURAMOTO, R. Y. R.; APPOLONI, C. R. Uma breve história da política nuclear brasileira. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 19, n. 3, p. 379-392, Florianópolis, dez. 2002.

SCARLATO, Francisco C.; PONTIN, Joel. *Energia para o século XXI*. São Paulo: Ática, 2001.

Física moderna e contemporânea

BASSALO, J. M. et al. *Aspectos contemporâneos da Física*. Belém: UFPA, 2000.

BOHR, Niels. *Física atômica e conhecimento humano:* ensaios 1932-1957. Tradução de Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto, 1995.

CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C. Inserção de Física moderna e contemporânea no Ensino Médio: uma proposta experimental. In: SBPC Jovem, 5, 1997, Belo Horizonte. *Anais da SBPC Jovem*.

CHAVES, Alaor et al. *Aplicações da Física quântica:* do transistor à nanotecnologia. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

COUDERC, P. et al. *A relatividade*. São Paulo: Martins Fontes, 1981.

DIAMOND, Sheldon R. *Fundamental Concepts of Modern Physics*. New York: Amsco School, 1970.

EINSTEIN, A. *A teoria da relatividade especial e geral*. São Paulo: Contraponto, 1999.

EISBERG, R.; RESNICK, R. *Física quântica*. Rio de Janeiro: Campus, 1983.

GAZZINELLI, Ramayana. *Teoria da relatividade especial*. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

GILBERT, A. *Origens históricas da Física moderna*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1982.

HOLTON, G. et al. *Fundamentos de la física moderna*. Barcelona: Reverie, 1948.

MENEZES, Luis Carlos de. *A matéria:* uma aventura do espírito. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

NUSSENZVEIG, H. Moysés. *Complexidade & caos*. Rio de Janeiro: UFRJ/Copea, 1999.

PATY, Michel. *A matéria roubada*. São Paulo: Edusp, 1995.

PESSOA JÚNIOR, Osvaldo. *Conceitos de Física quântica*. São Paulo: Livraria da Física, 2007.

SALAM, Abdus et al. *A unificação das forças fundamentais:* o grande desafio da Física contemporânea. Rio de Janeiro: Zahar, 1994. (Ciência e Cultura).

STACHEL, J. (Org.). Einstein e a teoria da relatividade. In: *O ano miraculoso de Einstein:* cinco artigos que mudaram a face da Física. Parte 3. Rio de Janeiro: Ed. da UFRJ, 2001.

TIPLER, Paul A. *Física moderna*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

VALADARES, Eduardo de Campos; MOREIRA, Alisson Magalhães. Ensinando Física moderna no Ensino Médio: efeito fotoelétrico, *laser* e emissão de corpo negro. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 15, n. 2, ago. 1998.

YOUNG, Matt. *Óptica e* lasers. São Paulo: Edusp, 1998.

Astronomia, Astrofísica e Cosmologia

ASIMOV, Isaac. *111 questões sobre a Terra e o Espaço*. São Paulo: Best Seller, 1992.

BAROLLI, Elizabeth; GONÇALVES FILHO, Aurélio. *Nós e o Universo*. 4. ed. São Paulo: Scipione, 1991.

BOCZKO, Roberto. *Conceitos de Astronomia*. São Paulo: Edgard Blucher, 1984.

BOOTH, Nicholas. *Exploring the Solar System*. New York: Press Syndicate of the University of Cambridge, 1995.

BRETONES, Paulo Sérgio. *Os segredos do Sistema Solar.* 3. ed. São Paulo: Atual, 1993. (Projeto Ciência).

CANIATO, Rodolpho. *O que é Astronomia*. São Paulo: Brasiliense, 1984.

FARIA, Romildo Povoa. *Visão para o Universo*. São Paulo: Ática, 1996.

FRIAÇA, Amâncio et al. *Astronomia:* uma visão geral do Universo. São Paulo: Edusp, 2001. (Coleção Acadêmica).

KOESTLER, Arthur. *O homem e o Universo*. São Paulo: Ibrasa, 1989.

MARTINS, Roberto de Andrade. *O Universo:* teorias sobre sua origem e evolução. São Paulo: Moderna, 1994.

MATSUURA, Oscar T. *Atlas do Universo*. São Paulo: Scipione, 1996.

MOURÃO, Ronaldo Rogerio de Freitas. *Manual do astrônomo*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1994.

REEVES, Hubert. *A hora do deslumbramento:* o Universo tem um sentido? São Paulo: Martins Fontes, 1988.

ZEILIK, M. et al. *Introductory Astronomy and Astrophysics*. Nova York: Saunders College, 1992.

Livros de divulgação científica e paradidáticos

ALVES, G.; CARUSO, F.; MOTTA, H.; SANTORO, A. *O mundo das partículas de hoje e de ontem*. Rio de Janeiro: Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), 2000.

BARTHEM, Ricardo. *A luz*. São Paulo: Livraria da Física, 2005

BEN-DOV, Yoav. *Convite à Física*. Tradução de Maria Luiza X. de A. Borges; revisão técnica de Henrique Lins de Barros. Rio de Janeiro: Zahar, 1996. (Ciência e Cultura).

BLOOMFIELD, L. A. *How Things Work:* the Physics of Everyday Life. New York: John Wiley & Sons, 1997.

BOLTON, L. *Hidden Pictures*. New York: Penguin, 1993.

BRENNAN, Richard. *Gigantes da Física:* uma história da Física moderna através de oito biografias. Rio de Janeiro: Zahar, 2000.

BRODY, David E. et al. *As sete maiores descobertas científicas da História*. São Paulo: Companhia das Letras, 2002.

CALDER, Nigel. *O Universo de Einstein*. Brasília: Ed. da UnB, 1994.

CARVALHO, Regina P. *Micro-ondas*. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

CHILDRESS, D. H. *As fantásticas invenções de Nikola Tesla*. São Paulo: Madras, 2004.

CRATO, Nuno. *Passeio aleatório pela ciência do dia a dia*. São Paulo: Livraria da Física, 2009.

DAWKINS, R. *Desvendando o arco-íris*. São Paulo: Companhia das Letras, 2000.

DUARTE, Marcos; OKUNO, Emico. *Física do futebol*. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

EINSTEIN, Albert; INFELD, Leopold. *A evolução da Física*. Tradução de Giasone Rebuá. 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara-Koogan, 1988.

ERNST, B. *Adventure with Impossible Figures*. Norfolk: Taschen, 2000.

FERRARO, Nicolau Gilberto. *Eletricidade:* história e aplicações. 7. ed. São Paulo: Moderna, 1991. (Desafios).

FEYNMAN, Richard P. *Está a brincar, Sr. Feynman!* Lisboa: Gradiva, 1988.

_____. *Física em seis lições*. Rio de Janeiro: Ediouro, 1995.

FIGUEIREDO, A. et al. *Calor e temperatura*. São Paulo: FTD, 2000.

_____; PIETROCOLLA, M. *Física, um outro lado:* faces da energia. São Paulo: FTD, 1999.

FIOLHAIS, Carlos. *Física divertida*. 4. ed. Lisboa: Gradiva, 1994. (Aprender Fazer Ciência).

GAMOW, George. *As aventuras do Sr. Tompkins*. Tradução de A. M. Nunes Santos e Christopher Auretta. Lisboa: Gradiva, 1990. (Aprender Fazer Ciência).

_____. *Biografia da Física*. Rio de Janeiro: Zahar, 1952.

_____. *O incrível mundo da Física moderna*. Tradução de E. Jacy Monteiro. São Paulo: Ibrasa, 1980.

GASPAR, Alberto. *Eletricidade e suas aplicações*. São Paulo: Ática, 1999.

_____. *História da eletricidade*. São Paulo: Ática, 2000.

GENNES, P. G. *Os objetos frágeis*. Campinas: Ed. da Unicamp, 1997.

GILMORE, Robert. *Alice no país do* quantum. Rio de Janeiro: Zahar, 1998.

_____. *O mágico dos* quarks. Rio de Janeiro: Zahar, 2001.

GLEISER, Marcelo. *A dança do Universo*. São Paulo: Companhia das Letras, 1997.

_____. *Macro micro*. São Paulo: Publifolha, 2005.

GONÇALVES FILHO, Aurélio; BAROLLI, Elizabeth. *Instalação elétrica:* investigando e aprendendo. São Paulo: Scipione, 2005.

GONICK et al. *Introdução ilustrada à Física*. São Paulo: Harbra, 1994.

HAWKING, Stephen. *O Universo numa casca de noz*. São Paulo: Mandarim, 2001.

_____; PENROSE, Roger. *A natureza do espaço e do tempo*. Tradução de Alberto Luiz da Rocha Barros. Campinas: Papirus, 1997. (Papirus Ciência).

INGRAM, J. *As ilusões da vida*: a estranha ciência do extremamente comum. Rio de Janeiro: Ediouro, 2005.

KAKU, M. *Física do impossível*. Rio de Janeiro: Rocco, 2010.

KRAUSS, Lawrence M. *Sem medo da Física:* um guia para você não ficar perdido no espaço. Rio de Janeiro: Campus, 1995.

LINDLEY, David. *The End of Physics*. New York: Basic Books, 1993.

LIVINGSTON, J. D. *Rising Force*: the Magic of Magnet. Cambridge: Harvard, 2011.

LOPES, José Leite. *Uma história da Física no Brasil*. São Paulo: Livraria da Física, 2004.

MARINHO, F. C.; DORIA, M. M. *Temas atuais de Física*: ondas e *bits*. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

MENEZES, Luis Carlos. *A matéria:* uma aventura do espírito. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

_____. *Vale a pena ser físico*? São Paulo: Moderna, 1988.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. *Algumas razões para ser um cientista*. Rio de Janeiro: CBPF, 2005.

MONTANARI, Valdir. *Energia nossa de cada dia*. São Paulo: Moderna, 2000. (Desafios).

MORRISON, Philip et al. *Powers of Ten*. New York: Scientific American Library, 1982.

MOSCOVICH, I. *Magic Cylinder Book*. Stradbroke: Tarquin, 1991.

NORRETRANDERS, Tor. *The User Illusion*. Londres: Penguin, 1999.

OKUNO, E. *Desvendando a física do corpo humano:* biomecânica. São Paulo: Manole, 2003.

_____. *Radiação:* efeitos, riscos e benefícios. São Paulo: Harbra, 1988.

_____. *Radiação ultravioleta:* características e efeitos. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

OSTERMANN, F.; PUREUR, P. *Temas atuais de Física*: supercondutividade. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

PATERNITI, Michael. *Ao volante com Mr. Albert*. Lisboa: Teorema, 2004.

PERELMAN, I. *Física recreativa*. Moscou: Mir, 1980.

REEVES, Hubert. *Nomes de deuses*. São Paulo: Unesp, 2000.

_____. *Um pouco mais de azul*. São Paulo: Martins Fontes, 1998.

RETONDO, F. *Química das sensações*. Campinas: Átomo, 2009.

SAGAN, Carl. *Bilhões e bilhões:* reflexões sobre vida e morte na virada do milênio. Tradução de Rosaura Eichemberg. São Paulo: Companhia das Letras, 1998.

_____. *O mundo mal assombrado pelos demônios*. São Paulo: Companhia das Letras, 1997.

SCHENBERG, Mário. *Pensando a Física*. São Paulo: Brasiliense, 1984.

SCHWARTZ, Joseph; MCGUINESS, Michael. *Einstein e a relatividade em quadrinhos.* Tradução de Mário Bendetson. Rio de Janeiro: Xenon, 1994.

SPEYER, Edward. *Seis caminhos a partir de Newton*. Rio de Janeiro: Campus, 1995.

STRATHERN, Paul. *Aristóteles em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.

_____. *Arquimedes e a alavanca*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.

_____. *Bohr e a teoria quântica*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.

_____. *Galileu e o Sistema Solar*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.

_____. *Hawking e os buracos negros*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.

_____. *Platão em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.

_____. *Sócrates em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.

VON BAEYER, Hans Christian. *Arco-íris, flocos de neve,* quarks*:* a Física e o mundo que nos rodeia. Tradução de Luiz Euclydes Trindade Frazão Filho. Rio de Janeiro: Campus, 1994.

WALKER, Jearl. *O grande circo da Física*. Lisboa: Gradiva, 1990.

WEINBERG, Steven. *Sonhos de uma teoria final:* a busca das leis fundamentais da natureza. Tradução de Carlos Irineu da Costa. Rio de Janeiro: Rocco, 1996. (Ciência Atual).

WYNN, Charles M. et al. *The Five Biggest Ideas in Science*. New York: John Wiley & Sons, 1997.

Física para os Ensinos Fundamental e Médio

CANIATO, Rodolpho. *As linguagens da Física mecânica*. São Paulo: Ática, 1990.

FERMI, Enrico. *Física*. Bologna: Nicola Zanichelli, 1948.

GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA (GREF). *Física 1*: Mecânica. São Paulo: Edusp, 1991. *Física 2:* Física térmica e Óptica. São Paulo: Edusp, 1991. *Física 3:* Eletromagnetismo. São Paulo: Edusp, 1993. 3 v.

MAIZTEGUI, A. P. et al. *Física elemental*. Buenos Aires: Kapellusz, 1981.

MCDERMOTT, L. C. *Physics by Inquiry*. New York: John Wiley & Sons, 1996. v. I e II.

NUFFIELD Foundation Collection. *Physics*. London: Penguin, 1966. v. I-V.

PIÓRICHKINE, A. V. *Física*. Moscou: Mir, 1982. v. 1-4.

PSSC (Physical Science Study Committee). *Física*. Brasília: Ed. da UnB, 1966.

Física para graduação

AMALDI, Ugo. *Imagens da Física:* as ideias e as experiências do pêndulo aos *quarks*. São Paulo: Scipione, 1995.

CHAVES, Alaor. *Física*. Rio de Janeiro: Reichmann & Affonso, 2000. v. 1-4.

CUTNELL, J.; JOHNSON, K. *Physics*. New York: John Wiley & Sons, 1995.

DURAN, J. E. R. *Biofísica*: conceitos e aplicações. São Paulo: Pearson, 2011.

EISBERG, R. M. et al. *Física:* fundamentos e aplicações. São Paulo: McGraw-Hill, 1981. v. 1-4.

HEWITT, P. G. *Fundamentos de Física Conceitual*. Porto Alegre: Bookman, 2009.

NASSAU, K. *The Physics and Chemistry of Color*: the Fifteen Causes of Color. Hoboken: Wiley inter-science, 2001.

NUSSENZVEIG, Moysés H. *Curso de Física básica*. São Paulo: Edgard Blücher, 1988. v. 1 e 2.

OKUNO, Emico; CALDAS, Iberê L.; CHOW, Cecil. *Física para Ciências Biológicas e Biomédicas*. São Paulo: Harper & Row do Brasil, 1982.

PAULA, H. F.; MATEUS, A. L.; ALVES, E.G. *Quântica para iniciantes*. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2011.

RESNICK, Robert; HALLIDAY, David; WALKER, Jearl. *Fundamentos de Física*. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2002. 4 v.

TIPLER, Paul. *Física*. Rio de Janeiro: LTC, 1997. 3 v.

_____; LLEWELLYN, R. A. *Física moderna*. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

Sites

Instituições de referência e fontes de pesquisa (Acessos em: 13 maio 2016)

CENPEC. Centro de Pesquisas para Educação e Cultura. Apresenta notícias, projetos e assessoria a políticas educacionais. Disponível em: <www.cenpec.org.br>.

ESCOLA DO FUTURO. Disponibiliza estudos e pesquisas sobre a sociedade do conhecimento e seus impactos nas áreas da Comunicação, Educação e Informação para iluminar os novos contornos da "sociedade em rede". Contém uma Biblioteca Virtual do Estudante Brasileiro. Disponível em: <www.bibvirt.futuro.usp.br>.

MEC — Ministério da Educação. Nele, o professor pode encontrar algumas informações úteis, como LDB, DCN e PCN e outras informações sobre o ensino em nosso país. Disponível em: <www.mec.gov.br>.

PROFIS — Espaço de Apoio, Pesquisa e Cooperação de Professores de Física. Disponibiliza diversos *links* e propostas de interesse a professores e estudantes de Física. Disponível em: <www.if.usp.br/profis>.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA — Fornece informações sobre publicações da Sociedade e atas dos Encontros na área de ensino de Física: Simpósio Nacional de Ensino de Física (Snef) e Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Física (Epef). Disponível em: <www.sbfisica.org.br>.

Referências para atividades, experimentos, leituras (Acessos em: 13 maio 2016)

Energia nuclear (apostila educativa). Disponível em: <www.cnen.gov.br>.

Experimentos virtuais — Mecânica (Ifusp). Disponível em: <www.fisfoto.if.usp.br/index.html>.

Física e Cultura — CBPF. Disponível em: <www.cbpf.br/FISCUL>.

Grupo de Reelaboração do Ensino de Física (GREF) — Leituras de Física. Disponível em: <www.if.usp.br/gref/>.

PET. Vídeos e experimentos de Física — Universidade Estadual de Maringá. Disponível em: <www.pet.dfi.uem.br/>.

Sistema Internacional de Unidades: SI. — Duque de Caxias, RJ : Inmetro/Cicma/Sepin, 2012. 94 p. Inclui índice. Traduzido de: Le Système international d'unités – The International System of Units. 8. ed. 2006. ISBN: 978-85-86920-11-0 1. Sistema SI. 2. Unidade de Medida. 3. Metrologia. I. Inmetro II. Disponível em: <www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/si_versao_final.pdf>.

Objetos Educacionais Digitais (OED) (Acessos em: 13 maio 2016)

Centro Interdisciplinar de Novas Tecnologias na Educação (Cinted). Disponível em: <www.cinted.ufrgs.br/CESTA>.

Conexão Escola. Disponível em: <http://www.conexaoprofessor.rj.gov.br/sala_de_aula_objaprendizagem.sp>.

Digital Education. Disponível em: <http://sitede.neweducation.com.br/sistema-ensino/objetos-aprendizagem/>.

Federação de Repositórios Educa Brasil (FEB). Disponível em: <www.feb.ufrgs.br/>.

Labvirt Física. Disponível em: <www.labvirt.fe.usp.br>.

MEC. Disponível em: <http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/handle/mec/115>.

Portal do Professor. Disponível em: <http://portaldoprofessor.mec.gov.br/index.html>.

Rede Interativa Virtual de Educação (Rived). Disponível em: <http://rived.mec.gov.br>.

Periódicos nacionais de ensino de Ciências e ensino de Física (Acessos em: 13 maio 2016)

ALEXANDRIA — Revista de Educação em Ciência e Tecnologia (UFSC). Publicação do Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica da UFSC. Disponível em: <www.ppgect.ufsc.br/alexandriarevista>.

CADERNO BRASILEIRO DE ENSINO DE FÍSICA. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica>.

CIÊNCIA E EDUCAÇÃO. Publicação do Programa de Pós-Graduação em Educação para Ciência da Faculdade de Ciência da Unesp, *campus* de Bauru. Órgão de divulgação dos trabalhos produzidos pelo Curso de Especialização em Ensino de Ciências e Matemática e pelo Curso de Mestrado em Educação para a Ciência. Disponível em: <www2.fc.unesp.br/cienciaeeducacao/>.

CIÊNCIA HOJE DAS CRIANÇAS. Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC). Disponível em: <www.ciencia.org.br>.

FÍSICA NA ESCOLA. Suplemento da Revista Brasileira de Ensino de Física. Publicação trimestral da Sociedade Brasileira de Física (SBF). É destinada a apoiar as atividades de Física do Ensino Fundamental e Médio. Disponível em: <www.sbfisica.org.br>.

INVESTIGAÇÕES EM ENSINO DE CIÊNCIAS (UFRGS). Periódico voltado para a pesquisa em ensino de Ciências, com apoio do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Publica artigos relacionados à investigação em ensino e aprendizagem de Ciências; revisão da literatura nessa área de pesquisa; fundamentação teórica com implicações para a pesquisa; metodologia de pesquisa; crítica e comentários sobre artigos publicados na própria revista. Disponível em: <www.if.ufrgs.br/ienci/>.

REVISTA BRASILEIRA DE ENSINO DE FÍSICA. São Paulo: Sociedade Brasileira de Física. Disponível em: <www.sbfisica.org.br/rbef>.

REVISTA EXPERIÊNCIAS EM ENSINO DE CIÊNCIAS (UFRGS). Revista dedicada ao ensino de Ciências e publicada pelo Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e pelo Programa Internacional de Doutorado em Ensino de Ciências (Pidec) oferecido pela Universidade de Burgos (UBU), Espanha, em convênio com a UFRGS. Disponível em: <www.if.ufrgs.br/eenci>.

Eventos de ensino de Ciências/Física (Acessos em: 13 maio 2016)

ENPEC — Encontro de Pesquisa em Ensino de Ciências. Disponível em: <http://fep.if.usp.br/~profis/enpec.html>.

EPEF — Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. Disponível em: <http://fep.if.usp.br/~profis/epef.html>.

SNEF — Simpósio Nacional de Ensino de Física. Disponível em: <http://fep.if.usp.br/~profis/snef.html>.

Cursos de extensão

Instituto de Física da UFRGS (IF-UFRGS). Disponível em: <www.if.ufrgs.br>.

Instituto de Física da UFRJ. Disponível em: <www.if.ufrj.br/>.

Instituto de Física da Universidade de Brasília. Disponível em: <www.fis.unb.br>.

Instituto de Física de São Carlos (USP) — IFSC. Disponível em: <www.ifsc.usp.br>.

Instituto de Física Gleb Watagin (Unicamp). Disponível em: <www.portal.ifi.unicamp.br/extensao/>.

Instituto de Física Teórica da Unesp (IFT/Unesp). Disponível em: <www.ift.unesp.br/Extensao/extensao.php>.

Espaços informais e de divulgação — Museus e Centros de Ciência

Casa da Ciência. Disponível em: <www.cciencia.ufrj.br>.

Centro de Divulgação Científica e Cultural. Disponível em: <www.cdcc.sc.usp.br>.

Espaço Museu do Universo. Disponível em: <www.rio.rj.gov.br/planetario/universo/>.

Estação Ciência. Disponível em: <www.eciencia.usp.br>.

Fundação Planetário da Cidade do Rio de Janeiro. Disponível em: <www.rio.rj.gov.br/planetario>.

Museu da Vida. Disponível em: <www.fiocruz.br/emvida/>.

Museu de Astronomia e Ciências Afins (MAST). Disponível em: <www.mast.br>.

Museu de Ciências e Tecnologia. Disponível em: <www.mct.pucrs.br/>.

Observatório do Valongo. Disponível em: <www.valongo.ufrj.br>.

Observatório Nacional. Disponível em: <www.o.n.br>.

Parque da Ciência e Tecnologia (Cientec). Disponível em: <www.parquecientec.usp.br>.

Planetário da Gávea. Disponível em: <www.rio.rj.gov.br/planetario>.

Planetário do Ibirapuera (Planetário e Escola Municipal de Astrofísica "Prof. Aristóteles Orsini"). Disponível em: <www.planetario>.

O *Show* da Física/USP. Disponível em: <www.cepa.if.usp.br/showdefisica>.

Usina Ciência. Disponível em: <www.ufal.br/usciencia/>.

9. Projeto integrador

O que são projetos

A palavra projeto é rotineiramente utilizada em diversos âmbitos da atuação humana. A ela estão associadas as mais diversas definições, tais como intenção, sonho, proposta para resolução de problemas, atividade organizada, entre outras.

A ideia de projeto voltado ao ensino tem sido muito difundida entre professores e educadores de nosso país. No entanto, erros de interpretação de seus fundamentos têm levado à banalização do termo e, algumas vezes, a equívocos sobre sua concepção e execução. Contudo, um trabalho bem organizado por meio de projetos aparece como uma importante alternativa ao contexto, geralmente pouco dinâmico, da sala de aula.

Uma modalidade de projeto que costuma ser bastante valorizada em termos didáticos é aquela que se desenvolve em torno de uma *situação-problema*. Nesse tipo de projeto, o aluno é inserido em um contexto que exige dele a integração de um conjunto amplo de conhecimentos que serão usados para obter a solução de um problema complexo. Mas, para que um projeto nesses moldes se desenvolva e traga os resultados de aprendizagem desejados, algumas etapas devem ser observadas ao longo de sua execução.

Etapas de um projeto

Seguem abaixo as etapas que devem estar presentes durante a execução de um projeto centrado em uma situação-problema, destinado ao Ensino Médio:

1) Levantamento do repertório dos estudantes e de possíveis propostas para a situação-problema.
2) Definição de uma situação-problema relacionada à realidade dos alunos.
3) Definição das etapas do projeto.
4) Formação das equipes de trabalho e definição do cronograma.
5) Investigação dos saberes que deverão ser apropriados para que se chegue à solução do problema proposto.
6) Execução das atividades e resolução do problema.
7) Apresentação do trabalho final do projeto.

Princípios norteadores de um projeto

Além dos momentos listados acima, o trabalho por projeto deve ser guiado por princípios que garantam o cumprimento das expectativas de aprendizagem estabelecidas. A seguir destacamos esses princípios e suas respectivas justificativas didáticas.

- A situação-problema deve pertencer à *realidade do aluno*, tem de lhe ser familiar, para que ele perceba mais facilmente as relações lógicas que serão estabelecidas e encontre sentido naquilo que terá que estudar.
- Para que uma proposta de trabalho se constitua de fato em um projeto, o desenvolvimento das atividades em sala de aula deve permitir a participação da turma durante a tomada de decisões. Compartilhar escolhas e decidir em conjunto são atitudes que favorecem o surgimento de uma atmosfera propícia à *cumplicidade* e à *cooperação*, características essenciais para um bom trabalho em equipe.
- A finalidade do projeto é a *aprendizagem significativa* de conteúdos relacionados ao problema, portanto a passagem para a próxima etapa deve ser feita apenas quando a equipe como um todo já atingiu a compreensão real dos conceitos abordados na etapa atual.
- O *sequenciamento* da pesquisa por informações e do estudo dos conteúdos devem facilitar a *memorização compreensiva* dos conceitos.
- Deve haver um *monitoramento* constante do andamento do projeto, não apenas do cumprimento do cronograma, mas também da aprendizagem significativa dos conceitos envolvidos em cada etapa.

Vantagens e resultados obtidos

Os projetos que envolvem situações-problema, geralmente, representam um desafio que mobiliza os estudantes em busca de soluções. Esse tipo de proposta modifica a organização da prática pedagógica, pois altera a relação tradicional entre professor e aluno, fazendo emergir um novo caminho para a construção do conhecimento.

Nesse caso, o engajamento dos estudantes, que muitas vezes não é percebido nas aulas tradicionais, se torna evidente na busca por informações, na proposta de soluções e no esforço para a produção de um trabalho bem-feito. Como resultado, o aluno se apropria de um conhecimento mais significativo, construído a partir da vivência e da coparticipação, uma vez que tanto professor como estudantes se tornam sujeitos ativos na elaboração das atividades.

Finalmente, o trabalho com projetos traz a possibilidade da interdisciplinaridade. Por estar centrado na busca de soluções de problemas complexos, o trabalho por projetos, com frequência, requer o diálogo entre diversas áreas do conhecimento. Essa necessidade, ao proporcionar conexões com conteúdos de outras disciplinas, aproxima assuntos que pareciam, inicialmente, isolados, favorecendo uma visão integrada e abrangente da natureza.

Proposta de projeto

Veja a seguir um exemplo de projeto cuja problemática se adéqua aos assuntos tratados neste volume da coleção, servindo de exemplo de como um projeto pode ser estruturado. No entanto, seu uso deve estar condicionado à realidade e ao interesse da turma de alunos a que se destina.

PROJETO: A TERRA É NOSSO LAR

Propondo o projeto

Situação-problema: Quais conceitos físicos, químicos, biológicos e geográficos estão relacionados à mudança climática? Trata-se de um processo natural ou causado pela ação do ser humano?

Planejamento

Este projeto pode ser realizado durante o estudo dos capítulos sobre temperatura e calor. Ele é composto de três etapas. A primeira e a segunda serão destinadas à pesquisa sobre a temperatura de algumas cidades ou regiões brasileiras e ao estudo dos fatores físicos, químicos, biológicos e geográficos que influenciam no clima. A terceira etapa será destinada à reunião dos estudos anteriores com o intuito de entender temas mais gerais relacionados às mudanças climáticas do planeta. Seguem abaixo alguns pontos que podem guiar seu planejamento.

Para a execução da primeira e da segunda etapa, será necessário:

- definir quais cidades brasileiras serão avaliadas e distribuir a cada grupo um tema de pesquisa que envolva os conceitos relacionados à variação climática;
- elencar livros, artigos e revistas que possam ser consultados para a realização do trabalho.

Para a execução da terceira etapa, será necessário:

- assistir ao filme *Um dia depois de amanhã* (2004);
- dividir a turma em grupos e pesquisar sobre:
  - efeito estufa;
  - acordos internacionais sobre meio ambiente e sua execução;
  - fontes renováveis de energia;
- definir os conteúdos conceituais e históricos a serem pesquisados, referentes a cada tema mencionado acima. São esses os saberes que representarão as expectativas de aprendizagem do projeto, ou seja, esse é o conhecimento que o aluno deverá se apropriar para que chegue à solução do problema proposto;
- informar aos alunos que eles serão avaliados tanto no que diz respeito aos aspectos atitudinais como conceituais de sua participação no projeto. A avaliação atitudinal vai considerar sua relação com os integrantes da equipe, sua colaboração com o desenvolvimento do trabalho, bem como o cumprimento de prazos. Os aspectos conceituais levam em conta a apropriação ou não das expectativas de aprendizagem e serão avaliados com base nas atividades de discussão e análise e na qualidade da apresentação do trabalho final;
- decidir com a classe a data e o formato da apresentação final de cada grupo. Como sugestões para o formato de apresentação, podemos citar: maquete, painel, dramatização, debate, seminário.

Execução

Primeira etapa

Durante um período de 15 a 30 dias, cada grupo deve recolher dados sobre as temperaturas máxima e mínima da cidade escolhida. Com base nos dados, o grupo deve montar uma tabela para apresentar ao restante da turma e, se possível, mantê-la sempre exposta em sala de aula. Nessa etapa, o professor de Física e o de Matemática podem desenvolver, com os alunos, uma análise dos dados recolhidos, elaborando médias das temperaturas máxima e mínima e construindo gráficos. Feitos os cálculos e os gráficos, os professores devem pedir a seus alunos que façam comparações com as temperaturas máxima e mínima de outras cidades e/ou regiões do país e também que fiquem atentos a mudanças ocorridas no decorrer dos anos. Após o trabalho com os dados, os alunos devem usar os conceitos estudados para explicar o comportamento dos valores da temperatura para a cidade ou região escolhida, enfatizando sua evolução no tempo.

Segunda etapa

Cada grupo deverá pesquisar, para a região ou a cidade escolhida, a relação entre o clima e os seguintes fatores:

- o tipo de construção arquitetônica das moradias e sua preocupação ou não com o conforto térmico;
- doenças causadas por influências climáticas e por variações drásticas de temperatura, especificando as mais frequentes na região ou cidade a que pertence a escola;
- fatores climáticos que interferem na produção e no calendário agrícola.

Terceira etapa

Inicie esta etapa do trabalho exibindo para os estudantes o filme *O dia depois de amanhã*. O filme reúne muitos dos aspectos associados às mudanças climáticas e suas consequências.

Peça a cada grupo que identifique, no filme, os temas relacionados aos conceitos que foram estudados.

Abra uma discussão sobre o filme. Peça aos alunos que tomem nota dos pontos relevantes da discussão e elaborem, em grupo, uma síntese dos principais aprendizados do debate.

