

FÍSICA

VOLUME 2

ensino médio

**Antônio Máximo
Beatriz Alvarenga**

**PROGRAMA LIVRO NA ESCOLA
2006**



**GOVERNO
DE MINAS**

VENDA PROIBIDA - LA

editora scipione

FÍSICA
livro não-consumível

FÍSICA

VOLUME 2

ensino médio

Antônio Máximo Ribeiro da Luz

*Professor Adjunto do Departamento de
Física da Universidade Federal de Minas Gerais*

Beatriz Alvarenga Álvares

*Professora Emérita do Departamento de Física da
Universidade Federal de Minas Gerais*

BEATRIZ ALVARENGA e ANTÔNIO MÁXIMO são autores da coleção *Física*, em dois volumes, editada pela Oxford University Press em língua espanhola, e do *Física* — volume único, editado pela Scipione.

ilustrações de

Rubens Villaça, Paulo César Pereira, Artur Kenji Ogawa
e Antônio Robson

São Paulo, 2006

1.^a edição

F Í S I C A
livro não-consumível



editora scipione

Ao estudante

Ao preparar este texto, uma de nossas preocupações foi tornar o seu curso de Física interessante e agradável, tentando evitar que você o considere apenas como mais uma de suas obrigações escolares. Julgamos que ele poderá entusiasmar tanto aos jovens que pretendam continuar seus estudos em uma carreira ligada às ciências exatas, como àqueles que provavelmente não mais terão outro contato com o estudo da Física.

O conhecimento das leis e fenômenos físicos constitui um complemento indispensável à formação cultural do homem moderno, não só em virtude do grande desenvolvimento científico e tecnológico do mundo atual, como também porque o mundo da Física nos rodeia por completo. De fato, a Física está totalmente envolvida em nossa vida diária: está em nossa casa, no ônibus, no elevador, no cinema, no campo de futebol etc.

Assim, 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 deste curso, você tenha conseguido compreender as leis fundamentais da Física, percebendo que elas representam modelos que procuram traduzir a harmonia e a organização presentes na natureza. Esta visão, possivelmente, fará crescer dentro de você o amor e o respeito pelas coisas e fatos do mundo em que vivemos. Ao mesmo tempo, entre seus sentimentos passará a figurar, por certo, a admiração aos grandes cientistas que, através de árduos esforços, conseguiram edificar este importante ramo do conhecimento humano.

Como usar esta obra de Física

Desenvolvemos os textos e as diversas atividades que compõem este livro tendo sempre em mente a produção de um trabalho que se constitua um auxílio real a seus estudos e a sua aprendizagem. Esperando que este propósito possa ser concretizado, apresentamos, a seguir, algumas orientações que, acreditamos, o levarão a conhecer melhor o seu livro e, conseqüentemente, a usá-lo com o máximo proveito:

- ▶ Inicie sempre o estudo de um determinado assunto com a leitura da secção que o aborda. A linguagem simples e a divisão do texto em pequenos blocos, com títulos indicativos de seu conteúdo, facilitam esta tarefa. Procure compreender o tópico exposto e, se houver dúvida, discuta-a com o professor e com seus colegas. Não tente apenas memorizar eventuais fórmulas ali presentes, pois a fórmula isolada pouco ou nada representa do conhecimento que ela sintetiza. A leitura e a compreensão do texto são passos indispensáveis à construção deste conhecimento.
- ▶ Depois de terminar a leitura de cada secção, passe à solução dos Exercícios de Fixação apresentados logo após cada uma delas. Esses exercícios serão, geralmente, resolvidos com certa facilidade, colaborando para sedimentar o conhecimento em estudo e para incentivá-lo a prosseguir em outras atividades. Não passe para a secção seguinte nem tente resolver problemas mais sofisticados, antes de responder a todos os Exercícios de Fixação. Seu raciocínio não pode dar saltos muito grandes e estes exercícios foram propostos exatamente para você ir construindo seus conhecimentos passo a passo.

- ▶ O Tópico Especial, como indica o seu subtítulo, *para você aprender um pouco mais*, foi desenvolvido como uma extensão aos conhecimentos ali abordados. Usando uma linguagem simples e um tratamento qualitativo da matéria, com quase nenhum apelo à matemática, esse texto ora apresenta aspectos históricos do assunto, ora uma visão mais moderna dos conceitos e leis a ele relacionados ou, ainda, suas aplicações tecnológicas interessantes e atuais. Estamos convictos de que você irá apreciar a leitura de um desses Tópicos Especiais e esteja certo de que a Física neles contida é de tão boa qualidade quanto a do restante do capítulo.
- ▶ A Revisão, que aparece no final de cada capítulo, é uma espécie de estudo dirigido, proposto para que você obtenha uma visão global do assunto, após ter estudado cada seção separadamente. Ao completar essa atividade, você terá em mãos um resumo deste capítulo, ao qual poderá recorrer quando desejar recapitulá-lo rapidamente.
- ▶ Outra atividade importante para facilitar a compreensão e a aprendizagem dos temas apresentados em um capítulo são as Experiências propostas no final de cada um. Escolhemos experiências bem simples, que, em geral, requerem material disponível em sua própria residência, possibilitando, assim, sua realização como tarefa para casa. Não deixe de fazer essas experiências e levá-las à escola para serem discutidas com seu professor e seus colegas. Temos certeza de que essas atividades lhe darão muitos momentos de prazer e lhe permitirão uma visão mais clara e concreta dos fenômenos em estudo.
- ▶ Os problemas, comumente usados nos cursos de Física para que os estudantes testem e apliquem seus conhecimentos, são apresentados em três séries em nosso texto: Problemas e Testes, Questões de Vestibular e Problemas Suplementares. Sendo muito grande o número total desses problemas, você, provavelmente, não terá tempo para resolver todos eles. Peça, então, para seu professor selecionar aqueles que forem mais significativos para seu curso e para o seu próprio contexto. Procurando soluções para eles, você estará subindo mais alguns degraus em sua formação científica.

Sumário

Unidade 4 – Leis de conservação	11
9. Conservação da quantidade de movimento	12
9.1. Impulso e quantidade de movimento	13
9.2. Quantidade de movimento de um sistema de partículas	16
9.3. Conservação da quantidade de movimento	19
9.4. Forças impulsivas e colisões	24
9.5. A descoberta do nêutron	31
Revisão	34
<i>Algumas Experiências Simples</i>	35
<i>Problemas e Testes</i>	36
<i>Problemas Suplementares</i>	40
Unidade 5 – Temperatura – Dilatação – Gases	43
10. Temperatura e dilatação	44
10.1. Temperatura – escalas termométricas	45
10.2. Dilatação dos sólidos	50
10.3. Dilatação dos líquidos	57
10.4. Termômetros e escalas – breve histórico	59
Revisão	65
<i>Algumas Experiências Simples</i>	66
<i>Problemas e Testes</i>	67
<i>Problemas Suplementares</i>	69
11. Comportamento dos gases	71
11.1. Transformação isotérmica	73
11.2. Transformação isobárica	76
11.3. Lei de Avogadro	80
11.4. Equação de estado de um gás ideal	82
11.5. Modelo molecular de um gás	85
11.6. A evolução do modelo molecular da matéria	90
Revisão	94
<i>Algumas Experiências Simples</i>	95
<i>Problemas e Testes</i>	97
<i>Problemas Suplementares</i>	100

Unidade 6 - Calor	103
12. Primeira lei da Termodinâmica	104
12.1. O calor como energia	105
12.2. Transferência de calor	107
12.3. Capacidade térmica e calor específico	111
12.4. Trabalho em uma variação de volume	115
12.5. A primeira lei da Termodinâmica	118
12.6. Aplicações da primeira lei da Termodinâmica	120
12.7. Máquinas térmicas – a segunda lei da Termodinâmica	126
Revisão	131
<i>Algumas Experiências Simples</i>	132
<i>Problemas e Testes</i>	135
Apêndice	138
C.1. Transferência de calor – estudo quantitativo	138
C.2. Máquinas térmicas – informações adicionais	145
<i>Problemas Suplementares</i>	155
13. Mudanças de fase	159
13.1. Sólidos, líquidos e gases	161
13.2. Fusão e solidificação	167
13.3. Vaporização e condensação	170
13.4. Influência da pressão	174
13.5. Sublimação – diagrama de fases	178
13.6. Comportamento de um gás real	180
Revisão	184
<i>Algumas Experiências Simples</i>	185
<i>Problemas e Testes</i>	186
<i>Problemas Suplementares</i>	189

Unidade 7 - Ótica e ondas	191
14. Reflexão da luz	192
14.1. Introdução	193
14.2. Reflexão da luz	198
14.3. Espelho plano	201
14.4. Espelhos esféricos	205
14.5. Imagem de um objeto extenso	211
14.6. A equação dos espelhos esféricos	214
14.7. A velocidade da luz	218
Revisão	224
<i>Algumas Experiências Simples</i>	225
<i>Problemas e Testes</i>	228
<i>Problemas Suplementares</i>	232
15. Refração da luz	235
15.1. Refração da luz	237
15.2. Alguns fenômenos relacionados com a refração	245
15.3. Dispersão da luz	250
15.4. Lentes esféricas	254
15.5. Formação de imagens nas lentes	261
15.6. Instrumentos óticos	264
15.7. As idéias de Newton sobre a natureza da luz e as cores dos corpos	269
Revisão	274
<i>Algumas Experiências Simples</i>	275
<i>Problemas e Testes</i>	278
<i>Problemas Suplementares</i>	282
16. Movimento ondulatório	285
16.1. Movimento harmônico simples	287
16.2. Ondas em uma corda	291
16.3. Ondas na superfície de um líquido	298
16.4. Difração	303
16.5. Interferência	307
16.6. Interferência com a luz	309
16.7. Ondas sonoras	314
16.8. O efeito Doppler	323
Revisão	327
<i>Algumas Experiências Simples</i>	328
<i>Problemas e Testes</i>	330

Apêndice	336
D.1. As equações do movimento harmônico simples	336
D.2. Cordas vibrantes e tubos sonoros	341
D.3. As equações do efeito Doppler	347
<i>Problemas Suplementares</i>	351
<i>Questões de Vestibular</i>	352
<i>Respostas dos Exercícios</i>	377
<i>Valores das Funções Trigonométricas</i>	398
<i>Constantes Físicas</i>	399
<i>Bibliografia indicada para os alunos</i>	399

VOLUME I

Unidade 1 – Introdução

1. Algarismos significativos

Unidade 2 – Cinemática

2. Movimento retilíneo

3. Vetores – Movimento curvilíneo

Unidade 3 – Leis de Newton

4. Primeira e terceira leis de Newton

Apêndice

5. Segunda lei de Newton

Apêndice

6. Gravitação Universal

7. Hidrostática

Unidade 4 – Leis de conservação

8. Conservação da energia

Questões de Vestibular

Respostas

Valores das Funções Trigonométricas

Constantes Físicas

VOLUME 3

Unidade 8 – Campo e potencial elétrico

17. Carga elétrica

18. Campo elétrico

19. Potencial elétrico

Unidade 9 – Circuitos elétricos de corrente contínua

20. Corrente elétrica

21. Força eletromotriz – Equação do circuito

Unidade 10 – Eletromagnetismo

22. O campo magnético – 1ª parte

23. O campo magnético – 2ª parte

Apêndice

E.I.A lei de Biot-Savart

24. Indução eletromagnética – Ondas eletromagnéticas

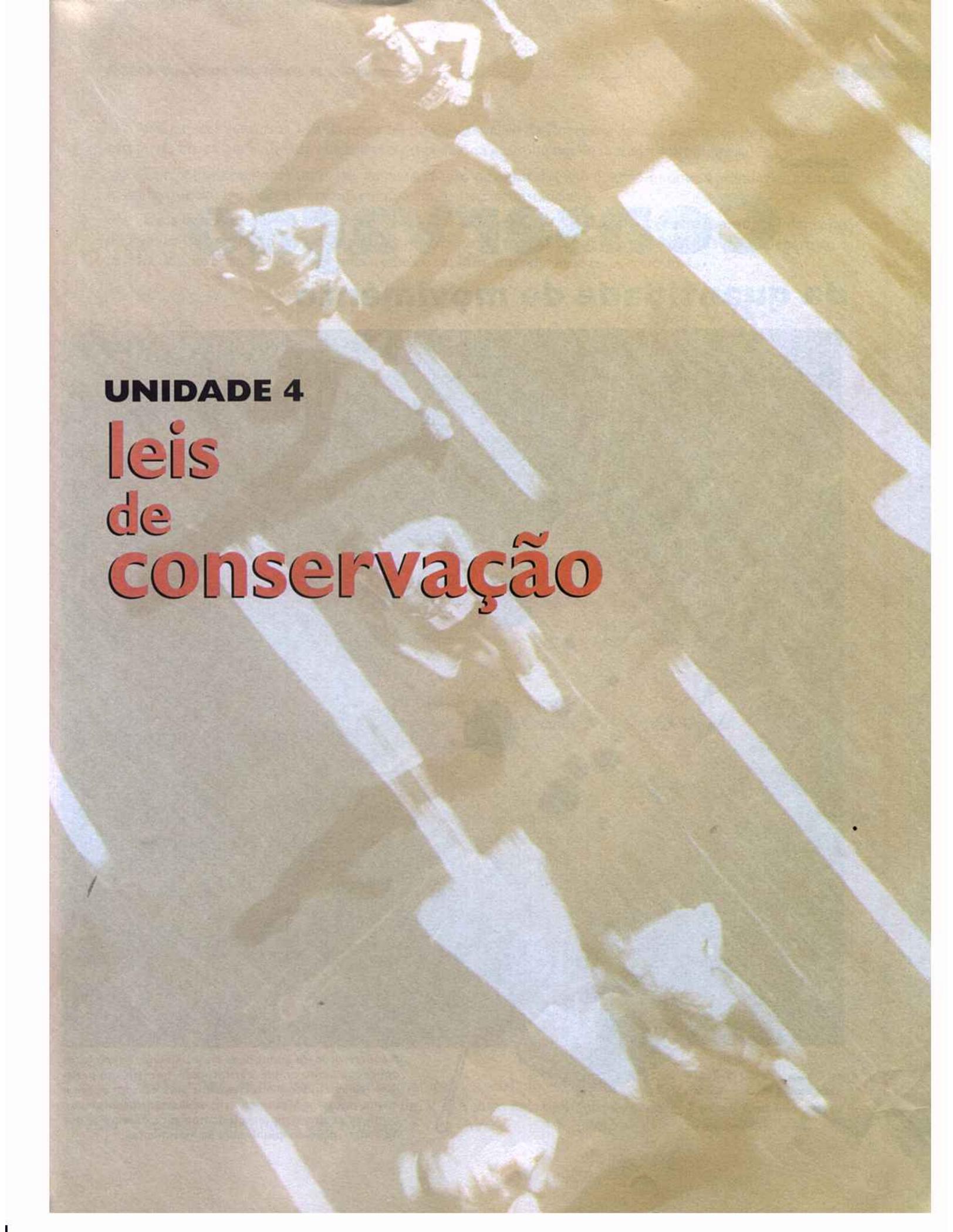
25. A nova Física

Questões de Vestibular

Respostas

Valores das Funções Trigonométricas

Constantes Físicas

An aerial, high-angle photograph of a soccer field. The field is green with white boundary lines. Several players in white and dark jerseys are scattered across the field, some in motion. The lighting creates long, soft shadows on the grass.

UNIDADE 4

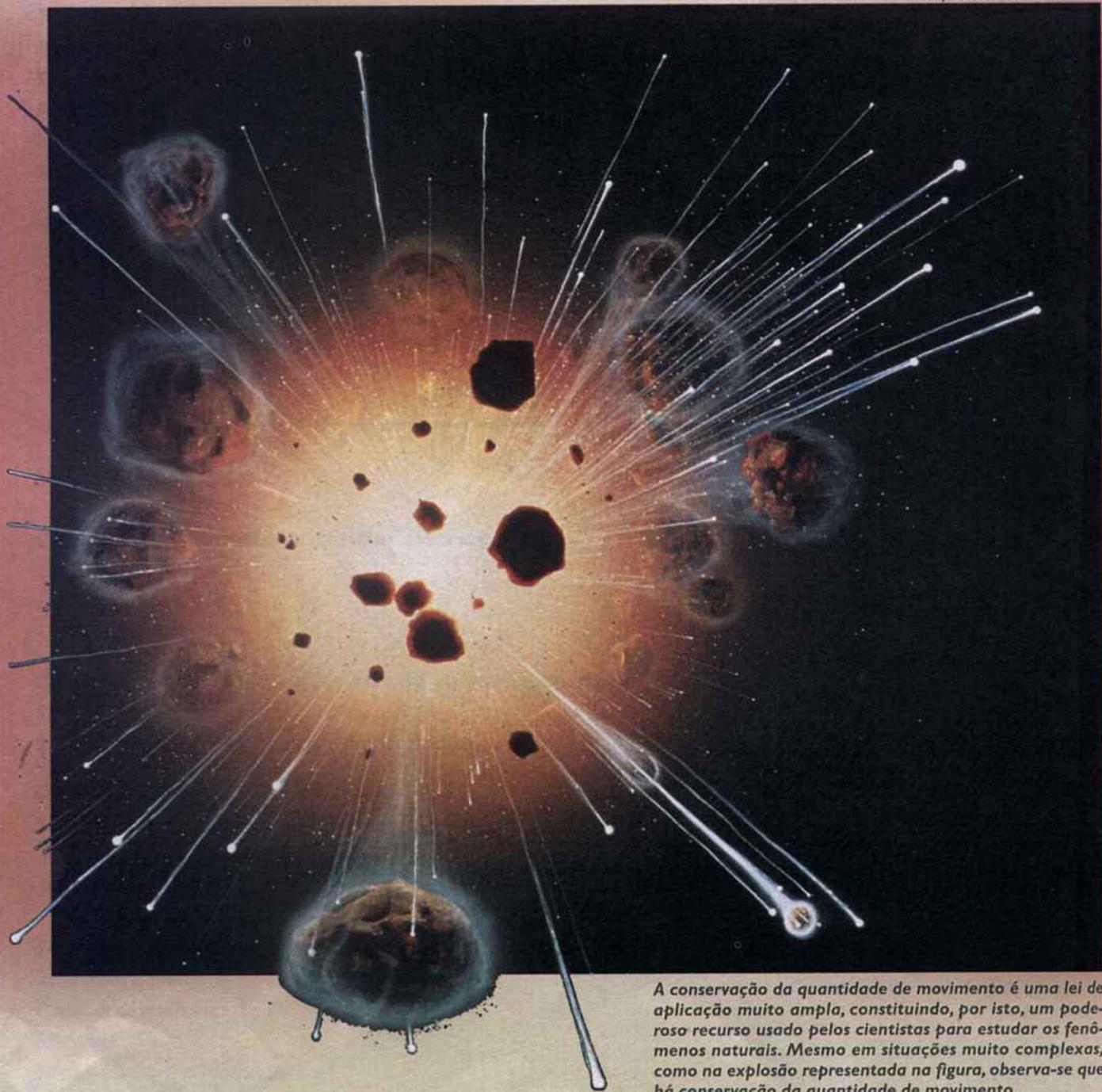
**leis
de
conservação**

capítulo 9

Conservação

da quantidade de movimento

Sally Bensusen/SPL/Stock Photos



A conservação da quantidade de movimento é uma lei de aplicação muito ampla, constituindo, por isto, um poderoso recurso usado pelos cientistas para estudar os fenômenos naturais. Mesmo em situações muito complexas, como na explosão representada na figura, observa-se que há conservação da quantidade de movimento.

No capítulo anterior, estudamos a lei de Conservação da Energia e destacamos a sua importância no campo da Física e a facilidade que seu uso proporciona nas soluções de inúmeros problemas.

Entretanto, existem outras leis de conservação na natureza, isto é, existem outras grandezas, além da energia, que também se conservam, em determinadas circunstâncias.

Uma destas leis, a *Conservação da Quantidade de Movimento*, será analisada neste capítulo. O conceito de *impulso* e sua relação com a *quantidade de movimento* constituem o ponto de partida para chegarmos a essa lei de conservação. Por isso, iniciaremos o capítulo introduzindo estes conceitos.

9.1. Impulso e quantidade de movimento

O QUE É IMPULSO

Quando um jogador de futebol cobra uma penalidade ou quando um tenista, usando a sua raquete, rebate a bola, em ambos os casos temos uma força atuando durante um curto intervalo de tempo sobre a bola, o que faz com que ela seja impulsionada.

De um modo geral, sempre que uma força atuar em um corpo durante um certo intervalo de tempo, diremos que o corpo recebeu um *impulso*. Para o caso de uma força \vec{F} constante, atuando durante um intervalo de tempo Δt (fig. 9-1), define-se o impulso \vec{I} , exercido pela força, através da expressão

$$\vec{I} = \vec{F} \cdot \Delta t$$

Observe que \vec{I} é um vetor que tem a mesma direção e o mesmo sentido de \vec{F} , como mostra a fig. 9-1. Pela expressão $\vec{I} = \vec{F} \cdot \Delta t$, vemos que, no Sistema Internacional (S.I.) a unidade de impulso é $1 \text{ N} \cdot \text{s}$.

QUANTIDADE DE MOVIMENTO

A fig. 9-2 mostra um corpo de massa m movendo-se com uma velocidade \vec{v} . Uma grandeza muito importante, relacionada com o movimento do corpo, é a sua *quantidade de movimento*. Esta grandeza, que também costuma ser denominada *momento linear* do corpo, e que vamos representar pela letra \vec{q} , é definida da seguinte maneira:

A quantidade de movimento (ou momento linear), \vec{q} , de um corpo de massa m , que se move com uma velocidade \vec{v} , é definida pela expressão:

$$\vec{q} = m\vec{v} \quad (\text{fig. 9-2})$$

A quantidade de movimento é uma grandeza vetorial, de mesma direção e mesmo sentido do vetor \vec{v} , como mostra a fig. 9-2. Vemos pela definição que, no S.I., a unidade de quantidade de movimento é $1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$.



Fig. 9-1: A força, atuando no corpo, exerce nele um impulso.

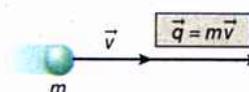


Fig. 9-2: Uma partícula de massa m , com velocidade \vec{v} , possui uma quantidade de movimento $\vec{q} = m\vec{v}$.

RELAÇÃO ENTRE IMPULSO E QUANTIDADE DE MOVIMENTO

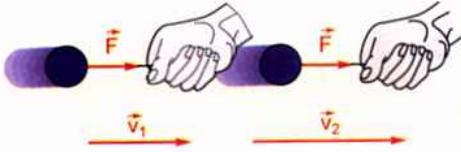


Fig.9-3: O impulso de uma força sobre o corpo provoca uma variação em sua quantidade de movimento.

Consideremos um corpo, de massa m , movendo-se com uma velocidade \vec{v}_1 . Se uma força \vec{F} , constante, atuar no corpo durante um intervalo de tempo Δt , observaremos que sua velocidade sofrerá uma variação, passando a ser \vec{v}_2 no final deste intervalo (fig. 9-3).

Supondo que \vec{F} seja a resultante das forças que atuam no corpo, a 2ª lei de Newton nos permite escrever que

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

onde \vec{a} representa a aceleração adquirida pelo corpo. Mas sabemos que $\vec{a} = \Delta\vec{v}/\Delta t$.

Logo:

$$\vec{F} = m \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \quad \text{donde} \quad \vec{F} \cdot \Delta t = m\Delta\vec{v}.$$

Como a variação da velocidade é $\Delta\vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$, temos:

$$\vec{F} \cdot \Delta t = m(\vec{v}_2 - \vec{v}_1) \quad \text{ou} \quad \vec{F} \cdot \Delta t = m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1.$$

Observemos, entretanto, que:

- $\vec{F} \cdot \Delta t$ representa o impulso \vec{I} que o corpo recebeu;
- $m\vec{v}_2$ representa a quantidade de movimento do corpo, \vec{q}_2 , no fim do intervalo Δt ;
- $m\vec{v}_1$ representa a quantidade de movimento do corpo, \vec{q}_1 , no início do intervalo Δt .

Assim:

$$\vec{I} = \vec{q}_2 - \vec{q}_1 \quad \text{ou} \quad \vec{I} = \Delta\vec{q}.$$

Portanto, chegamos à conclusão de que o impulso recebido pelo corpo é igual à variação de sua quantidade de movimento. Apesar de ter sido demonstrado para o caso de uma força constante, este resultado é geral, isto é, em qualquer situação podemos afirmar que:

o impulso, \vec{I} , exercido pela resultante das forças que atuam sobre um corpo, durante um certo intervalo de tempo, é igual à variação da quantidade de movimento, $\Delta\vec{q}$, ocorrida naquele intervalo de tempo, isto é:

$$\vec{I} = \Delta\vec{q} \quad \text{ou} \quad \vec{I} = \vec{q}_2 - \vec{q}_1$$

Observe que esta relação entre o impulso e a variação da quantidade de movimento é semelhante à relação entre o trabalho e a variação da energia cinética ($T_{AB} = E_{cB} - E_{cA}$), que vimos no capítulo anterior.

Exemplo 1

A resultante das forças que atuam no corpo da fig. 9-3 vale $F = 4,0 \text{ N}$ e atua durante um intervalo de tempo $\Delta t = 6,0 \text{ s}$.

a) Qual é o impulso recebido pelo corpo?

O valor do impulso é dado por:

$$I = F \cdot \Delta t = 4,0 \times 6,0 \quad \text{donde} \quad I = 24 \text{ N} \cdot \text{s}$$

A direção e o sentido de \vec{I} são os mesmos da força \vec{F} .

b) Se a quantidade de movimento inicial do corpo era $q_1 = 16 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$, qual será o seu valor no final do intervalo de tempo considerado?

Sabemos que a variação da quantidade de movimento do corpo é igual ao impulso que ele recebeu, isto é,

$$\Delta q = I \quad \text{donde} \quad \Delta q = 24 \text{ kg} \cdot \text{m/s}.$$

$$\text{Mas } \Delta \vec{q} = \vec{q}_2 - \vec{q}_1 \quad \text{donde} \quad \vec{q}_2 = \vec{q}_1 + \Delta \vec{q}.$$

Como a partícula se desloca em linha reta (fig. 9-3), os vetores \vec{q}_2 , \vec{q}_1 e $\Delta \vec{q}$ têm a mesma direção. Então, teremos:

$$q_2 = q_1 + \Delta q = 16 + 24 \quad \text{donde} \quad q_2 = 40 \text{ kg} \cdot \text{m/s}.$$

Exemplo 2

Uma bola de tênis, de massa $m = 100 \text{ g}$ e velocidade $v_1 = 10 \text{ m/s}$, é rebatida por um jogador, retornando com uma velocidade \vec{v}_2 de mesmo valor e direção que \vec{v}_1 , porém de sentido contrário.

a) Qual foi a variação da quantidade de movimento da bola?

No instante em que a bola atinge a raquete, o valor de sua quantidade de movimento é

$$q_1 = mv_1 = 0,100 \times 10 \quad \text{donde} \quad q_1 = 1,0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}.$$

No instante em que ela abandona a raquete, sua quantidade de movimento vale

$$q_2 = mv_2 = 0,100 \times 10 \quad \text{donde} \quad q_2 = 1,0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}.$$

Os vetores \vec{q}_2 e \vec{q}_1 têm a mesma direção e sentidos contrários. Portanto, a quantidade de movimento da bola variou de $1,0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ em um sentido para $1,0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ em sentido contrário. Quando isto ocorre, devemos atribuir sinais a estes valores, considerando, por exemplo, o sentido inicial do movimento como negativo e o sentido contrário como positivo. Nestas condições, a quantidade de movimento variou de $-1,0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ para $+1,0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$, isto é, a variação da quantidade de movimento da bola foi:

$$\Delta q = q_2 - q_1 = 1,0 - (-1,0) \quad \text{donde} \quad \Delta q = 2,0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

b) Supondo que o tempo de contato da bola com a raquete foi de $\Delta t = 0,01 \text{ s}$, qual foi o valor da força (suposta constante) que a raquete exerceu sobre a bola?

O impulso $\vec{I} = \vec{F} \cdot \Delta t$ que a raquete exerceu na bola é igual a $\Delta \vec{q}$, isto é,

$$F \cdot \Delta t = \Delta q \quad \text{donde} \quad F = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{2,0}{0,01}$$

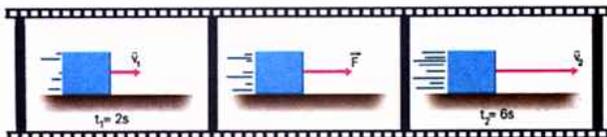
$$\text{ou} \quad F = 2,0 \times 10^2 \text{ N}$$

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

1. O bloco mostrado na figura deste exercício está se deslocando, em movimento retilíneo, sob a ação de uma força resultante $F = 5,0$ N. A força \vec{F} atua desde o instante $t_1 = 2,0$ s até o instante $t_2 = 6,0$ s.

- Qual é o valor do impulso, \vec{I} , produzido pela força sobre o bloco?
- Desenhe, em uma cópia da figura, o vetor \vec{I} .
- Desenhe, também, a variação da quantidade de movimento $\Delta\vec{q}$ que este impulso provocou no bloco.



Exercício 1.

2. Suponha, no exercício anterior, que o valor da quantidade de movimento do bloco, no instante t_1 , fosse $q_1 = 10$ kg · m/s.

- Desenhe, na cópia da figura, o vetor \vec{q}_1 .
- Lembrando-se de sua resposta à questão (c) do exercício anterior, determine o valor de \vec{q}_2 .
- Desenhe, também, o vetor \vec{q}_2 .

3. Uma partícula de massa $m = 200$ g descreve uma trajetória retilínea sob a ação de uma única força, que permanece constante. Observa-se que a partícula passa de uma velocidade inicial $v_1 = 3,0$ m/s para uma velocidade final $v_2 = 8,0$ m/s, em um intervalo de tempo $\Delta t = 4,0$ s.

- Quais são os valores das quantidades de movimento inicial (q_1) e final (q_2) da partícula?

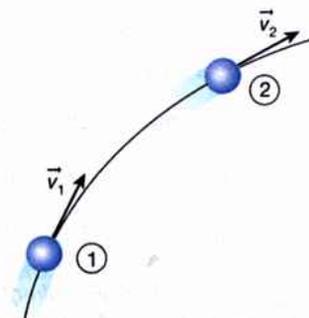
- Qual é o valor do impulso recebido pela partícula?
- Qual é o valor da força que atua na partícula?

4. Considere um corpo que está se deslocando em movimento retilíneo uniforme.

- A quantidade de movimento deste corpo está variando? Explique.
- Tendo em vista a resposta da questão (a), o que você conclui sobre o impulso que atua no corpo?
- Então, qual é o valor da resultante das forças aplicadas no corpo?

5. Uma partícula descreve, com velocidade de módulo constante ($v_2 = v_1$), a trajetória curva mostrada na figura deste exercício.

- Desenhe, em uma cópia da figura, os vetores \vec{q}_1 e \vec{q}_2 que representam as quantidades de movimento da partícula nas posições (1) e (2).
- A quantidade de movimento da partícula está variando? Explique.
- Tendo em vista a resposta da questão (b), podemos concluir que existe um impulso na partícula?



Exercício 5.

9.2. Quantidade de movimento de um sistema de partículas

QUANTIDADE DE MOVIMENTO TOTAL

A fig. 9-4 representa um *sistema de partículas* de massas m_1, m_2, m_3 , etc., as quais estão se movendo com velocidades $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3$, etc. As quantidades de movimento de cada partícula serão $\vec{q}_1 = m_1\vec{v}_1, \vec{q}_2 = m_2\vec{v}_2, \vec{q}_3 = m_3\vec{v}_3$, etc.

A quantidade de movimento do sistema, ou seja, a sua quantidade de movimento total, \vec{Q} , será obtida pela soma vetorial das quantidades de movimento das partículas do sistema, isto é, \vec{Q} é a resultante das quantidades de movimento $\vec{q}_1, \vec{q}_2, \vec{q}_3$, etc.

Portanto, temos

$$\vec{Q} = \vec{q}_1 + \vec{q}_2 + \vec{q}_3 + \dots \text{ ou } \vec{Q} = \sum \vec{q}$$

Desta maneira, para obter \vec{Q} você deverá usar os conhecimentos sobre adição de vetores, que analisamos no capítulo 3.

Exemplo

Em uma mesa de sinuca, três bolas, cada uma com 0,50 kg de massa, estão em movimento com velocidades \vec{v}_1, \vec{v}_2 e \vec{v}_3 mostradas na fig. 9-5-a. Sabendo-se que, em um dado instante, $v_1 = 2,0$ m/s, $v_2 = 1,0$ m/s e $v_3 = 2,0$ m/s, determine a quantidade de movimento total do sistema constituído por estas bolas neste instante.

O valor da quantidade de movimento de cada bola é:

$$\begin{aligned} q_1 &= m_1 v_1 = 0,50 \times 2,0 & \text{ donde } & q_1 = 1,0 \text{ kg} \cdot \text{m/s;} \\ q_2 &= m_2 v_2 = 0,50 \times 1,0 & \text{ donde } & q_2 = 0,50 \text{ kg} \cdot \text{m/s;} \\ q_3 &= m_3 v_3 = 0,50 \times 2,0 & \text{ donde } & q_3 = 1,0 \text{ kg} \cdot \text{m/s.} \end{aligned}$$

Os vetores \vec{q}_1, \vec{q}_2 e \vec{q}_3 estão representados no diagrama da fig. 9-5-b. Os vetores \vec{q}_1 e \vec{q}_2 têm a mesma direção e sentidos contrários. Então, sua resultante, $\vec{q}' = \vec{q}_1 + \vec{q}_2$, tem um módulo igual à diferença entre os módulos de \vec{q}_1 e \vec{q}_2 , isto é, o vetor \vec{q}' mostrado na fig. 9-5-b tem módulo $q' = 0,50$ kg · m/s.

A quantidade de movimento total, \vec{Q} , será dada pela resultante de \vec{q}' e \vec{q}_3 . Como estes vetores são perpendiculares entre si, podemos escrever:

$$Q^2 = (q')^2 + (q_3)^2 = (0,50)^2 + (1,0)^2 \quad \text{ donde } \quad Q = 1,1 \text{ kg} \cdot \text{m/s.}$$

A direção e o sentido de \vec{Q} estão mostrados na fig. 9-5-b.

FORÇAS INTERNAS E EXTERNAS

As forças que atuam em um sistema de partículas podem ser classificadas em *forças internas* e *forças externas*. Se uma partícula do sistema exercer uma força em outra partícula que também pertença ao sistema, esta força será uma *força interna*. Por outro lado, se a força que atua em uma partícula do sistema for exercida por um agente que não pertença ao sistema, ela será uma *força externa*.

Por exemplo, suponha que tenhamos escolhido um sistema de partículas constituído pelas bolas branca e preta em uma mesa de sinuca. Dando-se uma tacada na bola branca, estará atuando, no sistema, uma força externa. Se a bola branca colidir com a bola preta, as forças que uma exerce na outra serão forças internas. Se a bola branca tivesse colidido com a bola amarela, a força que ela receberia da bola amarela seria uma força externa, pois o sistema é constituído apenas pelas bolas branca e preta.

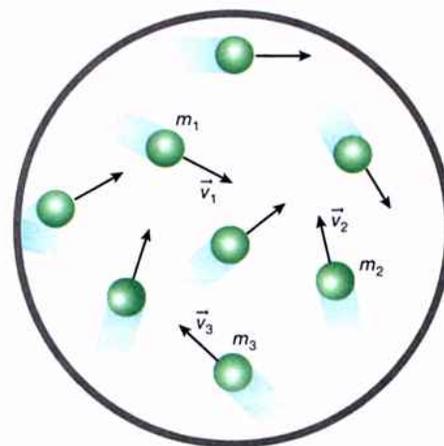


Fig. 9-4: A quantidade de movimento total de um sistema de partículas é igual à resultante das quantidades de movimento de cada partícula. Representação esquemática.

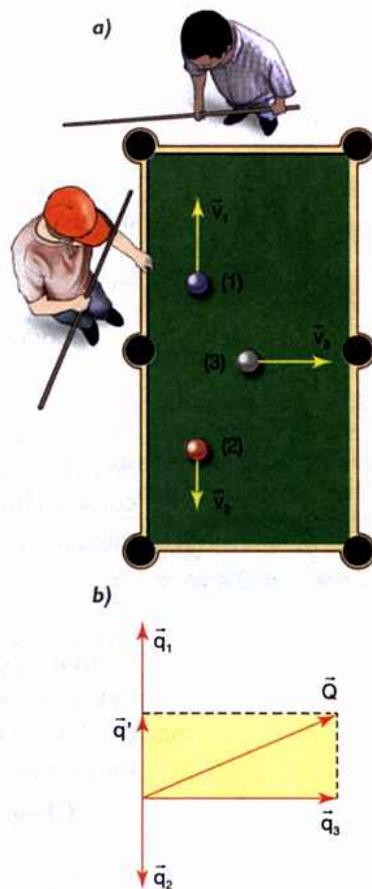


Fig. 9-5: Para o exemplo do item 9.2.

Entretanto, se uma outra pessoa tivesse escolhido, como seu sistema, todas as bolas existentes sobre a mesa, as forças entre as bolas branca e amarela seriam internas a este sistema. Mas a força exercida pelo taco sobre qualquer uma das bolas ainda seria uma força externa.

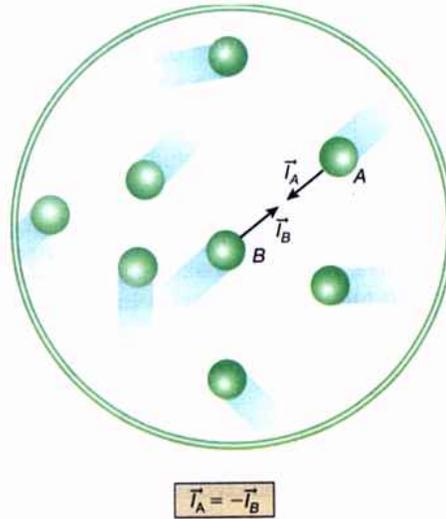


Fig. 9-6: As forças internas, de ação e reação, provocam impulsos de mesmo módulo mas de sentidos contrários. Representação esquemática.

FORÇAS INTERNAS NÃO PROVOCAM VARIÇÃO EM \vec{Q}

Consideremos um sistema no qual uma partícula A exerce uma força sobre outra partícula B também do sistema (fig. 9-6). Pela 3ª lei de Newton, sabemos que a partícula B reage sobre A com uma força igual e contrária. Estas forças, como vimos, são *forças internas* ao sistema. Em virtude desta interação, a partícula A recebe um impulso \vec{I}_A e B recebe um impulso \vec{I}_B . Uma vez que as forças que provocam estes impulsos são iguais e contrárias e atuam durante o mesmo intervalo de tempo, concluímos que

$$\vec{I}_A = -\vec{I}_B$$

Sejam $\Delta\vec{q}_A$ e $\Delta\vec{q}_B$ as variações nas quantidades de movimento de A e B , provocadas por estes impulsos. Pelo que vimos na secção 9.1, podemos escrever

$$\vec{I}_A = \Delta\vec{q}_A \quad \text{e} \quad \vec{I}_B = \Delta\vec{q}_B$$

Logo:

$$\Delta\vec{q}_A = -\Delta\vec{q}_B$$

Assim, sempre que atuarem *forças internas*, elas provocarão *variações iguais e contrárias nas quantidades de movimento das partículas do sistema*. Como consequência deste resultado, as forças internas não provocam variação na quantidade de movimento total, \vec{Q} , do sistema. De fato, como

$$\vec{Q} = \vec{q}_1 + \vec{q}_2 + \vec{q}_3 + \vec{q}_4 + \dots$$

se uma força interna provocar uma variação em \vec{q}_1 , por exemplo, forçosamente haverá uma variação igual e contrária na quantidade de movimento de outra partícula (\vec{q}_4 , por exemplo). Estas variações se anularão e a quantidade de movimento total, \vec{Q} , permanecerá invariável.

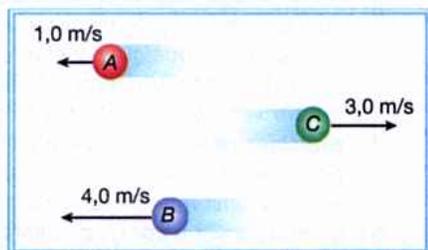
• Chegamos, assim, à seguinte conclusão:

As forças internas podem provocar variações nas quantidades de movimento de cada partícula de um sistema, mas não provocam variação na quantidade de movimento total do sistema.

os de fixação **exercícios de fixação** exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, **responda** às questões seguintes, **consultando o texto** sempre que julgar **necessário**.

6. Considere um sistema constituído por um automóvel, de massa $m_1 = 8,0 \times 10^2$ kg e um caminhão, de massa $m_2 = 2,0 \times 10^3$ kg. Determine o módulo da quantidade de movimento total, \vec{Q} , do sistema, em cada um dos seguintes casos:
 - a) O caminhão está em repouso e o carro, se deslocando com uma velocidade de 10 m/s.
 - b) O caminhão e o carro se deslocam, na mesma direção e no mesmo sentido, ambos a 20 m/s.
 - c) O caminhão e o carro se deslocam, ambos a 20 m/s, na mesma direção, mas em sentidos contrários.
7. Sobre uma mesa horizontal encontram-se três esferas de aço, A, B e C, cujas massas são $m_A = 2,0$ kg, $m_B = 0,50$ kg e $m_C = 2,0$ kg. Em um dado instante, estas esferas possuem as velocidades mostradas na figura deste exercício. Neste instante:
 - a) Calcule os valores das quantidades de movimento \vec{q}_A , \vec{q}_B , e \vec{q}_C de cada esfera. Desenhe estes vetores em uma cópia da figura.
 - b) Qual é o módulo, a direção e o sentido da quantidade de movimento do sistema constituído pelas esferas A e B?
 - c) Determine, em módulo, direção e sentido, a quantidade de movimento total \vec{Q} do sistema constituído pelas três esferas.



Exercício 7.

8. Considere o sistema constituído pela Terra e pela Lua. Diga se cada uma das forças seguintes é uma força interna ou externa a este sistema.

- a) Força da Terra sobre a Lua.
- b) Força do Sol sobre a Terra.
- c) Força do Sol sobre a Lua.
- d) Força da Lua sobre a Terra.

9. Uma pessoa empurra um carrinho com uma força \vec{F}_1 , como mostra a figura deste exercício. No interior do carrinho existe um pacote que comprime seu fundo com uma força \vec{F}_2 . Sejam \vec{F}_3 a força de reação do fundo do carro sobre o pacote e \vec{F}_4 as forças de atrito do chão sobre suas rodas. Considerando o sistema constituído pelo carrinho e o pacote, responda:
 - a) Quais dessas forças são internas?
 - b) Quais dessas forças são externas?



Exercício 9.

10. No exercício 7, suponha que as esferas A, B e C estejam ligadas umas às outras por meio de elásticos esticados, que exercem forças sobre elas. Considere o sistema constituído pelas esferas (e elásticos) e suponha que nenhuma outra força esteja atuando neste sistema.
 - a) As forças exercidas pelos elásticos sobre as esferas são internas ou externas?
 - b) As quantidades de movimento \vec{q}_A , \vec{q}_B e \vec{q}_C estão variando? Explique.
 - c) A quantidade de movimento total \vec{Q} do sistema está variando? Explique.

9.3. Conservação da quantidade de movimento

Como vimos, as forças internas não provocam variação na quantidade de movimento total, \vec{Q} , de um sistema. Portanto, qualquer variação em \vec{Q} só poderá ser causada por forças externas. Assim, se não atuarem forças externas em um

sistema, ou se a resultante das forças externas atuantes for nula, não poderá haver variação em \vec{Q} , isto é, a quantidade de movimento do sistema permanecerá constante. Chegamos, assim, às condições para que a quantidade de movimento se conserve.

Conservação da quantidade de movimento

Se for nula a resultante das forças externas que atuam em um sistema de partículas, a quantidade de movimento total deste sistema se conserva.

Devemos observar que as condições para a conservação da quantidade de movimento são bem mais amplas que as condições para a conservação da energia mecânica. Esta se conserva se atuarem apenas forças conservativas. Entretanto, a quantidade de movimento se conservará mesmo que estejam atuando forças dissipativas, como o atrito, desde que sejam forças internas ao sistema.

A seguir, apresentaremos dois exemplos que lhe ajudarão a compreender como a conservação da quantidade de movimento pode ser usada na solução de problemas.

Exemplo 1

A fig. 9-7-a mostra dois blocos, A e B, em repouso, encostados em uma mola comprimida, de massa desprezível. Os blocos estão apoiados em uma superfície sem atrito e suas massas são $m_A = 5,0$ kg e $m_B = 7,0$ kg. Abandonando o sistema, a mola se distende, empurrando os blocos (fig. 9-7-b). Supondo que o bloco B adquira uma velocidade $v_B = 2,0$ m/s, qual será a velocidade v_A adquirida pelo bloco A?

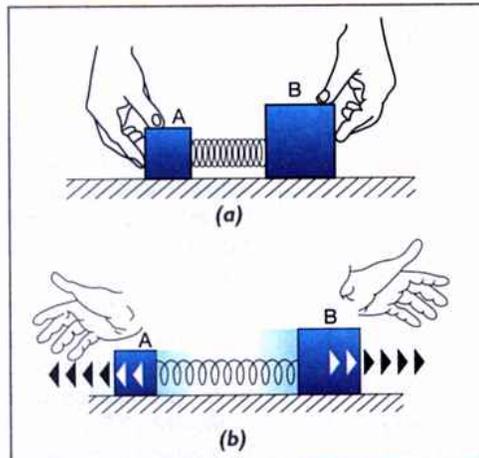


Fig. 9-7: Para o exemplo 1.

Consideremos o sistema constituído pelos dois blocos e pela mola. A resultante das forças externas que atuam no sistema é nula: os pesos dos blocos e as reações normais da superfície se anulam. Logo, a quantidade de movimento do sistema tem o mesmo valor em qualquer instante, embora a quantidade de movimento de cada bloco varie em virtude da ação das forças internas exercidas pela mola sobre eles. Designando por \vec{Q}_1 a quantidade de movimento inicial do sistema (instante em que os blocos foram abandonados) e por \vec{Q}_2 a quantidade de movimento final (instante em que os blocos abandonam a mola), devemos ter:

$$\vec{Q}_2 = \vec{Q}_1$$

Mas $\vec{Q}_1 = 0$, pois os blocos, ao serem abandonados, estavam em repouso e $\vec{Q}_2 = \vec{q}_A + \vec{q}_B$, onde \vec{q}_A e \vec{q}_B são as quantidades de movimento adquiridas por A e B. Então:

$$\vec{q}_A + \vec{q}_B = 0 \quad \text{ou} \quad m_A \vec{v}_A + m_B \vec{v}_B = 0 \quad \text{donde} \quad \vec{v}_A = -\frac{m_B \vec{v}_B}{m_A}$$

O sinal negativo na expressão anterior nos mostra que \vec{v}_A tem sentido contrário a \vec{v}_B , como você já devia ter previsto. O módulo de \vec{v}_A será, então,

$$v_A = \frac{m_B v_B}{m_A} = \frac{7,0 \times 2,0}{5,0} \quad \text{donde} \quad v_A = 2,8 \text{ m/s.}$$

Exemplo 2

Uma prancha, cuja massa é de 10 kg, encontra-se em repouso sobre uma superfície horizontal, sem atrito. Um bloco, de 5,0 kg de massa, é arremessado horizontalmente sobre a prancha, com uma velocidade $v_1 = 6,0$ m/s (fig. 9-8-a). Em virtude do atrito entre o bloco e a prancha, esta é arrastada e entra também em movimento. Após um certo tempo, o bloco e a prancha atingem a mesma velocidade final \vec{v}_2 , passando a se mover juntos (fig. 9-8-b).

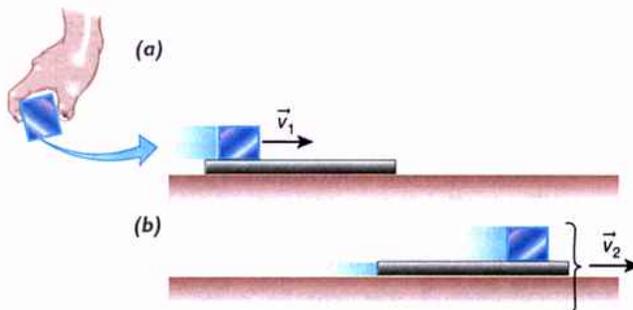


Fig. 9-8: Para o exemplo 2.

a) Qual é o valor da velocidade \vec{v}_2 ?

Tomemos como sistema o conjunto prancha-bloco. A resultante das forças externas (pesos e reação normal) é nula. As forças de atrito entre o bloco e a prancha são forças internas e, portanto, não provocam variação na quantidade de movimento do sistema. Então, sendo \vec{Q}_1 a quantidade de movimento do sistema no instante inicial (fig. 9-8-a) e \vec{Q}_2 a quantidade de movimento final (fig. 9-8-b), devemos ter

$$\vec{Q}_2 = \vec{Q}_1$$

Como a prancha se encontrava inicialmente em repouso, o valor de \vec{Q}_1 se refere apenas ao movimento do bloco, isto é,

$$Q_1 = 5,0 \times 6,0 \quad \text{donde} \quad Q_1 = 30 \text{ kg} \cdot \text{m/s.}$$

Na fig. 9-8-b, o bloco e a prancha deslocam-se com a mesma velocidade \vec{v}_2 . Logo

$$Q_2 = (10 + 5,0)v_2 \quad \text{ou} \quad Q_2 = 15v_2$$

Então:

$$15v_2 = 30 \quad \text{donde} \quad v_2 = 2,0 \text{ m/s.}$$

b) Qual é a quantidade de calor gerado pelo atrito entre o bloco e a prancha?

A energia cinética inicial do sistema é devida apenas ao movimento do bloco. Assim:

$$E_{c1} = \frac{1}{2} \times 5,0 \times (6,0)^2 \quad \text{donde} \quad E_{c1} = 90 \text{ J}$$

e a energia cinética final do sistema será, evidentemente,

$$E_{c2} = \frac{1}{2} \times (5,0 + 10) \times (2,0)^2 \quad \text{donde} \quad E_{c2} = 30 \text{ J.}$$

Então, houve uma diminuição de 60 J na energia cinética do sistema. Como vimos no capítulo anterior, a energia total sempre se conserva. Concluímos, assim, que na interação entre o bloco e a prancha, 60 J de energia mecânica foram transformados em 60 J de energia térmica.

ios de fixação **exercícios de fixação** exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima secção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

11. No exemplo 1 desta secção, considere as seguintes forças que atuam no sistema enquanto a mola se distende:

\vec{P}_A e \vec{P}_B – pesos dos blocos A e B;

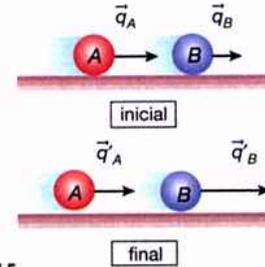
\vec{N}_A e \vec{N}_B – reações normais da superfície sobre os blocos A e B;

\vec{F}_A e \vec{F}_B – forças exercidas pela mola sobre os blocos A e B.

- a) Quais dessas forças são internas?
- b) Quais dessas forças são externas?
- c) Quanto vale a resultante das forças externas?
- d) A quantidade de movimento de cada bloco se conserva?
- e) A quantidade de movimento total do sistema se conserva?

12. Ainda no exemplo 1, usando os dados fornecidos e o valor calculado, responda:
- Qual é o módulo, a direção e o sentido da quantidade de movimento adquirida por B ?
 - Qual é o módulo, a direção e o sentido da quantidade de movimento adquirida por A ?
 - Tendo em vista as respostas de (a) e (b), qual é o valor da quantidade de movimento final do sistema?
 - Você já esperava o resultado obtido em (c)?
13. No exemplo 2 desta seção, como vimos, existe atrito entre o bloco e a prancha.
- Mostre, em uma cópia da fig. 9-8, o sentido da força de atrito sobre o bloco.
 - Na mesma cópia da fig. 9-8, mostre o sentido da força de atrito sobre a prancha.
 - Estas forças são internas ou externas ao sistema (prancha + bloco)?
 - Então, a quantidade de movimento do bloco se conserva? E a da prancha?
 - A quantidade de movimento total do sistema se conserva? E sua energia mecânica?
14. Suponha, no exemplo 2 desta seção, que exista atrito entre a prancha e a superfície sobre a qual ela desliza.
- Mostre, na cópia da fig. 9-8, o sentido desta força de atrito da superfície sobre a prancha.
 - Esta força seria interna ou externa ao sistema (prancha + bloco)?
 - Então, a quantidade de movimento total do sistema se conservaria? Seu valor final seria maior, menor ou igual a $30 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$?

15. A figura deste exercício representa duas bolas de bilhar, A e B , que se movimentam inicialmente com quantidades de movimento $q_A = 2,5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ e $q_B = 1,5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$. A bola A atinge a bola B e, após a colisão, passam a se mover com quantidades de movimento \vec{q}'_A e \vec{q}'_B , como mostra a figura. Considerando o sistema constituído pelas duas bolas, responda:



Exercício 15.

- Qual é a quantidade de movimento inicial do sistema?
- As forças que as bolas exercem, uma sobre a outra, durante a colisão, são internas ou externas?
- Supondo que a resultante das forças externas seja nula, qual é o valor da quantidade de movimento final do sistema?
- Sabendo-se que $\vec{q}'_A = 1,0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$, qual é o valor de \vec{q}'_B ?
- Supondo que a massa de B seja de $0,50 \text{ kg}$, qual é o valor da velocidade final desta bola?

Estabelecimento do conceito de quantidade de movimento

Observando os objetos que nos rodeiam, é fácil verificar que aqueles que se encontram em movimento acabam sempre, depois de um certo tempo, perdendo velocidade e chegando ao repouso. Os filósofos do século XVII preocupavam-se com estas observações, pois elas pareciam indicar que o “movimento total” do Universo estava diminuindo ou, em outras palavras, que o “Universo estaria morrendo”. Para eles, esta idéia era inaceitável, pois, sendo o Universo uma obra de Deus, ele deveria ser eterno. Vários cientistas e filósofos da época passaram, então, a acreditar na possibilidade da existência de uma grandeza, relacionada com o movimento, que deveria se manter constante enquanto os corpos interagiam uns com os outros, mesmo que alguns, eventualmente, acabassem por parar.

Na tentativa de encontrar qual seria esta grandeza que permaneceria constante, foi inicialmente levantada a hipótese de que, talvez, o vetor velocidade \vec{v} satisfizesse esta condição. Embora, em alguns casos, o vetor velocidade total de corpos que interagem realmente permaneça constante, é fácil encontrar exemplos em que isto não acontece. Por exemplo: na colisão completamente inelástica de dois corpos de massas diferentes, que se movimen-

tam inicialmente com velocidades de módulos iguais e de sentidos contrários (fig. 9-9), temos:

$$\text{antes da colisão: } \vec{v}_1 + \vec{v}_2 = 0$$

$$\text{depois da colisão: } \vec{V}_1 + \vec{V}_2 \neq 0$$

Logo, a velocidade vetorial total não se conservou durante esta colisão e podemos concluir que esta não é a grandeza que permaneceria constante nas interações dos corpos. O grande filósofo e cientista francês, René Descartes (fig. 9-10), interessando-se pelo problema, sugeriu que a grandeza procurada deveria ser obtida multiplicando-se a massa m do corpo pelo *módulo* v de sua velocidade. Ele acreditava que esta grandeza permaneceria constante nas interações entre os corpos, denominando-a “quantidade de movimento” do corpo. Portanto, segundo Descartes, a quantidade de movimento seria uma *grandeza escalar*, q , dada por $q = mv$.

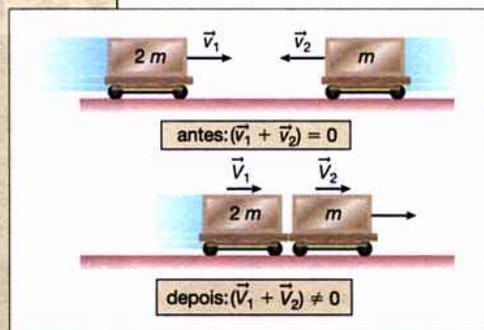


Fig. 9-9: Nesta colisão, não há conservação do vetor velocidade.

René Descartes (1596-1650)

Foi o mais importante cientista francês do século XVII. Além de sua contribuição para o estabelecimento do conceito de quantidade de movimento, devemos a ele a invenção do sistema de coordenadas denominado “sistema cartesiano” (em sua homenagem) e da representação gráfica das equações algébricas (geometria analítica).



Fig. 9-10

Apesar da reconhecida genialidade de Descartes, sua proposta não estava correta, tendo sido duramente criticada pelo grande matemático alemão Leibnitz (fig. 9-11). Este, com exemplos simples, apresentou vários tipos de colisões nas quais a grandeza escalar $q = mv$ não se conservava, ao contrário do que supunha Descartes.

Wilhelm Leibnitz (1646-1716)

Filósofo e matemático alemão, foi contemporâneo de Newton, tendo ambos, independentemente, estruturado as bases do Cálculo Diferencial e Integral. Em virtude disso, surgiu entre eles uma longa polêmica, com acusações mútuas de plágio.



Fig. 9-11

A maneira adequada de medir a “quantidade de movimento” através de uma grandeza cujo valor total se conservasse nas interações dos corpos só veio a ser encontrada, alguns anos mais tarde, por Isaac Newton. Este grande físico definiu a “quantidade de movimento” da maneira que foi feito no texto deste capítulo, isto é, \vec{q} seria uma *grandeza vetorial*, dada pela relação $\vec{q} = m\vec{v}$. Realmente, como vimos, o valor total desta grandeza se conserva em qualquer tipo de colisão e nas interações entre corpos de um sistema isolado. Em outras palavras, a quantidade de movimento total do Universo (da maneira definida por Newton) permanece constante no decorrer do tempo. Estava, portanto, resolvido o problema que tanto preocupou os filósofos do século XVII.

9.4. Forças impulsivas e colisões

Análise de uma colisão

Uma das aplicações mais importantes do conceito de quantidade de movimento é encontrada no estudo de interações de *curta duração*, entre partes de um sistema (ou conjunto) de corpos, como ocorre em uma *explosão* ou em uma *colisão*.

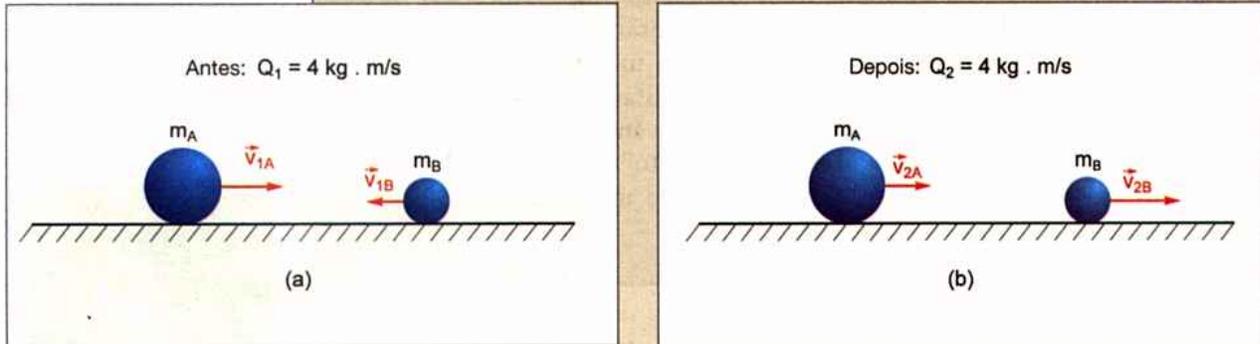


Fig. I: Em uma colisão, a quantidade de movimento total se conserva.

Para entender como essa grandeza está envolvida nestes fenômenos, consideramos a fig. I, que mostra duas esferas A e B deslocando-se ao longo de uma mesma reta, inicialmente em sentidos contrários. Após colidirem, as esferas passam a se mover no mesmo sentido. Suponha que as massas das esferas sejam $m_A = 2 \text{ kg}$ e $m_B = 1 \text{ kg}$, e suas velocidades, antes da colisão, fossem

$$v_{1A} = 3 \text{ m/s} \quad \text{e} \quad v_{1B} = 2 \text{ m/s}$$

com os sentidos mostrados na figura I-a. Em uma situação real, realizando medidas cuidadosas, uma pessoa encontrou os seguintes valores para as velocidades das esferas após a colisão:

$$v_{2A} = 0,5 \text{ m/s} \quad \text{e} \quad v_{2B} = 3 \text{ m/s}$$

com os sentidos mostrados na figura I-b.

Determinando a *quantidade de movimento total*, \vec{Q} , do conjunto (ou sistema) constituído pelas duas esferas, antes e depois da colisão, temos:

– antes da colisão (observe que os vetores \vec{q}_{1A} e \vec{q}_{1B} têm sentidos contrários)

$$Q_1 = m_A \cdot v_{1A} - m_B \cdot v_{1B} = 2 \times 3 - 1 \times 2 = 6 - 2 \\ Q_1 = 4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

– depois da colisão (observe que os vetores \vec{q}_{2A} e \vec{q}_{2B} têm o mesmo sentido)

$$Q_2 = m_A \cdot v_{2A} + m_B \cdot v_{2B} = 2 \times 0,5 + 1 \times 3 = 1 + 3 \\ Q_2 = 4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

Logo: $Q_2 = Q_1$

Portanto, as quantidades de movimento do sistema são iguais (em módulo, direção e sentido) antes e depois da colisão. Em outras palavras, a *quantidade de movimento total*, \vec{Q} , do sistema constituído pelos dois corpos que colidiram *se conservou* durante a colisão.

FORÇAS IMPULSIVAS

Quando uma bomba explode ou quando dois automóveis colidem, e em várias outras situações semelhantes, aparecem, entre os corpos que participam desses fenômenos, forças muito grandes mas que atuam durante um intervalo de tempo muito curto. Por exemplo, quando um jogador de futebol rebate uma bola, a força de interação entre a bola e o pé do jogador é da ordem de 10^3 kgf e dura cerca de 0,01 s. Estas forças são denominadas *forças impulsivas*. Deve-se observar que estas forças, em geral, provocam grandes acelerações nos corpos em que atuam, isto é, atuando em intervalos de tempo muito curtos, provocam variações apreciáveis nas velocidades destes corpos.



Uma força impulsiva tem um módulo muito grande e atua durante um intervalo de tempo muito pequeno.

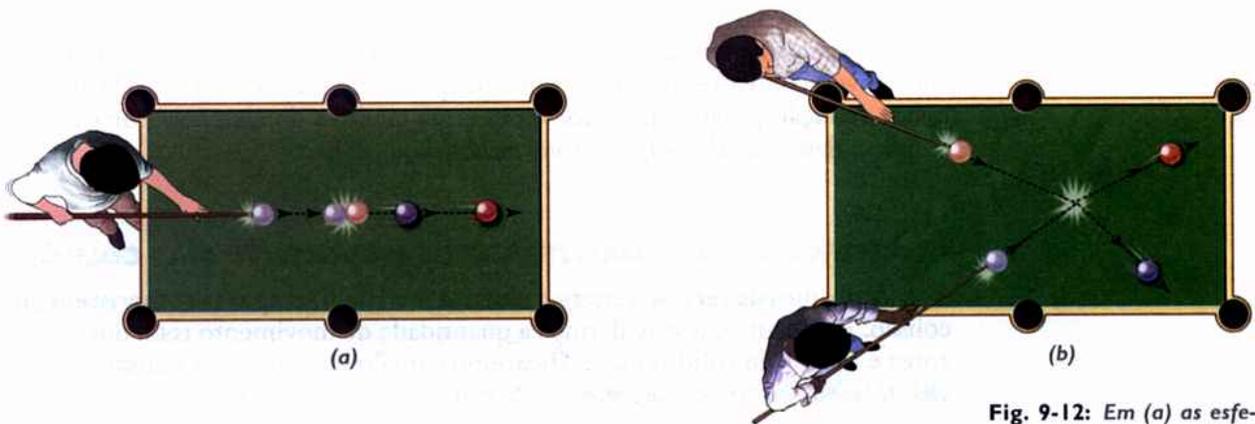


Fig. 9-12: Em (a) as esferas realizam uma colisão direta e, em (b), uma colisão oblíqua.

COLISÕES DIRETAS E OBLÍQUAS

Quando dois corpos colidem, como no choque entre duas bolas de bilhar, pode acontecer que a direção do movimento dos corpos não seja alterada pelo choque, isto é, eles se movimentam sobre uma mesma reta antes e depois da colisão (fig. 9-12-a). Quando isto acontece dizemos que ocorreu uma *colisão direta*, ou uma *colisão central* ou, ainda, que tivemos um *choque unidimensional*.

Por outro lado, pode ocorrer que os corpos se movimentem em direções diferentes, antes ou depois da colisão (fig. 9-12-b). Neste caso, a colisão é denominada *colisão oblíqua*.

COLISÕES ELÁSTICAS E INELÁSTICAS

Consideremos a colisão representada na fig. 9-13. Suponha que as energias cinéticas dos corpos, antes da colisão, fossem $E_{cA} = 8$ J e $E_{cB} = 4$ J e que, após o choque, passaram a ser $E'_{cA} = 5$ J e $E'_{cB} = 7$ J. Observe que, antes da

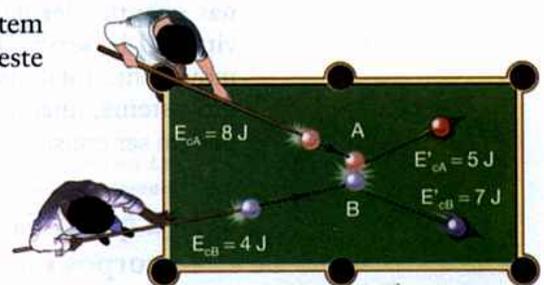


Fig. 9-13: Em uma colisão elástica, a energia cinética do sistema se conserva.

colisão, a energia cinética total do sistema era:

$$E_{cA} + E_{cB} = 8 \text{ J} + 4 \text{ J} = 12 \text{ J}$$

Calculando-se a energia cinética do sistema após a colisão, verificamos que:

$$E'_{cA} + E'_{cB} = 5 \text{ J} + 7 \text{ J} = 12 \text{ J}$$

Portanto, nesta colisão, a energia cinética total tem o mesmo valor antes e depois do choque, isto é, a energia cinética do sistema se conservou. Sempre que isto ocorre, dizemos que a colisão é *elástica*. De um modo geral, o choque é elástico quando os corpos que colidem não sofrem deformações permanentes durante a colisão. Duas bolas de bilhar, por exemplo, realizam colisões que podem ser consideradas elásticas.

Em caso contrário, se os corpos apresentarem deformações permanentes em virtude da colisão, ou se houver produção de calor durante o choque, verificamos que haverá uma redução no valor da energia cinética do sistema, pois parte desta energia cinética foi utilizada para produzir as deformações ou foi transformada em energia térmica. Sempre que os valores da energia cinética do sistema, antes e depois da colisão, forem diferentes, dizemos que a colisão é *inelástica*.

Um caso particular de colisão inelástica ocorre quando os corpos, após o choque, passam a ter velocidades iguais. Isto ocorre, por exemplo, quando dois automóveis colidem e movem-se colados após o choque. Neste caso, verifica-se a maior redução possível no valor da energia cinética do sistema. Por isto, esta colisão é denominada *completamente inelástica*.

CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO NAS COLISÕES

Acabamos de ver que a energia cinética total nem sempre se conserva em uma colisão. Entretanto, se calcularmos a quantidade de movimento total dos corpos, antes e depois de colidirem, verificaremos, qualquer que seja a colisão, *que esta quantidade de movimento se conserva*. Procuraremos entender por que isto ocorre.

No caso de *não* existirem forças *externas* atuando sobre os corpos que colidem, é natural que isto ocorra, pois já sabemos que a quantidade de movimento de um sistema se conserva se nele atuarem apenas forças internas. Contudo, *mesmo que existam forças externas*, como a duração do choque é sempre muito curta o impulso exercido por estas forças externas será também muito pequeno (em geral, os valores das forças externas não são muito grandes) e, conseqüentemente, a variação da quantidade de movimento que elas provocam pode ser desprezada. Observe que as forças impulsivas que ocorrem nas colisões (ou explosões), por serem muito grandes, podem provocar variações apreciáveis nas quantidades de movimento de cada um dos corpos que colidem mas, em virtude de serem forças *internas*, elas não influenciarão na quantidade de movimento total. Assim, podemos concluir que as quantidades de movimento de um sistema, imediatamente antes e imediatamente depois de qualquer colisão, podem ser consideradas iguais. Destacamos, pois, que:

a quantidade de movimento total de um sistema de corpos que colidem, imediatamente antes da colisão, é igual à quantidade de movimento total do sistema imediatamente após a colisão.

O número de problemas que podem ser resolvidos usando-se esta conclusão a que acabamos de chegar é muito grande. Os exemplos seguintes ilustram como a conservação da quantidade de movimento pode ser usada na solução de problemas de colisões ou explosões.

Exemplo 1

Em uma mesa de sinuca, a bola branca, de massa m , movendo-se com velocidade $v = 2,0$ m/s, atinge a bola amarela (também de massa m), que se encontrava em repouso. Supondo que o choque seja central e elástico, determine as velocidades das duas bolas após a colisão.

Sejam \vec{V}_1 e \vec{V}_2 as velocidades das bolas branca e amarela, após a colisão. A quantidade de movimento do sistema (das duas bolas), antes do choque, era $m\vec{v}$, pois apenas a bola branca estava em movimento. Como sabemos, em qualquer colisão há conservação da quantidade de movimento total e, então, podemos escrever

$$m\vec{v} = m\vec{V}_1 + m\vec{V}_2$$

Já que o choque é central, os vetores \vec{v} , \vec{V}_1 e \vec{V}_2 têm a mesma direção e, portanto, a relação anterior poderá ser escrita escalarmente, isto é

$$mv = mV_1 + mV_2 \quad \text{ou} \quad v = V_1 + V_2 \quad \text{donde} \quad V_1 + V_2 = 2,0.$$

Além disso, tratando-se de uma colisão elástica, a energia cinética do sistema se conserva. Logo:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mV_1^2 + \frac{1}{2}mV_2^2 \quad \text{ou} \quad v^2 = V_1^2 + V_2^2 \quad \text{donde} \quad V_1^2 + V_2^2 = 4,0$$

Obtivemos, assim, duas equações, relacionando as incógnitas V_1 e V_2 :

$$V_1 + V_2 = 2,0 \quad \text{e} \quad V_1^2 + V_2^2 = 4,0$$

Da primeira equação, tiramos $V_1 = 2,0 - V_2$ e, substituindo na segunda, virá

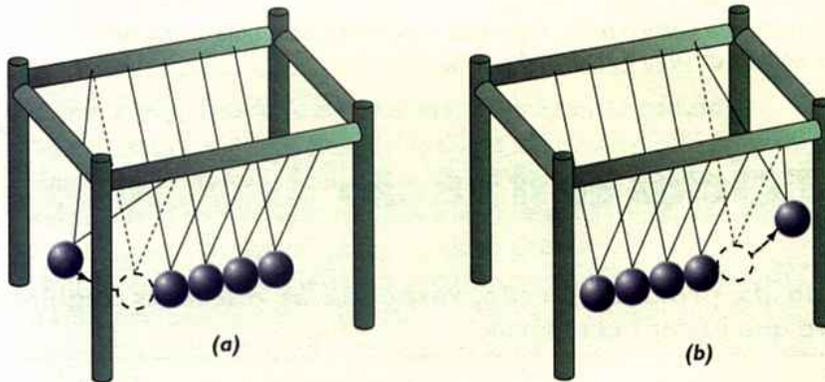
$$(2,0 - V_2)^2 + V_2^2 = 4,0$$

Resolvendo esta equação, obtemos $V_2 = 2,0$ m/s e, como $V_1 = 2,0 - V_2$, concluímos que $V_1 = 0$.