Fechamento

Ao final da execução e apresentação dos trabalhos, o professor de Física e os outros professores participantes devem pedir aos estudantes que:

- comentem sua participação como membro do grupo, a participação da turma e a participação dos professores;
- evidenciem aquilo que aprenderam, aquilo que gostariam de explorar mais e sugestões para melhorar a proposta de trabalho;
- elaborem uma lista de sugestões de condutas individuais e coletivas que poderiam minimizar os impactos ambientais, em especial aqueles relacionados às mudanças climáticas.

10. Orientações específicas de cada capítulo e resoluções das atividades

Unidade 1 — Temperatura — dilatação — gases

Capítulo 1: Temperatura e dilatação

Orientações específicas

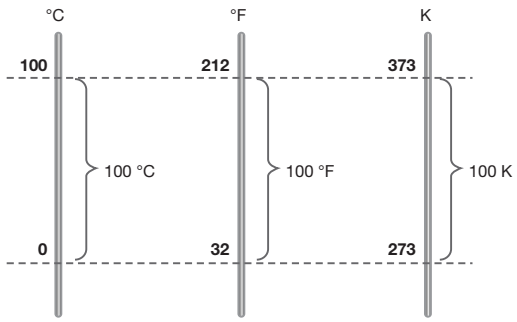
Nesta unidade iniciamos o estudo de uma nova classe de fenômenos físicos: os fenômenos térmicos. Entretanto, há uma íntima ligação entre esses fenômenos e aqueles analisados na Mecânica, uma vez que os fenômenos térmicos decorrem de variações na energia mecânica das partículas que constituem a matéria. Assim, quando o estudante já compreende os conceitos fundamentais da Mecânica, ele tem melhor condição de entender e analisar os fenômenos térmicos, do qual nos ocuparemos até o Capítulo 4.

Nossa experiência tem mostrado que os assuntos abordados nesta unidade são facilmente assimilados pelos alunos. Julgamos, portanto, que o professor não terá necessidade de se deter muito tempo nos dois primeiros capítulos, podendo desenvolvê-los em um ritmo mais acelerado do que aquele adotado no estudo da Mecânica.

Neste primeiro capítulo, são introduzidos os conceitos fundamentais de temperatura e de escala termométrica. O fenômeno de dilatação térmica, embora não apresente um caráter fundamental no campo da Física, é analisado com certo cuidado, já que explica vários fatos da vida diária do estudante.

Ao longo deste primeiro capítulo, julgamos que o professor deva prestar atenção aos seguintes pontos:

- No início do capítulo e no texto *Avanços na tecnologia da medida e do controle da temperatura* da seção *Aplicações da Física*, são apresentados alguns tipos de termômetro, mas sem entrar nos detalhes de como funcionam. No nosso entender, basta que o aluno saiba que existem outros tipos de termômetro, além daqueles usados para medir a temperatura do nosso corpo, e que tenha uma compreensão mínima dos princípios físicos utilizados em alguns deles.
- Consideramos sem uma justificativa didática razoável a descrição exaustiva de várias escalas termométricas, bem como para a resolução de um grande número de exercícios de conversão entre elas. Tal procedimento, apesar de muito comum em alguns livros didáticos, passa ao aluno uma ideia distorcida daquilo que é, de fato, importante e fundamental para o estudo da Física térmica. Em nosso livro, enfatizamos apenas as duas escalas que são realmente importantes: a escala Celsius (bastante usada em congressos internacionais) e a escala Kelvin (adotada como a escala do Sistema Internacional de Unidades). Em virtude de ter seu uso ainda bastante difundido em países de língua inglesa, a escala Fahrenheit é também apresentada neste capítulo, ficando a critério do professor sua apresentação para os estudantes. O professor não deve deixar de construir com o aluno a figura abaixo, que reúne essas três escalas e destaca o intervalo de temperatura entre os pontos de fusão e de ebulição da água para cada uma delas.



- No final do tópico 1.1, procuramos fazer com que o aluno comece a se habituar com a ideia de que a temperatura está relacionada com a agitação dos átomos e das moléculas. No capítulo seguinte, essa conceituação será tratada de maneira mais elaborada. O professor deve levar os alunos a perceberem que, no tópico 1.2, essa ideia é utilizada para explicar, em termos atômicos, por que ocorre a dilatação térmica da matéria.
- É importante frisar aos alunos que os valores de α são muito pequenos, como mostra a tabela 1.2, e que isso explica por que é tão difícil perceber, diretamente, a dilatação que ocorre nos objetos que nos rodeiam.

- As relações entre os coeficientes α, β e γ são apresentadas sem a respectiva demonstração matemática. Essas demonstrações são muito complexas para um aluno do Ensino Médio.

Resoluções das atividades

Para iniciar a conversa

As juntas de dilatação evitam danos à estrutura com possíveis acidentes caso haja dilatação ou contração térmica. Se as juntas de dilação não existirem, quando tivermos um aumento de temperatura, por exemplo, as vigas de pontes e edifícios podem exercer forças uma sobre a outra, provocando flambagens.

Quando aumentamos a temperatura de um material, aumentamos a agitação das partículas que o constituem, provocando em quase todos os materiais um aumento de suas dimensões em razão do distanciamento entre as moléculas. A contração térmica acontecerá quando a temperatura diminuir. Nesse caso, as moléculas vão reduzir o movimento, diminuindo a distância entre elas e provocando a contração térmica. Por exemplo, se um caminhão-tanque for completamente carregado em uma cidade com temperatura alta (42 °C) e abastecer um posto que está em outra cidade onde está frio (9 °C), o motorista perceberá que o tanque não estará completamente cheio.

O mercúrio é um metal que se apresenta na forma líquida à temperatura ambiente, possuindo, portanto, uma grande capacidade de dilatação.

Verifique o que aprendeu

1. a) O corpo mais aquecido esfria-se e o corpo mais frio se aquece, isto é, T_A **diminui** e T_B **aumenta**.

b) Os corpos tendem para o estado de **equilíbrio térmico**.

c) Alcançado o equilíbrio térmico, temos $T_A = T_B$.

2. Procedemos assim para que seja alcançado o equilíbrio térmico entre o termômetro e a pessoa, isto é, para que a temperatura do aparelho seja igual à da pessoa.

3. Como dissemos no texto, os cientistas verificaram que é impossível ser atingida uma temperatura inferior ao zero absoluto (−273 °C). Como −327 °C e −15 K são valores situados abaixo do zero absoluto, concluímos que o valor encontrado só pode ter sido −253 °C.

4. a) Errado, pois, como dissemos, a expressão **calor em um corpo** é destituída de sentido físico.

b) Correto, pois quanto maior for a **temperatura** de um corpo, **maior** será a **energia de agitação** dos seus átomos ou moléculas.

5. Este dispositivo não possuía escalas e permitia somente a **comparação** de temperaturas (por exemplo, para verificar se um doente estava com febre). Seria mais adequado denominá-lo **termoscópio**.

6. a) Como vimos, os valores atribuídos às temperaturas dos pontos fixos de uma escala são **totalmente arbitrários**.

b) A escala Celsius é centígrada (centesimal), e a facilidade que isso acarreta para trabalhar com ela talvez tenha sido a principal causa de sua grande aceitação.

7. Como $T_F = T_C$, vem:

$$\frac{T_C}{5} = \frac{T_C - 32}{9} \therefore 9T_C = 5T_C - 160$$

$$\text{ou } 4T_C = -160 \therefore T_C = -40\,°C$$

Portanto, a temperatura de −40 °C corresponde a −40 °F.

8. Os estudantes devem discutir como os processos de globalização, que se intensificaram após o final do século XIX e começaram a se consolidar após a Segunda Guerra Mundial e, de fato, se estabeleceram de modo definitivo após a queda da União Soviética, em fins da década de 1980, mudaram o perfil da ciência. Até o final do século XIX diversos países possuíam tradições de pesquisas próprias, ainda que interagindo com outros países, a circulação de conhecimentos era menor. Com a chegada do século XX, a circulação de pesquisadores e a interação de grupos de pesquisa mais amplos, os conhecimentos foram perdendo o seu caráter local, de modo que todos os cientistas do mundo discutiam os mesmos problemas. Atualmente, seria muito difícil o surgimento de escalas termométricas distintas em cada país. O processo de internacionalização do conhecimento levaria ao desenvolvimento de algum consenso sobre qual é a melhor escala. Um processo recente semelhante a essa discussão foi a classificação de Plutão em planeta-anão, em vez de planeta, por meio de uma decisão da União Astronômica Internacional, que consultou pesquisadores do mundo inteiro, a favor e contra a mudança, para finalmente decidir.

9. a) A parte do copo em contato com a água se aquecerá mais e, portanto, se dilatará mais do que a parte superior. Isso provavelmente fará com que o copo se quebre.

b) Neste caso, todas as partes do copo aquecem-se e dilatam-se, isto é, o copo dilata-se como um todo e, assim, provavelmente não se quebrará.

c) Porque, como nos mostra a tabela 1.2, o vidro pirex tem um coeficiente de dilatação relativamente pequeno, isto é, o vidro refratário dilata-se muito pouco e, por isso, não se quebra quando é aquecido.

10. A análise pedida neste exercício foi feita no texto usando-se o α do cobre como exemplo. Então, podemos dizer que, como para o Pb temos $\alpha = 29 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$, isso significa que uma barra de Pb de 1 cm (ou 1 m, ou 1 km, ou 1 polegada) de comprimento **dilata-se 29 · 10⁻⁶ cm** (ou m, ou km, ou polegada) quando sua temperatura **aumenta 1 °C**.

11. a) Temos $\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$. Os valores de L_0 e ΔT são iguais para as duas barras. Vemos então que, se elas possuírem diferentes valores de α (barras feitas de **materiais** diferentes), sofrerão dilatações diferentes.

b) Examinando novamente a expressão $\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$, vemos que, agora, α e ΔT são iguais para as duas barras. Entre-

tanto, elas poderão apresentar dilatações diferentes, desde que seus comprimentos iniciais sejam diferentes.

12. a) A esfera de aço se dilatará, isto é, terá seu volume aumentado. Então, sua densidade **diminuirá** (lembre-se de que $\rho = m/V$).

b) Como a densidade do Hg não se modificou e a densidade da esfera tornou-se menor, concluímos que ela flutuará com uma **menor fração** de seu volume submerso no Hg (de fato, sabemos da Hidrostática que quanto menor for a densidade de um sólido que flutua em um líquido, menor será a fração do volume deste sólido que ficará submersa no líquido).

13. De fato, o alumínio, o cobre e o chumbo são metais muito macios e a esfera poderia se deformar facilmente. Além disso, todos os metais mencionados, incluindo o aço, apresentam coeficientes de dilatação maiores do que o do tungstênio. Assim, além da dureza, esse fator torna o tungstênio mais adequado para esse uso, uma vez que a esfera da ponta das canetas esferográficas deve girar livremente no interior de um volume muito pequeno. Como elas são utilizadas em condições climáticas bastante diferentes em todo o planeta, ficam sujeitas a temperaturas muito distintas e devem se dilatar ou se contrair termicamente o menos possível.

14. a) Quanto maior for o comprimento de cada trilho, maior será a dilatação que ele sofrerá, como vemos pela expressão $\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$ (maior L_0 acarreta maior ΔL). Assim, nesse caso, as juntas de dilatação deveriam ter largura **maior** do que 1 cm.

b) Em caso de incêndio, temos valores muito elevados de ΔT. Assim, o valor de ΔL (dilatação) para cada trilho poderá ser maior do que a largura da junta de dilatação, ocasionando deformações.

Aplicações da Física: A lâmina bimetálica

1. Alguns equipamentos, como torradeira de pães, sanduicheira, máquina de fazer café, etc., se assemelham por possuírem esse dispositivo que controla a temperatura. A diferença é que cada um deles tem uma finalidade e eleva a temperatura a diferentes valores.

2. Ao ocorrer sobrecarga nas lâminas dos disjuntores, elas aquecem por meio do efeito joule e desarmam o dispositivo que as mantêm acionadas. No Capítulo 4 do Volume 3 desta coleção, vamos explicar detalhadamente o funcionamento dos dispositivos de segurança, entre eles o disjuntor.

15. a) É de se esperar que, em virtude da elevação de temperatura, tenha ocorrido uma dilatação do tanque de gasolina (sua capacidade tornou-se um pouco **maior**).

b) Não, em virtude de ter ocorrido uma dilatação no tanque, o volume que entornou representa a **dilatação aparente** da gasolina.

c) Se entornou uma parte da gasolina, concluímos que sua dilatação real foi **maior** do que a dilatação do tanque.

d) O tanque e a gasolina apresentavam o mesmo volume inicial V_0 (tanque cheio) e sofreram a mesma elevação de temperatura Δt. Como houve maior aumento no volume da gasolina, concluímos, pela expressão $\Delta V = \gamma V_0 \Delta t$, que o valor de γ para a gasolina é **maior** do que para o material do tanque.

16. a) A dilatação aparente é aquela que observamos. Neste caso terá sido, então, de 1,5 cm^3.

b) Na tabela 1.3 vemos que, para a glicerina, temos:

$$\gamma = 0{,}5 \cdot 10^{-3}\ °C^{-1}$$

Então, sua dilatação **real** foi:

$$\Delta V = \gamma V_0 \Delta t = (0{,}5 \cdot 10^{-3}) \cdot (100) \cdot (50 - 20)$$

$$\therefore \Delta V = 1{,}5\ cm^3$$

c) Vemos que a dilatação aparente da glicerina foi igual à sua dilatação real. É evidente, então, que não houve dilatação do recipiente, isto é, seu coeficiente de dilatação é **nulo** (muito pequeno).

17. a) Pela tabela 1.2 vemos que:

$$\alpha_{Al} = 23 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$$

Então:

$$\gamma_{Al} = 3\alpha_{Al} = 3 \cdot (23 \cdot 10^{-6}) \therefore \gamma_{Al} = 69 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$$

$$\text{ou } \gamma_{Al} = 6{,}9 \cdot 10^{-5}\ °C^{-1}$$

b) Deve-se observar que o líquido e o alumínio possuem o mesmo coeficiente de dilatação volumétrica. Então, aquecendo-se igualmente o líquido e o recipiente, eles se dilatarão igualmente e, assim, o nível do líquido **não se modificará**.

c) A dilatação aparente, isto é, aquela que é observada, terá sido evidentemente **nula**.

18. a) Ao passar de 2 °C para 4 °C, sabemos que o volume da água **diminui**.

b) Em virtude da contração sofrida, a densidade da água **aumentará** (densidade máxima a 4 °C).

c) Como houve um aumento na densidade da água, sabemos, da Hidrostática, que a esfera passará a flutuar com **menor** volume submerso.

Aplicações da Física: Avanços na tecnologia da medida e do controle da temperatura

1. A técnica de termografia é a mais indicada nesta situação.

2. Como a nossa mão não é um bom medidor de temperatura, já que a sensação térmica depende do ambiente anterior, para verificar se uma pessoa está com febre, é necessário "calibrar" a sensação térmica de nossa mão para que possamos perceber se a temperatura dessa pessoa está normal ou não. Assim, supondo que sua própria temperatura esteja normal, coloca-se a mão no pescoço para se acostumar com a própria temperatura e depois se coloca a mão no pescoço da outra pessoa. Caso a mão sinta uma temperatura maior, a outra pessoa poderá estar com febre. Em caso de dúvida, é eficiente ainda colocar a mão novamente em si mesmo para se certificar do resultado. Apesar de não conseguir medir o valor preciso da temperatura, esse método tem alguma precisão para indicar se alguém está mais quente do que deveria. Todavia, caso quem vá medir tenha feito alguma atividade física logo antes da medição, o resultado pode ser prejudicado, pois o seu corpo estará aquecido.

Pratique Física em equipe

1. Os efeitos desta experiência são facilmente observáveis, mostrando que há uma dilatação (e uma contração) bem acentuada da água. Os estudantes, em geral, sentem-se gratificados em realizar esta atividade. O professor poderá incentivar os alunos mais interessados a calibrar o dispositivo, transformando-o em um termômetro.

2. Para os alunos que realizaram a primeira experiência, esta atividade será feita com muita facilidade, pois não requer nenhum material adicional.

Problemas e testes

1. a) Correta, pois o pino se dilatará, ocasionando uma diminuição na folga existente.

b) Correta, pois o orifício aumentará de tamanho, tornando a folga maior.

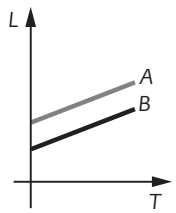
c) Correta, pois pela tabela 1.2 vemos que o coeficiente de dilatação do cobre é **maior** do que o do aço. Então, o orifício se dilatará mais do que o pino e, assim, a folga **aumentará**.

d) Errada, pelas razões analisadas em **c**.

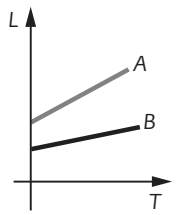
e) Correta, pois, com raciocínio semelhante ao da alternativa **c**, concluímos que o orifício se contrairá mais do que o pino e, assim, a folga diminuirá.

2. b

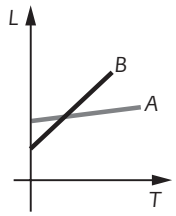
a)



b)



c)



Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

As duas barras possuem o mesmo coeficiente de dilatação e, pelos gráficos, vemos que o comprimento inicial de *A* é maior do que o de *B*. Por esse motivo, a barra *A* deverá se dilatar mais do que a *B* quando ambas sofrerem a mesma elevação de temperatura.

3. Os rebites normalmente são aquecidos até se tornarem avermelhados. Nessas temperaturas tornam-se maleáveis e, após serem introduzidos em orifícios, passando através das duas peças, têm suas extremidades amassadas de modo a uni-las firmemente. Quando se resfriam, a contração térmica dos rebites une ainda mais fortemente as duas peças.

4. a) Correto, pois um valor maior de γ acarreta maior dilatação do líquido, tornando possível perceber menores variações de temperatura.

b) Correto, pois quanto maior for o volume inicial do líquido, maior será a sua dilatação, possibilitando a observação de pequenas variações de temperatura.

c) Correto, pois quando o diâmetro do tubo de vidro é pequeno, mesmo para pequenas dilatações do líquido, será possível observar a variação da altura da coluna de líquido no tubo.

d) Correto, pois quanto menor for a dilatação do vidro, maior será a dilatação aparente do líquido.

e) Errado, pois este procedimento nada influirá na observação de pequenas dilatações do líquido (ele apenas possibilitará ao termômetro indicar um intervalo mais amplo de temperaturas).

5. a) A relação entre os **intervalos** $\Delta(1\,°C)$ e $\Delta(1\,°F)$ é:

$$100\,\Delta(1\,°C) = 180\,\Delta(1\,°F)$$

$$\therefore \Delta(1\,°C) = \frac{9}{5}\,\Delta(1\,°F) \text{ ou } \Delta(1\,°C) = 1{,}8\,\Delta(1\,°F)$$

isto é, uma **elevação** de 1 °C na temperatura de um corpo corresponde a uma elevação de **quase** 2 °F em sua temperatura. Portanto, a temperatura de *A* estava mais elevada do que a de *B*.

b) Como $\Delta(1\,°C) = 1{,}8\,\Delta(1\,°F)$, podemos concluir que o intervalo Δx procurado será dado por:

$$\Delta x = \frac{1{,}0 \text{ mm}}{1{,}8} \text{ ou } \Delta x = 0{,}55 \text{ mm}$$

6. É evidente que não poderia se tratar nem da escala Celsius, nem da escala Kelvin, pois o zero absoluto corresponde a -273 °C, ou a zero Kelvin, e não é possível atingir uma temperatura inferior a essa. Logo, a temperatura mencionada para Plutão é $T_F = -380$ °F.

Observação: Essa temperatura corresponde, na escala Celsius, a um valor T_C dado por:

$$\frac{T_C}{5} = \frac{-380 - 32}{9} \therefore T_C = -228\,°C$$

7. b

$$\frac{T_c}{5} = \frac{T_F - 32}{9}$$

$$\frac{T_c}{5} = \frac{87{,}8 - 32}{9}$$

$$T_c = 31\,°C$$

8. d

Como o coeficiente de dilatação do bronze é maior do que o do ferro, a lâmina maior (bronze) curva-se sobre a menor (ferro).

9. e

$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T$
$\Delta L = 10^{-6} \cdot 900\,000 \cdot (24 - (-6))$
$\Delta L = 27 \text{ m}$

10. a) Evidentemente, o metro do negociante, neste dia, terá um comprimento ligeiramente **maior** do que 1 m, em virtude da dilatação sofrida pelo metal.

b) Como o metro usado tem comprimento superior a 1 m, o comerciante terá prejuízo, pois estará vendendo um comprimento **superior** a 1 m pelo preço de 1 m do tecido. (Deve-se destacar para os estudantes que esse prejuízo é, na prática, completamente irrelevante, em virtude dos valores muito pequenos das dilatações da barra metálica.)

11. a) O procedimento é análogo àquele desenvolvido na seção 1.1 para relacionar as escalas Celsius e Fahrenheit (figura 1.10). Temos:

T_C divisões correspondem a T_R divisões

100 divisões correspondem a 80 divisões

Logo: $\frac{T_C}{100} = \frac{T_R}{80}$ ou $\frac{T_C}{5} = \frac{T_R}{4}$

b) Com $T_R = 20\,°R$, temos:

$$\frac{T_C}{5} = \frac{20}{4} \therefore T_C = 25\,°C$$

12. d

$$\frac{t_c}{5} = \frac{t_f - 32}{9} \Rightarrow t_f = \frac{9t_c}{5} + 32 = \frac{9 \cdot 70}{5} + 32 = 126 + 32 = 158\,°F$$

13. d

$$34\,°C \Rightarrow 0\,°D$$

$$78\,°C \Rightarrow 80\,°D$$

$$\therefore \frac{t_c - 34}{78 - 34} = \frac{t - 0}{80 - 0} \Rightarrow \frac{100 - 34}{44} = \frac{t}{80} \Rightarrow t = 120\,°D$$

Capítulo 2: Comportamento dos gases

Orientações específicas

O modelo do gás ideal, desenvolvido neste capítulo, é de fundamental importância para o ensino de Física, uma vez que fornece explicações para uma enormidade de fenômenos naturais, em particular, para aqueles relacionados aos sistemas termodinâmicos, os quais estão presentes em diversas aplicações tecnológicas, como motores a combustão, usinas termoelétricas, etc.

Para o ensino desse assunto, acreditamos ser importante considerar os seguintes pontos:

- A maneira como chegamos à equação $pV = nRT$, a partir das leis experimentais de Boyle, Gay-Lussac e Avogadro, é um excelente exemplo de como se pode articular resultados empíricos particulares para obter uma lei geral. Assim, discordamos do procedimento inverso, bastante difundido, de postular para o estudante essa equação e, com base nela, deduzir as leis específicas de Boyle, Gay-Lussac, etc. Apesar de menos trabalhoso para o professor, esse modo de apresentar as leis dos gases não corresponde à evolução histórica dos acontecimentos, passando ao aluno uma ideia distorcida do processo de desenvolvimento das ciências experimentais.
- Os alunos costumam acreditar que os conceitos relativos ao gás ideal não podem ser aplicados aos gases reais. Deve-se, então, fazer com que eles percebam que as equações aqui desenvolvidas podem sim ser aplicadas, com excelentes resultados, para descrever o comportamento dos gases reais, desde que esses gases não estejam submetidos a pressões muito elevadas e a temperaturas muito baixas. Neste capítulo, trazemos várias dessas aplicações, como aquela ilustrada no texto "Por que o balão sobe na atmosfera" da seção *Física no Contexto* e no texto "O planeta como uma grande estufa" da seção *Aplicações da Física*.
- O professor deve discutir cuidadosamente o exemplo do tópico 2.3 que ilustra o vínculo entre as grandezas relacionadas pela equação de estado: p, V, n e T. É fundamental que o aluno perceba que essas variáveis não podem ser escolhidas arbitrariamente, uma vez que devem satisfazer a equação $pV = nRT$, ou seja, fixado o valor para três dessas grandezas, a quarta fica automaticamente determinada. Esse vínculo ajuda o aluno a entender o significado do conceito de *estado* de um gás ideal.

Resoluções das atividades

Para iniciar a conversa

Além dos tradicionais sólido, líquido e gasoso, há também o condensado de Bose-Einstein e o plasma.

Pressão, volume, temperatura e massa.

De acordo com a teoria cinética dos gases, podemos dizer que moléculas de gases diferentes a uma mesma temperatura possuem a mesma energia cinética. A teoria de Avogadro amplia essa relação, acrescentando que volumes iguais de gases diferentes, à mesma temperatura e pressão, contêm o mesmo número de moléculas.

Verifique o que aprendeu

1. a) O estado de um gás fica definido quando conhecemos as seguintes grandezas: sua massa m, seu volume V, sua pressão p e sua temperatura T.

b) Dizemos que um gás sofreu uma transformação quando variam pelo menos duas das grandezas que caracterizam o estado do gás.

2. a) São os gases existentes na natureza: O_2, H_2, N_2, CO_2 etc.

b) Um gás ideal é aquele que obedece exatamente às leis que serão estudadas neste capítulo.

c) Os gases existentes na natureza, quando submetidos a pressões baixas e a altas temperaturas, comportam-se como um gás ideal.

3. a) Como não há entrada nem escapamento de ar no recipiente, a massa m do gás permanece constante. Além disso, como a transformação é isotérmica, o valor da temperatura T também não varia.

b) A pressão sobre o gás aumentou, e o seu volume diminuiu, isto é, p e V variaram.

4. Lembrando que, ao duplicar o valor de p, o valor de V reduz-se à metade; que triplicando p, teremos V dividido por 3, etc., é fácil completar a coluna de V. Em seguida, preenchendo a coluna com o produto de p e V observamos que este produto permanece constante (veja a resposta do exercício na seção *Respostas*).

5. a) O gráfico $p \times V$ está apresentado na seção *Respostas*.

b) Como sabemos, esta curva, representando uma transformação isotérmica, é denominada **isoterma** do gás ideal.

6. Como a temperatura é constante, temos $\rho \propto p$, concluímos que ao duplicar a pressão (de 0,50 atm para 1,0 atm) a densidade ρ também duplica (de 2,0 g/L para 4,0 g/L). Com raciocínio análogo, concluímos que os valores de ρ nos estados III e IV são 6,0 g/L e 8,0 g/L.

7. a) Supondo que não há entrada nem saída de gás no tubo, a massa m do gás que está sendo aquecida não varia. Além disso, a pressão sobre o gás não se altera, pois ela é exercida pela pressão atmosférica e pela coluna de Hg e ambas se mantêm constantes.

b) As demais grandezas, isto é, V e T, estão variando.

8. Lembrando que $T = T_C + 273$, completa-se a coluna de T(K), conforme vemos na seção *Respostas*, no livro do aluno, e observamos que os valores de T são duplos, triplos, etc. do valor inicial. Como, à pressão constante, temos $V \propto T$, podemos concluir que os valores de V serão também duplos, triplos, etc. do valor inicial.

Aplicações da Física: O planeta como uma grande estufa

1. Há várias possibilidades de respostas. Um aumento de temperatura faria com que diversos animais e plantas, sensíveis à temperatura ambiente, sofressem consequências adversas durante os invernos e os verões mais intensos, afetando o ecossistema a que pertencem. Outra consequência importante seria a elevação do nível dos mares, com o derretimento das camadas de gelo polares e geleiras. Com a elevação do nível da água, diversas regiões litorâneas poderiam ser afetadas, levando sua população a se deslocar para longe da costa, o que afetaria diretamente o Brasil, dado que o litoral, considerando saliências e reentrâncias da costa, tem cerca de 9 200 km de extensão. Além disso, a Amazônia e o Nordeste poderiam sofrer consequências irreversíveis. A floresta é essencial no ciclo de carbono do planeta, entretanto nada é feito para combater o problema. O desmatamento de áreas verdes em regiões de floresta dá lugar a áreas agrícolas e pastos, em que temos a transferência de carbono (CO_2) da biosfera para a atmosfera, contribuindo para o aquecimento global, o qual, por sua vez, acaba atuando sobre o ecossistema da própria região.

2. Há várias possibilidades de respostas. O professor deve promover um debate sobre o tema. Uma das dificuldades em alcançar uma concordância entre as pesquisas dos cientistas deve-se à difícil interpretação das variações do sistema climático, pois este é composto da interação entre diversas variáveis climáticas: a intensidade da radiação solar, a composição da atmosfera, as dimensões dos oceanos, a formação do gelo, os seres vivos, os continentes, a vegetação, etc. Qualquer alteração em uma dessas variáveis implica uma variação de maior ou menor impacto no sistema climático como um todo. Para alguns cientistas, o aquecimento global é causado pelo homem por diversos motivos que foram apresentados no texto, tendo em conta que nas últimas décadas a temperatura tem aumentado bruscamente; entretanto, outros cientistas vão afirmar que a interferência humana é insignificante (cerca de 3%) diante dos fatores de mudanças climáticas naturais. Eles afirmam que o planeta está passando apenas por uma variação climática, que o clima terrestre se modificou inúmeras vezes ao longo da história climática e que a média da temperatura, milhões de anos atrás, era até mesmo superior à atual. Assim, no período da história climática do planeta em que estamos há um aumento de temperatura, mas em breve deverá haver um período mais frio. Esses cientistas afirmam ainda que o declínio de grandes civilizações teve influência direta das mudanças climáticas. Como exemplo menciona-se o deserto do Saara, que muito tempo atrás, em vez de ser seco e quente como hoje, era povoado e próspero. Outro exemplo é a Groenlândia, que atualmente é coberta de gelo, mas no passado era uma área verde com florestas habitadas pelos *vikings*.

Qualquer que seja a situação, devemos lembrar que nosso papel de habitante do planeta é assegurar que o desenvolvimento econômico seja sustentável do ponto de vista ambiental.

9. a) Como, em qualquer estado do gás, devemos ter $pV = nRT$, concluímos que pV também é igual a 26 atm · L.

b) De $pV = 26$ atm · L, com $p = 2{,}0$ atm, vem:

$$2{,}0\,V = 26 \therefore V = 13\text{ L}$$

10. a) Como 1 mol de O_2 corresponde a 32 g, teremos:

$$n = \frac{480}{32} \therefore n = 15\text{ mols}$$

b) Nestas condições, temos:

$$R = 8{,}31\text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

c) Da equação $pV = nRT$ obtemos:

$$T = \frac{pV}{nR} = \frac{2{,}0 \cdot 10^5 \cdot 0{,}15}{15 \cdot 8{,}31} \therefore T = 241\text{ K}$$

d) De $T = T_C + 273$, vem:

$$T_C = T - 273 = 241 - 273 \therefore T_C = -32\,°\text{C}$$

11. Para que seja possível encontrar um gás em certo estado, é necessário que, neste estado, tenhamos o produto pV igual ao produto nRT ($pV = nRT$). No estado desejado, teremos:

$$pV = 1{,}5\text{ atm} \cdot 15\text{ L} \therefore pV = 22{,}5\text{ atm} \cdot \text{L}$$

$$nRT = 0{,}50 \cdot 0{,}082\,\frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \cancel{\text{K}}} \cdot 300\,\cancel{\text{K}}$$

$$\therefore nRT = 12{,}3\text{ atm} \cdot \text{L}$$

Como $pV \neq nRT$, podemos afirmar que é impossível alcançar as condições desejadas pela pessoa.

12. Como as moléculas estão em constante movimento, elas colidem sucessivamente contra as paredes do recipiente. Essas colisões dão origem à pressão exercida pelo gás.