T & D Maccarty/The Stock Market/Contexto

Em qualquer colisão, como as que ocorrem entre bolas de bilhar, há conservação da quantidade de movimento.



No dispositivo mostrado na figura, todas as esferas (de aço) têm a mesma massa. Levantando-se a esfera de uma das extremidades e deixando-a colidir com as demais, como em (a), observamos que ela entra em repouso e apenas a bola da outra extremidade adquire uma velocidade igual à da esfera incidente (b).

Assim, vemos que, em virtude da colisão, a bola branca entra em repouso e a bola amarela adquire uma velocidade igual à que a bola branca possuía antes do choque. É possível que você já tenha visto este fato ocorrer em um jogo de bilhar.

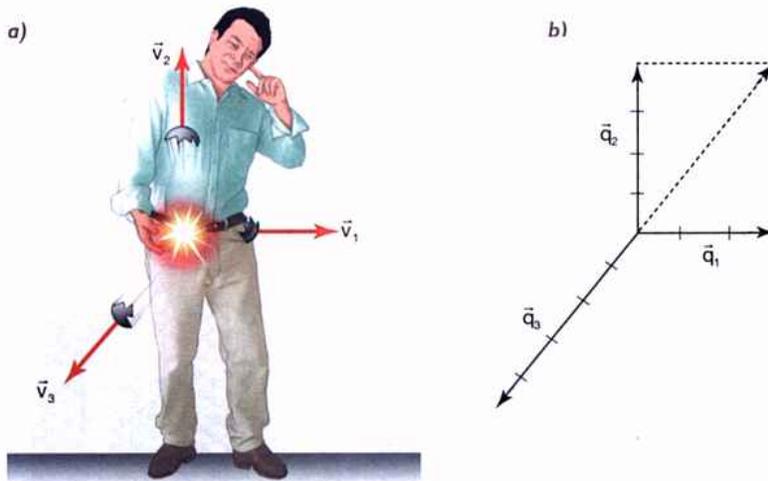


Fig. 9-14: Para o exemplo 2.

não alterarão sensivelmente o vetor \vec{Q} e, assim, a quantidade de movimento do sistema deverá ser ainda nula imediatamente após a explosão. As quantidades de movimento adquiridas pelo primeiro e pelo segundo pedaço valem, respectivamente:

$$q_1 = m_1 v_1 = 1,0 \times 12 \quad \text{donde} \quad q_1 = 12 \text{ kg} \cdot \text{m/s.}$$

$$q_2 = m_2 v_2 = 2,0 \times 8,0 \quad \text{donde} \quad q_2 = 16 \text{ kg} \cdot \text{m/s.}$$

Na fig. 9-14-b foram traçados, em escala, os vetores \vec{q}_1 e \vec{q}_2 . Para que a quantidade de movimento total, \vec{Q} , seja nula, a quantidade de movimento, \vec{q}_3 , do terceiro pedaço, deverá ser igual e contrária à resultante de \vec{q}_1 e \vec{q}_2 . Portanto, o terceiro pedaço se movimentará na direção do vetor \vec{q}_3 mostrado na fig. 9-14-b.

b) Se a massa do terceiro pedaço era $m_3 = 0,50$ kg, qual a velocidade, \vec{v}_3 , deste pedaço, imediatamente após a explosão?

Como vimos, o vetor \vec{q}_3 tem o mesmo módulo da soma $\vec{q}_1 + \vec{q}_2$. Pela fig. 9-14-b podemos tirar:

$$q_3 = \sqrt{q_1^2 + q_2^2} = \sqrt{12^2 + 16^2} \quad \text{donde} \quad q_3 = 20 \text{ kg} \cdot \text{m/s.}$$

Mas,

$$q_3 = m_3 v_3 \quad \text{ou} \quad 20 = 0,50 \cdot v_3 \quad \text{donde} \quad v_3 = 40 \text{ m/s}$$

Portanto, o terceiro pedaço parte, logo após a explosão, com uma velocidade de 40 m/s na direção e sentido do vetor \vec{q}_3 mostrado na fig. 9-14-b.

Exemplo 2

Suponha que uma pedra, em repouso, seja fragmentada em três pedaços, em virtude de uma explosão. Um dos pedaços, de massa $m_1 = 1,0$ kg, parte com uma velocidade $v_1 = 12$ m/s. Um segundo pedaço, de massa $m_2 = 2,0$ kg, sai com velocidade $v_2 = 8,0$ m/s, em uma direção perpendicular a \vec{v}_1 (fig. 9-14-a).

a) Desenhe um diagrama mostrando a direção do movimento do terceiro pedaço, imediatamente após a explosão.

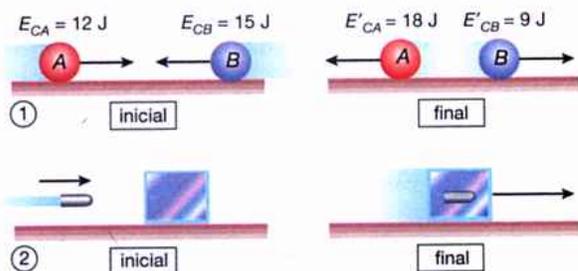
A quantidade de movimento do sistema (a pedra), antes da explosão, era nula. Como a explosão dura um intervalo de tempo muito curto, as forças externas

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

16. Observe a figura deste exercício. A situação (1) mostra duas bolas de aço, imediatamente antes e imediatamente após colidirem entre si. Na situação (2), uma bala é disparada contra um bloco de madeira, vendo-se esta bala imediatamente antes da colisão e movendo-se junto com o bloco, imediatamente após penetrar nele. Para cada uma das situações descritas, responda:

- Durante a colisão, a energia cinética do sistema se conservou?
- A colisão é elástica, inelástica ou completamente inelástica?
- A quantidade de movimento do sistema se conservou durante a colisão? Explique.



Exercício 16.

17. Duas locomotivas, A e B, movem-se no mesmo sentido, ao longo de um trilho reto e horizontal, estando A à frente de B. Sabe-se que $m_A = 3,0 \times 10^5 \text{ kg}$, $v_A = 8,0 \text{ m/s}$, $m_B = 5,0 \times 10^5 \text{ kg}$ e $v_B = 16 \text{ m/s}$. A locomotiva B choca-se com A, passando ambas a se deslocar juntas após a colisão.

- Como você classifica esta colisão?
- Qual é a quantidade de movimento do sistema constituído pelas duas locomotivas imediatamente antes da colisão?
- Então, qual deve ser o valor da quantidade de movimento do sistema imediatamente após a colisão?
- Considerando a resposta da questão (c), determine a velocidade com que as locomotivas se movem logo após a colisão.

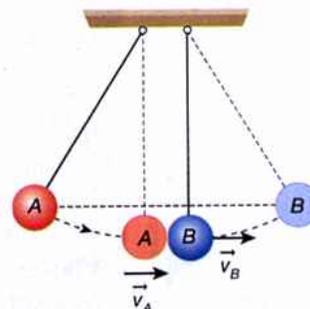
18. Um bloco de madeira, cuja massa é de 500 g, encontra-se em repouso sobre uma superfície horizontal. Em virtude da explosão de uma bomba colocada em seu interior, o bloco se fragmenta em dois pedaços A e B. Observa-se que o pedaço A, com massa igual a 200 g, é lançado, logo após a explosão, para a esquerda, com uma velocidade de 15 m/s.

- Qual era a quantidade de movimento do bloco antes da explosão?

- Então, qual deve ser a quantidade de movimento do sistema, constituído pelos dois pedaços, logo após a explosão?
- Qual é a quantidade de movimento adquirida por A?
- Portanto, qual deve ser a quantidade de movimento adquirida pelo pedaço B?
- Calcule a velocidade com que B foi lançado logo após a explosão.

19. Duas esferas, A e B, de massas iguais, estão suspensas por meio de fios de mesmo comprimento, como mostra a figura deste exercício. Abandonando-se a esfera A de uma certa altura, ela colide com B que, após a colisão, sobe, atingindo uma altura igual àquela de onde A partiu.

- Seja v_A a velocidade de A imediatamente antes da colisão e v_B a velocidade de B logo após receber o impacto de A. O valor de v_B é maior, menor ou igual a v_A ? Explique.
- Lembrando-se da solução do exemplo 1 desta secção, diga qual deve ser a velocidade da esfera A após a colisão.
- Então, a colisão entre as esferas foi uma colisão elástica ou inelástica?



Exercício 19.

O impulso e a quantidade de movimento em nosso cotidiano

Em diversas ocasiões de nossa vida diária, deparamos com fatos ou ocorrências que costumam despertar nossa curiosidade, e cuja interpretação pode ser feita com relativa facilidade usando-se os conceitos estudados nesta secção. Analisaremos, a seguir, algumas dessas situações:

– Em geral, os trapezistas de um circo são protegidos por redes para ampará-los em caso de uma eventual falha em suas apresentações. Por que, ao cair na rede, o trapezista não se machuca (fig. I), enquanto uma queda diretamente no solo poderia ser até fatal?

Deve-se observar que, ao cair, o trapezista adquire uma certa quantidade de movimento que, no final da queda, é anulada pela força de reação da rede, ou do solo. Em outras palavras, esses obstáculos exercem um impulso ($I = F \cdot t$) sobre o trapezista, que deve ter o mesmo valor em ambos os casos (igual à variação de sua quantidade de movimento). Como a interação do trapezista com a rede é mais demorada,



Fig. I: O trapezista não se machuca quando cai sobre a rede.

o tempo decorrido para a força de reação anular sua quantidade de movimento é *muito maior* que na queda sobre o solo (o tempo de interação da pessoa com o chão é de apenas alguns milésimos de segundo). Portanto, de $I = F \cdot t$, vemos que, para produzir o mesmo impulso \vec{I} , o valor de \vec{F} será *muito menor* na colisão com a rede. Por esse motivo, essa força praticamente não causa danos ao trapezista.

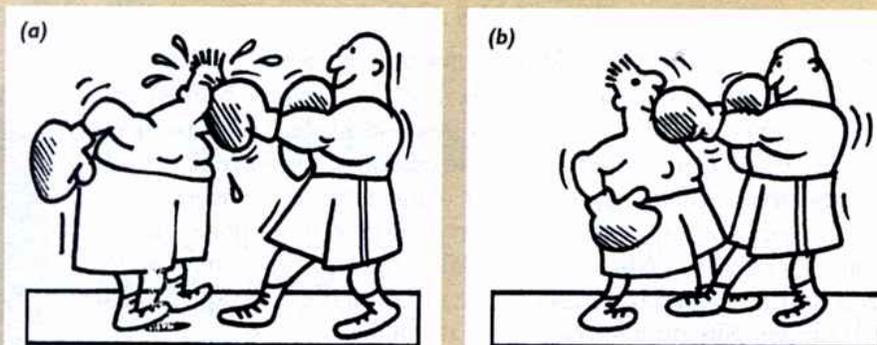
– De maneira semelhante, um atleta que salta de trampolins elevados não se machuca ao penetrar na água e, evidentemente, ele não se arriscaria a saltar, da mesma altura, sobre um solo rígido. Como o tempo de interação com a água é muito maior do que seria com o solo, a força de reação do líquido sobre a pessoa é pequena e, por isso, ela não se machuca ao penetrar na água.



Fig. II: Ao alcançar o solo, caindo de uma certa altura, a pessoa instintivamente dobra os joelhos.

– Ao pular de uma certa altura (de uma mesa, por exemplo) sobre o chão, qualquer pessoa, automaticamente, dobra seus joelhos ao tocar o solo. Com esse procedimento, consegue evitar danos aos ossos de suas pernas que possivelmente ocorreriam se elas fossem mantidas rígidas durante o impacto com o solo (fig. II). O fato de dobrar os joelhos torna maior o tempo que decorre até a pessoa parar completamente em sua interação com o chão duro (como acontece com o trapezista na rede). Assim, nesse caso, a força de reação do solo sobre as pernas é consideravelmente menor, evitando fraturas ósseas.

Fig. III: Em uma luta de boxe, o lutador, ao receber um golpe, não deve manter seu rosto imóvel, como em (a). Se ele consegue movimentar seu rosto no mesmo sentido do golpe, como em (b), mesmo sendo atingido o impacto (força) que recebe é consideravelmente menor, pois nesse caso o tempo de interação da luva do adversário com seu rosto é muito maior que em (a).



– Um outro fato interessante, no qual está envolvida a idéia de impulso, é descrito a seguir: se uma das rodas de um automóvel parado permanecesse apoiado sobre o pé de uma pessoa, certamente o pé seria esmagado em virtude de o peso do carro ser muito grande. Se a roda desse mesmo carro, entre-

tanto, passasse em grande velocidade sobre o pé da pessoa, provavelmente não causaria dano algum. Algumas pessoas, equivocadamente, tentam explicar esse fato dizendo que o carro torna-se mais leve quando está em movimento. Evidentemente, esta afirmação não é correta, pois o peso do carro é o mesmo nas duas situações. Na realidade, quando o carro está em movimento (com velocidade grande), o tempo durante o qual a roda comprime o pé da pessoa é muito curto e, assim, o impulso $I = F \cdot t$ exercido sobre ele é também muito pequeno. Em outras palavras, a força que a roda exerce sobre o pé é a mesma nas duas situações, mas no segundo caso ela atua durante um tempo tão curto que não chega a haver uma deformação apreciável nos ossos ou nos músculos da pessoa.

– A fig. III apresenta uma outra situação na qual estão envolvidas idéias semelhantes àquela que acabamos de analisar.

um tópico especial para você aprender um pouco mais

9.5. A descoberta do nêutron

A CONFIANÇA NA LEI DE CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO

A aplicação, com sucesso, do Princípio de Conservação da Quantidade de Movimento na solução de um grande número de problemas fez com que este princípio se estabelecesse como uma das leis fundamentais da natureza. Assim, os cientistas passaram a depositar uma grande confiança em sua generalidade, aplicando-o em todos os campos da Física, inclusive na Física Moderna, sobretudo no estudo das colisões entre partículas atômicas e nucleares.

J. Chadwick (1891-1974)

Físico inglês, recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1935 pela descoberta do nêutron. Trabalhou com o famoso cientista E. Rutherford, investigando a natureza dos números atômicos, tendo descoberto o próton (núcleo do átomo de hidrogênio). Em 1927 foi eleito membro da Real Academia de Ciências de Londres.



Fig. 9-15

Um exemplo notável, em que a crença no Princípio de Conservação da Quantidade de Movimento conduziu a uma importante conclusão, é ilustrado pela descoberta do nêutron, feita pelo cientista inglês James Chadwick (fig. 9-15) em 1932. O trabalho desenvolvido por este físico será descrito a seguir.

RUTHERFORD E A EXISTÊNCIA DO NÊUTRON

Como você sabe de seu curso de Química, o nêutron é uma das partículas fundamentais que constituem a matéria, fazendo parte, juntamente com os prótons, do núcleo atômico das substâncias.

Em 1920, o elétron e o próton eram partículas cujas existências já haviam sido amplamente confirmadas e suas propriedades eram bem conhecidas. Naquela época, o grande cientista inglês Rutherford (fig. 9-16) lançou a hipótese da possibilidade da ligação de um próton (carga elétrica positiva) com um elétron (carga elétrica negativa), o que daria origem a uma partícula sem carga elétrica, de massa praticamente igual à massa do próton, que ele denominou “nêutron”. Apesar de várias tentativas, os físicos não conseguiram comprovar experimentalmente a existência desta partícula, principalmente pelo fato de o nêutron não possuir carga elétrica, o que tornava a sua presença muito difícil de ser detectada.



Fig. 9-16

Hulton/Getty Images

Lord Ernest Rutherford (1871-1937)

Cientista inglês que influenciou duas gerações de físicos e cuja importância no pensamento científico pode ser comparada às de Faraday e Newton. Lançou as bases para o desenvolvimento da Física Nuclear, tendo proposto um modelo da constituição atômica, denominado “átomo de Rutherford”. Recebeu o Prêmio Nobel de Química em 1908 e em 1925 foi eleito presidente da Real Academia de Ciências de Londres.

A EXPERIÊNCIA DE CHADWICK

Na fig. 9-17 representamos esquematicamente a experiência realizada por Chadwick, em 1932, com a qual ele conseguiu comprovar a existência do nêutron, que Rutherford havia previsto 12 anos antes.

Um feixe de partículas α (núcleo do átomo de hélio) incidindo sobre uma amostra de berílio provocava a emissão, por esta substância, de um tipo de radiação invisível, sem carga elétrica, que os físicos suspeitaram, inicialmente, tratar-se de raios gama. Entretanto, fazendo cálculos e medidas cuidadosas, os cientistas verificaram que, se esta hipótese fosse verdadeira, os princípios de conservação da energia e da quantidade de movimento não estariam sendo obedecidos.

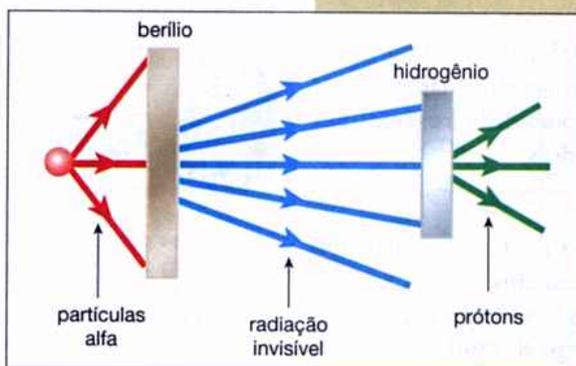


Fig. 9-17: Esquema da experiência realizada por Chadwick, com a qual ele comprovou a existência do nêutron.

Recusando-se a admitir que estas leis físicas estivessem sendo violadas, Chadwick formulou outra hipótese: a conservação da energia e da quantidade de movimento permaneciam válidas, mas a radiação invisível, proveniente do berílio, *seria constituída de nêutrons* e não de raios gama, como alguns físicos haviam suspeitado. Para verificar se realmente se tratava de nêutrons, Chadwick procurou medir a massa de uma dessas partículas que, de acordo com a proposta de Rutherford, deveria ser praticamente igual à massa do próton.

DETERMINAÇÃO DA MASSA DO NÊUTRON

Fazendo a radiação invisível incidir em uma amostra de hidrogênio (Fig. 9-17), Chadwick observou a emissão de grande número de prótons, que ele considerou como o resultado das colisões dos nêutrons com os núcleos dos

átomos de hidrogênio (prótons que se encontravam inicialmente em repouso). Supondo que estas colisões fossem elásticas, ele estabeleceu as equações que expressavam a conservação da quantidade de movimento e da energia cinética:

$$mv = mV + m_p v_p \quad \text{e} \quad \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mV^2 + \frac{1}{2}m_p v_p^2$$

onde

- m é a massa do nêutron;
- v é a velocidade do nêutron incidente;
- V é a velocidade do nêutron após a colisão;
- m_p é a massa do próton;
- v_p é a velocidade com que o próton é emitido após a colisão.

Combinando estas duas equações (você não precisa se preocupar em desenvolver estes cálculos), obtém-se

$$v_p = \frac{2m}{m + m_p} v$$

Como não havia possibilidade de medir a velocidade v dos nêutrons incidentes, Chadwick não conseguiu, apenas com esta equação, determinar a massa m do nêutron, apesar de conhecer os valores de m_p e v_p .

Para contornar esta dificuldade, ele repetiu a experiência, substituindo a amostra de hidrogênio por nitrogênio. Observou, então, que os núcleos deste elemento (massa m_N) eram emitidos com uma velocidade v_N ao serem bombardeados pelos nêutrons. Evidentemente, o valor de v_N (por analogia com a expressão obtida para v_p) será dado pela relação

$$v_N = \frac{2m}{m + m_N} v$$

Dividindo estas duas últimas equações, membro a membro, obtém-se

$$\frac{v_p}{v_N} = \frac{m + m_N}{m + m_p}$$

Assim, conseguiu-se obter uma relação na qual não figura o valor desconhecido, v , da velocidade dos nêutrons incidentes. Conseqüentemente, esta última equação permitiu a Chadwick determinar o valor da massa m do nêutron, pois m_N e m_p já eram conhecidas e v_N e v_p foram medidas nas experiências.

CHADWICK RECEBE O PRÊMIO NOBEL DE FÍSICA

O resultado destes cálculos forneceu, para m , um valor muito próximo da massa do próton, confirmando satisfatoriamente a hipótese de Chadwick. Realizando inúmeras outras experiências, ele encontrou resultados coerentes com o de suas primeiras medidas, estabelecendo então, de maneira definitiva, a existência do nêutron.

Seus trabalhos foram de tamanha importância para o desenvolvimento da Física Nuclear que Chadwick recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1935.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

20. a) Como um nêutron seria originado, de acordo com as idéias de Rutherford?
 b) Os cientistas tiveram dificuldade em comprovar a existência do nêutron. Qual foi a causa principal desta dificuldade?

21. a) Por que a radiação invisível emitida pelo berílio na experiência de Chadwick não pode ser identificada como raios gama (radiações eletromagnéticas)?
 b) Qual foi a proposta de Chadwick para a constituição dessas radiações invisíveis?

22. A equação que traduz a conservação da quantidade de movimento na experiência de Chadwick é:

$$mv = mV + m_p v_p$$

O que representa, nesta equação:

- a) o primeiro membro?
 b) o primeiro termo do segundo membro?
 c) o segundo termo do segundo membro?

23. Responda às questões do exercício anterior para a equação

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mV^2 + \frac{1}{2}m_p v_p^2$$

que expressa a conservação da energia cinética na colisão dos nêutrons com os prótons na experiência de Chadwick.

24. a) A partir das leis de conservação, Chadwick obteve a expressão

$$v_p = 2mv/(m + m_p).$$

Por que esta expressão não lhe permitiu calcular a massa m do nêutron?

- b) Por que razão Chadwick repetiu sua experiência, substituindo o hidrogênio pelo nitrogênio?

25. a) Na expressão

$$\frac{v_p}{v_N} = \frac{m + m_N}{m + m_p}$$

quais são as grandezas cujos valores Chadwick conhecia?

- b) A partir da relação apresentada na questão anterior, obtenha a expressão que permite calcular o valor de m .

Revisão

As questões seguintes foram formuladas para que você faça uma revisão dos pontos mais importantes abordados neste capítulo. Ao respondê-las, volte ao texto sempre que tiver dúvidas.

1. a) Dê a definição de impulso de uma força.
 b) O impulso é uma grandeza escalar ou vetorial?
 c) Qual é, no S.I., a unidade de impulso?
2. a) Defina a quantidade de movimento de um corpo.
 b) A quantidade de movimento é uma grandeza escalar ou vetorial?
 c) Seja \vec{v} o vetor velocidade de uma partícula. Qual é a direção e o sentido da quantidade de movimento \vec{q} desta partícula?
 d) Qual é, no S.I., a unidade de quantidade de movimento?
3. Diga, com suas próprias palavras, qual é a relação entre o impulso e a quantidade de movimento de um corpo. Expresse matematicamente esta relação.

4. a) Conhecendo-se as quantidades de movimento das partículas de um sistema, como se determina a quantidade de movimento total, \vec{Q} , deste sistema?
 b) O que são forças internas de um sistema? E forças externas?
5. Suponha que haja uma interação entre duas partículas, A e B , de um mesmo sistema (lembre-se de que as forças que uma exerce na outra são internas).
- a) Como se relacionam os impulsos \vec{I}_A e \vec{I}_B recebidos pelas partículas em virtude desta interação?

- b) Então, como se relacionam as variações das quantidades de movimento ($\Delta \vec{q}_A$ e $\Delta \vec{q}_B$) que estas partículas sofreram?
- c) Assim, a interação entre A e B (forças internas) provocará alguma alteração na quantidade de movimento total, \vec{Q} , do sistema?
6. a) Que forças podem provocar variações na quantidade de movimento total, \vec{Q} , de um sistema?
- b) Então, em que condições a quantidade de movimento total de um sistema se conserva?
7. a) O que é uma colisão direta? E uma colisão oblíqua?
- b) O que você entende por colisão elástica? E por colisão inelástica?
- c) Quando dizemos que uma colisão é completamente inelástica?
8. Faça um resumo do “bloco” intitulado “Conservação da quantidade de movimento nas colisões” (secção 9.4). Em seu resumo, procure explicar, com clareza, por que durante qualquer colisão podemos considerar que a quantidade de movimento total das partículas que colidem se conserva.

algumas experiências simples

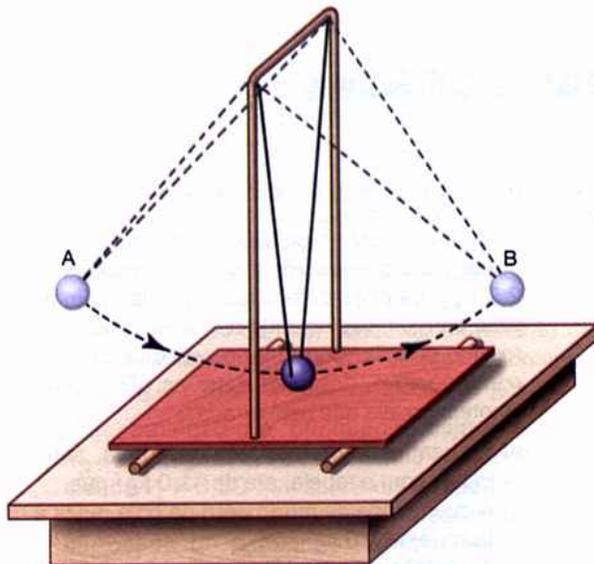
Para você fazer

Primeira experiência

Monte, sobre uma placa de madeira, ou papelão duro, uma estrutura capaz de sustentar um pêndulo razoavelmente pesado, como mostra a figura desta experiência. Coloque o conjunto sobre duas hastes cilíndricas, apoiadas em uma superfície horizontal lisa, de modo que a placa possa se deslocar livremente para a frente e para trás. (Em lugar da placa apoiada sobre as hastes, você poderá usar um carrinho cujas rodas girem livremente, praticamente sem atrito.)

Afaste o pêndulo da posição de equilíbrio até uma certa altura (posição A da figura). Solte o pêndulo e deixe que ele oscile.

- a) Observe o movimento da placa (ou do carrinho) enquanto o pêndulo oscila. Ela (ou ele) se desloca no mesmo sentido ou em sentido contrário ao pêndulo?



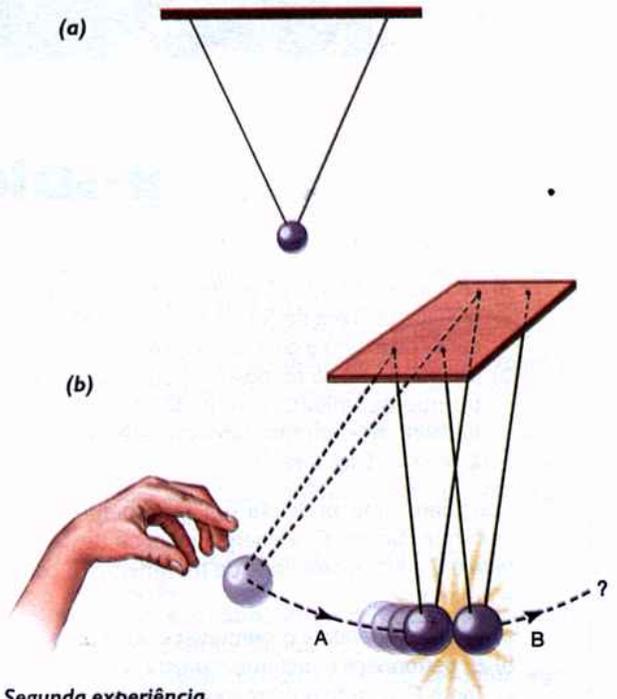
Primeira experiência.

- b) Tendo em vista o Princípio de Conservação da Quantidade de Movimento, tente explicar suas observações.

Segunda experiência

Suspenda uma esfera dura (de metal ou madeira) por meio de dois fios, formando um “pêndulo bifilar”, como mostra a figura (a) desta experiência. Monte dois pêndulos iguais a este usando duas esferas, A e B, de massas iguais, suspensas de tal maneira que, na posição de equilíbrio, elas estejam se tocando (veja a figura (b) desta experiência).

Afaste a esfera A até uma certa altura, de modo que, ao ser abandonada, ela colida frontalmente com a esfera B.

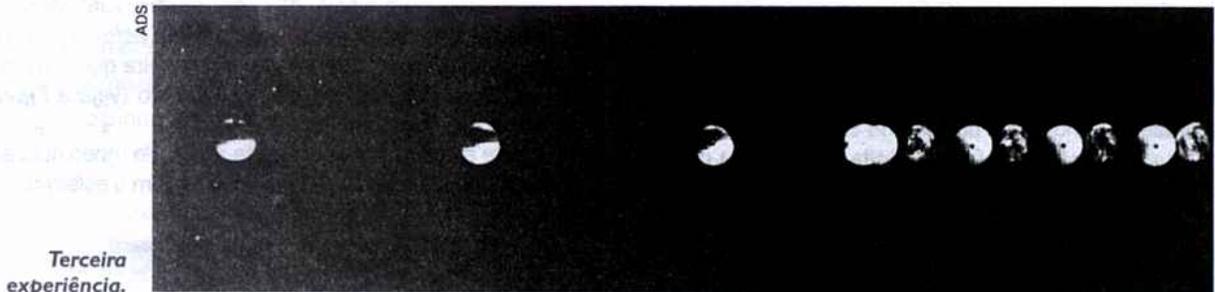


Segunda experiência.

- Procure observar a altura aproximada atingida por B após a colisão. Esta altura é bem maior, bem menor ou praticamente igual à altura de onde A partiu? (Repita a experiência algumas vezes para obter melhores informações.)
- Baseando-se em sua observação, você diria que houve conservação da energia cinética durante a colisão de A com B ? Então, como você classificaria esta colisão?
- Observe o que ocorre com a esfera A logo após a colisão. Sua observação confirma o resultado encontrado no exemplo 1 da secção 9.4?

Terceira experiência

A figura desta experiência é uma fotografia de "flash múltiplo", isto é, uma fotografia que mostra um objeto em intervalos de tempo sucessivos e iguais. Esta foto apresenta uma esfera de vidro (a esfera mais clara), de massa $m_1 = 46$ g, deslocando-se da esquerda para a direita com uma certa velocidade v_1 . Em seguida, esta esfera colide com outra, de cera (esfera mais escura), de massa $m_2 = 70$ g, que se encontrava inicialmente em repouso. Após a colisão, as duas esferas passam a se mover juntas, como vemos na fotografia.



- Meça cuidadosamente, com uma régua, na fotografia, a distância entre a 2ª e a 3ª posições da bola de vidro (contadas da esquerda para a direita). Considere que as dimensões da foto são 10 vezes menores do que as dimensões reais e que o intervalo de tempo entre dois flashes é de 1,0 s. Com essas informações, determine a velocidade v_1 da esfera de vidro, antes da colisão.
- Qual é, então, o valor da quantidade de movimento total do sistema constituído pelas duas bolas antes da colisão? (Escreva apenas algarismos significativos em sua resposta.)
- Meça, agora, a distância entre as duas últimas posições das esferas, unidas, após a colisão. Levando em conta as informações fornecidas em (a), determine a velocidade final, V , do conjunto.
- Calcule a quantidade de movimento do sistema após a colisão (lembre-se dos algarismos significativos). Compare este resultado com aquele que você encontrou em (b).
- Esta análise que você fez lhe permitiu verificar, com uma aproximação razoável, que a quantidade de movimento se conservou nesta colisão?

problemas e testes problemas e testes problemas e

- Lembrando-se da 2ª lei de Newton, expresse a unidade de força no S.I. (1 N) em função das unidades de massa e de aceleração neste sistema.
 - Baseando-se na resposta da questão (a), mostre que as unidades de impulso e de quantidade de movimento são equivalentes (isto é, $1 \text{ N} \cdot \text{s} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$).
- Considere uma partícula em movimento circular uniforme. Sejam E_c a energia cinética desta partícula e \vec{q} a sua quantidade de movimento. É correto afirmar que:
 - E_c está variando e \vec{q} permanece constante.
 - E_c permanece constante e \vec{q} está variando.
 - Tanto E_c quanto \vec{q} permanecem constantes.
 - Tanto E_c quanto \vec{q} estão variando.
- Uma bola de bilhar, de 0,50 kg de massa, movendo-se para a esquerda com uma velocidade de 2,0 m/s, perpendicular à tabela, colide com esta e volta com uma velocidade de mesmo módulo e de mesma direção. Considere o sentido para a direita como positivo. Assinale, entre as afirmativas seguintes, aquela que está *errada*:
 - A quantidade de movimento da bola, antes de colidir com a tabela, era de $-1,0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$.
 - A quantidade de movimento da bola, após a colisão, é de $1,0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$.
 - A variação da quantidade de movimento da bola, em virtude da colisão com a tabela, foi nula.

- d) O impulso que a bola recebeu da tabela foi de $2,0 \text{ N} \cdot \text{s}$.
- e) Se conhecêssemos o tempo de interação da tabela com a bola, seria possível calcular a força média que uma exerceu sobre a outra.
4. Dois corpos, A e B, sendo $m_A > m_B$, estão inicialmente em repouso. Suponha que ambos recebam impulsos iguais.
- a) A quantidade de movimento adquirida por A será maior, menor ou igual à adquirida por B?
- b) A velocidade adquirida por A será maior, menor ou igual à velocidade adquirida por B?
5. a) Se um corpo possui quantidade de movimento, podemos garantir que ele possui, pelo menos, uma forma de energia. Por quê?
- b) É possível que um corpo possua energia mas não possua quantidade de movimento. Dê um exemplo em que isto ocorra.
6. No exemplo 1 da secção 9.3:
- a) Calcule a energia cinética de cada bloco ao abandonar a mola.
- b) Tendo em vista a resposta da questão (a), determine a energia que estava armazenada na mola.
7. Um astronauta, tendo em suas mãos um pequeno objeto, encontra-se em repouso numa região do espaço onde não existe nenhuma atração gravitacional sobre ele. Nesta situação, ele arremessa o objeto, aplicando-lhe um impulso de $12 \text{ N} \cdot \text{s}$. Considere o sistema astronauta + objeto e assinale, entre as afirmativas seguintes, aquela que está errada:
- a) O astronauta recebe, do objeto, um impulso de módulo igual a $12 \text{ N} \cdot \text{s}$.
- b) O objeto passa a se deslocar com uma quantidade de movimento de $12 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$.
- c) O módulo da quantidade de movimento adquirida pelo astronauta é menor do que $12 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$.
- d) A quantidade de movimento do sistema, antes de o objeto ser arremessado, era nula.
- e) A quantidade de movimento do sistema, após o objeto ser arremessado, é nula.
8. Um foguete, na plataforma de lançamento, possui uma massa total (incluindo o combustível) de $4,0 \times 10^3 \text{ kg}$. Processando-se a combustão, o foguete expele rapidamente 800 kg de gás, com uma velocidade de $2,0 \times 10^3 \text{ m/s}$. Lembrando-se da conservação da quantidade de movimento de um sistema, determine a velocidade adquirida pelo foguete após ejetar esta massa de gás.
9. Um caminhão de brinquedo, cuja massa é $m_1 = 3,5 \text{ kg}$, está se deslocando com uma velocidade $v_1 = 0,20 \text{ m/s}$ sobre uma superfície horizontal lisa. Um menino arremessa, sobre a carroceria do caminhão, um tijolo de massa $m_2 = 0,50 \text{ kg}$, com uma velocidade horizontal $v_2 = 5,0 \text{ m/s}$ (veja a figura deste problema). Logo

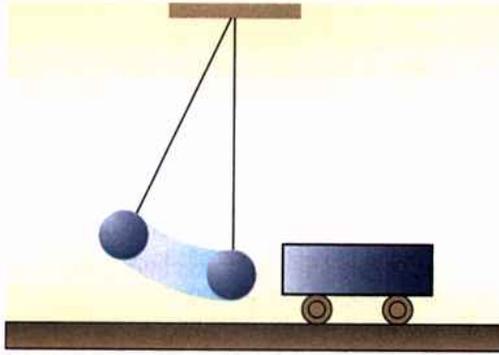
após o impacto, o caminhão e o tijolo (dentro da carroceria) passam a se deslocar juntos, com uma velocidade V . Considerando o sistema caminhão + tijolo indique, entre as afirmativas seguintes, aquelas que estão corretas:

- a) A colisão do tijolo com o caminhão é uma colisão elástica.
- b) A quantidade de movimento do sistema, imediatamente antes da colisão, era $3,2 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$.
- c) A quantidade de movimento do sistema, logo após a colisão, é menor do que antes da colisão.
- d) A energia cinética do sistema, logo após a colisão, é menor do que antes da colisão.
- e) A velocidade do caminhão deve diminuir, porque sua massa aumentou.
- f) A velocidade do sistema, logo após a colisão, é $V = 0,80 \text{ m/s}$.



Problema 9.

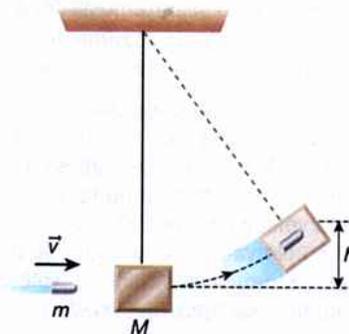
10. Um pequeno trator, cuja massa é de $4,0$ toneladas, estava se deslocando em uma estrada. Repentinamente, surgiu à sua frente um automóvel, de massa igual a 900 kg , desenvolvendo 80 km/h , na contramão, que colidiu frontalmente com o trator. Sabendo-se que as velocidades dos veículos se anularam logo após o choque, responda:
- a) Como você classificaria esta colisão?
- b) Qual era a velocidade do trator antes do choque?
11. Uma bola de ferro, de massa $1,0 \text{ kg}$, presa na ponta de uma corda (veja a figura deste problema), é lançada contra um carrinho de massa $2,0 \text{ kg}$. O carrinho está inicialmente em repouso e a velocidade da bola, imediatamente antes do choque, é de $3,0 \text{ m/s}$. Analise as afirmações seguintes, referentes aos movimentos da bola e do carrinho logo após a colisão, e diga quais delas descrevem situações impossíveis de ocorrer:
- a) A bola se move com $1,0 \text{ m/s}$ para a direita e o carrinho, com $2,0 \text{ m/s}$ também para a direita.
- b) A bola volta com $1,0 \text{ m/s}$ e o carrinho segue com $2,0 \text{ m/s}$.
- c) A bola fica em repouso e o carrinho segue com $1,5 \text{ m/s}$.
- d) A bola e o carrinho se deslocam juntos com $1,0 \text{ m/s}$ para a direita.
- e) A bola volta com $2,0 \text{ m/s}$ e o carrinho segue com $1,0 \text{ m/s}$.



Problema 11.

12. No problema anterior, para cada situação que é possível ocorrer, verifique se a colisão da bola com o carrinho é elástica, inelástica ou completamente inelástica.
13. Uma bola, de massa igual a 0,20 kg e velocidade de 0,10 m/s, colide com outra bola, idêntica a ela, que está em repouso. Usando apenas estas informações, é possível calcular somente uma das grandezas relacionadas a seguir. Qual é esta grandeza?
- A força que uma bola exerce sobre a outra.
 - O módulo da velocidade de cada bola após a colisão.
 - A direção da velocidade de cada bola após a colisão.
 - A energia cinética total das bolas após a colisão.
 - A quantidade de movimento total das bolas após a colisão.
14. Um menino, cuja massa é de 40 kg, encontra-se no interior de um carro que está se deslocando em trilhos horizontais com uma velocidade de 3,0 m/s. A massa do carro é de 100 kg.
- Suponha que o menino saísse do carro sem exercer nele qualquer impulso. Qual a velocidade horizontal com que o menino chegaria ao solo e com qual velocidade o carro continuaria a se mover?
 - Se o menino saltar de tal modo que caia verticalmente, com qual velocidade o carro passará a se mover?
15. Dois automóveis, de massas $m_1 = 2,0$ toneladas e $m_2 = 1,0$ tonelada, deslocam-se ao longo de duas ruas perpendiculares, com velocidades $v_1 = 20$ m/s e $v_2 = 30$ m/s. No cruzamento destas ruas eles colidem e passam a se mover juntos após a colisão.
- Calcule, em unidades do S.I., a quantidade de movimento total dos dois carros antes do choque.
 - Qual é o valor da velocidade comum dos dois carros após a colisão?

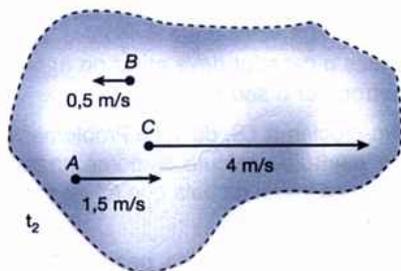
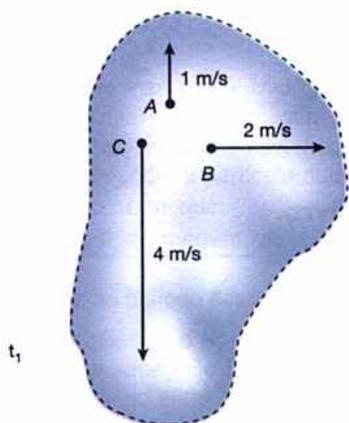
16. Uma granada, de massa igual a 1,0 kg, é lançada verticalmente para cima e explode no ponto mais alto, fragmentando-se em três pedaços. Imediatamente após a explosão, o primeiro fragmento, cuja massa é 0,20 kg, move-se verticalmente para cima com velocidade de 100 m/s. O segundo fragmento, cuja massa é 0,70 kg, move-se verticalmente para baixo com velocidade de 10 m/s.
- Qual é o módulo, a direção e o sentido da velocidade do terceiro fragmento?
 - Determine a energia liberada na explosão da granada.
17. Imagine que você estivesse no meio da superfície perfeitamente lisa de um lago gelado. Lembrando não ser possível caminhar sobre a superfície, devido à ausência total de atrito, sugira um procedimento que lhe permitisse alcançar a margem do lago.
18. *Pêndulo balístico* — Resolvendo este problema, você estará aprendendo um processo muito simples que pode ser usado na medida da velocidade de uma bala de revólver, por exemplo. Considere uma bala de massa m , disparada com uma velocidade \vec{v} , cujo valor desejamos medir. Fazendo a bala incidir contra um bloco de madeira, de massa M , suspenso por um fio, a bala se engasta no bloco e o conjunto sobe até uma altura h (veja a figura deste problema). Suponha que, em uma experiência, na qual $m = 8$ g e $M = 2,0$ kg, tenha-se observado que $h = 20$ cm.
- Sendo V a velocidade do conjunto bala + bloco logo após a colisão, expresse v em função de V .
 - Lembrando-se de que a energia cinética com que o conjunto parte após a colisão se transforma em energia potencial, calcule o valor de V (considere $g = 10$ m/s²).
 - Determine, então, o valor da velocidade v com que a bala foi disparada.



Problema 18.

19. Um sistema é constituído de três partículas, A, B e C, de massas $m_A = 2$ kg, $m_B = 2$ kg e $m_C = 0,5$ kg. A figura mostra as posições e as velocidades das partículas do sistema em um instante t_1 e no instante t_2 , posterior a t_1 .

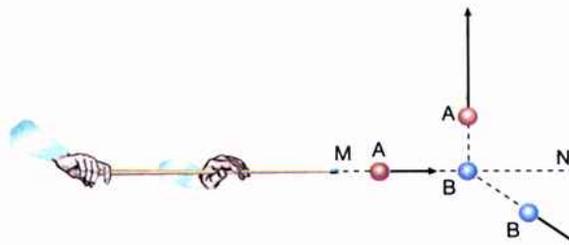
- Determine o módulo, a direção e o sentido da quantidade de movimento do sistema nos instantes t_1 e t_2 .
- Baseado em sua resposta à questão (a), que conclusão você tira sobre a resultante das forças externas que atuam no sistema?
- Você acha que houve interação (forças internas) entre as partículas? Explique.
- Houve conservação da energia cinética do sistema?



Problema 19.

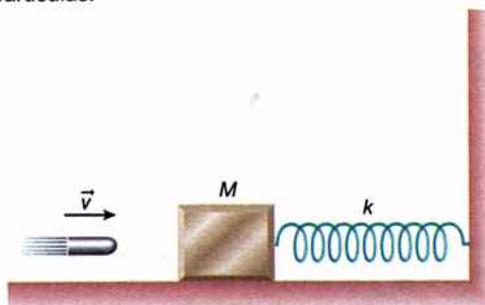
- Em um jogo de sinuca, uma bola, de massa igual a 200 g, colide contra a tabela lateral da mesa. Antes e após a colisão a velocidade da bola tem módulo igual a 2,0 m/s e forma um ângulo de 60° com a normal à tabela. Sabendo-se que o tempo de contato da bola com esta tabela é de $8,0 \times 10^{-3}$ s, determine o módulo da força média que a tabela exerce sobre a bola.
- Uma bola A, de massa 2,0 kg, move-se sobre uma mesa lisa e horizontal, ao longo da reta MN (veja figura) com uma velocidade de 2,0 m/s. Ela colide obliquamente com uma bola B, de massa 10,0 kg, inicialmente em repouso. Observa-se que, após a colisão, a bola A move-se em uma direção perpendicular a MN, como mostra a figura, com uma velocidade de 1,5 m/s. Após a colisão:
 - Qual deve ser o valor da quantidade de movimento do sistema na direção MN? E na direção perpendicular a MN?

- Calcule, baseando-se em sua resposta à questão (a), o valor da velocidade da bola B.



Problema 21.

- Um vagão vazio, sem cobertura, está se deslocando sobre trilhos retos horizontais, sem atrito.
 - Começa a chover e a água, caindo verticalmente, vai se acumulando no interior do vagão. O módulo da velocidade do vagão aumenta, diminui ou não se altera?
 - Pára de chover e a água acumulada gradualmente se escoia por um orifício existente no fundo do vagão. O módulo da velocidade do vagão aumenta, diminui ou não se altera?
- Uma bala, de 10 g de massa, é atirada por uma espingarda de massa igual a 4,0 kg, abandonando o seu cano com uma velocidade horizontal de 400 m/s. Determine o módulo da velocidade de recuo da espingarda.
- Um núcleo radioativo, inicialmente em repouso, desintegra-se emitindo um elétron e um neutrino, em direções perpendiculares entre si. A quantidade de movimento do elétron vale $1,2 \times 10^{-22}$ kg m/s e a do neutrino, $6,4 \times 10^{-23}$ kg m/s. Se a massa do núcleo resultante da desintegração é $6,0 \times 10^{-26}$ kg, calcule a velocidade de recuo do núcleo ao emitir essas partículas.



Problema 25.

- Uma bala de massa m , movendo-se com velocidade \vec{v} , colide contra um bloco de madeira, de massa M , que está encostado em uma mola de constante elástica k e apoiado em uma superfície horizontal, sem atrito (veja a figura deste problema). A bala penetra no bloco permanecendo incrustada nele e o conjunto comprime a mola que sofre uma deformação máxima igual a X .

- a) Para determinar o valor de X , um estudante desenvolveu o seguinte raciocínio: "Pela conservação da energia mecânica, a energia cinética inicial da bala deve ser igual à energia potencial elástica armazenada na mola comprimida. Logo,

$$\frac{1}{2}kX^2 = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{donde} \quad X = v\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Há um erro no raciocínio do estudante. Qual é?

- b) Determine, em função de m , M , v e k , a expressão que fornece corretamente o valor de X .

questões de vestibular

As questões de vestibular se encontram no final do livro.

problemas suplementares

1. Ao apresentar a sua 2ª lei do movimento, Newton expressou-a em termos da quantidade de movimento, \vec{q} , de uma partícula, da seguinte maneira

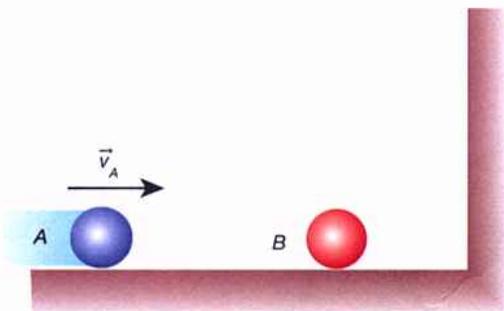
$$\vec{F} = \frac{\Delta\vec{q}}{\Delta t}$$

onde \vec{F} é a força resultante que atua na partícula e $\Delta\vec{q}$ é a variação da quantidade de movimento que a partícula experimenta no intervalo de tempo Δt . Mostre que, sendo constante a massa m da partícula, essa expressão é equivalente à expressão $\vec{F} = m\vec{a}$, que usamos ao apresentar a 2ª lei no capítulo 5.

2. Dois corpos, A e B , possuem massas m_A e m_B e velocidades v_A e v_B .
- Se suas energias cinéticas forem iguais, eles poderão ter quantidades de movimentos diferentes?
 - Se a energia cinética de A for maior do que a de B , a quantidade de movimento de A poderá ser menor do que a de B ?
3. Um jato de água que sai horizontalmente de uma mangueira, com vazão igual a 2,0 L/s, atinge uma pessoa, exercendo nela uma força de 16 N. Supondo que após o impacto a água caia verticalmente, calcule a velocidade das partículas de água no jato.
4. Um caçador possui um rifle que atira balas de massa igual a 60 g com uma velocidade de 900 m/s. Um pequeno tigre, de massa igual a 40 kg, pula sobre

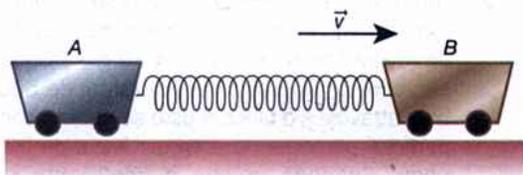
o caçador de tal modo que a componente horizontal de sua velocidade é igual a 10 m/s. Quantas balas o caçador deve atirar no tigre de modo a interromper o seu salto?

5. No problema 18, da série Problemas e Testes, deste capítulo, calcule a porcentagem da energia cinética inicial da bala que foi dissipada em sua colisão com o bloco.
6. a) Suponha que uma pessoa de massa igual a 70 kg, em repouso sobre a superfície da Terra, pulasse verticalmente, atingindo uma altura de 0,50 m. Calcule a velocidade de recuo que a Terra adquire, em virtude deste salto, no momento em que a pessoa pula. Considere a massa da Terra igual a 6×10^{24} kg.
- b) Imagine que toda a população da Terra (5 bilhões de habitantes) pulasse simultaneamente, numa mesma região da Terra, com um salto semelhante ao da questão (a). Você julga que um astronauta, observando este salto de sua nave, poderia perceber o recuo que a Terra sofreria em virtude deste pulo coletivo?
7. Uma bola A é lançada com velocidade $v_A = 3,0$ m/s contra outra bola B , idêntica a ela e inicialmente em repouso, colocada próxima a uma parede vertical (veja a figura deste problema). As colisões que ocorrem a seguir são perfeitamente elásticas e diretas. Considere desprezíveis as forças de atrito.
- Quantas colisões ocorrerão neste processo?
 - Quais são as velocidades \vec{v}_A e \vec{v}_B das bolas após a última colisão?



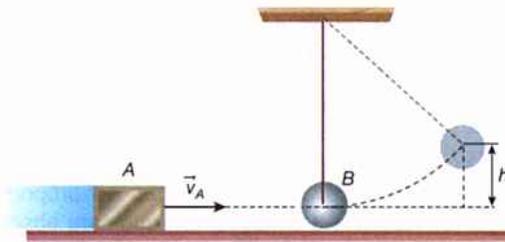
Problema suplementar 7.

8. Uma partícula, de massa $m = 200$ g, descreve um movimento circular uniforme com velocidade $v = 5,0$ m/s. Calcule o impulso, I , que a força centrípeta exerce sobre a partícula durante um intervalo de tempo Δt , tal que:
 - a) Δt seja igual à metade do período deste movimento.
 - b) Δt seja igual ao período deste movimento.
9. Dois carrinhos iguais, A e B, se deslocam em linha reta, sobre uma superfície horizontal, presos por um barbante e tendo entre eles uma mola comprimida de massa desprezível. No instante em que a velocidade do conjunto é $3,0$ m/s o barbante se rompe, a mola se distende e cai. O carrinho A pára imediatamente. Qual é a velocidade de B logo após este instante?



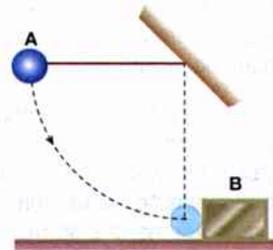
Problema suplementar 9.

10. Uma pessoa e um objeto estão situados sobre uma superfície horizontal sem atrito, separados por uma distância de 40 m. Por meio de uma corda, a pessoa exerce um puxão no objeto e ambos se deslocam, até se encontrarem em uma posição situada a 10 m da posição primitiva do objeto. Sabendo-se que a massa da pessoa é de 80 kg, determine o valor da massa do objeto.
11. Um bloco A, de massa $m_A = 2,0$ kg, é lançado com uma velocidade $v_A = 4,0$ m/s num plano horizontal liso, colidindo com uma esfera B, de massa $m_B = 5,0$ kg. A esfera estava inicialmente parada e suspensa por um fio, como mostra a figura deste problema. Verifica-se que após a colisão essa esfera atinge uma altura $h = 0,20$ m. Considerando $g = 10$ m/s²:
 - a) Qual é o módulo e o sentido da velocidade do bloco A após a colisão?
 - b) A colisão foi elástica?



Problema suplementar 11.

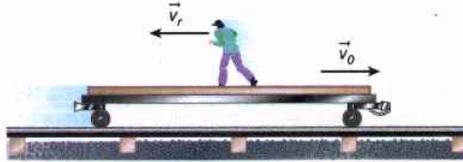
12. Uma esfera, A, de aço, de massa $m_A = 1,0$ kg, presa a um fio de comprimento $L = 45$ cm, é abandonada de uma posição mostrada na figura deste problema (com o fio na horizontal). Na posição mais baixa de sua trajetória esta esfera colide elasticamente com um bloco, B, também de aço, de massa $m_B = 5,0$ kg, que se encontra em repouso sobre uma superfície horizontal. Considerando $g = 10$ m/s², determine a velocidade \vec{v}_A , da esfera, e \vec{v}_B , do bloco, logo após a colisão.



Problema suplementar 12.

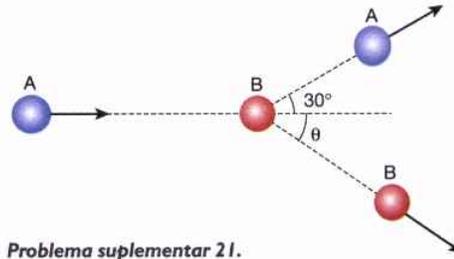
13. Um homem, usando um colete à prova de balas, está em pé sobre patins. Uma bala, de massa igual a 20 g, com velocidade horizontal de 400 m/s, é atirada contra ele, atinge o colete e cai verticalmente. Considere a massa do homem com o colete igual a 80 kg.
 - a) Qual é a velocidade que o homem adquire após receber o impacto da bala?
 - b) Alguns filmes apresentam cenas nas quais uma pessoa, após receber um tiro, é lançada brusca-mente para trás. Esta cena está de acordo com o resultado obtido em (a)?
14. No problema anterior, suponha que a bala colidis- se elasticamente com o colete e voltasse na mesma direção em que incidiu, com velocidade de módulo aproximadamente igual ao da velocidade de inci- dência. A velocidade adquirida pelo homem nestas condições seria maior, menor ou igual àquela cal- culada no problema anterior?
15. Um menino, de massa igual a 50 kg, está em pé na popa de um barco, de massa igual a 200 kg e de $3,0$ m de comprimento, em repouso, flutuando em um lago. Supondo que o menino caminhe até a proa, calcule o deslocamento que isto ocasionará no barco (despreze o atrito entre o barco e a água).

16. Um vagão-prancha, de estrada de ferro, de massa M , está se movendo sem atrito ao longo de trilhos retos e horizontais, com uma velocidade v_0 , como mostra a figura deste problema. Um homem, de massa m , inicialmente parado em relação ao vagão, começa a correr com uma velocidade relativa v_r (em relação ao próprio vagão). Determine a variação, Δv , que será observada na velocidade do vagão.



Problema suplementar 16.

17. No problema anterior, suponha que o homem corresse com uma certa velocidade sobre o vagão, tal que sua posição em relação à Terra permanecesse invariável. Determine, neste caso, a variação Δv da velocidade do vagão.
18. Uma espécie de bomba caseira, de massa igual a 7,0 kg, é lançada ao longo de uma superfície horizontal, sem atrito, com velocidade igual a 6,0 m/s. Num dado instante, a bomba explode, dividindo-se em dois fragmentos de massas iguais. Sabendo-se que em virtude da explosão uma energia de 126 J foi comunicada aos fragmentos, determine a velocidade de cada um deles imediatamente após a explosão.
19. Um corpo A, de massa igual a 5,0 kg, colide elasticamente com outro corpo, B, que se encontra inicialmente em repouso. Após a colisão, o corpo A continua a se mover no mesmo sentido com velocidade de módulo cinco vezes menor do que o de sua velocidade inicial. Calcule a massa do corpo B.
20. Duas pequenas esferas de argila, de mesma massa e movendo-se, cada uma, com velocidade de módulo igual a v_0 , realizam uma colisão oblíqua, completamente inelástica. Sabendo-se que o conjunto, após a colisão, move-se com velocidade de módulo igual a $v_0/2$, determine o ângulo entre as velocidades iniciais das esferas.
21. Duas esferas de aço A e B, de mesma massa, estão situadas sobre uma superfície horizontal lisa. A esfera B, inicialmente em repouso, é atingida obliquamente pela esfera A, que se movia com velocidade de 2,0 m/s. Após a colisão, A passa a se mover com velocidade de 1,5 m/s, formando um ângulo de 30° com a direção de sua velocidade inicial. Determine a velocidade adquirida por B e o ângulo θ , mostrado na figura deste problema.



Problema suplementar 21.

22. Uma pessoa, de massa igual a 70 kg, pula de uma altura de 5,0 m e cai, em pé, verticalmente sobre o chão. Suponha que, ao atingir o chão, para amortecer o impacto, ela dobre os joelhos, como fazemos habitualmente, de maneira intuitiva. Nestas condições, sabe-se que o impulso do chão sobre a pessoa dura cerca de 0,050 s. (Considere $g = 10 \text{ m/s}^2$.)
- Calcule o valor da reação normal que o chão exerce sobre a pessoa.
 - Sabendo-se que a área do osso da perna que sofre o impacto é de $3,0 \text{ cm}^2$ e que o osso humano pode suportar uma carga de compressão máxima de $1,7 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ sem se romper, verifique se houve fratura na perna da pessoa.
23. Suponha que a pessoa do problema anterior mantivesse sua perna esticada e rígida ao atingir o solo. Neste caso, medidas cuidadosas mostram que o tempo de impacto da pessoa com o chão se reduz para cerca de 0,002 s. Verifique se nestas condições haverá fratura na perna da pessoa.
24. Um bloco de massa igual a 2,0 kg encontra-se em repouso sobre uma superfície horizontal. Uma bala de revólver de massa igual a 10 g é atirada, contra ele, com uma velocidade horizontal de 500 m/s. A bala atravessa o bloco e este se arrasta sobre a superfície, percorrendo uma distância de 25 cm até parar. Sabendo-se que o coeficiente de atrito cinético entre o bloco e a superfície vale 0,20, calcule o módulo da velocidade da bala, após atravessar o bloco. (Considere $g = 10 \text{ m/s}^2$.)
25. Se um carro pesado alcançasse o pé de uma pessoa de modo que uma das rodas permanecesse apoiada sobre ele, certamente o pé da pessoa seria esmagado. Entretanto, se a roda deste mesmo carro, em grande velocidade, passasse sobre o pé da pessoa, provavelmente ele não sofreria dano algum.
- Algumas pessoas, ao tentar explicar este fato, afirmam que, no segundo caso, o carro estaria mais leve, pois os objetos em grande velocidade têm seu peso reduzido. Critique e comente esta afirmação.
 - Tente, você mesmo, explicar por que na segunda situação o pé da pessoa não seria esmagado pelo carro.

Observação: Se você encontrar dificuldades para analisar estes fatos, consulte o texto com o título "O impulso e a quantidade de movimento em nosso cotidiano", no final da seção 9.4.

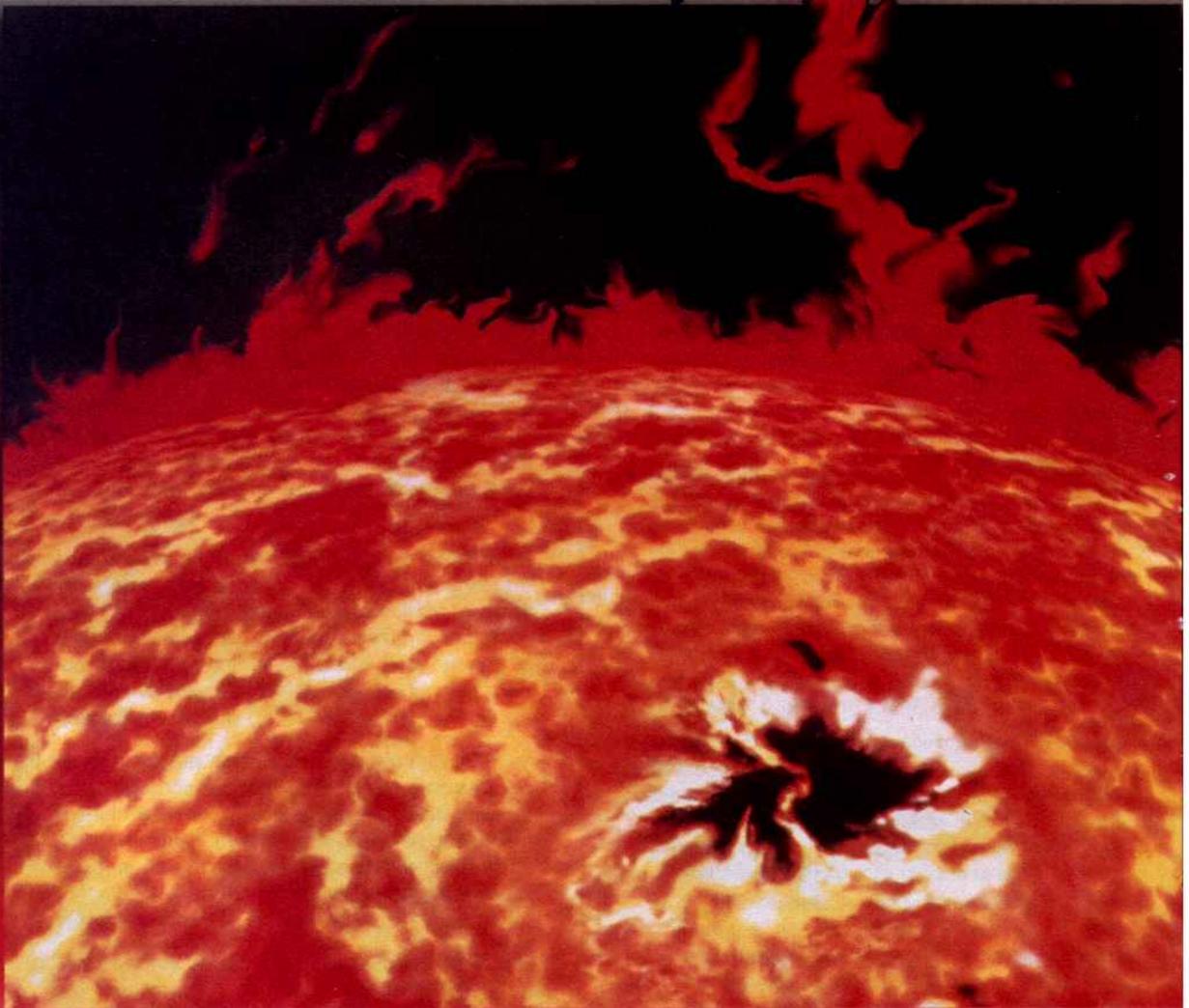


UNIDADE 5

**temperatura
dilatação
gases**

capítulo 10

Temperatura e dilatação



Julian Baum/SPL/Stock Photos

Utilizando métodos e aparelhos modernos, os cientistas conseguem determinar os valores de temperaturas extremamente elevadas, encontradas em corpos celestes situados a grandes distâncias da Terra. Nesta bela fotografia, podem ser vistas grandes labaredas provocadas por reações nucleares na superfície do Sol, cuja temperatura é superior a $6\ 000^{\circ}\text{C}$.

10.1. Temperatura – escalas termométricas

EQUILÍBRIO TÉRMICO

Usando o nosso tato, podemos perceber, entre dois corpos, qual é o mais quente e qual é o mais frio, isto é, sabemos reconhecer qual dos dois tem *temperatura* mais elevada. Em outras palavras, a temperatura de um corpo é uma propriedade que está relacionada com o fato de o corpo estar mais quente ou mais frio.

Suponha que tivéssemos dois corpos, com temperaturas diferentes, um em contato com o outro e isolados de influências externas. Você poderia verificar que o corpo mais quente iria se esfriando, enquanto o mais frio iria se aquecendo. Depois de um certo tempo, você perceberia, usando o seu tato, que os corpos atingiram uma mesma temperatura. A partir deste momento, as temperaturas dos corpos não sofrerão alterações, isto é, eles atingiram uma situação final, denominada *estado de equilíbrio térmico*. Portanto:

dois (ou mais) corpos, colocados em contato e isolados de influências externas, tendem para um estado final, denominado estado de equilíbrio térmico, que é caracterizado por uma uniformidade na temperatura dos corpos.

TERMÔMETROS

A comparação das temperaturas dos corpos através de nosso tato nos fornece apenas uma idéia qualitativa dessas temperaturas. Para que a temperatura possa ser considerada uma grandeza física, é necessário que saibamos medi-la, de modo que tenhamos um conceito quantitativo desta grandeza.

Como você já sabe, esta medida da temperatura é feita com os *termômetros*. Existem vários tipos de termômetros, cada um deles utilizando a variação de uma certa grandeza, provocada por uma variação da temperatura. Assim, temos termômetros que são construídos baseando-se 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. A título de ilustração, a fig. 10-2 apresenta alguns tipos de termômetros.

Entretanto, para se adquirir o conceito quantitativo de temperatura, não é necessário analisar esta grande variedade de aparelhos. Vamos desenvolver o nosso estudo baseando-nos apenas no tipo mais comum de termômetro — aquele que relaciona a temperatura com a altura da coluna de um líquido no interior de um tubo capilar de vidro (fig. 10-1). Neste termômetro, variações na temperatura provocam dilatações ou contrações do líquido, fazendo a coluna subir ou descer dentro do tubo de vidro. Assim, a cada altura da coluna podemos atribuir um número, correspondente à temperatura que determinou aquela altura.

O líquido mais utilizado neste tipo de termômetro é o Hg (por exemplo, nos termômetros clínicos). Alguns termômetros mais baratos utilizam álcool colorido, geralmente de cor vermelha, como você já deve ter visto.

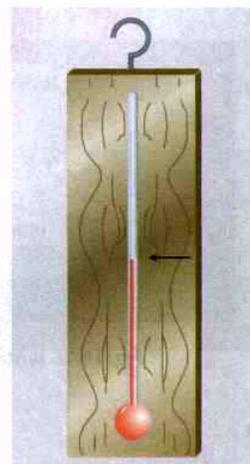
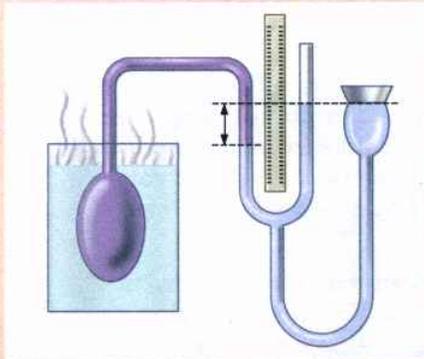
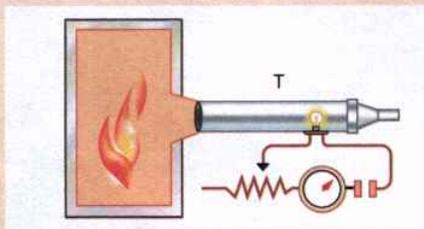


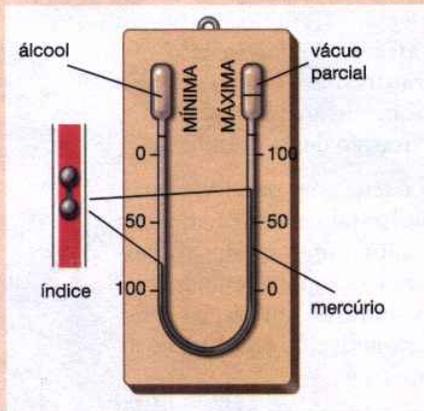
Fig. 10-1: Termômetro comum de líquido (Hg ou álcool) em tubo de vidro.



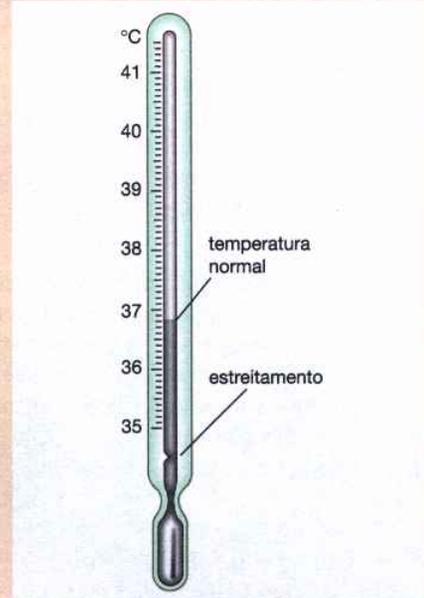
Termômetro de gás: neste instrumento, a temperatura é obtida através da leitura da pressão de um gás mantido a volume constante.



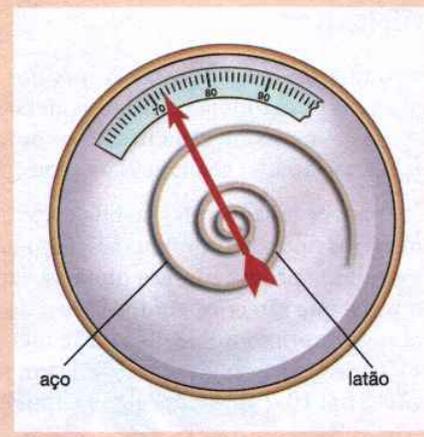
Pirômetro ótico: a temperatura do objeto (uma fornalha, por exemplo) é obtida comparando-se sua cor com a cor do filamento de uma lâmpada elétrica.



Termômetro de máxima e mínima: este aparelho indica, por meio de dois índices, as temperaturas máxima e mínima ocorridas em um certo intervalo de tempo.



Termômetro clínico: em virtude de um estreitamento na base do tubo capilar, a coluna de Hg é impedida de retornar ao reservatório. Por isso, este termômetro continua indicando a temperatura de uma pessoa, mesmo não estando mais em contato com ela.



Termômetro metálico: o aquecimento faz com que a espiral bimetalica se encurve, movendo o ponteiro, que indica o valor da temperatura.

Fig. 10-2: Ilustração esquemática de diversos tipos de termômetros.

ESCALA CELSIUS

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

Na construção de uma determinada escala termométrica, são adotadas convenções arbitrárias. Em virtude de serem arbitrárias essas convenções, várias escalas termométricas diferentes foram surgindo, com o decorrer do tempo, em vários países. Esta variedade de escalas termométricas, naturalmente, acarretava uma série de inconvenientes ao trabalho científico. Para afastar estas dificuldades, os cientistas sugeriram a adoção de uma escala única, baseada em convenções internacionais – a *escala Celsius* (anteriormente denominada escala centígrada), atualmente adotada em quase todos os países do mundo.

O conjunto de convenções usadas para se graduar um termômetro na escala Celsius é o seguinte:

- 1) Introdz-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, então, a altura da coluna líquida se estabiliza. Marca-se zero na extremidade da coluna (fig. 10-3-a). Assim, podemos dizer que a temperatura do gelo em fusão (à pressão de 1 atm) é zero grau Celsius e escrevemos 0°C.
- 2) Introdz-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. Podemos, então, dizer que a temperatura da água em ebulição (à pressão de 1 atm) é 100 graus Celsius e escrevemos 100°C (fig. 10-3-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 a uma variação de temperatura que é representada por $\Delta(1^\circ\text{C})$, como está indicado na fig. 10-4.

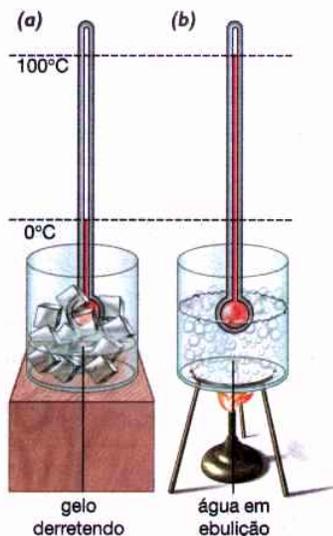


Fig. 10-3: Por convenção, a temperatura do gelo fundente é 0°C e a da água em ebulição é 100°C.

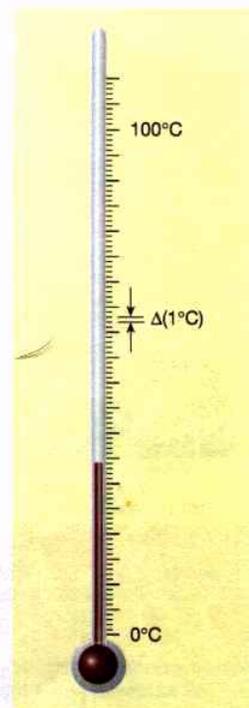
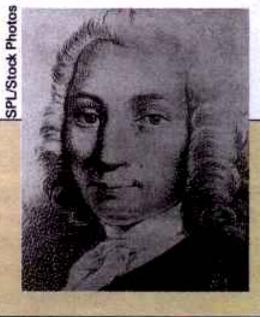


Fig. 10-4: Intervalo de 1°C, isto é, $\Delta(1^\circ\text{C})$. Estes intervalos são iguais ao longo da escala do termômetro.

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

Anders Celsius (1701-1744)

Astrônomo sueco, desenvolveu vários trabalhos no campo da Astronomia e da Geociência. Entretanto, seu nome tornou-se mais conhecido pela invenção da escala centígrada de temperatura, que passou a ser usada em quase todos os países do mundo.

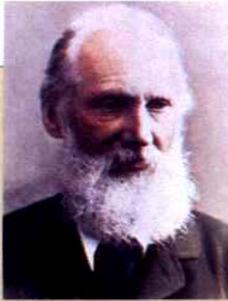


ESCALA KELVIN

Outra escala usada universalmente, principalmente nos meios científicos, foi proposta pelo grande físico irlandês, Lord Kelvin (1824-1907), sendo denominada *escala Kelvin* ou *escala absoluta*.

A idéia de se propor esta escala surgiu das discussões em torno de temperaturas máximas e mínimas que podem ser atingidas por um corpo. Verificou-se que não há, teoricamente, um limite superior para a temperatura que um corpo pode alcançar. Entretanto, observa-se que existe um limite natural, quando tentamos abaixar a temperatura. Estudos realizados em grandes laboratórios de diversos países mostraram que é impossível obter uma temperatura inferior a -273°C . Esta temperatura é denominada *zero absoluto*. Na realidade, o zero absoluto é uma temperatura limite, que não pode ser alcançada, tendo-se, entretanto, conseguido valores muito próximos a ela. Então:

o limite inferior para a temperatura de um corpo é -273°C . Esta temperatura é denominada zero absoluto.



Kelvin (1824-1907)

Engenheiro, matemático e físico inglês 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.

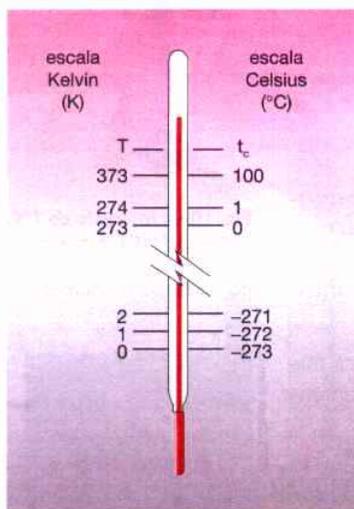


Fig.10-5: Observando a figura, concluímos facilmente que $T = t_c + 273$.

Kelvin propôs como zero de sua escala (representado por 0 K)* a temperatura do zero absoluto e um intervalo unitário igual ao intervalo de 1°C , isto é, $\Delta(1\text{ K}) = \Delta(1^{\circ}\text{C})$, como mostra a figura 10-5.

De modo geral, designando por T a temperatura Kelvin e por t_c a temperatura Celsius correspondente, é fácil concluir, observando a fig. 10-5, que

$$T = t_c + 273$$

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

COMENTÁRIOS

É possível que você já tenha ouvido algumas pessoas dizerem que “temperatura é uma medida do calor do corpo”. Esta afirmativa, entretanto, *não* é correta. Como você viu, a temperatura é um número usado para traduzir o estado de *quente* ou *frio* de um corpo. Como veremos no capítulo 12, a expressão *calor do corpo* não tem significado físico.

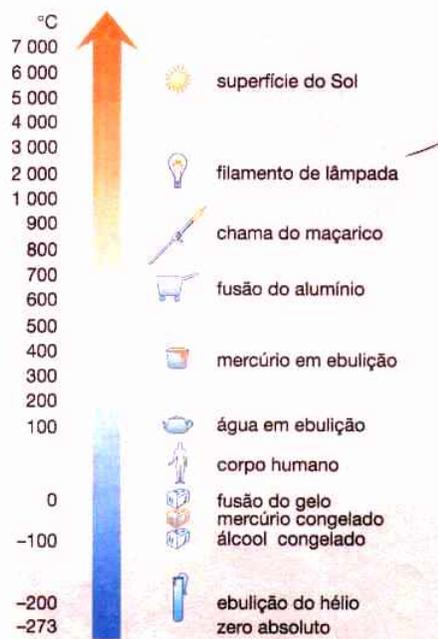
* Até algum tempo atrás escrevia-se 0°K e lia-se “zero grau Kelvin”. Atualmente, convencionou-se abolir a palavra “grau” ao se trabalhar com a escala Kelvin. Assim, escreve-se 0 K (lê-se “zero Kelvin”), 1 K (lê-se “um Kelvin”) etc.

Uma maneira correta de conceituar a temperatura seria dizer que ela é uma medida da maior ou menor agitação das moléculas ou átomos que constituem o corpo. No capítulo seguinte, por exemplo, 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 e o zero absoluto corresponderia a uma situação de energia cinética mínima dos átomos e moléculas do corpo.

Cor da luz emitida por um corpo aquecido a diversas temperaturas	
Temperatura (°C)	Cor
500	Vermelho (apenas visível)
700	Vermelho (intenso)
900	Laranja
1 000	Amarelo
Acima de 1 100	Branco

Tabela 10-2.

Temperaturas notáveis	
Explosão de fio metálico por descarga elétrica	10 000 °C
Fotosfera solar	5 700 °C
Arco voltaico	4 800 °C
Fusão do tungstênio	3 400 °C
Filamento de uma lâmpada	2 500 °C
Fusão de chumbo	327 °C
Mistura frigorífica (NaCl + gelo)	- 21 °C
Ebulição do hidrogênio	20 K
Ebulição do hélio	4 K
Vaporização rápida do hélio	0,71 K
Desmagnetização de alguns cristais	10 ⁻⁶ K



Representação de algumas temperaturas notáveis, desde o zero absoluto até a temperatura do Sol.

exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima secção, **responda** às questões seguintes, **consultando o texto sempre que julgar necessário**.

- Dois corpos, A e B, com temperaturas diferentes, sendo $t_A > t_B$, são colocados em contato e isolados de influências externas.
 - Diga o que se passa com os valores de t_A e t_B .
 - Como se denomina o estado para o qual tendem os dois corpos?
 - Quando este estado é alcançado, o que podemos dizer sobre os valores de t_A e t_B ?
- Para medir a temperatura de uma pessoa, devemos manter o termômetro em contato com ela durante um certo tempo. Por quê?
- A temperatura normal do corpo humano é cerca de 37°C. Exprese esta temperatura na escala Kelvin.
 - A temperatura de ebulição do nitrogênio líquido é 78 K. Qual é o valor desta temperatura em°C?
 - A temperatura de um corpo se elevou de 52°C. Qual foi a elevação da temperatura Kelvin deste corpo?

4. Em um laboratório de pesquisas, um cientista mediu a temperatura na qual um certo gás se liquefaz, encontrando um valor extremamente baixo. Qual dos valores seguintes você acha que poderia ter sido encontrado por ele? Explique.
- a) $-327\text{ }^{\circ}\text{C}$ b) -15 K c) $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$
5. Consulte a tabela 10-1 e responda:
- a) Qual das temperaturas ali indicadas é mais próxima do zero absoluto?
- b) Esta temperatura é maior ou menor do que o zero absoluto?
- c) Existe, nesta tabela, alguma temperatura superior à da superfície do Sol? (A temperatura da superfície do Sol é cerca de $6\ 000\text{ K}$.)
6. 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".
- b) "A energia cinética das moléculas do gás em A é maior do que a energia cinética das moléculas do gás em B".

10.2. Dilatação dos sólidos

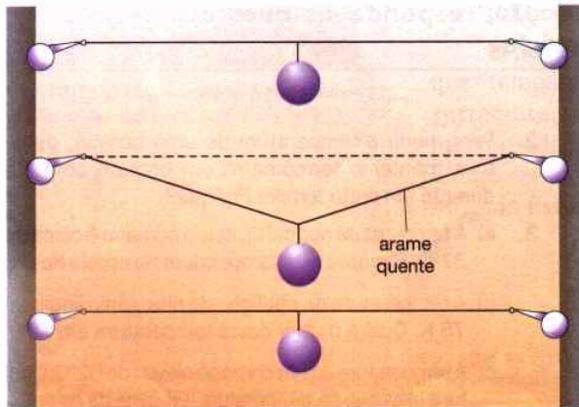
DILATAÇÃO

Um fato bastante conhecido é que as dimensões de um corpo aumentam quando aumentamos a sua temperatura. Salvo algumas exceções, todos os corpos, quer sejam sólidos, líquidos ou gasosos, dilatam-se quando sua temperatura aumenta.



Fig. 10-6: Quando a esfera é aquecida suas dimensões aumentam, isto é, ela se dilata.

A fig. 10-6 mostra uma experiência simples que ilustra a dilatação de um sólido: à temperatura ambiente, a esfera metálica A pode passar, com pequena folga, através do anel B. Aquecendo-se apenas a esfera, verifica-se que ela não poderá mais passar pelo anel. Devido à elevação da temperatura, a esfera se dilatou. Se você esperar que sua temperatura volte ao valor primitivo, a esfera se contrairá e tornará a passar pelo anel.



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 se distribuem ordenadamente, dando origem a uma estrutura que é denominada rede cristalina do sólido. A ligação entre estes átomos se faz por meio de forças elétricas, que atuam como se existissem pequenas molas unindo um átomo a outro (fig. 10-7). Esses átomos estão em constante vibração em torno de uma posição média, de equilíbrio.

Quando a temperatura do sólido é aumentada, há um aumento 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 disto, a distância média entre os átomos torna-se maior (fig. 10-7), ocasionando a dilatação do sólido.

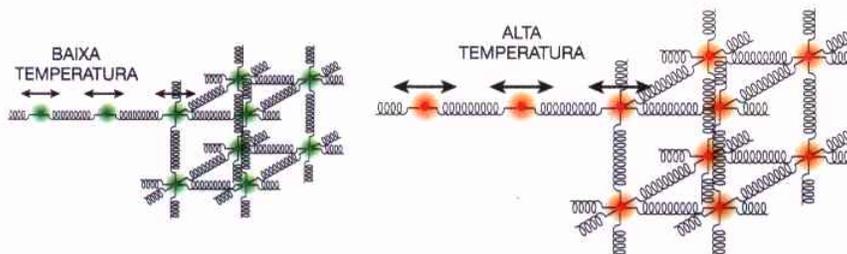


Fig. 10-7: A elevação de temperatura acarreta um aumento na distância média entre os átomos de um sólido. Por isso, o sólido se dilata.

DILATAÇÃO LINEAR

Tomando-se uma barra a uma certa temperatura e aquecendo-a, haverá um aumento em todas as suas dimensões lineares, isto é, aumentarão o seu comprimento, sua altura, sua largura ou qualquer outra linha que imaginarmos traçada na barra. Em um laboratório, podemos descobrir experimentalmente quais os fatores que vão influenciar na dilatação de qualquer uma dessas linhas.

Consideremos, por exemplo, que seja L_0 o comprimento inicial de uma barra, à temperatura t_0 . Elevando a temperatura da barra para t , o seu comprimento passa a ser L . Então, uma variação de temperatura $\Delta t = t - t_0$ provocou uma dilatação $\Delta L = L - L_0$ no comprimento da barra (fig. 10-8). 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:

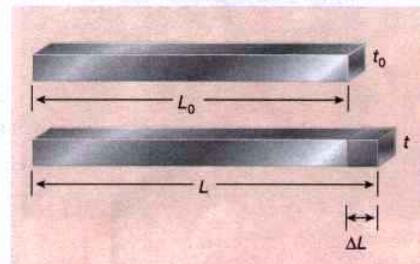


Fig. 10-8: Representação da dilatação linear de uma barra.

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

Uma das propriedades das proporções nos permite escrever que:

$$\Delta L \propto L_0 \Delta t \quad \text{donde} \quad \boxed{\Delta L = \alpha L_0 \Delta t}$$

A constante de proporcionalidade α 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 :

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

Coeficiente de dilatação linear	
Substância	α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Alumínio	23×10^{-6}
Cobre	17×10^{-6}
Invar	$0,7 \times 10^{-6}$
Vidro (comum)	$9,0 \times 10^{-6}$
Zinco	25×10^{-6}
Vidro (pirex)	$3,2 \times 10^{-6}$
Tungstênio	4×10^{-6}
Chumbo	29×10^{-6}
Silica	$0,4 \times 10^{-6}$
Aço	11×10^{-6}
Diamante	$0,9 \times 10^{-6}$

Tabela 10-3.

Realizando-se experiências com barras feitas de diferentes materiais, verifica-se que o valor de α é diferente para cada um desses materiais. Isto pode ser entendido se lembrarmos que as forças que ligam os átomos e as moléculas variam de uma substância para outra, fazendo com que elas se dilatam diferentemente. A tabela 10-3 nos fornece os coeficientes de dilatação linear de algumas substâncias.

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 unidades). Então, α pode ser expresso em

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

Observe que, na tabela 10-3, os coeficientes estão expressos em $^{\circ}\text{C}^{-1}$. Assim, para o cobre, por exemplo, temos $\alpha = 17 \times 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$. Isto significa que uma barra de cobre, de 1 cm (ou 1 m, ou 1 km etc.) de comprimento, aumenta de 17×10^{-6} cm (ou m ou km etc.) quando sua temperatura é elevada de 1°C .

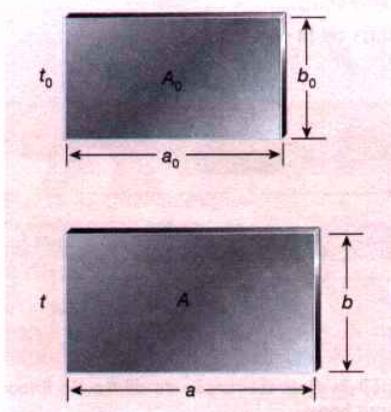


Fig. 10-9: Representação da dilatação superficial de uma placa.

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 de Δt , a área passa a ser A , sofrendo uma dilatação superficial $\Delta A = A - A_0$ (fig. 10-9).

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 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

$$\beta = 2\alpha$$

Então, se desejarmos saber, por exemplo, o valor de β para o aço, consultaremos a tabela 10-3 e obteremos

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

De maneira idêntica, verificamos que a dilatação volumétrica, isto é, a variação do volume de um corpo com a temperatura, segue as mesmas leis. Assim, se um corpo de volume V_0 tem sua temperatura aumentada de Δt , seu volume aumenta de $\Delta V = V - V_0$ e temos

$$\Delta V = \gamma V_0 \Delta t$$

O coeficiente γ é denominado *coeficiente de dilatação volumétrica* e pode-se mostrar que, para um dado material, tem-se $\gamma = 3\alpha$.

COMENTÁRIOS

Um grande número de fatos que ocorrem em nossa vida diária estão relacionados com o fenômeno de dilatação. A seguir, analisaremos alguns desses fatos que você, provavelmente, já deve ter observado.

- 1) Quando aquecemos um anel ou, de um modo geral, uma placa que apresenta um orifício, verifica-se que, com a dilatação da placa, *o orifício também tem suas dimensões aumentadas*, dilatando-se como se a placa fosse inteiriça, isto é, como se o orifício fosse feito do mesmo material da placa (fig. 10-10-a). Este fato é utilizado na adaptação de aros metálicos em rodas de madeira (rodas de carroça, por exemplo), da seguinte maneira: o aro, de diâmetro ligeiramente menor do que o da roda, é aquecido e, assim, é possível encaixar a roda nele. Quando o aro retorna à temperatura ambiente, ele se contrai, adaptando-se firmemente à periferia da roda. O mesmo ocorre com a dilatação volumétrica. A capacidade de um recipiente qualquer aumenta quando sua temperatura se eleva, em virtude da dilatação da parte oca (volume interno) deste recipiente (fig. 10-10-b).
- 2) A temperatura ambiente, em quase todos os lugares da Terra, sofre variações apreciáveis do dia para a noite, de uma estação para outra etc. Assim, os objetos existentes nestes lugares, evidentemente, terão 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 juntas de dilatação, como ilustra a fig. 10-11. Do mesmo modo, para que uma ponte possa se dilatar livremente, sem trincar, os engenheiros a apóiam sobre rolos (fig. 10-12). Se não fossem tomadas estas precauções, as estruturas se danificariam, pois são enormes as tensões que aparecem em peças submetidas a uma variação de temperatura e impedidas de se dilatarem ou de se contraírem (veja a fig. 10-13).

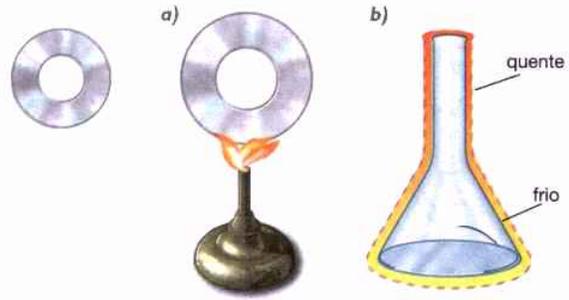
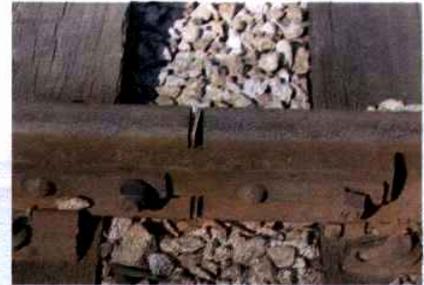


Fig. 10-10: O orifício também se dilata quando a placa é aquecida. Da mesma forma, o volume interno de um recipiente aumenta quando este recipiente se dilata.



Laurent Fochetto

Fig. 10-11: Junta de dilatação entre os trilhos de uma estrada de ferro.

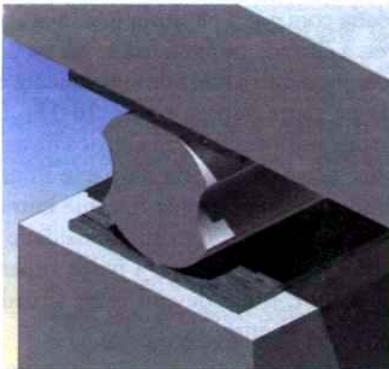


Fig. 10-12: Para que a dilatação de uma ponte se faça livremente, ela é apoiada sobre rolos.

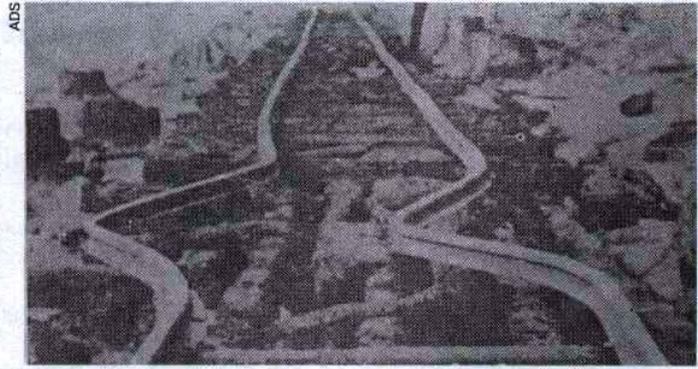


Fig. 10-13: A grande elevação de temperatura, durante um incêndio, provocou a deformação dos trilhos de uma estrada de ferro, apesar da existência de juntas de dilatação.

- 3) Como você sabe, se uma vasilha de vidro comum for levada ao fogo, ela se quebra. Isto ocorre porque a parte em contato direto com o fogo se aquece mais e, conseqüentemente, sofre maior dilatação do que as outras partes. No entanto, uma panela de vidro pirex pode ser levada ao fogo, sem trincar, por ser o pirex um tipo especial de vidro cujo coeficiente de dilatação é muito menor do que o do vidro comum (ver tabela 10-3).
- 4) Um fato importante, relativo à dilatação, é que ela influi na densidade ($\rho = m/V$) das substâncias. De fato, se a temperatura de um corpo cresce, sabemos que, em geral, seu volume aumenta e, como sua massa não varia, sua densidade irá diminuir. A formação dos ventos, por exemplo, é causada por esta variação de densidade. Às vezes, uma certa região da superfície da Terra se aquece mais do que outra região vizinha. Então, as camadas de ar, próximas à região aquecida, dilatam-se e sobem, porque sua densidade diminui, causando uma rarefação do ar naquela região. Isto origina ventos, constituídos por camadas de ar das regiões vizinhas, que se movimentam em direção ao local onde houve a rarefação (fig. 10-14).

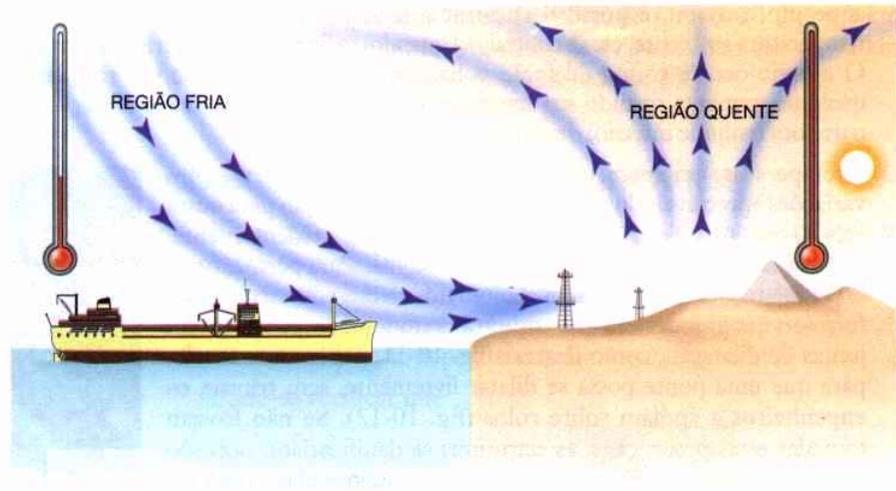


Fig. 10-14: Os ventos são causados pela variação da densidade do ar em camadas diferentemente aquecidas. Ilustração esquemática.

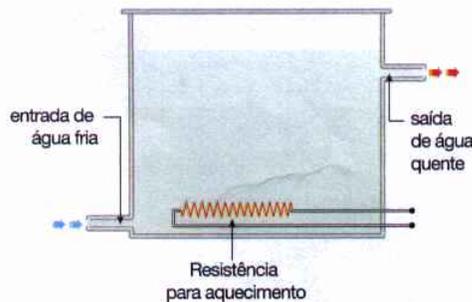


Fig. 10-15: Em um aquecedor elétrico, a entrada de água fria (mais densa) é feita na parte inferior e a saída de água quente (menos densa), na parte superior.

É também em virtude da variação da densidade com a temperatura que, nos aquecedores, a entrada de água fria se faz na parte inferior, enquanto a saída de água quente está situada na parte superior (fig. 10-15). Isto ocorre porque a resistência elétrica de aquecimento, estando situada na parte inferior do cilindro, aquece a água fria que entra. A água, ao se aquecer, tem sua densidade diminuída e tende a ocupar a parte superior do aquecedor, onde deverá estar situada a saída de água quente.

Observando os fatos que ocorrem ao seu redor, você poderá identificar várias outras situações nas quais a dilatação desempenha um papel importante.



Aquecendo-se a tampa de uma garrafa, apenas ela se dilata (o gargalo da garrafa é pouco aquecido) e, assim, pode ser retirada com facilidade.

Exemplo

Imagine que se envolvesse a Terra, na região do Equador, com um anel de alumínio, como está mostrado na fig. 10-16-a. Se a temperatura do anel fosse elevada de apenas 1,0°C, sem que a temperatura da Terra sofresse modificações, a que altura, acima da superfície da Terra, o anel iria ficar (fig. 10-16-b)?

Como já sabemos, o anel se dilataria como se fosse um disco maciço de alumínio. Então, a altura procurada representa a dilatação do raio do anel, indicada por ΔR na fig. 10-16b. Mas o raio inicial, R_0 , do anel, é o próprio raio da Terra (fig. 10-16-a). Assim, temos

$$\Delta R = \alpha R_0 \Delta t$$

O coeficiente de dilatação do alumínio vale $\alpha = 23 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ (tabela 10-3) e, na tabela no final deste volume, encontramos que o raio da Terra é $R_0 = 6,4 \times 10^6 \text{ m}$. Como $\Delta t = 1,0 \text{C}$, vem

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

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

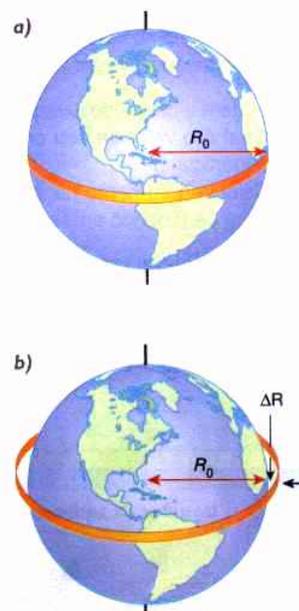


Fig. 10-16: Para o exemplo da secção 10.2.

os de fixação **exercícios de fixação** exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima secção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

7. a) Explique por que um copo de vidro comum provavelmente se quebrará se você o encher parcialmente com água fervendo.
 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 pirex?
8. Para compreender o significado do coeficiente de dilatação linear, copie as afirmações seguintes em seu caderno e complete os espaços vazios que ne-

las aparecem: quando se diz que o coeficiente de dilatação linear no chumbo vale $29 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$, isto significa que uma barra de chumbo:

- a) De 1 km de comprimento dilata-se de $29 \times 10^{-6} \text{ km}$ quando sua temperatura aumenta de XXX.
- b) De 1 polegada de comprimento dilata-se de $29 \times 10^{-6} \text{ polegadas}$ quando sua temperatura aumenta de XXX.

- c) De 1 cm de comprimento dilata-se de XXX cm quando sua temperatura aumenta de 1°C.
9. a) Duas barras, A e B, de mesmo comprimento inicial, sofrem a mesma elevação de temperatura. As dilatações destas barras poderão ser diferentes? Explique.
b) Duas barras, A e B, de mesmo material, sofrem a mesma elevação de temperatura. As dilatações destas barras poderão ser diferentes? Explique.
10. Uma chapa de zinco, de forma retangular, tem 60 cm de comprimento e 40 cm de largura à temperatura de 20°C. Supondo que a chapa foi aquecida até 120°C e consultando a tabela 10-3 calcule:
a) A dilatação no comprimento da chapa.
b) A dilatação na largura da chapa.
11. Considere a chapa do exercício anterior.
a) Qual é o valor de seu coeficiente de dilatação superficial β ?
b) Calcule o aumento na área da chapa usando o valor de β obtido em (a).
12. A capacidade de um balão volumétrico (completamente cheio), usado nos laboratórios de Química, é de exatamente 100 mL à temperatura de 20°C (estes dados vêm indicados no balão). Estando este balão completamente cheio de água em um dia quente (temperatura ambiente de 30°C), o volume de água nele contido será maior, menor ou igual a 100 mL?
13. Suponha que uma estrada de ferro tenha sido construída com trilhos individuais de um certo comprimento L , deixando-se entre eles juntas de dilatação de largura igual a 1 cm.
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 na estrada (como na fig. 10-13), os trilhos se deformam apesar da existência das juntas de dilatação?
14. 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 irá aumentar, diminuir ou não sofrerá alteração?
b) Então, a fração submersa da esfera aumentará, diminuirá ou não sofrerá alteração?

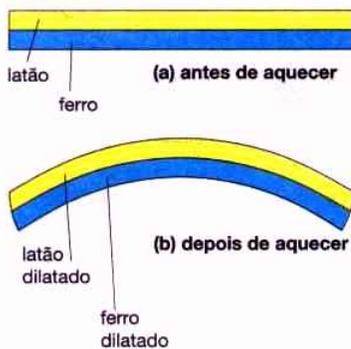


Fig. I: Uma lâmina bimetálica se curva ao ser aquecida.

A lâmina bimetálica

Uma lâmina bimetálica é constituída de duas lâminas de materiais diferentes – por exemplo, ferro e latão – unidas firmemente (figura I). Na temperatura ambiente, as lâminas são planas e possuem as mesmas dimensões. Quando é aquecida, como os dois materiais possuem coeficientes de dilatação diferentes, uma das lâminas se dilata mais que a outra. Para que as duas lâminas se mantenham unidas (com tamanhos diferentes), elas se encurvam, da maneira mostrada na figura I-b. Esta propriedade da lâmina bimetálica é muito usada para provocar aberturas e fechamentos automáticos de circuitos elétricos. A figura II mostra uma destas aplicações em um ferro elétrico automático, no qual a lâmina é utilizada como um termostato (dispositivo que mantém a temperatura aproximadamente estável).

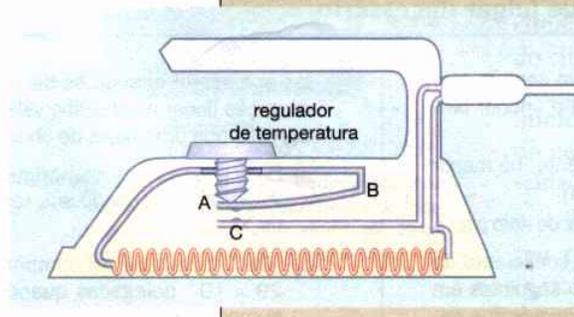


Fig. II: Ilustração esquemática. No ferro elétrico, a lâmina bimetálica AB é usada para manter o ferro em uma certa temperatura (termostato). Ao ser aquecida acima de uma certa temperatura, a lâmina se encurva para cima, interrompendo o circuito elétrico em AC (o ferro é desligado). Logo que o ferro sofre uma diminuição determinada de temperatura, a lâmina retorna a sua forma plana e A faz contato com C, tornando a ligar o ferro. O parafuso permite regular a temperatura desejada para o aparelho.

10.3. Dilatação dos líquidos

Os líquidos se dilatam 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, não é importante o estudo das dilatações linear e superficial de um líquido. O que interessa, em geral, é o conhecimento de sua dilatação volumétrica. Por isso, para os líquidos, são tabelados apenas os coeficientes de dilatação volumétrica (tabela 10-4).

Coeficientes de dilatação volumétrica	
substância	γ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Álcool etílico	$0,75 \times 10^{-3}$
Dissulfeto de carbono	$1,2 \times 10^{-3}$
Glicerina	$0,5 \times 10^{-3}$
Mercúrio	$0,18 \times 10^{-3}$
Petróleo	$0,9 \times 10^{-3}$

Tabela 10-4.

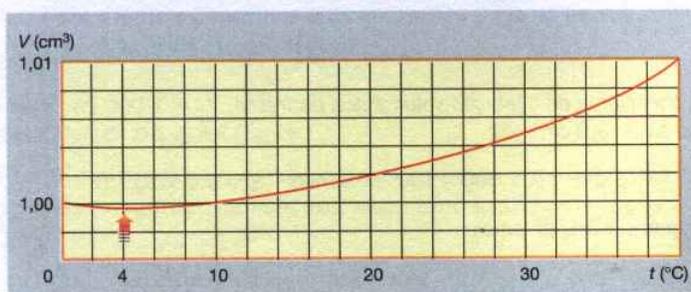
DILATAÇÃO APARENTE

Para se observar a dilatação de um líquido, este deve estar contido em um frasco, que será aquecido juntamente com o líquido. Assim, ambos se dilatarão e, como a capacidade do frasco aumenta, a dilatação que observaremos, para o líquido, será apenas uma dilatação *aparente*. A dilatação *real* do líquido será maior do que a dilatação aparente observada. Esta dilatação real é, evidentemente, igual à soma da dilatação aparente com a dilatação volumétrica do recipiente. Quando usamos um recipiente cujo coeficiente de dilatação é muito pequeno, a dilatação aparente torna-se praticamente igual à sua dilatação real.

DILATAÇÃO IRREGULAR DA ÁGUA

Como vimos, os corpos sólidos e líquidos, em geral, têm seu volume aumentado quando elevamos sua temperatura. Entretanto, algumas substâncias, em determinados intervalos de temperatura, apresentam um comportamento inverso, isto é, *diminuem* de volume quando sua temperatura aumenta. Assim sendo, estas substâncias, nestes intervalos, têm um coeficiente de dilatação *negativo*.

A água, por exemplo, é uma das substâncias que apresenta esta irregularidade na dilatação. *Quando a temperatura da água é aumentada, entre 0°C e 4°C , o seu volume diminui*. Elevando-se sua temperatura para acima de 4°C , ela se dilata normalmente. O gráfico volume \times temperatura para a água tem, então, o aspecto mostrado na fig. 10-17. Portanto, uma certa massa de água tem um volume mínimo a 4°C , ou seja, sua densidade é máxima nesta temperatura.

Fig. 10-17: O volume de uma dada massa de água é mínimo a 4°C .

É por este motivo que, em países onde o inverno é rigoroso, os lagos e rios se congelam na superfície, a água de máxima densidade encontra-se no fundo, isto é, a 4°C (fig. 10-18). Este fato é fundamental para a preservação da fauna e da flora destes lugares. Se a água não apresentasse esta irregularidade na dilatação, os rios e lagos se congelariam totalmente, causando danos irreparáveis às plantas e animais aquáticos.



Fig. 10-18: Quando um lago se congela, forma-se apenas uma camada de gelo em sua superfície. Abaixo desta camada encontra-se água a 4°C.

Exemplo

Um frasco de vidro, cujo volume é exatamente 1 000 cm³ a 0°C, está completamente cheio de mercúrio a esta temperatura. Quando o conjunto é aquecido até 100°C, entornam 15,0 cm³ de mercúrio (fig. 10-19).

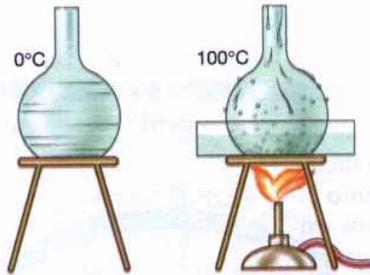


Fig. 10-19: Para o exemplo da secção 10.3.

a) Qual foi a dilatação real do mercúrio?

Como sabemos, esta dilatação é dada por

$$\Delta V_{\text{Hg}} = \gamma_{\text{Hg}} V_0 \Delta t$$

Neste caso, o volume inicial do mercúrio é $V_0 = 1\,000\text{ cm}^3$ e o aumento de temperatura vale $\Delta t = 100^\circ\text{C}$. O valor do coeficiente de dilatação volumétrica do mercúrio é fornecido pela tabela 10-4: $\gamma_{\text{Hg}} = 0,18 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Então

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

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

$$\Delta V_r = 18,0 - 15,0 \quad \text{donde} \quad \Delta V_r = 3,0\text{ cm}^3$$

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

Sabemos que

$$\Delta V_r = \gamma_r V_0 \Delta t$$

onde γ_r é o coeficiente de dilatação volumétrica do frasco, $V_0 = 1\,000\text{ cm}^3$ e $\Delta t = 100^\circ\text{C}$. Assim, como $\Delta V_r = 3,0\text{ cm}^3$, virá

$$3,0 = \gamma_r \times 1\,000 \times 100 \quad \text{donde} \quad \gamma_r = 3,0 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

Lembrando que $\gamma_r = 3\alpha_r$, obtemos

$$\alpha_r = \frac{\gamma_r}{3} = \frac{3,0 \times 10^{-5}}{3} \quad \text{donde} \quad \alpha_r = 1,0 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

de fixação **exErcÍcios de fixação** exErcÍcios de fixaçã

Antes de passar ao estudo da próxima secção, **responda** às questões seguintes, **consultando o texto** sempre que julgar **necessário**.

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 de temperatura, uma certa quantidade de gasolina havia entornado.
 - a) O tanque de gasolina se dilatou?
 - b) A quantidade que entornou representa a dilatação real que a gasolina sofreu?
 - c) Então, a dilatação real da gasolina foi maior, menor ou igual à dilatação do tanque?
 - 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?
16. Um líquido, cujo coeficiente de dilatação volumétrica é $\gamma_L = 6,9 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, foi colocado em um recipiente de alumínio, atingindo uma altura h dentro deste recipiente.
 - a) Consultando a tabela 10-3, determine o coeficiente de dilatação volumétrica, γ_{Al} , do alumínio.
 - b) Se o conjunto recipiente + líquido for aquecido, o nível do líquido no recipiente subirá, descerá ou não sofrerá alteração?
 - c) Então, qual foi a dilatação aparente do líquido?
17. Um recipiente, cujo volume inicial é $V_0 = 100 \text{ cm}^3$, está completamente cheio de glicerina à temperatura de $20 \text{ } ^\circ\text{C}$. Aquecendo-se o conjunto até $50 \text{ } ^\circ\text{C}$, verifica-se que entorna $1,5 \text{ cm}^3$ de glicerina.
 - a) Qual foi a dilatação aparente da glicerina?
 - b) Consulte a tabela 10-4 e calcule a dilatação real sofrida pela glicerina.
 - c) Então, qual é o valor do coeficiente de dilatação do recipiente?
18. Uma esfera de madeira está flutuando na superfície da água, contida em um recipiente, à temperatura de $2 \text{ } ^\circ\text{C}$. Se apenas a água for aquecida até sua temperatura atingir $4 \text{ } ^\circ\text{C}$:
 - a) O volume da água aumentará, diminuirá ou não sofrerá alteração?
 - b) A densidade da água aumentará, diminuirá ou não sofrerá alteração?
 - c) Então, a parte submersa da esfera aumentará, diminuirá ou não sofrerá alteração?
19. Responda às questões do exercício anterior supondo, agora, que a temperatura da água fosse aumentada, a partir de $4 \text{ } ^\circ\text{C}$, para $20 \text{ } ^\circ\text{C}$.

um tópico especial para você aprender um pouco mais

10.4. Termômetros e escalas - Breve histórico

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 uma grande variedade de objetos, nas mais diversas circunstâncias.

TERMOSCÓPIO DE GALILEU

As técnicas usadas no estabelecimento de escalas termométricas e na construção de termômetros vêm sofrendo uma grande evolução a partir do século XVI.

O primeiro termômetro de que se tem notícia foi construído por Galileu, em 1592. O aparelho de Galileu consistia em um bulbo de vidro, termi-

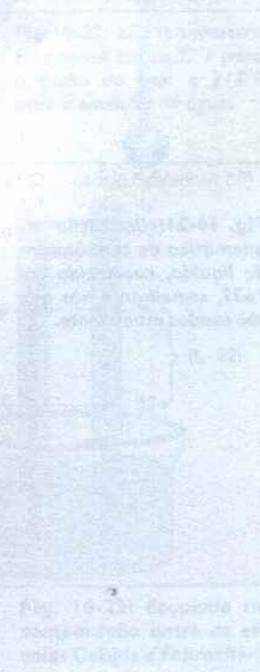


Fig. 10-10 Esquema do termoscópio inventado por Galileu Galilei e refinado por...

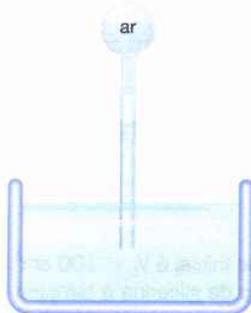


Fig. 10-20: Esquema do termômetro construído por Galileu.

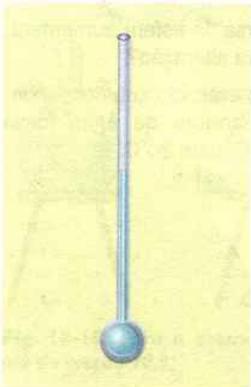


Fig. 10-21: Ilustração esquemática de termômetro de líquido, construído em 1637, semelhante aos que são usados atualmente.

nando por um tubo fino, cuja extremidade era introduzida em um recipiente contendo água colorida (fig. 10-20). Antes de emborcar o tubo na água, Galileu aquecia um pouco o bulbo de vidro para expulsar parte do ar aí 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 uma certa altura. Evidentemente, o aparelho assim construído 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.

Conta-se que os médicos da época passaram a usar o termômetro de Galileu para verificar se seus pacientes estavam com febre. Para isto, 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 e, por isso, devemos denominá-lo mais apropriadamente de “termoscópio de Galileu”.

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 (fig. 10-21). Neste termômetro, as variações de temperatura eram indicadas, de maneira semelhante aos termômetros atuais, pela dilatação ou contração da água contida no reservatório (observe, entretanto, na fig. 10-21, que a extremidade superior do tubo termométrico não era fechada, como nos atuais).

Alguns anos mais tarde, Fernando II, Duque de 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 água. Para evitar a evaporação do álcool, ele teve a idéia de fechar hermeticamente a parte superior do tubo, construindo, assim, um termômetro realmente igual aos que usamos na atualidade.

O 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 nesta Academia foram os primeiros a usar o mercúrio como líquido termométrico. Estes termômetros florentinos foram amplamente usados por mais de cem anos e, ainda hoje, é possível encontrar alguns exemplares destes aparelhos.

ESCALAS TERMOMÉTRICAS - A PROPOSTA DE CELSIUS

Para tornar possível a medida da temperatura, usando os primeiros termômetros construídos, os especialistas procuraram estabelecer *escalas termométricas* para graduar estes aparelhos. Como esta graduação podia ser feita de maneira totalmente arbitrária, foram surgindo várias escalas, bastante diferentes umas das outras.

Cada país adotava sua própria escala e, muitas vezes, cientistas diferentes de um mesmo país trabalhavam com escalas diferentes. No início do século XVIII, esta proliferação de escalas termométricas era tal que existiam mais de 35 escalas em uso.

Entre elas destacavam-se e tiveram maior aceitação as escalas de Réaumur, de Fahrenheit e de Celsius. O cientista francês Réaumur, em sua escala, marcava zero para o ponto de fusão do gelo e 80° para o ponto de ebulição da água. Este intervalo foi dividido em 80 partes iguais e, portanto, a escala de Réaumur não era centígrada. A primeira escala centígrada foi proposta pelo sueco Anders Celsius, em 1742, indicando zero no ponto de fusão do gelo e 100° no ponto de ebulição da água, como já vimos neste capítulo. Talvez por esta característica ela se tornou conhecida e usada em todo o mundo, sendo durante cerca de 200 anos denominada “escala centígrada”. A partir de 1948, em homenagem a seu idealizador, ela passou a ser oficialmente denominada “escala Celsius”. Esta escala, como sabemos, foi escolhida em congressos internacionais como escala padrão para ser adotada em qualquer atividade, em todos os países do mundo.

A ESCALA FAHRENHEIT

Apesar das convenções internacionais, alguns países, principalmente os de língua inglesa, ainda conservam o uso da escala Fahrenheit, que é amplamente empregada pela população e até mesmo em trabalhos científicos. Como você freqüentemente encontra em filmes, livros, revistas etc. referências a temperaturas expressas em graus Fahrenheit, daremos a seguir alguns detalhes sobre esta escala e mostraremos como se pode determinar a temperatura Celsius equivalente a uma dada temperatura Fahrenheit e vice-versa.

Na escala Fahrenheit, o ponto de fusão do gelo é marcado com 32 graus Fahrenheit (32°F) e o ponto de ebulição da água com 212 °F (fig. 10-22). Assim, o intervalo entre estas temperaturas corresponde a 180 divisões. Como na escala Celsius este mesmo intervalo de temperatura corresponde a 100 divisões, concluímos que o intervalo de 1°F, isto é, $\Delta(1^\circ\text{F})$, corresponde aproximadamente à metade do intervalo de 1°C [realmente tem-se $\Delta(1^\circ\text{F}) = (5/9) \Delta(1^\circ\text{C})$].

Suponha dois termômetros, um deles graduado na escala Celsius e o outro na escala Fahrenheit, ambos sendo usados para medir uma mesma temperatura (de um líquido, por exemplo, como mostra a fig. 10-23). Seja t_C a leitura do termômetro Celsius e t_F a do termômetro Fahrenheit. Evidentemente, t_C e t_F são leituras diferentes de uma mesma temperatura.

Observando a fig. 10-23, vemos 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

$$\frac{t_C}{100} = \frac{t_F - 32}{180} \quad \text{ou} \quad \frac{t_C}{5} = \frac{t_F - 32}{9}$$

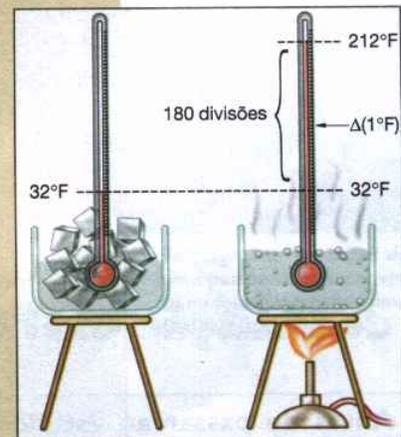


Fig. 10-22: Um termômetro Fahrenheit indica 32°F para a fusão do gelo e 212°F para a ebulição da água.

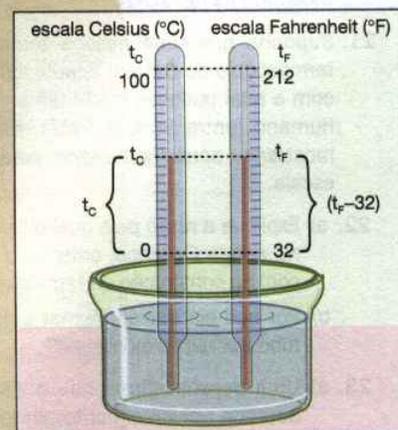


Fig. 10-23: Esquema de comparação entre as escalas Celsius e Fahrenheit.

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

$$\frac{t_c}{5} = \frac{104 - 32}{9} \quad \text{donde} \quad t_c = 40^{\circ}\text{C}$$

Embora a escala Fahrenheit seja a mais popular nos países de língua inglesa, tem sido feito um grande esforço para sua substituição pela escala Celsius, não só nos trabalhos científicos, mas também entre a população de um modo geral.

Atualmente, as técnicas de medida de temperatura estão altamente desenvolvidas. Os termômetros de Hg, como você sabe, são ainda amplamente utilizados, mas vários outros tipos de termômetros e novos processos de medida de temperatura foram criados: alguns que permitem obter medidas de alta precisão, outros capazes de medir temperaturas extremamente baixas (próximas do zero absoluto), outros ainda destinados a fornecer valores de temperaturas muito altas (como a temperatura de uma reação nuclear, que pode atingir cerca de 10^8°C) e mesmo dispositivos que fornecem a temperatura de objetos muito afastados de nós (como a temperatura da superfície do Sol, que vale cerca de $6\,000^{\circ}\text{C}$). Como você já deve ter observado no início deste capítulo, a fig. 10-1 apresenta alguns aparelhos através dos quais são utilizadas técnicas diversas para medida de temperaturas.

Ícios de fixação exercícios de fixação exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

20. Por que a expressão "termômetro" não é adequada para designar o dispositivo construído por Galileu, mostrado na fig. 10-20?
21. Suponha que uma pessoa tenha graduado um termoscópio de Galileu, adaptando-lhe uma escala com a qual pudesse medir temperaturas do corpo humano (entre 36°C e 42°C). Faça um desenho mostrando aproximadamente este aparelho e sua escala.
22. a) Explique a razão pela qual o Duque Fernando II, na antiga Florença, substituiu a água pelo álcool na construção de termômetros.
b) Por que ele decidiu fechar a parte superior do tubo desses termômetros?
23. 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 esta afirmativa é correta? Comente.
- b) Qual é então, possivelmente, a razão de ter sido essa escala preferida entre as inúmeras outras escalas propostas no século XVIII?
24. Conta-se que Fahrenheit, ao estabelecer os pontos fixos de sua escala, definiu 100°F como sendo igual à temperatura do corpo humano. Se isso fosse realmente verdadeiro, o que se poderia dizer sobre o estado de saúde da pessoa que Fahrenheit tomou para referência?
25. Sabe-se que a temperatura na qual o papel entra em combustão é de aproximadamente 233°C . O título de um famoso livro de ficção científica (e de um filme nele baseado) é exatamente o valor desta temperatura na escala Fahrenheit. Esta obra faz uma crítica da queima de livros que costuma ocorrer em sociedades dominadas por ditaduras, quando difundem idéias contrárias aos interesses do poder instituído. Qual é o título desse livro?
26. Existe uma temperatura na qual um termômetro Celsius e um termômetro Fahrenheit marcam o mesmo valor. Qual é essa temperatura?

Algumas informações adicionais

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 que esta técnica atinge na atualidade. São bastante conhecidos os papéis de relevo da termometria de precisão, dos controles de temperaturas elevadas e muito baixas nos laboratórios de pesquisas de todo o mundo. São também óbvias as necessidades dessas medidas em quase todas as atividades industriais, destacando-se entre elas as indústrias agrícola, aeronáutica, eletrônica, automobilística, de aquecimento, refrigeração e ar-condicionado, metalúrgica 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.

Como sabemos, qualquer propriedade de uma substância que varie com a temperatura poderia 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 na dilatação 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 a precisão, sensibilidade, durabilidade, forma, limites de temperatura que permitem medir, custo etc., desejados em cada caso.

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

Termômetros de gases

São baseados na variação de pressão e do volume dos gases e empregados, sobretudo, por oferecerem a possibilidade de medidas de alta precisão em amplo intervalo de temperaturas (desde cerca de $-263\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$). São práticos, principalmente para medidas de temperaturas muito baixas. Na fig. 10-1 apresentamos esquematicamente um termômetro de gás.

Termômetros de resistência elétrica

Permitem também alta precisão (até $0,0001\text{ }^{\circ}\text{C}$ em alguns termômetros de resistência usando a platina). Oferecem ótima reprodutibilidade nas leituras. Alguns termômetros desse tipo, usando semicondutores (germânio, por exemplo), são os mais recomendados para medidas de temperaturas muito baixas (entre $0,2\text{ K}$ e 50 K).

Termômetros de termopar

São, talvez, os termômetros mais importantes da atualidade, com largo uso na indústria para registros contínuos e controle de temperatura. Baseiam-se na medida da voltagem existente nas 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.



Termograma das mãos de uma pessoa. A cada cor vista na foto corresponde uma temperatura diferente.

D. Ermakoff/Eurelios/SPL/Stock Photos

Termômetros de radiação

Baseiam-se na medida da energia irradiada por um corpo, 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 cuja temperatura se procura. Entre os diversos modelos destacamos aquele em que uma lente (objetiva) produz a imagem do objeto sobre o filamento de tungstênio de uma lâmpada alimentada por uma bateria. A corrente elétrica no filamento pode ser alterada até que a imagem do objeto e o filamento apareçam ao observador igualmente brilhantes. A temperatura é obtida por uma prévia calibração do termômetro. Nos medidores mais modernos o observador é substituído por uma célula fotoelétrica, a qual aciona um dispositivo eletrônico que, automaticamente, completa a medida. Na fig. 10-1 mostramos um pirômetro ótico, que é um termômetro desse tipo. Para medidas de temperaturas ainda mais elevadas, como a de chamas, estrelas, gases ionizados (plasmas) etc., outras técnicas mais sofisticadas, baseadas na termometria espectroscópica, são usadas.

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, em aquecedores, em chaves automáticas ou disjuntores etc.), por serem de uso simples e oferecerem prontidão nas leituras. Observe, na fig. 10-1, o esquema de um termômetro bimetálico.

Termômetros acústicos

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

Termômetros magnéticos

Estes termômetros têm por base a medida de propriedades magnéticas de determinados materiais, que variam com a temperatura. Estes termômetros 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 termômetros magnéticos.

Indicadores de temperatura

Alguns materiais apresentam, em situações especiais, uma 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. São, assim, certas tintas ou lápis que se fundem ou mudam de cor, bolas ou cones que se fundem, cada um em determinada temperatura. Apresentam pouca precisão e têm a desvantagem de só poderem ser usados uma única vez, mas são bastante empregados nas indústrias de cerâmicas. Entre os indicadores, os cristais líquidos, substâncias descobertas recentemente, cujas cores se alteram com a temperatura, apresentam a vantagem de serem reversíveis. Como o nome indica, são

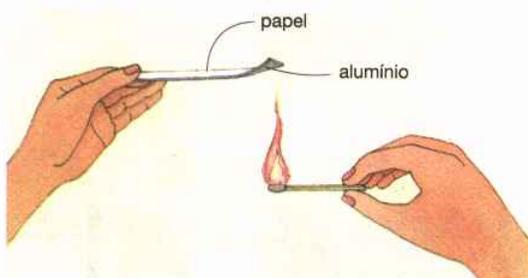
algumas experiências simples

Para você fazer

Primeira experiência

É comum encontrar como invólucro dos cigarros, no interior do maço, uma folha que apresenta duas faces: uma de papel comum e a outra de alumínio, coladas entre si.

Corte uma lâmina desta folha de dupla face e aproxime dela uma chama, como a de um fósforo aceso (veja a figura desta experiência). Mantenha a chama a uma certa distância para evitar que o papel se queime. Observe o que acontece com a lâmina. Em seguida, afaste a chama e verifique se a lâmina retorna à sua situação inicial ao esfriar.



Primeira experiência.

- Procure explicar suas observações, lembrando-se de seus conhecimentos sobre dilatação (veja o problema 7 deste capítulo).
- De acordo com o que você observou, qual dos dois materiais deve ter maior coeficiente de dilatação: o alumínio ou o papel?
- Aqueça, agora, uma fina lâmina feita apenas de alumínio (papel de alumínio). Por que, neste caso, não ocorre o efeito observado com a lâmina de dupla face?

Segunda experiência

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

- 1ª) Tome um frasco de vidro (um vidro de remédio com cerca de 50 cm³ de volume, por exemplo). Encha-o completamente com água previamente colorida (com um pouco de tinta ou mercúrio-cromo) para facilitar suas observações.
- 2ª) Procure uma rolha que se adapte, ficando bem ajustada, à boca do frasco de vidro. Faça um furo na rolha e passe, através dele, um tubo fino de plástico ou vidro (o tubo vazio do reservatório de tinta de uma caneta esferográfica presta-se muito bem). Usando um pouco de cola, procure vedar qualquer orifício que por acaso exista na superfície da rolha.

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

- 3ª) Coloque este 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.



Segunda experiência.

Depois de um certo tempo, transfira o dispositivo para um banho de água bem fria (mistura de água e gelo). Veja, então, o que se passa com o nível da água no tubo. Observe que este dispositivo poderia funcionar como um termômetro, bastando, para isso, que você o calibre de acordo com as convenções descritas no início deste capítulo.

Terceira experiência

Encha com água uma jarra ou uma lata com cerca de 30 cm de profundidade. Procure obter um termômetro cuja escala lhe permita ler temperaturas compreendidas entre 0°C e cerca de 30°C. Com este termômetro, meça as temperaturas da água próximo à superfície e próximo ao fundo do recipiente. Você observará que as temperaturas são praticamente iguais.

Coloque, então, vários pedaços de gelo na água e deixe o recipiente em repouso (sem agitar a água) durante um certo tempo. Em seguida, torne a medir a temperatura da água na superfície e no fundo.

- A temperatura da água é ainda a mesma no fundo e na superfície?
- Os valores que você encontrou estão próximos daqueles que você esperava? Estão de acordo com aquilo que você estudou sobre a dilatação da água neste capítulo? Explique.

Quarta experiência

No Tópico Especial deste capítulo descrevemos o termoscópio de Galileu. Você poderá construir um termômetro semelhante, usando a aparelhagem que foi utilizada na segunda experiência deste capítulo.

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). Embor-

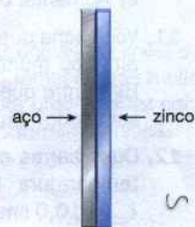
que o tubo em um recipiente contendo água colorida, da maneira mostrada na fig. 10-20. Controlando o aquecimento inicial do frasco, você poderá fazer com que, quando ele retornar à temperatura ambiente, a água suba até próximo à metade do tubo. Assim, estará pronto o seu termoscópio (igual ao de Galileu). Você poderá utilizá-lo para comparar as temperaturas de alguns objetos como, por exemplo, as temperaturas das mãos de diversas pessoas.

Problemas e testes problemas e testes problemas e testes

- Desejando-se medir a temperatura de um pequeno inseto, colocou-se um grande número deles em um recipiente. Introduzindo-se entre os insetos um termômetro, verificou-se que, depois de um certo tempo, o termômetro indicava 30°C .
 - Para determinar a temperatura de cada inseto seria necessário conhecer o número deles no recipiente?
 - Então, qual era a temperatura de um dos insetos?
- Quando o bulbo de um termômetro é aquecido por uma chama, o nível da coluna de Hg inicialmente desce para, logo em seguida, subir acima do nível inicial. Explique por que isto acontece.
- As rolhas de vidro, de frascos também de vidro, costumam ajustar-se ao gargalo, impedindo que o frasco seja aberto. Consegue-se retirar a rolha aquecendo-se apenas o gargalo do recipiente. Explique.
- Uma chapa metálica, que possui um orifício circular, é aquecida de 50°C para 100°C . Como consequência deste aquecimento podemos concluir que o diâmetro do orifício:
 - Dobra.
 - Reduz-se à metade.
 - Não varia.
 - Aumenta um pouco.
 - Diminui um pouco.
- O diâmetro externo de uma arruela de metal é de $2,0\text{ cm}$ e seu diâmetro interno mede $1,0\text{ cm}$. Aquecendo-se a arruela, verifica-se que seu diâmetro externo aumenta de Δx . Então, podemos concluir que seu diâmetro interno:
 - Diminui de Δx .
 - Diminui de $\Delta x/2$.
 - Aumenta de $\Delta x/2$.
 - Aumenta de Δx .
 - Não varia.
- Um pino de aço é colocado, com pequena folga, em um orifício existente numa chapa de cobre. Tendo em vista a tabela 10-3, analise as afirmativas seguintes e indique qual delas está *errada*:
 - Aquecendo-se apenas o pino, a folga diminuirá.

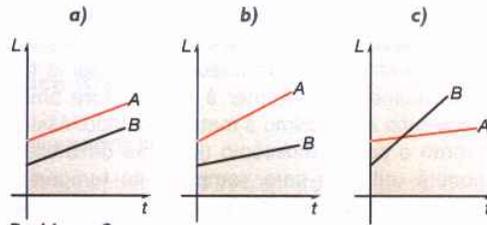
- Aquecendo-se apenas a chapa, a folga aumentará.
- Ambos sendo igualmente aquecidos, a folga aumentará.
- Ambos sendo igualmente aquecidos, a folga não irá se alterar.
- Ambos sendo igualmente resfriados, a folga irá diminuir.

- Uma lâmina bimetálica é constituída por duas folhas de metais diferentes (aço e zinco, por exemplo), unidas firmemente, como mostra a figura deste problema. Suponha que esta lâmina seja aquecida. Consultando a tabela 10-3, procure descrever o que acontecerá com a lâmina em virtude da dilatação dos dois metais. Faça um desenho mostrando o aspecto da lâmina após o aquecimento (este dispositivo costuma ser usado para fechar o circuito elétrico de um alarme contra incêndio).



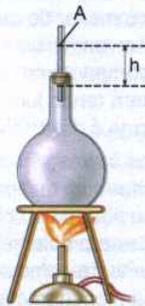
Problema 7.

- Um negociante de tecidos possui um metro de metal, que foi graduado a 20°C . Suponha que o negociante esteja usando este metro em um dia de verão, no qual a temperatura esteja próxima de 40°C . Neste dia:
 - O comprimento do metro do negociante é maior ou menor do que 1 m ?
 - Ao vender uma peça de tecido, medindo o seu comprimento com este metro, o negociante estará tendo lucro ou prejuízo? (A dilatação do tecido é desprezível.)
- Duas barras, A e B, de um mesmo metal (isto é, possuem o mesmo coeficiente de dilatação) são aquecidas a partir de 0°C . Entre os gráficos da figura deste problema, indique aquele que mostra corretamente como os comprimentos das duas barras variam enquanto a temperatura é aumentada.



Problema 9.

10. Suponha que uma pessoa possua um termômetro comum (como o da fig. 10-2) pouco sensível, isto é, não é possível perceber, com este termômetro, variações muito pequenas de temperatura. A pessoa resolveu, então, construir um termômetro mais sensível. As alternativas seguintes descrevem providências que ela pretende tomar para alcançar seu objetivo. Qual dessas providências *não* irá colaborar para o aumento da sensibilidade do termômetro?
- Usar um líquido de maior coeficiente de dilatação.
 - Aumentar o volume do bulbo do termômetro.
 - Diminuir o diâmetro do tubo capilar de vidro.
 - Usar um vidro de menor coeficiente de dilatação.
 - Aumentar o comprimento do tubo de vidro.
11. Você acha que podemos medir temperaturas muito altas ou muito baixas usando um termômetro de Hg? Entre que limites de temperaturas ele poderia ser usado? Explique.
12. Duas barras encontram-se inicialmente à mesma temperatura t_0 . Uma delas tem comprimento $\ell_{01} = 10,0$ cm e coeficiente de dilatação linear α_1 e a outra tem comprimento $\ell_{02} = 12,0$ cm e seu coeficiente de dilatação linear é α_2 . Deseja-se que, ao aquecer as duas barras até uma temperatura t , a diferença entre seus comprimentos permaneça sempre igual a 2,0 cm, qualquer que seja o valor de t . Qual deve ser o valor da relação entre os coeficientes α_1 e α_2 para que isso aconteça?
13. Um corpo, cujo coeficiente de dilatação volumétrica é γ , possui, a 0°C , um volume V_0 e uma densidade ρ_0 . Aquecendo este corpo até uma temperatura $t^\circ\text{C}$, mostre que nesta temperatura:
- Seu volume será dado por $V = V_0(1 + \gamma t)$.
 - Sua densidade será dada por $\rho = \rho_0/(1 + \gamma t)$.

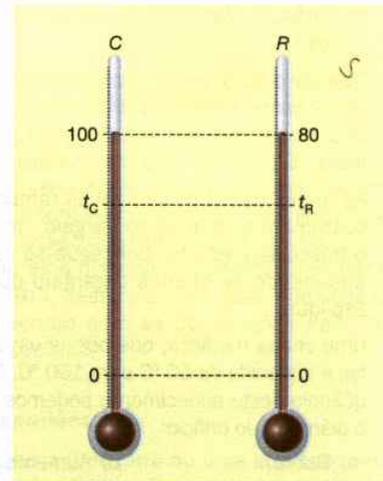


Problema 14.

14. Um balão de vidro está completamente cheio de um líquido, a uma certa temperatura inicial. Um tubo fino, cuja área da secção reta é A , é adaptado ao balão, como mostra a figura deste problema. Quando a temperatura do balão é aumentada de Δt , o líquido sobe no tubo até uma altura h . Supondo que a área A do tubo tenha se mantido constante e sendo V_0 o volume inicial do balão, γ_L o coeficiente de dilatação volumétrica do líquido e α_v o coeficiente de dilatação linear do vidro do balão, mostre que

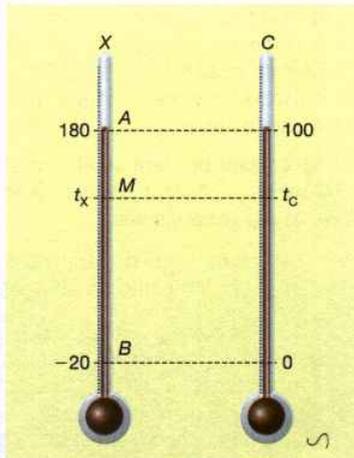
$$h = \frac{V_0}{A}(\gamma_L - 3\alpha_v)\Delta t$$

15. Na figura deste problema mostramos um termômetro R , calibrado na escala Réaumur, à qual fizemos referência na secção 10.4 e que foi muito usada na França no século XVIII.
- Determine uma expressão que nos permita converter uma temperatura qualquer t_R (na escala Réaumur) em sua correspondente t_C (na escala Celsius).
 - Qual é a temperatura Celsius correspondente a 20°R ?



Problema 15.

16. Como enfatizamos neste capítulo, os valores atribuídos às temperaturas de referência das escalas termométricas são totalmente arbitrários. Suponha, então, que uma pessoa tenha construído uma escala X na qual a temperatura do gelo fundente correspondia ao valor $-20^\circ X$ e a temperatura da água em ebulição ao valor $180^\circ X$ (veja a figura).
- Quantos graus X há no intervalo AB , mostrado na figura?
 - Considerando uma temperatura t_x qualquer, quantos graus X há no intervalo MB ?
 - Qual a temperatura t_x , correspondente a 60°C ?



Problema 16.

17. Dois termômetros de mercúrio, idênticos, um deles graduado na escala Celsius e o outro na escala Fahrenheit, estão sendo usados para medir a temperatura de um mesmo líquido. A altura da coluna de mercúrio que indica esta temperatura no termômetro Celsius é maior, menor ou igual à altura correspondente do termômetro Fahrenheit?
18. 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 se apresenta mais febril?

- b) Em um termômetro, graduado na escala Celsius, a distância entre duas marcas correspondentes ao intervalo de 1°C é igual a $1,0\text{ mm}$. Se este termômetro for graduado na escala Fahrenheit, qual será a distância entre duas marcas, correspondentes ao intervalo de 1°F ?
19. Em uma revista científica encontramos a seguinte afirmativa: "Em Plutão, o planeta mais afastado do Sol, 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.
20. A partir da relação $\Delta L = \alpha L_0 \Delta t$, determine uma expressão que permita calcular o comprimento final, L , da barra.
21. Uma barra de aço e um anel de alumínio estão ambos a 20°C . A barra possui um diâmetro de $3,000\text{ cm}$ e o diâmetro interno do anel é de $2,994\text{ cm}$. Sendo ambos igualmente aquecidos, a que temperatura mínima a barra poderá ser introduzida no anel?
22. Peças metálicas costumam ser unidas por meio de rebites que são adaptados em temperaturas muito elevadas. Explique por que este processo faz com que as peças se mantenham fortemente unidas.

questões de vestibular

As questões de vestibular se encontram no final do livro.

problemas suplementares

1. Suponha que uma pessoa resolva construir um termômetro Celsius usando a água como líquido termométrico.
 - a) Faça um desenho, mostrando de maneira aproximada como seria a escala deste termômetro entre 0°C e 8°C .
 - b) Qual a principal inconveniência que você percebe no uso deste termômetro, neste intervalo?
2. Um corpo sofre uma elevação de temperatura $\Delta t_c = 60^{\circ}\text{C}$. Se estivesse sendo usado um termô-

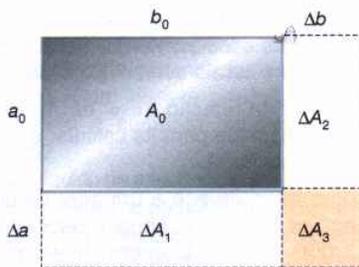
metro graduado na escala Fahrenheit, para medir esta elevação de temperatura, qual seria a variação Δt_f registrada neste termômetro?

3. Ao se aferir um termômetro que apresentava defeitos, verificou-se que ele indicava 2° para a temperatura do gelo fundente e 98° para o ponto de ebulição da água (à pressão de 1 atmosfera). Qual seria a temperatura Celsius correta quando o termômetro defeituoso indicasse -10° ? (Suponha que as alterações nas leituras tenham ocorrido uniformemente ao longo da escala.)