13. O aluno deve utilizar a relação $p = (1/3)(N/V)M\overline{v^2}$. Temos:

a) O valor de N foi duplicado. Como as demais grandezas não variaram, concluímos que p duplicará, pois $p \propto N$. Assim, a nova pressão será:

$$p = 2 \cdot 1{,}2 \text{ ou } p = 2{,}4\text{ atm}$$

b) Como o valor de N foi duplicado e o valor de V também foi duplicado, vemos que o valor de p não se altera, permanecendo igual a 1,2 atm.

c) A massa molecular do H_2 é 2 u.m.a. e a massa atômica do He é 4 u.m.a. Então, o valor de m na equação citada torna-se **2 vezes maior** quando o He substitui o H_2. Como as demais grandezas não variam e $p \propto m$, concluímos que a pressão exercida pelo He será **2 vezes maior** do que a pressão do H_2, isto é, será:

$$p = 2 \cdot 1{,}2 \text{ ou } p = 2{,}4\text{ atm}$$

14. a) Sabemos que:

$$\overline{E}_c = \frac{3}{2}kT = \frac{3}{2} \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 1\,000$$

$$\therefore \overline{E}_c = 2{,}07 \cdot 10^{-20}\text{ J}$$

b) Como $\overline{E}_c \propto T$, concluímos que o valor de $\overline{E}_c$ também será duplicado.

c) A relação $\overline{E}_c = (3/2)kT$ mostra-nos que, se $T = 0$, teremos $E_c = 0$, isto é, a energia cinética das moléculas se anulará no zero absoluto.

15. a) O número N de moléculas na amostra gasosa é constante, e o número delas por unidade de volume é N/V. Então, se V foi dividido por 5, teremos (N/V) multiplicado por 5, isto é, o número de moléculas por unidade de volume do gás torna-se 5 vezes maior.

b) Teremos um número de colisões por segundo também **5 vezes maior** (como é fácil perceber).

c) A pressão p do gás é proporcional ao número de colisões por segundo que as moléculas realizam contra as paredes do recipiente. Assim, p torna-se **5 vezes maior**.

d) Sim, pois podemos concluir que p e V são inversamente proporcionais (supondo T = constante), também a partir das ideias de Bernoulli.

16. a) A equação obtida por J. Herapath é $p = (1/3)\rho\overline{v^2}$. Temos, então:

$$\overline{v^2} = \frac{3p}{\rho} = \frac{3 \cdot 1{,}0 \cdot 10^5}{1{,}3} \therefore \overline{v^2} = 2{,}3 \cdot 10^5\text{ m/s}$$

Podemos ter uma ideia do valor médio das velocidades moleculares se calcularmos a raiz quadrada de $\overline{v^2}$, isto é:

$$v_m = \sqrt{\overline{v^2}} = 480\text{ m/s}$$

b) Como Herapath obteve um valor de cerca de 300 m/s, a diferença entre os dois valores é de 180 m/s. Para expressar essa diferença em forma percentual, podemos estabelecer a seguinte proporção:

$$480\text{ m/s} \text{ —— } 180\text{ m/s}$$

$$100 \text{ —— } x$$

$$x = \frac{180 \cdot 100}{480} \text{ ou } x = 37\%$$

Como o valor encontrado por Herapath representava a primeira estimativa na história da Física para o valor da velocidade de uma molécula, não poderíamos esperar uma avaliação de grande precisão, e a diferença percentual encontrada é compreensível.

17. No texto dissemos que no princípio do século XX muitos cientistas, de várias partes do mundo, ainda se recusavam a aceitar a ideia de ser a matéria constituída de átomos ou moléculas em movimento.

A grande importância do trabalho de Einstein sobre o movimento browniano foi conseguir convencer a comunidade científica da existência de átomos e moléculas.

18. a) O botânico R. Brown observou que pequenas partículas, como grãos de pólen, em suspensão no interior de um líquido, moviam-se incessante e irregularmente. O movimento dessas partículas foi denominado **movimento browniano**.

b) Segundo Einstein, as partículas se movimentavam em virtude das colisões que recebiam das moléculas do líquido no qual eram mergulhadas. A figura 2.18 ilustra essa ideia de Einstein.

c) Muitos cientistas do início do século recusavam a existência de átomos ou moléculas. O trabalho de Einstein sobre o movimento browniano foi determinante para alterar essa situação.

Pratique Física em equipe

1. Não há dificuldades em realizar e interpretar esta experiência. Entretanto, os efeitos serão muito mais visíveis usando a lata recomendada, que pode ser levada diretamente ao fogo. Nessas condições, o estudante perceberá nitidamente que tanto a pressão quanto o volume do ar aumentam quando ele é aquecido (inflando o balão). Quando o recipiente é resfriado, evidentemente observamos os efeitos inversos.

2. Espera-se que os estudantes observem que no copo mais quente o corante se difunde rapidamente, enquanto no copo com água fria o corante se difunde mais lentamente. Isso acontece porque a energia das moléculas aumenta com a temperatura. Com isso, os choques são mais fortes entre as moléculas de água e as do corante, o que faz com que no copo mais quente o corante se disperse mais rapidamente.

INTEGRANDO... conceitos para entender o congelamento da água

1. A tensão superficial da água é causada pelas pontes de hidrogênio que unem suas moléculas. A superfície da água, em virtude dessa propriedade, torna-se mais rígida que o restante, funcionando como uma membrana. Microrganismos são sustentados por essa "membrana" e, assim, são capazes de viver sobre ela. Mesmo alguns insetos conseguem caminhar sobre a superfície livre da água em razão dessa maior rigidez proporcionada pela tensão superficial.

2. O gelo não conduz bem o calor através dele. Em outras palavras, o gelo é um isolante térmico que, na situação do lago, impede que a água submersa (mais quente) perca calor para o ar frio. Ou seja, o gelo ajuda a manter a água à temperatura de 4 °C. Note ainda que a quantidade de calor que a água deveria perder para resfriar é enorme, dado seu alto calor específico e o grande volume de água submerso.

3. Apesar de existirem impurezas na rede cristalina, caso o gelo fosse 100% puro, não haveria nada nesses espaços vazios, ou seja, haveria vácuo.

Problemas e testes

1. a) A temperatura da bolha não vai se modificar enquanto ela sobe (a temperatura do lago é uniforme). Então, a transformação é isotérmica.

b) A pressão p no fundo do lago é igual à soma da pressão atmosférica local com a pressão exercida pela água. Como 30 m de água exerce uma pressão de 3,0 atm, teremos:

$$p = 1{,}0 + 3{,}0 \therefore p = 4{,}0 \text{ atm}$$

c) Pela lei de Boyle, temos: $pV = p'V'$ em que p e V são a pressão e o volume da bolha no fundo do lago e p' e V' referem-se à superfície ($p' = 1{,}0$ atm). Logo:

$$4{,}0 \cdot 2{,}5 = 1{,}0 \cdot V' \therefore V' = 10 \text{ cm}^3$$

2. Como o gás encontra-se à mesma temperatura nos dois estados, deveríamos ter $p_1V_1 = p_2V_2$. Com os dados fornecidos, temos:

$$p_1V_1 = 70 \cdot 20 \text{ ou } p_1V_1 = 1{,}4 \cdot 10^3 \text{ (cmHg)} \cdot \text{cm}^3$$
$$p_2V_2 = 120 \cdot 10 \text{ ou } p_2V_2 = 1{,}2 \cdot 10^3 \text{ (cmHg)} \cdot \text{cm}^3$$

Como $p_1V_1 \neq p_2V_2$, houve escapamento e, consequentemente, uma redução da massa de gás no recipiente. Assim, a lei de Boyle não é obedecida, pois ela se aplica a uma **dada massa** de gás.

3. I: a) Suponhamos que a temperatura do ambiente mantenha-se constante (isso é razoável para um intervalo de tempo não muito longo). Como o gás mantém-se em equilíbrio térmico com o ambiente, essa transformação será **isotérmica**.

b) Como sabemos, a equação que se aplica a esta transformação é pV = constante.

II: a) A pressão sobre o gás se manterá invariável, sempre igual à soma da pressão atmosférica com a pressão da coluna de Hg. Então, a transformação é **isobárica**.

b) Nesta transformação, V aumenta proporcionalmente a T, isto é, $V \propto T$ ou V/T = constante.

III: a) Como o recipiente não é dilatável, o volume do gás não varia, isto é, a transformação é **isovolumétrica**.

b) Como V é constante, temos $p \propto T$ ou p/T = constante.

Observação: Em nenhum dos três casos houve variação da massa gasosa no recipiente.

4. c

Se conhecermos a massa molecular da substância procurada, poderemos identificá-la entre as alternativas apresentadas. Então, calculemos inicialmente o número de moles, n, contido na amostra. De $pV = nRT$, obtemos $n = pV/RT$. Como $p = 2{,}0$ atm, $T = 273 + 47$ ou $T = 320$ K e $V = 8{,}2$ L, deveremos usar $R = 0{,}082$ atm · L/mol K (o valor de R deve ser fornecido, pois os alunos não devem se preocupar em memorizá-lo).

Então:

$$n = \frac{pV}{RT} = \frac{2{,}0 \cdot 8{,}2}{0{,}082 \cdot 320} \quad \therefore n = 0{,}625 \text{ mol}$$

Sendo M o valor da massa molecular da substância expresso em gramas (massa de 1 mol), temos $n = m/M$. Assim, como $m = 20$ g:

$$M = \frac{m}{n} = \frac{20}{0{,}625} \text{ ou } M = 32 \text{ g}$$

Logo, a massa molecular da substância é 32 u.m.a. Das substâncias apresentadas, aquela que possui essa massa molecular é o O_2.

5. a) $pV = nRT$

$$pV = \frac{N}{N_A}RT$$
$$\frac{N}{V} = \frac{N_A}{RT}$$
$$\frac{N}{V} = \frac{3{,}2 \cdot 10^{-8} \cdot 6 \cdot 10^{23}}{8 \cdot 300}$$
$$\frac{N}{V} = 8 \cdot 10^{12} \frac{\text{moléculas}}{\text{m}^3}$$

b) $\frac{p_{sub}}{p_{nave}} = \frac{\rho \cdot g \cdot h_{sub}}{1\,atm}$

$\frac{p_{sub}}{p_{nave}} = \frac{1000 \cdot 10 \cdot 100Pa}{10^5 Pa}$

$\frac{p_{sub}}{p_{nave}} = 10$

6. $\frac{P_1V_1}{n_1T_1} = \frac{P_2V_2}{n_2T_2}$

$\frac{T_2}{T_1} = \frac{n_1P_2V_2}{n_2P_1V_1}$

$\frac{T_2}{T_1} = \frac{n_1 \cdot 2P_1 \cdot 12V_1}{3n_1 \cdot P_1 \cdot V_1}$

$\frac{T_2}{T_1} = \frac{24}{3}$

$\frac{T_2}{T_1} = 8$

7. **01)** afirmativa incorreta, pois os pneus aquecem e há variação na pressão.

02) afirmativa correta.

04) afirmativa incorreta, pois a variação de volume causa variação do número de mols.

08) afirmativa correta.

16) afirmativa incorreta, pois:

$V = \pi h (R^2 - r^2)$
$V = 3{,}14 \cdot 18 \cdot (19^2 - 14^2)$
$V = 9\,325{,}8\ cm^3$
$V = 9{,}3\ L$

32) afirmativa correta.

8. O estado inicial do gás está representado pelo ponto *A* na figura da resposta deste problema.

I: ao se expandir isotermicamente, o volume do gás tornou-se 4 vezes maior (de $V_A = 3{,}0\ cm^3$ para $V_B = 12\ cm^3$). Portanto, sua pressão tornar-se-á 4 vezes menor, passando a valer $p_B = p_A/4 = 1{,}0$ atm. Esta transformação é representada pela hipérbole *AB* (veja a figura na seção *Respostas*).

II: como a pressão permanece constante, esta transformação é representada pelo segmento *BC* mostrado na na seção *Respostas*.

III: finalmente, como o volume permanece constante e o gás retorna ao estado inicial, temos o segmento *CA* representando esta transformação.

9. c

O volume inicial de ar é 100 mL.

O volume final de ar é 140 mL.

Processo isotérmico $\therefore pV =$ constante

$10^5 \cdot 100 = p140 \therefore p = 0{,}71 \cdot 10^5$ Pa = 71 000 Pa

10. $p_{ar} + p_{Hg} = p_{atm}$

$p_{atm} \cdot A \cdot H_0 = p_1 \cdot A \cdot H_1 \ \therefore \ p_1 = p_{atm} = \frac{375}{x}$ cmHg

$p_{Hg} = dgh_{Hg} = (25 - x)$ cmHg

$\frac{375}{x} + 25 - x = 75 \ \therefore \ x^2 + 50x - 375 = 0$

Resolvendo a equação do segundo grau temos:

$x_1 = 6{,}65\ cm \therefore h_{Hg} = 25 - x_1 = 18{,}38\ cm = 18{,}4\ cm$

11. e

Analisando cada uma das afirmações.

I. Correta. Por isso ela é chamada constante universal.

II. Correta. Da equação de Clapeyron:

$$PV = nRT$$

$$\frac{p_AV_A}{T_A} = \frac{p_BV_B}{T_B}$$

Se os gases apresentam a mesma pressão, o mesmo volume e a mesma temperatura, eles contêm o mesmo número de mols, portanto, o mesmo número de moléculas.

III. Correta. É exatamente o que afirma a equação de Boltzmann: $e_c = kT$.

Infográfico

1. Antigamente, usava-se hidrogênio para encher os dirigíveis. Porém, esse gás é inflamável e provocou vários acidentes (o mais conhecido foi a tragédia do dirigível Hindenburg em 1937, que explodiu durante o pouso, matando 36 passageiros). Em razão disso, o hidrogênio foi substituído pelo gás hélio, que é menos eficiente para a sustentação do dirigível, mas não é inflamável.

2. Porque são veículos lentos (voam em média a 80 km/h, enquanto um avião Boeing 737 voa a quase 900 km/h) e são muito vulneráveis a condições climáticas ruins. Porém, como são econômicos (usam pouco combustível), são utilizados em atividades como monitoramento ambiental, publicidade, vigilância aérea, etc.

3. O dirigível mais usado atualmente é o chamado dirigível semirrígido. Ele tem uma estrutura de metal na qual o envelope de lona (o balão) se apoia. Essa estrutura ajuda a manter o formato do veículo.

4. Um dirigível cheio de gás hélio pode teoricamente ultrapassar a atmosfera, atingindo 20 mil km de altitude! Porém, na prática, ele viaja no máximo a 20 km de altitude.

5. Dentro do envelope (balão) existem pequenos balões, os balonetes, que têm ar em vez de hélio. Na decolagem eles ficam meio cheios. Quando a aeronave atinge a altitude ideal, o piloto libera a entrada de mais ar nos balonetes. Assim, o dirigível ganha peso e para de subir. Na operação de descida, o piloto enche os balonetes com mais ar.

6. Para andar para a frente, o piloto aciona um motor com hélices, que fica acoplado à gôndola do dirigível. Sem motor, o veículo dependeria das correntes de ar para se deslocar. Para virar à esquerda ou à direita, o piloto usa o leme, que fica na cauda. Existem ainda outros equipamentos que ajudam no controle do voo, como o profundor, que permite embicar para baixo ou para cima.

7. A autonomia de um dirigível varia de modelo para modelo e de fatores como o peso da aeronave. No Brasil, a autonomia média dos dirigíveis é de sete horas em altitude e velocidade constantes.

Unidade 2 — Calor

Capítulo 3: Termodinâmica

Orientações específicas

Nesta unidade, continuamos o estudo dos fenômenos térmicos, abordando, neste capítulos, a 1ª e a 2ª lei da Termodinâmica. Trata-se de um dos capítulos mais importantes dentre aqueles relacionados com os fenômenos térmicos, pois essas são leis fundamentais da Física, situando-se, em importância, no mesmo nível das leis de Newton, da Lei de Gravitação Universal, das equações de Maxwell, etc.

Os seguintes comentários podem ser feitos sobre o desenvolvimento do capítulo:

- A ideia do calor como uma forma de energia é apresentada no tópico 3.1, e a experiência realizada por Joule para verificar essa equivalência está descrita no texto "Calor e energia mecânica – A experiência de Joule" da seção *Física no Contexto*. Recomendamos que a leitura e discussão desse texto sejam introduzidas como atividades propostas deste capítulo, e que o professor aproveite a oportunidade para retomar, com os alunos, os conceitos de energia cinética, potencial e mecânica.
- O professor deve alertar seus alunos para as informações apresentadas no primeiro comentário do tópico 3.1. Na linguagem do dia a dia é razoável dizer que se está com calor; mas os alunos precisam entender que, em termos conceituais, essa afirmação não tem significado, já que calor não é uma forma de energia contida no corpo, mas sim a energia que está sendo transferida para ele.
- Em um curso de Física para o Ensino Médio, o professor não deve se preocupar com excesso de rigor nas definições, pois essa necessidade, em geral, não é percebida por um iniciante. A definição de 1 *caloria*, por exemplo, pode ser apresentada como fizemos no tópico *Unidades de calor* e na figura 3.2, sem a preocupação de especificar que a elevação de 1 °C deve ocorrer no intervalo entre 14,5 °C e 15,5 °C. Essa condição, para que fosse compreendida pelo aluno, deveria ser acompanhada de sua explicação, que, por sua vez, foge do escopo do capítulo.
- Conforme foi comentado no Volume 1, Capítulo 1, existe uma tentativa mundial de adoção do Sistema Internacional de Unidades. O calor, como forma de energia, não deve ser tratado de modo diferente, ou seja, a sua unidade é o *joule*, e não a *caloria*. No entanto, como ainda é muito comum em nosso país o uso da caloria, preferimos manter essa unidade de medida em nosso texto e em alguns problemas resolvidos e propostos.
- Não é recomendável o tratamento matemático, por meio da lei de Fourier, no estudo da transferência de calor. Em nossa opinião, esse assunto deve ser desenvolvido apenas qualitativamente, como foi feito no tópico 3.2, por isso deixamos seu estudo quantitativo para o apêndice, ficando sua inserção no curso a critério e disponibilidade do professor.
- No tópico 3.4, o estudo quantitativo do trabalho realizado por um sistema gasoso foi feito apenas para o caso de uma transformação isobárica. Assim, evitamos abordar o cálculo do trabalho em outras transformações, nas quais a força exercida pelo sistema é variável. Nesses outros casos, o trabalho deve ser obtido pelo cálculo da área sob o gráfico $p \times V$ e, para o desenvolvimento de nosso curso, uma análise como essa não teria utilidade, podendo perfeitamente ser dispensada, daí deixarmos seu tratamento também para o apêndice do capítulo.
- O professor deve deixar bem claro para os estudantes que a 1ª lei da Termodinâmica é uma maneira de expressar o Princípio de Conservação da Energia. Assim, apesar de em nosso texto ela ter sido estabelecida apenas para sistemas gasosos, de fato, estamos tratando de uma lei geral, que pode ser aplicada a sistemas de qualquer natureza: mecânica, térmica, elétrica, etc. Essa generalização se torna evidente no texto "Termodinâmica e corpo humano" da seção *Integrando*, na qual exemplificamos como usar essa lei para entender as transformações de energia que ocorrem no interior de nosso corpo.

Resoluções das atividades

Para iniciar a conversa

No sistema solar fotovoltaico há transformação da radiação solar em energia elétrica pela produção de corrente elétrica quando a radiação solar incide em materiais semicondutores, enquanto no sistema solar térmico não há produção de energia elétrica, ou seja, a água é apenas aquecida pela radiação solar.

O principal obstáculo é o custo das células solares ou fotovoltaicas em comparação com usinas hidrelétricas, termelétricas e a gás.

No Brasil, o sistema solar fotovoltaico de geração de eletricidade é amplamente empregado no suprimento de eletricidade em comunidades rurais e/ou isoladas, com destaque para as regiões Norte e Nordeste. Há diversos meios de utilização do sistema solar fotovoltaico. Entre eles, destacam-se o bombeamento de água para abastecimento doméstico, irrigação e piscicultura, a iluminação pública; a eletrificação de escolas, de postos de saúde e de centros comunitários.

Verifique o que aprendeu

1. a) O valor de T_A terá diminuído e o de T_B terá aumentado.

b) A causa era a passagem de calórico do corpo *A*, mais quente, que possuía maior quantidade de calórico, para o corpo *B*, mais frio.

2. a) Quanto maior for a temperatura de um corpo, maior é a sua energia interna. Consequentemente, a energia interna de *A* diminuiu e a de *B* aumentou.

b) Sim, houve transferência de energia de *A* para *B*.

c) Esta energia que se transferiu de *A* para *B*, em virtude da diferença de temperatura entre eles, é denominada calor.

3. a) Sim, pois sua temperatura aumentou.

b) Não, pois o chumbo não foi colocado em contato com nenhum corpo a uma temperatura superior à dele.

c) A energia interna do bloco de chumbo aumentou porque ele recebeu energia mecânica por meio do trabalho realizado pelos golpes do martelo.

4. a) Como 1 cal = 4,18 J, temos:

$$100 \text{ cal} = 100 \cdot 4{,}18 \text{ J} = 418 \text{ J}$$

b) Usando a equivalência 1 cal = 4,18 J, temos:

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

$$836 \text{ J} \longrightarrow x$$

$$\Rightarrow x = \frac{836}{4{,}18} = 200$$

Isto é, 836 J = 200 cal.

Então, se fossem cedidas 200 cal ao chumbo, sua temperatura sofreria o mesmo acréscimo provocado pelo trabalho de 836 J realizado sobre ele pelo martelo.

5. a) Não, pois, sendo o metal um bom condutor de calor, a barra metálica se aquece rapidamente em toda a sua extensão.

b) Porque, sendo a madeira um material que não conduz bem o calor, a temperatura da extremidade livre não sofrerá uma elevação apreciável.

6. a) Não, pois não existe esta grandeza a que as pessoas leigas denominam frio. A sensação de frio é causada por uma perda de calor sofrida por nosso corpo. Assim, o agasalho impede que o calor seja transmitido do corpo da pessoa para o exterior.

b) Como o ladrilho é melhor condutor de calor do que o tapete, o pé esquerdo do menino perderá calor mais rapidamente do que seu pé direito. Consequentemente, o menino terá maior sensação de frio em seu pé esquerdo (em contato com o ladrilho).

7. a) Quando estamos próximos a um corpo muito aquecido, a maior parte do calor que recebemos dele é transmitida para nós por **radiação**.

b) A temperatura do carro escuro será mais elevada, porque ele absorve maior quantidade de radiação solar do que o carro claro.

8. a) As cavidades entre os pedaços de carvão possuem um comportamento de **corpo negro**. Dessa forma, dizemos que a emissividade das cavidades é próxima de 1. Assim, quando frias, as cavidades são negras, mas, quando aquecidas, são excelentes radiadores de calor.

b) É possível observar essa gradação de cores logo após formar o braseiro. As cores predominantes são tons de vermelho, além de tons amarelo e branco.

9. A radiação solar que consegue atravessar a atmosfera (em grande parte na faixa do visível, para o qual a atmosfera é transparente) provoca um aquecimento da superfície terrestre, fazendo sua temperatura ficar em torno dos 300 K. Nessa temperatura, a superfície da Terra irradia infravermelho. Os gases estufa, como o gás carbônico, ao bloquearem parte dessa emissão em direção ao espaço, diminuem a perda de energia sofrida pela Terra contribuindo para aumentar sua temperatura.

Aplicações da Física: Câmaras Termográficas

1. Há uma lista bem grande de aplicações. Podemos destacar a inspeção de equipamentos elétricos (motores, quadros de comando, subestações), inspeção de processos (equipamentos de montagem e manufatura automatizados) e na inspeção de construções (verificação e detecção de umidade em telhados e de vazamento de ar).

2. É um método que utiliza radiação infravermelha e que não faz mal para as pessoas como os raios X em excesso; é indolor; não há necessidade de tomar contraste, que é uma substância que pode provocar alergias em pacientes submetidos a exames de ressonância magnética, tomografia computadorizada e raios X, nem tem contraindicação para crianças, gestantes e idosos.

10. a) A capacidade térmica do bloco será $C = \Delta Q/\Delta T$, em que $\Delta Q = 330$ cal e $\Delta T = 50\ ^\circ\text{C} - 20\ ^\circ\text{C} = 30\ ^\circ\text{C}$.

Então:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{330}{30} \Rightarrow C = 11 \text{ cal/}^\circ\text{C}$$

b) Este resultado significa que são necessárias 11 cal para elevar 1 °C da temperatura do bloco.

11. a) Como os dois blocos são feitos do mesmo material, o calor específico de A é igual ao de B.

b) De $c = C/m$ temos $C = cm$. Como o valor de c é o mesmo para os dois blocos e $m_A > m_B$, concluímos que $C_A > C_B$.

c) De $C = \Delta Q/\Delta T$ obtemos $\Delta Q = C\Delta T$. Como o valor de ΔT é o mesmo para os dois blocos, vemos que vai absorver ou liberar maior quantidade de calor aquele que tiver maior capacidade térmica (o bloco A).

12. a) O recipiente que contém a concha de alumínio.

b) Como as massas das conchas são idênticas e o calor específico do alumínio é maior, a concha feita desse metal é a que apresenta a maior capacidade térmica. Supondo-se que as conchas têm inicialmente a mesma temperatura, a concha de alumínio é a que absorverá maior quantidade de calor até entrar em equilíbrio térmico com a água em ebulição. Dessa forma, quando colocada no recipiente com água à temperatura ambiente, a concha de alumínio terá maior impacto na elevação da temperatura da água.

13. a) Esta quantidade de calor é dada por $\Delta Q = mc\Delta T$, em que $m = 200$ g, $c = 0{,}094$ cal/g °C (obtido da tabela 3.1) e $\Delta T = 80\,°C - 30\,°C = 50\,°C$. Então:

$$\Delta Q = mc\Delta T = 200 \cdot 0{,}094 \cdot 50 \Rightarrow \Delta Q = 940 \text{ cal}$$

Observação: Deve-se notar que, sendo o valor de c expresso em cal/g °C, devemos expressar m em gramas e ΔT em °C para obter ΔQ em cal.

b) De $\Delta Q = mc\Delta T$ obtemos

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{mc} = \frac{186}{200 \cdot 0{,}094} \Rightarrow \Delta T \simeq 10\,°C$$

14. a) Como o gás se expandiu, temos $V_f > V_i$, e, então, a variação do volume foi **positiva**.

b) Como a variação do volume foi positiva, o trabalho realizado também é **positivo**.

c) Quando há um aumento do volume do sistema, dizemos que o trabalho foi realizado **pelo sistema**.

15. a) **Sim**, havendo uma pressão do gás, ele está exercendo uma força sobre o pistão ($F = pA$).

b) Durante o aquecimento, a pressão do gás aumenta e, assim, aumenta também o valor desta força.

c) **Não**, pois o volume do gás foi mantido constante.

d) Como não há deslocamento do pistão, não há realização de trabalho nesta transformação.

16. a) Como o volume do gás permaneceu constante, o trabalho realizado por ele é nulo ($\mathcal{C} = 0$).

b) De $\Delta U = Q - \mathcal{C}$, com $Q = -170$ cal (calor liberado) e $\mathcal{C} = 0$; logo, $\Delta U = -170$ cal.

c) Como ΔU é negativo, concluímos que a energia interna U **diminuiu** de 170 cal (uma diminuição em U igual ao calor liberado).

17. a) A energia interna tenderá a **aumentar**. Então, a colaboração de Q na equação deve ser tal que tenda a tornar ΔU **positivo**. Logo, Q deve ser **positivo**.

b) A energia tenderá a **diminuir**. Então, Q deve colaborar para tornar ΔU **negativo**. Portanto, Q deve ser **negativo**.

18. a) Temos:

$$Q = 50 \text{ cal} = 50 \cdot 4{,}2 \text{ J} = 210 \text{ J}$$

b) Esta variação é dada por $\Delta U = Q - \mathcal{C}$. Como o calor foi absorvido pelo sistema, Q é positivo ($Q = 210$ J). Sendo o trabalho realizado pelo sistema, teremos $\mathcal{C}$ também positivo ($\mathcal{C} = 320$ J). Então:

$$\Delta U = Q - \mathcal{C} = 210 - 320 \Rightarrow \Delta U = -110 \text{ J}$$

c) A energia interna do sistema diminui 110 J, porque ele realiza um trabalho de 320 J, que é maior do que o calor de 210 J que foi absorvido.

19. a) Como foi analisado no texto, na compressão adiabática há um **aumento** tanto na temperatura quanto na energia interna do gás.

b) Como a compressão foi feita rapidamente, não há absorção de calor pelo gás (compressão adiabática).

c) A elevação da temperatura deve-se a um aumento na energia interna do gás, causado pelo trabalho realizado sobre ele.

20. a) Temos:

$$Q = 150 \text{ cal} = 150 \cdot 4{,}2 \text{ J} = 630 \text{ J}$$

b) $\Delta U = Q - \mathcal{C} = 630 - 630 \Rightarrow \Delta U = 0$

c) Como $\Delta U = 0$, não houve variação da energia interna, e, consequentemente, a temperatura do gás também não variou.

d) Se a temperatura permaneceu constante, a transformação é **isotérmica** (deve-se observar que, nesta transformação, o gás realizou um trabalho igual ao calor absorvido, em concordância com a análise feita no texto dessa seção).

21. a) Observando que o chumbo teve a sua temperatura reduzida de 100 °C para 30 °C, o valor numérico do calor por ele liberado será:

$$\Delta Q = mc\Delta T = 200 \cdot c \cdot (100 - 30) \Rightarrow \Delta Q = 200 \cdot c \cdot 70 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \Delta Q = 1\,400c \text{ cal}$$

b) Como a capacidade térmica do calorímetro é nula ($C = 0$), o calor absorvido por ele é nulo ($\Delta Q = C\Delta T = 0$).

c) Os 50 g de água têm sua temperatura elevada de 20 °C para 30 °C. Então, o calor que a água absorveu foi:

$$\Delta Q = mc\Delta T = 50 \cdot 1 \cdot (30 - 20) \Rightarrow \Delta Q = 500 \text{ cal}$$

d) Como, no calorímetro, temos calor cedido = calor absorvido, podemos dizer que o calor liberado pelo chumbo é igual ao calor absorvido pela água. Então:

$$200 \cdot c \cdot (100 - 30) = 500 \Rightarrow c \simeq 0{,}035 \text{ cal/g °C}$$

22. Lembrando-se da relação $\Delta Q = mc\Delta T$ e observando que a água fria tem sua temperatura elevada de 20 °C para T_f, temos:

calor absorvido pela água fria $= 100 \cdot 1 \cdot (T_f - 20)$

Como a água quente tem sua temperatura reduzida de 80 °C para T_f, vem:

calor cedido pela água quente $= 200 \cdot 1 \cdot (80 - T_f)$.

Então, podemos escrever:

$$200 \cdot (80 - T_f) = 100 \cdot (T_f - 20)$$

Resolvendo esta equação, obtemos o valor de T_f:

$$2 \cdot (80 - T_f) = T_f - 20 \Rightarrow 160 - 2T_f = T_f - 20 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow 3T_f = 180 \Rightarrow T_f = 60\ ^\circ C$$

23. a) A energia perdida por m é representada por sua E_p na altura h, cujo valor é:

$$E_p = mgh = 10 \cdot 10 \cdot 1{,}5 \text{ ou } E_p = 150\ J$$

b) Dissemos, no texto, que m cai vagarosamente e com velocidade constante. Portanto, praticamente toda a E_p perdida na queda se converte em energia interna da água.

24. a) Deve-se observar que nenhum corpo a uma temperatura maior do que a água foi colocado em contato com ela. Logo, não pode ter havido fluxo de calor para a água.

b) Houve transferência de energia para a água por meio do **trabalho** realizado sobre ela.