4. A figura deste problema mostra uma placa retangular de lados a_0 e b_0 , à temperatura t_0 . Submetendo esta placa a uma elevação de temperatura Δt , a placa se dilata, sendo Δa e Δb os acréscimos de seus lados.

- a) Calcule em função de α , A_0 e Δt os acréscimos de área ΔA_1 , ΔA_2 e ΔA_3 , experimentados pela placa (veja a figura).

Lembrando que o acréscimo total de área ΔA , da placa, é dado por $\Delta A = \Delta A_1 + \Delta A_2 + \Delta A_3$ e que α^2 é desprezível em relação a α ; demonstre que $\beta = 2\alpha$.



Problema suplementar 4.

5. Uma estrada de ferro está sendo construída com trilhos de aço, cujo coeficiente de dilatação é $\alpha = 10 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$. Os trilhos estão sendo instalados em um dia frio, a uma temperatura de 10°C , com juntas de dilatação de $1,0 \text{ cm}$. Sabendo-se que em dias quentes de verão a temperatura dos trilhos pode chegar a 60°C , qual deve ser o comprimento máximo de cada trilho, para que não haja riscos de danos na linha férrea?
6. Um disco metálico sofreu um aumento de temperatura Δt , observando-se um aumento de $0,20\%$ em seu diâmetro. Qual foi a variação percentual observada:
- Na espessura do disco?
 - Na área de uma das faces do disco?
 - No volume do disco?
 - Na massa do disco?
7. No problema anterior, suponha que a elevação de temperatura do disco tenha sido $\Delta t = 100^\circ\text{C}$. Determine o coeficiente de dilatação do metal de que é feito o disco.
8. Em uma escala hipotética X , ao ponto de fusão do gelo foi atribuído o valor $100^\circ X$ e, ao ponto de ebulição da água, o valor $20^\circ X^*$.
- Obtenha a expressão matemática que relaciona uma temperatura qualquer, t_x , com a temperatura correspondente, t_c , na escala Celsius.
 - Determine a leitura de um termômetro Celsius quando o termômetro X marca $60^\circ X$.
9. O coeficiente de dilatação linear de uma liga de cobre é $\alpha = 18 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$. Qual seria o valor deste coeficiente se passarmos a usar:
- A polegada, no lugar do cm, como unidade de comprimento?
 - A escala Fahrenheit no lugar da escala Celsius?
 - A escala Kelvin no lugar da escala Celsius?
10. Ao se calibrar um termômetro de mercúrio, verificou-se que a altura, h , da coluna líquida, apresentava os seguintes valores:
- $h = 2,0 \text{ cm}$, no ponto de fusão do gelo.
 $h = 22,0 \text{ cm}$, no ponto de ebulição da água (a 1 atmosfera).
- Determine a expressão matemática que fornece a temperatura, t , na escala Celsius, em função da altura, h , da coluna líquida.
 - Qual é o valor de t quando $h = 15,0 \text{ cm}$?
11. Uma barra de metal, A , com $30,0 \text{ cm}$ de comprimento, dilata-se de $0,075 \text{ cm}$ quando sua temperatura é elevada de 0°C para 100°C . Outra barra, B , de um metal diferente e do mesmo comprimento que A , dilata-se de $0,045 \text{ cm}$ quando sofre a mesma elevação de temperatura. Uma terceira barra, também com $30,0 \text{ cm}$ de comprimento, é construída com pedaços de comprimentos ℓ_A e ℓ_B , das barras A e B . Esta barra se dilata de $0,065 \text{ cm}$ para uma elevação de temperatura de 100°C . Determine os valores de ℓ_A e ℓ_B .
12. Um estudante deseja construir um modelo de termômetro, usando como bulbo um frasco de vidro, como haste um reservatório de tinta de caneta esferográfica (vazio) e água como líquido termométrico (veja a 2ª experiência deste capítulo). Deseja-se medir temperaturas entre 20°C e 90°C , com uma escala de 10 cm de comprimento. Sabendo que os coeficientes de dilatação volumétrica da água e do vidro são $\gamma_a = 2,1 \times 10^{-4} \text{C}^{-1}$ e $\gamma_v = 0,3 \times 10^{-4} \text{C}^{-1}$ e que o diâmetro interno da haste é de $2,0 \text{ mm}$, determine o volume do frasco de vidro que ele deverá usar.
13. Um recipiente cilíndrico de vidro, de 50 cm de altura, contém mercúrio até uma altura h . Qual deve ser o valor de h para que o volume do recipiente não ocupado pelo mercúrio seja o mesmo a qualquer temperatura?
14. Um tipo de vodca é basicamente uma mistura de 50% de álcool etílico e 50% de água. Se um comerciante compra vodca a 0°C e a revende a 25°C , qual a porcentagem de lucro que este fato lhe proporciona? (O coeficiente de dilatação volumétrica da água é igual a $2,1 \times 10^{-4} \text{C}^{-1}$ e o do álcool, $7,5 \times 10^{-4} \text{C}^{-1}$.)

* Ao construir sua primeira escala, A. Celsius também atribuiu à temperatura de fusão do gelo um valor numérico mais elevado do que o atribuído à temperatura de ebulição da água, como foi feito nesta escala hipotética X .

capítulo 11

Comportamento dos gases



Kim Gordon/SPL/Stock Photos

A matéria, de qualquer natureza, pode se apresentar no estado gasoso, dependendo de sua temperatura. Na fotografia, vemos nuvens gasosas ejetadas por uma estrela em extinção que aparece em um ponto branco brilhante no centro da massa gasosa (a imagem mostrada corresponde a uma situação ocorrida cerca de 50 000 anos atrás).

No capítulo anterior, ao estudarmos a dilatação dos sólidos e líquidos, não foi feita nenhuma referência sobre a influência da pressão naquele fenômeno. Isto se justifica, pois somente grandes variações na pressão podem influenciar sensivelmente as dimensões de sólidos e líquidos. Assim, de um modo geral, em situações comuns, esta influência da pressão pode ser desprezada.

Entretanto, quando vamos analisar o comportamento de um gás, verificamos que as variações de pressão podem provocar variações apreciáveis em seu volume e em sua temperatura. Estudando experimentalmente o comportamento de uma dada massa de gás, os físicos verificaram que seria possível expressar este comportamento através 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 o gás se encontra fica definida ou, em outras palavras, fica definido o seu estado.

Provocando-se uma variação em uma dessas grandezas, verifica-se que, em geral, as outras também se modificam e estes novos valores caracterizam um outro estado do gás. Dizemos que o gás sofreu uma transformação ao passar de um estado para outro (Fig. 11-1).

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

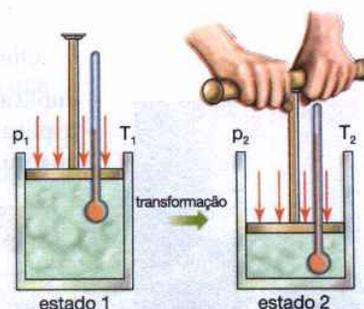


Fig. 11-1: Quando um gás passa de um estado para outro, dizemos que ele sofreu uma transformação.

11.1. Transformação isotérmica

O QUE É UMA TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA

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 escapamento nem entrada de gás no recipiente), concluímos que a pressão e o volume do gás foram as grandezas que variaram na transformação isotérmica.

A fig. 11-2 apresenta uma maneira de realizar uma transformação isotérmica. Na fig. 11-2-a, uma certa massa de ar está confinada em um determinado volume de um tubo fino, por meio de uma pequena coluna de Hg. A pressão que atua neste volume de gás é a soma da pressão exercida por esta coluna de Hg com a pressão atmosférica. Adicionando-se Hg lentamente no tubo, o aumento da altura da coluna acarreta um aumento na pressão que atua sobre o gás e, conseqüentemente, observa-se uma redução em seu volume (fig. 11-2-b e c). Sendo a operação realizada lentamente, a massa de ar permanece sempre em equilíbrio térmico com o meio ambiente, de modo que sua temperatura se mantém praticamente constante, ou seja, a transformação observada é isotérmica.

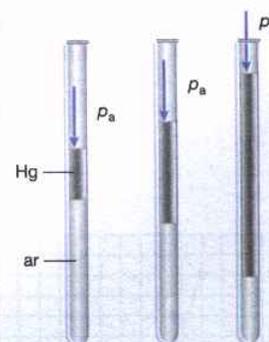


Fig. 11-2: Em uma transformação isotérmica, quando a pressão sobre o gás aumenta, seu volume diminui.

LEI DE BOYLE

Se realizarmos medidas da pressão e do volume do gás (ar) na experiência apresentada na fig. 11-2, poderemos encontrar uma relação simples entre estas grandezas. Por exemplo, suponhamos que, na fig. 11-2-a, o volume do ar confinado fosse $V_1 = 60 \text{ mm}^3$, sendo $p_1 = 80 \text{ cmHg}$ a pressão total sobre ele. Imagine que, na fig. 11-2-b, a pressão tenha sido aumentada para $p_2 = 160 \text{ cmHg}$. Nestas condições, observaríamos que o volume do gás se reduziu para $V_2 = 30 \text{ mm}^3$. Aumentando-se novamente a pressão para $p_3 = 240 \text{ cmHg}$ (fig. 11-2-c), o volume passaria a ser $V_3 = 20 \text{ mm}^3$ etc. Tabelaando estas medidas temos:

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

Observe, pela tabela, 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 etc.



R. Boyle (1627-1691)

Químico e físico inglês, conhecido por suas experiências pioneiras sobre as propriedades dos gases. Sendo adepto da teoria corpuscular da matéria, que deu origem à moderna teoria Química dos elementos, criticava duramente as idéias de Aristóteles e dos alquimistas sobre a composição das substâncias.

Como sabemos, este resultado significa que o volume V é inversamente proporcional à pressão p e, conseqüentemente, o produto $p \cdot V$ é constante. O físico inglês Robert Boyle, em 1660, chegou a estas mesmas conclusões, depois de realizar uma série de experiências semelhantes a esta que descrevemos. Por este 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 deste gás será inversamente proporcional à pressão p exercida sobre ele, ou seja:

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

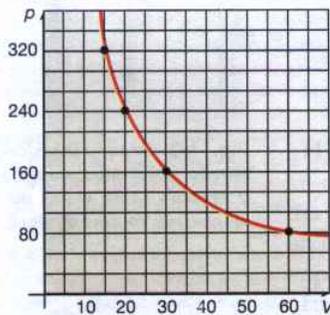


Fig. 11-3: Isoterma de um gás ideal.

O GRÁFICO $p \times V$

Na fig. 11-3 apresentamos o gráfico $p \times V$, construído com os valores de p e V tirados 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, nesta transformação, p e V estão relacionados por uma proporção inversa, podemos concluir, conforme você já deve ter aprendido em seu curso de Matemática, que a curva da fig. 11-3 é uma hipérbole. Em virtude de estar descrevendo uma transformação isotérmica, esta curva é também denominada uma *isoterma* do gás.

INFLUÊNCIA DA PRESSÃO NA DENSIDADE

A densidade de um corpo, como sabemos, é dada por $\rho = m/V$. Para os corpos sólidos e líquidos, uma variação na pressão exercida sobre eles praticamente não altera o volume V , de modo que a densidade destes corpos 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 disto, sua densidade aumenta também 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;
- quadruplicando $p \rightarrow V$ fica dividido por 4 $\rightarrow \rho$ quadruplica etc.

Comparando a primeira e a última coluna desta tabela, concluímos que

$$\rho \propto p$$

isto é, sendo mantida constante a temperatura de uma dada massa gasosa, sua densidade é diretamente proporcional à pressão do gás.

Exemplo

Um recipiente, contendo O_2 , é provido de um pistom (fig. 11-4) que permite variar a pressão e o volume do gás. Verifica-se que, quando o O_2 está submetido a uma pressão $p_1 = 2,0$ atm, ele 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 neste 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. Então, como $pV = \text{constante}$, teremos

$$p_2 V_2 = p_1 V_1 \text{ ou } 10 \times V_2 = 2,0 \times 20 \quad \text{donde} \quad V_2 = 4,0 \text{ L}$$

- 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. Conseqüentemente, a densidade também ficará 5 vezes maior e o novo valor de ρ será

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

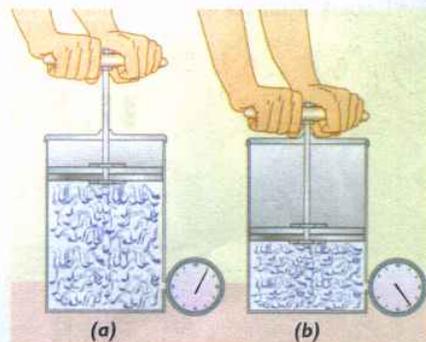


Fig. 11-4: Para o exemplo da secção 11.1.

Pressão nos pulmões de um mergulhador

Consideremos um mergulhador com seu equipamento de respiração, situado a 10 m de profundidade. Como uma coluna de água com cerca de 10 m de altura exerce uma pressão igual a 1 atm, concluímos que o mergulhador está submetido a uma pressão de 2 atm. Nesta situação, ele inspira ar comprimido de seu equipamento. Se ele retornar à superfície, retendo este ar em seus pulmões, estes terão a tendência de ter seu volume duplicado, pois a pressão sobre eles será reduzida à metade. Por isso, na primeira lição que um mergulhador recebe, ele é alertado para não prender sua respiração enquanto sobe. Fazer isso pode ser fatal.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

- Quais são as grandezas que determinam o estado de um gás?
 - O que significa dizer que um gás sofreu uma transformação?
- O que são *gases reais*?
 - O que se entende por um *gás ideal*?
 - Em que condições os gases reais se comportam como um gás ideal?
- Considere a transformação isotérmica mostrada na fig. 11-2. Das grandezas p , V , m e T :
 - Quais delas permanecem constantes?
 - Quais delas estão variando?
- Uma certa massa de um gás ideal sofre uma transformação isotérmica. Lembrando-se da lei de Boyle, copie a tabela deste exercício e complete-a.

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

Exercício 4.

- Com os dados da tabela do exercício anterior, construa o gráfico $p \times V$.
 - Como se denomina a hipérbole assim obtida?
- 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.

11.2. Transformação isobárica

O QUE É UMA TRANSFORMAÇÃO ISOBÁRICA

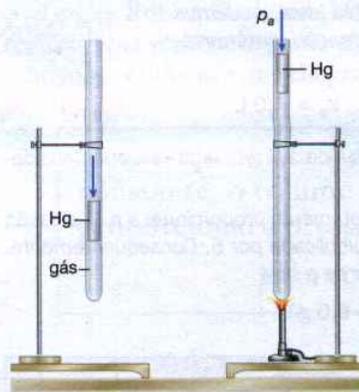


Fig. 11-5: Ilustração esquemática. Nesta expansão, a pressão sobre o gás permanece constante (transformação isobárica).

Consideremos uma certa massa de gás, encerrada em um tubo de vidro, suportando uma pressão igual à pressão atmosférica mais a pressão de uma pequena coluna de Hg, como na fig. 11-5. Aquecendo-se o gás e deixando-o expandir-se livremente (fig. 11-5), a pressão sobre ele não se altera, pois continua sendo sempre exercida pela atmosfera e pela coluna de Hg. Uma transformação como esta, em que o volume do gás varia com a temperatura, enquanto a pressão é mantida constante, é denominada *transformação isobárica* (*isos* = “igual” + *baros* = “pressão”).

TODOS OS GASES SE DILATAM IGUALMENTE

Tomemos dois blocos sólidos, de mesmo volume, mas de materiais diferentes, um de cobre e o outro de ferro, por exemplo. Dando a ambos os blocos o mesmo acréscimo de temperatura, eles sofrerão acréscimos diferentes em seus volumes e, portanto, apresentarão diferentes volumes finais. Isto acontece, como já sabemos, porque os coeficientes de dilatação do cobre e do ferro não são iguais, como ocorre, em geral, com os coeficientes de dilatação das substâncias nos estados sólido e líquido.

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.



SPU/Stock Photos

Imagine que realizássemos uma experiência semelhante com os gases. Tomemos volumes iguais de dois gases diferentes (O_2 e H_2 , por exemplo) a uma mesma temperatura inicial. Dando a ambos o mesmo acréscimo de temperatura, e mantendo constantes as suas pressões, observaremos um fato inesperado, pois *os dois gases apresentam o mesmo volume final*, ou seja, os dois gases têm o mesmo coeficiente de dilatação. O físico francês, Gay-Lussac, no início do século passado, realizando uma série de experiências, verificou que este resultado é verdadeiro para todos os gases. Podemos, então, destacar:

se tomarmos um dado volume de gás a uma certa temperatura inicial e o aquecermos sob pressão constante até uma outra 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, tomando uma dada massa gasosa, realizou medidas do volume e da temperatura deste gás, enquanto ele era aquecido e se expandia à pressão constante. Com os resultados dessas medidas, ele construiu um gráfico do volume V em função da temperatura t , expressa em grau Celsius. Obteve um gráfico retilíneo, semelhante ao da fig. 11-6, concluindo, daí, que *o volume de uma dada massa gasosa, sob pressão constante, varia linearmente com sua temperatura Celsius*.

No gráfico da fig. 11-6, vemos que o gás ocupa um volume V_0 a 0°C . Naturalmente, o volume do gás se reduziria gradualmente à medida que se fosse reduzindo a temperatura abaixo de 0°C . Pensando nesta redução, Gay-Lussac procurou determinar a que temperatura o volume do gás se anularia (se isto fosse possível), prolongando a reta do gráfico, como mostra a fig. 11-6. Desta maneira, verificou que o ponto em que $V=0$ corresponde à temperatura $t = -273^\circ\text{C}$. Esta temperatura, conforme vimos no capítulo anterior, é denominada *zero absoluto* e considerada como *zero* da escala Kelvin.

Levando em conta estes fatos, se construirmos um gráfico do volume, V , do gás, à pressão constante, em função de sua temperatura absoluta, T , é claro que

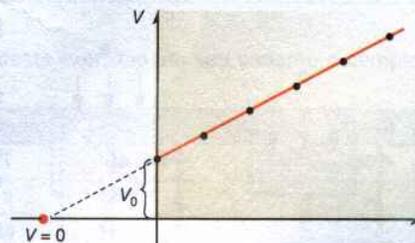


Fig. 11-6: Em uma transformação isobárica, o volume de um gás varia linearmente com sua temperatura Celsius.

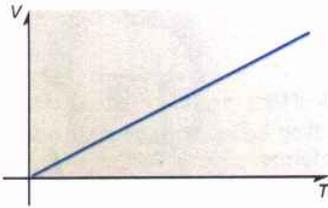


Fig. 11-7: Sob pressão constante, o volume de um gás é diretamente proporcional à sua temperatura absoluta.

obteremos uma reta *passando pela origem* (fig. 11-7). Isto nos mostra que o volume do gás é diretamente proporcional à sua temperatura Kelvin e, portanto, o quociente V/T é constante. 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 uma certa massa de gás, à pressão constante, varia com a temperatura, é claro que a densidade do 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;
- triplicando $T \rightarrow V$ triplica $\rightarrow \rho$ fica dividido por 3;
- quadruplicando $T \rightarrow V$ quadruplica $\rightarrow \rho$ fica dividido por 4 etc.

Comparando a primeira e a última coluna desta tabela, concluímos que

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

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

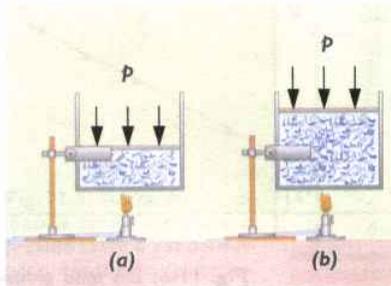


Fig. 11-8: Para o exemplo da secção 11.2.

Exemplo

Um recipiente contém um volume $V_1 = 10$ L de CO_2 gasoso, à temperatura $t_1 = 27^\circ\text{C}$ (fig. 11-8-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 $t_2 = 177^\circ\text{C}$ a temperatura final do CO_2 (fig. 11-8-b):

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

Como se trata de uma transformação isobárica, sabemos que $V/T = \text{constante}$, 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

$$T_1 = t_1 + 273 = 27 + 273 \quad \text{donde} \quad T_1 = 300 \text{ K}$$

$$T_2 = t_2 + 273 = 177 + 273 \quad \text{donde} \quad T_2 = 450 \text{ K}$$

Então, como $V_1 = 10$ L, teremos

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

- b) Supondo que a densidade inicial do CO_2 fosse 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 $T_1 = 300 \text{ K}$ para $T_2 = 450 \text{ K}$, isto é, foi multiplicada por 1,5, concluímos que a densidade será dividida por este fator. Portanto, a densidade do gás, no estado final, será

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

Por que um balão sobe na atmosfera

A dilatação sofrida por uma massa gasosa aquecida costuma ser usada para fazer um balão subir na atmosfera. Como mostra a figura, 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, conseqüentemente, sua densidade reduzida. Assim, o ar externo é mais denso que o ar interno e nestas condições o empuxo sobre o balão é maior que seu peso, fazendo com que ele suba na atmosfera. Regulando a temperatura do ar interno, pode-se fazer o balão subir ou descer, conforme deseje o operador.



Este balão sobe na atmosfera porque o ar tem sua densidade reduzida ao ser aquecido.

exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, **responda** às questões seguintes, **consultando o texto sempre que julgar necessário**.

7. Considere a transformação isobárica mostrada na fig. 11-5. Das grandezas p , V , m e T :
- Quais delas permanecem constantes?
 - Quais delas estão variando?
8. a) Tem-se dois blocos sólidos, um de alumínio e o outro de cobre, ambos com volume de 500 cm^3 à temperatura de 20°C . Aquecendo os dois blocos (à pressão constante) até 200°C , qual deles terá maior volume final (consulte a tabela 10-3)?
- b) Tem-se dois recipientes (providos de êmbolos que podem se deslocar livremente), um deles contendo O_2 gasoso e, o outro, N_2 gasoso, ambos ocupando um volume de 500 cm^3 , a 20°C . Aquecendo os dois gases, à pressão constante, até 200°C , qual deles terá maior volume final?
9. Uma certa massa de um gás ideal sofre uma transformação isobárica. Lembrando-se dos resultados das experiências de Gay-Lussac, copie a

tabela deste exercício em seu caderno e complete-a.

Estado	t ($^\circ\text{C}$)	T (K)	V (cm^3)
I	-73		150
II	127		
III	327		
IV	527		

Exercício 9.

10. a) Se fosse construído um gráfico $V \times t$ com os dados do exercício anterior, qual seria o seu aspecto?
- b) Usando a tabela do exercício anterior, construa o gráfico $V \times T$. Que tipo de gráfico você obteve?
- c) Você esperava obter este tipo de gráfico $V \times T$ para uma transformação isobárica?
11. Suponha que o gás do exercício 9, no estado I, tenha uma densidade de $6,0 \text{ g/L}$. Calcule sua densidade nos estados II, III e IV.

11.3. Lei de Avogadro

A HIPÓTESE DE AVOGADRO



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, ele concluiu que os gases hidrogênio, nitrogênio e oxigênio apresentam-se, na natureza, sob a forma diatômica (H_2 , N_2 e O_2). Apesar destas idéias terem sido propostas em 1811, elas só vieram a ser totalmente aceitas a partir de 1858, após os trabalhos do cientista italiano Cannizzaro, que estabeleceu um sistema químico baseado na hipótese de Avogadro.

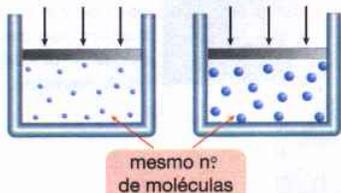


Fig. 11-9: Segundo Avogadro, estas duas amostras gasosas, ocupando volumes iguais, sob a mesma pressão e temperatura, têm o mesmo número de moléculas. Representação esquemática.

Até o início do século passado, os cientistas já haviam adquirido uma razoável quantidade de informações sobre as reações químicas observadas entre os gases. O cientista italiano, Avogadro, baseando-se nestas 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 tomarmos 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 (fig. 11-9).

Posteriormente, um grande número de confirmações experimentais desta afirmativa fizeram com que ela passasse a ser conhecida como a lei de Avogadro:

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

CONFIRMAÇÕES EXPERIMENTAIS

Conforme dissemos, a lei de Avogadro é amplamente confirmada pela experiência. Uma das verificações desta lei pode ser feita quando analisamos, no laboratório, a decomposição de alguns gases. Tomemos, por exemplo, volumes iguais de HCl , H_2O e NH_3 , sob a forma gasosa, à mesma pressão e temperatura. De acordo com a lei de Avogadro, as três amostras dos gases considerados devem ter o mesmo número, N , de moléculas. Decompondo estes gases e recolhendo o hidrogênio liberado em cada amostra, deveríamos, então, obter:

para o HCl	—————	N átomos de H
para o H_2O	—————	$2N$ átomos de H
para o NH_3	—————	$3N$ átomos de H

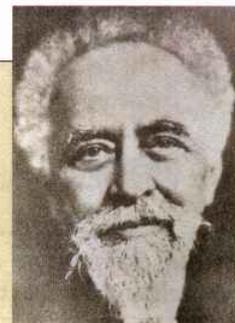
A experiência confirma este resultado pois, enquanto se recolhe uma massa m de hidrogênio na decomposição do HCl , verifica-se que uma massa $2m$ é recolhida na decomposição do H_2O e uma massa $3m$, na decomposição do NH_3 .

O NÚMERO DE AVOGADRO

Uma vez conhecida a lei de Avogadro, poder-se-ia indagar qual é o número de moléculas que existe em uma dada massa do gás. Suponha, por exemplo, que tomássemos 1 mol de vários gases diferentes (2 g de H_2 , 32 g de O_2 , 28 g de N_2 etc.). De seus conhecimentos de Química, você já deve saber que o número de moléculas, em cada uma dessas amostras, é o mesmo. Este número é denominado *número de Avogadro* e é representado por N_0 .

Jean-Baptiste Perrin (1870-1942)

Professor de físico-química na Universidade de Paris, estudou experimentalmente o movimento browniano, confirmando as previsões teóricas feitas por Einstein. Estes trabalhos contribuíram para o estabelecimento definitivo da natureza atômica da matéria. Observando partículas em suspensão em um líquido, ele conseguiu obter dados relativos ao tamanho das moléculas e sobre o número delas em um dado volume, chegando, assim, a obter o número de Avogadro. Foi agraciado, em 1926, com o Prêmio Nobel de Física.



SPL/Stock Photos

O cientista Perrin, no início do século, realizou uma série de experiências, procurando determinar o valor de N_0 , concluindo que este valor estaria compreendido entre $6,5 \times 10^{23}$ e $7,2 \times 10^{23}$ moléculas em cada mol. Por este 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

$$N_0 = 6,02 \times 10^{23} \text{ moléculas/mol}$$

DENSIDADE E MASSA MOLECULAR

Tomemos duas amostras gasosas, A e B , ambas ocupando o mesmo volume, à mesma pressão e temperatura. Pela lei de Avogadro, sabemos que estas 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 , evidentemente 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, $\rho_A = 3\rho_B$. Então, podemos concluir que

$$\rho \propto M$$

isto é, a densidade de um gás é diretamente proporcional à sua massa molecular.

Exemplo

Considere dois recipientes, um deles contendo 6 g de H_2 e, o outro, 96 g de O_2 .

a) Qual é o número de moles em cada amostra?

Sabemos que, em 1 mol de H_2 , temos 2 g deste gás. Logo, em nossa amostra de 6 g, teremos 3 moles de H_2 . Para o O_2 , 1 mol corresponde a uma massa de 32 g e, então, 96 g correspondem a 3 moles de O_2 .

b) Qual o número de moléculas existente em cada amostra?

Como verificamos na questão anterior, o número de moles é o mesmo para os dois gases. Conseqüentemente, as duas amostras terão o mesmo número de moléculas. Sabemos que em 1 mol temos $6,02 \times 10^{23}$ moléculas (número de Avogadro); então, em 3 moles teremos

$$3 \times (6,02 \times 10^{23}) \quad \text{ou} \quad 1,8 \times 10^{24} \text{ moléculas}$$

c) Supondo que as duas amostras estejam à mesma pressão e temperatura, qual é a relação entre os volumes que elas ocupam?

Já que ambas estão à mesma pressão e temperatura e contêm o mesmo número de moléculas, concluímos, pela lei de Avogadro, que os volumes ocupados pelas duas amostras são iguais.

d) Considerando ainda que as duas amostras estejam à mesma pressão e temperatura, e que a densidade do H_2 é de 0,1 g/L, qual é a densidade do O_2 ?

Vimos que, nestas condições, a densidade de um gás é diretamente proporcional à sua massa molecular ($\rho \propto M$). Então, já que a massa molecular do O_2 é 16 vezes maior do que a do H_2 , teremos, para o O_2 , uma densidade

$$16 \times 0,1 \text{ g/L} \quad \text{ou} \quad 1,6 \text{ g/L}$$

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima secção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

12. Três recipientes, A, B e C, de volumes iguais, contêm, respectivamente, HCl, H_2O e NH_3 , todos no estado gasoso, à mesma pressão e temperatura. Suponha que o recipiente A contenha $1,0 \times 10^{24}$ moléculas de HCl.
- Quantas moléculas de vapor de H_2O existem em B? E quantas moléculas de NH_3 existem em C?
 - Qual é o número de átomos de H existentes em cada recipiente?
 - Quantos gramas de hidrogênio seriam recolhidos na decomposição de cada um desses gases? (A massa de um átomo de H é $1,7 \times 10^{-24}$ g.)
13. Um estudante de Química informa a um colega que, para "matar" a sua sede, teve que tomar 20 moles de água.
- Quantos gramas de água o estudante tomou? (Considere a massa atômica do oxigênio igual a 16 u.m.a. e a do hidrogênio igual a 1 u.m.a.)
 - Quantas moléculas de água o estudante tomou? (Considere o número de Avogadro igual a 6×10^{23} .)
 - Baseando-se nas respostas dadas em (a) e (b), calcule, em gramas, a massa de uma molécula de água.
14. Considere os gases contidos nos recipientes A, B e C do exercício 12.
- Coloque estes gases em ordem crescente de suas massas moleculares.
 - Como foi dito, os três gases têm o mesmo volume, mesma pressão e mesma temperatura. Quando os gases estão nestas condições, qual é a relação entre a densidade ρ e a massa molecular M de cada um?
 - Considerando as respostas dadas em (a) e (b), coloque os gases em ordem crescente de suas densidades.

11.4. Equação de estado de um gás ideal

Nas secções anteriores mostramos que, para um gás ideal, temos: como consequência da lei de Boyle

$$(T \text{ constante}) \rightarrow \rho \propto p$$

como consequência da lei de Gay-Lussac

$$(p \text{ constante}) \rightarrow \rho \propto \frac{1}{T}$$

como consequência da lei de Avogadro

$$(p, V \text{ e } T \text{ constantes}) \rightarrow \rho \propto M$$

Estes resultados, quando reunidos, levam-nos a uma equação muito importante para o estudo dos gases, como veremos a seguir.

EQUAÇÃO DE ESTADO DE UM GÁS IDEAL

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, sabemos que $\rho = m/V$. 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 moles, n , da amostra. Introduzindo, na relação anterior, a constante de proporcionalidade, que vamos designar por R , obteremos a seguinte igualdade:

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

Concluimos, então, que:

a pressão p , o volume V e a temperatura absoluta T de uma dada massa gasosa, contendo n moles 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. Isto significa que, para uma dada massa gasosa (um valor determinado, n , de moles), se medirmos sua pressão, seu volume e sua temperatura, em uma certa situação, obteremos valores tais que o produto pV é sempre igual ao produto nRT .
- 2) Então, se colocarmos n moles 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, nestas condições, tomará um valor tal que satisfaça à equação $pV = nRT$. Por outro lado, se escolhêssemos, arbitrariamente, a pressão e a temperatura, o gás iria ocupar um volume não arbitrário, determinado pela equação $pV = nRT$.
- 3) A equação $pV = nRT$ pode ser escrita

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

Portanto, para uma dada massa de gás ($n = \text{constante}$), como R também é constante, concluímos que $(pV/T) = \text{constante}$. 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 estes dois estados pela equação

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

- 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, esta equação pode ser aplicada, com muito boa aproximação, a um gás qualquer, desde que sua temperatura não seja muito baixa e sua pressão não seja muito elevada.

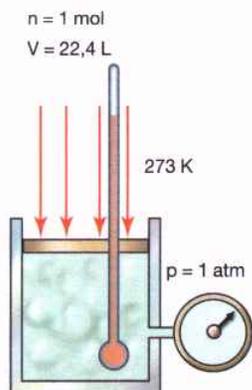


Fig. 11-10: A constante universal dos gases, R , pode ser calculada a partir dos dados experimentais mostrados na figura esquemática.

A CONSTANTE UNIVERSAL DOS GASES

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

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

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, tomando-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 (fig. 11-10).

Substituindo esses valores na expressão $R = pV/nT$ obtemos

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

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

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

Exemplo 1

Uma pessoa afirma que colocou 3,5 moles 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 esta pessoa?

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

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

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

Como pV não é igual a nRT , concluímos que as medidas realizadas pela pessoa não podem estar corretas, isto é, não é possível, a 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 moles do gás colocado no recipiente?

Da equação de estado obtemos

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

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

Exemplo 2

Suponha que um recipiente, fechado e indilatável, contenha hidrogênio. Aquecendo-se o gás, de uma temperatura Kelvin T_1 até uma temperatura T_2 , como será o gráfico $p \times T$ para esta transformação?

Da equação $pV = nRT$ podemos tirar

$$p = \left(\frac{nR}{V} \right) T$$

Nesta experiência, uma dada massa de gás ($n = \text{constante}$) é mantida a volume constante (transformação isovolumétrica). Então, nR/V mantém-se constante e concluímos que p é diretamente proporcional a T . Este resultado costuma ser denominado "lei de Charles", por ter sido observado experimentalmente por este cientista (contemporâneo de Gay-Lussac).

Desta maneira, o gráfico $p \times T$, desde T_1 até T_2 , será igual ao da fig. 11-11.

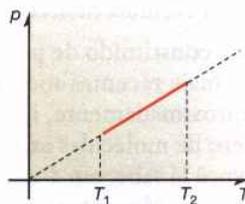


Fig. 11-11: Para o exemplo 2.

exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima secção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

15. Verifica-se que, para um gás contido em um recipiente, o produto nRT vale $26 \text{ atm} \cdot \text{L}$.
 - a) Qual é o valor do produto pV para o gás neste estado?
 - b) Adaptando-se um manômetro ao recipiente, ele indica, para o gás, uma pressão de $2,0 \text{ atm}$. Qual é o volume do recipiente?
16. Um reservatório de um frigorífico, cujo volume é $0,15 \text{ m}^3$, contém 480 g de O_2 à pressão de $2,0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$.
 - a) Quantos moles de O_2 existem no reservatório?
 - 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 ?
 - c) A que temperatura absoluta se encontra o O_2 no reservatório?
 - d) Expresse a temperatura do O_2 em $^\circ\text{C}$.
17. Uma pessoa coloca $0,50 \text{ mol}$ 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 uma pressão de $1,5 \text{ atm}$. É possível alcançar as condições desejadas pela pessoa? Explique.
 - a) Qual a equação que relaciona p_2 , V_2 e T_2 com p_1 , V_1 e T_1 ?
 - b) Use esta equação e calcule o valor de V_2 .
18. Um recipiente, provido de um êmbolo móvel, contém um gás ideal, a uma pressão $p_1 = 1,0 \text{ atm}$, ocupando um volume $V_1 = 4,5 \text{ L}$ e à temperatura $t_1 = 0^\circ\text{C}$. Aquecendo-se o recipiente, o gás se expande, passando a ocupar um volume V_2 , com uma pressão $p_2 = 1,5 \text{ atm}$ e a uma temperatura $t_2 = 273^\circ\text{C}$.
 - a) Das grandezas p , V , n e T , quais permanecem constantes? Quais delas variam?
 - b) Expresse a inclinação do gráfico $p \times T$ em função de n , R e V .
19. Considere a transformação isovolumétrica analisada no exemplo 2 desta secção.
 - a) Das grandezas p , V , n e T , quais permanecem constantes? Quais delas variam?
 - b) Expresse a inclinação do gráfico $p \times T$ em função de n , R e V .

11.5. Modelo molecular de um gás

MODELO CINÉTICO DE UM GÁS

As leis que estudamos até agora, e que descrevem o comportamento dos gases, foram obtidas experimentalmente. Nesta secção, procuraremos relacionar estas leis com o comportamento das partículas que constituem o gás, isto é, seus átomos ou suas moléculas.

Foi principalmente a partir do século XIX que os cientistas intensificaram seus

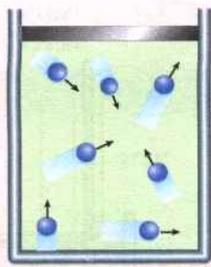


Fig. 11-12: As moléculas de um gás estão em constante movimento com velocidades de valores e direções distribuídos ao acaso. Ilustração esquemática.

estudos sobre a estrutura molecular dos gases, baseando-se nas seguintes suposições:

- Um gás é constituído de pequenas partículas: seus átomos ou suas moléculas (estudos mais recentes mostraram que a dimensão de uma molécula de um gás é, aproximadamente, igual a 10^{-8} cm).
- O número de moléculas existentes em uma dada massa gasosa é muito grande (como você já sabe, em 1 mol de um gás temos cerca de 6×10^{23} moléculas).
- A distância média entre as moléculas é muito maior do que as dimensões de uma molécula (lembre-se de que, quando um líquido se evapora, ele passa a ocupar um volume muitas vezes maior).
- As moléculas de um gás estão em constante movimento e este movimento é inteiramente ao acaso, isto é, as moléculas se movimentam em qualquer direção (fig. 11-12), com velocidades que podem apresentar valores desde zero até valores muito grandes.

Ao estabelecerem estas hipóteses, os cientistas estavam tentando descrever o comportamento de um gás através do movimento de suas moléculas, isto é, estavam supondo que as leis dos gases poderiam ser obtidas aplicando-se as leis da Mecânica ao movimento das moléculas, tratando-as como se fossem partículas. Desta maneira, os cientistas estavam estruturando um *modelo* para descrever o comportamento de um gás. Este modelo é denominado modelo cinético, em virtude de se basear no *movimento* das moléculas do gás.

Várias conclusões obtidas a partir deste modelo estavam em concordância com as leis experimentais já conhecidas, evidenciando, assim, que as suposições sobre a constituição molecular de um gás eram válidas. Deste modo, foi possível usar o modelo para se obterem novas informações sobre o comportamento dos gases.

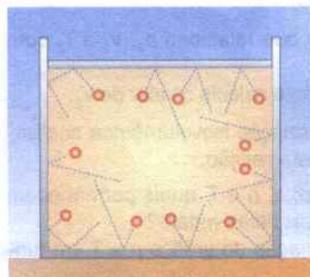


Fig. 11-13: A pressão de um gás sobre uma parede é causada pelas colisões de suas moléculas contra esta parede. Ilustração esquemática.

CÁLCULO CINÉTICO DA PRESSÃO

Como vimos, no modelo cinético de um gás o número de moléculas é muito grande e elas estão em constante movimento. Em consequência disto, as moléculas colidem continuamente contra as paredes do recipiente que contém o gás, exercendo uma pressão nessas paredes (fig. 11-13).

Como o número de colisões é muito grande, não se percebe o efeito do choque de cada partícula. O que se observa é o efeito médio da freqüente sucessão de colisões, que ocasiona o aparecimento de uma força contínua, sem flutuações, pressionando as paredes do recipiente. Portanto,

a pressão que um gás exerce sobre as paredes do recipiente que o contém é devida às incessantes e contínuas colisões das moléculas do gás contra as paredes do recipiente.

Aplicando as leis da Mecânica às colisões das moléculas contra as paredes do recipiente, os físicos do século XIX obtiveram uma expressão matemática, 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;

v^2 – média dos quadrados das velocidades das moléculas.

A expressão a que chegaram foi a seguinte:

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

Analisando esta expressão vemos que

- 1) $p \propto N$ – este resultado é intuitivo, pois, quanto maior for o número total de moléculas, maior será o número de colisões contra as paredes e, portanto, maior será a pressão exercida pelo gás.
- 2) $p \propto 1/V$ – de fato, quanto maior for o volume do recipiente, maior será a distância que uma molécula terá que percorrer para colidir contra as paredes e, conseqüentemente, menor será o número de colisões, isto é, menor será a pressão exercida pelo gás.
- 3) $p \propto m$ – este resultado era esperado, pois, quanto maior for a massa de uma molécula, maior será a sua quantidade de movimento e, assim, maior será a força que ela exerce ao colidir contra a parede do recipiente.
- 4) $p \propto \bar{v}^2$ – realmente, quanto maior for \bar{v}^2 , mais rapidamente as moléculas estarão se movimentando. É fácil perceber que, nestas condições, maior será a força que cada molécula exercerá ao colidir contra a parede e, além disso, maior será o número de colisões.

INTERPRETAÇÃO CINÉTICA DA TEMPERATURA

No capítulo anterior, ao estudarmos a temperatura de um corpo, mencionamos que ela se relaciona com a energia de agitação dos átomos e moléculas deste corpo. Mostraremos, agora, como os físicos do século XIX, baseados no modelo cinético de um gás, chegaram a esta conclusão.

A expressão $p = (1/3) (N/V) m \bar{v}^2$, que havia sido obtida baseando-se no modelo cinético, pode ser escrita

$$pV = \frac{1}{3} N m \bar{v}^2$$

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

$$\frac{1}{3} N m \bar{v}^2 = nRT$$

Mas, sendo N_0 (número de Avogadro) o número de moléculas que existe em 1 mol e sendo n o número de moles que corresponde a N moléculas, é claro que

$$N = nN_0$$

Levando este valor de N na igualdade anterior, virá

$$\frac{1}{3} nN_0 m \bar{v}^2 = nRT \quad \text{ou} \quad m \bar{v}^2 = 3 \left(\frac{R}{N_0} \right) T$$

Dividindo-se os dois membros desta igualdade por 2, teremos

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



Ludwig Boltzmann (1844-1906)

Físico austríaco 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 constituem esta matéria. Estas idéias foram fortemente atacadas por muitos daqueles que não acreditavam na teoria atômica.

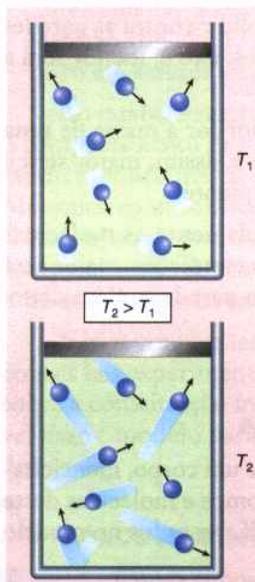


Fig. 11-14: Quanto maior for a temperatura de um gás, maior será a energia cinética média de suas moléculas. Ilustração esquemática.

Observe que o primeiro membro desta expressão representa a *energia cinética média* das moléculas (a soma das energias cinéticas das moléculas, dividida pelo número delas). Esta energia cinética média será representada por \bar{E}_c , isto é, $\bar{E}_c = (1/2) m\bar{v}^2$. O quociente (R/N_0) , que aparece no segundo membro, é constante, pois, como já sabemos, tanto R quanto N_0 são constantes. Este quociente é muito importante, é representado por k e denominado *constante de Boltzmann*, em homenagem a Ludwig Boltzmann, físico austríaco do século XIX. Então

$$k = \frac{R}{N_0} = \frac{8,31}{6,02 \times 10^{23}} \quad \text{ou}$$

$$k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

Desta 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 for a energia cinética média das moléculas, maior será a temperatura do gás (fig. 11-14). Destacamos, então, que:

a temperatura absoluta, T , de um gás está relacionada com a energia cinética média, \bar{E}_c , de suas moléculas através da expressão

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

onde k é a constante de Boltzmann.

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, $T = 273 + 27$ ou $T = 300$ K. Logo

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

Observe que este valor de \bar{E}_c é muito pequeno, pois ele 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, não dependendo 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 $3,3 \times 10^{-27}$ kg, qual deve ser a sua velocidade para que ela tenha uma energia cinética igual ao valor médio calculado em (a)?

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

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

Este resultado nos mostra que o movimento das moléculas é muito rápido, pois $1,9 \times 10^3$ m/s equivalem a cerca de 7 000 km/h.

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

Sabemos, da Química, que 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 temos:

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

De $(1/2)mv^2 = \bar{E}_c$ vem

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

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

28 29

os de fixação exercícios de fixação exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima secção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

20. Como vimos, os cientistas procuraram interpretar o comportamento dos gases formulando algumas hipóteses sobre a sua constituição. No texto, foram citadas quatro destas hipóteses. Quais são elas?
21. De acordo com o modelo cinético, por que um gás exerce pressão contra as paredes do recipiente que o contém?
22. Um recipiente de volume V contém N moléculas de H_2 , com um certo valor de \bar{v}^2 , a uma pressão de 1,2 atm. Supondo que o valor de \bar{v}^2 não se altere, diga qual será o valor da pressão do gás em cada um dos seguintes casos:
- Mantém-se o valor de V e mais N moléculas de H_2 são introduzidas no recipiente.
 - Aumenta-se o volume para $2V$, mantendo-se o número de moléculas igual a $2N$.
 - Mantém-se o volume V e substitui-se o H_2 por N moléculas de He (massa atômica = 4 u.m.a.).
23. Uma amostra de gás hélio encontra-se à temperatura de 1 000 K.
- Calcule a energia cinética média, \bar{E}_c , das moléculas desta amostra.
 - Se duplicarmos a temperatura absoluta da amostra, por quanto ficará multiplicado o valor de \bar{E}_c ?
 - A que temperatura a \bar{E}_c das moléculas do gás se anularia?
24. Considere uma amostra de argônio gasoso, à mesma temperatura que o hélio do exercício anterior (1 000 K).
- A \bar{E}_c das moléculas de argônio é maior, menor ou igual à \bar{E}_c das moléculas de hélio?
 - A velocidade média das moléculas de argônio é maior, menor ou igual à velocidade média das moléculas de hélio?

um tópico especial para você aprender um pouco mais

11.6. A evolução do modelo molecular da matéria

AS PRIMEIRAS IDÉIAS

No século V a.C., o filósofo grego Leucipo lançou a idéia de que toda a matéria existente no Universo seria constituída de pequenas partículas, indivisíveis e idênticas entre si. Estas partículas foram denominadas “átomos”, palavra grega que significa “indivisível”. Esta idéia foi ampliada e divulgada, ainda naquele século, por outro filósofo grego, Demócrito, cujo trabalho foi bem-aceito entre os pensadores dos séculos seguintes.

A descrição mais completa destas primeiras hipóteses sobre a constituição atômica da matéria é encontrada na obra do poeta romano Lucrecio, que viveu no século I a.C. É interessante observar que muitas das idéias dos filósofos gregos prevalecem ainda hoje, com algumas modificações conceituais na teoria atômica moderna.

Com o advento da Idade Média, as especulações sobre a constituição atômica da matéria sofreram um declínio, acompanhando a decadência geral observada no pensamento científico do mundo ocidental durante aquela fase da História da Civilização.

Por ocasião do Renascimento, época em que ressurgiram as grandes correntes de pensamento cultural, as idéias da teoria atômica foram retomadas e desenvolvidas por vários cientistas que viveram naquele período. Entre os físicos da época, que aceitavam como verdadeira a hipótese da existência dos átomos, podemos citar Galileu, Newton, Boyle, Huyghens, Hooke etc.

R. Hooke chegou mesmo a propor uma teoria, na qual ele procurava explicar algumas propriedades dos gases como sendo devidas ao movimento e às colisões dos átomos que constituíam estes gases. Assim, Hooke estava lançando as primeiras idéias da Teoria Cinética dos Gases, que estudamos neste capítulo. Entretanto, como Hooke não possuía suficiente habilidade matemática, ele não conseguiu desenvolver adequadamente sua teoria. Somente em meados do século XVIII o grande físico e matemático Bernoulli deu início a este desenvolvimento.

ADS



Daniel Bernoulli (1700-1782)

Membro de uma famosa família de matemáticos e físicos suíços. Foi professor de Matemática na Academia de Ciências da Rússia e, mais tarde, retornando à Suíça, lecionou Botânica, Anatomia e Física. Além de suas contribuições para o desenvolvimento da Teoria Cinética dos Gases, publicou um tratado sobre as marés. Entretanto, seu trabalho de maior vulto foi realizado no campo da Hidrodinâmica (estudo do escoamento dos fluidos).

DANIEL BERNOULLI E A TEORIA CINÉTICA

Bernoulli, baseando-se nos estudos de Hooke, admitia que a pressão de um gás deveria ser simplesmente o resultado das colisões dos átomos ou moléculas contra as paredes do recipiente (como destacamos na secção 11.5). Com

esta hipótese, ele conseguiu facilmente uma explicação para a lei de Boyle: reduzindo-se à metade o volume de um gás, sua densidade duplica. Então, teremos 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 ao quadrado da velocidade média das moléculas.

Apesar da importância do trabalho de Bernoulli, que parece ter sido o primeiro passo na evolução matemática da moderna Teoria Cinética dos Gases, ele foi completamente ignorado pelos outros cientistas do século XVIII. Isto ocorreu, provavelmente, porque Newton havia sugerido um outro modelo para um gás, com o qual ele conseguia, também, explicar a lei de Boyle: segundo Newton, um gás seria constituído por partículas, *em repouso*, que se repeliam com forças inversamente proporcionais à distância entre elas. Devido ao grande prestígio que Newton desfrutava na época, os cientistas aceitavam praticamente sem contestação qualquer idéia que houvesse sido proposta por ele.

UM VALOR NUMÉRICO PARA A VELOCIDADE DE UMA MOLÉCULA

No início do século XIX, o físico inglês John Herapath, retomando a linha definida por Bernoulli, conseguiu estabelecer a seguinte relação matemática entre a pressão, p , de um gás, sua densidade, ρ , e a velocidade média, \bar{v} , de suas moléculas:

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

Esta equação foi apresentada, em nosso texto, sob a forma equivalente $p = (1/3)(N/V) m \bar{v}^2$ e representa um resultado muito importante. Ela permitiu a Herapath determinar a velocidade média das moléculas de um gás, uma vez que os valores de p e ρ podem ser obtidos experimentalmente. Para as moléculas do ar, por exemplo, Herapath 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.

De modo semelhante ao que ocorreu com Bernoulli, o trabalho de Herapath não teve aceitação no meio científico da época, sendo sua publicação rejeitada pela Real Academia de Ciências de Londres.

A TEORIA CINÉTICA ADQUIRE SUA ESTRUTURA DEFINITIVA

Poucos anos mais tarde, em 1848, o grande físico Joule, reconhecendo o valor do trabalho de Herapath, tentou reviver as idéias básicas da Teoria Cinética. Inicialmente, seu esforço não foi bem-sucedido, mas, talvez em virtude do prestígio de Joule, não demorou muito para que outros cientistas de renome passassem a se interessar pelos estudos da teoria molecular. Foi assim que, em 1856, o brilhante físico alemão, R. Clausius, publicou um trabalho no qual ele 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.

Apesar de, com estes trabalhos, a Teoria Cinética dos Gases se encontrar quase totalmente estruturada, um elevado número de grandes cientistas, no iní-

cio do século XIX, ainda se mostravam descrentes com relação à hipótese da constituição atômico-molecular da matéria. Em outras palavras, eles se recusavam a aceitar que os corpos fossem constituídos por átomos ou moléculas em movimento caótico constante, como propunham os adeptos da Teoria Cinética. A comprovação direta da realidade dos átomos e moléculas só veio a ser concretizada com o trabalho de Einstein sobre o “movimento browniano”, publicado em 1905, que analisaremos a seguir.

O MOVIMENTO BROWNIANO

Este fenômeno, observado pela primeira vez pelo botânico inglês Robert Brown, é assim denominado em homenagem a ele. Brown observou que pequenas partículas (grãos de pólen) em suspensão no interior de um líquido, observadas ao microscópio, apresentavam um movimento constante e inteiramente irregular, mudando sucessivamente de direção, como mostra a fig. 11-15. Inicialmente, ele pensou que o movimento existia por tratar-se de organismos vivos. Mais tarde, esta idéia teve de ser abandonada, pois constatou-se que o movimento continuava, sem interrupção, durante meses seguidos e, além disso, o mesmo fenômeno podia ser observado com partículas inorgânicas (portanto sem vida) em suspensão.

Passaram-se muitos anos sem que se encontrasse uma explicação adequada para o movimento browniano. Um estudo completo e uma análise matemática deste movimento só vieram a ser desenvolvidos no trabalho mencionado anteriormente, apresentado por Einstein, no início do século XIX.

Einstein, que acreditava ser a matéria realmente constituída de átomos e moléculas em constante movimento, estava procurando um fenômeno que tor-



Fig. 11-15: Representação esquemática de movimento browniano de uma partícula, em suspensão em um líquido.

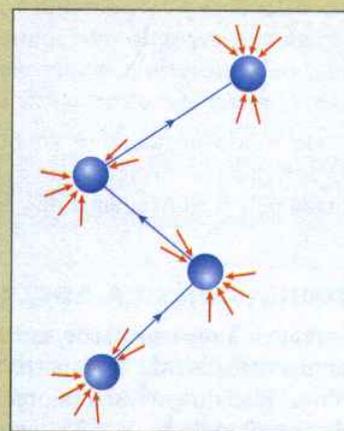


Fig. 11-16: O movimento browniano é causado pelo impacto de um grande número de moléculas do líquido contra a partícula em suspensão.

nasse evidente a existência destas partículas. Ele propunha, então, a seguinte explicação para o movimento browniano: estando uma partícula em suspensão no líquido, ela recebe, simultaneamente, os impactos de um número muito grande de moléculas do líquido que, de acordo com a Teoria Cinética, encontram-se

em movimento constante e caótico. Eventualmente, a partícula pode receber um maior número de impactos de um lado do que do outro e isto, evidentemente, provoca um deslocamento desta partícula (que é visível ao microscópio). Logo em seguida, a direção em que há predominância das colisões moleculares se modifica e, então, a partícula passa a se deslocar em uma direção diferente (fig. 11-16). Portanto, segundo Einstein, o movimento browniano seria uma consequência direta do movimento caótico das moléculas do líquido.

CONFIRMAÇÃO EXPERIMENTAL DAS IDÉIAS DE EINSTEIN

Desenvolvendo uma análise matemática cuidadosa do fenômeno, Einstein deduziu equações (um tanto complicadas) através das quais ele conseguiu fazer diversas previsões, tais como: o deslocamento das partículas em movimento browniano deve aumentar com o aumento da temperatura, deve ser tanto maior quanto menor for a partícula, deve ser tanto menor quanto maior for a viscosidade do líquido etc. Ao publicar o seu trabalho, Einstein conclamou os físicos experimentais a verificarem, em seus laboratórios, se suas previsões teóricas estavam corretas.

O cientista francês, Jean Perrin, em 1908, observando partículas em movimento browniano e realizando experiências sofisticadas e medidas bastante precisas, conseguiu com grande sucesso comprovar todas as previsões feitas por Einstein. No decorrer de seu trabalho, usando as equações deduzidas por Einstein, foi possível a Perrin determinar o valor do número de Avogadro, conforme dissemos na seção 11.3.

A confirmação experimental da teoria de Einstein sobre o movimento browniano, evidenciando de maneira incontestável a constituição atômica e molecular da matéria, teve enorme repercussão no meio científico da época. A partir de então todos os cientistas, mesmo aqueles mais descrentes, convenceram-se definitivamente da realidade dos átomos e moléculas.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

25. a) Qual o significado da palavra *átomo*?
b) Onde e quando surgiu, pela primeira vez, a idéia de que a matéria seria constituída de *átomos*?
26. Qual foi a proposta de Robert Hooke sobre os átomos que o levou a ser considerado o introdutor das primeiras idéias da Teoria Cinética dos Gases?
27. Suponha que o volume de um gás contido em um recipiente seja reduzido à quinta parte. Lembrando-se das idéias de Bernoulli, responda:
a) O que ocorre com o número de moléculas por unidade de volume, desse gás?
b) Qual a alteração sofrida pelo número de colisões por segundo que as moléculas efetuam contra as paredes do recipiente?
c) Quantas vezes maior torna-se a pressão do gás?
d) Então, as idéias de Bernoulli levam a resultados concordantes com a lei de Boyle?
28. Qual a diferença fundamental entre o modelo de um gás proposto por Newton e o modelo de Hooke-Bernoulli?

29. A densidade do ar nas condições normais de temperatura e pressão (considere $p = 1,0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$) é $\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$.
- Usando a equação citada no texto, obtida pelo físico inglês Herapath, calcule a velocidade média das moléculas do ar.
 - Qual a porcentagem de erro cometida por esse físico no valor que ele obteve para a velocidade média das moléculas do ar?
30. a) Como dissemos, o trabalho de Herapath foi rejeitado pela Academia de Ciências de Londres. Consultando o texto, cite o nome e a nacionalidade de quatro grandes cientistas que se interessaram pelas idéias de Herapath e colaboraram para estabelecer a estrutura definitiva da Teoria Cinética dos Gases.
- Diga se a afirmativa seguinte é falsa ou verdadeira: "No início do século XX a idéia de que a matéria era constituída de átomos e moléculas já era aceita por toda a comunidade científica".
31. Responda resumidamente às seguintes questões:
- Que é movimento browniano?
 - De acordo com as idéias de Einstein, qual é a causa do movimento browniano?
 - Qual a importância do estudo do movimento browniano para a teoria cinética da matéria?
32. a) Quais as três previsões sobre o deslocamento médio de uma partícula em movimento browniano, feitas por Einstein e citadas no texto?
- Qual o nome e a nacionalidade do cientista que verificou, experimentalmente, que essas previsões de Einstein eram verdadeiras?
 - Qual a constante física, relacionada também com a teoria molecular da matéria, cujo valor foi obtido por esse cientista? Em que ano ele recebeu o Prêmio Nobel de Física por esses trabalhos? (Consulte informações na secção 11.3.)

isãõ reVisãõ reVisãõ reVisãõ reVisãõ reVisãõ reVisãõ

As questões seguintes foram formuladas para que você faça uma revisão dos pontos mais importantes abordados neste capítulo. Ao respondê-las, volte ao texto sempre que tiver dúvidas.

- Diga, com suas palavras, o significado de cada uma das seguintes expressões:
 - Estado de um gás.
 - Transformação de um gás.
 - Gás ideal.
 - Gás real.
- O que é uma transformação isotérmica?
 - Enuncie e expresse matematicamente a lei de Boyle.
 - Faça um desenho mostrando o aspecto do gráfico $p \times V$ para uma transformação isotérmica de um gás ideal.
 - Se a temperatura de uma amostra gasosa permanece constante, que tipo de relação existe entre sua densidade ρ e sua pressão p ?
- O que é uma transformação isobárica?
 - O que Gay-Lussac observou sobre o coeficiente de dilatação dos gases à pressão constante?
- Considere uma mostra de gás ideal sofrendo uma transformação isobárica.
 - Faça um desenho mostrando o aspecto do gráfico $V \times t$ (*volume* \times *temperatura Celsius*) para esta amostra.
 - Em que ponto este gráfico corta o eixo das temperaturas? Qual seria o valor do volume do gás neste ponto?
 - Mostre como seria o gráfico $V \times T$ (*volume* \times *temperatura absoluta*) para esta amostra.
 - Qual é a relação matemática entre o volume V e a temperatura absoluta T desta amostra? E entre a densidade ρ e a temperatura T ?
- Enuncie a lei de Avogadro.
 - Descreva a experiência analisada no texto que comprova a lei de Avogadro.
 - O que é o número de Avogadro? Qual é o seu valor?
 - Qual é a relação entre a densidade, ρ , de um gás e sua massa molecular M ?
- Escreva a equação de estado de um gás ideal, dizendo o que representa cada símbolo que nela figura.
 - Como se calcula o número de moles, n , de uma amostra, quando se conhece sua massa m e sua massa molecular M ?
 - O valor de R varia de um gás para outro? Varia conforme as unidades usadas?
 - Para uma dada massa gasosa, se escolhermos arbitrariamente os valores de duas das grandezas p , V e T , não será possível escolher o valor da terceira, pois ele já está definido. Por quê?

7. a) Explique, com suas palavras, o que se entende por *modelo cinético de um gás*.
 b) De acordo com o modelo cinético de um gás, qual é a equação que nos permite calcular a pressão exercida por ele? Diga o que representa cada símbolo que aparece nesta equação.
8. a) Qual é a equação que relaciona a energia cinética média, E_c , das moléculas de um gás com sua temperatura absoluta T ?
 b) Como se define a constante de Boltzmann, k , na equação solicitada em (a)?

algumas experiências simples

Para você fazer

Primeira experiência

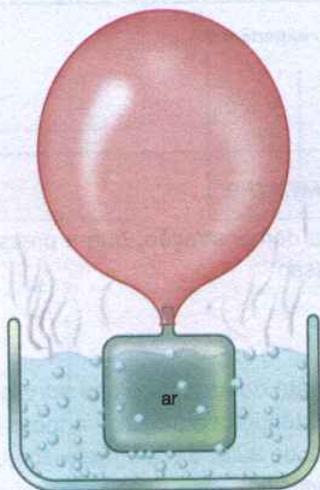
Quando aumentamos a temperatura de um gás, observamos normalmente que seu volume aumenta, acompanhado de um aumento em sua pressão. Este fenômeno pode ser observado facilmente realizando-se a experiência seguinte.

1) Tome um recipiente (uma lata ou um frasco de plástico) com cerca de 1 L de volume. Adapte firmemente ao gargalo do recipiente um balão de borracha ligeiramente inflado, como mostra a figura desta experiência. Temos, assim, uma certa massa de ar ocupando o volume do recipiente e do balão.

2) Mergulhe totalmente o frasco (ou lata) em um banho de água bem quente (temperatura próxima à de ebulição). Observe o que acontece com o balão. O que ocorreu com o volume do ar ao ser aquecido? E com sua pressão?

Observação: se a experiência for realizada com uma lata, você poderá obter um efeito muito mais notável levando-a diretamente ao fogo.

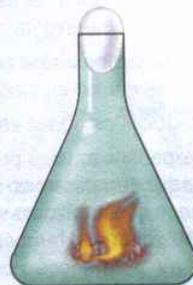
3) Mergulhe, agora, o recipiente em um banho de água bem fria (mistura de água e gelo). Observe novamente o que ocorre com o balão. Explique.



Primeira experiência.

Segunda experiência

Procure obter um recipiente (uma garrafa, por exemplo) cujo gargalo seja razoavelmente largo, mas que não deixe passar por ele um ovo cozido sem casca (veja a figura desta experiência).

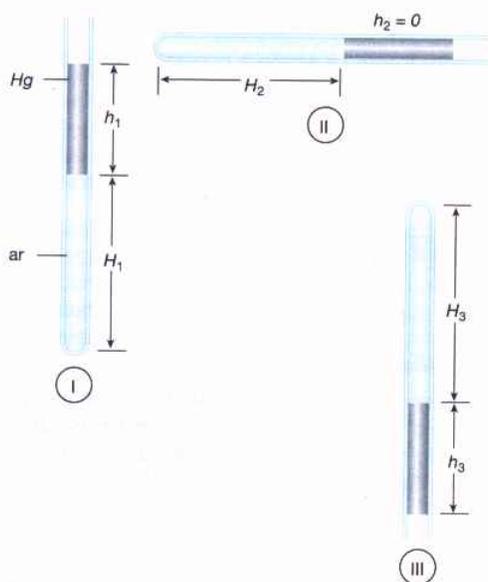


Segunda experiência.

Você poderá usar, alternativamente, uma garrafa de refrigerante e um ovo de codorna (que não passe pelo seu gargalo).

- 1) Retire o ovo do gargalo e queime alguns pedaços de papel no interior do recipiente. Em virtude do aquecimento provocado pela combustão do papel, o que acontecerá com a quantidade de ar no interior do recipiente?
- 2) Terminada a combustão, adapte cuidadosamente o ovo ao gargalo e deixe o recipiente esfriar. À medida que a temperatura do recipiente diminui, o que se passa com a pressão do ar em seu interior?
- 3) Possivelmente, depois de um certo tempo, você verá o ovo ser forçado a passar pelo gargalo, penetrando no recipiente. Explique por que isto ocorre.
- 4) Você poderá, agora, retirar o ovo da garrafa procedendo da seguinte maneira:
 - inverta a garrafa de modo que o ovo volte ao gargalo e aí se adapte (se for preciso, você poderá lançar mão de um barbante ou arame, para ajudá-lo nesta tarefa).
 - após conseguir uma boa adaptação do ovo no gargalo, tome a inverter a garrafa com cuidado e mergulhe-a em um recipiente contendo água bem quente. O ovo será, então, rapidamente expulso para fora. Explique por que isto ocorre.

Terceira experiência



Terceira experiência.

Com esta experiência, você poderá verificar a lei de Boyle, isto é, se a temperatura de uma dada massa gasosa permanece constante, ao variarmos a pressão p sobre o gás, seu volume V também varia, de tal modo que o produto pV permanece constante. Proceda da seguinte maneira:

- 1) Tome um tubo de vidro com cerca de 50 cm de comprimento e de diâmetro interno bem pequeno. Introduza, no tubo, uma coluna de Hg de cerca de 20 cm, de maneira a manter, na parte inferior, um certo volume de ar (veja a figura desta experiência).
- 2) Com o tubo na posição mostrada em I, meça e anote a altura h_1 da coluna de Hg e a altura H_1 do volume de ar. Observe que a pressão p_1 que atua sobre o ar confinado no tubo, nesta posição, é a soma da pressão

atmosférica p_a com a pressão exercida pela coluna de Hg de altura h_1 . O volume de ar, nesta posição, é dado por $V_1 = A \cdot H_1$, onde A é a área da base da coluna de ar. Como o valor de A permanecerá constante durante a experiência, não é necessário medir o seu valor.

- 3) Coloque o tubo na posição II (horizontal). Anote o valor de H_2 e observe que a pressão que atua sobre o ar, nesta posição, é $p_2 = p_a$, pois a coluna de Hg não está exercendo pressão sobre ele (isto equivale a dizer que $h_2 = 0$).
- 4) Inverta cuidadosamente o tubo (posição III) e anote os valores de h_3 e H_3 . Nesta posição, a pressão atmosférica está sustentando a coluna de Hg e a pressão do ar confinado. Logo, a pressão p_3 sobre o ar é igual à diferença entre p_a e a pressão exercida pela coluna h_3 .
- 5) Procure saber qual é o valor, em cm de Hg, da pressão atmosférica em sua cidade (se você realizou a 3ª experiência do capítulo 7, este dado já é de seu conhecimento). Com este valor e os dados que você anotou, complete a tabela desta experiência.
- 6) A temperatura do ar dentro do tubo permaneceu praticamente constante (em equilíbrio térmico com o ambiente) durante a experiência. Então, as transformações sofridas pela massa de ar são isotérmicas. Observe a última coluna de sua tabela. Os resultados aí obtidos são uma confirmação razoável da lei de Boyle?

Posição	$V = A \cdot H$	h (cm)	p do gás (cmHg)	$p \cdot V$
I	$V_1 = A \cdot H_1 = A$	$h_1 =$	$p_1 = p_a + h_1 =$	$p_1 V_1 =$
II	$V_2 = A \cdot H_2 = A$	$h_2 =$	$p_2 = p_a =$	$p_2 V_2 =$
III	$V_3 = A \cdot H_3 = A$	$h_3 =$	$p_3 = p_a - h_3 =$	$p_3 V_3 =$

Terceira experiência.

UMA ATIVIDADE COMPLEMENTAR •

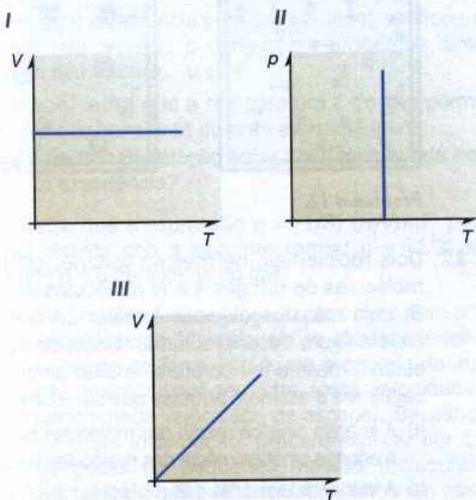
Na seção 11.5 afirmamos, sem nos preocuparmos com a demonstração, que a pressão exercida por um gás, de acordo com a teoria cinética, é dada pela expressão

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

Faça uma pesquisa bibliográfica, procurando um texto que trate do assunto e que apresente a dedução desta expressão. Analise a dedução apresentada, procure entendê-la e transcreva todas as etapas e raciocínios utilizados em um cartaz, para ser afixado em sua sala de aula. Se seu professor julgar conveniente, apresente a dedução perante a classe e discuta-a com seus colegas.

Problemas e testes problemas e testes problemas e testes

- Uma bolha de ar, com volume de $2,5 \text{ cm}^3$, forma-se no fundo de um lago, a 30 m de profundidade, e sobe até atingir a superfície. A pressão atmosférica no local vale $1,0 \text{ atm}$ e a temperatura do lago é a mesma a qualquer profundidade.
 - Como você classificaria a transformação sofrida pela bolha de ar ao se deslocar do fundo até à superfície?
 - Qual 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 aproximadamente igual a $1,0 \text{ atm}$.)
 - Calcule o volume da bolha ao atingir a superfície.
- 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 $p_1 = 70 \text{ cmHg}$ e seu volume era $V_1 = 20 \text{ cm}^3$. Para outro estado (2), à mesma temperatura, ele encontrou $p_2 = 120 \text{ cmHg}$ e $V_2 = 10 \text{ cm}^3$. Estas medidas levam o estudante a confirmar sua suspeita? Explique.
- Os gráficos da figura deste problema se referem a transformações de uma dada massa gasosa. Entre as alternativas seguintes, assinale aquela que classifica corretamente as três transformações.
 - I é isotérmica, II é isobárica e III é isovolumétrica.
 - I é isovolumétrica, II é isotérmica e III é isobárica.
 - I é isobárica, II é isovolumétrica e III é isotérmica.
 - I é isotérmica, II é isovolumétrica e III é isobárica.
 - I é isobárica, II é isotérmica e III é isovolumétrica.



Problema 3.

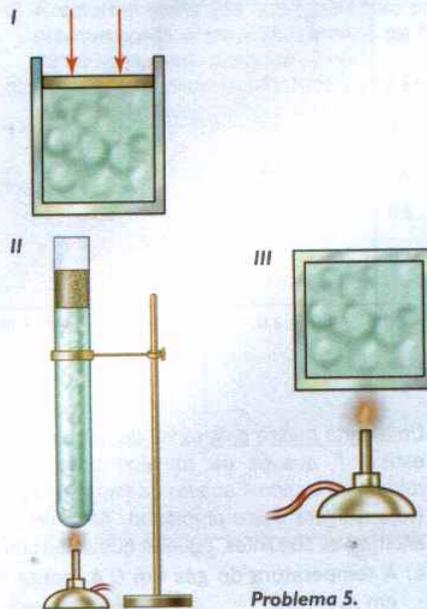
- Um gás ideal, com uma pressão $p_A = 4,0 \text{ atm}$ e um volume $V_A = 3,0 \text{ cm}^3$, sofre as seguintes transformações sucessivas:
 - expande-se isotermicamente até um volume $V_B = 12 \text{ cm}^3$.
 - é comprimido, à pressão constante, até que seu volume atinja um valor $V_C = 3,0 \text{ cm}^3$.
 - é aquecido a volume constante até voltar ao estado inicial.

Represente estas transformações em um gráfico $p \times V$.

- A figura deste problema representa:
 - em I – um gás sendo comprimido lentamente, de modo a se manter constantemente em equilíbrio térmico com o ambiente.
 - 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 indilatável.
 - Qual o tipo de transformação que está ocorrendo em cada caso?
 - Dadas as equações

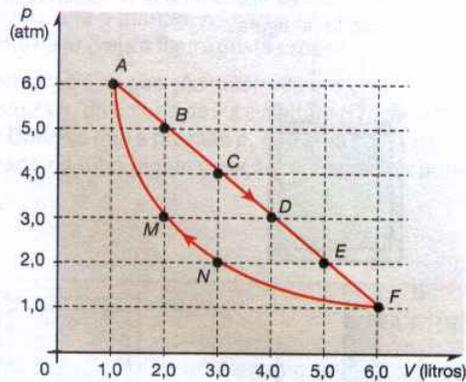
$$\frac{V}{T} = \text{constante}, \quad \frac{p}{T} = \text{constante} \text{ e}$$

$$pV = \text{constante},$$
 qual delas se aplica a cada transformação apresentada na figura?



Problema 5.

6. Três recipientes A, B e C, de volumes iguais, contêm respectivamente os gases NO, NO₂ e N₂O₃ à mesma pressão e temperatura. Decompondo estes gases, um estudante recolheu o oxigênio desprendido em cada recipiente, obtendo resultados que confirmaram a lei de Avogadro. Quais das alternativas seguintes poderiam corresponder às massas de oxigênio recolhidas, respectivamente, em A, B e C?
- 0,50 g, 1,0 g e 1,5 g
 - 1,0 g, 1,0 g e 1,0 g
 - 3,0 g, 1,5 g e 1,0 g
 - 3,0 g, 6,0 g e 9,0 g
 - 2,0 g, 3,0 g e 4,0 g
7. Um motorista calibra os pneus de seu carro com uma pressão de 20 libra/pol² a uma temperatura de 20 °C. Após realizar uma viagem, a temperatura dos pneus subiu para 40 °C. Supondo desprezível a dilatação do pneu, responda:
- Qual o tipo de transformação sofrida pelo ar contido no pneu?
 - Qual a pressão na câmara de ar no fim da viagem?
8. 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?
- H₂
 - CO₂
 - O₂
 - NH₃
 - N₂

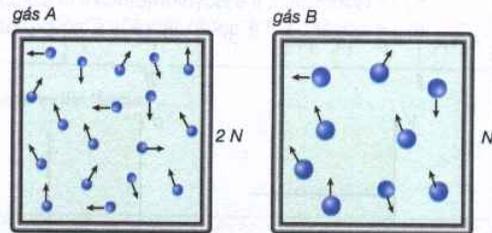


Problema 9.

9. Uma certa massa gasosa vai de um estado A a um estado F através da transformação ABCDEF e retorna ao estado A através da transformação FNMA (veja a figura deste problema). Assinale, entre as alternativas seguintes, aquelas que estão corretas:
- A temperatura do gás em C é menor do que em A.

- As temperaturas em C e D são iguais.
- A temperatura do gás em B é maior do que em M.
- A temperatura do gás em N é menor do que em M.
- A transformação ABCDEF é isotérmica.
- A transformação FNMA é isotérmica.

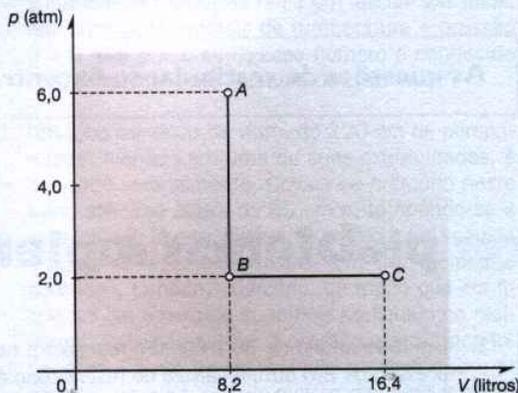
10. Os resultados experimentais sobre o comportamento dos gases, obtidos por Boyle, Gay-Lussac e Charles, estão contidos na equação de estado de um gás ideal. Para comprovar esta afirmação, partindo da equação $pV = nRT$, mostre que quando uma dada massa gasosa passa de um estado (1) para outro estado (2):
- Se T for constante, teremos $p_1V_1 = p_2V_2$ (lei de Boyle).
 - Se V for constante, teremos $p_1/T_1 = p_2/T_2$ (lei de Charles).
 - Se p for constante, teremos $V_1/T_1 = V_2/T_2$ (lei de Gay-Lussac).
11. Um recipiente, de volume constante e igual a 1 L, contém 1 mol de um gás (6×10^{23} moléculas), à pressão de 1 atm. Suponha que, ligando-se ao recipiente uma bomba de alto vácuo e mantendo-se constante a temperatura, conseguíssemos reduzir a pressão até 10^{-13} atm (pressão correspondente aos melhores vácuos obtidos nos grandes laboratórios de pesquisa).
- Nestas condições, qual seria o número de moléculas ainda existentes no recipiente?
 - Este número de moléculas é quantas vezes maior do que a população do mundo? (Considere-a igual a 5 bilhões de habitantes.)



Problema 12.

12. Dois recipientes, de mesmo volume, contêm 2N moléculas de um gás A e N moléculas de um gás B, cuja massa molecular é maior do que a de A (veja a figura deste problema). Sabendo que A e B estão à mesma temperatura, analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que são corretas:
- A energia cinética média das moléculas de A é igual à energia cinética média das moléculas de B.
 - A velocidade média das moléculas de A é igual à velocidade média das moléculas de B.

- c) A pressão exercida pelo gás A é duas vezes maior do que a pressão exercida pelo gás B.
- d) A energia cinética total das moléculas de A é igual à energia cinética total das moléculas de B.
13. a) Para um gás ideal, qual é o aspecto do gráfico $\bar{E}_c \times T$ (energia cinética média das moléculas em função da temperatura absoluta do gás)?
b) Qual é o valor da inclinação deste gráfico?
14. O avião supersônico Concorde pode desenvolver cerca de 800 m/s de velocidade. Imagine que uma molécula de H_2 , cuja massa é de $3,4 \times 10^{-27}$ kg, esteja se deslocando com esta velocidade.
- a) Qual seria a energia cinética desta molécula?
b) Suponha que a energia cinética média das moléculas de uma amostra de H_2 fosse igual ao valor calculado em (a). Qual é, em graus Celsius, a temperatura desta amostra?
c) Se a amostra for constituída por 1 mol de H_2 , qual será a energia cinética total de suas moléculas?
15. O ar da sala onde você se encontra contém, entre outros, os seguintes gases: O_2 , CO_2 , H_2O , N_2 e H_2 . Suponha que a temperatura do ar seja a mesma em qualquer ponto da sala.
- a) Qual desses gases possui moléculas com maior energia cinética média?
b) Coloque estes gases em ordem crescente dos valores das velocidades médias de suas moléculas.
16. Pesa-se um balão de borracha vazio, encontrando-se o valor P .
- a) Pesando-se o balão cheio de ar, à pressão de 1,0 atm, o valor encontrado será maior, menor ou igual a P ? (Lembre-se do empuxo que o balão recebe do ar.)
b) Pesando-se o balão cheio de ar à pressão de 1,5 atm, o valor encontrado será maior, menor ou igual a P ?
17. Em uma experiência com um gás ideal, verificou-se que sua pressão p variava em proporção direta com seu volume.
- a) Você acha que a temperatura T do gás permaneceu constante durante a experiência?
b) Que tipo de relação entre T e V foi mantida nesta experiência?
18. Mostre que a expressão $p = (1/3) (N/V) m\bar{v}^2$ pode ser escrita sob a seguinte forma: $p = (1/3) \rho \bar{v}^2$, onde ρ é a densidade do gás.
19. a) Se um corpo fosse lançado para cima com uma velocidade de 11 km/s, ele se afastaria indefinidamente da Terra, isto é, ele escaparia da atração gravitacional terrestre (esta velocidade é denominada velocidade de escape). Baseando-se nesta informação, procure explicar por que os gases de pequenas massas moleculares (hidrogênio, hélio etc.) são mais raros em nossa atmosfera.
- b) Sabe-se que o valor da velocidade de escape na Lua é bem menor do que na Terra. Este fato poderia ser uma justificativa para a inexistência de atmosfera na Lua?
20. Um gás se encontra em equilíbrio no interior de um cilindro vertical, ocupando um volume de 5,0 L. O cilindro é provido de um êmbolo móvel, sem atrito, de massa $m = 6,0$ kg e de área $A = 20$ cm². Coloca-se um novo êmbolo, idêntico ao primeiro, sobre o conjunto e, restabelecido o equilíbrio, o volume ocupado pelo gás passa a ser de 4,0 L. Sabendo-se que a temperatura do gás permaneceu constante durante a experiência, determine o valor local da pressão atmosférica (considere $g = 10$ m/s²).
21. Suponha que um gás ideal tenha sofrido uma transformação isobárica, na qual sua temperatura varia de 27 °C para 57 °C. Qual seria a porcentagem de variação que o volume do gás iria experimentar?
22. Um recipiente contém n moles de um gás ideal. Este gás sofre uma transformação, verificando-se que sua pressão reduziu-se à metade, seu volume quadruplicou e sua temperatura absoluta triplicou. Qual a fração do número de moles que escapou do recipiente durante esta transformação?
23. O valor da relação pV/T :
- a) Para um dado gás ideal, depende de sua massa?
b) Varia quando a temperatura de uma dada massa de um certo gás ideal se altera?
c) Tem o mesmo valor para uma dada massa de gases ideais diferentes?
24. O gráfico deste problema representa transformações sofridas por 88 g de CO_2 .
- a) Classifique as transformações AB e BC.
b) Determine a temperatura do gás em A.
c) A isoterma deste gás que passa pelo ponto A, em que ponto corta BC? Desenhe na figura a forma aproximada desta isoterma.
d) Poderia uma dada isoterma de outro gás qualquer passar pelos pontos A e C?



Problema 24.

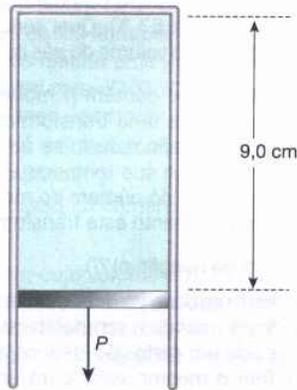
25. Dois gases ideais A e B encontram-se em recipientes separados nas seguintes condições:

Gás A: $V_A = 5,0 \text{ L}$; $p_A = 3,0 \text{ atm}$ e $t_A = 27 \text{ }^\circ\text{C}$

Gás B: $V_B = 4,0 \text{ L}$; $p_B = 4,0 \text{ atm}$ e $t_B = 227 \text{ }^\circ\text{C}$

Esses gases são misturados em um mesmo recipiente de volume $V = 8,0 \text{ L}$, a uma temperatura $t = 127 \text{ }^\circ\text{C}$. Qual será a pressão que esta mistura exercerá nas paredes do recipiente?

Observação: A partir das idéias fundamentais da teoria cinética, é fácil concluir que "a pressão exercida por uma mistura de gases, em um recipiente, é igual à soma das pressões que cada gás exerceria se ocupasse isoladamente o recipiente". Este resultado foi observado experimentalmente por Dalton, antes do estabelecimento da teoria cinética e por isso costuma ser denominado Lei de Dalton.



Problema 26.

26. Um gás está contido em um cilindro, provido de um pistão de peso $P = 200 \text{ N}$ e área da seção reta $A = 100 \text{ cm}^2$. Inicialmente o sistema está em equilíbrio nas condições mostradas na figura deste pro-

blema. Invertendo-se o cilindro de modo que o pistão passe a comprimir o gás, qual será a nova altura que este gás ocupará dentro do cilindro? Suponha que a temperatura foi mantida constante e que a pressão atmosférica local vale $1,0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$.

27. Um balão esférico, contendo gás hélio, é solto ao nível do mar, num local onde a temperatura é de $27 \text{ }^\circ\text{C}$. O balão sobe, mantendo-se em equilíbrio térmico com o ar atmosférico, até atingir uma altitude onde a pressão atmosférica é 90% da pressão ao nível do mar e a temperatura do ar é de $-3,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Qual a relação entre os raios do balão, ao nível do mar e na altitude considerada? (Suponha que a pressão no interior do balão seja igual à pressão atmosférica externa.)
28. Um gás ideal encontra-se no interior de um cilindro metálico, provido de um êmbolo e de uma torneira, a uma pressão inicial de $4,0 \text{ atm}$. Abre-se a torneira e desloca-se o êmbolo de forma que metade da massa do gás escape lentamente. Sabendo-se que o gás que permanece no cilindro passa a ocupar um volume igual a $2/3$ do volume inicial, determine o valor de sua pressão.
29. A densidade do ar é $1,3 \text{ g/L}$, à pressão atmosférica normal e a uma temperatura de $27 \text{ }^\circ\text{C}$. Num compressor, onde o ar está submetido a uma pressão de 12 atm e a temperatura é de $87 \text{ }^\circ\text{C}$, qual será a densidade do ar?
30. Deseja-se representar uma transformação isotérmica de um gás ideal em um gráfico $pV \times V$.
- Mostre, em um diagrama, como seria a isoterma correspondente a uma transformação realizada à temperatura absoluta T .
 - No mesmo diagrama, desenhe a isoterma correspondente à temperatura absoluta $2T$.

estibular questões de vestibular questões de vesti

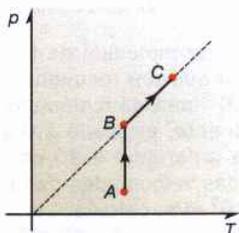
As questões de vestibular se encontram no final do livro.

ntares problemas suplementares problemas supl

1. Um reservatório de 30 L contém nitrogênio, no estado gasoso (diatômico), à temperatura ambiente de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e à pressão de $3,0 \text{ atm}$. A válvula do reservatório é aberta momentaneamente e uma certa quantidade de gás escapa para o meio ambiente, fazendo com que a pressão do gás restante no reservatório seja de $2,4 \text{ atm}$. Determine, em gramas, a massa de nitrogênio que escapou.

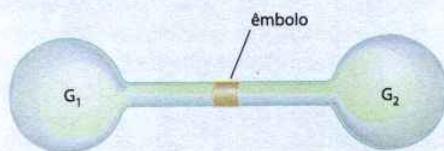
2. Uma determinada massa de um gás ideal sofre as transformações AB e BC mostradas na figura deste problema. Represente estas transformações:

- a) Em um diagrama $p \times V$.
b) Em um diagrama $V \times T$.



Problema suplementar 2.

3. Dois balões esféricos de raios R_1 e $R_2 = 4R_1$ contêm massas iguais de oxigênio e hidrogênio, respectivamente, e estão na mesma temperatura. Qual a razão entre as pressões exercidas por estes gases nas paredes dos balões?
4. Um gás ideal, contido em um recipiente, experimenta uma elevação de temperatura de 300 K para 1 200 K. Suponha que a velocidade média das moléculas desse gás tenha passado de um valor v_1 para v_2 . Qual o valor da relação v_2/v_1 ?
5. Dois gases ideais, G_1 e G_2 , estão contidos em recipientes rígidos, ligados por um tubo longo, de seção reta igual a $3,0 \text{ cm}^2$ (veja a figura deste problema). Os gases, que inicialmente têm volumes iguais a $1\ 000 \text{ cm}^3$ e temperaturas iguais a 27°C , são separados por um êmbolo que pode mover-se sem atrito. Suponha que a temperatura de G_1 aumente de 20°C e a de G_2 diminua, também, de 20°C . Sabendo-se que durante essa transformação o êmbolo permanece no tubo longo, determine o deslocamento que ele sofre.

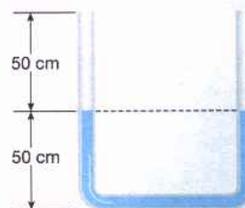


Problema suplementar 5.

6. Um recipiente, de volume igual a $8,0 \text{ m}^3$, contém um gás ideal à temperatura de 300 K e à pressão de $2,0 \times 10^4 \text{ N/m}^2$.
- a) Qual é o número total de moléculas do gás no recipiente?
b) Qual é a energia cinética total das moléculas desse gás?
c) Suponha que uma energia cinética igual àquela calculada em (b) fosse comunicada a um corpo de massa $m = 1,0 \text{ kg}$, arremessando-o vertical-

mente para cima. Desprezando a resistência do ar, calcule a altura que seria atingida pelo corpo ($g = 10 \text{ m/s}^2$).

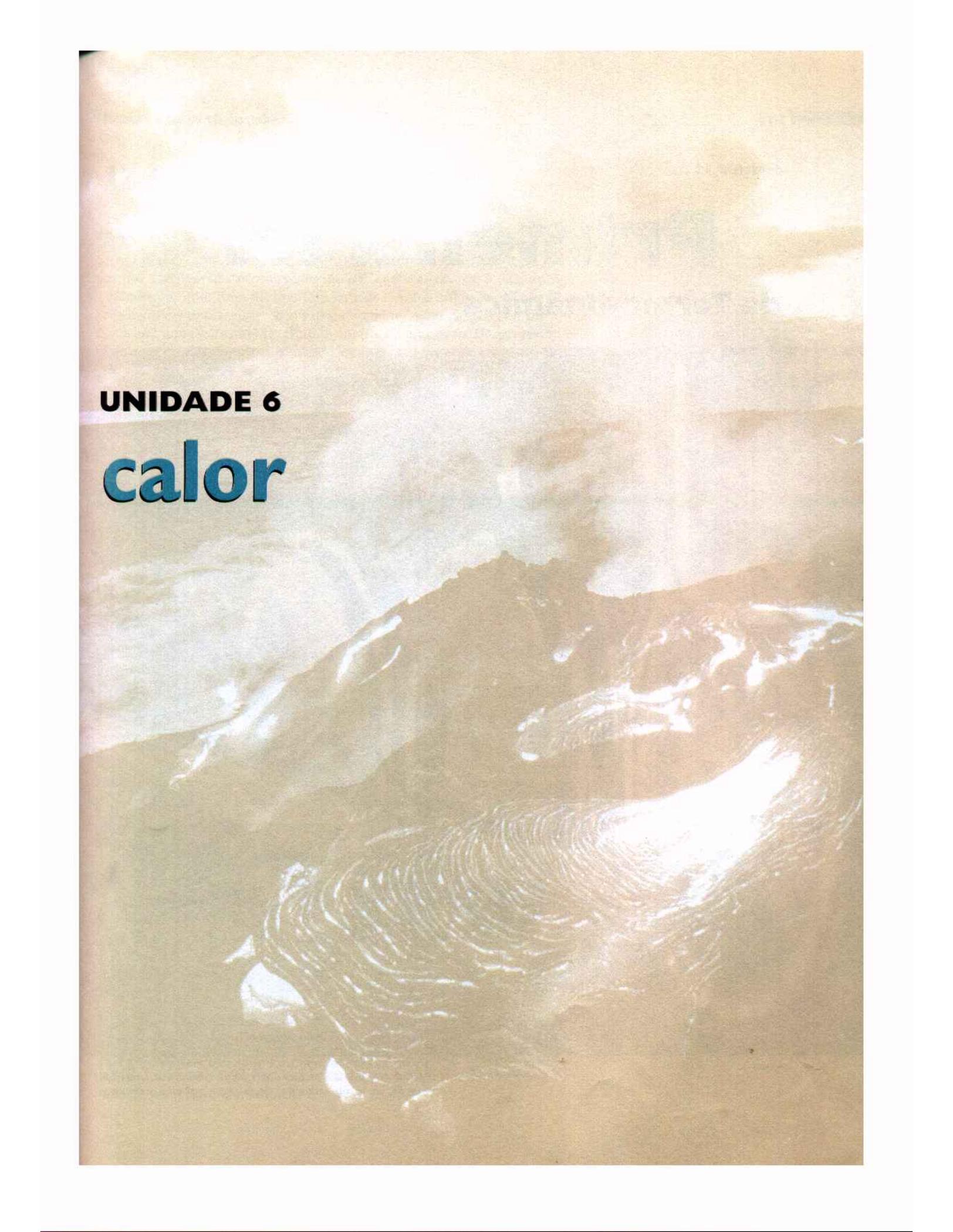
7. Em um barômetro de Torricelli, a altura da coluna de Hg é igual a 74,0 cm. Suspeita-se que haja um pouco de ar no espaço que fica acima do Hg, cuja altura é igual a 6,0 cm. A extremidade inferior do tubo barométrico é afundada um pouco mais no reservatório, verificando-se que a altura da coluna de Hg passa a ser de 73,0 cm e a altura do espaço acima desta coluna passa a ser de 4,0 cm. Determine o valor da pressão atmosférica local (suponha a temperatura constante).
8. Uma certa massa de um gás ideal está encerrada em um frasco aberto, à temperatura de $7,0^\circ\text{C}$. A que temperatura deve ser aquecido este gás para que $1/5$ da massa gasosa escape do frasco?
9. O tubo em U, mostrado na figura deste problema, contém Hg e possui seção reta uniforme, cuja área é igual a $1,0 \text{ cm}^2$. Fecha-se a extremidade esquerda do tubo e liga-se uma bomba de alto vácuo na extremidade direita. Suponha a temperatura constante e considere que a pressão atmosférica local é de 75 cm de Hg.
- a) Determine de quanto desce o nível de Hg, no lado esquerdo.
b) Que alteração haveria na resposta da questão anterior se a área da seção reta do tubo fosse de $2,0 \text{ cm}^2$?



Problema suplementar 9.

10. Usando o valor do número de Avogadro, determine o número de moléculas em 1 cm^3 de um gás ideal, nas condições normais de temperatura e pressão ($t = 0^\circ\text{C}$ e $p = 1 \text{ atm}$). Esse número é conhecido com a denominação "número de Loschmidt".
11. Um tubo cilíndrico de vidro, de 120 cm de comprimento, fechado em uma de suas extremidades, é colocado verticalmente. Coloca-se mercúrio neste tubo, até uma altura de 90 cm e, tampando-se a extremidade aberta, inverte-se o tubo e em seguida introduz-se esta extremidade em um recipiente contendo, também, mercúrio, de modo que ela fique 15 cm abaixo da superfície do líquido no recipiente. Sabendo-se que a pressão atmosférica local é de 75 cm de Hg, calcule a altura que o ar ocupará no tubo, depois que se destapar a extremidade mergulhada. Suponha que a temperatura tenha sido mantida constante.

12. Dois recipientes, H e N , de mesmo volume, estão à mesma temperatura, contendo respectivamente $1,0 \text{ kg}$ de gás H_2 e $1,0 \text{ kg}$ de gás N_2 .
- Qual o recipiente que contém maior número de moléculas? Quantas vezes mais?
 - Em qual recipiente a pressão é maior? Quantas vezes maior?
 - Em qual recipiente a velocidade média das moléculas é maior? Quantas vezes maior?
13. Um recipiente, de volume igual a $2,0 \text{ L}$, é provido de uma válvula e contém oxigênio a 300 K e à pressão atmosférica. O conjunto é aquecido até 400 K , com a válvula aberta para a atmosfera. Em seguida a válvula é fechada e o recipiente é esfriado até sua temperatura original. Calcule o valor da pressão final do oxigênio no recipiente.
14. Um recipiente cilíndrico vertical tem 100 cm de altura. Sua extremidade superior está fechada por um pistom, de peso desprezível, bem-adaptado ao cilindro e que pode deslizar sem atrito. A pressão do ar no cilindro é de $1,0 \text{ atm}$. Verte-se mercúrio lentamente sobre o pistom, de modo a comprimir isotermicamente o ar. Determine a máxima distância que o pistom pode descer antes que o mercúrio comece a entornar pela borda superior do cilindro.
15. A massa da molécula de H_2 é $3,3 \times 10^{-27} \text{ kg}$. Suponha que um recipiente contém H_2 e que $1,0 \times 10^{23}$ dessas moléculas colidem perpendicularmente, em cada $1,0 \text{ s}$, contra uma parede de área igual a 30 cm^2 . Supondo que a média das velocidades das moléculas seja de $1,0 \times 10^3 \text{ m/s}$, calcule:
- O impulso exercido pelas moléculas, durante $1,0 \text{ s}$, contra aquela parede;
 - A pressão que o gás exerce sobre aquela parede.



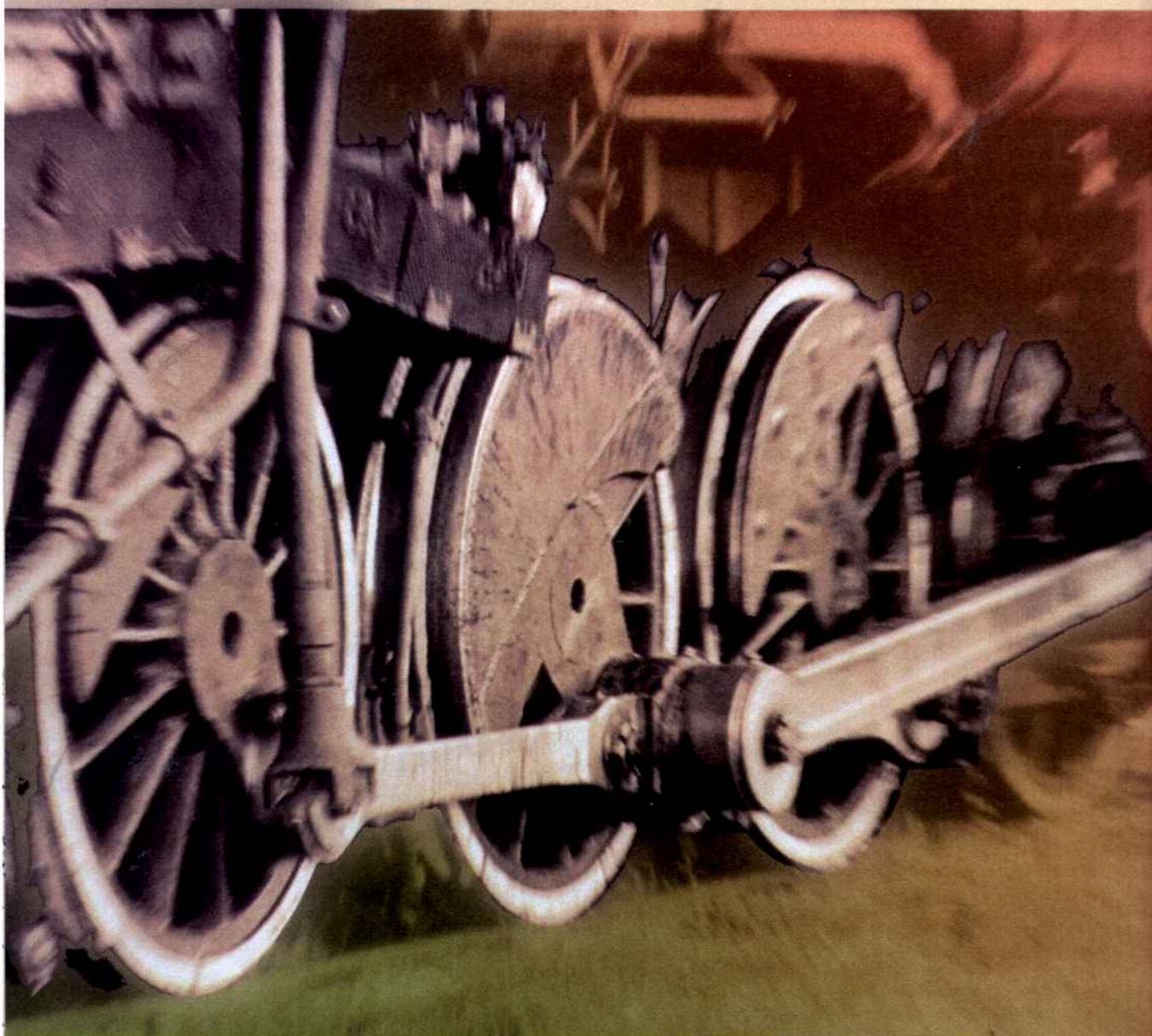
UNIDADE 6

calor

capítulo 12

Primeira lei

da Termodinâmica



Keystone

Rodas de uma locomotiva a vapor em movimento. A máquina a vapor é um dispositivo que permite a transformação, em escala industrial, de calor em trabalho mecânico.

12.1. O calor como energia

A TEORIA DO CALÓRICO

Quando analisamos o conceito de equilíbrio térmico, vimos que, se dois corpos a temperaturas diferentes são colocados em contato, eles atingem, após um certo tempo, uma mesma temperatura. Até o início do século passado, os cientistas explicavam este fato supondo que todos os corpos continham, em seu interior, uma substância fluida, invisível, de peso desprezível, que era denominada *calórico*. Quanto maior fosse a temperatura de um corpo, maior seria a quantidade de calórico em seu interior. De acordo com este modelo, quando dois corpos, a temperaturas diferentes, eram colocados em contato, haveria passagem de calórico do corpo mais quente para o mais frio, acarretando uma diminuição na temperatura do primeiro e um aumento na temperatura do segundo corpo. Quando os corpos atingiam a mesma temperatura, o fluxo de calórico era interrompido e eles permaneciam, a partir daquele instante, em equilíbrio térmico.

Apesar de esta teoria ser capaz de explicar satisfatoriamente um grande número de fenômenos, alguns físicos mostravam-se insatisfeitos em relação a certos aspectos fundamentais da idéia do calórico e tentaram substituí-la por outra, mais adequada, na qual o calor é considerado como uma forma de energia.

CALOR É ENERGIA

A idéia 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 teve a idéia de atribuir este 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 uma elevação em suas temperaturas. Portanto, a antiga idéia de que um corpo mais aquecido possui maior quantidade de *calórico* começava a ser substituída pela idéia de que este corpo possui, realmente, maior quantidade de *energia* em seu interior.

Conde Rumford (1753-1814)

Engenheiro americano que, sendo leal à coroa britânica durante a Revolução da Independência Americana, viu-se obrigado a se exilar na Inglaterra, onde trabalhou como alto funcionário do governo. Após ser sagrado cavaleiro 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.



A divulgação destas idéias provocou muitas discussões entre os cientistas do século passado. Alguns deles realizaram experiências que vieram confirmar as suposições de Rumford. Entre estes cientistas, devemos destacar James P. Joule (1818-1889), cujas célebres experiências acabaram por estabelecer, definitivamente, que o calor é uma forma de energia.

Modernamente, considera-se que, quando a temperatura de um corpo é aumentada, a energia que ele possui em seu interior, denominada *energia interna*, também aumenta. Se este corpo é colocado em contato com outro, de temperatura mais baixa, haverá transferência de energia do primeiro para o segundo, energia esta que é denominada calor. Portanto, o conceito moderno de calor é o seguinte:

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

COMENTÁRIOS

- 1) Deve-se observar que o termo *calor* só deve ser usado para designar a energia em *trânsito*, isto é, enquanto ela está sendo transferida de um corpo para outro, em virtude de uma diferença de temperatura. A transferência de calor para um corpo acarreta um aumento na energia de agitação de seus átomos e moléculas, ou seja, acarreta um aumento da *energia interna* do corpo o que, em geral, provoca uma elevação em sua temperatura. Não se pode, portanto, dizer que “um corpo possui calor” ou que “a temperatura é uma medida do calor no corpo”. Na realidade, o que um corpo possui é *energia interna* e quanto maior for a sua temperatura, maior será esta energia interna. Naturalmente, se um corpo está a uma temperatura mais elevada do que outro, ele pode transferir parte de sua energia interna para este outro. Esta energia transferida é o calor que está passando de um corpo para o outro (fig. 12-1).

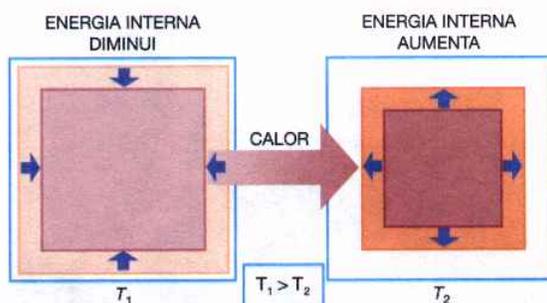


Fig. 12-1: Calor é a energia que se transfere de um corpo para outro em virtude de uma diferença de temperatura entre eles.

- 2) É importante observar, ainda, que a energia interna de um corpo pode aumentar sem que o corpo receba calor, desde que receba alguma outra forma de energia.

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

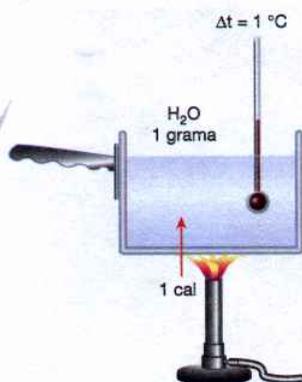


Fig. 12-2: 1 caloria é a quantidade de calor necessária para elevar de 1°C a temperatura de 1 g de água. Ilustração esquemática.

UNIDADES DE CALOR

Uma vez estabelecido que o calor é uma forma de energia, é evidente que uma certa quantidade de calor deve ser medida em unidades de energia. Então, no S.I., mediremos o calor em *joules*.

Entretanto, na prática, é até hoje usada uma outra unidade de calor, muito antiga (da época do calórico), denominada 1 caloria = 1 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 (fig. 12-2).

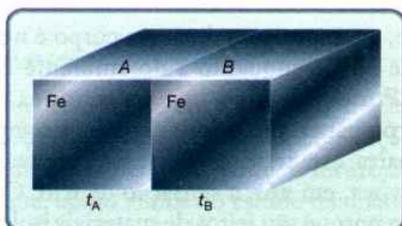
Em suas experiências já mencionadas, Joule estabeleceu a relação entre estas duas unidades, encontrando

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

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, **responda** às questões seguintes, **consultando o texto** sempre que julgar **necessário**.

- Dois blocos idênticos, A e B, ambos de ferro, são colocados em contato e isolados de influências externas, como mostra a figura deste exercício. As temperaturas iniciais dos blocos são $t_A = 200^\circ\text{C}$ e $t_B = 50^\circ\text{C}$.
 - Depois de um certo tempo, o que ocorreu com a temperatura t_A ? E com t_B ?
 - De acordo com os cientistas anteriores a Rumford e Joule, qual era a causa das variações das temperaturas t_A e t_B ?



Exercício 1.

- Considere, ainda, os blocos do exercício anterior. De acordo com o ponto de vista dos cientistas atuais:
 - Depois de um certo tempo, o que ocorreu com a energia interna de A? E com a de B?

- Houve transferência de energia de um bloco para outro? Em que sentido?
 - Como se denomina esta energia transferida?
- Uma pessoa, usando um martelo, golpeia repetidas vezes um bloco de Pb. Verifica-se que a temperatura do bloco se eleva apreciavelmente. Lembrando-se do 2º comentário feito nesta seção, responda:
 - A energia interna do bloco de Pb aumentou?
 - Houve alguma transferência de calor para o Pb?
 - Então, qual foi a causa do aumento da energia interna do bloco de Pb?
 - No exercício 1, suponha que 100 cal de calor foram transferidas de A para B. Qual é, em joules, o valor desta quantidade de calor?
 - Suponha que o trabalho total realizado pelo martelo sobre o bloco de Pb, no exercício anterior, tenha sido de 836 J. Qual a quantidade de calor, em calorias, que deveria ser fornecida ao Pb para provocar nele a mesma elevação de temperatura?

12.2. 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 (fig. 12-3-a). Os átomos ou moléculas desta extremidade, aquecida pela chama, adquirem uma maior energia de agitação. Parte desta energia é transferida para as partículas da região vizinha a esta extremidade e, então, a temperatura desta região também aumenta. Este processo continua ao longo da barra (fig. 12-3-b) e, após um certo tempo, a pessoa que segura a outra extremidade perceberá uma elevação de temperatura neste local.

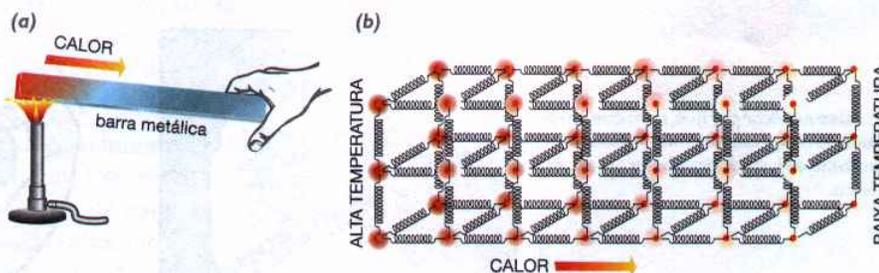


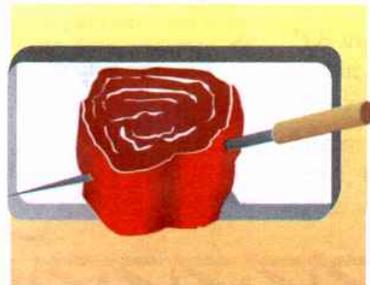
Fig. 12-3: O calor se transfere, por condução, ao longo de um sólido, através da agitação dos átomos e moléculas deste sólido. Ilustração esquemática.

Houve, portanto, uma transmissão de calor ao longo da barra, que continuará enquanto existir uma diferença de temperatura entre as duas extremidades. Observe que esta transmissão foi feita pela agitação dos átomos da barra, transferida sucessivamente de um para outro, sem que estes átomos sofressem translação ao longo do corpo. Este processo de transmissão de calor é denominado *condução*. A maior parte do calor que é transferido através dos corpos 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 esta substância seja boa ou má condutora de calor. Assim, os metais, por exemplo, são bons condutores de calor, enquanto outras substâncias, como o isopor, a cortiça, a porcelana, a madeira, o ar, o gelo, a lã, o papel etc., são isolantes térmicos, isto é, conduzem mal o calor.



Fig. 12-4: Uma pessoa sente frio quando ela perde calor rapidamente para o meio ambiente.



Procure explicar por que, para que um pedaço de carne cozinhe mais rapidamente, costuma-se introduzir nele um espeto metálico.



Fig. 12-5: O pássaro eriça suas penas para manter ar entre elas, evitando que haja transferência de calor de seu corpo para o ambiente.



Fig. 12-6: Embora o metal e a madeira estejam à mesma temperatura, a peça metálica parece estar mais fria.

COMENTÁRIOS

Como você sabe, a temperatura de nosso corpo é normalmente mantida em torno de 36°C , enquanto a do ambiente é, em geral, inferior a este valor. Por este motivo, há uma contínua transmissão de calor de nosso corpo para o meio ambiente. Se a temperatura do ambiente for muito baixa, esta transmissão se faz com maior rapidez, sendo isto o que provoca, em nós, a sensação de frio. Os agasalhos atenuam esta sensação porque são feitos de materiais isolantes térmicos (lã, por exemplo), reduzindo, assim, a quantidade de calor que é transmitida de nosso corpo para o exterior (fig. 12-4). É também para obter este efeito que, em dias frios, uma ave eriça suas penas, de modo a manter, entre elas, camadas de ar, que é um bom isolante térmico (fig. 12-5).

Quando tocamos em uma peça de metal e em um pedaço de madeira, ambos em um mesmo ambiente, isto é, ambos à mesma temperatura, o metal nos dá a sensação de estar mais frio do que a madeira. Isto ocorre porque, sendo o metal um condutor térmico melhor do que a madeira, haverá uma maior transferência de calor de nossa mão para a peça metálica do que para o pedaço de madeira (fig. 12-6).

CONVECÇÃO

Quando um recipiente, com água, é colocado sobre uma chama, a camada de água do fundo do recipiente recebe calor da chama, por condução. Conseqüentemente, o volume desta camada aumenta e, então, 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 desta região superior. O processo continua, com uma circulação contínua de corrente de água mais quente para cima e mais fria para baixo, denominadas *correntes de convecção* (fig. 12-7). Assim, o calor que é transmitido, por condução, às camadas inferiores, vai sendo distribuído, por convecção, a toda a massa do líquido, através do movimento de translação do próprio líquido.

A transferência de calor, nos líquidos e gases, pode-se fazer por condução, mas o processo de convecção é o responsável pela maior parte do calor transferido através dos fluidos.



Fig. 12-7: Em um líquido, o calor se transfere de um ponto a outro devido à formação de correntes de convecção. Ilustração esquemática.

COMENTÁRIOS

Podemos encontrar, em nossa vida diária, várias situações em que as correntes de convecção desempenham um papel importante. A formação dos ventos que, como vimos no estudo da dilatação, é devida a variações da densidade do ar, nada mais é do que o resultado de correntes de convecção que ocorrem na atmosfera.

Em uma geladeira observa-se, também, a formação de correntes de convecção. Na parte superior, as camadas de ar, em contato com o congelador, cedem calor a ele por condução. Por causa disso, o ar desta região torna-se mais denso e dirige-se para a parte inferior da geladeira, enquanto as camadas de ar desta parte se deslocam para cima (fig. 12-8). Esta circulação de ar, causada pela convecção, faz com que a temperatura seja, aproximadamente, a mesma em todos os pontos do interior da geladeira.

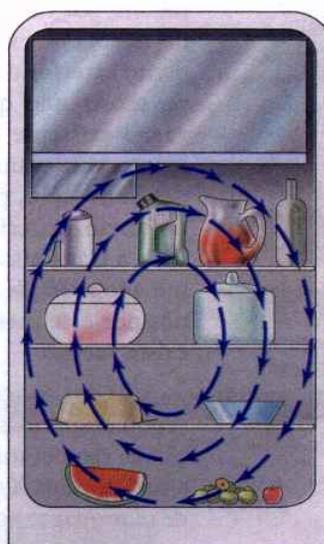


Fig. 12-8: No interior de uma geladeira formam-se correntes de convecção. Ilustração esquemática.

Até alguns anos atrás, o aquecimento de água nas residências era feito nos fogões a lenha, utilizando-se do fenômeno da convecção. A água mais fria, vinda da caixa, circulava através de uma serpentina colocada no interior do fogão (fig. 12-9). Recebendo calor, a água aquecida tornava-se menos densa e voltava à caixa, subindo pelo outro ramo da canalização, como mostra a fig. 12-9. Até hoje este processo é usado em muitas casas antigas, em fazendas, por exemplo, que não possuem aquecedores elétricos.

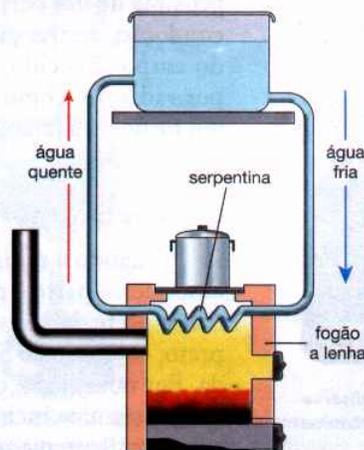


Fig. 12-9: Em residências que possuíam fogão a lenha, o aquecimento da água era feito em serpentinas, onde ela circulava por convecção.

As correntes de convecção na atmosfera, ao se moverem para cima (ar mais quente), costumam ser aproveitadas por alguns pássaros, aviões planadores (sem motor) e asas-delta para ganharem altura, planando em seguida (perdendo altitude), até encontrarem outra corrente de convecção ascendente. Desta maneira, estes dispositivos conseguem percorrer enormes distâncias, sem consumo de combustível próprio.



As correntes de convecção na atmosfera são o combustível de um planador e de uma asa-delta.

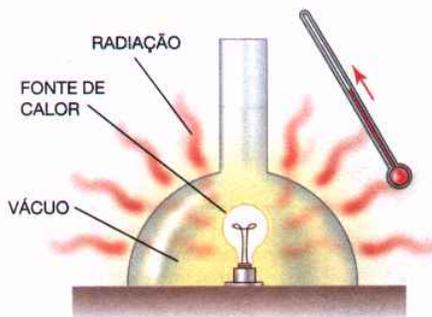


Fig. 12-10: O calor se propaga, no vácuo, por radiação. Representação esquemática.

RADIAÇÃO

Suponha que um corpo aquecido (uma lâmpada de filamento, por exemplo) seja colocado no interior de uma campânula de vidro, onde se fez o vácuo (fig. 12-10). Um termômetro, situado no exterior da campânula, acusará uma elevação de temperatura, mostrando que houve uma transmissão de calor através do vácuo existente entre o corpo aquecido e o exterior. Evidentemente, esta transmissão não pode ter sido feita por condução ou por convecção, pois estes processos só podem ocorrer quando há um meio material através do qual o calor é transmitido. Neste caso, a transmissão de calor foi feita por um outro processo, denominado *radiação térmica*. O calor que recebemos do Sol chega até nós por este mesmo processo, uma vez que entre o Sol e a Terra existe vácuo.

Todos os corpos aquecidos emitem radiações térmicas que, ao serem absorvidas por um outro corpo, provocam, nele, uma elevação de temperatura. Estas radiações, assim como as ondas de rádio, a luz, os raios X etc., são tipos de ondas eletromagnéticas, capazes de se propagar no vácuo e que serão estudadas mais tarde.

De um 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 ou a uma fogueira.



Fig. 12-11: Um corpo escuro absorve maior quantidade de radiação térmica do que um corpo claro.

COMENTÁRIOS

Quando a radiação térmica incide em um corpo, parte dela é absorvida e parte é refletida por ele. Os corpos escuros absorvem a maior parte da radiação que neles incide. É por isso que um objeto preto, colocado ao Sol, tem a sua temperatura sensivelmente elevada. Por outro lado, os corpos claros refletem quase totalmente a radiação térmica incidente. Por isso, nos climas quentes, as pessoas usam freqüentemente roupas brancas (fig. 12-11).

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

5. Considere duas barras, sendo uma de metal e a 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?
6. a) Uma pessoa afirma que seu agasalho é de boa qualidade "porque impede que o frio passe através dele". Esta afirmativa é correta? Explique.

b) Um menino descalço, em uma sala ladrilhada, coloca seu pé esquerdo diretamente sobre o ladrilho e seu pé direito sobre um tapete aí existente. O tapete e o ladrilho estão a uma mesma temperatura. Em qual dos dois pés o menino terá maior sensação de frio? Explique.
7. a) Por que, em uma geladeira, as camadas de ar próximas ao congelador, após entrarem em contato com ele, dirigem-se para baixo?

b) Se o congelador fosse colocado na parte inferior de uma geladeira haveria formação das correntes de convecção? Explique.
8. Lembrando-se dos comentários feitos sobre o mecanismo de resfriamento do interior de uma geladeira, responda:

 - a) Por que as prateleiras de uma geladeira não podem ser feitas com chapas inteiriças?
 - b) Por que se deve evitar encher demasiadamente uma geladeira?
9. 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 uma grande quantidade de calor. Por quê?

b) Dois automóveis, um claro e outro escuro, permanecem estacionados ao Sol durante um certo tempo. Qual dos dois você acha que se aquecerá mais? Explique.

12.3. Capacidade térmica e calor específico

CAPACIDADE TÉRMICA

Suponha que uma quantidade de calor igual a 100 cal fosse fornecida a um corpo A e que sua temperatura se elevasse de 20°C . Entretanto, fornecendo-se a mesma quantidade de calor (100 cal) a um outro corpo B , poderemos observar uma elevação de temperatura diferente, por exemplo, de 10°C (fig. 12-12). Portanto, fornecendo a mesma quantidade de calor a corpos diferentes, eles, em geral, apresentam variações diferentes em suas temperaturas. Para caracterizar este com-

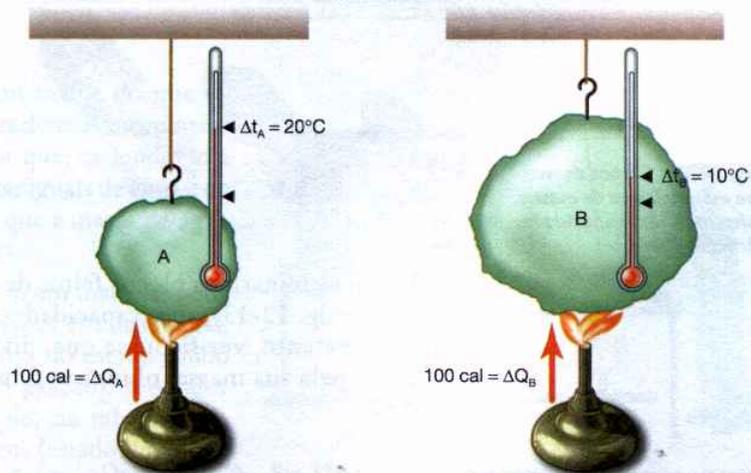


Fig. 12-12: Corpos diferentes geralmente sofrem diferentes variações de temperatura ao receberem a mesma quantidade de calor.

portamento dos corpos, define-se uma grandeza, denominada *capacidade térmica*, do seguinte modo:

se um corpo recebe uma quantidade de calor ΔQ e sua temperatura varia de Δt , a capacidade térmica deste corpo é dada por

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

Assim, calculando as capacidades térmicas dos corpos A e B citados (fig. 12-12), teremos

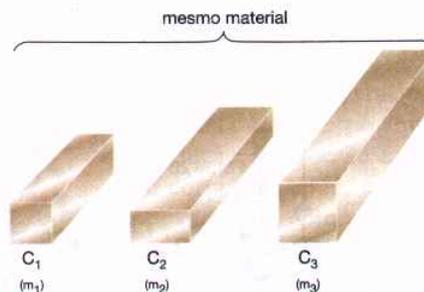
$$C_A = \frac{\Delta Q_A}{\Delta t_A} = \frac{100 \text{ cal}}{20^\circ\text{C}} \quad \text{donde} \quad C_A = 5,0 \text{ cal/}^\circ\text{C}$$

$$C_B = \frac{\Delta Q_B}{\Delta t_B} = \frac{100 \text{ cal}}{10^\circ\text{C}} \quad \text{donde} \quad C_B = 10 \text{ cal/}^\circ\text{C}$$

Estes resultados indicam que devemos fornecer, ao corpo A , 5,0 cal para cada 1°C de elevação em sua temperatura, enquanto, para o corpo B , são necessárias 10 cal para provocar este mesmo efeito. Logo, quanto maior for a capacidade térmica de um corpo, maior será a quantidade de calor que devemos fornecer a ele para provocar uma determinada elevação em sua temperatura e, do mesmo modo, maior será a quantidade de calor que ele cede quando sua temperatura sofre determinada redução.

Sendo a capacidade térmica de um corpo dada pela relação $C = \Delta Q/\Delta t$, uma unidade para a medida desta grandeza é $1 \text{ cal/}^\circ\text{C}$, que já usamos nesta secção. Como sabemos que o calor é uma forma de energia e pode, portanto, ser expresso em joules, poderemos usar, também, como unidade de capacidade térmica, $1 \text{ J/}^\circ\text{C}$.

Fig. 12-13: Corpos de mesmo material, mas de massas diferentes, têm capacidades térmicas diferentes.



CALOR ESPECÍFICO

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

Assim, se tomarmos blocos feitos de um mesmo material, de massas m_1 , m_2 , m_3 etc. (fig. 12-13), suas capacidades térmicas C_1 , C_2 , C_3 etc. serão diferentes. Entretanto, verificou-se que, dividindo-se a capacidade térmica de cada bloco pela sua massa, obtém-se o mesmo resultado para todos os blocos, isto é

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

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

se um corpo de massa m tem uma capacidade térmica C , o calor específico, c , do material que constitui o corpo 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. Conseqüentemente, o calor específico do chumbo vale

$$c = \frac{C}{m} = \frac{5,0 \text{ cal/}^\circ\text{C}}{170 \text{ g}} \quad \text{donde} \quad c = 0,030 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}$$

Observe a unidade para a medida do calor específico: cal/g°C. É claro que poderíamos também expressá-lo em joules/kg°C. O resultado obtido acima indica que, para elevarmos de 1°C a temperatura de 1 g de chumbo, devemos fornecer-lhe 0,030 cal de calor.

COMENTÁRIOS

- 1) Sendo o calor específico característico de cada material, seus valores, para cada substância, são determinados cuidadosamente nos laboratórios e apresentados em tabelas, como a tabela 12-1.
- 2) Na secção 12-1 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, então, concluir que o calor específico da água é

$$c = 1 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}$$

O calor específico da água é bem maior do que os calores específicos de quase todas as demais substâncias (veja a tabela 12-1). Isto significa que, cedendo-se a mesma quantidade de calor a massas iguais de água e de uma outra substância, observa-se que a massa de água se aquece muito menos (fig. 12-14).

- 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 12-1, 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 d'água é 0,50 cal/g°C.

Calores específicos	
Substância	c (cal/g · °C)
Água	1,00
Gelo	0,55
Vapor d'água	0,50
Alumínio	0,22
Vidro	0,20
Ferro	0,11
Latão	0,094
Cobre	0,093
Prata	0,056
Mercúrio	0,033
Chumbo	0,031

Tabela 12-1.

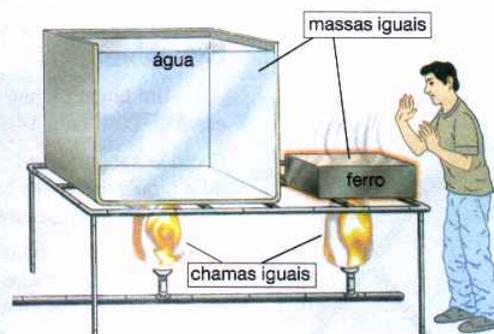
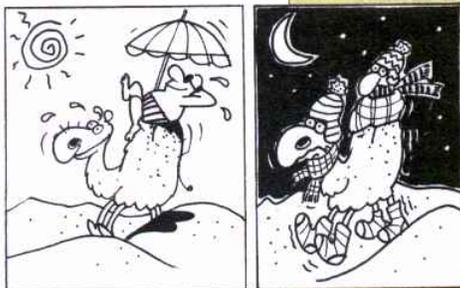


Fig. 12-14: Quando dois corpos de massas iguais recebem iguais quantidades de calor, o de menor calor específico sofrerá maior elevação de temperatura.



Durante o dia, a temperatura no deserto é muito elevada e, durante a noite, sofre uma grande redução. Isto ocorre em virtude do pequeno calor específico da areia.

Calor específico e temperatura ambiente

Acabamos de ver que, quanto maior o calor específico de uma substância, menos ela se aquece ao receber uma 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 situados em sua vizinhança. 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 que o daqueles objetos. Assim, é fácil entender por que é tão agradável mergulhar na água em um dia muito quente.

Por outro lado, como a areia tem um calor específico muito pequeno, ela se aquece e se resfria com facilidade. Por isso, nos desertos, embora os dias sejam excessivamente quentes, as noites costumam apresentar temperaturas muito baixas.

CÁLCULO DO CALOR ABSORVIDO POR UM CORPO

A capacidade térmica de um corpo foi definida como sendo $C = \Delta Q / \Delta t$. Então, a quantidade de calor, ΔQ , que um corpo 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 corpo, lembrando que $c = C/m$, donde $C = m \cdot c$. Assim, teremos, para ΔQ

$$\Delta Q = mc\Delta t$$

Chegamos, portanto, ao seguinte resultado:

a quantidade de calor, ΔQ , absorvida ou liberada por um corpo de massa m e calor específico c , quando sua temperatura varia de Δt , pode ser calculada pela relação

$$\Delta Q = mc\Delta t$$

Exemplo

Um bloco de alumínio, cuja massa é $m = 200$ g, absorve calor e sua temperatura se eleva de 20°C para 140°C . Qual a quantidade de calor absorvida pelo bloco?

Como já sabemos, esta quantidade de calor pode ser calculada por $\Delta Q = mc \Delta t$. Consultando a tabela 12-1, encontramos o valor do calor específico do alumínio: $c = 0,22$ cal/g $^\circ\text{C}$. A variação de temperatura do bloco foi $\Delta t = 140^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 120^\circ\text{C}$. Assim,

$$\Delta Q = mc\Delta t = 200 \times 0,22 \times 120 \quad \text{donde} \quad \Delta Q = 5,3 \times 10^3 \text{ cal}$$

Observe que o valor de ΔQ foi expresso em calorias porque tomamos m em gramas, c em cal/g $^\circ\text{C}$ e Δt em $^\circ\text{C}$. Então

$$\text{g} \times \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}} \times ^\circ\text{C} = \text{cal}$$

Se a temperatura do bloco retornasse de 140°C para 20°C , ele liberaria $5,3 \times 10^3$ cal de calor, isto é, a mesma quantidade de calor que absorveu ao ser aquecido.

exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, **responda** às questões seguintes, **consultando o texto** sempre que julgar necessário.

10. Um bloco metálico está inicialmente a uma temperatura de 20°C . Recebendo uma quantidade de calor $\Delta Q = 330 \text{ cal}$, sua temperatura se eleva para 50°C .
- Qual é o valor da capacidade térmica do bloco?
 - Diga, com suas palavras, o significado do resultado que você encontrou em (a).
11. Considerando o bloco do exercício anterior, responda:
- Quantas calorias deveriam ser fornecidas a ele para que sua temperatura se elevasse de 20°C para 100°C ?
 - Quantas calorias seriam liberadas pelo bloco se sua temperatura baixasse de 100°C para 0°C ?
12. Sabe-se que a massa do bloco do exercício 10 é $m = 100 \text{ g}$.
- Qual é o valor do calor específico do material que constitui o bloco?
 - Este material encontra-se relacionado na tabela 12-1. Identifique-o.
 - Diga, com suas palavras, o significado do resultado encontrado em (a).
13. Suponha que dois blocos, A e B, ambos de Zn, tenham massas m_A e m_B , tais que $m_A > m_B$.
- O calor específico de A é maior, menor ou igual ao de B?
 - A capacidade térmica de A é maior, menor ou igual à de B?
 - Se A e B sofrerem o mesmo abaixamento de temperatura, qual deles liberará maior quantidade de calor?
14. Considere 1 kg de água e 1 kg de Hg. Consultando a tabela 12-1, responda:
- A capacidade térmica desta massa de água é maior, menor ou igual à do Hg?
 - Cedendo-se a mesma quantidade de calor à água e ao Hg, qual deles sofrerá maior elevação de temperatura?
 - Se a água e o Hg se encontrarem, inicialmente, ambos à temperatura de 60°C , qual deles será mais eficiente para aquecer os pés de uma pessoa em um dia frio?
15. a) Um bloco de cobre, de massa $m = 200 \text{ g}$, é aquecido de 30°C até 80°C . Qual a quantidade de calor que foi cedida ao bloco?
 b) Se fornecermos a este bloco 186 cal de calor, de quanto se elevará sua temperatura?

12.4. Trabalho em uma variação de volume

O QUE É UM SISTEMA

A palavra *sistema* é usada, na Física, para designar um corpo (ou um conjunto de corpos) sobre o qual fixamos nossa atenção a fim de estudá-lo. Tudo aquilo que não pertencer ao sistema, isto é, o *resto do universo*, 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, uma certa quantidade, Q , de calor poderá ser transferida de um para o outro (fig. 12-15). Além disso, o sistema pode se expandir, vencendo uma pressão externa e, portanto, realizando trabalho sobre a vizinhança

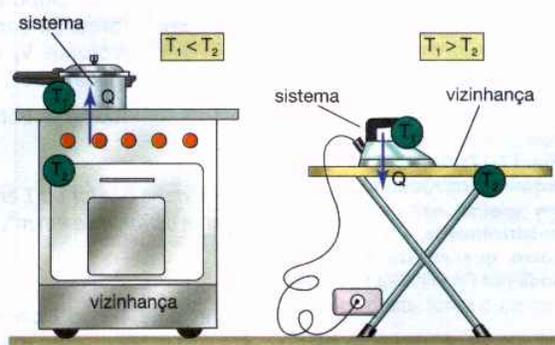


Fig. 12-15: Ilustração esquemática. Um sistema pode trocar energia com a vizinhança sob a forma de calor.

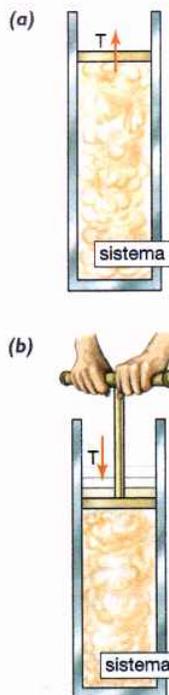


Fig. 12-16: Ilustração esquemática. Um sistema pode trocar energia com a vizinhança por meio da realização de trabalho.

(fig. 12-16-a) ou, ainda, o sistema poderá ter o seu volume reduzido, com a realização de um trabalho da vizinhança sobre ele (fig. 12-16-b).

Nas seções anteriores, já analisamos as trocas de calor entre um sistema e sua vizinhança. Nesta seção, será analisado o trabalho realizado nas variações de volume do sistema e, na seção seguinte, estudaremos a 1ª lei da Termodinâmica, que estabelece uma relação entre estas energias que um sistema pode trocar com a sua vizinhança.

TRABALHO REALIZADO EM UMA EXPANSÃO

Para simplificar nosso estudo, consideraremos como sistema um gás ideal, encerrado em um cilindro provido de um êmbolo (pistom) que pode se deslocar livremente.

Suponha que o gás se encontre em um estado inicial i , ocupando um volume V_i (fig. 12-17). Em virtude da pressão do gás, ele exerce uma força \vec{F} sobre o pistom que, estando livre, desloca-se de uma distância d . Assim, o gás se expandiu até o estado final f onde o seu volume é V_f , e realizou um trabalho T . 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, T , realizado pelo gás, pode ser facilmente calculado. De fato, para este caso (força constante e no mesmo sentido do deslocamento), temos

$$T = F \cdot d$$

Mas $F = pA$, onde A é a área do pistom (fig. 12-17). Então

$$T = pAd$$

Observe, porém, que Ad é o volume "varrido" pelo pistom durante a expansão, que é igual à *variação* do volume do gás, isto é, $Ad = V_f - V_i$. Logo,

$$T = p(V_f - V_i)$$

Portanto, esta expressão nos permite calcular o trabalho que um gás realiza, ao sofrer uma variação de volume, *sob pressão constante*.

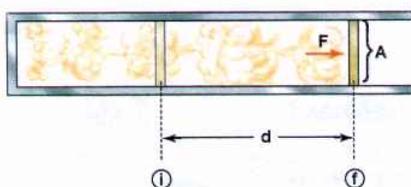


Fig. 12-17: Ilustração esquemática. Quando um gás se expande isobaricamente, o trabalho que realiza é dado por $T = p(V_f - V_i)$.

Exemplo

Suponha que, na fig. 12-17, o gás se expandiu, exercendo uma pressão constante $p = 2,0 \text{ atm}$, desde o volume $V_i = 200 \text{ cm}^3$ até o volume $V_f = 500 \text{ cm}^3$. Qual o trabalho realizado pelo gás nesta expansão?

Como se trata de uma expansão isobárica, este trabalho é dado por

$$T = p(V_f - V_i)$$

Para obtermos o valor de T em joules, isto é, no Sistema Internacional, devemos expressar p em N/m^2 e os volumes em m^3 . Consultando a tabela 7-1, vemos que $1 \text{ atm} = 1,01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$. Então

$$p = 2,0 \text{ atm} = 2,02 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

Evidentemente, sendo $1 \text{ cm}^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$, obtemos

$$V_i = 200 \text{ cm}^3 = 2,00 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \quad \text{e} \quad V_f = 500 \text{ cm}^3 = 5,00 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Logo

$$T = p(V_f - V_i) = 2,02 \times 10^5 (5,00 \times 10^{-4} - 2,00 \times 10^{-4}) \text{ ou } T = 60,6 \text{ J}$$

TRABALHO POSITIVO E TRABALHO NEGATIVO

A expressão $T = p(V_f - V_i)$ pode ser usada, também, para se 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. Neste caso, dizemos que o *trabalho foi realizado pelo sistema*. Quando ocorre uma compressão do gás, o volume final é menor do que o inicial e, então, $V_f - V_i$ será negativo, acarretando um trabalho também negativo. Nestas condições, 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. Se ele fosse comprimido, sob a mesma pressão, voltando ao volume inicial, diríamos que o trabalho realizado foi de - 60,6 J, ou que foi realizado, sobre o gás, um trabalho de 60,6 J.

De maneira geral, sempre que um sistema aumenta de volume (trabalho positivo) dizemos que ele realiza trabalho e, quando o seu volume é reduzido (trabalho negativo), dizemos que um trabalho foi realizado sobre ele. Evidentemente, se o volume do sistema for mantido constante (transformação isovolumétrica), o sistema não realiza trabalho, nem trabalho é realizado sobre ele, isto é, $T = 0$. De fato, se o volume permanece constante, não há deslocamento e, como sabemos, nestas condições não há realização de trabalho.

os de fixação **exErcÍcios de fixação** exErcÍcios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

16. Suponha, na fig. 12-7, que o gás se expandiu sob pressão constante $p = 3,0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$. Considerando a área do pistom $A = 5,0 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ e que ele tenha se deslocado de uma distância $d = 10 \text{ cm}$, responda:
 - a) Qual o valor da força \vec{F} que o gás exerce sobre o pistom?
 - b) Calcule o trabalho realizado pelo gás usando a expressão $T = F \cdot d$.
17. Considere a situação descrita no exercício anterior.
 - a) Qual foi a variação de volume ($V_f - V_i$) que o gás sofreu ao se expandir?
 - b) Calcule o trabalho realizado pelo gás usando a expressão $T = p(V_f - V_i)$.
 - c) A resposta obtida em (b) coincide com a resposta do exercício anterior?
18. Como vimos, a fig. 12-16-a mostra um sistema construído por um gás em expansão. Observando esta figura, responda:
 - a) A variação de volume do gás foi positiva, negativa ou nula?
 - b) Então, o trabalho realizado foi positivo, negativo ou nulo?
 - c) Neste caso, dizemos que o trabalho foi realizado pelo sistema ou sobre ele?
19. Observando a fig. 12-16-b, que representa um gás sendo comprimido, responda, para este caso, às mesmas questões do exercício anterior.
20. Suponha que, após a expansão, o gás do exercício 16 tenha sido comprimido, conservando a mesma pressão, até retomar ao seu volume inicial.
 - a) Qual o trabalho realizado nesta compressão?
 - b) Este trabalho foi realizado pelo gás ou sobre ele?
21. Considere um gás dentro de um cilindro provido de um pistom. O gás é aquecido, mas seu volume permanece constante.
 - a) O gás está exercendo força sobre o pistom?
 - b) O que ocorre com o valor desta força durante o aquecimento?
 - c) Há deslocamento do pistom?
 - d) Então, qual o valor do trabalho realizado nesta transformação?

12.5. A primeira lei da Termodinâmica

ENERGIA INTERNA

Na secção 12.1 nos referimos à *energia interna* de um corpo e vimos que ela representa a soma das diversas formas de energia que os átomos e moléculas deste corpo possuem. De um modo geral, quando estamos estudando um *sistema* qualquer, a energia interna deste sistema, que representaremos por U , nada mais é do que a energia total existente em seu interior.

Quando um sistema vai de um estado inicial i a outro estado final f , ele geralmente troca energia com a sua vizinhança, como vimos na secção 12.4 (absorve ou libera calor e realiza ou recebe trabalho). Conseqüentemente, 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 1ª LEI DA TERMODINÂMICA

Consideremos um sistema, como o gás da fig. 12-18-a, ao qual fornecemos uma quantidade de calor $Q = 100$ J. Naturalmente, esta energia é 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 $T = 30$ J sobre a vizinhança (fig. 12-18-a).

Este trabalho será feito com a utilização de energia interna do sistema a qual, portanto, tenderia a decrescer de 30 J. Assim, se a energia interna tende a aumentar de 100 J (calor absorvido) e a diminuir de 30 J (trabalho realizado), é claro que será observada uma variação, ΔU , da energia interna do sistema, cujo valor é

$$\Delta U = 100 \text{ J} - 30 \text{ J} \quad \text{donde} \quad \Delta U = 70 \text{ J}$$

Generalizando, se um sistema absorve uma quantidade de calor Q e realiza um trabalho T (fig. 12-18-b), o Princípio de Conservação da Energia nos permite concluir que sua energia interna sofrerá uma variação ΔU dada por

$$\Delta U = Q - T$$

Esta expressão poderá ser usada mesmo quando o sistema ceder calor à vizinhança, mas, neste 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 $\Delta U = Q - T$ continua válida, devendo-se lembrar que, agora, T é negativo, como vimos na secção anterior.

Estas considerações que acabamos de fazer, com base no Princípio de Conservação da Energia, constituem, essencialmente, o conteúdo da 1ª lei da Termodinâmica, uma das leis fundamentais da Física e que pode ser enunciada da seguinte maneira:

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 T é realizado por este sistema (T positivo) ou sobre ele (T negativo), a variação da energia interna, ΔU , do sistema é dada por

$$\Delta U = Q - T$$

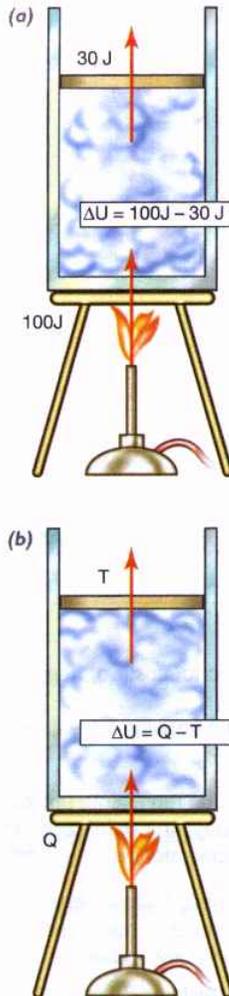


Fig. 12-18: Ilustração esquemática. Quando um sistema absorve uma quantidade de calor Q e realiza um trabalho T , a variação de sua energia interna é $\Delta U = Q - T$.

Exemplo

Suponha que um sistema passe de um estado a outro, trocando energia com a 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.

A variação da energia interna é dada pela 1ª lei da Termodinâmica, isto é,

$$\Delta U = Q - T$$

Neste caso, temos $Q = 100 \text{ cal} = 418 \text{ J}$ (pois $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$) e seu sinal é positivo, porque se trata de calor absorvido pelo sistema. O valor $T = 200 \text{ J}$ também é positivo, porque o trabalho foi realizado pelo sistema. Então

$$\Delta U = 418 - 200 \quad \text{donde} \quad \Delta U = 218 \text{ J}$$

Este 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.