25. a) A máquina térmica é um dispositivo que transforma calor (energia térmica) em trabalho (energia mecânica). As máquinas de Heron (figura 3.37) e de Watt (figura 3.38) ilustram muito bem como essa transformação pode ser realizada.

b) A máquina de Heron absorve calor da fornalha (fonte quente) e o calor é liberado pelo vapor, ao sair dos tubos, para o ar ambiente (fonte fria).

26. a) Temos:

$$Q_1 = 100\ cal = 420\ J$$

Então:

$$R = \frac{\mathcal{C}}{Q_1} = \frac{84}{420} = 0{,}20 \text{ ou } R = 20\%$$

b) $Q_2 = Q_1 - \mathcal{C} = 420\ J - 84\ J = 336\ J$

$$\text{ou } Q_2 = \frac{336}{4{,}2} \Rightarrow Q_2 = 80\ cal$$

27. **Observação:** Neste exercício, para facilitar os cálculos que os estudantes devem fazer (muitas vezes sem o uso de calculadoras), vamos considerar que 1 cal = 4 J.

a) De $R = \mathcal{C}/Q_1$, com $R = 0{,}40$ e $\mathcal{C} = 1\,000\ J$, vem:

$$\frac{1\,000}{Q_1} = 0{,}40 \Rightarrow Q_1 = 2\,500\ J$$

Portanto, tomando 1 cal = 4 J, temos:

$$Q_1 = \frac{2\,500}{4} \text{ ou } Q_1 = 625\ cal$$

b) Temos $Q_2 = Q_1 - \mathcal{C} \Rightarrow Q_2 = 2\,500\ J - 1\,000\ J = 1\,500\ J$

$$\text{ou } Q_2 = \frac{1\,500}{4} \Rightarrow Q_2 = 375\ cal$$

28. A massa $m = 10$ g de óleo libera a seguinte quantidade de energia térmica:

$$Q_1 = 10 \cdot 45 \cdot 10^3 \Rightarrow Q_1 = 45 \cdot 10^4\ J$$

De $R = \mathcal{C}/Q_1$, obtemos o trabalho que o motor realiza a partir desta energia Q_1. Temos:

$$\mathcal{C} = RQ_1 = 0{,}40 \cdot 45 \cdot 10^4 \Rightarrow \mathcal{C} = 1{,}8 \cdot 10^5\ J$$

Este trabalho foi realizado em um tempo $\Delta T = 1$ s (o motor consome 10 g de combustível em 1 s). Logo, a potência do motor é:

$$P = \frac{1{,}8 \cdot 10^5\ J}{1\ s} = 1{,}8 \cdot 10^5\ J/s = 1{,}8 \cdot 10^5\ W$$

29. O estudante, ao ler com atenção o último bloco desta seção, conseguirá identificar as três maneiras equivalentes de apresentar o enunciado da 2ª lei da Termodinâmica. Esta resposta é encontrada na seção *Respostas*.

30. a) Temos:

$$Q_1 = 100 \cdot 4{,}18 \Rightarrow Q_1 = 418\ J$$

Portanto, vemos que $\mathcal{C} = Q_1$, isto é, a máquina estaria convertendo em trabalho todo o calor que recebeu da fonte quente. Esse fato **não** contraria a 1ª lei da Termodinâmica (conservação da energia), pois isso só ocorreria se tivéssemos $\mathcal{C} > Q_1$.

b) Se $\mathcal{C} = Q_1$, a máquina teria um rendimento $R = 100\%$, e sabemos que isso está fundamentalmente contrário à 2ª lei da Termodinâmica.

Pratique Física em equipe

1. A diferença entre soprar as mãos com a boca aberta e com ela quase fechada ocorre porque, no segundo caso, o gás sofre uma expansão rápida (adiabática) ao sair da boca quase fechada. Logo, há uma queda em sua temperatura.

2. Usando o termômetro, o estudante verificará que a água da garrafa escura aquece mais. Os alunos poderiam prever esse resultado, lembrando-se de que um corpo escuro absorve maior porcentagem de radiação térmica do que um corpo claro (como foi comentado no tópico 3.2).

INTEGRANDO... Termodinâmica e corpo humano

1. **a)** 1 kg de gordura metabolizada libera aproximadamente 8 000 kcal.

b) 200 g de carboidrato contêm aproximadamente 800 kcal.

c) 1 h nadando *crawl* requer aproximadamente 500 kcal.

2. **a)** Considerando as respostas da primeira questão, a pessoa deverá nadar um pouco mais de uma hora.

b) Supondo que a energia gasta ao subir a escada seja convertida em energia potencial gravitacional e que a massa seja, por exemplo, 70 kg, então:

800 kcal = 3 360 kJ = 3 360 000 J $= 70 \cdot 10 \cdot h \Rightarrow$
$\Rightarrow h = 4\,800$ m

c) Considerando as informações pesquisadas, a pessoa vai acumular aproximadamente 100 g de gordura.

Problemas e testes

1. a) Temos:

$$E_p = mgh = 200 \cdot 10 \cdot 210 \Rightarrow E_p = 4{,}2 \cdot 10^5\ J$$

b) Se não há atrito com o ar, a E_p da água converte-se integralmente em E_c. Então, a E_c da água, ao chegar ao solo, será $E_c = 4{,}2 \cdot 10^5$ J.

c) Teremos:

$$\Delta Q = \frac{4{,}2 \cdot 10^5}{4{,}2} \Rightarrow \Delta Q = 1{,}0 \cdot 10^5 \text{ cal} = 10^5 \text{ cal}$$

d) Tudo se passa como se a água recebesse uma quantidade de calor $\Delta Q = 1{,}0 \cdot 10^5$ cal. Então, de $\Delta Q = mc\Delta T$ obtemos $\Delta T = \Delta Q/mc$. Sendo $c = 1$ cal/g °C e $m = 200$ kg $= 200 \cdot 10^3$ g, vem:

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{mc} = \frac{1{,}0 \cdot 10^5}{200 \cdot 10^3 \cdot 1} \Rightarrow \Delta T = 0{,}5\ ^\circ\text{C}$$

É interessante observar que essa elevação de temperatura é relativamente pequena e dificilmente seria perceptível ao nosso tato.

2. a) Correta, pois de $\Delta U = Q - \mathcal{C}$, sendo $\Delta U = 0$ (temperatura constante), obtemos $Q = \mathcal{C}$.

b) Correta, pois de $\Delta U = Q - \mathcal{C}$, com $\mathcal{C} = 0$ (volume constante), obtemos $\Delta U = Q$.

c) Incorreta, pois de $\Delta U = Q - \mathcal{C}$, com $Q = 0$ (adiabática) e $\mathcal{C} \neq 0$ (há variação de volume), obtemos $\Delta U = -\mathcal{C} \neq 0$.

d) Correta, pois $\Delta U = Q - \mathcal{C}$ e, em uma expansão isobárica, $\Delta U > 0$ (há uma elevação de temperatura). Então, devemos ter $Q > \mathcal{C}$.

e) Incorreta, pois, se $Q = 0$, a transformação seria adiabática e esta não é isotérmica (na adiabática a temperatura **não** permanece constante).

3. a) Como o valor de p permanece **constante**, o gráfico $p \times V$ será como mostrado na seção *Respostas*.

b) Esta área é a de um retângulo, cujos lados correspondem ao valor de p e à variação de volume $(V_f - V_i)$. Então: área sob o gráfico $= p(V_f - V_i)$.

c) O produto $p(V_f - V_i)$ representa o trabalho que o gás realiza ao se expandir isobaricamente.
Então, a área referida representa esse trabalho.

4. a) Temos:

$$\Delta U = 900 \text{ cal} - 300 \text{ cal} \Rightarrow \Delta U = 600 \text{ cal}$$

b) Como V = constante, logo $\mathcal{C} = 0$.

c) De $\Delta U = Q - \mathcal{C}$, com $\mathcal{C} = 0$, obtemos:

$$Q = \Delta U \Rightarrow Q = 600 \text{ cal}$$

d) De $\Delta Q = mc\Delta T$ obtemos (observe que $\Delta T = 200$ K)

$$c = \frac{\Delta Q}{m\Delta T} = \frac{600}{4 \cdot 200} \Rightarrow c = 0{,}75\ \frac{\text{cal}}{\text{gK}}$$

5. Observemos que a temperatura da água quente diminuiu 20 °C (passou de 45 °C para 25 °C) e que tanto a da água fria quanto a do calorímetro elevaram-se 5 °C (passaram de 20 °C para 25 °C). Então, temos:

calor cedido pela água quente $= mc\Delta T = 100 \cdot 1 \cdot 20$

calor absorvido pela água fria $= mc\Delta T = 300 \cdot 1 \cdot 5$

calor absorvido pelo calorímetro $= C \cdot \Delta T = C \cdot 5$

Como calor cedido = calor absorvido, virá:

$$100 \cdot 20 = 300 \cdot 5 + C \cdot 5 \Rightarrow C = 100 \text{ cal/°C}$$

6. Uma garrafa térmica comum possui um recipiente de vidro de paredes duplas, ambas espelhadas, sendo feito o vácuo entre elas. As paredes espelhadas evitam que haja transmissão de calor por **radiação** porque as radiações térmicas são refletidas por elas. O fato de as paredes serem feitas de material isolante térmico e de existir vácuo entre elas impede a transmissão por **condução**. A **convecção** é evitada pelo fato de ter sido feito o vácuo entre as paredes, desde que se tome o cuidado de manter a garrafa sempre bem fechada.

7. Consideremos uma massa m da água do rio, à temperatura T_0, da qual 20% entram na usina. Então, a massa 0,20 m passa a ter uma temperatura $T_0 + 12$ °C e, após se misturar com a massa 0,80 m, ambas adquirem a temperatura final T_f. Assim, temos:

calor cedido $= 0{,}20\ m \cdot 1{,}0 \cdot (T_0 + 12 - T_f)$,

calor recebido $= 0{,}80\ m \cdot 1{,}0 \cdot (T_f - T_0)$.

De calor recebido = calor cedido, e dividindo-se todos os termos por m, temos:

$$0{,}20\ T_0 + 2{,}4 - 0{,}20\ T_f = 0{,}80\ T_f - 0{,}80\ T_0 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow T_f - T_0 = 2{,}4\ ^\circ\text{C}$$

8. b

A afirmativa I está incorreta, pois não é necessário alcançar 100 °C, uma vez que a evaporação ocorre para temperaturas abaixo da temperatura de ebulição.

A afirmativa II está correta.

A afirmativa III está incorreta, pois não ocorrem correntes de convecção, já que a água quente se mantém na superfície do tanque.

9. e

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

$Q = 100 \cdot 1 \cdot 0{,}5$

$Q = 50$ cal

$Q = 50 \cdot 4{,}2$

$Q = 210$ J

O rendimento será:

$$\eta = \frac{210}{250}$$

$\eta = 84\%$

Apêndice D

Verifique o que aprendeu

1. a) A expressão $\mathcal{C} = p(V_f - V_i)$ só pode ser usada se p = constante, e isso **não** ocorre na transformação *I*.

b) O valor de $\mathcal{C}_{if}$ será dado pela área sob o gráfico *I* no diagrama $p \times V$. Observando que essa área corresponde a um trapézio e a um retângulo, temos:

$$A_{trap} = \frac{6{,}0 \cdot 10^5 + 2{,}0 \cdot 10^5}{2} \cdot 0{,}10$$

$$A_{ret} = 6{,}0 \cdot 10^5 \cdot 0{,}10$$

$$\mathcal{C}_{if} = 4{,}0 \cdot 10^4 + 6{,}0 \cdot 10^4 \Rightarrow \mathcal{C}_{if} = 10{,}0 \cdot 10^4 \text{ J}$$

2. a) $\mathcal{C}_{fi}$ será numericamente igual à área sob o gráfico II. Como há uma redução ao volume do sistema, temos $\mathcal{C}_{fi} < 0$. Logo (área de um trapézio):

$$\mathcal{C}_{fi} = \frac{6{,}0 \cdot 10^5 + 2{,}0 \cdot 10^5}{2} \cdot 0{,}20$$

$$\therefore \mathcal{C}_{fi} = -8{,}0 \cdot 10^4 \text{ J}$$

b) $\mathcal{C} = 10{,}0 \cdot 10^4 - 8{,}0 \cdot 10^4 \therefore \mathcal{C} = 2{,}0 \cdot 10^4$ J

c) O valor de $\mathcal{C}$ corresponde à área limitada pelas curvas I e II do gráfico (área limitada pelo ciclo).

3. a) Temos:

$$R = \frac{\mathcal{C}}{Q_1} = \frac{2{,}0 \cdot 10^4}{8{,}0 \cdot 10^4} \text{ ou } R = 0{,}25 = 25\%$$

b) De $\mathcal{C} = Q_1 - Q_2$ vem:

$$Q_2 = Q_1 - \mathcal{C} = 8{,}0 \cdot 10^4 - 2{,}0 \cdot 10^4 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q_2 = 6{,}0 \cdot 10^4 \text{ J}$$

4. a) De $R = 1 - T_2/T_1$ vem (com $R = 0{,}30$):

$$0{,}30 = 1 - \frac{T_2}{400} \Rightarrow T_2 = 280 \text{ K}$$

b) A máquina realiza um trabalho de $4{,}5 \cdot 10^3$ J em cada 1,0 s. Logo, ela realiza esse trabalho em 10 ciclos; então, o trabalho em cada ciclo é:

$$\mathcal{C} = \frac{4{,}5 \cdot 10^3}{10} \Rightarrow \mathcal{C} = 450 \text{ J}$$

c) De $R = T/Q_1$ temos:

$$Q_1 = \frac{\mathcal{C}}{R} = \frac{450}{0{,}30} \Rightarrow Q_1 = 1\,500 \text{ J}$$

Assim, de $\mathcal{C} = Q_1 - Q_2$ obtemos:

$$Q_2 = Q_1 - T = 1\,500 - 450 \Rightarrow Q_2 = 1\,050 \text{ J}$$

5. O rendimento máximo R_M é dado por:

$$R_M = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{700}{2\,000} \Rightarrow R_M = 0{,}65 = 65\%$$

Vemos, então, que mesmo os motores de mais alta eficiência apresentam um rendimento bem menor do que o limite teórico determinado pelo ciclo de Carnot.

6. a) O refrigerador rejeita para o ambiente uma quantidade de calor igual à quantidade retirada de seu interior, acrescida do trabalho realizado sobre ele, ou seja:

$$Q_1 = Q_2 + \mathcal{C}$$

Então, temos $Q_2 < Q_1$ ou $Q_2 < 800$ cal

b) De $\varepsilon = Q_2/(Q_1 - Q_2)$, com $\varepsilon = 3{,}0$ e $Q_1 = 800$ cal, vem:

$$3{,}0 = \frac{Q_2}{800 - Q_2} \Rightarrow Q_2 = 600 \text{ cal}$$

7. Vemos que a geladeira iria retirar uma quantidade de calor Q_2 do seu interior e, como a sua porta está aberta, parte desse calor seria retirada da sala. Mas ela vai rejeitar para o ambiente da própria sala uma quantidade de calor Q_1 tal que $Q_1 > Q_2$ (em virtude do trabalho realizado pelo compressor). Portanto, ao contrário do que se poderia imaginar, o procedimento da pessoa irá **aumentar** a temperatura da sala (uma geladeira, com sua porta aberta ou fechada, sempre tende a aumentar a temperatura do ambiente onde se encontra, em virtude do calor Q_1 que ela rejeita para este ambiente).

Problemas e testes

1. d

Considerando que não há perda de calor com o meio exterior, a temperatura final de equilíbrio será dada por:

$$Q_{fria} + Q_{quente} = 0$$

$$\frac{m}{3} c_{água} (\theta_f - 10) + \frac{2m}{3} c_{água} (\theta_f - 40) = 0$$

$$\theta_f = 30$$

A variação percentual de temperatura em 6 horas é dada por:

$$\frac{\theta_f - \theta}{\theta_f} = \frac{30 - 16}{30} = 0{,}47 = 47\%$$

2. V F F V V

A afirmativa I é verdadeira, pois o trabalho equivale à área do ciclo.

A afirmativa II é falsa, pois, quando uma máquina opera no ciclo de Carnot, ela tem o maior rendimento possível.

A afirmativa III é falsa, pois:

$$\frac{P_B V_B}{T_B} = \frac{P_D V_D}{T_D}$$

$$T_D = \frac{P_D V_D T_B}{P_B V_B}$$

$$T_D = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 500}{4 \cdot 10^5 \cdot 5}$$

$$T_D = 150 \text{ K}$$

A afirmativa IV é verdadeira, pois:

$$R = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$R = 1 - \frac{150}{500}$$

$$R = 0{,}7$$

A afirmativa V é verdadeira, pois, como a temperatura final é igual à inicial, a variação de energia interna em um ciclo completo será nula.

3. a) No processo AC, o trabalho é calculado através da área do trapézio:

$$\mathcal{C}_{AC} = \frac{(9+6) \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2} = +150 \text{ J}$$

No processo AB, o trabalho é calculado através da área do retângulo:

$$\mathcal{C}_{ABC} = 6 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = +120 \text{ J}$$

b) Da primeira lei da Termodinâmica:

$$\Delta U_{AC} = Q_{AC} - \mathcal{C}_{AC}$$

De acordo com a convenção de sinais adotada, temos:

$$\Delta U_{AC} = 300 - 150 = +150 \text{ J}$$

c) $\Delta U_{ABC} = \Delta U_{AC} = Q_{ABC} - \mathcal{C}_{ABC}$

Como o trabalho é:

$$\mathcal{C}_{ABC} = 150 - 120 = +30\,J$$

Logo:

$$\mathcal{C}_{ABC} = 150 + 30 = +180\,J$$

4. d

O ciclo de Carnot é um ciclo teórico que determina o máximo rendimento de uma máquina, mas, por razões práticas e técnicas, **não** é o ciclo seguido pelas máquinas térmicas usuais. Seu rendimento não é de 100% e, dependendo dos valores de T_1 e T_2, pode ser **inferior** a 100%.

5. a) Neste caso, o calor Q_1 estaria sendo rejeitado para um ambiente exterior à sala. Seria possível conseguir, então, uma redução na temperatura da sala.

b) Um aparelho de ar-condicionado funciona de maneira semelhante àquela descrita na questão **a**, isto é, ele rejeita o calor Q_1 para um ambiente **externo**.

Capítulo 4: Mudanças de fase

Orientações específicas

O estudo dos fenômenos térmicos é encerrado neste capítulo. Nele analisamos as mudanças de fase que podem ocorrer com uma substância. Vários conceitos e exemplos que são aqui abordados estão, frequentemente, presentes no cotidiano dos estudantes, o que costuma reforçar o interesse da turma e intensificar sua participação nas aulas e nas atividades propostas.

Chamamos a atenção do professor para os seguintes pontos:

- Ao elaborar o capítulo sobre *mudança de estado*, não nos limitamos simplesmente a descrevê-la e apresentar as suas leis experimentais. Procuramos, além disso, interpretar, em termos moleculares, o que se passa com a estrutura das substâncias durante essa transição. Mas, para que o estudante se aproprie desse detalhamento conceitual, será necessário que ele tenha uma noção de como os átomos ou as moléculas encontram-se distribuídos quando a matéria se apresenta nos estados sólido, líquido ou gasoso. O tópico 4.1, que trata sucintamente desse assunto, fornece aos alunos as ideias básicas necessárias a esse tipo de interpretação.
- Um aspecto fundamental que deve ficar claro para os estudantes é que, durante a mudança de estado, a temperatura da substância permanece inalterada, ainda que haja trocas de calor. Esse é um fato que pode confundi-los, pois em sua experiência diária eles se dão conta apenas dos casos em que o recebimento ou a perda de calor conduz a mudanças de temperatura. Isso que parece contraditório na visão dos alunos ocorre porque, nesses casos de mudança de fase, o calor recebido (ou cedido) não é transformado em energia de agitação molecular — o que ocasionaria aumento (ou diminuição) de temperatura —, mas sim transferido para a nova distribuição espacial atômica da substância.
- A diferença entre evaporação e ebulição é um assunto que desperta especial interesse da turma, já que seus exemplos são facilmente identificáveis pelos alunos. Assim, recomendamos que o professor trabalhe detalhadamente o tópico 4.3, em que essas diferenças estão explicadas e ilustradas com exemplos de fácil verificação.
- Recomendamos que o tópico 4.4, sobre a influência da pressão nas temperaturas de fusão e ebulição, e o tópico 4.5, sobre diagrama de fases, sejam abordados de maneira mais prática que de costume, já que as experiências relacionadas a esses assuntos são de fácil realização e de forte impacto visual, servindo não apenas para que o aluno compreenda os conceitos envolvidos, mas também para que se sinta mais motivado em continuar seus estudos. As experiências da seção *Pratique Física* são bons exemplos de atividades que podem ser usadas com essa finalidade.

Resoluções das atividades

Para iniciar a conversa

Pois é necessário que a temperatura do ar esteja muito baixa para que esse tipo de precipitação ocorra, e isso é muito difícil no nosso país, pelas suas médias de temperatura elevadas.

Chamamos de fusão o processo de derretimento, ou seja, passagem do estado sólido para o líquido.

Na maioria das substâncias, a fase sólida é mais densa que a fase líquida. Na água, isso é uma exceção: o gelo boia, pois ocupa um volume maior, o que torna sua densidade menor, uma vez que densidade é a relação entre massa e volume.

Verifique o que aprendeu

1. a) A **pressão** e a **temperatura** da substância são as duas grandezas que determinam a fase da substância: sólida, líquida, gasosa ou plasma.

b) A água (ou outro líquido qualquer) passará para o estado gasoso se elevarmos convenientemente a sua temperatura ou se reduzirmos suficientemente a pressão sobre ela.

2. a) Porque as forças de atração entre os átomos de um sólido são suficientemente grandes para mantê-los fixos em posições definidas. Nos líquidos, as ligações entre os átomos são mais fracas, e, por isso, eles não permanecem fixos em determinadas posições (podem se deslocar uns em relação aos outros).

b) Como os líquidos não têm uma estrutura interna regular, quando o cristal passa para o estado líquido, a regularidade na distribuição de seus átomos deixa de existir (figura 4.10).

c) Porque, no estado gasoso, a força de atração entre as moléculas é praticamente nula. Como essas moléculas estão em contínuo movimento, elas se deslocam livremente tendendo a ocupar todo o espaço que lhes for oferecido. Nos líquidos, isso não ocorre porque há uma força de atração não desprezível entre suas moléculas.

3. a) Pela tabela 4.1 vemos que o calor de fusão da prata é de 21 cal/g. Então, como a massa da moeda é de 100 g, para ela se fundir totalmente devemos fornecer-lhe a seguinte quantidade de calor:

$$\Delta Q = 21 \cdot 100 \text{ ou } \Delta Q = 2\,100 \text{ cal}$$

b) Durante a fusão, a temperatura da moeda permanece constante a 961 °C.

c) A quantidade de calor fornecida após ser atingida a temperatura de fusão (2 100 cal) é exatamente aquela necessária para fundir a moeda. Então, a temperatura da prata líquida será ainda de 961 °C.

4. a) Devemos observar, pela tabela 4.1, que o enxofre já se encontra no seu ponto de fusão (119 °C). Então, o calor fornecido será totalmente utilizado para fundir o sólido. Como o calor de fusão do enxofre é 13 cal/g, a massa m desta substância que se fundirá pode ser determinada pela seguinte proporção:

13 cal fundem 1 g
650 cal fundirão m

Então:

$$m = \frac{650}{13} \text{ ou } m = 50 \text{ g}$$

b) Como não ocorreu a fusão total do enxofre, teremos, no final, 150 g de enxofre sólido e 50 g de enxofre líquido, ambos a 119 °C.

5. a) Ela começará a solidificar na temperatura correspondente ao seu ponto de fusão. Pela tabela 4.1 vemos que essa temperatura é 1 775 °C.

b) Durante a mudança de fase a temperatura permanece constante. Então, a temperatura da platina permanecerá a 1 775 °C enquanto ela estiver se solidificando.

c) Sim, para o caso da água, é necessário retirar calor de um líquido para que ela se solidifique.

6. a) Ao soprar sobre a superfície do líquido, removemos o vapor aí acumulado, o que acarreta um **aumento** na velocidade de evaporação do líquido.

b) Como a evaporação provoca um abaixamento na temperatura do líquido, ao aumentarmos a velocidade de evaporação, o líquido esfriará mais rapidamente (um maior número de moléculas mais velozes escapa do líquido).

7. a) A tabela mostra-nos que o ponto de ebulição do Hg é 357 °C.

b) Durante a ebulição, a temperatura do Hg permanece constante a 357 °C.

c) Pela tabela vemos que o calor de vaporização do Hg é 65 cal/g. Então, podemos estabelecer a seguinte proporção:

65 cal vaporizam 1 g
$3{,}9 \cdot 10^4$ cal vaporizarão m gramas

Logo:

$$m = \frac{3{,}9 \cdot 10^4}{65} \therefore m = 600 \text{ g}$$

d) A temperatura do vapor resultante da vaporização é a mesma do líquido em ebulição. Portanto, o vapor de Hg estará a 357 °C.

8. a) Ao formular esta questão não pretendemos que ela seja analisada em termos de "saturação" ou "tensão de vapor" (conceitos que, aliás, não foram tratados no texto). Deseja-se apenas que o estudante perceba que o embaçamento do vidro se deve à condensação do vapor de água já existente na própria atmosfera.

b) De maneira semelhante ao que ocorre quando sopramos sobre a superfície de um líquido, o desembaçador remove o vapor que se acumula próximo ao vidro, permitindo que o líquido condensado torne a se evaporar.

9. a) A barra de ferro, tendo um comportamento igual ao da maioria das substâncias, **aumentará** de volume ao se fundir.

b) Como há um aumento de volume na fusão, a densidade do ferro líquido é **menor** do que a do ferro sólido.

c) O ferro sólido, sendo mais denso, **afundará** no ferro líquido.

10. Como o ferro aumenta de volume ao se fundir, um aumento de pressão provoca um aumento em sua temperatura de fusão. Portanto, sob uma pressão de 5 000 atm, a barra de ferro se fundirá **acima** de 1 535 °C.

11. a) Se a cidade estiver situada ao nível do mar, a pressão atmosférica local será de 1 atm (76 cmHg). Se estiver acima do nível do mar, a pressão atmosférica será inferior a 76 cmHg.

b) Ao nível do mar ($p_a = 1$ atm) o ponto de fusão do gelo é 0 °C. Acima do nível do mar ($p_a < 1$ atm) o ponto de fusão do gelo será **superior** a 0 °C, pois, para a água, uma diminuição na pressão ocasiona uma elevação na temperatura de fusão.

12. a) O álcool entra em ebulição a 78 °C se a pressão sobre ele for de 1 atm (tabela 4.2). Se aumentarmos a pressão sobre o líquido, sua temperatura de ebulição tornar-se-á mais elevada. Assim, com uma pressão adequada, é possível que o álcool alcance a temperatura de 100 °C sem entrar em ebulição.

b) Pela figura 4.23 vemos que, se a água entra em ebulição a 96 °C, a altitude do local é de 1 000 m (observe que a pressão atmosférica, nessa altitude, é de 752 mmHg).

13. a) Verifica-se, no diagrama, que o ponto correspondente a $T = -80$ °C e $p = 50$ atm encontra-se situado na região *S*. Portanto, nessas condições o CO_2 apresenta-se no estado **sólido**.

b) De forma semelhante, vemos que, para $T = 20$ °C e $p = 1$ atm, o ponto estará na região *V*, isto é, o CO_2 estará na forma **gasosa** (de fato, nas condições citadas o CO_2 é um **gás** existente em nossa atmosfera).

14. a) No diagrama, vemos que a linha correspondente à pressão de 56 atm (paralela ao eixo das temperaturas) cruza a curva de vaporização no ponto correspondente à temperatura de 20 °C. Assim, concluímos que, sob a pressão de 56 atm, o CO_2 começará a vaporizar a 20 °C (entrará em ebulição a 20 °C).

b) Devemos submetê-lo à pressão e temperatura correspondentes ao seu ponto triplo. Pelo diagrama vemos que esses valores são $p = 5{,}2$ atm e $T = -57$ °C.

15. a) O ponto do diagrama que corresponde ao estado inicial é o ponto triplo. Mantendo constante a temperatura e aumentando a pressão, vemos que o ponto desloca-se para a região *S*, isto é, toda a massa de CO_2 passará para o estado **sólido**.

b) Nestas condições, o ponto se deslocará para a região *V*, isto é, o CO_2 passará totalmente para o estado de **vapor**.

c) O ponto somente se deslocará para a região *L* se aumentarmos simultaneamente a pressão e a temperatura da mistura.

Aplicações da Física: Aquecimento global do planeta

1. Existem diversos aspectos que podem ser abordados nesta questão, sendo interessante discutir esse tema com o professor de Geografia. O aumento dos níveis dos mares causaria um processo de deslocamento das cidades na direção do interior. Com um aumento de 1 ou 2 metros, muitas cidades litorâneas seriam afetadas, repercurtindo especialmente na indústria do turismo e na agricultura.

2. Os ursos-polares, por dependerem do ecossistema existente nas calotas de gelo, possivelmente deixarão de ter acesso a alimentos, visto que os demais animais, como focas, também desaparecerão da região. Estima-se que os ursos-polares desaparecerão do polo Norte, ficando restritos somente ao norte do Canadá. Já os peixes, como o salmão, dependem de uma temperatura especificamente baixa para a sua reprodução, e a alteração da temperatura das águas pode prejudicar o processo de reprodução, possivelmente levando à sua extinção.

16. a) Estando o líquido e o vapor em equilíbrio, a pressão exercida pelo gás é **igual** à pressão de vapor.

b) Quando escapa certa massa de gás (vapor), a pressão sobre o líquido torna-se **menor** que sua pressão de vapor. Então, ocorre vaporização de parte do líquido até que a pressão do gás retorne ao valor da pressão de vapor.

Observação: O estudante pode entender, agora, por que a pressão no botijão de gás permanece praticamente invariável à medida que o combustível vai sendo usado para cozinhar.

17. Um gás só pode ser condensado se for resfriado a uma temperatura menor do que sua temperatura crítica. Portanto, para liquefazer o gás hélio é necessário baixar sua temperatura para um valor inferior a 5 K! (Isso constituiu um desafio para os cientistas em todo o mundo durante muitos anos, mas, atualmente, é uma operação quase rotineira nos grandes laboratórios de pesquisa dos países desenvolvidos.)

18. O vapor que se desprende de uma panela aberta ($p = 1$ atm) está a 100 °C, isto é, sua temperatura é menor do que a temperatura crítica. Então, é possível condensá-lo e a denominação usual (embora não seja obrigatória) é **vapor de água**.

19. a) O vapor condensa quando a pressão parcial é igual à pressão de vapor. Se a temperatura da sala fosse reduzida para 15 °C, esta condição seria cumprida, e teríamos o **ponto de orvalho** (vapor condensado).

b) A 40 °C a pressão de vapor da água é 55,1 mmHg. Portanto, a umidade da sala teria de ser aumentada até que a pressão parcial do vapor atingisse 55,1 mmHg. Nestas condições, o ambiente estaria saturado de vapor de água.

20. Em ambos os casos, teríamos:

$$\text{pressão parcial} = \text{pressão de vapor}$$

e, assim, $u_r = 1 = 100\%$ (o ar da sala, nos dois casos, estaria saturado com vapor de água).