Como no caso anterior, $Q = 100 \text{ cal} = 418 \text{ J}$ e é positivo. Entretanto, temos agora $T = -200 \text{ J}$, pois o trabalho foi realizado sobre o sistema. Assim

$$\Delta U = Q - T = 418 - (-200) \quad \text{donde} \quad \Delta U = 618 \text{ J}$$

Portanto, a energia interna sofreu um acréscimo de 618 J, o que é fácil de ser interpretado, 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.

Temos, neste caso, $Q = -100 \text{ cal} = -418 \text{ J}$ e $T = -200 \text{ J}$, pois o calor foi cedido pelo sistema e o trabalho foi realizado sobre ele. Logo

$$\Delta U = Q - T = -418 - (-200) \quad \text{donde} \quad \Delta U = -218 \text{ J}$$

Vemos, então, que a energia interna do sistema diminuiu de 218 J. Este resultado poderia ser previsto, pois o sistema perdeu 418 J sob a forma de calor e recebeu apenas 200 J pelo trabalho realizado sobre ele.

21 20

os de fixação **exercícios de fixação** exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

22. Quando um sistema troca energia com sua vizinhança:

- Se o sistema absorver calor, sua energia interna tenderá a aumentar ou a diminuir? Então, neste caso, em $\Delta U = Q - T$, Q deverá ser positivo ou negativo?
- Se o sistema liberar calor, sua energia interna tenderá a aumentar ou a diminuir? Então, em $\Delta U = Q - T$, Q deverá ser positivo ou negativo?

23. Considere novamente o sistema do exercício anterior:

- Se o sistema realizar trabalho, sua energia interna tenderá a aumentar ou a diminuir? Então,

em $\Delta U = Q - T$, deveremos considerar T positivo ou negativo?

- Se for realizado trabalho sobre o sistema, sua energia interna tenderá a aumentar ou a diminuir? Então, em $\Delta U = Q - T$, deveremos considerar T positivo ou negativo?

24. Um sistema sofre uma transformação na qual ele absorve 50 cal de calor e se expande, realizando um trabalho de 320 J.

- Qual é, em joules, o calor absorvido pelo sistema? (Considere $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$.)
- Calcule a variação de energia interna que o sistema experimentou.
- Interprete, como foi feito no exemplo desta seção, o significado da resposta da questão (b).

25. Um gás, contido em um cilindro provido de um pistão, expande-se ao ser colocado em contato com uma fonte de calor. Verifica-se que a energia interna do gás não varia. O trabalho que o gás realizou é maior, menor ou igual ao calor que ele absorveu?
26. Suponha que um gás, mantido a volume constante, liberasse 170 cal de calor para sua vizinhança.
- Qual o trabalho realizado pelo gás?
 - Qual foi, em calorías, a variação da energia interna do gás?
- c) A energia interna do gás aumentou, diminuiu ou não variou?
27. Um gás é comprimido sob uma pressão constante $p = 5,0 \times 10^4 \text{ N/m}^2$, desde um volume inicial $V_i = 3,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, até um volume final $V_f = 1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$.
- Houve trabalho realizado pelo gás ou sobre o gás?
 - Calcule este trabalho.
 - Se o gás liberou 100 J de calor, determine a variação de sua energia interna.

12.6. Aplicações da primeira lei da Termodinâmica

Após ter sido estudada a 1ª lei da Termodinâmica, vamos agora aplicá-la a algumas situações particulares, para obter informações sobre a energia interna de um sistema nestas situações. Iniciaremos esta análise estudando a *transformação adiabática*.

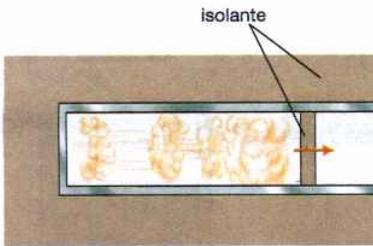


Fig. 12-19: Quando um gás se expande adiabaticamente, ele realiza trabalho mas não recebe nem libera calor.

TRANSFORMAÇÃO ADIABÁTICA

Considere um gás encerrado em um cilindro, cujas paredes são feitas de um material isolante térmico (fig. 12-19). Em virtude disso, se este gás se expandir (ou for comprimido), ele não poderá ceder nem receber calor da vizinhança. Uma transformação como esta, em que o sistema não troca calor com a vizinhança, isto é, na qual $Q = 0$, é denominada *transformação adiabática*.

Quando um gás sofre uma expansão (ou compressão) rápida, mesmo que as paredes do recipiente não sejam isolantes, esta transformação pode ser considerada como sendo adiabática. Realmente, se a transformação é muito rápida, a quantidade de calor que o sistema poderá ceder ou absorver é muito pequena e, assim, podemos considerar $Q = 0$.

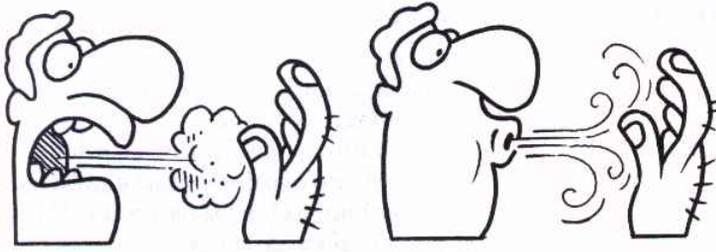
Aplicando a 1ª lei da Termodinâmica, $\Delta U = Q - T$, a uma transformação adiabática, como temos $Q = 0$, vem

$$\Delta U = -T$$

Analisemos este resultado. Supondo que o gás tenha se expandido, o trabalho T que ele realizou, como sabemos, é positivo. Então, a expressão anterior nos mostra que ΔU será negativo, isto é, a energia interna do sistema diminuiu. Uma diminuição na energia interna de um gás acarreta um abaixamento de sua temperatura. Logo, quando um gás se expande adiabaticamente, sua temperatura diminui. Podemos constatar este fato deixando um gás comprimido se expandir rapidamente (transformação adiabática) e observando que ele realmente se resfria (fig. 12-20).



Fig. 12-20: Em uma expansão adiabática, a energia interna do gás diminui e, portanto, há uma diminuição em sua temperatura. Ilustração esquemática.



Procure realizar a experiência mostrada na figura. Coloque uma de suas mãos nas proximidades de sua boca e, com esta aberta, sopra sobre a mão. Em seguida, sopra sobre a mão com a boca quase fechada. Você percebe a diferença de temperatura nas duas situações? Esta diferença ocorre porque, no segundo caso, o gás sofre uma expansão rápida (adiabática) ao passar pela boca quase fechada. Conseqüentemente, há uma queda em sua temperatura.

Suponha, agora, que o sistema tenha sido comprimido. Neste caso, como sabemos, T é negativo. Da expressão $\Delta U = -T$, concluímos, então, que ΔU será positivo, isto é, a energia interna do gás aumenta e, conseqüentemente, haverá um aumento em sua temperatura. Você poderá verificar este efeito se tampar, com um de seus dedos, a saída de ar de uma bomba de encher pneu e comprimir rapidamente o pistom (compressão adiabática): com o dedo você perceberá a elevação de temperatura do ar que foi comprimido no interior da bomba (fig. 12-21).

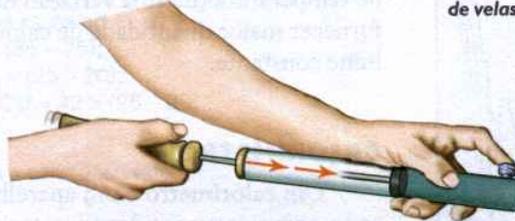
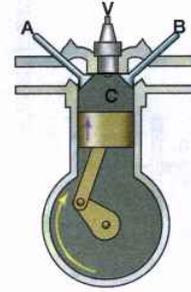


Fig. 12-21: Em uma compressão rápida (adiabática), a energia interna do gás aumenta e há, portanto, uma elevação em sua temperatura.



Em um motor de explosão, no segundo tempo, quando a mistura gasosa (gasolina e ar) é comprimida rapidamente (compressão adiabática), sua temperatura se eleva consideravelmente. Isto pode provocar a explosão da mistura antes de a vela produzir a centelha (pré-ignição), causando distúrbios no funcionamento do motor. Em um motor a diesel, essa elevação de temperatura é tão grande que a ignição da mistura sempre ocorre, sem a necessidade da centelha. Por isso, um motor a diesel não precisa de velas para seu funcionamento.

TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA

A fig. 12-22 mostra um gás absorvendo uma quantidade de calor Q e se expandindo, realizando um trabalho T . Se o trabalho que o gás realiza for igual ao calor que ele absorve, isto é, se $Q = T$, teremos, pela 1ª lei da Termodinâmica

$$\Delta U = Q - T \quad \text{donde} \quad \Delta U = 0 \quad \text{ou seja} \quad U = \text{constante}$$

O fato de a energia interna permanecer constante indica que a temperatura também não sofreu alteração e, portanto, o gás se expandiu isotermicamente. Aprendemos, então, 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.

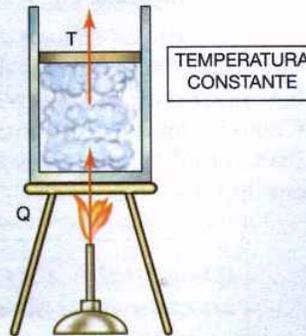


Fig. 12-22: Quando um gás se expande isotermicamente, o trabalho que ele realiza é igual ao calor que ele absorve.

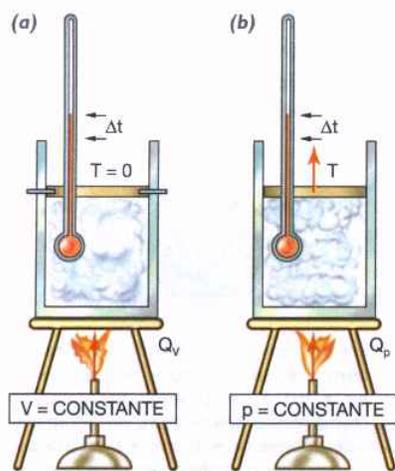


Fig. 12-23: Na experiência ilustrada na figura temos $Q_p > Q_v$.

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 (fig. 12-23). A experiência nos mostra 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 fig. 12-23). A 1ª lei da Termodinâmica nos permite entender este resultado, como veremos a seguir.

O aumento da energia interna foi o mesmo para as duas massas gasosas, pois ambas experimentaram a mesma elevação de temperatura. Na fig. 12-23-a, o gás não realizou trabalho, porque seu volume permaneceu constante. Então, pela 1ª lei da Termodinâmica, como $T = 0$, teremos $\Delta U = Q_v$, isto é, todo o calor absorvido foi usado para provocar o aumento da energia interna.

Na transformação isobárica (fig. 12-23-b), o gás se expande e, portanto, realiza um trabalho T . Então, o calor, Q_p , fornecido ao gás, é usado para provocar o aumento da energia interna e para realizar este trabalho. Assim, é claro 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.

CALORÍMETRO

Um calorímetro é um aparelho usado na medida do calor trocado entre corpos colocados em seu interior, podendo-se obter, como resultado desta medida, o calor específico de uma substância qualquer envolvida na experiência.

A fig. 12-24 apresenta um tipo comum de calorímetro. Ele consiste, essencialmente, em um recipiente interno, de paredes espelhadas, envolvido por outro recipiente fechado, de paredes isolantes. Com estes cuidados, consegue-se isolar termicamente o interior do calorímetro, impedindo-se 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 corpos são colocados no interior de um calorímetro, sendo suas temperaturas diferentes da temperatura dos corpos aí existentes, haverá troca de calor entre eles, até que o equilíbrio térmico seja alcançado. Como já vimos, não há entrada nem saída de calor do calorímetro. Então, pelo Princípio de Conservação da Energia, concluímos que, após ser atingido o equilíbrio térmico:

o calor total liberado pelos corpos que se esfriaram é igual ao calor total absorvido pelos corpos que se aqueceram.

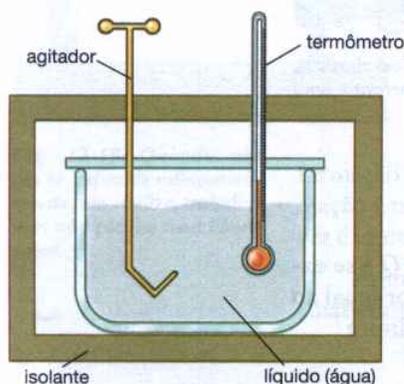


Fig. 12-24: Um tipo comum de calorímetro.

ou, como se costuma dizer, resumidamente, no interior de um calorímetro, temos

$$\text{calor cedido} = \text{calor absorvido}$$

O uso desta igualdade nos permite determinar, em um laboratório, os valores de várias grandezas térmicas, características de um corpo ou de uma substância, como a capacidade térmica, o calor específico e outras. O exemplo seguinte mostra como um calorímetro pode ser usado na determinação do calor específico de uma substância.

Exemplo

Um calorímetro, cuja capacidade térmica é $42 \text{ cal/}^\circ\text{C}$, 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 cuja temperatura é de 85°C . O termômetro nos mostra que, após ser atingido o equilíbrio térmico, a temperatura da mistura é de 25°C . Com os dados desta experiência podemos determinar o calor específico do ferro, como se segue.

Observe que o bloco de ferro se esfriou (de 8°C para 25°C) enquanto a água e o calorímetro se aqueceram (de 20°C para 25°C). Lembrando que, quando um corpo 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 = $100 \times c \times (85 - 25)$;
- calor absorvido pela água = $90 \times 1 \times (25 - 20)$;
- calor absorvido pelo calorímetro = $C\Delta t = 42 \times (25 - 20)$.

Usando a igualdade

$$\text{calor cedido} = \text{calor absorvido}$$

teremos

$$100 \times c \times (85 - 25) = 90 \times 1 \times (25 - 20) + 42 \times (25 - 20)$$

Resolvendo esta equação, obtemos, para o calor específico do ferro

$$c = 0,11 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}$$

Calor e energia mecânica — A experiência de Joule

Como vimos no início deste capítulo, os trabalhos de Rumford e de outros cientistas, no século passado, mostraram que o calor é uma forma de energia.

Uma vez aceita esta idéia, tornava-se necessário determinar a relação entre uma certa quantidade de calor e a quantidade equivalente de outra forma de energia. Em outras palavras, devia-se procurar obter, experimentalmente, a relação entre a unidade de calor (1 caloria) e a unidade mais comumente empregada para medir qualquer forma de energia (1 joule).

Entre os trabalhos que mais contribuíram para estabelecer que o calor é uma forma de energia, devemos destacar as experiências do físico inglês James P. Joule. Realizando medidas muito cuidadosas e repetindo-as inúmeras vezes, Joule conseguiu obter, com sucesso, a relação procurada, isto é, quantos joules de energia mecânica seriam necessários transformar para se obter 1 caloria de energia térmica.



Conta-se que Joule e sua esposa, durante sua lua-de-mel na Suíça, em 1848, tentaram medir a elevação de temperatura da água de uma cachoeira. Esta elevação é, entretanto, muito pequena e dificilmente teria sido possível medi-la naquela época.

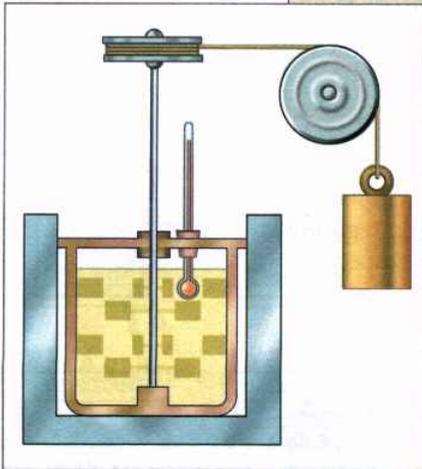


Fig. 12-25: Esquema de dispositivo usado por Joule para medir o "equivalente mecânico do calor".

Das diversas experiências realizadas por Joule com esta finalidade, uma delas tornou-se muito conhecida e destacou-se entre as demais. Vamos, a seguir, descrever esta experiência, cujo esquema está apresentado na fig. 12-25.

Joule deixava cair, de uma certa altura, um peso conhecido preso a uma corda, de tal maneira que, durante sua queda, um sistema de pás fosse acionado, entrando em rotação e agitando a água contida em um recipiente isolado termicamente (veja a fig. 12-25). Em virtude do atrito das pás com a água, o peso caía com velocidade praticamente constante, isto é, sua energia cinética se mantinha invariável. Portanto, a energia potencial perdida pelo peso era integralmente transformada em energia interna da água, devido à agitação nela provocada pelas pás. Desta maneira, a temperatura da água sofria uma elevação (de modo semelhante ao que ocorreria se ela estivesse recebendo calor). Um termômetro adaptado ao aparelho permitia a Joule medir esta elevação de temperatura.

Conhecendo o valor do peso cuja queda acionava as pás e a altura desta queda, Joule pôde calcular a energia potencial perdida por este peso ($E_p = Mgb$). Por outro lado, sabendo o valor da massa da água no recipiente e tendo medido a elevação de sua temperatura, foi possível a ele calcular a quantidade de energia térmica transferida à água ($\Delta Q = mc\Delta t$). Comparando estes valores (E_p e ΔQ), Joule conseguiu estabelecer a relação procurada, isto é, quantos joules de energia mecânica equivalem a 1 caloria de calor.

No exemplo numérico seguinte, procuraremos mostrar como estes cálculos foram conduzidos.

Suponha que a experiência de Joule fosse realizada com um peso da massa $M = 6,0$ kg, caindo de uma altura $b = 2,0$ m, em um local onde $g = 9,8$ m/s². Para se obter uma sensível elevação na temperatura da água, é necessário deixar o peso cair várias vezes sucessivas. Considere que, nesta experiência, o peso tenha caído 25 vezes. Então, a energia potencial total perdida pelo peso, nas quedas, foi

$$E_p = (25) Mgb = 25 \times 6,0 \times 9,8 \times 2,0 \quad \text{ou} \quad E_p = 2\,940 \text{ J}$$

A água contida no recipiente, cuja massa era $m = 500$ g, sofreu uma elevação de temperatura $\Delta t = 1,4^\circ\text{C}$. Esta elevação de temperatura seria obtida se a água recebesse a seguinte quantidade de calor:

$$\Delta Q = mc\Delta t = 500 \times 1,0 \times 1,4 \quad \text{ou} \quad \Delta Q = 700 \text{ cal}$$

Logo, 2 940 J de energia mecânica equivalem a 700 cal de calor, ou seja:

$$700 \text{ cal} = 2\,940 \text{ J} \quad \text{donde} \quad 1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$$

Este é o resultado a que chegamos nesta experiência hipotética. Em suas cuidadosas experiências, Joule obteve $1 \text{ cal} = 4,15 \text{ J}$, em excelente concordância com a relação atualmente estabelecida, através de sofisticadas experiências, que nos fornecem $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

28. Como vimos, na fig. 12-20 representamos um gás se expandindo rapidamente. Suponha que o trabalho realizado por ele tenha sido $T = 250 \text{ J}$.
- Se a expansão é muito rápida, o que se pode dizer sobre a quantidade de calor, Q , que o gás troca com a vizinhança?
 - Então, como se denomina esta expansão?
 - Qual a variação ΔU da energia interna do gás?
 - Então, a energia interna do gás aumentou, diminuiu ou não se alterou?
 - Logo, a temperatura do gás aumentou, diminuiu ou não se alterou?
29. Considere a compressão adiabática mostrada na fig. 12-21.
- A temperatura do gás aumentou? E sua energia interna?
 - Houve absorção de calor pelo gás?
 - Então, qual foi a causa do aumento de temperatura do gás?
30. Suponha que um gás, ao se expandir, absorva uma quantidade de calor $Q = 150 \text{ cal}$ e realize um trabalho $T = 630 \text{ J}$.
- Expresse o valor de Q em joules. (Considere $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$.)
 - Qual foi a variação da energia interna do gás?
 - Então, a energia interna do gás aumentou, diminuiu ou não variou? E sua temperatura?
 - Logo, como se denomina esta transformação?
31. Observe a fig. 12-23. Como foi dito, ela representa massas iguais, de um mesmo gás, sofrendo a mesma elevação de temperatura.
- A variação da energia interna na transformação mostrada na figura (a) é maior, menor ou igual à da transformação mostrada em (b)?
 - Qual o trabalho realizado na transformação da figura (a)?
 - Então, podemos afirmar que o calor Q_v foi totalmente usado para aumentar a energia interna do gás?
 - Na transformação da figura (b), o gás realizou trabalho?
 - Então, podemos dizer que o calor Q_p foi totalmente usado para aumentar a energia interna do gás?
- f) Baseado em suas respostas anteriores, você pode concluir que Q_p é maior, menor ou igual a Q_v ?
32. Um calorímetro, de capacidade térmica desprezível ($C = 0$), contém 50 g de água a 20°C . Coloca-se, no interior do calorímetro, um bloco de chumbo de 200 g , a uma temperatura de 100°C . Observa-se, depois de um certo tempo, que a temperatura de equilíbrio é de 30°C .
- Sendo c o calor específico do chumbo, como podemos expressar o calor perdido por ele?
 - Qual o calor absorvido pelo calorímetro?
 - Qual o calor absorvido pela água?
 - Usando suas respostas às questões anteriores, calcule o calor específico do chumbo.
33. Um recipiente de isopor 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.
34. Suponha que em uma repetição da experiência de Joule (fig. 12-25), o corpo suspenso tivesse uma massa $M = 10 \text{ kg}$ e caísse de uma altura $h = 1,5 \text{ m}$ (considere $g = 10 \text{ m/s}^2$).
- Qual o valor da energia mecânica perdida por M , durante a queda?
 - A energia potencial perdida por M , durante a queda, é transformada em energia cinética de M , em energia interna da água ou em ambas?
35. Considerando a situação descrita no exercício anterior, responda:
- Houve transferência de calor para a água do recipiente durante a queda de M ?
 - Então, qual foi a causa da variação da energia interna da água?
36. Ainda em relação à experiência mencionada no exercício 34, suponha que a massa M tenha caído 30 vezes sucessivas e que a massa da água no recipiente seja $m = 400 \text{ g}$. Considerando $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$, determine a elevação de temperatura da água.

um tópico especial para você aprender um pouco mais

12.7. Máquinas térmicas — a segunda lei da Termodinâmica

O QUE É UMA MÁQUINA TÉRMICA

Sabemos que somente no século passado 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 e este era capaz de realizar um trabalho mecânico. Esta idéia foi usada pelo inventor grego Heron, que no século I d.C. construiu o dispositivo mostrado na fig. 12-26: o vapor formado pelo aquecimento da água, ao escapar pelos orifícios mostrados na figura, colocava em rotação uma esfera de metal.

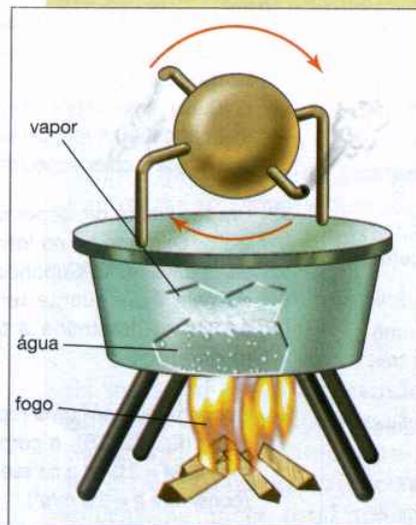
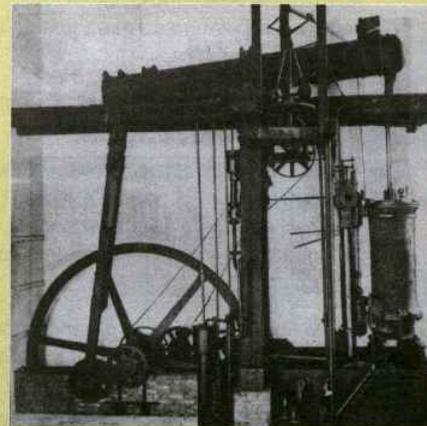


Fig. 12-26: Modelo da primeira máquina térmica, inventada por Heron no século I d.C.



Modelo de máquina a vapor de James Watt. Este dispositivo foi um dos primeiros que permitiram a transformação, em escala industrial, de calor em trabalho mecânico.

Em linguagem moderna, dizemos que este aparelho de Heron é uma máquina térmica, isto é, um dispositivo que transforma calor em trabalho mecânico. Entretanto, a máquina de Heron 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 capazes de realizar trabalho em escala industrial.

A MÁQUINA DE WATT

As primeiras máquinas térmicas, inventadas no século XVIII, além de bastante precárias, apresentavam rendimentos muito baixos, isto é, consumiam grande quantidade de combustível para produzir um trabalho relativamente pequeno.

Por volta de 1770, o inventor escocês James Watt apresentou um novo modelo de máquina térmica que veio substituir, com enormes vantagens, as má-

quinas então existentes. A fig. 12-27 apresenta esquematicamente a máquina de Watt. O vapor formado na caldeira a alta pressão penetra no cilindro através da válvula *A*, que está aberta (neste momento, a válvula *B* está fechada). O pistom é, então, empurrado pelo vapor, colocando em rotação uma roda a ele acoplada, como mostra a figura. Quando o pistom se aproxima da extremidade do cilindro, a válvula *A* é fechada e *B* é aberta, permitindo o escapamento do vapor para o condensador, o qual é continuamente resfriado por um jato de água fria. Assim, o vapor se condensa, ocasionando uma queda de pressão no interior do cilindro, fazendo com que o pistom retorne à sua posição inicial. A válvula *B* é, então, fechada, enquanto *A* é aberta, permitindo nova admissão de vapor no cilindro, repetindo-se o ciclo. Desta maneira, a roda acoplada ao pistom se manterá continuamente em rotação.

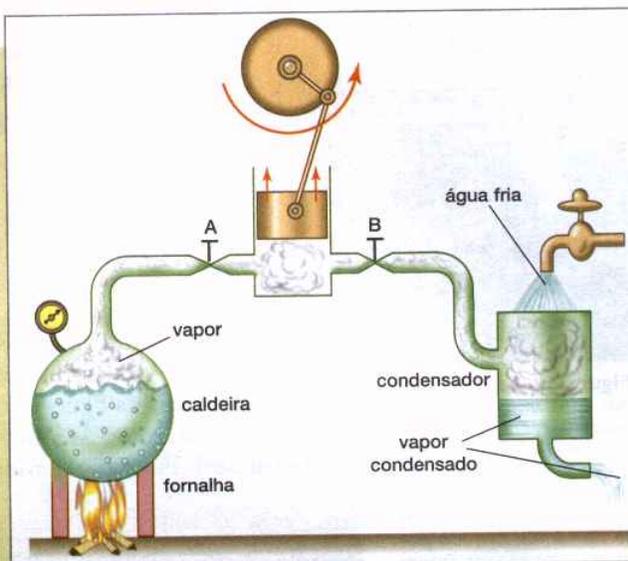
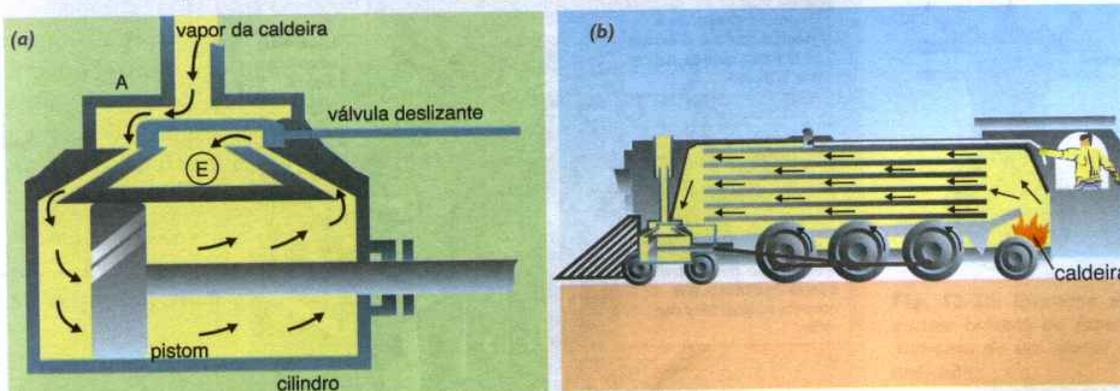


Fig. 12-27: Esquema da máquina a vapor de Watt.

A máquina de Watt foi inicialmente empregada para movimentar moinhos e acionar as bombas que retiravam água de minas subterrâneas e, posteriormente, nas 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, dando origem a um grande surto de desenvolvimento nesta área, sendo, por isso, considerada como um dos fatores que provocaram a chamada Revolução Industrial no século passado.

LOCOMOTIVA A VAPOR

A máquina térmica de Watt deu origem a novos modelos mais aperfeiçoados. Entre eles destaca-se aquele usado, durante muitos anos, nas antigas locomotivas a vapor. As principais fases do funcionamento desta máquina são analisadas na legenda da figura abaixo. Não deixe de ler essas informações.



(a) O vapor proveniente da caldeira entra pela extremidade esquerda do cilindro, empurrando o pistom para a direita. O vapor que estava à direita do pistom escapa pela saída E. Uma válvula deslizante desloca-se, então, para a esquerda, fechando a entrada inicial de vapor e abrindo a entrada da direita. Nesse instante, o pistom, que já se encontrava na extremidade direita do cilindro, recebe a pressão dessa nova entrada de vapor e se desloca para a esquerda. Um novo movimento da válvula deslizante, agora para a direita, permite novamente a entrada de vapor à esquerda e o ciclo se repete. (b) Observe, na locomotiva, a localização do cilindro e do pistom analisados em (a) e procure entender como o movimento de ida-e-volta do pistom é transmitido às rodas.

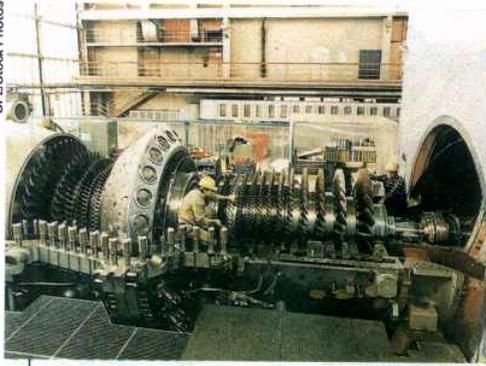


Figura II: Essa turbina nos dá uma idéia da enorme evolução no uso da energia térmica, desde a invenção de Heron até os tempos modernos. Uma grande turbina desse tipo é alimentada por uma caldeira, que fornece cerca de 1 500 toneladas de vapor por hora. Esse vapor encontra-se acima de 600°C e a uma pressão superior a 100 atm. A turbina coloca em rotação um gerador que produz, aproximadamente, 45 000 kW de energia elétrica, capaz de suprir as necessidades residenciais de uma cidade com 4 milhões de habitantes.

TURBINA A VAPOR

Os modelos de máquina a vapor que descrevemos são, atualmente, muito pouco usados. A energia térmica do vapor continua, entretanto, sendo empregada em larga escala, nas centrais termelétricas, para movimentar um outro modelo de máquina térmica, denominado *turbina a vapor*. O princípio básico de funcionamento dessas turbinas é muito mais simples que o da máquina de Watt: um jato de vapor, a altíssima pressão, é lançado contra um conjunto de lâminas presas a um eixo (rotor), colocando a turbina em rotação (figura I). A fotografia da figura II apresenta uma turbina aberta, podendo-se ver suas lâminas e seu rotor. As informações da legenda dessa figura são fornecidas apenas a título de ilustração e, evidentemente, você não precisa memorizá-las.

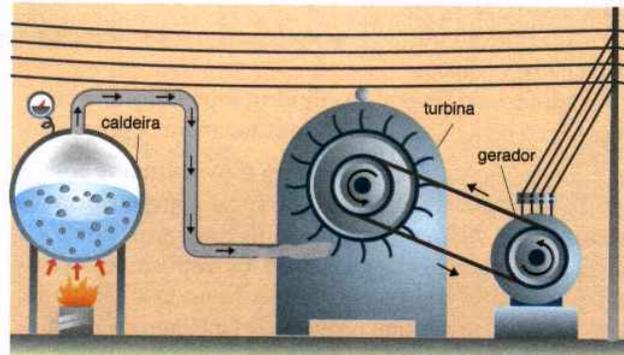
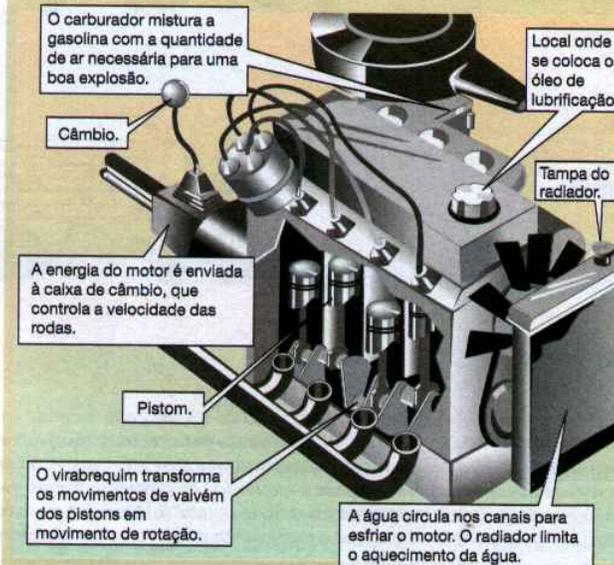


Figura I: Ilustração esquemática. O vapor, proveniente da caldeira, coloca a turbina em rotação, e este movimento é transmitido ao gerador de energia elétrica.

O MOTOR DE EXPLOÇÃO

No decorrer do século XX, foram inventados vários outros tipos de máquinas térmicas, destacando-se entre elas os motores de explosão, as turbinas a vapor, os motores a jato etc.



Esquema de motor de automóvel com 4 cilindros. Nos modelos modernos, o carburador foi substituído pelo sistema de injeção eletrônica.

Em particular, os motores de explosão a gasolina tornaram-se muito conhecidos em virtude de seu uso nos automóveis. Na fig. 12-28 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) que é um dispositivo destinado a produzir uma centelha (que provoca a ignição ou explosão) no momento oportuno. A mistura explosiva, constituída de gasolina 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.

- No primeiro tempo, denominado *admissão*, a válvula A se abre, permitindo a entrada da mistura explosiva, enquanto o pistom desce no cilindro (fig. 12-28-a).
- No segundo tempo, denominado *compressão*, a mistura é comprimida na câmara C (o pistom sobe) e sua temperatura se eleva. Neste tempo, as válvulas A e B permanecem fechadas (fig. 12-28-b).
- No terceiro tempo, denominado *explosão e expansão*, a vela V produz uma centelha elétrica, causando a ignição da mistura explosiva. Este é o único tempo no qual há produção de um trabalho efetivo, pois os gases quentes da combustão, por sua alta pressão, fazem o pistom descer, comunicando movimento de rotação a uma roda a ele acoplada (fig. 12-28-c).
- No quarto tempo, denominado *exaustão ou escapamento*, a válvula B se abre, permitindo o escape dos gases através do tubo E (cano de descarga) enquanto o pistom sobe no cilindro (fig. 12-28-d).

Fechando-se a válvula B , uma nova descida do pistom 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, da maneira mostrada na fig. 12-29. Esta figura indica que a máquina retira uma certa quantidade de calor Q_1 de um corpo aquecido, denominado *fonte quente* (por exemplo, no caso da máquina de Watt, a fonte quente é a fornalha que aquece a água da caldeira). A máquina utiliza parte deste calor para realizar um trabalho T e rejeita uma quantidade de calor Q_2 para a fonte fria. Na máquina de Watt, por exemplo, este calor Q_2 é transportado pelo vapor que sai ainda aquecido do cilindro e é liberado no condensador, o qual representa a fonte fria desta máquina.

Denomina-se *rendimento*, R , de uma máquina térmica a relação entre o trabalho, T , que ela realiza em cada ciclo, e o calor, Q_1 , absorvido, durante o ciclo, da fonte quente, isto é,

$$R = \frac{T}{Q_1}$$

Logo, o rendimento de uma máquina térmica será tanto maior quanto maior for o trabalho que ela realiza, para uma determinada quantidade de calor absorvido. Assim, se o rendimento de uma máquina for $R = 0,50$ (ou $R = 50\%$), isto significa que esta máquina transforma em trabalho a metade do calor que ela recebe da fonte quente.

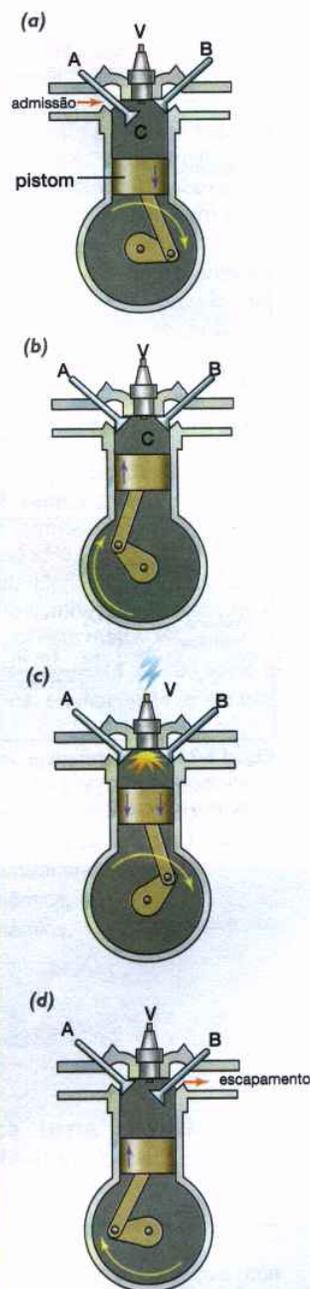


Fig. 12-28: Esquema dos quatro tempos do funcionamento de um motor de explosão.

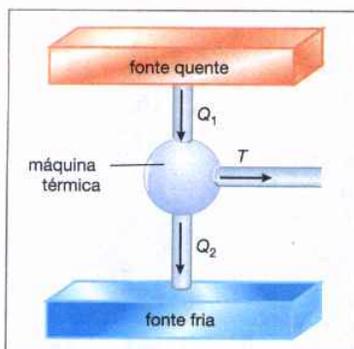


Fig. 12-29: Representação esquemática de uma máquina térmica qualquer.

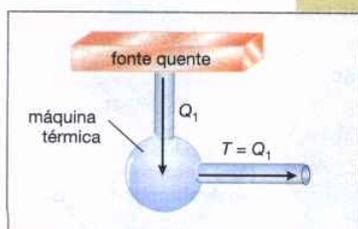


Fig. 12-30: Uma máquina térmica como esta teria um rendimento de 100%.

Na fig. 12-29 vemos claramente, pela conservação da energia, que $Q_1 = T + Q_2$ ou $T = Q_1 - Q_2$. Então, podemos expressar o rendimento de uma máquina térmica da seguinte maneira:

$$R = \frac{T}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad \text{ou} \quad R = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

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 esta transformaria em trabalho todo o calor absorvido da fonte quente (fig. 12-30).

Entretanto, observando o comportamento das máquinas térmicas durante muitos anos, os cientistas perceberam que é impossível construir uma máquina como esta (com $R = 100\%$). Em outras palavras, qualquer dispositivo existente na natureza, ao efetuar um ciclo, nunca conseguirá transformar integralmente em trabalho todo o calor que ele absorve de uma fonte quente. 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, $Q_2 \neq 0$.

Esta conclusão constitui uma das leis fundamentais da natureza, denominada *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.

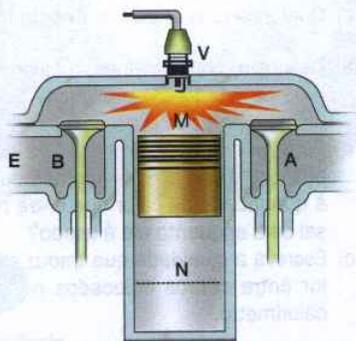
Desta maneira, o rendimento de qualquer máquina térmica é inferior a 100%. Na realidade, os rendimentos das máquinas térmicas mais comumente usadas estão situados muito abaixo deste limite. Por exemplo: nas locomotivas a vapor o rendimento é cerca de apenas 10%, nos motores a gasolina nunca ultrapassa 30% e nos motores a diesel, que estão entre as máquinas mais eficientes, o rendimento situa-se em torno de 40%.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

- | | |
|---|--|
| <p>37. a) Diga 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.</p> | <p>38. Observando o esquema da máquina de Watt, apresentado na fig. 12-27, responda:
a) Enquanto o pistão está subindo, a válvula A está aberta ou fechada? E a válvula B? Explique.</p> |
|---|--|

- b) Explique por que após atingir a parte mais alta do cilindro o pistom desce, retornando à posição inicial.
- c) Durante a descida do pistom qual das válvulas está aberta e qual está fechada?
39. Na figura deste exercício reproduzimos o esquema de um motor de explosão onde *A* é a válvula de admissão e *B* a de escapamento. Nesta figura *M* representa a posição mais alta do pistom e *N* sua posição mais baixa. Para cada uma das situações seguintes, diga se ela corresponde a um dos tempos de funcionamento do motor e, em caso afirmativo, qual é o nome dado a esse tempo.
- O pistom está se deslocando de *N* para *M* e as válvulas *A* e *B* estão ambas fechadas.
 - O pistom está se deslocando de *M* para *N* e apenas a válvula *A* está aberta.
 - O pistom está se deslocando de *N* para *M* e as duas válvulas estão abertas.



Exercício 39.

40. Observe o esquema de uma máquina térmica qualquer, mostrado na fig. 12-29. Suponha que em uma máquina a vapor com este 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 $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$, determine:
- O rendimento da máquina térmica.
 - A quantidade de calor que ela rejeita em cada ciclo para a fonte fria.
41. 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 $1 \text{ cal} = 4 \text{ J}$):
- recebe da fonte quente.
 - rejeita para a fonte fria.
42. Sabe-se que o calor de combustão do óleo diesel é de $45 \times 10^3 \text{ J/g}$, isto é, cada 1 g deste óleo libera $45 \times 10^3 \text{ J}$ de energia térmica, ao ser totalmente queimado. Considerando esta informação e supondo que o motor a diesel, referido no exercício anterior, consuma 10 g/s de combustível, determine a potência desenvolvida por este motor.
43. Tendo em vista o que foi dito nesta secção sobre a 2ª lei da Termodinâmica, enuncie esta lei de três maneiras equivalentes.
44. 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 $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$, diga se esta máquina estará contrariando:
- A 1ª lei da Termodinâmica.
 - A 2ª lei da Termodinâmica.

Visão reVisão reVisão reVisão reVisão reVisão reVi

As questões seguintes foram formuladas para que você faça uma revisão dos pontos mais importantes abordados neste capítulo. Ao respondê-las, volte ao texto sempre que tiver dúvidas.

- Faça um pequeno resumo do que foi dito no texto sobre a teoria do calórico.
 - Expresse, com suas palavras, o conceito atual de calor.
 - Observando a fig. 12-2, dê a definição de caloria.
 - Qual é a relação entre 1 cal e 1 J?
- Descreva o mecanismo de propagação do calor, por condução, através de um sólido.
 - Dê exemplos de materiais que são bons condutores de calor. Cite alguns que sejam bons isolantes térmicos.
- Explique por que um agasalho impede que uma pessoa sinta frio.
- Descreva como se formam as correntes de convecção nos líquidos ou gases.
 - Cite algumas situações nas quais as correntes de convecção desempenham um papel importante.
 - Além da condução e da convecção, existe um terceiro processo de transferência de calor. Como se denomina este processo?
 - Dê exemplos de situações em que o calor esteja sendo transferido por radiação.

4.
 - a) Defina *capacidade térmica* de um corpo. Em que unidades ela pode ser expressa?
 - b) Como se define o calor específico de uma substância? Em que unidades ele pode ser expresso?
 - c) Lembrando a definição de 1 cal, o que podemos concluir sobre o valor do calor específico da água?
 - d) Qual é a expressão que nos fornece, em função do calor específico, o calor absorvido ou cedido por um corpo quando sua temperatura varia?
5.
 - a) Qual o significado dado, na Física, ao termo sistema?
 - b) O que se entende por vizinhança de um sistema?
 - c) Descreva as maneiras pelas quais um sistema pode trocar energia com sua vizinhança.
6.
 - a) Um gás sofre uma transformação, sob pressão constante p , de um volume inicial V_i a um volume final V_f . Qual é, em função destes dados, a expressão do trabalho que o gás realiza?
 - b) Observando a expressão solicitada em (a), diga qual é o sinal do trabalho quando o gás se expande. E quando o gás é comprimido?
 - c) Em que condições dizemos que o trabalho foi realizado *pelo sistema*? E *sobre o sistema*?
7.
 - a) Diga o que você entende por energia interna de um sistema.
 - b) Escreva a expressão matemática da 1ª lei da Termodinâmica. Explique o significado de cada símbolo que aparece nesta expressão.
8.
 - a) Na expressão da 1ª lei da Termodinâmica, quando devemos considerar Q positivo? E negativo?
 - b) O que é uma transformação adiabática?
 - c) Quando um sistema sofre uma transformação muito rápida, mesmo que suas paredes não sejam isolantes, a transformação pode ser considerada adiabática. Por quê?
 - d) Aplique a 1ª lei da Termodinâmica a uma expansão adiabática de um gás e diga o que se passa com sua energia interna e com sua temperatura.
 - e) Responda à questão anterior supondo que o gás tenha sofrido uma compressão adiabática.
9. Suponha que um gás ideal sofreu uma expansão isotérmica.
 - a) Foi necessário fornecer calor ao gás?
 - b) Sua energia interna variou?
 - c) Qual a relação entre Q e T nesta transformação?
10.
 - a) Descreva, com detalhes, o calorímetro apresentado na fig. 12-24 e explique qual a finalidade de cada parte do aparelho.
 - b) Para que um calorímetro seja considerado de boa qualidade, o que devemos exigir em relação à quantidade de calor que entra no aparelho ou sai dele enquanto ele é usado?
 - c) Escreva a igualdade que traduz as trocas de calor entre corpos colocados no interior de um calorímetro.

algumas experiências simples

Para você fazer

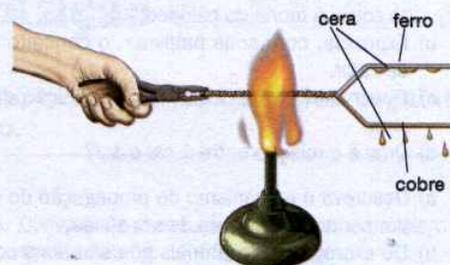
Primeira experiência

Com esta experiência, você poderá verificar que alguns metais são melhores condutores de calor do que outros.

Para isto, tome dois arames, de mesmo diâmetro e de metais diferentes: por exemplo, um de cobre e o outro de ferro. Enrole uma das extremidades dos fios entre si, como mostra a figura desta experiência. Prenda pequenos pedaços de cera (ou parafina) ao longo dos ramos livres dos arames de ferro e cobre (veja a figura).

Com uma chama, aqueça a parte enrolada dos dois fios. O calor se transmitirá, por condução, ao longo dos dois arames, provocando a fusão da cera.

Observando a fusão dos pedaços de cera, diga qual dos dois metais é melhor condutor de calor.

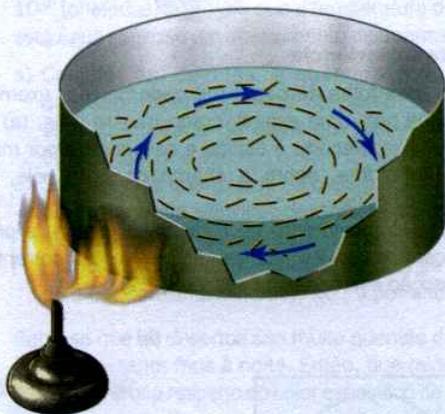


Primeira experiência.

Segunda experiência

Coloque um pouco de serragem de madeira na água contida em um recipiente. O diâmetro do recipiente não deve ser muito pequeno, de modo que você possa observar, com facilidade, o que se passa no seu interior. Colocando o recipiente sobre uma chama, à medida que a água se aquece, formam-se, como você já sabe, correntes de convecção no líquido. Você poderá observar estas correntes através do movimento da serragem, a qual acompanha aproximadamente o movimento do líquido.

Para que as correntes de convecção se tornem mais acentuadas, recomenda-se fazer o calor incidir apenas próximo à parede lateral do recipiente, como mostra a figura desta experiência.



Segunda experiência.

Terceira experiência

Tome dois recipientes idênticos, de vidro claro e transparente, como, por exemplo, duas garrafas comuns de refrigerante ou outra bebida. Usando uma substância escura (tinta preta, graxa de sapato, fuligem etc.), recubra totalmente a superfície externa de uma das garrafas.

Coloque em ambas a mesma quantidade de água e exponha ao Sol as duas garrafas (procure realizar a experiência em um dia bastante ensolarado). Depois de um 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).

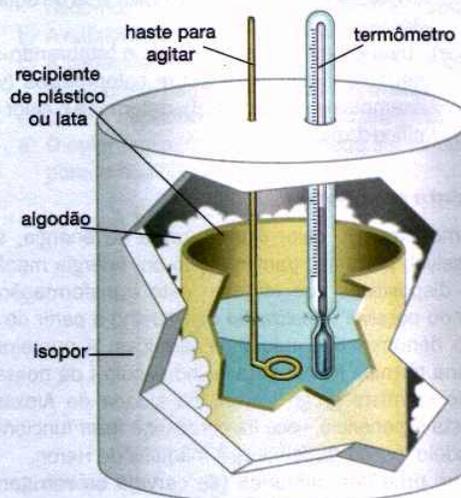
Em qual das duas garrafas a água se aqueceu mais? Explique este resultado (lembre-se do que você aprendeu sobre absorção da radiação térmica).

Quarta experiência

Você poderá construir, com relativa facilidade, um bom calorímetro, semelhante àquele da fig. 12-24. Após construí-lo, você deverá medir sua capacidade térmica para, em seguida, usando este aparelho, determinar o

calor específico de um sólido ou líquido qualquer. Proceda da seguinte maneira:

- 1) Tome um recipiente de isopor, provido de uma tampa ajustada. Em seu interior, coloque um outro recipiente, de plástico ou lata, e preencha o espaço entre os dois recipientes com algodão (veja a figura desta experiência). Faça na tampa dois orifícios, introduzindo em um deles um arame com a ponta recurvada (agitador) e, no outro, um termômetro comum (usado na experiência anterior). Assim, seu calorímetro estará pronto para ser usado.



Quarta experiência.

- 2) Para determinar a capacidade térmica do calorímetro que você construiu, leia, com atenção, o enunciado do problema 14 deste capítulo e acompanhe os passos seguidos pelo estudante mencionado naquele problema. Evidentemente, as massas e temperaturas em sua experiência não precisam ser iguais àsquelas referidas no problema 14 (você deverá escolher os valores das massas de água compatíveis com o tamanho do seu calorímetro). Se você não dispuser de uma balança apropriada, poderá obter os valores destas massas medindo seus volumes e lembrando-se de que a densidade da água é 1 g/cm^3 .

Depois de realizadas todas as medidas necessárias (descritas no problema 14), calcule, em $\text{cal}/^\circ\text{C}$, a capacidade térmica de seu calorímetro.

- 3) Agora, você poderá utilizar o calorímetro para medir o calor específico de um líquido ou sólido qualquer. Vamos usá-lo para determinar o calor específico de um óleo (de lubrificação ou de cozinha). Siga a orientação seguinte:

- a) Coloque no calorímetro uma massa conhecida de água fria, ocupando um pouco menos da metade de seu volume. Com o termômetro, leia a temperatura de equilíbrio do calorímetro com a água.

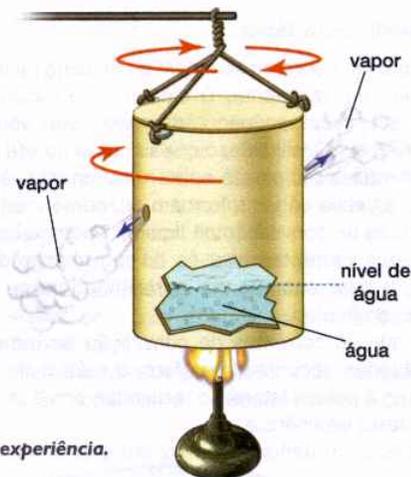
- b) Meça, com cuidado, uma certa massa de óleo, aproximadamente igual à da água colocada no calorímetro (caso não possua uma balança, peça ao farmacêutico ou comerciante próximo de sua casa que realize esta medida para você).
- c) Aqueça a massa de óleo até uma certa temperatura (cerca de 60°C ou 70°C). Usando o termômetro, leia e anote esta temperatura.
- d) Coloque imediatamente o óleo aquecido no interior do calorímetro. Use o agitador para uniformizar a temperatura da mistura e, observando o termômetro, aguarde que ela atinja o valor final de equilíbrio. Anote este valor.
- e) Usando os valores medidos e lembrando-se de seus conhecimentos sobre calorímetros (veja o exemplo da seção 12.6), determine o calor específico do óleo.

Quinta experiência

Como vimos, o calor é uma forma de energia, sendo possível, portanto, transformá-lo em energia mecânica. Os dispositivos que efetuam esta transformação, tornando possível a realização de trabalho a partir do calor, são denominados *máquinas térmicas*. A primeira máquina térmica foi construída, no século I de nossa era, pelo cientista grego Heron, na cidade de Alexandria. Nesta experiência, você irá construir e fazer funcionar um modelo rústico semelhante à máquina de Heron.

Tome uma lata cilíndrica (de cerveja ou refrigerante) contendo um pouco de água. Faça dois orifícios oblíquos em sua parede lateral de tal modo que, quando a água entrar em ebulição, o vapor formado saia pelos orifícios, em jatos de sentidos contrários, tangentes às paredes da lata (veja a figura desta experiência).

Tampe cuidadosamente a lata, para que o vapor só possa escapar por estes orifícios. Suspenda-a, por meio de cordões, de modo semelhante ao mostrado na figura. Aqueça a água com uma chama e observe o movimento que a lata adquire à medida que o vapor é expelido. Em que sentido ela está girando? Explique este movimento lembrando-se da 3ª. lei de Newton.

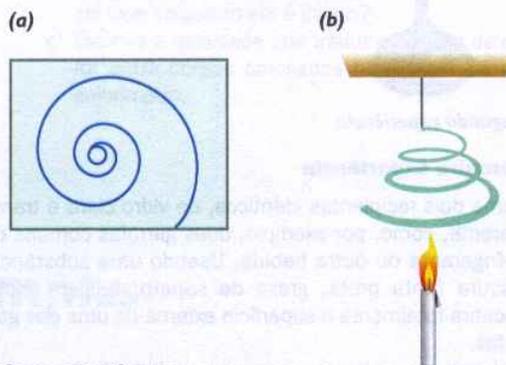


Quinta experiência.

Sexta experiência

Tome uma folha de papel (de caderno, por exemplo) e desenhe nela uma espiral, como mostra a fig. (a) desta experiência. Recorte a espiral e suspenda-a por meio de uma linha fina, sobre a chama de uma vela, como mostra a fig. (b).

Observe o movimento de rotação da espiral e procure explicar por que isto ocorre (lembre-se das correntes de convecção estudadas na seção 12.2).



Sexta experiência.

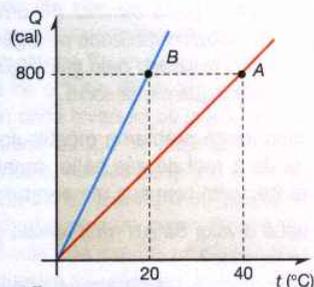
UMA ATIVIDADE COMPLEMENTAR

Faça uma pesquisa bibliográfica sobre o conjunto de acontecimentos que se seguiram à invenção da máquina de Watt e que deram origem à Revolução Industrial, ocorrida no século XIX. Procure destacar os aspectos histórico-sociais relacionados com esta revolução, elabore uma pequena dissertação sobre estes estudos e faça sua apresentação na sala de aula.

mas e testes problemas e testes problemas e test

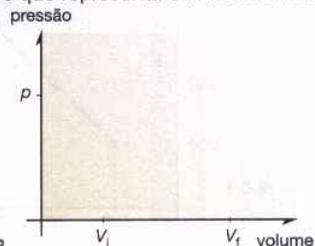
- Algumas propagandas de refrigeradores costumam apregoar as vantagens destes produtos com a seguinte frase: "Nossa geladeira não deixa o calor entrar nem o frio sair!" Há um erro conceitual de Física nesta afirmação. Qual é este erro?
- Deseja-se degelar uma geladeira. Para isto, seria melhor colocar em seu interior uma certa massa de água quente ou a mesma massa de um metal, à mesma temperatura? Explique.
- A massa total de água existente na Terra vale cerca de 10^{18} toneladas. Suponha que a temperatura de toda esta água sofresse um abaixamento de apenas 1°C .
 - Calcule, em calorias, a quantidade de calor que seria liberada neste processo. Expresse esta quantidade de calor em joules. (Considere $1 \text{ cal} \cong 4 \text{ J}$.)
 - Se toda esta quantidade de calor fosse convertida em energia elétrica, durante quantos anos ela poderia ser usada para suprir a demanda mundial? (O consumo mundial de energia elétrica é de, aproximadamente, 10^{20} J por ano.)
- Sabe-se que os desertos são muito quentes durante o dia e bastante frios à noite. Então, que conclusão você pode tirar a respeito do calor específico da areia?
- Dois blocos metálicos, A e B, de massas m_A e m_B , sendo $m_A > m_B$, absorvem a mesma quantidade de calor ΔQ e suas temperaturas sofrem a mesma variação Δt .
 - A capacidade térmica de A é maior, menor ou igual à de B?
 - O calor específico de A é maior, menor ou igual ao de B?
 - Os sólidos A e B poderiam ser feitos do mesmo material?
- Considere uma massa de 200 kg de água, caindo do alto de uma catarata cuja altura é de 210 m.
 - Qual é a energia potencial desta massa de água no alto da catarata? (Considere $g = 10 \text{ m/s}^2$.)
 - Desprezando o atrito com o ar, qual será a energia cinética desta água ao chegar ao solo?
 - Qual é, em calorias, a quantidade de calor equivalente a esta energia cinética? (Considere $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$.)
 - 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?

- A figura deste problema representa a quantidade de calor absorvido por dois corpos, A e B, ao serem aquecidos, em função de suas temperaturas. A massa de B vale 100 g, mas não conhecemos a massa de A. Assinale, entre as afirmativas seguintes, aquela que está errada:
 - A inclinação do gráfico $Q \times t$, para um corpo, fornece-nos o valor de sua capacidade térmica.
 - A capacidade térmica de B vale $40 \text{ cal}/^\circ\text{C}$.
 - A capacidade térmica de A não pode ser calculada porque não conhecemos sua massa.
 - O calor específico de B vale $0,40 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$.
 - O calor específico de A não pode ser calculado porque não conhecemos sua massa.



Problema 7.

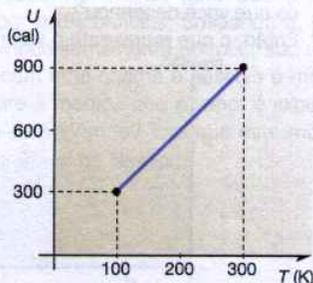
- Um gás, com um volume inicial V_i , e uma pressão p , expande-se isobaricamente até um volume final V_f .
 - Desenhe o gráfico pressão \times volume, para esta transformação.
 - Qual é a expressão do valor da área sob o gráfico que você desenhou?
 - Então, o que representa o valor desta área?



Problema 8.

- Uma dada massa gasosa sofre uma transformação, absorvendo uma quantidade de calor Q , realizando um trabalho T e sofrendo uma variação ΔU em sua energia interna. Assinale, entre as afirmativas seguintes, aquelas que estão corretas:
 - $T = Q$ se a transformação for isotérmica.
 - $\Delta U = Q$ se a transformação for isovolumétrica.
 - $\Delta U = 0$ se a transformação for adiabática.
 - $Q > T$ se a transformação for uma expansão isobárica.
 - $Q = 0$ se a transformação for isotérmica.

10. Um gás se expande rapidamente, empurrando o pistom do cilindro que o contém. Assinale as afirmativas *erradas*:
- O calor que o gás troca com a vizinhança é desprezível.
 - A expansão é praticamente adiabática.
 - A temperatura do gás permanece constante.
 - A pressão do gás diminui enquanto seu volume aumenta.
 - A pressão, p , e o volume, V , variam de tal modo que $pV = \text{constante}$.
11. Considere a transformação descrita no problema anterior. Assinale as afirmativas *corretas*:
- O trabalho realizado pelo gás foi positivo.
 - A energia interna do gás não variou.
 - O gás realiza trabalho usando parte de sua energia interna.
 - A energia interna diminui de uma quantidade igual ao trabalho realizado pelo gás.
 - O trabalho realizado pelo gás é igual à quantidade de calor que ele absorve.
12. O gráfico deste problema mostra como a energia interna de 1 mol de gás hélio, mantido a volume constante, varia com sua temperatura absoluta.
- Qual é o valor de ΔU no intervalo de temperatura mostrado?
 - Qual o trabalho realizado pelo hélio nesta transformação?
 - Qual a quantidade de calor que o gás absorveu?
 - Calcule, então, o calor específico, a volume constante, do hélio (lembre-se de que a massa de 1 mol deste gás é de 4 g).



Problema 12.

13. Assinale as afirmativas seguintes e diga se cada uma delas está certa ou errada. Justifique sua resposta.
- Sempre que um gás recebe calor, sua temperatura sofre um acréscimo.
 - Se um gás recebe calor e sua energia interna não varia, seu volume aumenta obrigatoriamente.
14. Um estudante construiu um calorímetro e procurou determinar o valor da capacidade térmica deste aparelho. Para isto, colocou em seu interior 300 g

de água fria e, aguardando um certo tempo, verificou que o conjunto alcançou o equilíbrio térmico a uma 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, então, que a temperatura final era de 25°C . Baseando-se nestes dados, calcule a capacidade térmica do calorímetro do estudante.

15. O estudante usou o calorímetro mencionado no problema anterior para determinar o calor específico de um certo metal. Tomando o aparelho nas mesmas condições iniciais citadas no problema 14 (conjunto calorímetro + 300 g de água a 20°C), ele colocou, em seu interior, 500 g de pequenas esferas do referido metal a uma temperatura de 90°C . Aguardando que o equilíbrio térmico fosse alcançado, o estudante constatou uma temperatura final de 35°C .
- Calcule o calor específico do metal.
 - Consultando a tabela 12-1, procure identificar qual era o metal utilizado na experiência.
16. a) Para medir a temperatura de um corpo, dispõe-se de um termômetro, cuja capacidade térmica tem um valor próximo ao da capacidade térmica deste corpo. O termômetro forneceria um valor correto para aquela temperatura? Explique.
- b) Que condição a capacidade térmica de um termômetro deve satisfazer para fornecer corretamente a temperatura de um corpo?
17. Sabe-se que o calor específico da água é bem maior do que o da terra. Baseando-se nesta informação e considerando uma região à beira-mar, responda:
- Em virtude da incidência dos raios solares nesta região, a temperatura da terra, durante o dia, é maior ou menor do que a da água do mar?
 - Então, durante o dia, uma pessoa na praia deverá perceber uma brisa soprando do mar para a terra ou da terra para o mar?
 - Após o pôr-do-sol, qual se esfriará mais rapidamente, a terra ou a água do mar? Então, em que sentido deverá soprar a brisa durante a noite?
18. Um recipiente, cuja capacidade térmica é igual a $20 \text{ cal}/^\circ\text{C}$, contém 100 g de um certo líquido. O conjunto é aquecido a uma temperatura de 75°C e, em seguida, colocado no interior de um calorímetro de capacidade térmica igual a $80 \text{ cal}/^\circ\text{C}$, que se encontra a 20°C e contém 300 g de água a esta mesma temperatura. Observa-se uma temperatura final de 25°C . Determine o calor específico do líquido considerado.
19. É possível fornecer calor a um gás e, apesar disto, sua temperatura diminuir? Explique.

20. Como você sabe, uma garrafa térmica é um dispositivo que permite manter constante a temperatura de um objeto (quente ou frio) colocado em seu interior. Observando a figura deste problema, procure explicar como é construída uma garrafa térmica e descreva como se tenta impedir que o calor entre ou saia de seu interior pelos três processos que conhecemos (condução, convecção e radiação).



Problema 20.

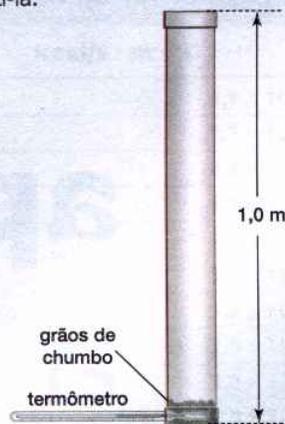
21. Em um calorímetro, de capacidade térmica igual a $2,5 \text{ cal/}^\circ\text{C}$, colocam-se 100 g de álcool verificando-se que o conjunto encontra-se a uma temperatura de $8,0^\circ\text{C}$. Um bloco de cobre de massa igual a 200 g e à temperatura de 100°C é introduzido no calorímetro. A temperatura final da mistura é de 28°C . Considerando o calor específico do cobre igual a $0,095 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, determine o calor específico do álcool.
22. Um bloco metálico recebe um fluxo de calor (quantidade de calor por unidade de tempo), constante, proveniente de uma fonte térmica, durante $5,0$ minutos. A mesma massa de água, recebendo o mesmo fluxo de calor durante 10 minutos, sofre uma variação de temperatura igual à metade daquela experimentada pelo bloco. Calcule o calor específico do metal.

bloco	$c \text{ (cal/g}^\circ\text{C)}$	$m \text{ (g)}$
A	0,20	200
B	0,40	400
C	0,05	600
D	0,60	800
E	0,01	1000

Problema 23.

23. A mesma quantidade de calor é fornecida a cinco blocos sólidos, de substâncias e massas diferentes. Considerando os dados fornecidos na tabela deste problema, determine qual dos blocos experimenta maior elevação de temperatura.
24. Uma usina termonuclear utiliza 20% das águas de um rio para seu sistema de refrigeração. Uma vez utilizada, esta água sai da usina com uma temperatura 12°C acima da temperatura média do rio no trecho anterior à usina. De quanto se eleva a temperatura média das águas do rio logo após receber a água da usina?
25. Uma massa de $m \text{ g}$ de pequenos grãos de chumbo é colocada no interior de um tubo de PVC (ou de papelão) de $1,0 \text{ m}$ de comprimento, fechado em ambas as extremidades. Mede-se a temperatura inicial do chumbo por um termômetro introduzido lateralmente, que esteja em contato com os grãos, como mostra a figura deste problema. Em seguida, inverte-se o tubo 20 vezes sucessivas, de modo que em cada inversão os grãos de chumbo sofram uma queda de $1,0 \text{ m}$. Fazendo nova leitura com o termômetro, verifica-se que o chumbo sofreu uma elevação de temperatura de $1,5^\circ\text{C}$. Considerando estes dados procure determinar o valor que esta experiência, de pouca precisão, fornece para a relação entre as unidades 1 cal e 1 J (esta relação costuma ser denominada "equivalente mecânico da caloria"). Tome $g = 10 \text{ m/s}^2$.

Observação: Você poderá realizar com relativa facilidade esta experiência muito simples, que lhe fornecerá um valor aproximado de uma relação importante no campo da Termodinâmica. Procure reproduzi-la.



Problema 25.

26. a) Verifica-se que a madeira sólida é um isolante térmico pior do que a serragem feita da mesma madeira. Procure uma explicação para este fato. (Sugestão: o ar é um isolante térmico muito melhor do que a madeira.)

- b) Apesar de o ar ser melhor isolante térmico do que a madeira, para retardar a fusão de uma barra de gelo, colocada ao ar livre, costuma-se cobri-la com serragem. Tente explicar esta “saberia” popular.
27. Considere uma amostra de um gás ideal monoatômico, cuja energia interna é devida apenas à energia cinética de translação de suas moléculas. Sabe-se que a amostra contém $2,0 \times 10^{24}$ moléculas.
- a) Sendo de 27°C a temperatura da amostra, determine o valor de sua energia interna U (considere a constante de Boltzmann, $k = 1,4 \times 10^{-23} \text{ J/K}$).
- b) Suponha que uma quantidade de calor $Q = 2,0 \times 10^3 \text{ cal}$ seja fornecida à amostra enquanto ela se expande, realizando um trabalho $T = 2,4 \times 10^3 \text{ J}$. Determine a temperatura Celsius da amostra após sofrer esta transformação (considere $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$).
28. Para determinar a temperatura da chama de um bico de gás, um estudante aqueceu, nesta chama, durante um certo tempo, um prego de ferro, de massa igual a 10 g . Logo a seguir, mergulhou o prego em um calorímetro de capacidade térmica desprezível, contendo 100 g de água, verificando que a temperatura desta água sofreu uma elevação de 10°C para 20°C . Qual era a temperatura da chama?
29. A potência elétrica dissipada por um aquecedor de imersão é de 200 W . Mergulha-se o aquecedor em um recipiente que contém $1,0 \text{ L}$ de água a 20°C . Supondo que 70% da potência dissipada pelo aquecedor seja aproveitada para o aquecimento da água, determine o tempo necessário para que sua temperatura atinja 90°C .
30. Em um calorímetro, chamado calorímetro de fluxo, um líquido cujo calor específico deseja-se medir atravessa este aparelho com uma vazão de $10,0 \text{ cm}^3/\text{s}$. No interior do calorímetro há um aquecedor elétrico de 240 W que fornece calor ao líquido. Verifica-se que há uma diferença constante de 15°C entre as temperaturas do líquido ao entrar e ao sair do calorímetro. Sabendo-se que a densidade deste líquido é de $0,80 \text{ g/cm}^3$, determine em $\text{J/kg}^\circ\text{C}$ o seu calor específico.

Resolva as questões de vestibular questões de vestibular

As questões de vestibular se encontram no final do livro.

apêndice

C. I. Transferência de calor — Estudo quantitativo

Na secção 12.2 foi feito um estudo qualitativo da transferência de calor de um corpo, a uma certa temperatura, para outro com temperatura inferior. Vimos que essa transferência pode ser feita por *condução*, *convecção* e *radiação* e não nos

preocupamos, naquela secção, em determinar o valor da quantidade de calor transferida em cada caso. Aqui vamos mostrar como este valor pode ser calculado para os casos da condução e da radiação.

CONDUÇÃO

Consideremos dois corpos mantidos em temperaturas fixas T_1 e T_2 , tais que $T_2 > T_1$. Unindo estes corpos por uma barra de secção uniforme de área A e de comprimento L (fig. C-1), haverá condução de calor, através da barra, do corpo mais quente para o mais frio, como poderíamos prever. Seja ΔQ a quantidade de calor que passa por uma secção qualquer da barra, durante um intervalo de tempo Δt . O quociente $\Delta Q/\Delta t$ é denominado *fluxo de calor* através daquela secção, grandeza que vamos representar pela letra grega ϕ (fi), isto é,

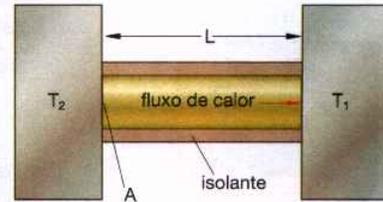


Fig. C-1: Em uma barra sólida, o calor se transfere por condução.

$$\phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Se a barra da fig. C-1 for envolvida por um isolante térmico, verifica-se que depois de um certo tempo ela atinge uma situação denominada *regime estacionário*, que é caracterizado por ter o fluxo de calor o mesmo valor em qualquer secção da barra. Em consequência desse fato, a temperatura de um ponto qualquer da barra atinge um valor que não se altera com o decorrer do tempo. Em nosso estudo vamos trabalhar sempre com barras conduzindo calor em regime estacionário.

Verifica-se experimentalmente que o fluxo de calor ϕ é:

- 1º) diretamente proporcional à área A da secção reta da barra, isto é, $\phi \propto A$.
- 2º) diretamente proporcional à diferença de temperatura entre as extremidades da barra, isto é, $\phi \propto (T_2 - T_1)$.
- 3º) inversamente proporcional ao comprimento da barra, isto é, $\phi \propto 1/L$.

Podemos, então, escrever:

$$\phi \propto A \frac{T_2 - T_1}{L}$$

ou, introduzindo a constante de proporcionalidade K , vem

$$\phi = KA \frac{T_2 - T_1}{L}$$

A constante K é característica do material de que é feita a barra e se denomina *condutividade térmica* da substância. Na tabela C-1 estão apresentados valores da condutividade térmica de alguns materiais. Quanto maior o valor de K , maior é o fluxo de calor que a barra conduz e, portanto, melhor condutora de calor será a substância de que é feita a barra.

Condutividade térmica	
kcal/s · m · °C	
Alumínio	$4,9 \times 10^{-2}$
Cobre	$9,2 \times 10^{-2}$
Chumbo	$8,3 \times 10^{-3}$
Prata	$9,9 \times 10^{-2}$
Aço	$1,1 \times 10^{-2}$
Ar	$5,7 \times 10^{-6}$
Hidrogênio	$3,3 \times 10^{-5}$
Amianto	$2,0 \times 10^{-5}$
Vidro	$2,0 \times 10^{-4}$
Concreto	$2,0 \times 10^{-4}$
Madeira	$2,0 \times 10^{-5}$
Cortiça	$1,0 \times 10^{-5}$

Obs.: Os gases estão em condições normais de temperatura e pressão.

Tabela C-1.

Exemplo 1

Uma barra de alumínio de comprimento $L = 80$ cm e de secção reta $A = 200$ cm², tem uma de suas extremidades introduzida em uma caldeira com água em ebulição (veja a fig. C-2). A outra extremidade da barra encontra-se, no ar ambiente, a 20°C.

- a) Determine o fluxo de calor ϕ que é transferido através da barra para o ar ambiente. Supondo o regime estacionário, sabemos que o fluxo de calor por condução é dado pela equação

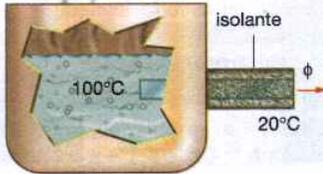


Fig. C-2: Para o exemplo 1.

$$\phi = KA \frac{T_2 - T_1}{L}$$

Na tabela C-1 encontramos a condutividade térmica do alumínio:

$$K = 4,9 \times 10^{-2} \text{ kcal/s} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$$

Observe que o valor de K está expresso usando-se o metro como unidade de comprimento. Então, os valores de A e L devem ser expressos nesta unidade, isto é:

$$L = 80 \text{ cm} = 80 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$A = 200 \text{ cm}^2 = 200 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Logo

$$\phi = 4,9 \times 10^{-2} \times 200 \times 10^{-4} \times \frac{(100 - 20)}{80 \times 10^{-2}} \quad \text{donde} \quad \phi = 9,8 \times 10^{-2} \text{ kcal/s.}$$

A unidade obtida nessa resposta vem da combinação de unidades de cada grandeza presente na equação que fornece ϕ :

$$\frac{\text{kcal}}{\text{s} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}} \times \text{m}^2 \times \frac{^\circ\text{C}}{\text{m}} = \frac{\text{kcal}}{\text{s}}$$

Como $1 \text{ kcal} = 1$ quilocaloria $= 10^3 \text{ cal}$, vem

$$\phi = 9,8 \times 10^{-2} \times 10^3 \text{ cal/s} = 98 \text{ cal/s}$$

- b) Qual é em watts a potência térmica, P , que está sendo transferida através da barra para o ar? Evidentemente, o fluxo ϕ é a própria potência transferida, expressa em cal/s. Supondo $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$, temos

$$\phi = P = 98 \times 4,2 \text{ J/s}$$

ou

$$P = 411 \text{ J/s} = 411 \text{ W}$$

Observe, apenas para comparação, que esta potência equivale aproximadamente à potência emitida por 4 lâmpadas de 100 W.

- c) Supondo que a situação descrita na questão (a) seja mantida invariável, durante 10 minutos, calcule, em calorías, a quantidade total de calor transferida ao ar durante este tempo.

De $\phi = \Delta Q/\Delta t$, obtemos $\Delta Q = \phi \cdot \Delta t$. Temos

$$\Delta t = 10 \text{ min} = 600 \text{ s}$$

Logo

$$\Delta Q = \phi \Delta t = 98 \frac{\text{cal}}{\text{s}} \times 600 \text{ s}$$

ou

$$\Delta Q = 5,9 \times 10^4 \text{ cal}$$



RADIAÇÃO

Já vimos que a transferência de calor por condução e por convecção exige a presença de um meio material para que ela ocorra. A radiação, ao contrário, pode se fazer através do espaço vazio e é por este motivo que a radiação emitida pelo Sol chega até à Terra. Sabe-se ainda que qualquer corpo pode emitir radiações térmicas, não sendo necessário que sua temperatura seja tão elevada quanto a do Sol. Por exemplo, um ferro de passar roupa, aquecido, emite uma quantidade apreciável de radiação (fig. C-3-a), como é fácil perceber colocando nossa mão a uma certa distância de sua superfície (lembre-se de que o ar é mau condutor de calor). Até mesmo o corpo humano emite radiações que podem ser detectadas por uma máquina fotográfica com filmes especiais sensíveis a essas radiações (fig. C-3-b).

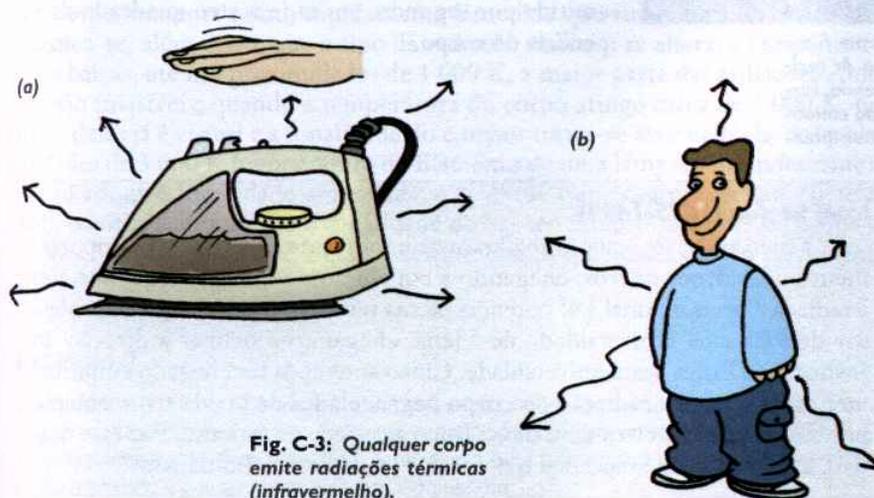


Fig. C-3: Qualquer corpo emite radiações térmicas (infravermelho).

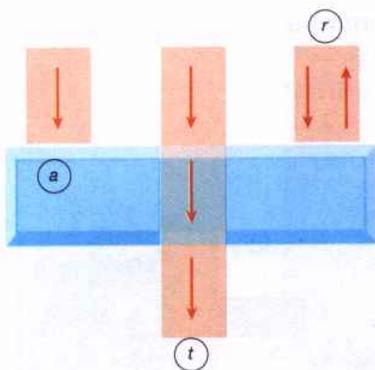


Fig. C-4: Quando um corpo recebe energia radiante, esta pode ser refletida (*r*), absorvida (*a*) ou transmitida (*t*) por ele.

Quando uma certa quantidade de energia radiante incide em um corpo (fig. C-4), de um modo geral parte dela é absorvida pelo corpo, outra parte é transmitida através dele e a parte restante é refletida. Na fig. C-4 essas partes estão representadas pelas faixas *a*, *t* e *r*. Como dissemos na seção 12.2, os corpos escuros absorvem uma porção maior da radiação que neles incide, enquanto os corpos claros e lisos refletem a maior parte da radiação incidente. Além disso, verificou-se experimentalmente que os corpos que apresentam grande poder de absorção são também bons emissores e vice-versa. Por esta razão, um corpo ideal, capaz de absorver toda a radiação que nele incidir, seria também um emissor de eficiência máxima. Em outras palavras, o absorvedor ideal seria o corpo que a uma dada temperatura emitiria uma taxa de radiação (por unidade de área) maior do que qualquer outro corpo. Todo emissor ou absorvedor ideal é denominado *corpo negro*. Essa denominação se deve ao fato de que (como veremos no estudo de Ótica) esse corpo apareceria negro ao ser observado, já que ele não reflete radiação alguma. Entretanto, deve-se ressaltar que este corpo não nos pareceria negro se estivesse em temperatura tal que o tornasse emissor de radiações visíveis.



Alfred Pasika/SPL/Stock Photos

Fotografia de uma casa, obtida com filme sensível à radiação infravermelha. As regiões que aparecem nas cores amarelo, vermelho e rosa são aquelas que estão emitindo este tipo de radiação com maior intensidade.

A LEI DE STEFAN-BOLTZMANN

Consideremos um corpo cuja superfície externa tenha uma área *A*, emitindo através dela uma radiação total de potência *P* (energia irradiada por unidade de tempo, por toda a superfície). Denomina-se *radiância* ou *poder emissivo*, *R*, do corpo, à relação

$$R = \frac{P}{A}$$

Evidentemente, a unidade de medida desta grandeza no S.I. é 1 W/m^2 . Vemos, então, que o valor de *R*, no S.I., representa a quantidade de energia, em joules, emitida por segundo, em cada metro quadrado da superfície do corpo.

Josef Stefan (1835-1893)

Físico austríaco, cujo trabalho mais importante se refere ao comportamento dos corpos negros, chegando à conclusão de que a energia por eles irradiada é proporcional à 4ª potência de sua temperatura Kelvin. Foi professor de Física na Universidade de Viena, chegando a ocupar a direção do Instituto de Física desta universidade. Cinco anos após ter chegado empiricamente à lei sobre a radiação do corpo negro, ela foi deduzida teoricamente por seu colega L. Boltzmann, outro físico austríaco de renome. Por esse motivo, a lei mencionada recebeu o nome de "lei de Stefan-Boltzmann".

Na segunda metade do século passado, os cientistas austríacos, J. Stefan e L. Boltzmann, chegaram (o primeiro experimentalmente e o segundo teoricamente) a um resultado, referente aos corpos negros, denominado lei de Stefan-Boltzmann, cujo enunciado é o seguinte:

a radiância, R_N , de um corpo negro é proporcional à quarta potência de sua temperatura Kelvin T , isto é,

$$R_N \propto T^4 \quad \text{ou} \quad R_N = \sigma T^4$$

A constante de proporcionalidade σ (letra grega sigma) é denominada constante de Stefan-Boltzmann e seu valor no S.I. é

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$$

Qualquer emissor não ideal, isto é, um corpo real qualquer, terá a uma dada temperatura uma radiância, R , menor do que a do corpo negro, ou seja, $R < R_N$. Define-se, então, *emissividade*, e , de um corpo qualquer, da seguinte maneira:

$$e = \frac{R}{R_N} \quad \text{donde} \quad R = eR_N$$

$$\text{ou} \quad R = e \sigma T^4$$

Com esta equação podemos calcular a radiância de um corpo qualquer quando conhecemos sua temperatura e sua emissividade.

Evidentemente, para um corpo negro temos $e = 1$ e para um refletor ideal, ou seja, um corpo que não emite radiação alguma, temos $e = 0$. Outros corpos terão emissividade compreendida entre esses limites. Por exemplo: para o aço polido tem-se $e = 0,07$; para o cobre polido, $e = 0,3$; para uma pintura metálica preta, $e = 0,97$ etc.

COMENTÁRIO

A equação $R = e\sigma T^4$ nos mostra que a quantidade de radiação emitida por um corpo aumenta muito rapidamente à medida que sua temperatura se eleva. Verifica-se, além disso, que o tipo da radiação também se altera: a temperaturas mais baixas, até nas proximidades de 1 000 K, a maior parte das radiações emitidas são invisíveis; quando a temperatura do corpo atinge cerca de 2 000 K, boa parte delas já é visível e a tonalidade do emissor torna-se avermelhada; nas proximidades de 3 000 K (temperatura do filamento de uma lâmpada incandescente) o corpo adquire tonalidade amarelada; a 6 500 K (temperatura da superfície do Sol), o corpo emite luz com tonalidade do branco intenso; finalmente, acima de 10 000 K (temperatura de algumas estrelas muito quentes) a cor do corpo emissor torna-se azulada.

Exemplo 2

- a) Um objeto a uma temperatura T_1 está envolvido por um ambiente à temperatura T_2 . O objeto emite radiações para o ambiente e absorve radiações emitidas por ele. Sendo e a emissividade e A a área do objeto, determine a potência térmica líquida (diferença entre o fluxo emitido e o fluxo absorvido) irradiada por ele.

Da expressão $R = \frac{P}{A}$ vem

$$P = R \cdot A \quad \text{ou} \quad P = e \sigma AT^4$$

Então, o objeto emite uma potência

$$P_1 = e \sigma AT_1^4$$

Como vimos, a capacidade de absorção de um corpo é igual à sua capacidade de emissão. Isto significa que o coeficiente e que caracteriza a emissividade de um determinado corpo é o mesmo coeficiente e que caracteriza sua absorvidade. Portanto, a potência absorvida pelo objeto será dada por

$$P_2 = e \sigma AT_2^4$$

Logo, a potência líquida irradiada pelo objeto é

$$P = P_1 - P_2 \quad \text{ou} \quad P = e \sigma A (T_1^4 - T_2^4)$$

b) Uma pessoa, sem roupa, está em pé em uma sala cujas paredes estão à temperatura de 15°C . Sabe-se que a área da superfície do corpo da pessoa é $A = 1,5 \text{ m}^2$ e que a temperatura de sua pele é de 34°C (a pele se apresenta sempre em temperatura um pouco inferior à do interior do corpo). Considerando a emissividade da pele $e = 0,70$, determine a potência líquida irradiada pela pessoa.

Temos

$$T_1 = 273 + 34 = 307 \text{ K} \quad \text{e} \quad T_2 = 273 + 15 = 288 \text{ K}$$

Então, usando o resultado obtido na questão (a), vem:

$$P = 0,70 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 1,5 (307^4 - 288^4) \quad \text{donde} \quad P = 120 \text{ W}$$

De modo geral, uma pessoa em repouso produz calor, pelo metabolismo interno, com uma potência inferior a 120 W. Assim, nas condições deste exemplo, a temperatura da pessoa, em virtude da irradiação e de outras perdas de calor, tenderá a cair, causando-lhe um considerável desconforto. Seu organismo reage a este desconforto e começa a tremer, o que ocasiona um aumento da taxa metabólica para compensar a perda e manter estável a temperatura de seu corpo. Evidentemente, o uso de roupas ou agasalhos, diminuindo as perdas de calor, pode evitar o desconforto mencionado.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

- a) Suponha que na equação $\phi = KA (T_2 - T_1)/L$, a quantidade de calor seja medida em kcal ($1 \text{ kcal} = 10^3 \text{ cal}$), o tempo em segundos, L em metros, A em m^2 e as temperaturas em $^\circ\text{C}$. Qual seria, neste caso, a unidade da condutividade térmica K ?

b) Consulte a tabela C-1 e verifique se a unidade ali usada para K coincide com sua resposta da questão anterior.
- Consultando a tabela C-1, identifique, entre as substâncias ali apresentadas:

 - Aquela que é o melhor isolante térmico.
 - Aquela que é o melhor condutor de calor.
- Tendo em vista a resposta do exercício anterior, explique por que em países de clima frio costuma-se

usar janelas com vidraças duplas, como mostra a figura deste exercício (este tipo de janela chega a reduzir em até 50% as perdas de calor).



Exercício 3.

4. a) Calcule o fluxo, ϕ , de calor, através do vidro de uma janela, de área $A = 3,0 \text{ m}^2$ e de espessura $L = 4,0 \text{ mm}$, sabendo-se que as temperaturas das superfícies interna e externa do vidro são $15,0^\circ\text{C}$ e $14,0^\circ\text{C}$, respectivamente.
- b) Determine, aproximadamente, quantas lâmpadas de 100 W poderiam ser mantidas acesas com o fluxo de calor perdido através dessa janela (considere $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$).
5. Uma parede de concreto tem uma espessura de 20 cm . Deseja-se substituí-la por outra de mesma área, com a mesma capacidade de isolamento térmico. Qual deveria ser a espessura da nova parede, supondo que ela fosse feita de:
- a) Amianto?
b) Aço?
6. Lembrando-se da definição de radiância, R , e da lei de Stefan-Boltzmann, apresentadas nesta seção, procure determinar a unidade, no S.I.:
- a) Da radiância R .
b) Da constante σ .
7. Em sua famosa obra *2001 — Uma odisséia no espaço*, o autor Arthur Clarke refere-se a um astronauta que “passeia” no espaço sem vestimenta especial, sem fazer nenhuma observação sobre os danos que esta situação causaria ao astronauta. Para você ter uma idéia do que ocorreria nessas condições, procure responder às questões seguintes:
- a) Considere para o astronauta os mesmos dados da pessoa da questão (b) — exemplo 2, resolvendo nesta seção, mas, para facilitar seus cálculos, tome a temperatura da pele igual a 300 K e $\sigma = 6 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$. Calcule a radiância, R , deste astronauta.
- b) Qual seria a potência térmica que o astronauta iria irradiar?
- c) Qual seria o fluxo de radiação térmica que o astronauta iria absorver? (Estamos supondo o astronauta no espaço, muito afastado de qualquer outro corpo material.)
- d) Quantas vezes a potência térmica irradiada pelo astronauta é maior que a potência irradiada pela pessoa da questão (b), exemplo 2?
- e) Lembrando-se que a pessoa no exemplo 2 chegava a tremer de frio, qual seria a sensação que o astronauta iria sentir naquela situação?
8. a) Imagine que a temperatura Kelvin de um corpo se tornasse duas vezes maior. Quantas vezes maior se tornaria a potência térmica irradiada por este corpo?
- b) Suponha que a temperatura de um corpo passasse de 27°C para 127°C . Quantas vezes maior se tornaria a potência térmica irradiada por ele?
9. Sabe-se que a radiação térmica do Sol, em um dia claro, ao chegar à superfície terrestre, possui uma intensidade de 1000 W/m^2 , admitindo que ela atinja perpendicularmente a superfície sobre a qual incide.
- a) Suponha que uma pessoa cuja emissividade vale $e = 0,70$, esteja deitada em uma praia, com uma área de $0,80 \text{ m}^2$ de sua pele exposta perpendicularmente aos raios solares (sol a pino). Determine em quilocalorias a quantidade de radiação térmica absorvida pela pessoa durante $5,0$ minutos. Considere $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$.
- b) Resolva a questão anterior supondo que o Sol esteja com uma elevação de 30° acima do horizonte (aproximadamente às 8 horas da manhã).
10. Uma folha, em uma árvore, tem uma de suas faces com área igual a 40 cm^2 voltada diretamente para o Sol em um dia claro. A massa dessa folha é de $5,0 \times 10^{-3} \text{ kg}$, sua emissividade é $0,80$ e seu calor específico vale $0,80 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$. Considere a intensidade da radiação solar fornecida no exercício anterior e determine a elevação da temperatura da folha após uma exposição de 10 s de duração (tome $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$).

C.2. Máquinas térmicas — informações adicionais

DIAGRAMA $p \times V$ PARA UM CICLO

Na seção 12.7 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

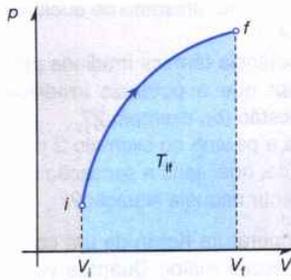


Fig. C-5: O trabalho realizado por um gás, em uma variação de volume, é dado pela área sob o gráfico $p \times V$.

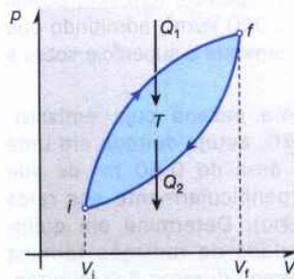


Fig. C-6: O trabalho realizado pelo sistema ao percorrer o ciclo é fornecido pela área indicada.

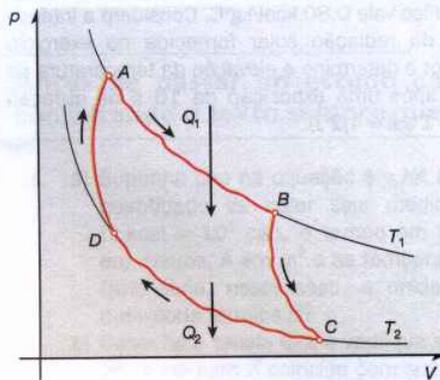


Fig. C-7: Ciclo de Carnot para um gás ideal. O ciclo de Carnot consiste em duas transformações isotérmicas, alternadas com duas transformações adiabáticas.

p do gás tenha variado, durante a transformação, da maneira mostrada na fig. C-5. Como a transformação não é isobárica, o trabalho T_{if} realizado pelo gás nesta expansão, não pode ser calculado pela expressão $T_{if} = p(V_f - V_i)$, analisada na secção 12.4. Pode-se mostrar que nesse caso (p variável), o valor do trabalho T_{if} é dado pela área sob a curva do gráfico $p \times V$, destacada na fig. C-5.

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 fig. C-6. Nesta 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. É fácil perceber que o trabalho líquido, T , realizado pelo sistema ao percorrer o ciclo, será dado pelas diferenças entre aqueles dois trabalhos realizados na expansão e na compressão. Este trabalho T será, então, representado pelo valor da área limitada pelas curvas que definem o ciclo (fig. C-6).

Deve-se observar que durante a expansão o gás absorveu uma quantidade de calor Q_1 , rejeitando uma quantidade de calor Q_2 na compressão. 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

$$Q - T = \Delta U \quad \text{donde} \quad (Q_1 - Q_2) - T = 0$$

$$\text{ou} \quad T = Q_1 - Q_2$$

CICLO DE CARNOT

Das diversas maneiras que podemos realizar um ciclo, existe uma, em particular, muito importante. Tal ciclo, denominado *ciclo de Carnot*, foi descrito e analisado por um jovem engenheiro francês, Sadi Carnot, em 1824. O ciclo de Carnot consiste em duas transformações isotérmicas, alternadas com duas transformações adiabáticas e está representado na fig. C-7 para um gás ideal.

Na transformação isotérmica, AB , o gás absorve o calor Q_1 , enquanto se expande. Este 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 . Esta transformação adiabática é representada pela curva BC na fig. C-7. De C para D temos uma compressão isotérmica, na qual o gás cede calor para a fonte fria à temperatura T_2 e, finalmente, com uma compressão adiabática (DA) o gás retorna às condições iniciais. Quando um dispositivo opera segundo este ciclo, dizemos que ele é uma *máquina de Carnot*. A importância do ciclo de Carnot é devida ao teorema seguinte, conhecido como *teorema 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 estas mesmas fontes”.

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. Apesar da importância deste estudo no desenvolvimento da ciência da Termodinâmica, ele foi inicialmente ignorado, talvez em virtude da liderança da Inglaterra na tecnologia das máquinas a vapor. Não era, portanto, esperado que um trabalho deste vulto surgisse na França. Trabalhando com as idéias da teoria do calórico, Carnot comparava o funcionamento de uma máquina térmica, que está relacionado com a “queda” de calor da fonte quente para a fonte fria, ao trabalho que é realizado pela água ao cair entre pontos de alturas diferentes. Embora essas idéias estejam atualmente ultrapassadas, muitos dos resultados obtidos através delas são válidos ainda hoje, sobretudo 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. O reconhecimento deste grande trabalho ocorreu quando Clausius, na Alemanha, e Kelvin, na Inglaterra, desenvolveram a moderna teoria da Termodinâmica, incorporando nela as idéias de Carnot. Interessado na melhoria da educação pública, Sadi Carnot morreu ainda jovem, aos 36 anos de idade, durante uma epidemia de cólera em Paris.



SPL/Stock Photos

Então, o ciclo de Carnot corresponde ao rendimento máximo que podemos obter com duas fontes térmicas. Este teorema é demonstrado a partir da 2ª lei da Termodinâmica.

O rendimento de uma máquina de Carnot pode ser calculado, teoricamente, tendo sido encontrado para ele o seguinte resultado:

$$R = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

onde T_2 e T_1 são as temperaturas Kelvin da fonte fria e da fonte quente, respectivamente. Assim, se uma máquina de Carnot operasse entre duas fontes, tais que $T_1 = 800 \text{ K}$ e $T_2 = 200 \text{ K}$, 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 deste, teria rendimento inferior a 75%.

Com estes conhecimentos você pode entender por que o zero absoluto representa um limite inferior para a temperatura de um corpo. De fato, se um sistema pudesse atingir esta temperatura, ele poderia ser usado como a fonte fria de uma máquina de Carnot. Como $T_2 = 0$, o rendimento da máquina seria $R = 1 = 100\%$, o que contraria a 2ª lei. Logo, o zero absoluto pode ser aproximado indefinidamente, mas não pode ser atingido. Conforme já dissemos, a experiência tem mostrado que isto é verdadeiro. De fato, os cientistas já conseguiram obter temperaturas extremamente baixas, chegando até 0,000 001 K, mas o zero absoluto não foi atingido.

Exemplo 1

Um inventor afirma que inventou uma máquina que extrai 25×10^6 cal de uma fonte à temperatura de 400 K e rejeita 10×10^6 cal para uma fonte a 200 K, entregando-nos um trabalho de 54×10^6 J. Você investiria dinheiro na fabricação dessa máquina?

Temos:

$$Q_1 = 25 \times 10^6 \text{ cal}$$

$$Q_2 = 10 \times 10^6 \text{ cal}$$

$$T = 54 \times 10^6 \text{ J}$$

Logo,

$$T = \left(\frac{54 \times 10^6}{4,18} \right) \text{ cal} = 13 \times 10^6 \text{ cal}$$

Como $Q_1 - Q_2 = 15 \times 10^6$ 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 13×10^6 cal, em vez de 15×10^6 cal, é perfeitamente razoável, pois 2×10^6 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.

Vejamos, agora, se ela é compatível com a 2ª lei da Termodinâmica. O rendimento da máquina é:

$$R = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{10 \times 10^6}{25 \times 10^6} = 0,6 = 60\%$$

Entretanto, uma máquina de Carnot, operando entre estas mesmas temperaturas, teria um rendimento:

$$R = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{200}{400} = 50\%$$

Ora, a suposta máquina tem um rendimento maior que a máquina de Carnot. Se você acredita nos princípios básicos da Termodinâmica, não seria capaz de acreditar no inventor. Apenas para dissipar dúvidas, você poderia ir verificar o funcionamento da máquina. Pode estar certo de que, ou alguma medida realizada anteriormente estava errada, ou havia evidente má-fé por parte do inventor.

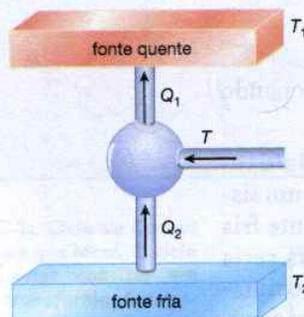


Fig. C-8: Um refrigerador funciona como uma máquina térmica operando em sentido inverso. Ilustração esquemática.

REFRIGERADOR

Como você sabe, o refrigerador é um aparelho que reduz a temperatura dos materiais colocados no seu interior e mantém neste ambiente uma temperatura inferior à de suas vizinhanças. Para realizar estas tarefas o refrigerador funciona como uma máquina térmica operando em sentido contrário, isto é, o refrigerador retira calor (Q_2) de uma fonte fria, à temperatura T_2 , e, após um certo trabalho (T) ser realizado sobre ele, rejeita uma quantidade de calor (Q_1) para um ambiente (fonte quente) a uma temperatura T_1 tal que $T_1 > T_2$ (fig. C-8). É evidente que $Q_1 = Q_2 + T$, isto é, o refrigerador rejeita 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).

Para compreender o funcionamento de um refrigerador comum, observe a fig. C-9, que representa esquematicamente as principais partes deste aparelho. Na serpentina *B*, o gás que circula no refrigerador (que costuma ser o fréon ou outro gás usado na indústria de refrigeração), está liquefeito sob a pressão produzida pelo compressor *A* (acionado pelo motor).

Este líquido, passando por um estrangulamento em *C*, sofre uma expansão, ao penetrar na tubulação do refrigerador, *D*, onde ele se apresenta como uma mistura de líquido e vapor a uma temperatura relativamente baixa. Este resfriamento ocorre em virtude da expansão brusca (mudança de fase) na qual o gás realiza trabalho utilizando sua própria energia interna. A tubulação estando em contato com o ambiente do congelador, *D*, absorve calor deste, o que leva o restante do líquido a se evaporar. O gás passa, então, 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 (como veremos no capítulo seguinte), que é transferido para o ar ambiente na serpentina *B*. É por este motivo que a parte posterior do refrigerador, onde está situada a serpentina *B*, deve estar voltada para um local onde haja circulação do ar (fig. C-10), para facilitar a transferência de calor da serpentina para o ambiente.

Em resumo, vemos que o refrigerador funciona retirando calor (Q_2) do congelador em *D*, recebendo um trabalho (T) no compressor e rejeitando uma quantidade de calor (Q_1) para o ambiente, em *B*.

Conforme vimos na secção 12.2 (fig. 12-8), a transferência de calor dos alimentos colocados no interior do refrigerador para o congelador se faz graças às correntes de convecção do ar interno do aparelho.

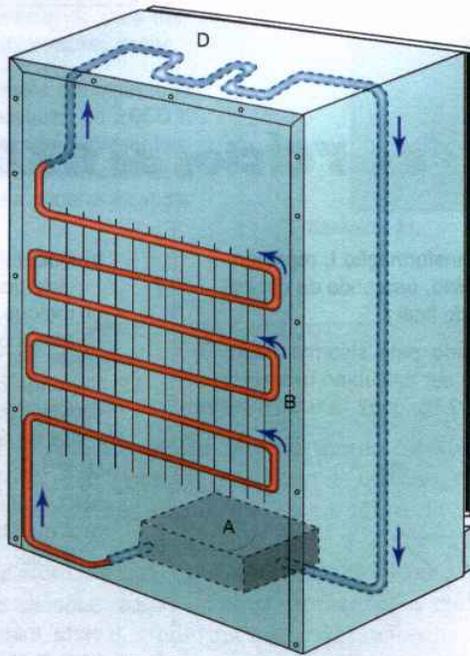


Fig. C-9: Ilustração esquemática. Em um refrigerador, o gás é liquefeito no compressor *A* e se vaporiza no congelador *D*. Em *D*, ele absorve calor e, em *B*, o calor é liberado para o meio ambiente.

Fig. C-10: Ilustração esquemática. A serpentina, onde é liberado o calor que é retirado do refrigerador, está situada na parte posterior do aparelho.

EFICIÊNCIA DE UM REFRIGERADOR

É fácil perceber que o refrigerador mais eficiente seria aquele que retirasse o máximo possível de calor, Q_2 , da fonte fria, exigindo que o mínimo de trabalho, T , fosse realizado sobre ele. Para medir esta característica define-se uma grande-

za denominada *eficiência do refrigerador*, e , da seguinte maneira:

$$e = \frac{Q_2}{T}$$

Como

$$Q_1 = Q_2 + T, \text{ temos } T = Q_1 - Q_2, \text{ donde}$$

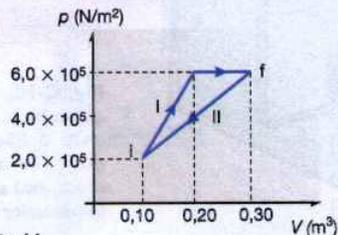
$$e = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

Suponha que um sistema percorra o ciclo de Carnot, mostrado na fig. C-7, em sentido inverso, isto é, no sentido $DCBA$. Neste caso, em cada ciclo, ele retira um calor Q_2 da fonte fria (durante a transformação DC) e rejeita uma quantidade de calor Q_1 para a fonte quente (durante a transformação BA). A área limitada pelo ciclo representa o trabalho, T , realizado *sobre* o sistema. Este 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 . Esta eficiência máxima é dada por

$$e = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

11. Um sistema sofre uma transformação I, representada na figura deste exercício, passando de um estado inicial i para um estado final f .
- O trabalho, T_{tr} , realizado pelo sistema nesta transformação poderia ser calculado usando a expressão $T_{tr} = p_i(V_f - V_i)$? Por quê?
 - Calcule o valor de T_{tr} .

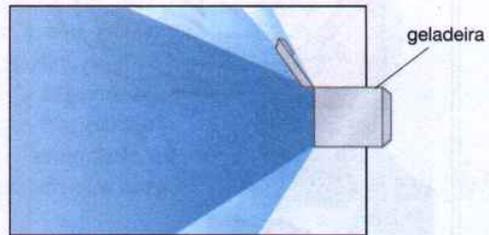


Exercício 11.

12. No exercício anterior, suponha que o sistema retorne de f para i seguindo a transformação II, mostrada na figura.
- Calcule o trabalho do sistema nesta transformação.

- Qual foi o trabalho T realizado pelo sistema no ciclo que ele percorreu?
 - Indique, na figura, a área que corresponde ao trabalho T , no ciclo.
13. Suponha que o gráfico referente ao exercício 11 represente o ciclo de uma máquina térmica que retira da fonte quente uma quantidade de calor $Q_1 = 8,0 \times 10^4$ J. Determine:
- O rendimento desta máquina.
 - A quantidade de calor que ela rejeita para a fonte fria.
14. Suponha que uma pessoa lhe informe que uma certa máquina térmica absorve, em cada ciclo, uma quantidade de calor $Q_1 = 500$ cal, realiza um trabalho $T = 200$ cal e rejeita para a fonte fria uma quantidade de calor $Q_2 = 400$ cal.
- As informações fornecidas por esta pessoa, certamente, não estão corretas. Por quê?
 - A pessoa, refazendo suas medidas, verificou que havia um engano na medida da quantidade de calor Q_2 . Qual é, então, o valor correto de Q_2 ?

15. a) No exercício anterior, considerando o valor correto de Q_2 , determine o rendimento daquela máquina térmica.
 b) Suponha que a máquina mencionada operasse entre duas temperaturas constantes, de 27°C e 227°C . Esta máquina contraria o teorema de Carnot? Explique.
 c) Procure identificar o ciclo que esta máquina está descrevendo.
16. Uma máquina de Carnot apresenta um rendimento de 30% e a temperatura de sua fonte quente é 400 K. A potência desta máquina é de 4,5 kW e ela efetua 10 ciclos/s.
 a) Calcule a temperatura da fonte fria desta máquina.
 b) Qual o trabalho que a máquina realiza em cada ciclo?
 c) Quais as quantidades de calor Q_1 e Q_2 , que a máquina absorve e rejeita?
17. Assinale 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.
18. Um dos motores térmicos de maior rendimento já construído trabalha nas temperaturas de 2000 K (fonte quente) e de 700 K (fonte fria), apresentando um rendimento de 40%. Este rendimento está próximo do valor máximo que ele poderia alcançar entre aquelas temperaturas?
19. Um refrigerador rejeita para o ambiente uma quantidade de calor $Q_1 = 800$ cal, durante um certo intervalo de tempo.
 a) Neste intervalo, a quantidade de calor Q_2 que ele retira do seu interior é maior, menor ou igual a 800 cal?
 b) Supondo que o refrigerador apresente uma eficiência $e = 3,0$, calcule o valor de Q_2 .
20. 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 isto, fechou as portas e janelas da sala e abriu a porta da geladeira. Com este procedimento a pessoa alcançou seu objetivo? Explique.
21. a) Suponha que a pessoa mencionada no exercício anterior colocasse a geladeira da maneira mostrada na figura deste exercício (encaixada em uma abertura feita na parede com a serpentina voltada para o exterior da sala). Neste caso, ela teria êxito ao tentar resfriar a sala?
 b) Qual o aparelho eletrodoméstico que funciona de maneira semelhante à geladeira referida na questão (a)?



Exercício 21.

Entropia — Indisponibilidade da energia

Irreversibilidade e desordem em um processo natural

Suponha que uma certa massa de água quente seja misturada com uma porção de água fria. Como sabemos, este sistema, resultante da mistura, termina por alcançar uma temperatura de equilíbrio, que tem o mesmo valor em qualquer ponto do sistema.

Evidentemente, 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 desta máquina. Isto é, 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 não tenha havido desaparecimento de energia, não é mais possível convertê-la em trabalho. Vemos, então, que uma parte da energia do sistema tornou-se *indisponível*. Em outras palavras, não podemos usá-la de forma útil.



Fig. C-11: Quando o recipiente é agitado, as bolas diferentes se misturam. Este processo conduz a um aumento da desordem do sistema e a continuidade da agitação não levaria o sistema de volta às condições iniciais (o processo é irreversível).

Para que aquela parte de energia continuasse disponível para a realização de 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 isto nunca ocorre, ou seja, o processo que levou à homogeneização da temperatura é *irreversível**.

Outra maneira de analisar este processo consiste em observar que o sistema inicialmente encontrava-se 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, com as moléculas distribuídas aleatoriamente, havendo uma uniformidade da temperatura.

Outros exemplos

Esta irreversibilidade do processo que acabamos de analisar e o aumento da desordem do sistema, que conduzem à indisponibilidade de parte de sua energia, é uma característica de qualquer processo que ocorre na natureza. Por exemplo: um bloco deslizando sobre uma superfície horizontal *com atrito*, como sabemos, acaba parando e sua energia é toda dissipada em forma de energia térmica do próprio bloco e da superfície. Este processo também é irreversível, pois a energia térmica não poderia, espontaneamente, voltar a aparecer como energia cinética do bloco como um todo, colocando-o em movimento. Isto é, a energia cinética do bloco como um todo (ordenada macroscopicamente) se distribuiu, desorganizando-se, em energia cinética das partículas que constituem o sistema (energia térmica). Também neste caso, a energia cinética do bloco que poderia ter sido utilizada para realizar um trabalho útil, agora, sob a forma de energia térmica, perdeu sua capacidade de realizar trabalho, isto é, perdeu sua disponibilidade.

De maneira geral, ao analisarmos qualquer processo que ocorra na natureza iremos chegar às mesmas conclusões (fig. C-11). Assim, enquanto você caminha, estuda, cresce, se alimenta, dorme, acende uma lâmpada ou passeia de automóvel, uma 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

* O ramo da Física denominado Mecânica Estatística modifica a afirmativa "nunca ocorre" para "é altamente improvável que ocorra".

nova grandeza, denominada *entropia*. Esta grandeza, que é usualmente representada pela letra S , teria um valor que varia quando o sistema passa de um estado para outro. Esta variação, ΔS , é exatamente o que é importante conhecer e não o valor S da entropia em cada estado pelo qual o sistema passa (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 rejeitando uma quantidade de calor ΔQ , a variação da entropia do sistema é dada por

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \quad \text{ou} \quad S_f - S_i = \frac{\Delta Q}{T}$$

Foi convençãoado que quando o sistema recebe calor temos $\Delta Q > 0$ e conseqüentemente temos, também, $\Delta S > 0$, ou seja, a entropia do sistema aumenta. Se o sistema rejeita calor, temos $\Delta Q < 0$ e $\Delta S < 0$ (a entropia do sistema diminui).

Rudolf Clausius (1822-1888)

Físico-matemático alemão que formulou a 2ª lei da Termodinâmica e ao qual se atribui a criação desta ciência, que estuda o calor e a temperatura. Exerceu o magistério superior em diversas escolas da Alemanha e da Suíça e, em 1850, ao ser designado professor de Física, da Escola de Engenharia de Berlim, publicou um trabalho no qual ele apresentava a 2ª lei da Termodinâmica, da seguinte maneira: "O calor não pode passar espontaneamente de um corpo frio para um corpo mais quente". Esta formulação da 2ª lei é conhecida como "enunciado de Clausius", sendo possível mostrar que ela é equivalente ao enunciado que apresentamos na secção 12.7.

SPL/Stock Photos



Por exemplo, se um gás sofre uma expansão isotérmica, na temperatura $T = 300 \text{ K}$, absorvendo uma quantidade de calor $\Delta Q = 900 \text{ J}$, a variação de sua entropia seria de

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} = \frac{900}{300} \quad \text{ou} \quad \Delta S = 3,0 \text{ J/K}$$

isto é, a entropia do gás aumentou de $3,0 \text{ J/K}$. Se aquela quantidade de calor tivesse sido retirada do gás, teríamos $\Delta S = -3,0 \text{ J/K}$, o que significa que a sua entropia teria diminuído de $3,0 \text{ J/K}$.*

Princípio de aumento da entropia

Consideremos um sistema que sofra um processo irreversível qualquer. Neste processo, em geral, este 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_{total} , ocorrida no processo

* Quando o processo não é isotérmico, a determinação do valor de ΔS deve ser feita por meio de Cálculo Integral, um ramo da Matemática que é estudado em cursos superiores.

será, evidentemente

$$\Delta S_t = \Delta S_s + \Delta S_v$$

Observando os fenômenos que ocorrem na natureza (fenômenos irreversíveis), foi possível concluir que nesses processos a entropia total sempre aumenta, isto é, temos seguramente $\Delta S_t > 0$. Portanto, a entropia, ao contrário de outras grandezas, tais como a energia, o *momentum* etc., não se caracteriza por uma lei de conservação, mas por 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.

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 este aumento de entropia está relacionado com o aumento da desordem do sistema e com a perda da oportunidade 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 é 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, como havíamos dito, a entropia é uma grandeza apropriada para caracterizar o grau de desordem e de degradação da energia envolvidos nos processos irreversíveis e podemos destacar:

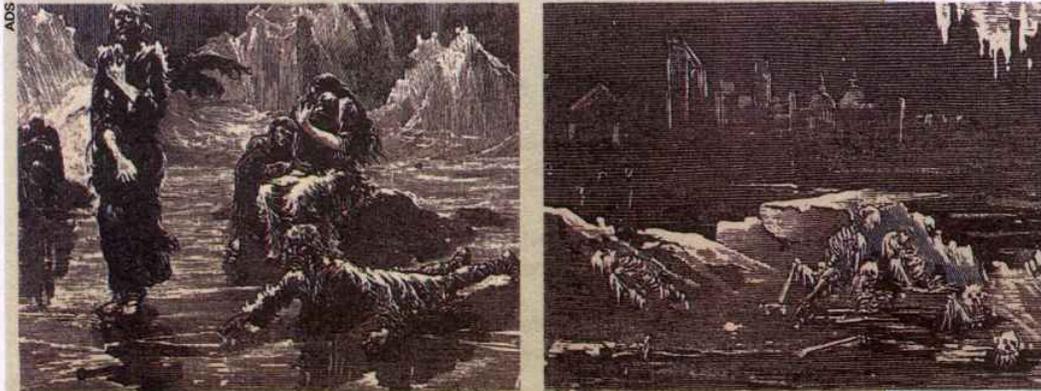
A quantidade de energia ΔE que se torna indisponível em um processo natural é diretamente proporcional ao aumento total de entropia ΔS_t , que acompanha o processo.

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 dos processos. Em cada um desses processos há um aumento de entropia e um aumento na indisponibilidade da energia. Podemos, então, visualizar um momento, em um futuro distante, no qual todo o universo terá atingido um estado de uniformidade absoluta. Se esta situação for alcançada, ainda que não tenha havido nenhuma alteração no valor da energia total do universo, todos os processos físicos, químicos e biológicos terão cessado. Este fim para o qual parecemos caminhar é comumente conhecido como *a morte térmica do universo*.

** Alguns processos ideais podem ser considerados reversíveis e nestes processos a entropia total não varia, ou seja, $\Delta S_t = 0$.

Estas idéias, que parecem ser uma conseqüência inevitável do estabelecimento das leis da Termodinâmica, desde quando foram estabelecidas têm despertado grande interesse, até mesmo popular, e já foram usadas como tema em diversas obras literárias.

H. G. Wells, com sua obra *A máquina do tempo*, e o astrônomo francês Camille Flammarion são exemplos de escritores que se envolveram com o assunto. Na fig. C-12 apresentamos uma reprodução de duas ilustrações da obra de Flammarion, na qual ele descreve várias maneiras pelas quais chegaremos ao *fim do mundo*.



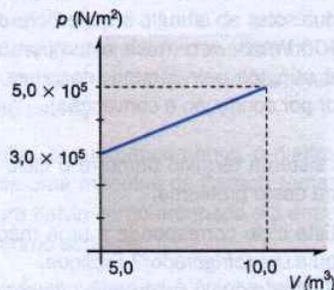
"La misérable race humaine périra par le froid."

"Ce sera la fin."

Fig. C-12: 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".

problemas suplementares problemas suplementares

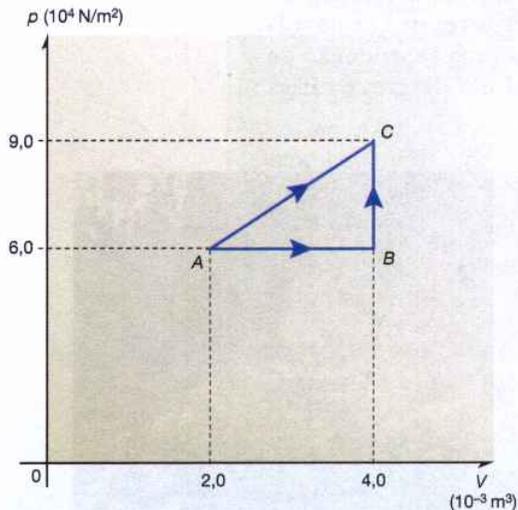
- Um gás se expande de um volume inicial $V_i = 5,0 \text{ m}^3$, até um volume final $V_f = 10,0 \text{ m}^3$, da maneira mostrada na figura deste problema. Sabendo-se que na transformação o gás absorveu uma quantidade de calor $Q = 10 \times 10^5 \text{ cal}$, determine a variação de sua energia interna (considere $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$).



Problema suplementar 1.

- Três líquidos, M , N e P , estão a 30°C , 20°C e 10°C , respectivamente. Quando massas iguais de M e N são misturadas, resulta uma temperatura final de 26°C e quando massas iguais de M e P são misturadas, resulta uma temperatura de 25°C . Calcule a temperatura final de uma mistura em partes iguais de N e P .
- 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 e ABC (veja a figura deste problema). No processo AC , o sistema absorve 300 J de calor.
 - Calcule o trabalho realizado pelo sistema nos dois processos.
 - Qual é a variação da energia interna do sistema no processo AC ?
 - 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 esta informação, calcule o calor absorvido pelo gás no processo ABC.

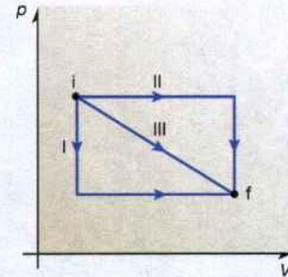


Problema suplementar 3.

- Uma pequena barra metálica de 10 g de massa é constituída de uma liga de ouro e cobre. Para determinar a porcentagem de cada um desses metais na liga, uma pessoa aqueceu a barra até 520 °C, mergulhando-a em seguida em um calorímetro cuja capacidade térmica é 20 cal/°C e que continha 80 g de água a 18 °C. O equilíbrio térmico ocorreu na temperatura de 20°C. Determine as porcentagens de cobre e ouro na liga (considere $c_{Au} = 0,030$ cal/g°C e $c_{Cu} = 0,090$ cal/g°C).
- Um martelo, com 2,0 kg de massa, é usado para golpear um bloco de chumbo de massa igual a 5,0 kg, cuja temperatura se eleva de 20°C para 30°C após ter recebido 50 golpes. Sabendo-se que 80% da energia mecânica do martelo é transferida para o chumbo, determine a velocidade do martelo no momento de cada golpe (considere 1 cal = 4,2 J e $c_{Pb} = 0,030$ cal/g°C).
- Suponha que uma amostra, contendo n moles de um gás ideal, ao ser aquecida a volume constante, sofra uma variação de temperatura ΔT ; enquanto absorve uma quantidade de calor ΔQ_V . Defina-se calor específico molar ou capacidade térmica molar, $C_{M,V}$, da seguinte maneira: $C_{M,V} = \Delta Q_V/n\Delta T$.
 - Expresse a energia interna U desta amostra em função de n , T e R (constante dos gases).

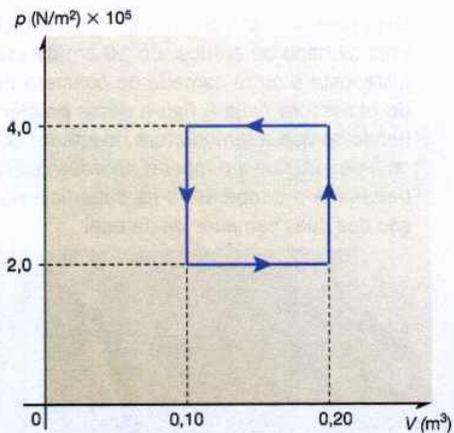
b) Com base na resposta da questão (a) expresse o valor de $C_{M,V}$ em função de R .

- Um sistema gasoso passa de um estado inicial i para um estado final f , por meio de três transformações diferentes, I, II e III, mostradas na figura deste problema. Tendo em vista a informação fornecida no problema suplementar 3 (questão c), determine em qual das três transformações o gás absorve maior quantidade de calor.



Problema suplementar 7.

- O casco de aço de um barco tem 6,0 mm de espessura e sua área que se encontra submersa mede 120 m². A temperatura da água é de 26,0°C e a do interior do barco é de 20,0°C. Determine, em calorias, a quantidade de calor que é transferida da água para o interior do barco, durante 1,0 h.
- A emissividade do tungstênio é de 0,35. Uma esfera deste material, de raio igual a 1,0 cm, é suspensa no interior de um grande recipiente no qual foi feito vácuo e cujas paredes estão a 300 K. Tendo em vista o exemplo 2 resolvido no apêndice C.1, deste capítulo, determine a potência que deve ser fornecida à esfera para mantê-la à temperatura de 3 000 K (despreze as perdas por condução).
- Uma lâmina metálica de pequena espessura está totalmente envolvida por um ambiente a 27°C e tem uma de suas faces voltada diretamente para o Sol em um dia claro (recebendo perpendicularmente os raios solares). Sabendo-se que a intensidade da luz solar ao atingir a superfície da Terra é de 1 000 W/m², determine a temperatura final que será atingida pela lâmina (despreze as trocas de calor por condução e convecção).
- Um sistema térmico percorre o ciclo mostrado na figura deste problema.
 - Este ciclo corresponde a uma máquina térmica ou a um refrigerador? Explique.
 - Supondo que o sistema ao percorrer o ciclo rejeite $8,0 \times 10^4$ J de calor, calcule sua eficiência.

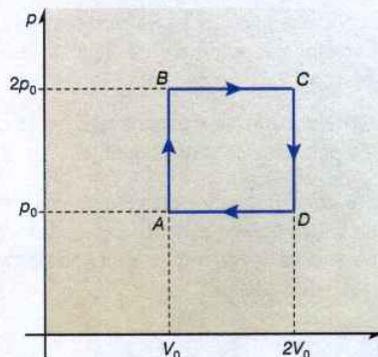


Problema suplementar 11.

12. Uma máquina de Carnot, cuja fonte fria está a 280 K, tem um rendimento de 40%. Deseja-se elevar este rendimento para 50%. Para isto:
 - a) De quantos graus deve-se elevar a temperatura da fonte quente, mantendo-se constante a temperatura da fonte fria?
 - b) De quantos graus deve-se abaixar a temperatura da fonte fria, mantendo-se constante a temperatura da fonte quente?
13. Procure realizar a seguinte experiência: coloque uma de suas mãos nas proximidades de sua boca e, mantendo-a aberta, sopra sobre a mão; em seguida, repita a experiência com a boca quase fechada. Você consegue perceber a diferença de temperatura do seu sopro ao atingir sua mão, nos dois casos? Explique a causa desta diferença.
14. Como veremos no próximo capítulo, uma certa massa de gelo a 0°C, ao se fundir, transforma-se em água, também a 0°C (a transformação é isotérmica). Neste processo, o gelo absorve uma quantidade de calor igual a 80 cal/g.
 - a) Calcule a variação de entropia de um sistema constituído por 20 g de gelo a 0°C, ao se transformar em água, também a 0°C. Esta variação é positiva ou negativa?
 - b) A entropia da vizinhança do sistema aumentou, diminuiu ou não variou?
 - c) Sabendo-se que a fusão do gelo é um processo natural (irreversível), o módulo da variação de entropia da vizinhança é maior, menor ou igual a 5,86 cal/K?
15. Desenhe, esquematicamente, o diagrama de um ciclo de uma máquina de Carnot, tomando a temperatura Kelvin como ordenada e a entropia do sistema como abscissa.
16. Uma máquina térmica funciona fazendo com que n moles de um gás ideal percorra o ciclo ABCD, re-

presentado na figura deste problema.

- a) Sendo T_0 a temperatura Kelvin do gás em A, determine suas temperaturas em B, C e D.
- b) Sabendo-se que os calores específicos molares do gás a volume constante e a pressão constante valem $C_{MV} = (3/2)R$ e $C_{MP} = (5/2)R$, determine a quantidade de calor, Q_1 , que o gás absorveu da fonte quente (dê sua resposta em função de n, R e T_0).
- c) Calcule o rendimento desta máquina.



Problema suplementar 16.

17. Um sistema sofre uma transformação irreversível na qual ele interage com sua vizinhança. Analise as afirmativas seguintes e responda se cada uma delas está certa ou errada.
 - a) A entropia do sistema certamente aumentou.
 - b) A variação total de entropia (do sistema e da vizinhança) certamente é positiva.
 - c) Parte da energia envolvida no processo desaparece.
 - d) Parte da energia envolvida no processo se torna indisponível para a realização de trabalho.
 - e) A variação de entropia da vizinhança pode ter sido negativa.
18. Um motor a gasolina consome 10 L de combustível por hora. Sabe-se que o calor de combustão da gasolina (calor liberado quando ela se queima) é de 11 kcal/g e que sua densidade é 0,68 g/cm³.
 - a) Qual a quantidade de calor liberado pela gasolina durante 2,0 h?
 - b) Sabendo-se que o motor desenvolve uma potência de 20 kW, qual é o seu rendimento? (1 cal = 4,2 J)
19. Uma máquina de Carnot, M_1 , opera entre dois reservatórios a 300°C e 100°C e uma outra, M_2 , opera entre 300 K e 100 K. Qual das duas tem maior rendimento?

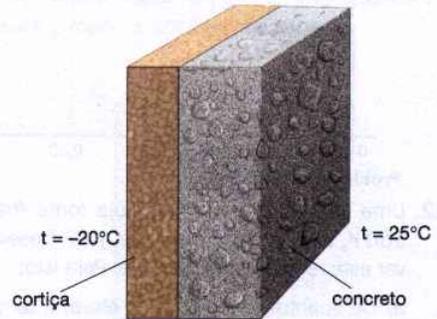
20. Na secção 12.6 analisamos uma transformação isotérmica de um gás ideal, sob o ponto de vista da 1ª lei da Termodinâmica.
- Considere como rendimento daquele processo o quociente entre o trabalho realizado e o calor absorvido pelo gás. Consulte a secção 12.6 e determine o rendimento da transformação isotérmica analisada.
 - Explique por que o resultado obtido na questão (a) não contraria a 2ª lei da Termodinâmica.

21. O enunciado da 2ª lei da Termodinâmica, proposto por Clausius, equivalente àquele apresentado na secção 12.7, é o seguinte:

“O calor não passa espontaneamente de um corpo frio para um corpo mais quente”.

Em um refrigerador observa-se uma transferência de calor naquele sentido. Explique por que o funcionamento de um refrigerador não contraria o enunciado de Clausius.

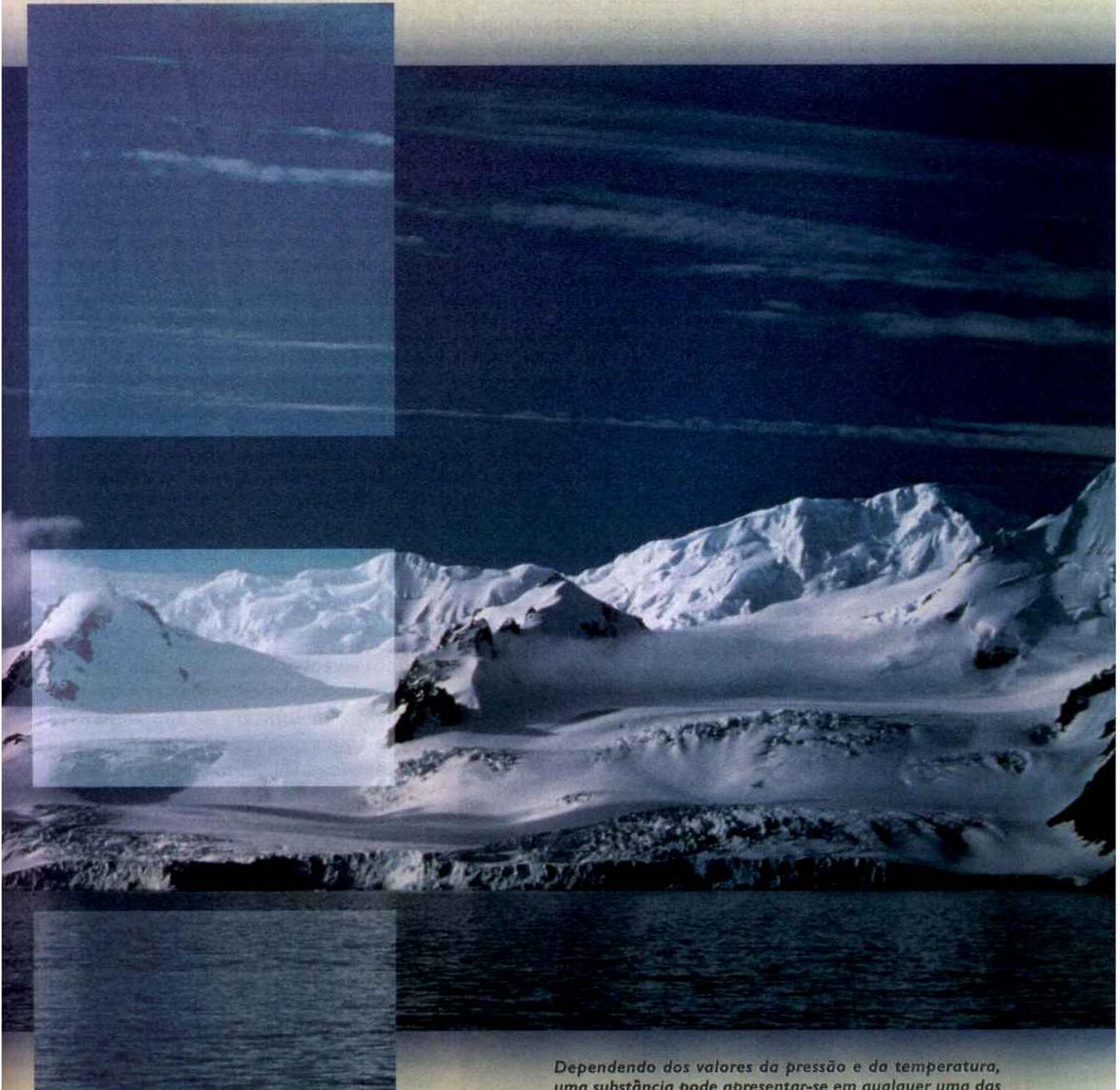
22. Uma parede dupla de um frigorífico industrial tem uma camada de cortiça, de 10 cm de espessura, justaposta a outra camada de concreto de 20 cm de espessura (veja a figura deste problema). Sabendo-se que a temperatura no interior do frigorífico é de -20°C e a temperatura externa é de 25°C , determine a temperatura na superfície de separação das duas camadas da parede.



Problema suplementar 22.

capítulo 13

Mudanças de fase



Stock Photos

Dependendo dos valores da pressão e da temperatura, uma substância pode apresentar-se em qualquer uma das três fases (ou estados) da matéria: sólida, líquida e gasosa. Na foto, é possível identificar a água nestas três fases (o vapor no ar se condensa para formar as nuvens).

13.1. 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*. A pressão e a temperatura a que uma substância for submetida determinarão a fase na qual ela se apresentará. 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 líquida, poderá tornar-se um gás pela elevação de sua temperatura ou pela redução da pressão a que ela está submetida.

Quando uma substância passa de uma fase para outra, dizemos que ela sofreu uma *mudança de fase* ou uma *mudança de estado*. Neste capítulo, estaremos estudando as leis que descrevem o comportamento das substâncias ao mudarem de fase. A fim de facilitar a compreensão destas leis, vamos, inicialmente, mostrar como os átomos e as moléculas devem se organizar ou se distribuir, para que uma substância se apresente no estado sólido, no líquido ou no gasoso.

ESTADO SÓLIDO

Neste estado, os átomos da substância se encontram muito próximos uns dos outros e ligados por forças elétricas relativamente grandes. Eles não sofrem translação ao longo do sólido, mas encontram-se 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 algumas características, tais como o fato de apresentarem uma forma própria e de oferecerem uma certa resistência a deformações.

Na natureza, quase todos os sólidos se apresentam em forma de *cristais*, isto é, os átomos que os constituem são organizados de maneira regular, numa estrutura que se repete ordenadamente ao longo do sólido, denominada *rede cristalina*, como foi mencionado no capítulo 10. 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 fig. 13-1, por exemplo, apresenta o modelo da estrutura cristalina do NaCl, mostrando a distribuição ordenada dos íons de Na (esferas menores) e de Cl (esferas maiores). A repetição desta estrutura regular faz com que os cristais apresentem uma aparência externa também regular, como vemos na fig. 13-2,

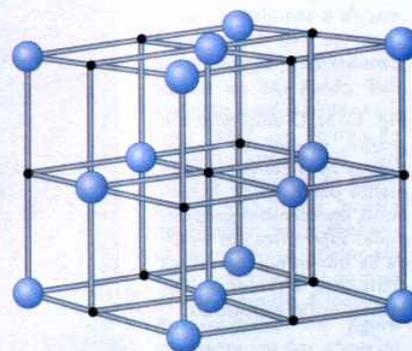


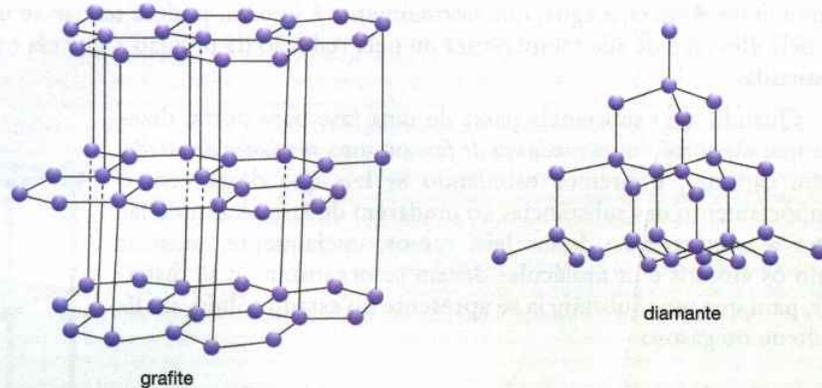
Fig. 13-1: Modelo da estrutura cristalina do cloreto de sódio.



Fig. 13-2: O aspecto regular deste grande cristal de cloreto de sódio é consequência da organização interna (rede cristalina) desta substância.

que mostra um grande cristal de cloreto de sódio. Uma mesma substância pode se apresentar em estruturas cristalinas diferentes. O diamante e a grafite, por exemplo, são ambos constituídos apenas de átomos de carbono, distribuídos, porém, de maneiras diferentes, como mostra a fig. 13-3. Como você sabe, as propriedades destes sólidos são muito diversas e isto se deve justamente à diferença de suas estruturas cristalinas.

Fig. 13-3: O diamante e a grafite, apesar de serem ambos constituídos unicamente por átomos de carbono, apresentam propriedades diferentes em virtude de possuírem estruturas cristalinas diferentes. Representações estruturais.



Agostinho de Paula

a) Uma bela formação natural de cristais de quartzo.



Agostinho de Paula

b) Um modelo, feito com esferas de plástico, permite perceber como os átomos são dispostos na formação de um cristal.

Alguns sólidos deixam de apresentar, em sua estrutura interna, a regularidade dos cristais, isto é, seus átomos *não* estão distribuídos em uma estrutura organizada, sendo denominados sólidos *amorfos*. Um exemplo típico de sólido amorfo é o vidro, podendo-se citar, ainda, o asfalto, plásticos, a borracha etc.

ESTADO LÍQUIDO

Os átomos de uma substância líquida se apresentam mais afastados uns dos outros do que no estado sólido e, conseqüentemente, 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 no interior do líquido. É por

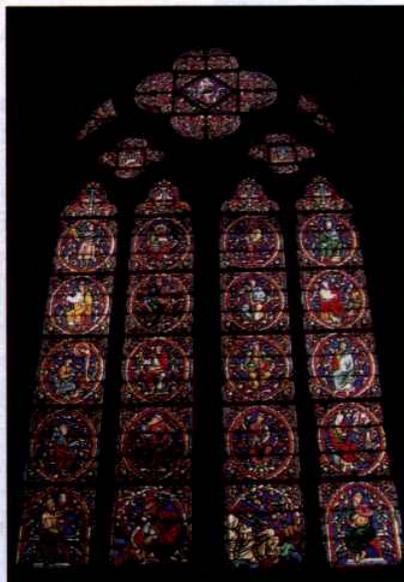
este motivo que os líquidos podem escoar com certa facilidade, não oferecem resistência à penetração e tomam a forma do recipiente onde são colocados.

Do mesmo modo que nos sólidos amorfos, os átomos, nos líquidos, não estão distribuídos ordenadamente. Portanto, quando um cristal passa para o estado líquido, a sua rede cristalina é desfeita.

ESTADO GASOSO

Já tivemos oportunidade de analisar, no capítulo 12, a estrutura interna de um gás. Como vimos, a separação entre os átomos ou moléculas de uma substância no estado gasoso é muito maior do que nos sólidos e líquidos, sendo praticamente nula a força de ligação entre estas partículas. Por este motivo, elas se movimentam livremente em todas as direções, fazendo com que os gases não apresentem forma definida e ocupem sempre o volume total do recipiente onde estão contidos.

A fig. 13-4, que apresenta modelos das estruturas internas de um cristal, de um líquido e de um gás, permite-nos comparar a distribuição e a separação dos átomos (ou moléculas) nos três estados*.



Os sólidos amorfos, como o vidro, possuem estrutura interna semelhante à de um líquido e, por isso, apresentam algumas propriedades típicas de um fluido. Por exemplo, o vidro pode se escoar como um líquido de altíssima viscosidade. Nas antigas catedrais da Europa, os vitrais das janelas apresentam maior espessura em sua parte inferior, em virtude de centenas de anos de escoamento. A fotografia mostrada na figura apresenta um dos vitrais da catedral de Notre Dame, em Paris, no qual é possível, com cuidadosas medidas, constatar esse fato.

MUDANÇAS DE FASE

Quando fornecemos calor a um corpo e sua temperatura se eleva, já sabemos que há um aumento na energia de agitação de seus átomos. Este aumento de agitação faz com que a força de ligação entre os átomos seja alterada, podendo acarretar modificações na organização e separação destes átomos. Em outras palavras, a absorção de calor por um corpo pode provocar nele uma mudança de fase. Naturalmente, a retirada de calor deverá provocar efeitos inversos dos que são observados quando o calor é cedido à substância.

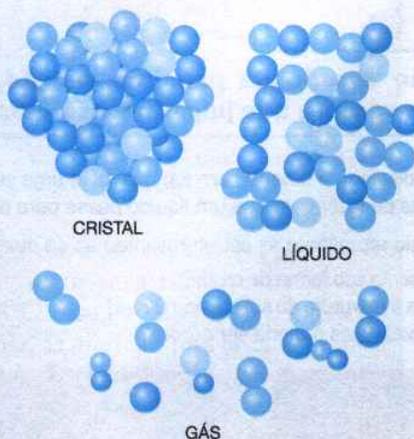


Fig. 13-4: Modelos da estrutura interna de um sólido, de um líquido e de um gás. Observe a organização e a separação das moléculas em cada caso.

* Um quarto estado da matéria costuma ser incorporado, entre os três citados, nas referências mais atualizadas. Trata-se do plasma, estado caracterizado pelo fato de as partículas que constituem o material se apresentarem carregadas eletricamente, ou seja, em forma de íons. Para que este estado seja alcançado, a temperatura do material deve ser muito elevada, como ocorre no Sol e em muitas outras estrelas. A maior parte da matéria existente no Universo se apresenta sob a forma de plasma, embora, em nosso planeta, raramente possamos encontrá-la neste estado.

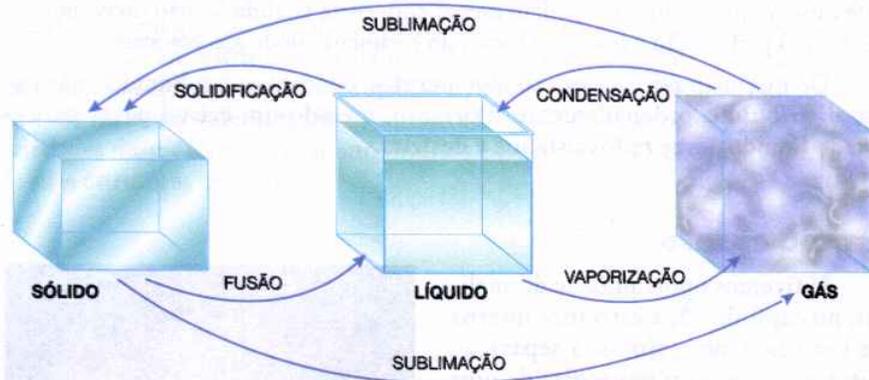


Fig. 13-5: Denominações que recebem as passagens de um estado físico para outro.