21. Temos, a 40 °C:

pressão parcial do vapor = 12,6 mmHg

pressão de vapor da água = 55,1 mmHg

Então:

$$u_r = \frac{12{,}6}{55{,}1} \therefore u_r = 0{,}228 = 22{,}8\%$$

Pratique Física em equipe

1. Esse experimento é simples de ser executado, e os resultados são interessantes, podendo ser realizado em sala de aula. Durante a etapa em que os estudantes vão medir a temperatura de fusão, recomende que triturem quatro pedras de gelo para que o contato entre o termômetro e a água derretida com gelo seja o melhor possível. Na etapa de medir a temperatura de ebulição da água, oriente os alunos a utilizar panela de tamanho pequeno e com volume médio de água, para garantir a elevação gradativa e homogênea de todo o volume de água. Caso a cidade na qual o experimento foi realizado se localize acima do nível

do mar, como a pressão atmosférica é menor, a temperatura de ebulição será menor. Na figura 4.23 é possível verificar como varia a temperatura em função da altitude.

2. Ao puxar o êmbolo da seringa, provoca-se uma diminuição da pressão sobre a água. Assim, ela entra em ebulição mesmo estando a uma temperatura inferior a 100 °C (o efeito é facilmente perceptível e provoca a admiração dos estudantes).
3. Para obter um bom resultado nesta experiência, é importante que o arame seja bem fino e resistente, pois o esforço exercido pela pessoa deverá ser bastante elevado. Teremos:
   a) Quando aumentamos a pressão sobre o gelo, a sua temperatura de fusão torna-se mais baixa. Então, o gelo funde-se apesar de sua temperatura estar abaixo de 0 °C.
   b) Após a passagem do arame, a água resultante da fusão (situada sobre o arame) estará novamente sob a ação apenas da pressão atmosférica. Como sua temperatura é inferior a 0 °C, ela torna a congelar.
   c) Puxando continuamente o arame com bastante força, os estudantes conseguirão obter este interessantíssimo efeito (quase uma mágica!).
4. Como surgem bolhas no copo de água com gás? Despeje água mineral com gás num copo e procure observar de onde saem as bolhas de gás carbônico. Surgem do interior do líquido ou da superfície do copo? A cada momento elas saem de um lugar diferente ou existem locais preferenciais? Se elas dão preferência por surgir em determinados lugares, o que esses lugares possuem em comum? Faz diferença o copo ser de vidro, de papel, de plástico ou de alumínio? E se o copo possuir internamente arranhões? Qual é o efeito de impurezas como grãozinhos de açúcar, sal ou areia jogados no interior do copo?

   A compreensão das questões acima pode ser útil para entender uma série de situações, várias delas relacionadas com o início de uma transição de fase. Podemos querer saber, por exemplo, por que uma garrafa fechada de água com gás, depois de receber uma forte pancada, produz uma enorme quantidade de gás ao ser aberta em seguida. O que é importante para a formação do primeiro cristalzinho de gelo quando a água é resfriada, ou a primeira gotícula de água quando o vapor é resfriado? Como é possível fazer chover "bombardeando-se" nuvens de chuva com produtos químicos? Como é possível ter um líquido super-resfriado, como água no estado líquido em temperatura inferior a 0 °C, ainda que a pressão seja próxima da atmosférica? Por que é perigoso ferver água no forno de micro-ondas? (Não faça essa experiência, pois a água pode vaporizar subitamente quando tocamos no copo, podendo provocar sérias queimaduras.) Por que agricultores soltam foguetes com bombas para evitar geada?

   Explicação sobre o surgimento da bolha no copo de água com gás:

   Na fabricação da água com gás é injetado gás carbônico, sob pressão, no momento do engarrafamento, que passa a ficar dissolvido no líquido. Quando a água com gás é aberta, a pressão diminui, e o gás dissolvido tende a escapar.

   Observando a formação das bolhas no copo de água com gás, notamos uma tendência de elas surgirem na interface do líquido em contato com o copo e repetidamente no mesmo lugar. Arranhões na face interna do copo ou grãozinhos de areia são boas fontes de bolhas.

   Para entender essas observações, precisamos antes saber que é muito difícil, do ponto de vista de energia, começar a crescer a bolha de gás. Existe uma forma de energia, relacionada com a tensão superficial, associada à área da superfície da bolha em contato com o líquido. É uma energia superficial proporcional à área e que deve ser fornecida pelo volume do líquido das redondezas, caso se queira criar ou crescer uma bolha. Acontece que quanto menor uma bolha, mais área, e consequentemente energia, por unidade de volume ela possui. Matematicamente temos que a área é proporcional ao quadrado da dimensão linear, e o volume é proporcional ao cubo. Assim, a razão da área pelo volume é inversamente proporcional à dimensão da bolha, e uma pequena bolha com proporcionalmente mais área requer mais energia por unidade de volume para ser formada. Uma vez formada uma microbolha, ela cresce com facilidade, pois retira do líquido uma quantidade menor de energia por volume. A bolha também deve retirar do líquido o gás dissolvido, que é a substância da qual é formada.

   A formação de bolhas num copo de água com gás acontece normalmente em arranhões ou nas quinas do fundo de um copo de papel, pois nesses casos ela economiza uma grande área, e consequentemente energia, aproveitando-se das laterais da quina ou do arranhão.

   Se jogarmos grãos de sal ou de açúcar na água com gás, a quantidade de bolhas liberadas aumenta, pois a bolha pode crescer em torno da superfície do grão, que passa a se comportar como se fosse uma "semente" que origina a bolha.

   No caso de uma garrafa fechada de água com gás, se nela aplicarmos uma forte pancada, a energia fornecida propiciará o surgimento, em todo o volume do líquido, de microbolhas de gás, que não poderão se expandir em virtude da alta pressão interna. Se a água com gás for aberta antes de essas bolhas dissolverem, o grande número de bolhas espalhado pelo líquido expandirá como se este estivesse fervendo.

   No caso de ferver água no forno de micro-ondas, se o forno vibrar pouco, a água pode ser aquecida sem que, no entanto, haja energia para nuclear a primeira bolha de vapor. Nesse caso, teremos um líquido "superaquecido", numa temperatura acima do ponto de ebulição, só esperando por uma pequena concentração de energia, necessária para formar a primeira microbolha. Quando isso acontece, o processo é explosivo e produz uma súbita vaporização em uma grande porção do líquido. O aquecimento usual da água na chama é seguido por correntes de convecção, pois o líquido aquecido por baixo tende a subir e a água fria tende a descer. As

correntes de convecção podem fornecer energia para nuclear as primeiras bolhas, além do fato de a água estar mais quente junto à superfície de baixo do recipiente, onde imperfeições, como pequenos arranhões, facilitam o aparecimento das microbolhas. No forno de micro-ondas a água é aquecida por igual em todo o seu volume, e, normalmente, a região de água mais quente está afastada de superfícies que ajudariam a nuclear a primeira microbolha. O líquido pode então se tornar superaquecido.

Problemas e testes

1. a) Errada, pois durante uma mudança de fase (de sólido para líquido ou de líquido para vapor) uma substância absorve calor e sua temperatura não varia.

b) Correta, pois para que ocorra a mudança de fase a substância deve absorver ou ceder calor.

c) Errada, pois um bloco de gelo, por exemplo, absorve calor ao se fundir e seu volume diminui nesse processo.

2. a) Maior, pois no caso do gelo temos de utilizar inicialmente certa quantidade de calor para fundi-lo, transformando-o em água a 0 °C.

b) Como a massa de gelo, para ser aquecida até certa temperatura, absorve mais calor do que a água a 0 °C, o gelo será mais eficaz para esfriar a bebida.

3. a) O calor de fusão do chumbo é 5,8 cal/g. Logo, para fundir 100 g, será necessária uma quantidade de calor:

$$\Delta Q = 5{,}8 \cdot 100 \therefore \Delta Q = 580 \text{ cal}$$

b) Após se fundir, o chumbo líquido vai absorver uma quantidade de calor:

$$\Delta Q' = 1\,300 - 580 \therefore \Delta Q' = 720 \text{ cal}$$

De $\Delta Q' = mc\Delta T$, obtemos:

$$\Delta T = \frac{\Delta Q'}{mc} = \frac{720}{100 \cdot 0{,}036} \therefore \Delta T = 200\,°C$$

Como a temperatura inicial do chumbo líquido era de 327 °C, sua temperatura final será:

$$T_f = 327 + 200 \therefore T_f = 527\,°C$$

4. Não se fundirão aquelas barras cujos pontos de fusão forem superiores a 700 °C. Pela tabela, vemos que essas barras serão de: Pt, Au e Ag.

5. Deve-se observar pelos valores dos pontos de fusão da tabela que, neste aquecimento, **nenhuma** das barras mudará de fase. De $\Delta Q = mc\Delta T$, como todas possuem os mesmos valores para m e ΔT, concluímos que absorverá maior quantidade de calor aquela que possuir maior **calor específico** c. Pela tabela, vemos que isso ocorre para o **alumínio**.

6. Provocará a fusão de maior massa de gelo aquela barra que liberar maior quantidade de calor ao se resfriar de 120 °C a 0 °C. De $\Delta Q = mc\Delta T$, como m e ΔT são iguais para todas as barras, vemos que o calor liberado ΔQ será maior para aquela que apresentar maior **calor específico** c. Pela tabela, verificamos que isso ocorre para o **alumínio**.

7. a) Correta, pois, quando o líquido atinge 80 °C, vemos pelo gráfico que sua temperatura não varia, apesar de ele receber calor (está mudando de fase).

b) Correta, pois, de $\Delta Q = mc\Delta T$ temos $c = \Delta Q/m\Delta T$. O gráfico nos fornece, para o líquido: $\Delta Q = 1\,000$ cal e $\Delta T = 80$ °C. Como $m = 50$ g, vem:

$$c = \frac{\Delta Q}{m\Delta T} = \frac{1\,000}{50 \cdot 80} \therefore c = 0{,}25 \text{ cal/g °C}$$

c) Errada, pois pelo gráfico vemos que, durante a ebulição, o líquido absorve 3000 cal − 1000 cal = 2000 cal. Então, o calor (latente) de vaporização da substância, isto é, o calor absorvido **por unidade de massa** para se vaporizar será:

$$\frac{2\,000 \text{ cal}}{50 \text{ gramas}} = 40 \text{ cal/g}$$

d) Correta, pois temos $c = \Delta Q/m\Delta T$ e o gráfico fornece-nos, para o vapor, $\Delta Q = 4000$ cal − 3000 cal = 1000 cal e $\Delta T = 120$ °C − 80 °C = 40 °C. Então:

$$c = \frac{\Delta Q}{m\Delta T} = \frac{1\,000}{50 \cdot 40} \therefore c = 0{,}50 \text{ cal/g°C}$$

e) Correta, pois pelo gráfico vemos que, durante a ebulição, a substância absorve

$$\Delta Q = 3000 \text{ cal} - 1000 \text{ cal} = 2000 \text{ cal}.$$

8. b

As substâncias podem mudar de estado físico (sólido, líquido, gasoso, etc.), e esse fenômeno depende da temperatura e da pressão a que estão expostas.

9. a

As gotas de água são formadas na superfície externa da garrafa a partir da condensação do vapor de água que está no ar junto à superfície quando este entra em contato com a superfície fria da garrafa. Esse fenômeno também ocorre nos aparelhos de ar-condicionado. Para escoar as gotas de água resultantes da condensação do vapor por causa do resfriamento do ar ambiente existe uma mangueira em todo aparelho de ar-condicionado.

10. c

Na etapa 1, a água sofre o processo de solidificação, passando do estado líquido para sólido (seta 2) e, na etapa 2, o gelo sofre o processo de sublimação, passando do estado sólido para vapor (seta 3).

Infográfico

1. Uma refinaria tem como função decompor o petróleo em diferentes subprodutos, como gasolina, *diesel* e querosene.

2. Durante a destilação o petróleo é aquecido a altas temperaturas, evapora e, quando volta à forma líquida, já tem boa parte de seus subprodutos separados.

3. Por meio de tubulações utilizadas para o transporte de óleo bruto, conhecidas por oleodutos.

4. O petróleo ao chegar na caldeira é aquecido até 370 °C e vira parcialmente vapor. O que sai da caldeira é uma mistura de vapor com o que sobrou do petróleo na forma líquida.

5. Na torre de destilação a parte gasosa sobe e a líquida desce. As partes mais densas do petróleo líquido caem até o fundo da torre. As menos densas podem até virar vapor no meio da queda e começar a subir.
6. O vapor de cada subproduto do petróleo (gasolina, gás de cozinha, *diesel* e querosene) vira líquido a certa temperatura (gás de cozinha: 40 °C, gasolina: 80 °C a 100 °C, querosene: 180 °C, *diesel*: 260 °C – 340 °C) atingida em "andares" diferentes da torre, sendo, assim, cada um separado por uma tubulação específica.
7. Os subprodutos saem da torre de destilação um pouco "contaminados" uns pelos outros. Todos seguem para um processo de purificação em tanques, passando por reações químicas para quebrar e recombinar suas moléculas até estarem puras.

Unidade 3 — Óptica e ondas

Capítulo 5: Reflexão da luz

Orientações específicas

A unidade 3, composta dos capítulos 5, 6 e 7, trata tanto dos fenômenos relacionados com a luz quanto dos fenômenos ondulatórios. Nos capítulos 5 e 6, analisamos a reflexão e a refração da luz, que, juntas, fundamentam o estudo denominado *óptica geométrica*. O capítulo 7, por sua vez, é reservado aos fenômenos ondulatórios, quando o aluno terá a oportunidade de constatar a existência de uma relação entre a luz e esse tipo de fenômeno. Nesse capítulo, mostramos que os cientistas do século passado chegaram à conclusão de que a luz pode ser compreendida como um tipo particular de movimento ondulatório, e, quando ela é analisada sob essa perspectiva, seu estudo recebe o nome de *óptica física*. Seria recomendável que essas informações fossem transmitidas aos alunos no início da unidade, para que eles pudessem entender a razão de essas duas classes de fenômenos (ópticos e ondulatórios), aparentemente distintos, terem sido colocadas na mesma unidade.

Para o ensino deste capítulo, recomendamos que o professor considere, em seu planejamento, os seguintes pontos:

- Em alguns casos, o estudo da óptica geométrica costuma ser desenvolvido com excessiva preocupação em detalhes que consideramos irrelevantes, principalmente para iniciantes no estudo da Física. Por exemplo, é comum encontrar, em alguns livros, uma análise completa da formação de imagens conjugadas por dois espelhos planos que formam um ângulo entre si. No nosso entender, esse detalhamento não é necessário, pois não contribui para o aprimoramento do aluno. Em nosso curso, essa situação específica foi analisada apenas qualitativamente e de maneira experimental, na atividade 2 da seção *Pratique Física*, somente para que o aluno observe que o número de imagens cresce à medida que o ângulo entre os espelhos diminui e que isso se deve a reflexões sucessivas da luz nos dois espelhos.
- Consideramos importante que o estudante saiba que a imagem virtual forma-se no encontro dos prolongamentos dos raios refletidos pelo espelho. Entretanto, é mais importante ainda que ele entenda por que enxergamos uma imagem naquela posição. Por esse motivo, o professor deverá dar ênfase à interpretação da figura 5.20, que procura ilustrar o mecanismo de formação da imagem virtual. Esses mesmos comentários aplicam-se à formação de uma imagem real, ilustrada na figura 5.29.
- O estudo analítico da formação das imagens foi feito por meio da equação $\frac{1}{f} = \frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i}$, que, com a convenção de sinais que apresentamos, é uma equação simples de ser usada. Assim, não recomendamos a apresentação de outras equações que tenham a mesma finalidade ou de outras convenções de sinais que poderiam dificultar o trabalho dos estudantes.
- O professor deverá discutir detalhadamente os exemplos 1, 2 e 3 resolvidos no final do tópico 5.5. Será por meio deles que os alunos conseguirão entender de que maneira os raios principais são traçados para localizar imagens conjugadas por espelhos esféricos. Se o estudante seguir com cuidado cada etapa desses exemplos, ele será capaz de traçar outros diagramas para localizar a imagem do objeto em outras situações, qualquer que seja a posição do objeto em relação ao espelho e qualquer que seja o tipo de espelho: esférico, côncavo ou convexo.

Resoluções das atividades

Para iniciar a conversa

O telhado branco reflete maior quantidade de luz, pois o intervalo de albedo é maior. Já o telhado vermelho vai esquentar mais, pois absorve mais luz e calor do Sol.

A reflexão pode ser especular ou difusa. É especular quando o feixe refletido é bem definido e difusa quando se dá em todas as direções. Portanto, no texto, o conceito que se encaixa melhor é a difusão.

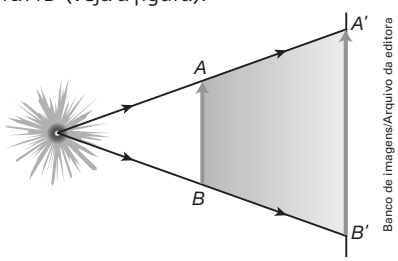
As ilhas de calor surgem nos centros urbanos graças à presença de muitas edificações e da retirada das áreas verdes, favorecendo a absorção de grande quantidade de calor da radiação solar durante o dia com irradiação de calor para o meio ambiente durante a noite. A principal consequência é o aumento da temperatura provocando, desse modo, o aumento no consumo de energia elétrica com o uso de ventiladores e aparelhos de ar-condicionado, além da formação de gases que contribuem para o efeito estufa. Não é possível extinguir as "ilhas de calor", mas pode-se reduzir seu efeito mudando as cores das superfícies dos telhados para tons mais claros, ou seja, cores que reflitam mais a luz solar (maiores valores de albedo).

Verifique o que aprendeu

1. a) Não, a Lua não emite luz própria.

b) Podemos ver a Lua porque ela é iluminada pelo Sol e envia para nossos olhos a luz que recebe dele.

2. a) Trace os raios luminosos que partem da fonte de luz e tangenciam o objeto, definindo sobre o anteparo a sombra $A'B'$ (veja a figura).

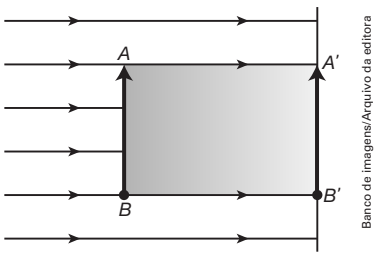


Banco de imagens/Arquivo da editora

b) Toda a região $AA'B'B$, mostrada na figura, não recebe luz.

c) Traçando um novo diagrama, com o objeto mais próximo da fonte de luz, os alunos perceberão facilmente que o tamanho da sombra **aumentará**.

3. a) Estando a fonte muito afastada do objeto, o feixe de luz que alcança o objeto é constituído de raios praticamente **paralelos**.



Banco de imagens/Arquivo da editora

b) Na figura mostramos a sombra $A'B'$ para este caso. Vemos que a sombra tem o mesmo tamanho do objeto.

4. a) Como a velocidade da luz no vácuo é constante e vale $c = 3{,}00 \cdot 10^8$ m/s, obtemos, de $\Delta S = v\Delta T$:

$$1 \text{ ano-luz} = (3{,}00 \cdot 10^8) \cdot (3{,}2 \cdot 10^7) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 1 \text{ ano-luz} = 9{,}6 \cdot 10^{15} \text{ m}$$

b) Como 1 ano-luz representa a distância que a luz percorre em 1 ano, então a luz desta estrela gasta 20 anos para chegar até nós.

c) Como 1 ano-luz $= 9{,}6 \cdot 10^{15}$ m $= 9{,}6 \cdot 10^{12}$ km, a distância da estrela será:

$$\Delta S = 20 \text{ anos-luz} = 20 \cdot (9{,}6 \cdot 10^{12} \text{ km}) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta S = 1{,}9 \cdot 10^{14} \text{ km}$$

5. A velocidade da luz em qualquer meio material é **menor** do que o seu valor no vácuo. Portanto, se o vácuo entre o Sol e a Terra fosse preenchido com água, o tempo que a luz do Sol gastaria para chegar até nós seria **maior** do que 8 minutos.

6. a) Verificamos, traçando as retas F_1P_1 e F_2P_1, que elas não cortam AB. Portanto, P_1 recebe luz tanto de F_1 quanto de F_2. De modo análogo, isso também ocorre com P_5.

b) Traçando os raios F_1P_2 e F_2P_2, vemos que este último é interceptado pelo objeto AB. Logo, P_2 recebe luz apenas de F_1.

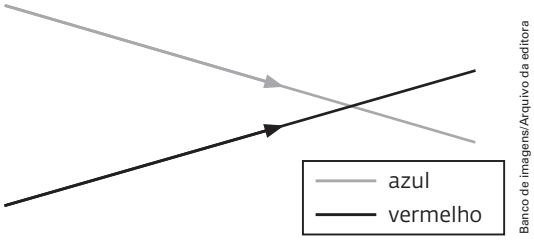
c) Com raciocínio análogo, vemos que P_4 só recebe luz de F_2.

d) Traçando os raios F_1P_3 e F_2P_3 vemos que ambos são interceptados por AB. Logo, P_3 não recebe luz de nenhuma das duas fontes.

7. O livro não emite luz própria; assim, para que seja visto, tem de refletir a luz emitida pela fonte (lâmpada) em direção aos olhos do leitor. A figura mostra um dos raios de luz que emerge da lâmpada, reflete no livro e atinge os olhos do leitor, possibilitando, portanto, que ele veja o livro.


João Xavier de Campos/Arquivo da editora

8. Após o cruzamento, os raios de luz mantêm as mesmas características que possuíam antes do ponto de cruzamento. Assim, a luz azul continua azul e a vermelha continua vermelha.



Banco de imagens/Arquivo da editora

9. a) Porque estes objetos, ao receberem a luz do Sol (ou de uma lâmpada), refletem essa luz, espalhando-a em to-

das as direções (reflexão difusa). Então, qualquer que seja a posição de uma pessoa em torno do objeto, ela receberá essa luz difundida e verá esse objeto (figura 5.15).

b) Como dissemos, a atmosfera terrestre difunde a luz proveniente do Sol, espalhando-a em todas as direções. Por isso, o céu apresenta-se totalmente claro durante o dia. Na Lua, como não há atmosfera, o céu apresenta-se escuro (a não ser nas posições ocupadas pelo Sol e pelas estrelas).

c) Mesmo a Lua não tendo atmosfera, a região próxima ao planeta permanece iluminada, pois a superfície da Lua reflete a luz do Sol; neste caso, a reflexão não se dá por difusão.

10. a) Desejamos apenas que o estudante se habitue a traçar o raio refletido de tal modo que o ângulo de reflexão seja aproximadamente igual ao ângulo de incidência.

b) O ângulo de reflexão $\hat{r}$ é o ângulo formado por *NP* (normal) com o raio refletido (o aluno deverá indicar este ângulo em seu desenho).

c) Como $\hat{i} = \hat{r}$, temos $\hat{r} = 32°$

11. a) Como o raio incidente é perpendicular à superfície, a direção da normal coincidirá com a direção deste raio.

b) Temos $\hat{i} = 0$ (como no exemplo resolvido no final deste tópico).

c) Como $\hat{i} = \hat{r}$, vem $\hat{r} = 0$.

d) Como $\hat{r} = 0$, concluímos que o raio refletido terá a mesma direção do raio incidente, porém sentido contrário a ele (conforme foi analisado no exemplo resolvido neste tópico).

12. a) Este feixe é refletido pelo espelho.

b) Na figura 5.19, o feixe refletido é **divergente**.

c) Ainda pela figura 5.19, verificamos que tudo se passa como se o feixe refletido se originasse de um ponto situado atrás do espelho e simétrico ao objeto. Em nosso caso, este ponto estará a 50 cm do espelho.

d) Neste ponto, vemos uma **imagem virtual** da lâmpada.

e) Deseja-se que o estudante trace um diagrama semelhante ao da figura 5.19.

13. Como sabemos, a imagem de um pequeno objeto em um espelho plano está situada sobre a perpendicular traçada do objeto ao espelho e tal que $D_o = D_i$. Pela figura deste exercício vemos que os pares de pontos que satisfazem estas condições são *AA'* e *CC'*.

14. a) Como a imagem virtual da pessoa se formará atrás do espelho e a 2 m dele, a distância da pessoa à sua imagem será de 4 m.

b) Vimos, na figura 5.21, que no espelho plano o tamanho da imagem é sempre igual ao do objeto. Portanto, se a pessoa aproximar-se do espelho, o tamanho de sua imagem não se modificará (mantém-se sempre igual ao tamanho da pessoa).

15. Seguindo a orientação ilustrada pela figura 5.21, os estudantes não terão dificuldade em traçar as imagens mostradas nas figuras da resposta deste exercício.

Observação: No 1º e no 2º diagramas (objeto retilíneo) bastará localizar *A'* e *B'* e traçar a imagem *A'B'*. No 3º diagrama, tratando-se de um objeto curvo, devemos localizar as imagens de alguns pontos intermediários a *AB* para melhor definir a forma da imagem *A'B'*.

Aplicações da Física: Reflexão em câmeras fotográficas

1. A riqueza de detalhes das fotos depende de um conjunto de características técnicas que a máquina oferece, por exemplo:

A qualidade das lentes e do sensor óptico, usado para capturar as imagens; o *zoom* óptico, que aproxima o objeto a ser fotografado.

Um visor grande também ajuda a enquadrar e conferir as fotos assim que são tiradas. Apesar de resolução nem sempre ser sinônimo de qualidade, o valor de *megapixels* orienta quanto sua foto poderá ser ampliada.

O uso do *flash* automático nem sempre traz o melhor resultado. Procure utilizar o *flash* somente quando perceber que há ausência de luz natural.

2. Sim, é possível, mas depende exclusivamente do tipo de aparelho celular. Pode-se, por exemplo, encaixar lentes (grande angular, "olho de peixe" e teleobjetiva) no celular, utilizar tripé e *zoom* óptico para aproveitar melhor a luz ambiente.

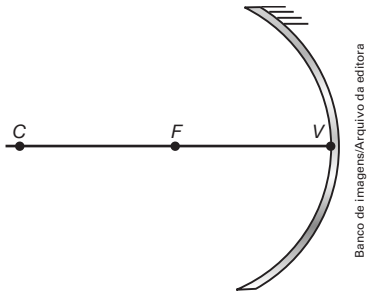
16. a) É côncava e, portanto, convergente.

b) É convexa e, portanto, divergente.

c) É convexa (superfície externa) e, portanto, divergente.

d) O espelho de um farol é côncavo e, portanto, convergente.

17. a) O vértice *V* está situado no centro da calota esférica que constitui o espelho, como mostra a figura.



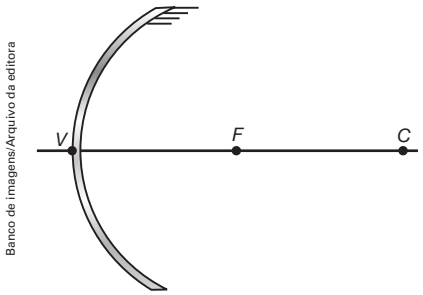
Banco de imagens/Arquivo da editora

b) O eixo é uma reta perpendicular ao espelho, passando por *V*.

c) O centro *C* está na frente do espelho e a uma distância $CV = 6{,}0$ cm.

d) O foco *F* está no meio do segmento *CV*, isto é, $FV = 3{,}0$ cm.

18. Os pontos *V*, *F*, *C* e o eixo do espelho estão mostrados na figura, sendo $CV = 6{,}0$ cm e $FV = 3{,}0$ cm. Deve-se observar que *C* e *F* estão situados, neste caso (espelho convexo), atrás do espelho.



Banco de imagens/Arquivo da editora

19. a) Como a estrela está muito afastada de nós, o feixe de raios luminosos proveniente dela é constituído praticamente de **raios paralelos**.

b) Como os raios incidentes são paralelos, a imagem da estrela se formará no foco do espelho, isto é, a 2,5 m do seu vértice ($f = R/2 = 2{,}5$ m).

c) O foco de um espelho côncavo é real (figura 5.30.a). Portanto, a imagem da estrela é real.

20. a) Os alunos devem perceber que o espelho mais "aberto" (menor concavidade) será aquele que possuir maior raio. Portanto, o valor de *R* é maior para o espelho *I*.

b) Como $f = R/2$, possui menor f aquele com menor *R*, isto é, o espelho *II* (espelho mais convergente).

21. a) O foco *F* está localizado no meio do segmento *CV*. O aluno deverá marcar este ponto na figura.

b) Como o espelho é côncavo, o foco *F* é **real**.

c) Como os raios incidentes são paralelos ao eixo do espelho, eles refletirão passando pelo foco *F*. Os alunos deverão traçar os raios refletidos na figura.

d) Os estudantes verão, na figura traçada por eles, que os raios, após refletidos, convergem no foco, isto é, o espelho é **convergente** (conforme foi dito no texto).

22. a) Os alunos deverão marcar o foco *F* no meio do segmento *CV*.

b) Como o espelho é convexo, sabemos que seu foco é **virtual**.

c) Como os raios incidentes são paralelos ao eixo, os alunos deverão traçar os raios refletidos, de tal modo que seus prolongamentos passem pelo foco *F*.

d) Os estudantes verão, na figura traçada por eles, que os raios **divergem** após serem refletidos pelo espelho, isto é, o espelho é divergente (conforme foi dito no texto).

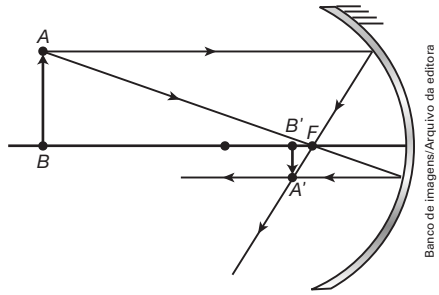
23. a) Este feixe é convergente, pois os raios refletidos passam pelo ponto *I* (convergem para *I*).

b) Vemos que este feixe é divergente (diverge a partir de *I*).

c) Tudo se passa como se o feixe estivesse sendo emitido do ponto *I*.

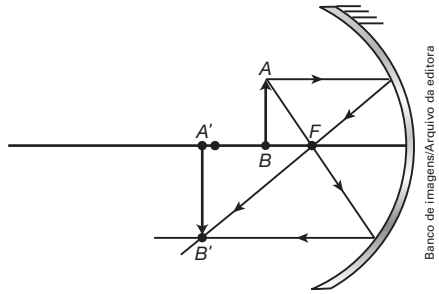
d) Então, o observador verá, em *I*, uma imagem real do objeto O.

24. a) Como se trata de um espelho côncavo, o estudante poderá se orientar pela solução do exemplo 1. Traçando a partir de *A* os mesmos raios principais empregados na figura 5.43, ele obterá, no encontro dos raios refletidos, o ponto *A'*, que é a imagem **real** de *A* (veja a figura a seguir). Tendo localizado o ponto *A'*, o estudante poderá traçar a imagem *A'B'*, verificando que ela é invertida e menor do que o objeto, como mostra a figura abaixo.



Banco de imagens/Arquivo da editora

b) Usando os mesmos raios principais da figura acima, obtém-se o diagrama mostrado na figura a seguir, em que *A'B'* é a imagem de *AB*. Como vemos no diagrama, esta imagem é real, invertida e maior do que o objeto.



Banco de imagens/Arquivo da editora

25. Com o objeto situado sobre o foco, o feixe luminoso que parte de um ponto deste objeto, após refletir, dá origem a um feixe de raios paralelos (figura 5.37). Não havendo ponto de encontro desses raios refletidos, não haverá formação de imagem (costuma-se dizer que a imagem forma-se no infinito).

26. a) É uma esfera espelhada externamente, portanto convexo.

b) Virtual, pois a imagem é formada "dentro" do espelho, na região oposta do objeto em relação à superfície especular esférica. Espelhos convexos conjugam sempre imagens virtuais de objetos reais.

c) Não. Assim como ocorre em espelhos planos, as imagens virtuais de um objeto extenso não se superpõem a ele. A imagem virtual da mão esquerda é a mão direita e vice-versa.

27. a) Sabemos que D_o é sempre positivo ($D_o = 60$ cm) e, como o espelho é côncavo, f também será positivo ($f = 10$ cm). Então, temos:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i} \Rightarrow \frac{1}{10} = \frac{1}{60} + \frac{1}{D_i} \Rightarrow \frac{1}{D_i} = \frac{1}{10} - \frac{1}{60} = \frac{5}{60} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow D_i = 12 \text{ cm}$$

b) Como o valor de D_i é positivo, concluímos que a imagem é **real**.

c) O aumento $A'B'/AB$ será dado por:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{D_i}{D_o} \text{ ou } \frac{A'B'}{AB} = \frac{12}{60} \therefore \frac{A'B'}{AB} = \frac{1}{5}$$

Este resultado significa que a imagem é 5 vezes menor do que o objeto.

d) Os resultados encontrados neste exercício estão em concordância qualitativa com o diagrama traçado no item **a** do exercício 24.

28. a) Como o espelho é convexo, temos $f = -12$ cm e, como $D_o = 36$ cm, vem:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i} \Rightarrow -\frac{1}{12} = \frac{1}{36} + \frac{1}{D_i}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{D_i} = -\frac{1}{12} - \frac{1}{36} \Rightarrow \frac{1}{D_i} = \frac{-3-1}{36} = \frac{-4}{36} \Rightarrow D_i = -9{,}0 \text{ cm}$$

b) Como o valor de D_i é negativo, concluímos que a imagem é virtual.

c) Temos (não é necessário considerar o sinal de D_i):

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{D_i}{D_o} = \frac{9{,}0}{36} \therefore \frac{A'B'}{AB} = \frac{1}{4}$$

d) $\frac{A'B'}{AB} = \frac{1}{4} \Rightarrow A'B' = \frac{AB}{4} = \frac{4}{4}$ ou $A'B' = 1$ cm

29. Traçando o diagrama correspondente a esta situação, o estudante obterá uma figura semelhante àquela da figura 5.47. Em seu diagrama, ele poderá verificar que a imagem será virtual e menor do que o objeto, em concordância com os resultados do exercício anterior.

30. A diferença (absoluta) entre os dois valores é $0{,}13 \cdot 10^8$ m/s. Para expressá-la em forma percentual, temos:

$$3{,}0 \cdot 10^8 \text{ m/s} \text{ —— } 0{,}13 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$
$$100 \text{ —— } x$$
$$\Rightarrow x = 4{,}3\%$$

Esse erro percentual pode ser considerado pequeno, tendo em vista a época (século XIX) e as condições em que a experiência foi realizada. O ótimo resultado obtido por Fizeau é uma consequência de seus esforços e da grande habilidade experimental de que era dotado.

31. Na pequena biografia de A. Michelson (legenda de sua fotografia), dissemos que suas experiências, de grande precisão, serviram de base para que A. Einstein, em 1905, lançasse as bases da teoria da relatividade. Em outras palavras, foram resultados muito precisos, obtidos experimentalmente por Michelson (e Morley), relacionados com a velocidade da luz, que serviram de orientação para Einstein quando estabeleceu as ideias revolucionárias da relatividade restrita, algumas das quais analisamos no capítulo 3, do volume 1.

32. a

Se a distância de Andrômeda à Terra é de $2 \cdot 10^6$ anos-luz, sabemos que a luz desta galáxia gasta 2 milhões de anos para chegar à Terra. Assim, o estudante conclui que as alternativas (b), (d) e (e) estão corretas. Como um foguete se propaga sempre com uma velocidade menor do que a da luz, (c) também está correta. A alternativa (a) é a única **errada**, porque não há nenhuma relação entre a idade da galáxia e sua distância da Terra.

33. a) No início do item "As enormes dimensões do Universo" do tópico 5.7, encontra-se a informação de que a ordem de grandeza de 1 ano-luz é 10^{13} km $= 10^{16}$ m. Então, a distância de um quasar à Terra, em anos-luz, é:

$$\frac{10^{26}}{10^{16}} \text{ ou } 10^{10} \text{ anos-luz!}$$

b) Temos

$$10^{10} = 10 \cdot 10^9 = 10 \text{ bilhões}$$

isto é, a luz do quasar gasta **dez bilhões de anos** para chegar à Terra!

34. Quando observamos um avião no céu, escutamos o som segundos após ter visto sua imagem. Situação semelhante acontece com um trovão, em que vemos o relâmpago alguns segundos antes de ouvirmos o som. Na verdade, toda mensagem, imagem e informação leva algum tempo para ir da origem ao seu destino. Antes, uma mensagem por carta, da Europa para a América, levava dias viajando de barco. Atualmente uma carta entre duas cidades brasileiras leva pelo menos dois dias para chegar. Com o uso de sistemas informatizados para levar imagens e sons, é possível se comunicar rapidamente. Hoje, com o auxílio de satélites, podemos receber mensagens quase instantaneamente, como vemos em transmissões de televisão ao vivo, no telefone ou no *e-mail*.

Pratique Física em equipe

1. No 1º caso (superfície metálica) observa-se que a ponta do lápis está encostada em sua imagem, isto é, a distância entre elas é nula. No 2º caso (espelho comum), mesmo quando a ponta toca a superfície do vidro, há certa distância entre ela e sua imagem. Com essas observações, podemos responder às questões da seguinte maneira:

a) No 1º caso, a superfície refletora é a própria superfície metálica e, então, quando a ponta toca essa superfície, sua distância da superfície refletora é nula. Portanto, será também nula a distância da imagem à superfície e, por isso, o objeto e sua imagem se tocam.

No 2º caso, concluímos que a superfície (externa) do vidro do espelho **não** é a superfície refletora, pois há certa distância entre a imagem e o objeto.

b) No espelho comum, a reflexão se faz em uma camada metálica que recobre a face interna da placa de vidro. Assim, quando a ponta toca a superfície externa da placa de vidro, ela está a certa distância da superfície refletora (distância esta igual à espessura da placa de vidro).

c) Tendo em vista a resposta da questão **b**, concluímos que a distância entre a ponta e a imagem será de 4 mm.

2. 1º) Os alunos observarão as três imagens do objeto. O professor deverá deixar bem claro que a 3ª imagem é formada pelos raios luminosos que sofreram uma segunda reflexão, como ilustra a figura da experiência.

2º) É interessante para o aluno observar que o número de imagens vai se tornando cada vez maior, à medida que o ângulo entre os espelhos diminui. Como já dissemos, este estudo deve se restringir à observação experimental do fato, sem a preocupação da análise matemática

do fenômeno e do cálculo do número de imagens. Se o professor desejar, poderá informar aos alunos que o número de imagens aumenta porque a possibilidade de reflexões sucessivas dos raios luminosos nos espelhos também aumenta.

Para o caso dos espelhos paralelos, o estudante observará que se forma um número infinito de imagens.

3ª) O professor deverá incentivar os estudantes a realizar esta atividade, pois, em geral, o resultado é gratificante, em virtude das belas imagens que eles poderão observar.

4. Esta atividade é importante porque apresenta ao estudante o princípio de funcionamento do periscópio. A figura (b) desta experiência mostra como este aparelho poderá ser montado, sem maiores dificuldades, por um estudante interessado.

5. a) A pessoa situada em *P* observará que a imagem final, fornecida pelo espelho E_2, está situada atrás deste espelho, isto é, a imagem forma-se no encontro dos prolongamentos dos raios recebidos pelo estudante. Logo, ela é uma imagem **virtual**.

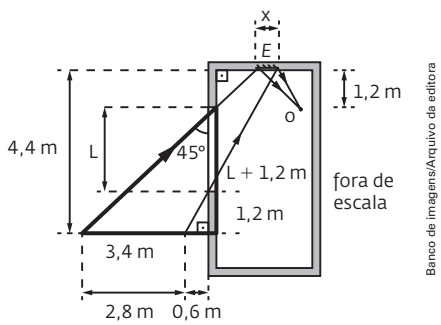
b) Não, pois a inversão provocada por E_1 desaparece em virtude da inversão provocada por E_2.

Problemas e testes

1. A região *CD* não pode receber luz da lâmpada *A* (azul), mas recebe luz da lâmpada *V* (vermelha). Então, essa região aparece parcialmente iluminada, isto é, sombreada com a cor vermelha. Com raciocínio análogo, vemos que *C'D'* será uma região sombreada com a cor azul (seria interessante que os alunos observassem experimentalmente esses resultados).

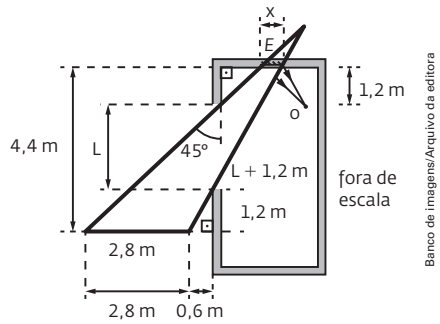
2. O espelho a ser usado deverá fornecer uma imagem direta (virtual) e de tamanho maior possível. A imagem fornecida por um espelho côncavo satisfaz essas condições, quando o objeto está localizado entre o foco e o espelho (figura 5.45). O espelho plano fornece imagem virtual do mesmo tamanho do objeto e, no espelho **convexo**, ela é menor do que o objeto. Por esse motivo, muitas pessoas usam espelhos côncavos para fazer a barba, se maquiar, etc.

3. a) Considerando o triângulo a partir da figura 2, temos:



$$tg\ 45° = \frac{3,4}{L+1,2} \Rightarrow 1 = \frac{3,4}{L+1,2} \Rightarrow L = 2,2\ m$$

b) Observando o triângulo a seguir, por semelhança de triângulos, temos:



$$\frac{x}{2,8} = \frac{1,2}{4,4+1,2} \Rightarrow x = 0,6\ m$$

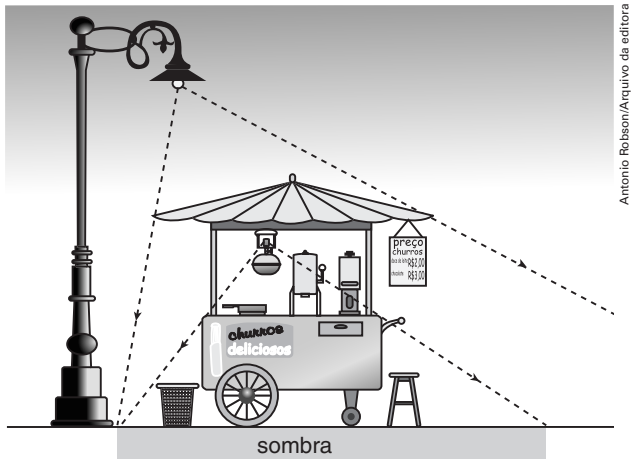
4. a) Tirando raios luminosos de qualquer ponto do Sol, em direção ao observador *A*, vemos que estes raios serão todos interceptados pela Lua. Portanto, *A* não recebe nenhuma luz do Sol e, assim, para ele o Sol estará em eclipse total.

b) Com procedimento análogo, vemos que o observador *B* receberá raios provenientes de algumas regiões do Sol, mas não poderá receber de outras. Então, para *B* haverá eclipse parcial do Sol.

c) Vemos que o observador *C* poderá receber luz de qualquer ponto do Sol, isto é, para ele não há eclipse do Sol.

5. a

A figura abaixo mostra a região de sombra pela influência exclusiva das duas fontes.



Observando a figura, notamos que a base do poste está iluminada, enquanto a lixeira e o banquinho estão na região de sombra.

6. c

Afirmativa (1) incorreta, pois a reta definida pelo centro de curvatura e pelo vértice do espelho é denominada eixo principal.

Afirmativa (3) correta.

Afirmativa (5) incorreta. O espelho côncavo tem foco real, e o convexo, foco virtual.

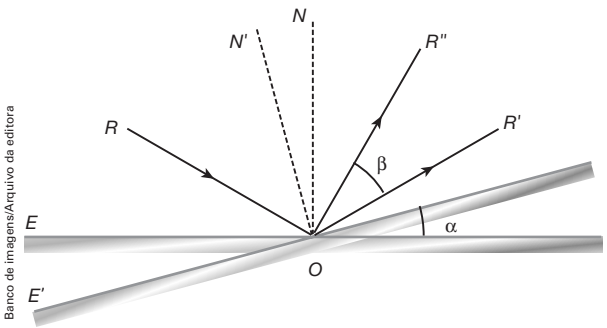
Afirmativa (7) correta.

Afirmativa (9) correta.

7. a) Os estudantes deverão traçar cuidadosamente os diagramas solicitados. Eles não terão dificuldades, podendo orientar-se pela figura 5.47.

b) Observando os diagramas traçados, os estudantes verão que as imagens são sempre virtuais e menores do que o objeto. Eles poderão, assim, inferir que o espelho convexo fornece sempre esse tipo de imagem (os estudantes que realizaram a 2ª parte da terceira experiência já terão chegado a essa conclusão).

8. a) Medindo o ângulo de incidência *RON* vemos que ele vale 60°. Então, devemos traçar o raio refletido *OR'*, de tal modo que o ângulo *R'ON* seja também de 60° (veja a figura abaixo).



Banco de imagens/Arquivo da editora

b) Na figura acima foi traçada a normal *ON'*, perpendicular a *E'O*.

c) O ângulo de incidência, para a nova posição do espelho, é *RON'*, cujo valor, vemos facilmente, é igual a 45°. Então, o novo raio refletido, *OR''*, deve fazer com *ON'* um ângulo também de 45° (veja a figura acima).

d) O raio refletido passou da posição *OR'* para a posição *OR''*, girando de um ângulo β mostrado na figura do item **a**. Medindo o valor deste ângulo, encontramos $\beta = 30°$.

e) Como $\alpha = 15°$ e $\beta = 30°$, a relação $\beta = 2\alpha$ foi verificada com boa precisão.

9. a) Como, no espelho plano, temos $D_i = D_o$, é claro que $D_i/D_o = 1$, isto é, aumento = 1.

b) Se aumento = 1, isto significa que a imagem tem o mesmo tamanho do objeto.

c) Sim, chegamos exatamente a este resultado quando estudamos o espelho plano.

10. d

Dados: $h = 1{,}5$ m; $d = 50$ cm $= 0{,}5$ m; $D = 20$ m.

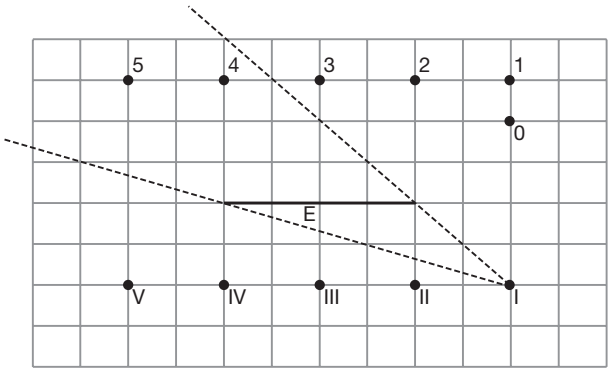
$$\frac{H}{h} = \frac{D}{d} \Rightarrow \frac{H}{1{,}5} = \frac{20}{0{,}5} \Rightarrow H = 1{,}5 \cdot 40 \Rightarrow H = 60 \text{ m}$$

11. a

No espelho plano, objeto e imagem são sempre simétricos em relação ao plano do espelho. O ponto simétrico de *O* é o ponto *I*.

12. d

A figura abaixo mostra o campo de visão para a imagem do objeto *O*. Nela podemos notar que apenas os observadores colocados nas posições 4 e 5 estão nessa região.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Capítulo 6: Refração da luz

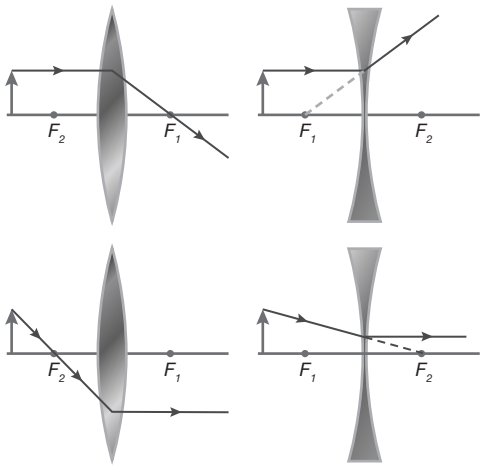
Orientações específicas

Não julgamos conveniente um estudo muito detalhado dos fenômenos da óptica geométrica em um curso do Ensino Médio. Por isso mesmo, não tratamos de situações muito específicas ou que apresentem um grau elevado de dificuldade e sofisticação matemática, como é o caso, por exemplo, do estudo detalhado das lâminas de faces paralelas ou ainda da análise minuciosa do prisma.

A seguir, listamos algumas recomendações que poderão ajudar o trabalho do professor durante o ensino da refração.

- O estudante costuma ter mais facilidade em compreender e manipular a lei de Snell quando ela é apresentada no formato: $n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$, daí termos optado por colocá-la dessa maneira em nosso livro. Também observamos que o aluno sente certa dificuldade em trabalhar com o índice de refração relativo e, por tratar-se de um conceito que julgamos dispensável, preferimos não introduzi-lo no texto.
- O estudo da formação de imagens por refração em um dioptro plano, como ocorre na situação ilustrada na figura 6.7, foi feito apenas qualitativamente. Este tipo de análise conceitual desperta o interesse do estudante, ao contrário do desenvolvimento matemático da situação, que, geralmente, contribui para desestimulá-lo.

- A análise da passagem da luz através de um prisma foi feita com o objetivo de apresentar a dispersão da luz branca e de obter o seu espectro. Desse modo, o professor não deverá se preocupar em deduzir fórmulas matemáticas para o cálculo do desvio da luz nesta situação. Um desenvolvimento matemático nesses moldes, um tanto elaborado para um iniciante no estudo da Física, afasta sua atenção dos conceitos envolvidos no fenômeno da dispersão, que deveriam ser o ponto central de suas reflexões durante o estudo deste tópico.
- A equação dos fabricantes de lentes deve ser tida como uma leitura opcional, a ser indicada somente para os casos em que a turma demonstra um interesse especial pelo assunto. Lembramos que a sofisticação matemática desta equação pode prestar um desserviço ao envolvimento do estudante com seus estudos, daí o cuidado com a extensão de sua análise.
- A influência do índice de refração do meio na convergência de uma lente foi analisada apenas qualitativamente. O estudo dessa influência pode se tornar um pouco mais detalhado caso o professor julgue necessário. Para isso, ele deve pedir ao aluno que use a equação do fabricante de lentes para diferentes valores de índices de refração do meio e da lente e que preste atenção ao valor e ao sinal encontrados para a distância focal, pois são essas as informações que determinam, numericamente, as características de convergência e divergência de uma lente.
- Para a obtenção dos diagramas de imagens conjugadas por lentes, utilizamos somente dois raios principais, representados na figura abaixo:



Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Preferimos não apresentar os raios que passam pelo centro da lente, pois seria difícil justificar suas trajetórias apenas com as informações fornecidas no livro.

- O professor deverá discutir detalhadamente os exemplos 1, 2, 3 e 4 resolvidos no tópico 6.5. Será por meio deles que o estudante aprenderá a usar os raios principais para localizar a imagem conjugada pela lente.
- A equação das lentes: $\frac{1}{f} = \frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i}$, poderia ter sido deduzida a partir da análise geométrica da figura 6.40. Entretanto, como uma análise semelhante já foi feita para o caso dos espelhos esféricos, julgamos que essa nova dedução não traria ganhos conceituais significativos para nossos alunos.
- Imaginamos que fugiria ao escopo do capítulo uma análise detalhada dos instrumentos ópticos, pois isso demandaria a introdução de termos técnicos e cálculos complexos. Por esse motivo, optamos por uma análise simples, que proporcionasse aos estudantes uma visão geral dos princípios físicos relacionados à formação das imagens fornecidas por tais instrumentos.
- Finalmente, recomendamos a leitura do texto da seção *Integrando*: "*Imagem e o sentido da visão*". O assunto lá abordado não apenas reúne vários dos conceitos estudados neste capítulo e no capítulo anterior, mas também costuma despertar de forma particular o interesse dos estudantes. Trata-se de um exemplo típico de como o estudo e o entendimento dos temas tratados no livro poderão promover a compreensão de fenômenos complexos do nosso cotidiano.

Resoluções das atividades

Para iniciar a conversa

Porque suas descobertas feitas com o telescópio contrariavam o modelo aristotélico. Galileu descobriu que a superfície da Lua era irregular, que a Via Láctea era formada por um conjunto de estrelas, que as estrelas não eram fixas, que havia quatro satélites girando em torno de Júpiter, que a Terra não era o centro do Universo.

A lente convergente concentra os raios de luz, portanto ela é utilizada para receber a luz proveniente do astro (objetiva). Por sua vez, a lente divergente espalha os raios de luz, logo é utilizada para enviar a luz aos olhos (ocular), ampliando a imagem.

Para a mesma função, um espelho côncavo também converge os raios de luz, portanto foi substituída a lente convergente, ou seja, a objetiva.

Verifique o que aprendeu

1. a) Temos:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{3{,}0 \cdot 10^8}{1{,}5 \cdot 10^8} \therefore n = 2{,}0$$

b) Na tabela 6.1, vemos que, para o diamante, temos $n = 2{,}42$. Então, de $n = c/v$, virá:

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3{,}0 \cdot 10^8}{2{,}42} \therefore v = 1{,}24 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

2. De $n = c/v$ obtemos $v = c/n$. Desta relação vemos que:

a) A luz propaga-se com maior velocidade no meio de **menor** índice de refração. Na tabela 6.1, este meio é o gelo.

b) A luz propaga-se com menor velocidade no meio de **maior** n. Na tabela 6.1, este meio é o rutilo.

3. a) n_1 é o meio no qual o raio luminoso está se propagando inicialmente. Este meio é o **ar**; então, temos $n_1 = 1{,}0$. Já θ_1 é o ângulo de incidência, então $\theta_1 = 30°$. Por sua vez, n_2 é o índice de refração da glicerina (meio onde a luz passa a se propagar) e pela tabela 6.1 temos $n_2 = 1{,}47$.

b) Substituindo os valores numéricos de **a** na lei de Snell, $n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$, vem:

$$1{,}0 \operatorname{sen} 30° = 1{,}47 \operatorname{sen} \theta_2 \Rightarrow \operatorname{sen} \theta_2 = 0{,}34$$

Consultando a tabela de senos no final do livro, obtemos $\theta_2 = 20°$.

c) O aluno deve fazer um desenho no caderno mostrando a refração do raio luminoso, como aquele da seção *Respostas* (com os valores exatos dos ângulos de incidência e de refração).

4. a) Como $n_2 > n_1$, o raio, ao se refratar, **aproxima-se da normal**, como está mostrado na figura **a** da resposta deste exercício na seção *Respostas*.

b) Quando $n_2 < n_1$, o raio, ao se refratar, **afasta-se da normal**, como mostra a figura **b** da resposta deste exercício na seção *Respostas*.

5. a) Se traçarmos a normal no ponto de incidência, veremos que o raio refratado afastou-se da normal.

b) Uma vez traçada a normal, θ_1 é menor do que θ_2.

c) Como o raio refratado afastou-se da normal, concluímos que $n_A > n_B$.

d) A luz tem maior velocidade no meio de menor índice de refração, isto é, no meio B.

6. Pela figura 6.10 vemos que, ao olhar para o céu, o observador enxerga uma imagem virtual da estrela. A estrela propriamente dita encontra-se mais próxima do horizonte.

7. a) O estudante deverá traçar, na figura, os prolongamentos dos raios refratados, como foi feito na figura 6.7. A imagem do peixe estará situada no encontro desses prolongamentos.

b) Como a imagem está situada no encontro dos **prolongamentos** dos raios refratados, ela é uma **imagem virtual**.

c) O observador está vendo a imagem do peixe, mas o peixe de verdade encontra-se abaixo daquela imagem. Assim, o observador deverá apontar o arpão para um ponto situado abaixo da posição onde ele vê o peixe.

8. a) Quando a luz passa de um meio (1) para outro meio (2), sendo $n_1 > n_2$, temos $\operatorname{sen} L = n_2/n_1$. Em nosso caso, o meio (1) é o vidro e o meio (2) é a água. Pela tabela 6.1, obtemos $n_1 = 1{,}50$ e $n_2 = 1{,}33$. Então:

$$\operatorname{sen} L = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1{,}33}{1{,}50} = 0{,}886$$

Consultando a tabela de senos, obtemos $L = 62°$.

b) Raio OA: como o seu ângulo de incidência é menor do que 62° (ângulo limite), ele passa a se propagar na água, afastando-se da normal (pois $n_2 < n_1$).

Raio OB: como o seu ângulo de incidência é igual a 62° (ângulo limite), ele se refrata tangenciando a superfície de separação dos dois meios, isto é, com ângulo de refração $\theta_2 = 90°$.

Raio OC: como o seu ângulo de incidência é maior do que o ângulo limite, ele não passará para a água, sofrendo reflexão total.

Observação: O professor deverá fazer com que os alunos tracem esses raios em uma cópia da figura do exercício.

9. Não, porque agora o raio luminoso está passando da água para o vidro, isto é, de um meio para outro cujo índice de refração é maior. Nestas condições, não ocorre reflexão total (o raio se refratará, qualquer que seja o seu ângulo de incidência).

10. a) Pela figura 6.24.a, vemos que os raios extremos do feixe que emerge da gota são o violeta (mais acima) e o vermelho (mais abaixo). Então, o observador está recebendo o raio vermelho.

b) Conforme mostra a figura 6.24.b, a luz violeta que chega ao observador é proveniente das gotas **mais baixas**.

11. a) Observando a figura 6.18, vemos que a cor que sofre maior **desvio** (afasta-se mais da direção inicial de propagação) é a **luz violeta**.

b) Ainda na figura 6.18, vemos que o feixe mais afastado da normal, isto é, aquele para o qual o ângulo de refração é **maior**, será o feixe **vermelho**.

c) O índice de refração do vidro tem maior valor para a **luz violeta**.

Observação: A resposta da questão **c**, se o professor desejar, poderá ser justificada da seguinte maneira: pela lei de Snell, temos $n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$ e, como $n_1 = 1{,}0$ (índice do ar) e $n_2 = n_v$ (índice do vidro), vem:

$$\operatorname{sen} \theta_1 = n_v \operatorname{sen} \theta_2 \therefore n_v = \frac{\operatorname{sen} \theta_1}{\operatorname{sen} \theta_2}$$

Mas, nesta experiência, θ_1 é o mesmo para todas as cores (luz branca) e θ_2 tem o **menor** valor para a luz violeta. Assim, n_v apresentará **maior** valor para esta cor.

12. a) O círculo central é azul (sob luz branca) e, portanto, absorve a luz amarela. Assim, o círculo apresenta-se **escuro**, pois não está refletindo luz alguma.

b) O losango é amarelo (sob luz branca) e, portanto, reflete a luz amarela. Assim, o losango apresenta-se **amarelo**, pois está refletindo luz desta cor.

c) A faixa e as estrelas são brancas (sob luz branca), isto é, refletem todas as cores. Portanto, refletirão a luz amarela e se apresentarão com esta cor.

d) O restante da bandeira é verde (sob luz branca) e, portanto, absorve a luz amarela. Assim, esta parte apresenta-se **escura**, pois não está refletindo luz alguma.

13. a) Como a lente é convergente, os raios paralelos ao seu eixo vão convergir no foco, a uma distância de 5 cm da lente (figura **a** da resposta deste exercício na seção *Respostas*).

b) Como a lente é divergente, os raios paralelos a seu eixo vão divergir de modo que seus prolongamentos passem pelo foco, situado a 5 cm da lente (figura **b** da resposta deste exercício na seção *Respostas*).

14. a) Como a lente é convergente, os raios que emergem paralelamente ao seu eixo são provenientes do foco (como mostra a figura **a** da resposta deste exercício na seção *Respostas*).

b) Como a lente é divergente e os raios estão emergindo paralelamente ao seu eixo, os raios incidentes devem ser tais que seus prolongamentos passem pelo foco (como mostra a figura **b** da resposta deste exercício na seção *Respostas*).

15. As lentes citadas encontram-se desenhadas na figura 6.27.

a) Vemos que esta lente apresenta as extremidades mais finas do que a parte central. Logo, ela é uma lente **convergente**.

b) Esta lente apresenta as extremidades mais espessas do que a parte central. Então, ela é **divergente**.

c) Como se observa, esta lente possui a parte central mais espessa do que as extremidades. Portanto, ela é **convergente**.

16. a) Como ela possui a parte central mais fina, esta lente, no ar, é divergente.

b) Como os raios luminosos não sofreram desvio ao atravessar a lente, concluímos que $n_1 = n$.

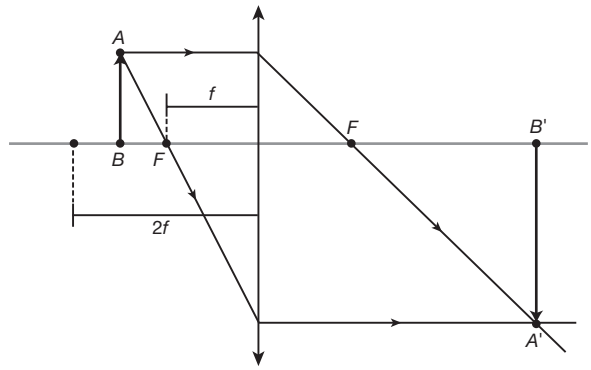
c) Uma lente que no ar é divergente torna-se convergente ao ser mergulhada em um meio cujo índice de refração é maior do que o da lente. Então, na figura deste exercício, devemos ter $n_2 > n$.

17. a) Orientando-se pela figura 6.38 (do exemplo 1), é possível localizar a imagem do objeto *AB* fornecida pela lente convergente.

b) Como o diagrama é semelhante ao da figura 6.38, a imagem é **real**, invertida e menor do que o objeto.

18. a) Utilizando os raios principais, traçamos o diagrama mostrado na figura, obtendo a imagem *A'B'* do objeto *AB* colocado na posição solicitada (D_o compreendida entre f e $2f$).

b) Comparando a figura abaixo com aquela traçada no exercício anterior, o estudante verificará que, quando um objeto é aproximado da lente (sem ultrapassar o foco), sua imagem permanece real e, ao afastar-se da lente, aumenta de tamanho.



Banco de imagens/Arquivo da editora

19. a) Na equação $(1/f) = (1/D_o) + (1/D_i)$ temos $f = 4$ cm (positivo, pois a lente é convergente) e $D_o = 12$ cm (sempre positiva). Então:

$$\frac{1}{4} = \frac{1}{12} + \frac{1}{D_i} \text{ ou } \frac{1}{D_i} = \frac{1}{4} - \frac{1}{12} \text{ ou } \frac{1}{D_i} = \frac{2}{12}$$

$$\therefore D_i = 6 \text{ cm}.$$

b) O aumento *A'B'/AB* será dado por:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{D_i}{D_o} = \frac{6}{12} \quad \therefore \quad \frac{A'B'}{AB} = 0{,}5$$

c) O resultado, aumento = 0,5, indica que o tamanho da imagem é igual à metade do tamanho do objeto.

d) Sim, pois, como D_i é positiva, a imagem é real e, como o aumento = 0,5, a imagem é menor do que o objeto. Esses resultados estão de acordo com o diagrama traçado no exercício 17.

20. a) Este caso corresponde à situação analisada no exemplo 3. Orientando-se pela figura 6.40, os estudantes localizarão facilmente a imagem do objeto. Observando o diagrama construído, eles verão que a imagem é virtual, direta e menor do que o objeto (como na figura 6.40).

b) O diagrama, para este caso, é traçado de maneira idêntica ao da questão **a**. Observando o diagrama, o estudante concluirá que a imagem é, ainda, virtual, direta e menor do que o objeto.

c) Baseando-se nos diagramas traçados em **a** e **b**, o estudante poderá concluir que a lente divergente fornece sempre uma imagem virtual, direta e menor do que o objeto, qualquer que seja a posição deste sobre o eixo da lente.

21. a) Na equação $(1/f) = (1/D_o) + (1/D_i)$ temos $f = -4$ cm (pois a lente é divergente) e $D_o = 12$ cm (sempre positiva).

Então:

$$-\frac{1}{4} = \frac{1}{12} + \frac{1}{D_i} \Rightarrow \frac{1}{D_i} = -\frac{1}{4} - \frac{1}{12} \Rightarrow \frac{1}{D_i} = -\frac{4}{12}$$

$$\therefore D_i = -3 \text{ cm}$$

b) Temos (não é necessário considerar o sinal de D_i):

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{D_i}{D_o} = \frac{3}{12} \therefore \frac{A'B'}{AB} = \frac{1}{4} = 0{,}25$$

c) De $(A'B'/AB) = 0{,}25$, com $AB = 10$ cm, vem:

$$\frac{A'B'}{10} = 0{,}25 \therefore A'B' = 2{,}5 \text{ cm}$$

Observação: Seria interessante que o aluno comparasse as respostas deste exercício com o diagrama traçado no exercício 20.a.

Aplicações da Física: Microscopia moderna

1. Como toda ciência fundamental, a Física é capaz de, com suas descobertas, permitir novas reflexões acerca do mundo que conhecemos. Durante muito tempo acreditávamos que todo o Universo se constituía somente da Via Láctea, e hoje sabemos que é muito maior. Porém, como muitos dos fenômenos descritos pela Física são absolutamente abstratos, é possível refletir se eles de fato descrevem o mundo ou se apenas servem de instrumentos de previsão de resultados experimentais. Espera-se que os estudantes discutam o papel que a Física tem na construção de suas visões de mundo.

2. Ao fazer uso de instrumentos de amplificação em uma análise pericial, é possível encontrar evidências que dificilmente seriam identificadas a olho nu. Além disso, pequenas marcas e traços, característicos de certos materiais e contextos, permanecem no ambiente a ser investigado, embora sua análise, na maioria das vezes, só seja possível com o uso dos microscópios ópticos ou até mesmo dos eletrônicos.

22. a) Esta situação está mostrada na figura 6.45.a e corresponde à **miopia**.

b) Na figura 6.45.b, se os raios luminosos que partem do objeto sofrerem uma divergência antes de penetrar no olho, a imagem vai se formar a uma maior distância do cristalino. Então, com uma divergência apropriada, a imagem poderá se formar sobre a retina. Portanto, para corrigir a miopia, a pessoa deve usar óculos com lentes **divergentes**.

23. Para que a imagem seja nítida, ela deve se formar sempre sobre a retina, isto é, D_i deve permanecer constante enquanto D_o e f variam. Da equação das lentes obtemos:

$$\frac{1}{D_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{D_o}$$

Por esta relação vemos que, para D_i permanecer constante, se D_o diminuir, o valor de f também deverá diminuir. Portanto, quando um objeto é aproximado de nosso olho, a distância focal do cristalino deve **diminuir**, para que possamos observá-lo nitidamente.

24. a) Dissemos, no texto, que a lupa (ou "lente de aumento") é uma lente **convergente**.

b) Na lupa, o objeto a ser observado deve estar situado entre o foco e a lente. Então, a formiga que está sendo observada através da lupa deve estar situada a uma distância da lente **menor** do que sua distância focal.

c) Como a formiga está situada entre o foco e a lente, sua imagem é virtual (e ampliada).

25. a) Deve ser **maior**, porque a objetiva deve fornecer uma imagem real do objeto (observe, então, que a objetiva deve ser uma lente de distância focal muito pequena).

b) Como mostra a figura 6.49, a imagem real fornecida pela objetiva funciona como um objeto para a ocular.

c) A imagem I_1, na figura 6.49, está entre a ocular e o seu foco. Portanto, a imagem final I_2 será **virtual**.

d) Na figura 6.49 a imagem final (I_2) no microscópio é **invertida** em relação ao objeto.

26. Na época de Leonardo da Vinci (por volta do ano 1500) a natureza ondulatória do som já se encontrava estabelecida e o fenômeno do eco já era interpretado como consequência da reflexão das ondas sonoras. Observando que a luz sofria reflexões de maneira semelhante ao som, Leonardo da Vinci levantou a hipótese de que a luz poderia ser também um tipo de movimento ondulatório.

27. A grande polêmica estabelecida entre Newton e Huyghens, no século XVII, estava relacionada com diferentes concepções sobre a natureza da luz: Newton era adepto de um modelo corpuscular (a luz seria constituída de partículas em movimento), enquanto Huyghens defendia a ideia de que a luz deveria ser um tipo de movimento ondulatório.

28. a) A luz, ao passar do ar para a água, se refrata da maneira mostrada na figura 6.53. A força que seria responsável por essa refração (de acordo com o modelo corpuscular) provocaria também um aumento no valor da velocidade das "partículas de luz". Então, a velocidade da luz na água seria **maior** do que no ar.

b) Ao passar da água para o vidro, a luz se refrata de maneira semelhante àquela mostrada na figura 6.53 (do ar para a água). Então, com a mesma análise desenvolvida em **a**, concluímos que a velocidade da luz no vidro deve ser **maior** do que na água (de acordo com o modelo corpuscular).

29. a) Para provocar um desvio como aquele mostrado na figura deste exercício (raio luminoso se afastando da normal), a força sobre as partículas de luz deveria estar dirigida de *O* para *P*.

b) Neste caso, a força teria um componente em sentido contrário à velocidade das partículas, o que provocaria uma **redução** no valor desta velocidade. Então, a velocidade da luz em *B* deveria ser menor do que em *A*.

c) As previsões do modelo corpuscular da luz estão em desacordo com os resultados obtidos experimentalmente. Portanto, a experiência mostraria que a velocidade da luz em *B* é, na realidade, **maior** do que em *A*.

30. De acordo com o modelo corpuscular, a velocidade da luz na água deveria ser maior do que no ar. Ao medir a velocidade da luz na água, Foucault encontrou um valor **menor** do que no ar, isto é, um resultado **contrário** àquele previsto pelo modelo corpuscular.

31. Fazendo a luz, após a dispersão pelo prisma, incidir em um anteparo com uma pequena fenda, Newton conseguiu obter um feixe de luz constituído por apenas uma das cores do espectro (luz monocromática). Usando um segundo prisma de vidro, Newton fez este feixe passar através dele e verificou que o prisma nada acrescentou ao feixe, isto é, o feixe monocromático não sofreu nenhuma alteração ao passar pelo prisma de vidro.

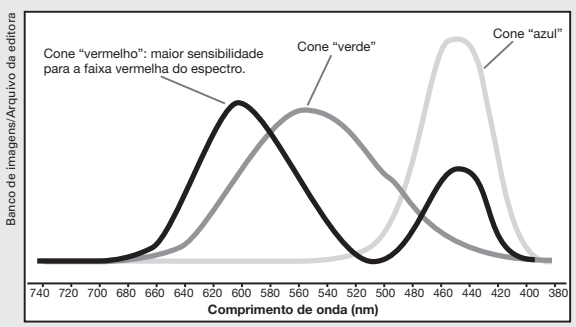
32. Em um dicionário etimológico ou, talvez, em uma enciclopédia, o estudante aprenderá que a palavra espectro deriva do latim *spectrus*, que significa "visão" ou "fantasma". Newton usou esse termo para designar o espectro solar porque considerou o espetáculo das cores uma **bela aparição**.

33. O período romântico ficou caracterizado por uma forte oposição ao modelo de ciência tradicional. Mesmo tendo expressiva força, não chegou a se estabelecer dentro da ciência, mas fomentou diversas críticas ao conhecimento científico, incluindo a feita por Goethe à Newton. Atualmente, desde fins da década de 1970, existem alguns movimentos que criticam a ciência, clamando por uma ciência pós-moderna. Existem ainda diversos outros movimentos que se aproximam do esoterismo, criticando a ciência, o que às vezes se assemelha às críticas românticas dos séculos passados, porém com menor alcance.

INTEGRANDO... IMAGEM E O SENTIDO DA VISÃO

1. Os cones são responsáveis pela visão diurna, operam melhor na presença de luz intensa e são capazes de distinguir as cores. Os bastonetes não distinguem cores e funcionam melhor à noite. É por essa razão que não enxergamos bem as cores no escuro.

A retina humana contêm três tipos de cone. Cada um deles é capaz de detectar apenas faixas delimitadas de comprimento de ondas (que correspondem a cores diferentes). A figura abaixo mostra as cores captadas por cada um dos três tipos de cone e seus respectivos comprimentos de onda.



Banco de imagens/Arquivo da editora

2. Pela figura, percebe-se que o ser humano é capaz de enxergar apenas as cores que correspondem aos comprimentos de onda entre 400 e 700 nm. A radiação infravermelha, apesar de também ser formada por ondas eletromagnéticas, possui comprimentos de onda maiores do que 700 nm e, portanto, não são detectadas pelos cones presentes na retina, sendo invisível para nós.

PRATIQUE FÍSICA EM EQUIPE

1. a) O estudante verá que seu dedo não estará mais apontando o objeto. Parece que seu dedo sofreu uma brusca mudança de direção.

b) Quando os dois olhos estão abertos, o cérebro combina as duas imagens que viu separadamente, fornecendo-lhe a imagem tridimensional de sua mão. Verifique.

Os filmes em 3D, os desenhos estereoscópicos, os hologramas, etc. são feitos de maneira a apresentar a cada um de seus olhos imagens ligeiramente diferentes, a fim de que seu cérebro possa combiná-las para dar a ilusão de relevo. Existem revistas em quadrinhos com desenhos em duas cores, ligeiramente defasadas, para serem observadas com óculos também de duas cores, que nos dão a ilusão de três dimensões.

c) Numa certa posição, o estudante verá um furo em sua mão. O cérebro mistura a visão da imagem fornecida por um olho com a visão fornecida pelo outro, levando-o a essa ilusão.

2. Com algumas tentativas, o estudante conseguirá obter uma largura da fenda e posições da lanterna e do anteparo tais que o feixe de luz seja estreito e bem nítido. Nessas condições, ele conseguirá facilmente fazer as observações descritas no roteiro da experiência.

3. Realizando esta atividade, o estudante terá oportunidade de observar dois fatos que foram citados no texto: um feixe de raios luminosos paralelos (do Sol) convergindo no foco da lente e uma imagem real fornecida pela lente convergente projetada em um anteparo.

Além disso, o aluno medirá a distância focal da lente por meio de dois processos diferentes. Se suas medidas forem realizadas com certo cuidado, ele obterá para f dois valores razoavelmente concordantes.

PROBLEMAS E TESTES

1. a) De $n = c/v$ obtemos $v = c/n$. Então, como $n = 1{,}5$, vemos que a velocidade, v, da luz neste vidro é **1,5 vez menor** do que no vácuo.

b) Como a velocidade da luz tornou-se 1,5 vez menor, ela gastará um tempo **1,5 vez maior**, isto é:

$$\Delta t = 1{,}5 \cdot 500 \therefore \Delta t = 750 \text{ s}$$

2. a) Podemos ler os valores destes ângulos na fotografia. Temos $\theta_1 = 60^\circ$ e $\theta_2 = 35^\circ$.

b) Pela lei de Snell temos: $n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$. Em nosso caso, o meio (1) é o ar e o meio (2) é o vidro. Então, $n_1 = 1{,}0$ e $n_2 = n_v$ (índice de refração do vidro). Assim:

$$1{,}0 \cdot \operatorname{sen} 60^\circ = n_v \cdot \operatorname{sen} 35^\circ \therefore n_v = \frac{\operatorname{sen} 60^\circ}{\operatorname{sen} 35^\circ}$$

Consultando a tabela de funções trigonométricas no final do volume, obtemos (considerando dois algarismos significativos):

$$\operatorname{sen} 60^\circ = 0{,}87 \text{ e } \operatorname{sen} 35^\circ = 0{,}57$$

Portanto:

$$n_v = \frac{0{,}87}{0{,}57} \therefore n_v = 1{,}5$$

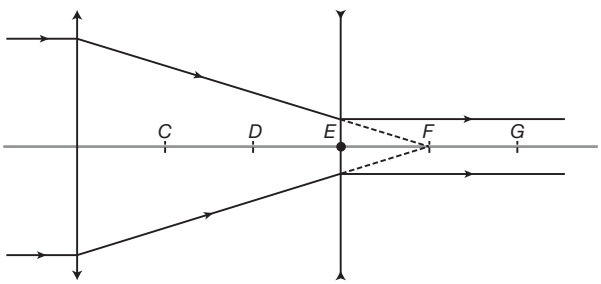
Observação: Deve-se destacar que este problema apresenta uma situação real usada nos laboratórios para determinar o índice de refração de um meio transparente. Observe-se que, uma vez conhecido o valor de n, podemos determinar o valor da velocidade da luz naquele meio ($v = c/n$).

3. c

Observemos, inicialmente, que, como o raio luminoso está passando do ar para o vidro, ele vai se aproximar da normal. Traçando pelo ponto *O* a normal à superfície refratora, vemos que sua direção coincide com *OB*. Então, *OB* não pode ser o raio procurado, pois o raio refratado somente terá a direção da normal se o raio incidente também for normal à superfície (o que não ocorre em nosso caso). Dos demais raios mostrados na figura, o único que está se aproximando da normal é o raio *OC*.

4. Ao penetrar na gota, o raio luminoso está passando do ar para a água e, assim, ele deverá se aproximar da normal. Como a gota é esférica, a normal no ponto *O* é representada por *OC* (direção radial). Vemos então que, para essa primeira refração, os raios *II* e *III* representam **trajetórias possíveis**, pois ambos se aproximam da normal. Para examinar esses dois raios ao emergirem da gota, lembremos que, nesta segunda refração, o raio deverá se afastar da normal (passagem da água para o ar). Se traçarmos as normais nos pontos de emergência (ligando *C* a cada um desses pontos), veremos que é o raio *III* aquele que se afasta da normal. Portanto, a trajetória correta é a **trajetória III**.

5. Para que os raios luminosos, após atravessarem uma lente divergente, sejam paralelos ao seu eixo, eles devem incidir na lente de tal maneira que seus prolongamentos passem pelo foco. Então, se a lente divergente for colocada no ponto *E*, o **seu foco estará em *F*** e esta condição será satisfeita (figura a seguir). Portanto, os raios emergirão da lente divergente paralelamente ao eixo do sistema.



Banco de imagens/Arquivo da editora

6. e

O índio enxerga o peixe porque existem raios de luz que foram refletidos por ele na água e se transmitiram até os olhos do índio no ar. Como a luz ao passar da água para o ar sofre refração, a direção dos raios de luz se altera. Isso explica a necessidade de o índio jogar a lança em uma posição mais abaixo da qual ele vê o peixe.

7. a

Como é o fenômeno de transição da luz de um meio para outro, que é conhecido como refração.

Capítulo 7: Movimento ondulatório

Orientações específicas

Os fenômenos ondulatórios estão presentes em inúmeras situações de nosso dia a dia. Entre eles, podemos citar as ondas do mar, o som, os terremotos e muitos outros exemplos que examinaremos neste capítulo. Esse fato já seria suficiente para justificar a introdução do assunto em um curso de Física para o Ensino Médio. No entanto, existe outro aspecto, tão importante quanto o citado, que torna ainda mais relevante o estudo do tema: a conclusão científica de que a luz também apresenta comportamento ondulatório. Desse modo, ao longo deste capítulo, além de adquirir conceitos gerais sobre o movimento das ondas, o estudante terá a oportunidade de acompanhar a evolução do modelo ondulatório da luz.

Solicitamos ao professor que observe as seguintes recomendações:

- A análise do movimento harmônico simples deve ser feita de maneira apenas qualitativa, como está apresentada no texto que introduz o capítulo. Observamos que os estudantes, em geral, têm dificuldade em lidar com expressões trigonométricas do tipo $x = A \cos(\omega t + \delta)$ ou $v = -\omega A \operatorname{sen}(\omega t + \delta)$, etc.; daí termos optado por incluir as equações do movimento harmônico simples somente no apêndice do capítulo.
- Julgamos muito importante que o estudante adquira, com segurança, os conceitos de amplitude, ciclo, frequência e período, abordados no tópico 7.1, conceitos estes que serão imprescindíveis para a compreensão dos fenômenos que serão vistos no desenrolar do capítulo.

- Outro aspecto que deve ser destacado pelo professor é a relação de interdependência entre frequência e período. O aluno precisa entender que, quando estiver em posse de uma dessas grandezas, a outra fica automaticamente determinada pelo emprego da equação: $T = \frac{1}{f}$. Além disso, é importante que compreenda a razão de proporcionalidade inversa entre essas duas grandezas, como enfatizamos no tópico 7.1.
- Durante a análise da refração de uma onda no tópico 7.3, preferimos novamente destacar apenas seus aspectos qualitativos. Portanto, o professor deverá se concentrar em fazer o aluno entender a razão da mudança de direção da onda quando ela muda de meio (figura 7.22) e deixar para um plano secundário as considerações matemáticas que conduzem à relação $\text{sen}\,\theta_1/\text{sen}\,\theta_2 = v_1/v_2$.
- Deve-se observar que no final no tópico 7.3, após o estudo da reflexão e da refração de uma onda, introduzimos as primeiras suspeitas históricas que levaram à constatação experimental da natureza ondulatória da luz, isto é, nesse momento do curso começamos a estruturar o modelo ondulatório da luz. Após o estudo da difração, no final no tópico 7.4, concluímos que a luz pode mesmo se comportar como uma onda, uma vez que é possível observar sua difração. Essa conclusão confirma-se no tópico 7.6, quando mostramos que é possível obter interferência de feixes luminosos. A linha que seguimos no texto corresponde, aproximadamente, ao desenvolvimento histórico do modelo ondulatório da luz.
- Os fenômenos da difração e da interferência também foram examinados de forma qualitativa, uma vez que o estudo quantitativo exigiria um ferramental matemático muito além, em termos de complexidade, do que aquele que pretendemos desenvolver em nosso curso.
- A equação $\Delta x = \frac{L\lambda}{d}$ foi apresentada para que o estudante entendesse como foi possível medir, pela primeira vez, o comprimento de onda da luz.
- Deixamos a apresentação e o estudo das ondas estacionárias para o nosso apêndice por julgarmos se tratar de conteúdo que não contribui de forma essencial para os objetivos a que nos propusemos, qual seja, estruturar o modelo ondulatório da luz.

Resoluções das atividades

Para iniciar a conversa

Som, vibração, ressonância, frequência, amplitude e oscilação.

A faixa de capacidade de audição humana está compreendida entre os valores de 20 hertz a 20 000 hertz.

Aumentando a tensão da corda, aumentamos também a velocidade de propagação dessa onda na corda e, consequentemente, sua frequência.

Verifique o que aprendeu

1. a) Na posição mostrada, a mola está comprimida. Portanto, a força restauradora que ela exerce sobre o bloco está voltada para a **esquerda** (para o ponto *O*).

b) Pela 2ª lei de Newton, a aceleração do bloco tem o mesmo sentido da força que a provoca. Então, a aceleração também está dirigida para a **esquerda**.

c) Como a velocidade do bloco está dirigida para a direita e sua aceleração aponta para a esquerda, concluímos que o seu movimento é **retardado**.

2. a) O módulo da força é dado por $F = kX$. Então F terá valor máximo quando o valor de X também o for, isto é, nos pontos B e B'.

b) Teremos $F = 0$ em $X = 0$, isto é, no ponto O.

c) O bloco possui sua maior velocidade ao passar pelo ponto O.

d) A velocidade do bloco anula-se nos pontos extremos da trajetória, isto é, em B e em B'.

e) Quando o bloco está à direita de O, a força da mola está dirigida para a esquerda (figuras 7.1.b e c) e,quando o bloco está à esquerda de O, a força está dirigida para a direita (figuras 7.1.d e e). Portanto, quando o bloco passa por O, a força que atua nele muda de sentido.

3. a) Sim, pois este movimento é equivalente à definição dada de 1 ciclo (deslocar-se de B a B' e retornar a B).

b) Após passar por O, ao voltar a esse ponto pela 1ª vez, o bloco terá efetuado apenas meio ciclo (foi de O a B e retornou a O). O bloco completará 1 ciclo quando passar pela 2ª vez por O (foi a B' e retornou a O). Assim, se o bloco passou 100 vezes consecutivas por O, ele efetuou 50 vibrações completas, isto é, 50 **ciclos**.

c) Como o bloco efetuou 50 ciclos em 100 s, sua frequência será:

$$f = \frac{50 \text{ ciclos}}{100 \text{ s}} = 0{,}50 \text{ ciclo/s ou } f = 0{,}50 \text{ hertz}$$

d) O período é o tempo gasto para efetuar 1 ciclo. Como o bloco gastou 100 s para efetuar 50 ciclos, seu período será:

$$T = \frac{100 \text{ s}}{50} \Rightarrow T = 2{,}0 \text{ s}$$

O valor de T poderia também ser determinado da seguinte maneira:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{0{,}50} \Rightarrow T = 2{,}0 \text{ s}$$

4. a) Amplitude A é a distância da posição de equilíbrio, isto é, do ponto médio da trajetória até a sua extremidade. Então:

$$A = \frac{BB'}{2} = \frac{10}{2} \Rightarrow A = 5{,}0 \text{ cm}$$

b) Durante um período, a extremidade da lâmina efetua 1 ciclo, isto é, vai de B a B' e retorna a B percorrendo, então, 20 cm. Assim, durante o tempo de 2 períodos a distância percorrida será $2 \cdot 20 \text{ cm} = 40 \text{ cm}$.

5. Analisando a relação $T = 2\pi\sqrt{m/k}$, temos:

a) Quanto menor for m, menor será T. Portanto, o período **diminuirá**.

b) Sabemos que quanto mais flexível for a mola, menor será o valor de k desta mola. Como o valor de k diminuiu, vemos pela equação que o período **aumenta**.

c) O período **não depende** da amplitude, pois ela não aparece na expressão de T. Portanto, neste caso o período **não sofrerá alteração**.

6. e

Os pontos da corda deslocam-se somente para cima ou para baixo com a propagação da onda.

7. a) O período é:

$$T = \frac{1}{2} = 0{,}5 \text{ s}$$

b) Da figura do exercício 6, vemos que a amplitude é igual a 5 cm.

c) Na figura do exercício 6, vemos metade do comprimento de onda. Logo,

$$\lambda = 60 \text{ cm}$$

d) A velocidade de propagação é igual a:

$$v = \lambda \cdot f = 60 \cdot 2 = 120 \text{ cm/s}$$

8. a) De $\lambda = v/f$ vem $f = v/\lambda$. Essa relação fornece-nos a frequência da onda, isto é, a frequência de oscilação de qualquer ponto da corda. Para a corda (1) teremos (observando que $v_1 = 150$ cm/s):

$$f = \frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{150}{30} \Rightarrow f = 5{,}0 \text{ hertz}$$

b) Este tempo é igual ao período T da onda. Temos:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{5{,}0} \Rightarrow T = 0{,}20 \text{ s}$$

c) A frequência de vibração deste ponto é, como dissemos, a mesma dos demais pontos da corda (1), ou seja, $f = 5{,}0$ hertz.

d) A frequência de uma onda não se altera quando ela passa de um meio para outro. Assim, a frequência da onda na corda (2) será, ainda, $f = 5{,}0$ hertz.

9. A distância entre duas cristas consecutivas é o comprimento de onda λ_2. Temos, de $\lambda = v/f$ (observando que $v_2 = 100$ cm/s):

$$\lambda_2 = \frac{v_2}{f} = \frac{100}{5{,}0} \Rightarrow \lambda_2 = 20 \text{ cm}$$

10. a) O ângulo de incidência $\hat{i}$ é o ângulo entre o raio incidente e a normal à barreira. Assim, $\hat{i} = 60°$, como mostra a figura da resposta deste exercício.

b) Como $\hat{r} = \hat{i}$, temos $\hat{r} = 60°$.

c) O raio refletido forma um ângulo $\hat{r} = 60°$ com a normal à barreira, como mostra a figura da resposta deste exercício.

d) As cristas da onda refletida devem ser perpendiculares ao raio refletido, como mostra a figura da resposta.

e) Como a onda, após a reflexão, continua a se propagar no mesmo meio, o seu comprimento de onda não se altera (observe, na figura da resposta, que a separação entre as cristas da onda refletida é igual à da onda incidente).

11. a) O período da onda é igual ao da fonte que a produziu. Então, $T = 0{,}20$ s.

b) A rolha simplesmente oscila verticalmente, para cima e para baixo, sem sofrer translação na direção em que a onda se propaga.

c) A frequência de vibração da rolha é igual à da onda. Como $T = 0{,}20$ s, vem:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0{,}20} \Rightarrow f = 5{,}0 \text{ vib/s} = 5{,}0 \text{ hertz}$$

d) Como $\lambda = 5{,}0$ cm, de $\lambda = v/f$, vem:

$$v = f\lambda = 5{,}0 \cdot 5{,}0 \Rightarrow v = 25 \text{ cm/s}$$

12. Se o λ da luz fosse aproximadamente igual a 1 cm (ou maior), ela sofreria difração perceptível ao passar pelo orifício citado. Como isso não acontece, concluímos que o λ da luz é **muito menor** do que 1 cm.

13. a) Se não existisse o fenômeno da difração, a onda se propagaria em linha reta após passar pela barreira, como mostra a figura da resposta deste exercício.

b) Em virtude da difração, a onda contorna o obstáculo (a propagação da onda deixa de ser retilínea).

14. a) Diminuindo-se a largura do orifício, a difração torna-se **mais** acentuada.

b) Aumentando-se a frequência da onda, o seu comprimento diminui. Então, se λ diminui a difração torna-se **menos** acentuada.

15. Em virtude da difração da luz, quanto **menor** for a largura do orifício, mais largo ele aparecerá na fotografia. Então, os orifícios deste exercício parecem maiores na fotografia (**b**) porque, sendo menores do que em (**a**), provocam uma difração mais acentuada da luz.

16. a) Estão chegando a A, no instante considerado, duas cristas.

b) No ponto *B* temos uma crista proveniente de F_2 e um vale proveniente de F_1 (como as linhas representam cristas, o ponto médio entre elas representa um vale).

c) Ao ponto *C*, naquele instante, chegam dois vales.

17. Pela solução do exercício anterior concluímos que:

a) Temos uma dupla crista em *A*.

b) Temos um duplo vale em *C*.

c) Temos um nó em *B*.

18. a) Usando a relação $\lambda = vT$, temos:

$4 = v \cdot 0{,}2 \Rightarrow v = 20$ cm/s

b) $f = 1/T \Rightarrow f = 1/0{,}2 \Rightarrow f = 5$ Hz

c) O ponto *A* da figura oscila com a onda, portanto tem a mesma frequência e o mesmo período: $T_A = 0{,}2$ s.

d) O ponto *B* está permanentemente em repouso, já que se encontra em uma linha nodal. Desse modo, ele não oscila e, portanto, não podemos definir um período para ele: período indefinido.

19. a) Não, porque, para que possa ser observada a formação das franjas de interferência, é preciso que as duas fontes estejam em fase (ou mantenham entre si uma diferença de fase constante). Com duas lâmpadas distintas é impossível obter essas condições, pois a diferença de fase entre elas varia com grande rapidez.

b) Porque com a montagem mostrada na figura 7.44 ele conseguiu obter duas fontes de luz em fase (os orifícios F_1 e F_2).

20. a) Pela tabela 7.1 vemos que o λ do amarelo é **maior** do que o do azul.

b) De $f = v/\lambda$, como *v* tem o mesmo valor (no vácuo) para as duas cores, vemos que terá maior f a cor que possuir **menor** λ. Então, a maior frequência é da luz **azul**.

21. As frequências das cores apresentam ordem crescente. O estudante deverá colocar as cores fornecidas em ordem **crescente de** f: vermelho, amarelo, verde, azul e violeta.

22. Deve-se observar que este exercício é análogo às questões **a** e **b** do exemplo resolvido no final deste tópico.

a) De $\Delta x = L\lambda/d$ vem (calculando em mm):

$$\lambda = \frac{d \cdot \Delta x}{L} = \frac{0{,}10 \cdot 1{,}3}{200} \Rightarrow \lambda = 6{,}5 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$$

$$\text{ou } \lambda = 6{,}5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

b) $f = \frac{v}{\lambda} = \frac{3{,}0 \cdot 10^8}{6{,}5 \cdot 10^{-7}} \Rightarrow f = 4{,}6 \cdot 10^{14}$ hertz

c) Usando a tabela 7.2, vemos que a frequência encontrada em **b** corresponde à **luz vermelha**. Lembrando que em **a** encontramos $\lambda = 6{,}5 \cdot 10^{-7}$ m, verificamos pela tabela 7.1 que esse valor de λ corresponde à cor vermelha.

23. a) O som mais agudo que percebemos corresponde aproximadamente a uma frequência $f = 20\,000$ hertz. Então, como no ar temos $v = 340$ m/s, vem:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340}{20\,000} \Rightarrow \lambda = 1{,}7 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 17 \text{ mm}$$

b) Para o som mais grave, temos $f = 20$ hertz. Então:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340}{20} \Rightarrow \lambda = 17 \text{ m}$$

c) O valor $\lambda = 10$ mm é inferior ao valor de λ do som mais agudo que percebemos (calculado no item **a**). Então, a frequência desta onda longitudinal será **maior** do que 20 000 hertz, tratando-se, portanto, de um **ultrassom**.

24. a) Para a nota lá padrão, temos $f = 440$ hertz e, como, no ar, $v = 340$ m/s, vem:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340}{440} \Rightarrow \lambda = 0{,}77 \text{ m} = 77 \text{ cm}$$

b) Vimos que a frequência de uma onda não se modifica quando ela passa de um meio para outro. Portanto, a frequência do som que chega ao ouvido da pessoa mergulhada na piscina é, ainda, 440 hertz.

c) Pela tabela 7.3 a velocidade do som na água é $v = 1\,450$ m/s. Então, na água, temos:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1450}{440} \Rightarrow \lambda = 3{,}3 \text{ m}$$

25. a) A frequência da nota dó de uma escala é exatamente **duas vezes maior** do que a nota dó da escala imediatamente anterior.

b) Para o lá padrão, temos $f = 440$ hertz. Então, o lá da escala imediatamente anterior terá uma frequência duas vezes menor (220 hertz) e o da escala imediatamente superior terá uma frequência duas vezes maior (880 hertz).

26. a) Como os dois sons propagam-se com a mesma velocidade, o som de menor λ será o de maior f, isto é, o som mais agudo (o da flauta).

b) Sofrerá difração mais acentuada a onda sonora de maior λ, isto é, a onda emitida pela tuba.

c) Como o som da tuba difrata-se mais (contorna melhor o obstáculo), ele será ouvido mais claramente pela pessoa.

27. a) O som de maior intensidade será aquele de maior amplitude (o da clarineta).

b) Como os dois sons têm a mesma altura, possuirão a **mesma frequência**.

c) Os sons emitidos pelos dois instrumentos possuem a mesma frequência, eles correspondem à **mesma** nota musical.

d) As formas das ondas emitidas pelos dois instrumentos **são diferentes**.

e) Sendo diferentes as formas das duas ondas sonoras recebidas pela pessoa, concluímos que ela perceberá sons de **timbres diferentes**.

28. Como dissemos no texto deste tópico, não percebemos o efeito Doppler com a luz, em experiências de nossa vida diária, porque as velocidades presentes nessas experiências são muito pequenas quando comparadas com a velocidade da luz.

29. Em **a** e em **b** temos velocidades muito pequenas em relação à velocidade da luz e, assim, a velocidade da galáxia não poderia ter um valor próximo ao delas. Em **c** temos um valor que daria origem a um efeito Doppler perceptível com a luz.

30. Como a galáxia se afasta de nós com grande velocidade, a luz emitida por ela é recebida na Terra com um valor **menor** para sua frequência. Na figura deste exercício (espectro de linhas), vemos que as radiações de menor frequência estão situadas à esquerda (cor vermelha). Logo, as linhas da **luz** emitida pelas substâncias na galáxia estariam deslocadas **para a esquerda**.

31. Como vimos no exercício anterior, as linhas do espectro da luz emitida pelas galáxias aparecem deslocadas para a região de menores frequências (para a esquerda, na figura do exercício 30). Portanto, as linhas apresentam um deslocamento para a região onde a cor vermelha é encontrada no espectro.

32. a) Nesse caso, concluímos que a luz da estrela está sendo recebida na Terra com uma frequência **maior** do que aquela com que foi emitida. Isso significa que a estrela está se aproximando de nós (fonte aproximando-se do observador).

b) Todas as galáxias se afastam da Terra e, então, a luz proveniente de qualquer uma delas sempre apresenta um "deslocamento para o vermelho" (não se observa nunca um "deslocamento para o violeta").

Pratique Física
em equipe

1. Os estudantes não devem ter dificuldades para realizar a construção do pêndulo. Durante a medida do período sugira que eles utilizem entre 5 e 20 períodos, lembrando que é necessário dividir o tempo medido pelo número de períodos utilizado para encontrar o período de oscilação do pêndulo.

Ao alterar o comprimento do barbante, os estudantes devem observar que, ao aumentá-lo, o período de oscilação aumenta e vice-versa. Incentive os estudantes a verificar se o valor medido se aproxima do previsto substituindo os valores na equação, o que deve ocorrer sem maiores desvios. Ao alterar o valor da massa, os estudantes devem observar que o período não varia, conforme demonstra a equação.

Em relação ao valor da aceleração da gravidade, é possível observar, na expressão abaixo, que, ao substituir os valores do experimento na equação, os estudantes devem encontrar resultados na faixa entre 9,3 m/s² e 10,2 m/s², o que representa erro da ordem de 5%. Caso os resultados estejam fora desses valores, confira as anotações, os cálculos, a precisão das medidas e o comprimento do barbantes.

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}$$

Na maioria dos cursos, a Física é apresentada como a análise de situações imaginárias, desvinculadas da realidade e da vida diária do estudante. Esta orientação certamente leva o aluno a perder o interesse e o entusiasmo pelo estudo da Física.

2. Os resultados da experiência são facilmente observáveis e o aluno não terá necessidade de medir para tirar as conclusões solicitadas. Assim, com a massa maior, o estudante perceberá claramente que o período aumentou (o corpo oscila mais "vagarosamente"). Com a mola mais dura (maior k) percebe-se que o período diminui (a frequência aumenta, isto é, o corpo oscila mais "rapidamente").

Quando se corta pela metade uma mola, a sua constante elástica dobra. Da mesma forma, quanto mais fina for a mola de encadernação, maior é sua constante elástica.

5. É interessante que o professor incentive seus alunos a realizar esta experiência, em que se constrói, com facilidade, um espectroscópio capaz de analisar a luz proveniente de várias fontes. A familiaridade com o espectro adquirida ao lidar com o espectroscópio será útil em várias ocasiões em que este assunto será abordado. Ele é comum nos tópicos relacionados à astronomia e também na parte referente à Física moderna.

Problemas e testes

1. a) Temos, observando que $m = 0{,}400$ kg:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2 \cdot 3{,}14\sqrt{\frac{0{,}400}{160}} \Rightarrow T = 0{,}314 \text{ s}$$

b) $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0{,}314} \Rightarrow f = 3{,}18$ hertz

c) O período **não depende** da amplitude, pois essa grandeza não aparece na expressão $T = 2\pi\sqrt{m/k}$. Então, o valor do período continua sendo $T = 0{,}314$ s.

2. d

Uma onda eletromagnética é uma onda transversal constituída por campos elétricos ($\vec{E}$) e magnéticos ($\vec{B}$) que oscilam perpendicularmente entre si na direção de propagação da onda e, por definição, a direção da polarização é definida como a direção do campo elétrico ($\vec{E}$) da onda.

3. Como $f = 1\,500$ quilohertz $= 1\,500 \cdot 10^3$ hertz ou $f = 1{,}500 \cdot 10^6$ hertz e $v = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s, temos:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{3{,}0 \cdot 10^8}{1{,}500 \cdot 10^6} \Rightarrow \lambda = 200 \text{ m}$$

4. b

A partir do gráfico podemos obter Δt, a diferença entre o tempo dos ecos provenientes das reflexões nas paredes anterior e posterior da artéria carótida.

$\Delta t = (16 - 2)\ \mu s$

$\Delta t = 14 \cdot 10^{-6}$ s

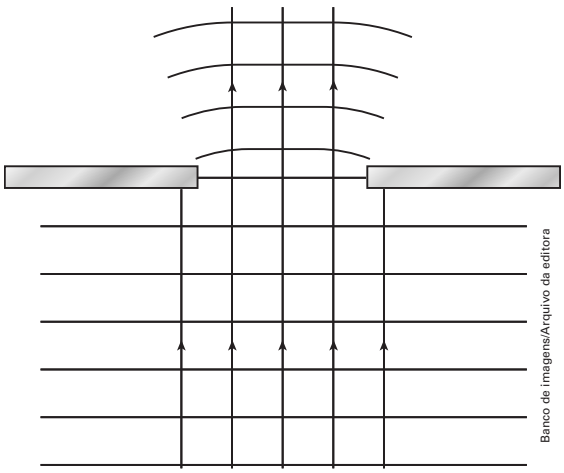
Sendo ΔS a distância percorrida (2 vezes a espessura (e) da artéria) durante o intervalo de tempo Δt, temos:

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$
$$\Delta S = v \cdot \Delta t$$
$$2e = v \cdot \Delta t$$
$$e = \frac{1500 \cdot 14 \cdot 10^{-6}}{2}$$
$$e = 1{,}05 \cdot 10^{-2} m$$
$$e = 1{,}05\, cm$$

5. Como a onda se refratou aproximando-se da normal, concluímos que $v_2 < v_1$. Então, devemos ter $\lambda_2 < \lambda_1$, isto é, as cristas da onda em (2) devem estar mais próximas umas das outras do que em (1), ao contrário do que está mostrado no diagrama feito pelo estudante.

6. a) Nestas condições, isto é, λ aproximadamente igual à largura do orifício, haverá uma difração da onda. O aluno deverá mostrar esse fato traçando um diagrama semelhante ao da figura 7.37.

b) Neste caso, praticamente **não haverá** difração da onda e, assim, ela continua a se propagar aproximadamente em linha reta após passar pelo orifício. O diagrama que o estudante vai traçar deve ser semelhante àquele mostrado na figura abaixo.



7. a) $\beta = 10 \cdot \log_{10} \frac{I}{I_0}$

$$120 = 10 \cdot \log_{10} \frac{I}{10^{-12}}$$
$$12 = \log_{10} \frac{I}{10^{-12}}$$
$$10^{12} = \frac{I}{10^{-12}}$$
$$I = 1\ W/m^2$$

b) Quando $\beta = 85$ dB a exposição não deve ser maior do que 8 horas; então, para uma exposição de 4 horas, o nível máximo de intensidade sonora deve ser $\beta = 90$ dB, pois, segundo o texto, o tempo de exposição reduz à metade quando β sofre um acréscimo de 5 dB.

c) $\beta = 10 \cdot \log_{10} \frac{I}{I_0}$

$$100 = 10 \cdot \log_{10} \frac{I}{10^{-12}}$$
$$10 = \log_{10} \frac{I}{10^{-12}}$$
$$10^{10} = \frac{I}{10^{-12}}$$
$$I = 10^{-2}\ W/m^2$$

A potência será dada por:

$$I = \frac{P}{A}$$
$$P = IA$$
$$P = I \cdot \frac{\pi d^2}{4}$$
$$P = 10^{-2} \cdot \frac{3 \cdot \left(10^{-2}\right)^2}{4}$$
$$R = 7{,}5 \cdot 10^{-7}\ W$$

8. a) O som emitido propaga-se até o anteparo, é refletido e retorna ao ouvido da pessoa. Para que esta pessoa perceba o eco, o intervalo de tempo neste percurso de ida e volta deve ser, no mínimo, igual a 0,1 s. Como para o som no ar temos $v = 340$ m/s, a distância que ele percorre neste intervalo de tempo será:

$$s = v\Delta t = 340 \cdot 0{,}1 \Rightarrow s = 34\ m$$

Como essa distância corresponde a um percurso de ida e volta, concluímos que a distância da pessoa ao anteparo deve ser de 17 m.

Então, se o anteparo estiver a uma distância da pessoa igual ou superior a 17 m, ela poderá ouvir o eco de um som que emitiu.

b) Se o eco foi recebido após 2 s, concluímos que o ultrassom do sonar gastou 1 s para chegar ao fundo do mar. Como a velocidade do ultrassom na água é igual à do som, isto é, $v = 1\,450$ m/s (obtido na tabela 7.3) temos:

$$s = v\Delta t = 1\,450 \cdot 1 \Rightarrow s = 1\,450\ m$$

Essa é, portanto, a distância do submarino ao fundo do oceano.

9. d.

O som, ao passar do ar para a água, tem sua velocidade aumentada. Então, incidindo obliquamente, os raios que representam a trajetória correta do som devem se **afastar da normal** ao penetrar na água. Examinando a figura deste problema, vemos que:

a) a trajetória P_1AP_2 **não** representa uma situação fisicamente possível porque, para ela, o ângulo de refração é nulo ($\hat{r} = 0$), e sabemos que isso só ocorre quando $\hat{i} = 0$.

b) a trajetória P_1BP_2 apresenta o raio refratado aproximando-se da normal e, portanto, **não é correta**.

c) a trajetória P_1CP_2 apresenta um raio que incidiu obliquamente e não se refratou, o que é evidentemente **incorreto**.

d) a trajetória P_1DP_2 apresenta um raio incidindo obliquamente e afastando-se da normal ao se refratar. Portanto, esta **pode ser** a trajetória correta da onda sonora.

e) a trajetória P_1EP_2 mostra um raio incidindo com $\hat{i} = 0$ e $\hat{r} \neq 0$, o que é uma situação **fisicamente incorreta**.

10. a) O ângulo de incidência θ_1 é igual ao ângulo entre o pulso incidente e a superfície de separação dos meios. Logo, temos $\theta_1 = 30°$.

b) Para a refração de uma onda, temos $\text{sen}\,\theta_1/\text{sen}\,\theta_2 = v_1/v_2$. Mas $v_1 = f\lambda_1$ e $v_2 = f\lambda_2$. Portanto:

$$\frac{\text{sen}\,\theta_1}{\text{sen}\,\theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \text{ ou } \frac{\text{sen } 30^\circ}{\text{sen}\,\theta_2} = \frac{6{,}0}{10{,}0} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \text{sen}\,\theta_2 = 0{,}83 \text{ ou } \theta_2 = 57°$$

11. a) Correta, pois, como vimos no capítulo anterior, se o raio se afastou da normal ao passar de *A* para *B*, temos $n_A > n_B$.

b) Correta, pois não há mudança na frequência de qualquer onda (inclusive na onda luminosa) quando ela passa de um meio para outro.

c) Correta, pois de $n = c/v$ vem $v = c/n$ e, como $n_A > n_B$, vemos que $v_A < v_B$.

d) Correta, pois $\lambda = v/f$ e, como f não varia e $v_A < v_B$, temos $\lambda_A < \lambda_B$.

12. O período de oscilação do corpo preso à mola é $T = 2\pi\sqrt{m/k}$ e o período do pêndulo simples é $T = 2\pi\sqrt{L/g}$. Como esses períodos devem ser iguais vem:

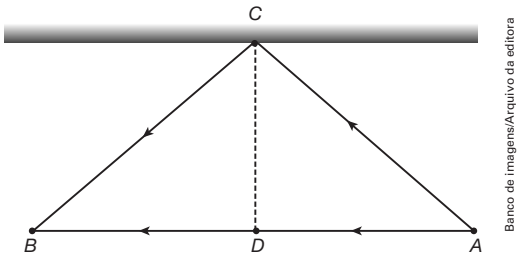
$$2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \text{ ou } \frac{L}{g} = \frac{m}{k} \therefore L = \frac{mg}{k}$$

13. a) Como $PF_1 = PF_2$, as ondas que se originaram em F_1 e F_2 devem percorrer a mesma distância para chegar a *P*. Então, neste ponto, quando chega uma crista de F_1, chegará também uma crista de F_2; ou quando chega um vale de F_1, chegará também um vale de F_2 etc. Desta maneira, temos em *P* uma **interferência construtiva**.

b) Como $PF_1 - PF_2 = \lambda$, a onda proveniente de F_1, ao chegar a *P*, terá percorrido uma distância λ a mais do que a onda proveniente de F_2. Lembrando que a distância entre duas cristas consecutivas é igual a λ, concluímos que uma crista de F_1 chega a *P* com uma crista de F_2, ou um vale de F_1 chega a *P* com um vale de F_2 etc. Portanto, ainda neste caso, temos uma interferência **construtiva** em *P*.

c) Como $PF_1 - PF_2 = \lambda/2$, a onda proveniente de F_1, ao chegar a *P*, terá percorrido uma distância $\lambda/2$ a mais do que a onda proveniente de F_2. Lembrando que a distância entre uma crista e um vale de uma onda é $\lambda/2$, concluímos que uma crista de F_1 chega a *P* com um vale de F_2, ou um vale de F_1 chega com uma crista de F_2 etc. Desta maneira, teremos em *P* uma **interferência destrutiva**.

14. O observador *B* recebe o som emitido por *A* diretamente ao longo da trajetória *AB*. O som refletido pelo paredão (eco) só pode chegar a *B* ao longo da trajetória *ACB* mostrada na figura a seguir:



Banco de imagens/Arquivo da editora

Por esta figura vemos que:

$$AC^2 = AD^2 + CD^2 \text{ ou } AC^2 = 30^2 + 40^2 \therefore AC = 50 \text{ m}$$

Portanto, o percurso total *ACB* é igual a 100 m. Como *AB* = 60 m, vemos que no percurso *ACB* o som percorreu uma distância $\Delta d = 40$ m a mais do que no percurso *AB*. Então, tendo em vista o enunciado do problema, concluímos que esta distância $\Delta d = 40$ m foi percorrida em um intervalo de tempo $\Delta t = (1/8)$ s. Logo, a velocidade do som é:

$$v = \frac{\Delta d}{\Delta t} = \frac{40}{(1/8)} \therefore v = 320 \text{ m/s}$$

15. a) Na posição de equilíbrio, a força exercida pela mola está equilibrando o peso do corpo. Logo:

$$kX = mg \therefore k = \frac{mg}{X}$$

Mas: $X = 15{,}0 \text{ cm} - 10{,}0 \text{ cm} = 5{,}0 \cdot 10^{-2} \text{ m}$

$$\therefore k = \frac{0{,}100 \cdot 10}{5{,}0 \cdot 10^{-2}} \text{ ou } k = 20 \text{ N/m}$$

b) O corpo foi abandonado de uma posição situada a 5,0 cm da posição de equilíbrio. Então, é claro que ele oscilará com uma amplitude de 5,0 cm (em torno da posição na qual a mola tem um comprimento de 15,0 cm).

c) Temos:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{100}{200}} \therefore T = 0{,}44 \text{ s}$$

Como $f = 1/T$, vem:

$$f = \frac{1}{0{,}44} \text{ ou } f = 2{,}27 \text{ hertz}$$

16. a) Quando o bloco se encontra nas extremidades de sua trajetória, ele possui uma energia potencial $E_p = (1/2)\,kA^2$ e este valor representa, também, o valor de sua energia mecânica total *E* (porque $E_c = 0$ nessas posições). Então, de $E = (1/2)\,kA^2$, temos:

$$A = \sqrt{\frac{2E}{k}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0{,}36}{10}} \therefore A = 0{,}12 \text{ m} = 12 \text{ cm}$$

b) O valor da velocidade máxima ocorre quando o bloco passa pela posição de equilíbrio ($X = 0$), pois nessa posição toda a sua energia mecânica encontra-se sob a forma de E_c, isto é, temos $E_c = 0{,}36$ J. Assim, de $E_c = (1/2)\,mv^2$, obtemos:

$$v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0{,}36}{0{,}180}} \therefore v = 2{,}0 \text{ m/s}$$

Apêndice E

Verifique o que aprendeu

1. a) Temos:

$$\mu = \frac{m}{L} \cdot \frac{0{,}45\ g}{60\ cm} \text{ ou } \mu = 7{,}5 \cdot 10^{-3}\ g/cm$$

$$\mu = 7{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{10^{-3}\ kg}{10^{-2}\ m} = 7{,}5 \cdot 10^{-4}\ kg/m$$

b) A frequência do 1º harmônico (frequência fundamental) é:

$$f_1 = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{T}{\mu}} = \frac{1}{2 \cdot 0{,}60}\sqrt{\frac{15}{7{,}5 \cdot 10^{-4}}}$$

$$\therefore f_1 = 117 \text{ hertz}$$

c) Essas frequências são, respectivamente, iguais a:

$$f_2 = 2f_1 \text{ ou } f_2 = 234 \text{ hertz}$$

$$f_5 = 5f_1 \text{ ou } f_5 = 585 \text{ hertz}$$

2. a) A nota dó da escala imediatamente superior tem uma frequência **duas vezes maior** do que o dó de 512 hertz. Supondo que a corda do piano esteja emitindo sua frequência fundamental, sabemos que f_1 é inversamente proporcional a L. Então, para duplicar f_1, devemos reduzir L à metade de seu valor.

b) A expressão que fornece o valor de f_1 nos mostra que $f_1 \propto \sqrt{T}$. Portanto, para duplicar f_1, devemos **multiplicar** por 4 o valor da tensão T.

3. a) Se L e T têm o mesmo valor para ambas as cordas, temos $f_1 \propto 1/\sqrt{\mu}$. Então, o som mais grave (menor f_1) é emitido pela corda de maior μ (mais grossa).

b) De $f_1 \propto 1/\sqrt{\mu}$ vemos que, para ter um valor duplo de f_1, devemos ter um valor de μ **quatro vezes menor**. Como as cordas têm o mesmo comprimento, uma delas deverá ter uma massa 4 vezes maior do que a da outra e, como são ambas feitas do mesmo material, isso somente será possível se a área da seção reta de uma for 4 vezes maior do que a da outra (uma corda é 4 vezes "mais grossa" do que a outra). Formalmente, esse resultado pode ser obtido da seguinte maneira (designando por M e N as cordas analisadas):

$$\mu_M = 4\,\mu_N \text{ ou } \frac{m_M}{L} = 4\frac{m_N}{L} \Rightarrow m_M = 4\,m_N$$

Mas a massa m de uma corda de densidade ρ, área de seção reta A e comprimento L pode ser expressa como $m = \rho AL$. Logo:

$$\rho\, A_M\, L = 4\,\rho\, A_N\, L \Rightarrow A_M = 4\,A_N$$

Observe que, para essa relação ocorrer, o diâmetro da corda M deve ser $\sqrt{4} = 2$ vezes maior do que o da corda N.

4. a) Acompanhando a sequência da figura E.2, o aluno conclui que o 5º harmônico corresponde à presença de 5 intervalos iguais a $\lambda/2$ no comprimento L da corda. Temos, então, a figura mostrada na resposta deste exercício.

b) De $5\left(\frac{\lambda_5}{2}\right) = L$ vem $\lambda_5 = \frac{2L}{5}$.

c) Como $f_5 = v/\lambda_5$, vem:

$$f_5 = 5\left(\frac{v}{2L}\right) \text{ ou } f_5 = 5f_1$$

5. a) De $f_1 = v/4L$, vem:

$$L = \frac{v}{4f_1} = \frac{340}{4 \cdot 500} \Rightarrow L = 0{,}17\ m = 17\ cm$$

b) O tubo fechado só emite os harmônicos de ordem ímpar, e a menor frequência que ele é capaz de emitir é a frequência fundamental f_1. Logo, o tubo **poderá emitir** as seguintes frequências:

$$f_1 = 500 \text{ hertz}$$

$$f_2 = 3 \cdot 500 \text{ hertz} = 1\,500 \text{ hertz}$$

$$f_3 = 5 \cdot 500 \text{ hertz} = 2\,500 \text{ hertz, etc.}$$

6. a) Acompanhando a sequência da figura E.10, o estudante perceberá que o 4º harmônico corresponde à existência de 8 intervalos iguais a $\lambda/4$ no comprimento L do tubo. Temos, então, a figura mostrada na resposta deste exercício.

b) De $8\left(\frac{\lambda_4}{4}\right) = L$ vem $\lambda_4 = \frac{L}{2}$.

c) Como $f_4 = v/\lambda_4$, temos:

$$f_4 = \frac{2v}{L} = 4\left(\frac{v}{2L}\right) \text{ ou } f_4 = 4f_1$$

7. Isso ocorreria quando fosse possível a formação de uma nova onda estacionária no tubo. Pela figura E.11 vem que tal fato ocorrerá quando o nível da água for abaixado de uma distância Δd igual a $\lambda/2$. Como $\lambda/4 = 35$ cm, ou $\lambda = 140$ cm, vem:

$$\Delta d = \frac{\lambda}{2} = \frac{140}{2} \Rightarrow \Delta d = 70\ cm$$

8. Para o tubo fechado, a frequência fundamental é dada por $f_1 = v/4L$ e, para o tubo aberto, por $f'_1 = v/2L$. Como $f'_1 > f_1$, concluímos que o **tubo aberto** emite a nota mais aguda.

9. a) Essa situação ocorreria quando o apito (tubo fechado) emitisse uma frequência f_1 aproximadamente igual a 20 000 hertz. De $f_1 = v/4L$, temos:

$$L = \frac{v}{4f_1} = \frac{340}{4 \cdot 20\,000} \text{ ou } L = 4{,}25\ mm$$

b) A frequência emitida seria (temos $L = 2{,}5\ mm = 2{,}5 \cdot 10^{-3}\ m$):

$$f_1 = \frac{v}{4L} = \frac{340}{4 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-3}} \therefore f_1 = 3{,}4 \cdot 10^4 \text{ hertz}$$

Como sabemos, essa frequência corresponde a um ultrassom, que não é audível por um ser humano. Entretanto um cachorro é capaz de escutar um ultrassom com essa frequência.

10. a) Nesse caso, a frequência recebida pela pessoa será **menor** do que f_0. Esse fato ajudará o aluno a se lembrar de que deverá usar o sinal "+" no denominador da equação. Assim:

$$f = f_0\left(\frac{v}{v + v_F}\right) = 1\,000\left(\frac{340}{340 + 40}\right) \Rightarrow f = 894 \text{ hertz}$$

b) Também aqui temos $f < f_0$. Isso indica que o sinal "−" deverá ser usado no numerador da equação, isto é:

$$f = f_0\left(\frac{v - v_R}{v}\right) = 1\,000\left(\frac{340 - 40}{340}\right) \Rightarrow f = 882 \text{ hertz}$$

11. a) A frequência máxima ouvida ocorre quando a velocidade do apito aponta diretamente para a pessoa (fonte se aproximando do observador em repouso). Assim, temos:

$$f = f_0\left(\frac{v}{v - v_F}\right) \text{ ou } 515 = 500\left(\frac{340}{340 - v_F}\right)$$

Resolvendo essa equação, encontramos para a velocidade do apito $v_F = 9{,}7$ m/s. O período de seu movimento é dado por $T = 2\pi R/v_F$ e, então, a frequência com que ele gira (número de voltas efetuadas em 1 s) será:

$$f' = \frac{1}{T} = \frac{v_F}{2\pi_R} = \frac{9{,}7}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 1{,}0}$$

$$\therefore f' = 1{,}5 \text{ volta/s}$$

b) Isso ocorrerá quando a velocidade do apito estiver em sentido contrário ao da questão anterior (fonte se afastando do receptor em repouso). Então:

$$f = f_0\left(\frac{v}{v + v_F}\right) = 500\left(\frac{340}{340 + 9{,}7}\right)$$

$$\therefore f = 486 \text{ Hz}$$

12. A situação corresponde ao receptor se aproximando da fonte em repouso. Então:

$$f = f_0\left(\frac{v + v_R}{v}\right)$$

Usando $f = 5{,}6 \cdot 10^{14}$ hertz (luz verde), $f_0 = 4{,}6 \cdot 10^{14}$ hertz (luz vermelha) e observando que $v = c = 3 \cdot 10^8$ m/s (velocidade da onda de luz), obtemos, da equação anterior:

$$\frac{5{,}6}{4{,}6}\left(1 + \frac{v_R}{c}\right) \Rightarrow \frac{v_R}{c} = 0{,}21$$

Esse resultado significa que a velocidade v_R do automóvel deveria ser igual a 21% da velocidade da luz (ou seja, $v_R = 6{,}3 \cdot 10^7$ m/s!).

13. a) Como $\lambda > \lambda_0$, concluímos que $f < f_0$, isto é, a frequência da luz emitida pela galáxia chega à Terra com uma frequência **menor** do que a frequência emitida f_0. Isso significa que a fonte (a galáxia) está se **afastando** da Terra.

b) Na equação correspondente à fonte se afastando do receptor em repouso, lembrando-se de que $v = c$ (onda luminosa), que $f = c/\lambda$ e $f_0 = c/\lambda_0$, teremos:

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{c + v_F}{c} \text{ ou } \frac{\lambda}{\lambda_0} = 1 + \frac{v_F}{c}$$

Substituindo os valores de λ e λ_0, obtemos:

$$\frac{v_F}{c} = 0{,}0046 \Rightarrow v_F = 1{,}38 \cdot 10^6 \text{ m/s} = 1\,380 \text{ km/s}$$

c) O resultado $v_F/c = 0{,}0046$, expresso em forma percentual, nos fornece $v_F/c = 0{,}46\%$. Portanto, a galáxia está se movendo com uma velocidade pequena comparada com a velocidade da luz e, nessas condições, é possível aplicar, para a luz, as equações válidas para as ondas mecânicas.

14. a) Usando as equações correspondentes, temos:

$$450 = f_0\left(\frac{340}{340 - v_F}\right) \text{ e } 300 = f_0\left(\frac{340}{340 + v_F}\right)$$

Dividindo membro a membro essas equações, obtemos:

$$1{,}5 = \frac{340 + v_F}{340 - v_F} \therefore v_F = 68 \text{ m/s}$$

b) Substituindo o valor de v_F em qualquer uma das duas equações relacionadas no início da questão **a**, obtemos a frequência $f_0 = 360$ hertz.

Problemas e testes

1. c

Os tubos sonoros fechados emitem os harmônicos de ordem ímpar; logo, se a frequência fundamental é 500 Hz, ele ressoará para 1500 Hz, 2500 Hz, 3500 Hz, 4500 Hz, etc.

2. c

A velocidade com que uma onda se propaga varia quando a onda passa de um meio para outro, enquanto a frequência não se modifica nessas condições.

3. a) Sabemos que $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$. Para encontrar μ, fazemos:

$$\mu = \frac{m}{L}$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\frac{\pi d^2}{4} L} = \frac{4m}{\pi d^2 L}$$

Relacionando as duas equações acima, temos:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{m}{L} \cdot \frac{\pi d^2 L}{4m} = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$\mu = \frac{\rho \cdot \pi \cdot d^2}{4}$$

Tomando a equação da velocidade e substituindo o resultado acima:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

$$v = \sqrt{\frac{T}{\frac{\rho \cdot \pi \cdot d^2}{4}}}$$

$$v = \frac{2}{d} \cdot \sqrt{\frac{T}{\pi \cdot \rho}}$$

b) Quando a nova corda está sujeita a uma tensão quatro vezes superior à primeira:

$d' = d/2$ e $T' = 4T$

$$v' = \frac{2}{d'}\sqrt{\frac{T'}{\pi \cdot \rho}}$$

$$v' = \frac{2}{d/2} \cdot \sqrt{\frac{4T}{\pi \cdot \rho}}$$

$$v' = 4 \cdot \left(\frac{2}{d} \cdot \sqrt{\frac{T}{\pi \cdot \rho}}\right)$$

c) Quando a nova corda está sujeita a uma tensão quatro vezes superior à primeira:

$f_1 = \frac{v}{2L}$

$f_1' = \frac{v'}{2L}$

$f_1' = \frac{4v}{2L} = 4 \cdot \left(\frac{v}{2L}\right)$

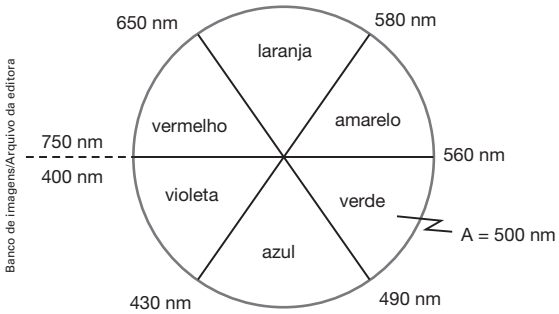
$f_1' = 4 \cdot f_1$

$f_1' = 4 \cdot 420$

$f_1' = 1\,640$ Hz

4. e

Essa substância apresenta uma máxima absorção, segundo o gráfico da figura 1, para radiação de comprimento de onda próximo a $\lambda = 500$ nm.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Esse valor de comprimento de onda está na faixa da cor verde da roda de cores situado entre os valores 490 nm $< \lambda <$ 560 nm, conforme indica a figura. A cor diametralmente oposta ao verde é o vermelho.

Assim a cor da substância que originou o espectro de absorção da figura 1 é vermelha.

5. d

Um indivíduo que não consiga captar as informações dos cones, não conseguirá distinguir cores. Com o uso dos bastonetes, será capaz de diferenciar apenas tons de cinza para diferentes intensidades de luz.

Infográfico

1. É um procedimento para o ajuste do nível dos sons (graves, médios e agudos), que serão captados das vozes e dos instrumentos.

2. Um clique que pulsa constantemente no retorno (fone de ouvido pelo qual os músicos ouvem o que todos estão tocando).

3. O revestimento é feito de painéis, madeira e lã mineral, posicionados na parede e no teto. Peças móveis, como biombos, são também utilizadas para esse fim. O isolamento acústico é importante porque evita que ruídos entrem e saiam do estúdio.

4. O som captado no estúdio chega a mais de 90 canais da mesa de som. Na mixagem é feita a programação, canal por canal, de efeitos e variações de volume que dão mais dinâmica à música. Esse processo é feito através de equalizadores e outros aparelhos da mesa de som.

5. Após a mixagem, o som é condensado na mesa de som em dois canais (direito e esquerdo), que criam o efeito estéreo.

6. É o processo no qual se faz a uniformização entre o som das faixas e se escolhe a sequência do álbum. Ao final da masterização, temos dois produtos: o *CD master*, que é a matriz enviada à fábrica para gerar milhares de cópias, e os arquivos compactados (*mp3*, *wma*, etc.), que podem ser disponibilizados na internet.

ISBN 978-85262992-1