As mudanças de fase que podem ocorrer com uma substância recebem denominações especiais, como ilustra a fig. 13-5, e que citaremos a seguir:

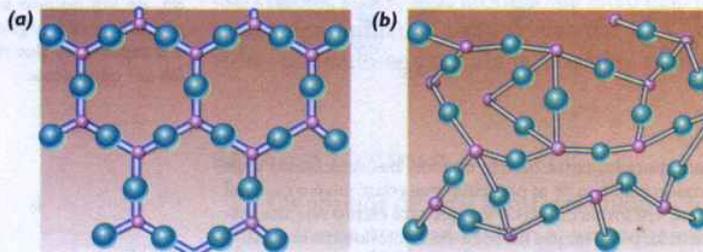
<i>fusão</i>	— passagem de sólido para líquido
<i>solidificação</i>	— passagem de líquido para sólido
<i>vaporização</i>	— passagem de líquido para gás
<i>condensação (ou liquefação)</i>	— passagem de gás para líquido
<i>sublimação</i>	— passagem direta de sólido para gás ou de gás para sólido (sem passar pelo estado líquido)

Nas seções seguintes, analisaremos, separadamente, cada uma dessas mudanças de fase.

Ícios de fixação **exercícios de fixação** exercícios de fi

Antes de passar ao estudo da próxima seção, **responda** às questões seguintes, **consultando o texto sempre que julgar necessário**.

- Quais são as grandezas que determinam em qual fase uma substância se apresenta?
 - Cite duas maneiras de fazer com que um líquido passe para o estado gasoso.
- A figura deste exercício representa as estruturas internas de duas substâncias sólidas, A e B.
 - Qual delas se apresenta sob forma de cristal?
 - Como se denomina a estrutura da substância B?
 - Qual das duas substâncias poderia ser o vidro?

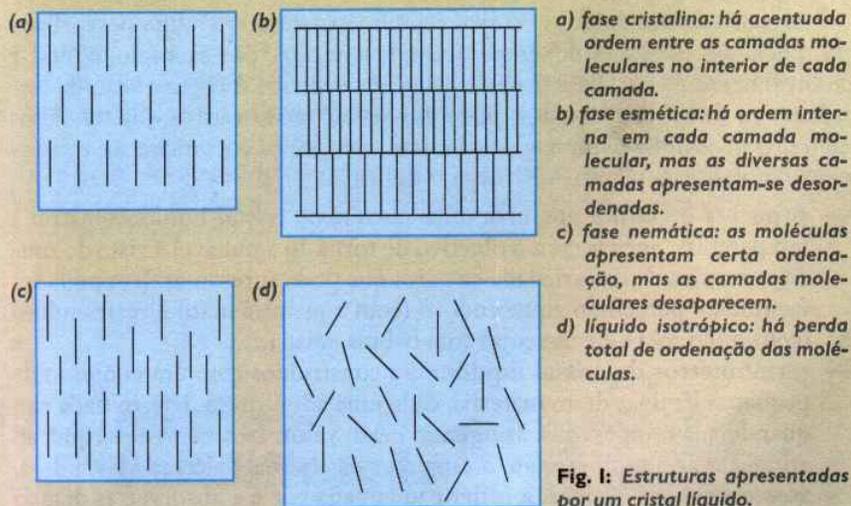


Exercício 2.

3.
 - a) Por que um sólido apresenta forma própria, enquanto isto 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 isto não ocorre com um líquido?
4. Dar o nome da mudança de fase que ocorre em cada um dos fenômenos descritos a seguir.
 - a) Um pedaço de gelo se derrete ao ser retirado da geladeira.
 - b) Uma roupa molhada seca ao Sol.
 - c) Um pedaço de naftalina "desaparece" no interior de uma gaveta.
 - d) A superfície externa de uma garrafa de cerveja, muito fria, torna-se coberta de gotículas de água em um dia úmido.

Cristais líquidos — Materiais de estrutura pouco comum

Os cristais líquidos são substâncias cujas moléculas se escoam, umas sobre as outras, como ocorre nos líquidos, mas que, em certas situações, mantêm uma estrutura organizada como os cristais. Este fato, apresentando-se como uma certa contradição, costuma ocorrer na própria natureza. Os cristais líquidos apresentam esta característica dual, possuindo, porém, propriedades bem-definidas.



Há pouco menos de 100 anos um fato estranho foi observado 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. Esta 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 e úteis aplicações. As forças moleculares que mantêm suas estruturas são muito fracas sendo, então, facilmente afetadas por campos eletromagnéticos, tensões mecânicas e temperaturas aplicadas ao material. Esses conhecimentos só se fizeram possíveis recentemente (décadas de 40 e 50).

Hoje em dia, são conhecidas centenas de materiais orgânicos sólidos, naturais ou produzidos sinteticamente, que, ao se fundirem, 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 estas 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. A agitação térmica tende a desorientar as moléculas e, assim, a estrutura real que o cristal líquido apresenta irá depender 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 cresce (ou uma voltagem é aplicada ao cristal), as moléculas tendem à desordem, aproximando-se da estrutura líquida. Enquanto esta mudança ocorre, várias fases intermediárias são percebidas nos cristais líquidos, ao contrário do que ocorre com as substâncias comuns (como a água, por exemplo) que passam bruscamente da fase sólida para a líquida (fig. I).

Aplicações dos cristais líquidos

Alguns cristais líquidos podem ter sua estrutura cristalina perturbada por pequenas variações de temperatura, levando-os, por exemplo, a mudar sensivelmente de cor. Esta propriedade é aproveitada na construção de termômetros de cristais líquidos, podendo-se encontrar outros objetos feitos com materiais dessa natureza. Atualmente, até tecidos costumam ser confeccionados com este material. Eis alguns desses materiais:

- **suportes de copo:** possuem uma camada de cristal líquido sensível à temperatura, apenas com o objetivo de torná-lo agradável à vista do usuário, em virtude da variedade de cores que pode apresentar. Isto pode ser facilmente percebido aquecendo-o (com a própria mão) e resfriando-o (colocando sobre ele um copo com bebida gelada).
- **termômetros de cristal líquido:** são construídos com um conjunto de pequenas lâminas deste material, cada uma adquirindo determinada cor, quando sua temperatura atinge um certo valor. Isto ocorre porque, ao atingir aquela temperatura, a estrutura da lâmina é alterada levando-a, ao receber a luz branca, a refletir uma dada cor e a absorver as demais apresentando-se, portanto, com a cor refletida. Em outra temperatura, a estrutura do material é tal que ele absorve toda a luz recebida, apresentando-se praticamente preto (fig. II). Tente obter um termômetro deste tipo e verifique estes fatos (costumam ser encontrados em lojas especializadas em materiais para aquários).
- **cartão (ou anel) medidor de estresse:** contém um pequeno retângulo de cristal líquido (no anel, a pedra é feita com este material) e são apresentados como capazes de indicar o estresse (tensão psíquica) de uma pessoa, em determinado momento. Segundo as instruções contidas no cartão, a pessoa deverá colocar seu polegar sobre o retângulo mencionado, deixando-o ali alguns segundos. Ainda no cartão há uma relação de possíveis estados a serem identificados, de acordo com a cor apresentada pelo retângulo de cristal líquido, quando a pessoa retira seu polegar. Você percebe a farsa no uso desses cartões? A cor apresentada pelo cristal líquido irá depender exclusivamente da temperatura da mão da pessoa. Em dia muito frio, toda

pessoa mal agasalhada se apresentaria estressada!? E bastaria esfregar bastante as mãos para que seu estado de tensão desaparecesse!

- **display de cristal líquido (LCD – liquid crystal display):** este tipo de mostrador vem sendo usado no lugar do LED (*light emitting diode*), comum em aparelhos digitais, cujo uso é feito com ligação a uma tomada. O LCD funciona com potência muito inferior ao LED (cerca de 1 000 vezes menor). Sendo seu uso mais econômico, é mais adequado para aparelhos portáteis, que utilizam pequenas pilhas ou baterias, pois permite maior duração dessas fontes. É usado com frequência em relógios de pulso, calculadoras de bolso etc.

Para discernir se um *display* de qualquer aparelho é do tipo LCD ou LED, basta observá-lo através de um polaróide. Girando o polaróide, se para uma dada inclinação do *display* os dígitos não puderem ser vistos, trata-se de um LCD. Se for um LED não haverá alteração na luminosidade dos dígitos.

- **televisão colorida:** há tentativas, que ainda não alcançaram completo êxito, de usar os cristais líquidos na confecção de telas de aparelhos de TV, aproveitando as propriedades destes materiais utilizados nos exemplos já descritos (efeitos de cores sob variações de temperatura e desvio do plano de polarização da luz por aplicações de pequenas variações de voltagem). Estes aparelhos evitariam a necessidade de uso dos tubos de raios catódicos para desviar os feixes de elétrons, tornando o aparelho mais compacto, pois sua espessura poderia ser muito reduzida.

Por enquanto os fabricantes têm usado cristais líquidos apenas em televisores portáteis, de telas de pequenas dimensões, mas alguns problemas técnicos de nitidez da imagem e outros ainda não foram resolvidos.



Fig. 11: Termômetro de cristal líquido.

13.2. Fusão e solidificação

FUSÃO

Consideremos um sólido cristalino, recebendo calor, como mostra a fig. 13-6. Esta energia recebida pelo sólido provoca um aumento na agitação dos átomos na rede cristalina, ou seja, provoca uma elevação na temperatura do corpo.

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 os átomos ou moléculas torna-se menor e, conseqüentemente, estas partículas terão maior liberdade de movimentação (fig. 13-6). Em outras palavras, ao atingir aquela temperatura, o corpo passa para o estado líquido, isto é, ocorre a *fusão* do sólido.

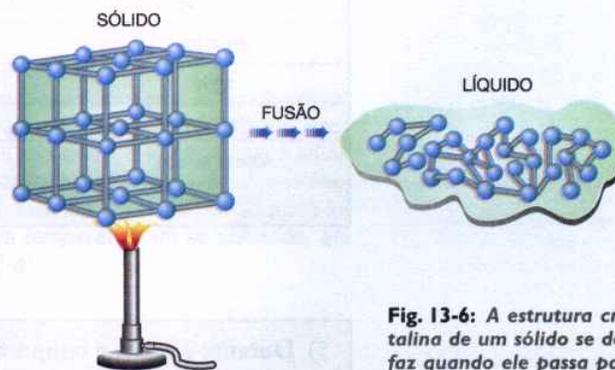


Fig. 13-6: A estrutura cristalina de um sólido se desfaz quando ele passa para o estado líquido. Representação esquemática.

AS LEIS DA FUSÃO

A experiência nos mostra que os cristais, ao se fundirem, apresentam comportamentos semelhantes, podendo-se, então, estabelecer leis gerais que descrevem a fusão desses sólidos. Estas leis 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. (ver a tabela 13-1).

- 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 13-1, que apresenta calores latentes de fusão de algumas substâncias, vemos que o calor de fusão do chumbo, por exemplo, vale 5,8 cal/g. Isto 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.

Pontos de fusão e calores de fusão (à pressão de 1 atm)		
Substância	Ponto de fusão ($^{\circ}\text{C}$)	Calor de fusão (cal/g)
platina	1 775	27
prata	961	21
chumbo	327	5,8
enxofre	119	13
água	0	80
mercúrio	-39	2,8
álcool etílico	-115	25
nitrogênio	-210	6,1

Tabela 13-1.

- 3) Durante a fusão, a temperatura do sólido permanece constante.

Isto acontece porque o calor que é fornecido ao sólido, para ele se fundir, é usado para aumentar a separação entre seus átomos, rompendo a rede cristalina, sem ocasionar variação na agitação térmica destes 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 .

Estas leis são válidas apenas para os sólidos cristalinos que, ao se fundirem, passam diretamente do estado sólido para o líquido. Os sólidos amorfos, como o vidro, por exemplo, sofrem um processo diferente, pois sua fusão é gradual, passando por estados intermediários, nos quais ele se apresenta pastoso, antes de se tornar líquido.

Exemplo

Um bloco de gelo, de massa $m = 10$ g, é retirado do congelador à temperatura de -8°C e colocado em um recipiente aberto, em contato com o ar ambiente (fig. 13-7-a). Depois de algum tempo, verificou-se que, no recipiente, havia 10 g de água a uma temperatura invariável de 20°C . Descreva os processos que ocorreram com o gelo até ser atingida esta situação final.

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 (fig. 13-7-a), o ambiente está cedendo calor ao gelo e sua temperatura se elevará até atingir 0°C , que é o seu ponto de fusão (fig. 13-7-b). Se, neste momento, fosse interrompido o fluxo de calor para o gelo, ele não se fundiria, permanecendo sólido a 0°C .

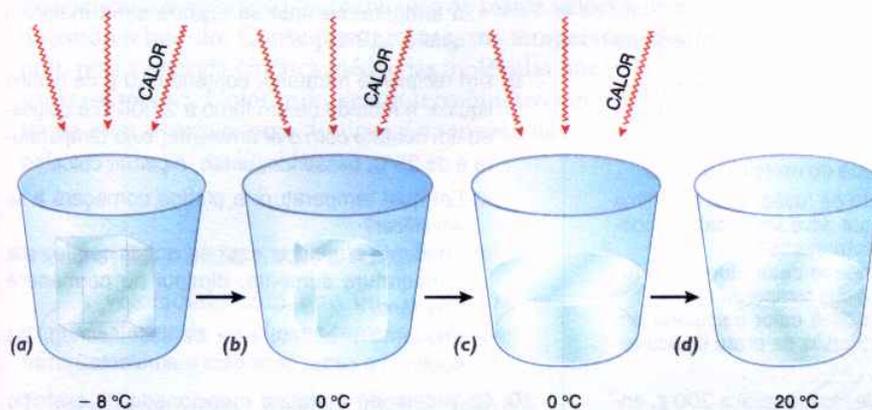


Fig. 13-7: Para o exemplo da secção 13.2.

Entretanto, como o ambiente continua a fornecer calor, o gelo começa a se fundir. Na tabela 13-1 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 que receber 800 cal do ambiente para fundir-se completamente. Recebendo esta quantidade de calor, o bloco se transforma em 10 g de água a 0°C (fig. 13-7-c). Esta água, estando ainda em temperatura inferior à do ambiente, continuará a receber calor e sua temperatura irá se elevando, até que seja atingido o equilíbrio térmico, a 20°C (fig. 13-7-d).

SOLIDIFICAÇÃO

Na solidificação, os processos ocorrem em sentido inverso ao da fusão. Desta maneira, se retirarmos calor de um líquido, sua temperatura diminui e, quando ela atinge um certo valor, inicia-se a solidificação. A experiência mostra que esta temperatura é a mesma na qual ocorreu a fusão. 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 ocorresse a fusão. Em outras palavras, o calor latente de solidificação é igual ao calor latente de fusão.

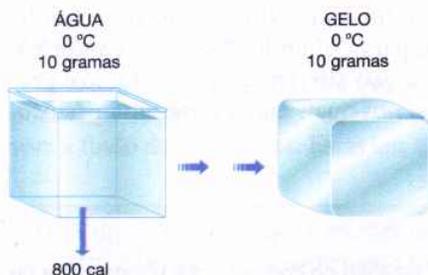


Fig. 13-8: Deve-se retirar 80 cal por grama da água no estado líquido, a 0°C, para que ela se transforme em gelo, também a 0°C. Representação esquemática.

Então, se o líquido da fig. 13-7-d fosse colocado de volta ao congelador, os processos ocorreriam em sentido inverso. 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 (fig. 13-8).

Ícios de fixação **exERCÍCIOS de fixação** exERCÍCIOS de fi

Antes de passar ao estudo da próxima secção, **responda** às questões seguintes, **consultando o texto** sempre que julgar necessário.

5. Uma moeda de prata possui massa igual a 100 g. Consultando a tabela 13-1, responda:
 - a) Aquecendo-se a moeda, em qual temperatura ela começará a se fundir?
 - b) Se, ao ser atingida esta temperatura, o fornecimento de calor for interrompido, a moeda se fundirá?
6. Considere a mesma moeda do exercício anterior.
 - a) Ao ser atingido o ponto de fusão, qual a mínima quantidade de calor que deve ser cedida à moeda para ela se fundir 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?
7. Uma pedra de enxofre, de massa igual a 200 g, encontra-se à temperatura de 119°C. Consulte a tabela 13-1 e responda:
 - a) Se fornecermos 650 cal de calor a esta pedra, qual será a massa de enxofre que se fundirá?
 - b) Então, qual será a temperatura final do enxofre sólido? E do líquido?
8. a) No exercício anterior, qual a quantidade mínima de calor que deveríamos fornecer para fundir totalmente a pedra de enxofre?
 - b) Se tivéssemos fornecido 3 000 cal a esta pedra, a temperatura final do enxofre seria maior ou igual a 119°C?
9. 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?
 - b) Enquanto a platina está se solidificando, sua temperatura aumenta, diminui ou permanece constante?
 - c) Enquanto a platina está se solidificando, ela continua a ceder calor para o ambiente?
10. Considerando a platina mencionada no exercício anterior:
 - a) Qual a quantidade de calor que ela libera para o meio ambiente durante o processo de solidificação?
 - b) Qual é a temperatura da platina sólida no instante em que a solidificação se completa?
 - c) Depois de um certo tempo, qual será a temperatura final da platina?

13.3. Vaporização e condensação

VAPORIZAÇÃO

A passagem do estado líquido para o estado gasoso pode ocorrer de duas maneiras:

- 1) por *evaporação* — quando a passagem se faz lentamente, a qualquer temperatura. Uma roupa molhada, por exemplo, torna-se seca em virtude da evaporação da água.

- 2) por *ebulição* — quando a passagem se faz 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.

A seguir, analisaremos estes dois processos.

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 seio do líquido. Após escaparem, estas moléculas passam a uma situação em que se encontram muito afastadas umas das outras, de modo que a força entre elas é praticamente nula, isto é, elas se encontram no estado gasoso (fig. 13-9).

Este é o processo da *evaporação* do líquido. Observe que, à medida que ocorre a evaporação, as moléculas de maior velocidade estão abandonando o líquido. Conseqüentemente, sua temperatura tende a diminuir, pois a energia cinética média das moléculas que nele permanecem torna-se menor. Colocando-se um termômetro em um copo que contenha éter, notamos uma diminuição sensível na temperatura, causada pela evaporação do líquido.

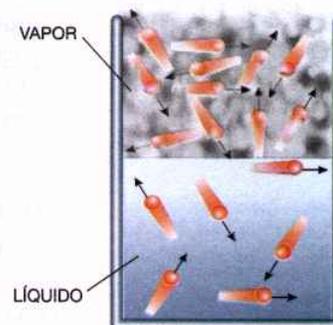


Fig. 13-9: Representação esquemática. Um grande número de moléculas de um líquido, em virtude de sua constante agitação, consegue escapar através da superfície do líquido, passando para o estado gasoso.

VELOCIDADE DE EVAPORAÇÃO

A velocidade com que um líquido se evapora depende de alguns fatores, que examinaremos a seguir:

- 1) Verifica-se que, quanto maior for a temperatura de um líquido, maior será a rapidez com que ele evapora. Isto ocorre porque, quando aumentamos a temperatura de um líquido, a energia cinética média de suas moléculas aumenta e, portanto, haverá um maior número de moléculas capazes de escapar através da superfície do líquido.
- 2) Colocando-se a mesma quantidade de um mesmo líquido em dois recipientes, tais como os da fig. 13-10, o líquido contido no recipiente (b) evapora muito mais rapidamente. Este fato nos mostra que a velocidade de evaporação aumenta quando a área da superfície livre do líquido é aumentada. De fato, quanto maior for esta área, maior será o número de moléculas que poderão atingir a superfície e escapar. Assim, para que uma roupa molhada seque



Geralmente, quando uma pessoa sai de uma piscina (ou do mar), ela sente mais frio que quando se encontrava dentro da água. Essa sensação é uma conseqüência da evaporação da água aderida à sua pele.

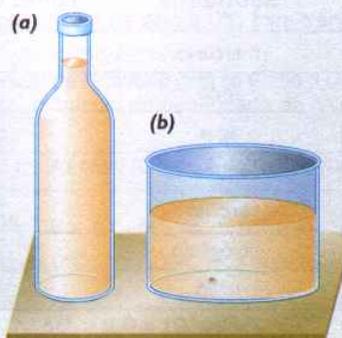


Fig. 13-10: A velocidade de evaporação de um líquido é tanto maior quanto maior for a área de sua superfície livre.

mais depressa, devemos colocá-la estendida, de modo que a área de evaporação da água seja aumentada.

- 3) Quando ocorre a evaporação, algumas moléculas do vapor, que se localizam próximas à superfície do líquido (fig. 13-9), em seu constante movimento, incorporam-se novamente ao seio do líquido. Assim, se o número de moléculas no estado de vapor, próximas à superfície, for muito grande, a velocidade de evaporação será pequena, pois muitas moléculas voltam para a fase líquida. Por este motivo, em um dia úmido (grande quantidade de vapor d'água na atmosfera) uma roupa molhada demora 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. Como você sabe, uma roupa molhada seca mais depressa se estiver ventando.

EBULIÇÃO

Conforme dissemos, quando a temperatura de um líquido atinge um 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 obedece a leis semelhantes àsquelas 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.

Para a água, por exemplo, à pressão de 1 atm, o ponto de ebulição é de 100°C. A tabela 13-2 apresenta os pontos de ebulição de outras substâncias.

- 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*, que é característico de cada substância.

Pontos de ebulição e calores de vaporização (à pressão de 1 atm)		
Substância	Ponto de ebulição (°C)	Calor de vaporização (cal/g)
mercúrio	357	65
iodo	184	24
água	100	540
álcool etílico	78	204
bromo	59	44
nitrogênio	-196	48
hélio	-269	6

Tabela 13-2.

Na tabela 13-2 vemos que o valor 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.

- 3) Durante a ebulição, apesar de se fornecer calor ao líquido, sua temperatura permanece constante e o vapor que vai sendo formado encontra-se à mesma temperatura do líquido.

A fig. 13-11 ilustra a vaporização, por ebulição, de 10 g de água. Observe que os dados apresentados nesta figura estão de acordo com as leis que acabamos de estudar.

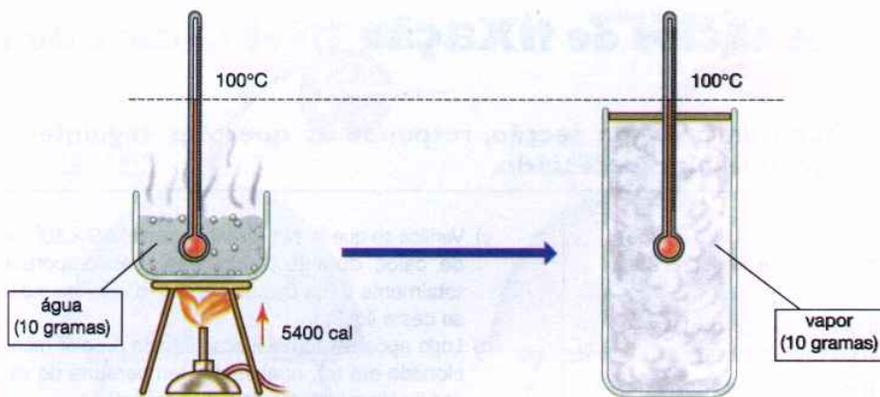


Fig. 13-11: Deve-se fornecer 540 cal a cada grama de água no estado líquido, a 100°C, para que ela se transforme em vapor, também a 100°C.

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), isto é, o ponto de condensação é igual ao ponto de ebulição. Sendo a condensação um processo inverso ao da 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 d'água, que se encontra a 100°C, condensa-se, ele libera 540 cal. A água que se origina da condensação se encontrará também a 100°C.

Exemplo

Qual a quantidade de calor que devemos fornecer a 20 g de gelo a 0°C para transformá-lo em vapor d'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 disto, 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 13-1), para fundir 20 g devemos fornecer uma quantidade de calor

$$\Delta Q_1 = 80 \times 20 \quad \text{donde} \quad \Delta Q_1 = 1,6 \times 10^3 \text{ cal}$$

- 2) para elevar a temperatura da água resultante da fusão de 0°C para 100°C — a quantidade de calor necessária, neste processo, é dada por

$$\Delta Q_2 = mc\Delta t = 20 \times 1,0 \times 100 \quad \text{donde} \quad \Delta Q_2 = 2,0 \times 10^3 \text{ cal}$$

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 13-2), para vaporizar 20 g devemos fornecer uma quantidade de calor

$$\Delta Q_3 = 540 \times 20 \quad \text{donde} \quad \Delta Q_3 = 10,8 \times 10^3 \text{ cal}$$

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 d'água) é fornecido pela tabela 12-1: $c = 0,50 \text{ cal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$. Então

$$\Delta Q_4 = mc\Delta t = 20 \times 0,50 \times 100 \quad \text{donde} \quad \Delta Q_4 = 1,0 \times 10^3 \text{ cal}$$

Logo, a quantidade total de calor, ΔQ , necessária para transformar 20 g de gelo a 0°C , em vapor a 200°C , será

$$\Delta Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \Delta Q_3 + \Delta Q_4 \quad \text{donde} \quad \Delta Q = 15,4 \times 10^3 \text{ cal}$$

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

11. Como você sabe, costuma-se soprar sobre a superfície de um líquido quente para que ele esfrie mais rapidamente.
 - a) Quando se faz isto, o que acontece com a velocidade de evaporação do líquido?
 - b) Explique, então, por que, procedendo desta maneira, conseguimos fazer com que o líquido esfrie mais depressa.
12. Um certo volume de éter está contido em um vidro aberto, de gargalo estreito. Um volume igual deste líquido é derramado em uma superfície lisa e horizontal, espalhando-se sobre ela. Qual dos dois volumes evaporará mais depressa? Explique.
13. Uma certa quantidade de Hg, à temperatura ambiente, é aquecida por meio de uma chama. Consulte a tabela 13-2 e responda:
 - a) Em que temperatura o Hg entrará em ebulição?
 - b) Continuando-se a fornecer calor ao Hg, o que ocorre com sua temperatura enquanto ele estiver em ebulição?
 - c) Verifica-se que foi necessário fornecer $3,9 \times 10^4 \text{ cal}$ de calor, durante a ebulição, para vaporizar totalmente o Hg. Calcule, então, o valor da massa deste líquido.
 - d) Logo após ser fornecido ao líquido o calor mencionado em (c), qual será a temperatura do vapor de Hg resultante da vaporização?
14. a) É comum observarmos que, em dias de chuva, ao fecharmos os vidros de um automóvel, eles se tornam embaçados. Explique.
 b) Para desembaçar o pára-brisa, alguns automóveis possuem um ventilador (desembaçador). Explique por que este processo é eficaz.
15. Uma massa de 100 g de álcool etílico encontra-se sólida à temperatura de -115°C . Sabe-se que o calor específico deste álcool, na fase líquida, vale $0,50 \text{ cal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$. Consultando as tabelas 13-1 e 13-2, calcule a menor quantidade de calor que deve ser fornecida ao álcool sólido para transformá-lo totalmente em vapor (orientar-se pelo exemplo resolvido no final desta seção).

13.4. Influência da pressão

Verifica-se experimentalmente que, se variarmos a pressão exercida sobre uma substância, a temperatura na qual ela muda de fase sofre alterações. Assim, quando dissemos que o gelo se funde a 0°C e a água entra em ebulição a 100°C , destacamos que isto ocorre se a pressão for de 1 atm . Nesta seção, vamos analisar esta influência da variação de pressão nas temperaturas de mudanças de fase.

INFLUÊNCIA DA PRESSÃO NA TEMPERATURA DE FUSÃO

Quando uma substância se funde, de modo geral ela aumenta de volume. Para uma substância que tenha este comportamento, observa-se que *um aumento na pressão exercida sobre ela acarreta um aumento em sua temperatura de fusão* (e, conseqüentemente, em sua temperatura de solidificação). Assim, o chumbo, 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 elevada, ele irá se fundir a uma temperatura mais alta. A fig. 13-12-a mostra um bloco de chumbo que atinge uma temperatura superior a 327°C , porque a pressão sobre ele é maior do que 1 atm. Evidentemente, a uma pressão inferior a 1 atm o chumbo se fundirá abaixo de 327°C (fig. 13-12-b).

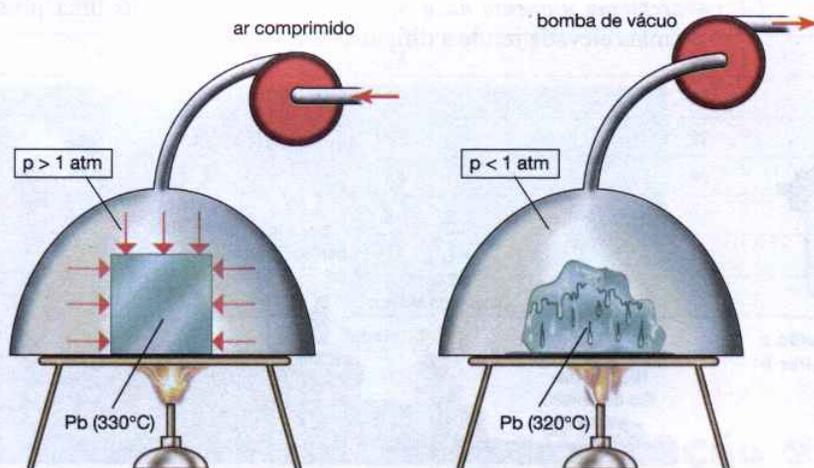
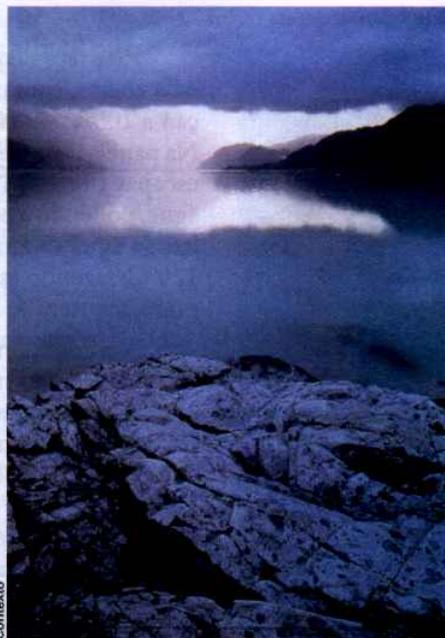


Fig. 13-12: Um aumento na pressão faz aumentar o valor da temperatura de fusão do chumbo.

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 uma dada massa de água aumenta quando ela se transforma em gelo. É por este motivo que uma garrafa cheia de água, colocada em um congelador, parte-se quando a água se solidifica.

Para estas substâncias, *um aumento na pressão acarreta uma diminuição na temperatura de fusão*. Como sabemos, o gelo se funde a 0°C somente se a pressão sobre ele for de 1 atm. Se aumentarmos esta pressão, ele se fundirá a uma temperatura inferior a 0°C e, reciprocamente, a uma pressão inferior a 1 atm o seu



A água das chuvas penetra em frestas existentes nas rochas ficando aí acumulada. Em países de clima frio, é comum observar-se o rompimento dessas rochas, quando a água se congela. Por que isto acontece?



Fig. 13-13: O gelo funde-se apesar de estar abaixo de 0°C , devido à grande pressão exercida sobre ele.

ponto de fusão será superior a 0°C . Uma aplicação deste fato é mostrada na fig. 13-13: 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 se 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 .

INFLUÊNCIA DA PRESSÃO NA TEMPERATURA DE EBULIÇÃO

Como você sabe, qualquer substância, ao se vaporizar, aumenta de volume. Por este motivo, *um aumento na pressão acarreta um aumento na temperatura de ebulição*, pois uma pressão mais elevada tende a dificultar a vaporização.

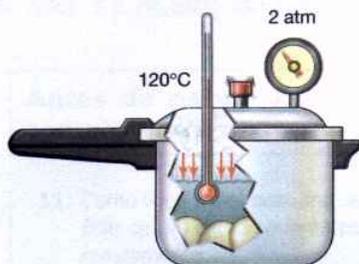


Fig. 13-14: Em uma panela de pressão a água atinge temperaturas superiores a 100°C .



Quanto maior a altitude (menor pressão atmosférica), menor é a temperatura de ebulição da água.



Fig. 13-15: É difícil cozinhar no alto do monte Everest porque ali a temperatura da água, em uma panela aberta, não ultrapassa 72°C .

Este fato ocorre nas 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 este valor. Na panela de pressão, os vapores formados e impedidos de escapar (fig. 13-14) ajudam a pressionar a superfície da água, podendo a pressão total atingir cerca de 2 atm. Com isto, a água só entrará em ebulição nas proximidades de 120°C , fazendo com que os alimentos sejam cozidos mais rapidamente.

Naturalmente, uma diminuição na pressão provoca um abaixamento na temperatura de ebulição. É um fato conhecido que, 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 (observe a tabela 13-3). No alto do monte Everest, por exemplo, cuja altitude é de 8800 m e a pressão atmosférica é de apenas 26 cmHg, a água entra em ebulição a 72°C . Então, tentar cozinhar no alto do monte Everest, sem panela de pressão, é uma tarefa bas-

tante difícil ou mesmo impossível para alguns alimentos (fig. 13-15). 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 (fig. 13-16).

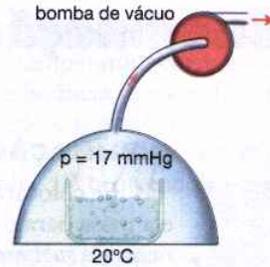


Fig. 13-16: É possível fazer a água entrar em ebulição a temperaturas relativamente baixas.

Ponto de ebulição da água a diversas altitudes		
Altitude (m)	Pressão atmosférica (cmHg)	Ponto de ebulição da água (°C)
0	76	100
500	72	98
1000	67	97
1500	64	95
2000	60	93
2500	56	92
9000	24	70

Tabela 13-3.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, **responda** às questões seguintes, **consultando o texto sempre que julgar necessário**.

16. Sabe-se que o ferro, como a maioria das substâncias, ao se fundir tem um comportamento igual ao do chumbo (descrito no início desta seção). Baseando-se nesta informação, responda:
 - a) Uma barra de ferro, ao se fundir, aumenta ou diminui de volume?
 - b) Então, o ferro líquido tem densidade maior ou menor do que o ferro sólido?
 - c) Assim, uma barra de ferro sólido, colocada em ferro líquido, afunda ou flutua?
17. O ponto de fusão do ferro é de 1535°C sob uma pressão de 1 atm. Aquecendo-se uma barra de ferro que está submetida a uma pressão de 5000 atm, ela irá se fundir abaixo ou acima de 1535°C?
18. a) Algumas rochas apresentam fendas ou porosidades que permitem a infiltração de água. Nos países de clima muito frio, observa-se que estas rochas, no inverno, fragmentam-se em várias partes. Explique por que isto ocorre.
 - b) Tendo em vista a resposta da questão (a), você pode concluir que a densidade do gelo é maior ou menor do que a da água?
 - c) Então, você pode entender por que um *iceberg* flutua no mar?
19. 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?
20. a) A tabela 13-2 nos informa que o álcool entra em ebulição a 78°C. Será possível aquecer uma certa 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 95°C. Qual é a altitude desta cidade? (Consulte a tabela 13-3.)

13.5. Sublimação — diagrama de fases



Agostinho de Paula

SUBLIMAÇÃO

Se colocarmos uma bola de naftalina em uma gaveta, sabemos que ela passa para o estado de vapor, sem passar pelo estado líquido, isto é, ocorre a *sublimação* da naftalina. Este fato também ocorre com o CO_2 sólido e, por isso, ele é denominado *gelo-seco*. Embora sejam poucas as substâncias que se sublimam nas condições ambientes, verifica-se que este fenômeno pode ocorrer com qualquer substância, dependendo da temperatura e da pressão a que ela estiver submetida. O estudo do *diagrama de fases*, que faremos a seguir, nos permitirá definir em que condições a sublimação de uma substância poderá ocorrer.

Um pedaço de gelo-seco se sublimando. Observe que o vapor se desprende diretamente do sólido.

DIAGRAMA DE FASES

Como dissemos na secção 13.1, uma dada substância pode se apresentar nos estados sólido, líquido ou gasoso, 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 estes valores podemos construir um gráfico, denominado *diagrama de fases*, que tem aspecto semelhante ao da fig. 13-17. Observe que este diagrama está dividido em três regiões, indicadas por S , L e V na fig. 13-17. Se nos forem fornecidos os valores da pressão e da temperatura em que uma substância se encontra, o seu diagrama de fases nos permitirá determinar se ela está sólida, líquida ou gasosa. Para isto, devemos localizar, neste diagrama, o ponto correspondente ao par de valores de p e t fornecidos. Se este ponto estiver localizado na região S , a substância estará na fase sólida (por exemplo, o ponto A da fig. 13-17); se estiver na região L , estará na fase líquida e se estiver na região V , na fase gasosa.

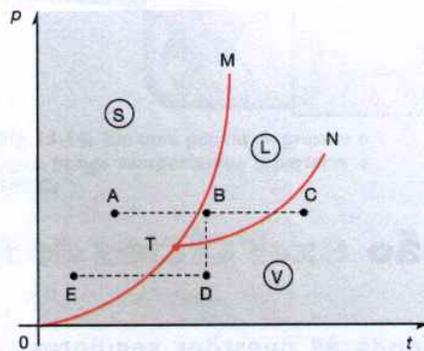


Fig. 13-17: Diagrama de fases de uma substância. Conhecendo-se a pressão e a temperatura de uma substância, este diagrama nos permite determinar o estado em que ela se encontra.

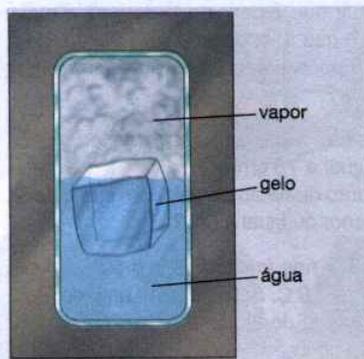


Fig. 13-18: À pressão de 4,6 mmHg e à temperatura de $0,01^\circ\text{C}$ é possível encontrar a água, simultaneamente, nos estados sólido, líquido e gasoso.

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, qualquer ponto da linha TM corresponde a um par de valores de p e t no qual a substância se apresenta, simultaneamente, nos estados sólido e líquido. A linha TN corresponde ao equilíbrio entre líquido e vapor e a linha OT , entre sólido e vapor. O ponto de encontro dessas três linhas (ponto T da fig. 13-17) nos fornece os valores da pressão e da temperatura nos quais a substância pode se apresentar, simultaneamente, nos três estados. Este ponto é denominado *ponto triplo* da substância. A água, por exemplo, à pressão de 4,6 mmHg e a uma temperatura de $0,01^\circ\text{C}$, pode ser encontrada, simultaneamente, nos estados sólido, líquido e gasoso (fig. 13-18) e, portanto, estes valores correspondem ao seu ponto triplo.

COMENTÁRIOS

Consideremos uma substância com uma pressão e temperatura correspondentes ao ponto *A* da fig. 13-17. Evidentemente, esta substância se encontra no estado sólido. Já sabemos que mantendo constante a pressão e aumentando a temperatura, ocorrerá a fusão da substância em um certo valor de *t*. No diagrama, este processo corresponde a um deslocamento ao longo da linha *AB*, ocorrendo a fusão quando esta linha cruzar a curva *TM*.

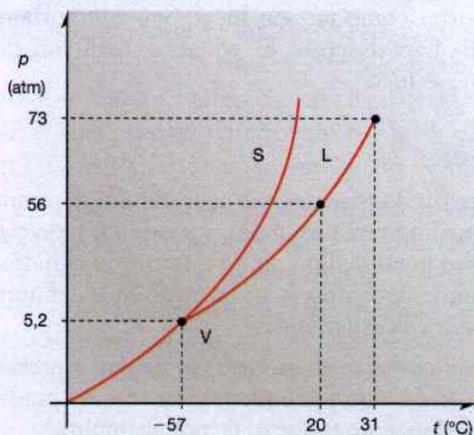
No ponto *B*, a substância se encontra no estado líquido. Já vimos que temos duas maneiras para fazer um líquido se vaporizar (entrar em ebulição): aumentando sua temperatura a pressão constante ou reduzindo sua pressão a temperatura constante. Observe que no diagrama, o primeiro processo corresponde a um deslocamento ao longo de *BC* e, o segundo, ao longo de *BD*. Em ambos os casos, a vaporização ocorre no cruzamento destas linhas com a curva *TN*.

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, através do diagrama, que, se uma substância sólida estiver submetida a uma pressão inferior à pressão de seu ponto triplo, ao ser aquecida, ela 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.

s de fixação **exercícios de fixação** exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, **responda** às questões seguintes, **consultando o texto** sempre que julgar necessário.

Os exercícios de **21 a 24** se referem ao diagrama de fases do CO_2 , que está representado na figura destes exercícios (o gráfico não foi construído em escala uniforme).



Exercícios 21 a 24.

21. a) Se o CO_2 estiver submetido a uma pressão de 50 atm e a uma temperatura de -80°C , em que fase ele se encontra?
b) Uma 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?
22. a) Em um tanque tem-se CO_2 líquido, submetido à pressão de 56 atm. Aquecendo-se este líquido e mantendo-se constante a pressão sobre ele, em que temperatura o CO_2 começará a se vaporizar?
b) A que pressão e temperatura devemos submeter o CO_2 para que seja possível encontrá-lo, simultaneamente, nas três fases?
23. a) Considere uma pedra de gelo-seco sob uma pressão de 3,0 atm. Mantendo-se constante esta pressão e aquecendo-se a pedra, em uma certa temperatura, ela mudará de fase. Qual será esta mudança de fase?
b) Para que, ao ser aquecida, ocorra a fusão de uma pedra de gelo-seco, que condição deve satisfazer a pressão à qual ela está submetida?

24. Um recipiente contém uma mistura de CO_2 nos estados sólido, líquido e vapor, em equilíbrio.
- 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 ?
 - Responda à questão anterior, supondo que a pressão foi mantida constante e a temperatura aumentada.
 - O que deveria ser feito para que o CO_2 passasse totalmente para o estado líquido?

um tópico especial para você aprender um pouco mais

13.6. Comportamento de um gás real

No capítulo 11, ao estudarmos o comportamento de um gás ideal, vimos que ele obedece a algumas leis bastante simples (como a lei de Boyle e a lei de Gay-Lussac) que podem ser sintetizadas pela equação $pV = nRT$. Naquela ocasião, afirmamos que os gases existentes na natureza, isto é, os gases reais (O_2 , N_2 , He, H_2 etc.) se comportam como um gás ideal quando submetidos a pressões baixas e temperaturas elevadas, ou seja, quando a densidade do gás é pequena.

Procuraremos, a seguir, descrever sucintamente como se comporta um gás real quando estas condições não são satisfeitas, isto é, quando ele se encontra submetido a pressões elevadas e sua temperatura é relativamente baixa.

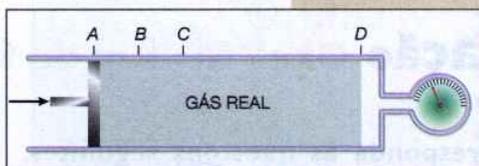


Fig. 13-19: Um gás real é comprimido no interior de um cilindro provido de um manômetro.

UM GÁS REAL PODE NÃO SE COMPORTAR COMO UM GÁS IDEAL

Para isto, suponha que um gás real esteja encerrado em um cilindro provido de um pistão e de um manômetro que nos permita ler os valores de sua pressão, como mostra a fig. 13-19.

Mantendo constante a temperatura do gás, vamos comprimi-lo a partir da posição *A* do pistão, quando a pressão do gás é, ainda, relativamente baixa. Durante a compressão, verifica-se que, inicialmente, o gás real se comporta como um gás ideal, isto é, os valores de p , V e T do gás satisfazem à equação $pV = nRT$.

Entretanto, após o pistão atingir uma certa posição (por exemplo, a posição *B* da fig. 13-19), na qual a pressão já 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.

O QUE É PRESSÃO DE VAPOR

Prosseguindo-se 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 inicia-se a condensação do gás. Tal pressão é denominada *pressão de vapor* do gás na temperatura da experiência.

A partir desta posição, continuando-se 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 esta 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 modificação 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 uma certa temperatura. De fato, se o gás se encontrar nesta temperatura, ou em valores superiores a ela, não conseguiremos liquefazê-lo por maior que seja a pressão exercida sobre ele. Esta 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 desta temperatura só é possível encontrar a substância no estado gasoso.

É costume, entre certos autores, fazer-se 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*, e se sua temperatura for superior a t_c , diz-se que ela é um *gás*.

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 $t_c = -118^\circ\text{C}$. Então, para obtermos 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 e, acima desta temperatura, seria um gás.

Para o anidrido carbônico (CO_2), a temperatura crítica é $t_c = 31^\circ\text{C}$. Portanto, tomando-se uma certa quantidade de O_2 e CO_2 do ar ambiente, em um dia no qual a temperatura é 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.



Quando a temperatura do gás se eleva, a pressão de vapor também se eleva. Isso significa que, para condensar o gás, é necessário exercer uma pressão maior. A temperatura crítica é o ponto em que a pressão de vapor se torna igual à pressão crítica. Acima desta temperatura, o gás não pode ser liquefeito por aumento de pressão.

Exemplos de temperaturas críticas:

Temperatura crítica:

Temperatura crítica:



Quando uma pessoa transpira, se seu suor evaporar haverá absorção de calor de sua pele e ela sentirá mais conforto. Isto ocorre, por exemplo, em lugares de clima quente e seco (baixa umidade). Se a umidade do ar, entretanto, for elevada, a evaporação do suor é mais lenta, fazendo com que as pessoas tenham uma sensação mais desagradável, mesmo que o clima não seja muito quente.

Vapor d'água na atmosfera

O ar atmosférico, como você deve saber, é uma mistura de alguns gases tais como o oxigênio, o nitrogênio, o anidrido carbônico e vapor d'água. A quantidade de vapor d'água existente em um dado volume de ar é um fator importante para a nossa vida, pois está relacionado com a ocorrência das chuvas, com o clima em geral e até mesmo com a sensação de conforto que experimentamos em um determinado ambiente (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 a *umidade absoluta*, u_a , da atmosfera, da seguinte maneira: sendo m a massa de vapor presente em um volume V de ar, temos

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

Esta grandeza é pouco usada, porque os técnicos e cientistas preferem trabalhar com o conceito de *umidade relativa* que analisaremos a seguir.

A pressão atmosférica é a soma das pressões exercidas por todos os gases presentes no ar. A pressão que cada um destes gases exerce isoladamente é denominada *pressão parcial* do gás. A pressão parcial que o vapor d'água exerce é, em geral, muito baixa, estando situada em torno de alguns milímetros de Hg.

É fácil perceber que, para uma dada temperatura, a pressão parcial do vapor d'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 este valor, o vapor é denominado *vapor seco* ou *não-saturado*. A *umidade relativa*, u_r , do ar é definida da seguinte maneira:

$$u_r = \frac{\text{pressão parcial do vapor d'água}}{\text{pressão de vapor* da água na mesma temperatura}}$$

Vejam um exemplo: suponhamos que em um ambiente, à temperatura de 20°C, a pressão parcial do vapor d'água fosse de 10 mmHg. A tabela 13-4 nos mostra que a pressão de vapor d'água a esta temperatura é 17,5 mmHg (isto é, o vapor estaria saturado se sua pressão tivesse este 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,

$$u_r = 100 \times 0,57 \quad \text{ou} \quad u_r = 57\%$$

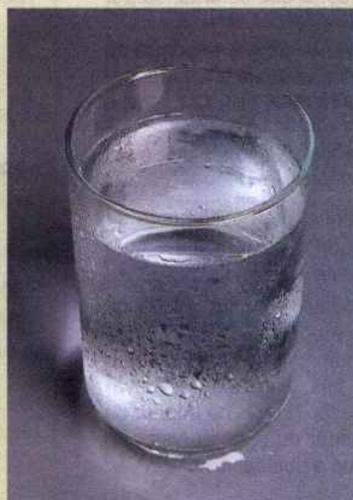
Evidentemente, se o vapor no ambiente estivesse saturado, sua umidade relativa seria $u_r = 100\%$ e se não houvesse vapor presente na atmosfera, teríamos $u_r = 0$. Como vimos na seção 13.3, nesta última situação a velocidade de evaporação da água colocada em um recipiente aberto seria muito alta e no primeiro caso ($u_r = 100\%$) a água não se evaporaria.

A medida da umidade relativa do ar é feita por meio de aparelhos denominados *higrômetros*. Um modelo muito simples de higrômetro pode ser

* A pressão de vapor para uma dada temperatura costuma ser denominada *tensão máxima de vapor* naquela temperatura.

Pressão de vapor da 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	1 490
140	2 710

Tabela 13-4.



Laurenti Fochetto

O vapor d'água, presente na atmosfera, se condensa sobre a superfície do copo frio.

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 irá decrescendo gradualmente. Em certo momento observa-se que a superfície externa do recipiente torna-se embaçada, em virtude da condensação, sobre esta superfície, do vapor da água existente na atmosfera. A temperatura em que isto ocorre é denominada *ponto de orvalho*. Suponha que esta condensação tenha ocorrido quando a temperatura do recipiente atingiu 10°C. A tabela 13-4 nos fornece o valor da pressão de vapor da 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 d'água na atmosfera é igual a 8,9 mmHg. O termômetro nos fornece também a temperatura do ar ambiente. Supondo que ela seja de 20°C, obtemos a pressão de vapor a esta temperatura: 17,5 mmHg (tabela 13-4). Temos assim os dados que nos permitem obter a umidade relativa do ar:

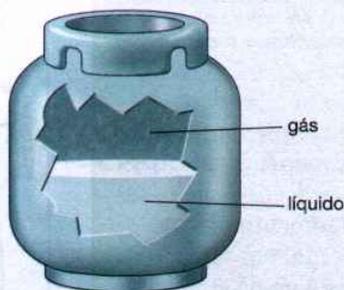
$$u_r = \frac{8,9}{17,5} = 0,51 \quad \text{ou} \quad u_r = 51\%$$

s de fixação **exercícios de fixação** **exercícios de fixação**

Antes de passar ao estudo da próxima seção, **responda** às questões seguintes, **consultando o texto** sempre que julgar **necessário**.

25. Considere um gás, contido em um recipiente, a alta pressão e baixa temperatura. Duplicando-se isotermicamente a pressão deste gás, verifica-se que seu volume *não* se reduz à metade. Supondo que não tenha havido escapeamento do gás, que explicação você daria para o fato observado?

26. a) Diga, com suas palavras, o que se entende por pressão de vapor.
 b) Uma certa massa de vapor d'água encontra-se a 20°C. Qual a pressão que se deve exercer sobre este vapor para condensá-lo? (Consulte a tabela adequada.)
 c) Responda à questão anterior supondo que o vapor esteja a 100°C.
27. Um botijão de gás de cozinha, hermeticamente fechado, contém gás liquefeito em equilíbrio com seu vapor (veja a figura deste exercício).
- a) A pressão do gás do botijão é maior, menor ou igual à sua pressão de vapor?
 b) Abre-se a válvula do botijão e deixa-se escapar uma 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.



Exercício 27.

28. Durante muitos anos os cientistas tentaram liquefazer o gás hélio, sem sucesso. Procure apontar a causa desta dificuldade sabendo-se que a temperatura crítica do hélio é de -268°C , ou seja, 5 K (a temperatura crítica mais baixa entre todas as substâncias).
29. A temperatura crítica da água é de 374°C . Se tivermos água em ebulição em uma panela aberta, devemos dizer que dela se desprende vapor d'água ou gás d'água?
30. Uma sala, a 40°C , contém vapor d'água a uma pressão parcial de 12,6 mmHg.
- a) Para que valor deveria ser reduzida a temperatura da sala, a fim de que este vapor se condensasse (ponto de orvalho)?
 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?
31. Qual seria o valor da umidade relativa do ar na sala do exercício anterior nas condições mencionadas na questão (a)? E na questão (b)?
32. Determine a umidade relativa do ar na sala referida no exercício 30, nas condições iniciais ali fornecidas.
33. Considere um ambiente quente e seco (como o de uma sauna, por exemplo), no qual a temperatura é de 60°C e a umidade relativa do ar é 30%. Qual é a pressão parcial do vapor d'água neste ambiente?

Revisão Revisão Revisão Revisão Revisão Revisão

As questões seguintes foram formuladas para que você faça uma revisão dos pontos mais importantes abordados neste capítulo. Ao respondê-las, volte ao texto sempre que tiver dúvidas.

- a) Explique o que são substâncias cristalinas e substâncias amorfas. Dê exemplos de substâncias que apresentam estas estruturas.

b) Quando um cristal passa para a fase líquida, diga o que ocorre com: sua rede cristalina, a distância entre seus átomos e a força entre eles.

c) Cite as principais características da estrutura molecular de uma substância no estado gasoso.
- Diga quais são e como se denominam as mudanças de fase que podem ocorrer com uma substância.
- a) Descreva, em termos moleculares, o que se passa com a estrutura interna de um sólido cristalino que é aquecido até se fundir.

b) Enuncie as leis de fusão e dê exemplos que ilustrem cada uma delas.

c) O que é calor latente de fusão?
- a) Enuncie as leis da solidificação, dando exemplos que ilustrem cada uma delas.

b) As substâncias amorfas obedecem a estas leis da fusão e solidificação que você enunciou?
- a) O que é evaporação?

b) Quais os fatores que influem na velocidade de evaporação?

c) Explique como e por que cada um desses fatores tem influência na velocidade de evaporação. Ilustre sua resposta com exemplos.

6.
 - a) Em que consiste a ebulição de um líquido?
 - b) Enuncie as leis da ebulição. Exemplifique.
 - c) O que é calor latente de ebulição?
 - d) Enuncie as leis da condensação.
7.
 - a) O que acontece com o volume da maioria das substâncias ao se fundirem?
 - b) Então, a densidade destas substâncias, no estado líquido, é maior ou menor do que no estado sólido?
 - c) Explique o que ocorre com o volume e a densidade do gelo quando ele se funde.
8. Diga qual é a influência de um aumento de pressão:
 - a) Na temperatura de fusão das substâncias que aumentam de volume ao se fundirem.
 - b) Na temperatura de fusão do gelo.
 - c) Na temperatura de ebulição de qualquer líquido.
9.
 - a) Se você dispõe apenas do diagrama de fases de uma substância, quais os dados que você precisa conhecer para determinar o estado em que a substância se encontra?
 - b) No diagrama de fases, explique o que representam os pontos situados em S, L e V.
 - c) Na fig. 13-17, mostre os pontos nos quais é possível encontrar a substância, simultaneamente, nos estados sólido e líquido. Faça o mesmo para os estados líquido e gasoso e para os estados sólido e gasoso.
10.
 - a) O que é ponto triplo de uma substância?
 - b) Mostre, na fig. 13-17, onde está localizado o ponto triplo da substância.
 - c) Qual a condição que deve satisfazer a pressão sobre uma substância sólida para que, ao ser aquecida, ela se sublime?

algumas experiências simples

Para você fazer

Primeira experiência

Retire de um congelador várias pedras de gelo e coloque-as em um recipiente (é aconselhável picar o gelo em pequenos pedaços). Introduza no gelo um termômetro que lhe permita medir temperaturas um pouco inferiores a 0°C (você já deve ter usado um termômetro como este, simples e de preço acessível, em experiências anteriores). Verifique que, de acordo com uma das leis da fusão, a partir do momento em que o gelo começa a se fundir, a indicação do termômetro permanecerá constante. Observe qual é, nestas condições, a leitura do termômetro. Introduzindo o termômetro um pouco mais no recipiente, para que seu bulbo fique mergulhado na água resultante da fusão, verifique também que esta água está à mesma temperatura do gelo.

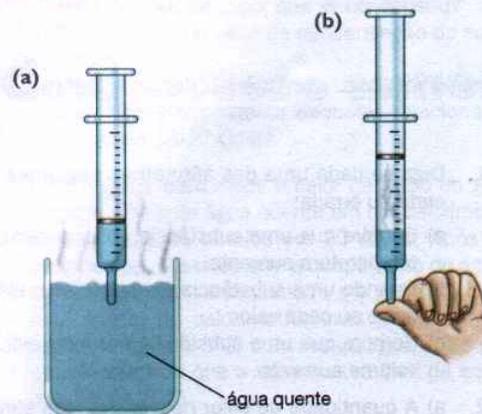
Segunda experiência

Leve ao fogo uma vasilha contendo água. Introduza no líquido um termômetro (cuja escala indique até 100°C) e observe sua indicação à medida que a água se aquece.

- a) Quando a água entra em ebulição, a leitura do termômetro se estabiliza?
- b) Aumente a intensidade da chama sob o recipiente. Isto provoca alguma alteração na temperatura da água em ebulição?
- c) Qual é, então, a temperatura de ebulição da água em sua cidade? Consultando a tabela 13-3, determine, aproximadamente, a pressão atmosférica e a altitude locais.

Terceira experiência

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.

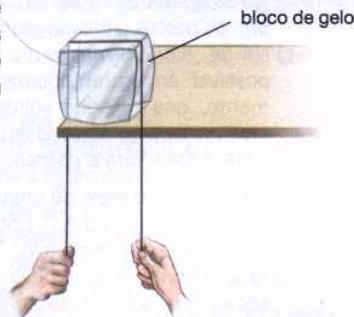


Terceira experiência.

Tome uma seringa de injeção e, puxando o êmbolo, deixe que um pouco desta 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 com seu dedo polegar). 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 13.4, procure explicar por que isto acontece.

Quarta experiência

Tome um bloco de gelo, apoiando-se sobre uma superfície horizontal. Passe sobre o gelo um arame bem fino e resistente (de preferência um arame de aço). Puxe firme e lentamente as extremidades do arame, como mostra a figura desta experiência.



Quarta experiência.

- 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?
- 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.
- Continuando a puxar cuidadosamente o arame, você poderá conseguir fazer com que ele atravesse totalmente o bloco, sem parti-lo. Tente obter este resultado.

Quinta experiência

O calorímetro que você construiu na quarta experiência do capítulo anterior será usado, agora, para medir o calor de fusão do gelo. Anote o valor da capacidade térmica do calorímetro, que você já determinou naquela experiência.

- Meça uma certa massa de água morna (cerca de 50°C), cujo volume seja aproximadamente igual à metade do volume de seu calorímetro.
- Coloque esta água no calorímetro e, observando o termômetro, aguarde até que o equilíbrio térmico seja estabelecido. Anote o valor desta temperatura.
- Retire de um recipiente contendo gelo fundente (gelo a 0°C) algumas pedras e determine a massa total delas. A seguir, coloque-as imediatamente dentro do calorímetro.
Observação: Para facilitar a realização da experiência, é desejável que este gelo se funda totalmente. Por isso, recomenda-se que a massa das pedras de gelo seja cerca de $1/3$ da massa de água já existente no calorímetro.
- Após ser atingido o equilíbrio térmico, anote a temperatura final no interior do calorímetro.
- Com os dados que você obteve, calcule o calor de fusão do gelo (o problema 13 deste capítulo poderá lhe orientar na maneira de conduzir este cálculo).
- O valor que você obteve se aproxima razoavelmente daquele que se encontra na tabela 13-1? Se a diferença for muito grande, tente encontrar as possíveis causas desta discrepância.

problemas e testes problemas e testes problemas

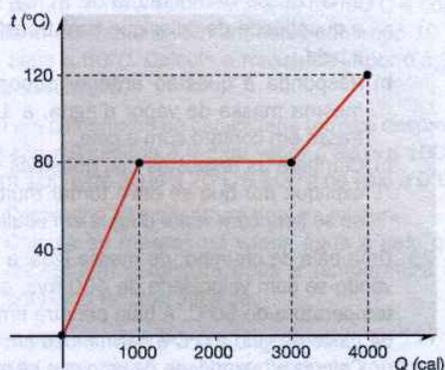
- Diga se cada uma das afirmativas seguintes está certa ou errada:
 - Sempre que uma substância absorve calor, sua temperatura aumenta.
 - Quando uma substância muda de fase, ela absorve ou cede calor.
 - Sempre que uma substância absorve calor, seu volume aumenta.
- A quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de uma 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 ?
 - Baseando-se na resposta da questão anterior, responda: para esfriar uma bebida, seria mais eficaz colocar nela água a 0°C ou uma massa igual de gelo também a 0°C ?
- Um bloco de chumbo, de massa igual a 100 g, encontra-se no estado sólido à temperatura de 327°C (seu ponto de fusão). Fornece-se ao bloco 1 300 cal de calor.

- Quantas calorias serão usadas para fundir completamente o bloco de chumbo? (Consulte a tabela 13-1.)
- Qual será a temperatura final do chumbo líquido formado? (O calor específico do chumbo líquido é $0,036 \text{ cal/g } ^{\circ}\text{C}$.)

Para resolver os problemas 4, 5, 6, 7 e 8, considere cinco barras de massas iguais, construídas, respectivamente, de platina, alumínio, ouro, prata e chumbo. A tabela seguinte apresenta constantes físicas destes metais.

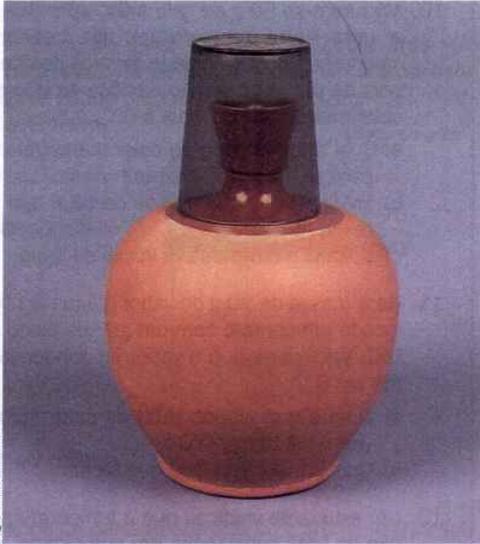
Metal	Calor específico (cal/g $^{\circ}\text{C}$)	Calor de fusão (cal/g)	Ponto de fusão ($^{\circ}\text{C}$)	Coefficiente de dilatação linear ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
platina (Pt)	0,032	27	1775	9×10^{-4}
alumínio (Al)	0,22	77	659	23×10^{-4}
ouro (Au)	0,031	16	1063	13×10^{-4}
prata (Ag)	0,056	21	961	17×10^{-4}
chumbo (Pb)	0,031	5,8	327	29×10^{-4}

4. Aquecendo-se cada uma das barras de 20°C até 700°C , aquelas que não irão se fundir serão as construídas de:
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:
a) Pt b) Al c) Au d) Ag e) Pb
6. Na questão anterior, suponha que as barras apresentassem o mesmo comprimento a 20°C . Após o aquecimento, aquela que apresentará menor comprimento será a barra de:
a) Pt b) Al c) Au d) Ag e) Pb
7. Imagine que cada uma das barras se encontrasse no estado sólido e na temperatura de seu ponto de fusão. Cedendo-se calor às barras até que elas se fundam totalmente, aquela que terá absorvido menor quantidade de calor será a barra de:
a) Pt b) Al c) Au d) Ag e) Pb
8. 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?
a) Pt b) Al c) Au d) Ag e) Pb
9. A figura deste problema 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, entre as afirmativas seguintes, aquela que está errada:
a) A temperatura de ebulição do líquido é 80°C .
b) O calor específico do líquido vale $0,25 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$.
c) O calor de vaporização da substância é igual a 1000 cal.
d) O calor específico da substância, no estado gasoso, é $0,50 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$.
e) A substância absorve 2000 cal desde o início da ebulição até vaporizar-se totalmente.



Problema 9.

10. Misturam-se 50 g de gelo a 0°C com 80 g de água a uma certa temperatura, no interior de um calorímetro de capacidade térmica desprezível. Depois de um certo tempo, verifica-se que existe, no calorímetro, apenas água a 0°C .
a) Qual a quantidade de calor que o gelo absorveu para se fundir totalmente?
b) Então, qual a quantidade de calor que a água liberou ao esfriar?
c) Calcule a temperatura inicial da água.
11. Uma massa de 20 g de vapor d'água a 100°C é colocada em contato com um grande bloco de gelo a 0°C . Verifica-se que o vapor se condensa e se esfria até 0°C .
a) Qual a quantidade total de calor liberada pelo vapor até atingir 0°C ?
b) Qual a massa de gelo que se fundiu?
12. Um estudante verificou que a temperatura de ebulição de uma substância, em sua cidade, era 80°C . Em seguida, desejando determinar o seu calor de condensação, ele realizou uma experiência, fazendo passar 50 g de vapor da substância, a 80°C , por uma serpentina mergulhada em um recipiente contendo 2,0 kg de água a 20°C . Ao passar pela serpentina, o vapor se condensou e foi recolhido, no estado líquido, ainda a 80°C . O estudante verificou, então, que a temperatura da água no recipiente subiu para 25°C .
a) Qual a quantidade de calor que a água do recipiente recebeu do vapor que se condensou?
b) Então, qual é o calor de condensação da substância?
c) Você acha que a substância usada na experiência poderia ser alguma daquelas relacionadas na tabela 13-2? Qual?
13. Uma pessoa, para medir o calor de fusão do gelo, colocou 100 g de água quente em um calorímetro, cuja capacidade térmica era $30 \text{ cal/}^{\circ}\text{C}$. Após um certo tempo, observou que a temperatura de equilíbrio da água com o calorímetro era de 40°C . Colocou, então, no calorímetro, uma pedra de gelo fundente (gelo a 0°C) com massa igual a 25 g. A pessoa verificou que a temperatura final de equilíbrio era de 20°C .
a) Qual a quantidade total de calor liberada pela água e pelo calorímetro ao se esfriarem?
b) Sabendo que este calor foi usado para fundir o gelo e elevar a temperatura da água resultante desta fusão, a pessoa calculou o calor de fusão do gelo. Qual foi o resultado que ela encontrou?
14. É muito comum guardar a água para se beber em recipientes de barro que possuem paredes porosas (veja a figura deste problema). Nestes recipientes, a água esfria e mantém-se fresca (abaixo da temperatura ambiente). Procure uma explicação para este fato.



Agostinho de Paula

Problema 14.

15. Aquecendo-se água em uma chaleira, verifica-se que ela atinge o ponto de ebulição mais rapidamente do que se fosse aquecida em uma panela aberta. Explique por que isto acontece.
16. Normalmente, em dias quentes, uma pessoa transpira. Se o suor se evaporar, haverá absorção de calor da pele da pessoa e ela se sentirá melhor, apesar da elevada temperatura do meio ambiente. Baseando-se nesta informação, explique:
 - a) Por que um clima quente e seco é mais agradável do que um clima quente e úmido?
 - b) Por que, em um dia quente, liga-se o ventilador de uma sala para tornar o ambiente mais agradável?
17. Se misturarmos, em um calorímetro de capacidade térmica desprezível, 50 g de água a 20°C com 20 g de gelo a 0°C, qual será a temperatura final da mistura?
18. Uma pessoa coloca 500 g de água a 20°C em um recipiente metálico que é, em seguida, introduzido no congelador de uma geladeira. Nestas condições, a água passa a liberar calor à taxa constante de 50 cal/s e sua temperatura começa a baixar, de maneira uniforme, em todos os pontos de sua massa. Suponha que a pessoa retire o recipiente do congelador após um intervalo de tempo de 200 s. Esta pessoa encontrará no recipiente apenas gelo, apenas água ou uma mistura de água e gelo? A que temperatura?
19. Um aquecedor elétrico cuja potência é de 1 000 W é mergulhado em um recipiente contendo 2,0 L de água a 20°C. Suponha que 80% do calor gerado no aquecedor seja absorvido pelo líquido e considere 1 cal = 4,2 J. Determine o tempo necessário para que metade da água do recipiente se evapore.

20. Um frasco aberto, parcialmente preenchido com água, é aquecido até que ela entre em ebulição. Fechando-se o frasco e retirando-o da fonte de calor, a ebulição se interrompe. Resfriando-se a superfície externa do frasco com água fria (veja a figura deste problema), observa-se que a água no frasco torna a entrar em ebulição. Explique por que isto ocorre.

**Problema 20.**

21. a) Em um certo local, observa-se que a água, em uma panela aberta, entra em ebulição a 80°C. Qual a pressão atmosférica neste local?
b) Qual a pressão que deve ser exercida sobre a água contida em um recipiente para que ela entre em ebulição a 0°C?
22. Lembrando-se do que foi informado no exercício de fixação 27 deste capítulo, responda: a temperatura crítica do gás de cozinha é maior, menor ou igual à temperatura ambiente?
23. Em um certo dia, a temperatura do ar é de 20°C e a umidade relativa é de 60%. Determine qual é, aproximadamente, a temperatura do ponto de orvalho neste dia.
24. a) Suponha que 3,0 g de água (aproximadamente 1 colher de chá) a 100°C caiam sobre a pele de uma pessoa (temperatura de 37°C). Determine a quantidade de calor que será transferida para a pele.
b) Responda à questão anterior supondo que a mesma massa de vapor d'água, a 100°C, entrasse em contato com a pele.
c) Compare as respostas das questões (a) e (b) e explique por que se deve tomar muito cuidado ao se lidar com vapor d'água em ebulição.
25. Uma bala de chumbo, de massa igual a 20 g, movendo-se com velocidade de 400 m/s, está a uma temperatura de 50°C. A bala penetra em um grande bloco de gelo a 0°C e permanece em seu interior. Calcule a quantidade de gelo que irá se fundir (1 cal = 4,2 J).

26. Uma pessoa está assentada à sombra, em um ambiente com temperatura de 37°C , que é a temperatura do seu corpo. Nessas condições seu metabolismo gera 120 W de calor e para manter a temperatura de seu corpo constante este calor gerado passa a ser liberado quase que exclusivamente por evaporação de suor. Quantos g de suor a pele deverá liberar em $1,0$ hora? (O calor de vaporização da água, a 37°C , vale 580 cal/g e $1\text{ cal} = 4,2\text{ J}$.)
27. Uma massa de $1,0\text{ kg}$ de água, a 0°C , é convertida em gelo a 0°C . Se todo o calor liberado neste processo fosse convertido em energia cinética do bloco de gelo, qual a velocidade que ele iria adquirir? ($1\text{ cal} = 4,2\text{ J}$.)
28. Um bloco de gelo, de massa igual a 50 kg e a 0°C , é empurrado por uma força horizontal, sobre um piso também horizontal e a 0°C . O bloco é empurrado com velocidade constante, percorrendo uma distância de 20 m . Observa-se que 25 g do gelo se fundem. Admitindo-se que todo o calor gerado pelo atrito foi absorvido pelo gelo, calcule o coeficiente de atrito cinético entre o bloco e o piso (considere $g = 10\text{ m/s}^2$ e $1\text{ cal} = 4,2\text{ J}$.)
29. Suponha que 200 g de água a 0°C (no estado líquido) tenham sido derramados em um recipiente contendo grande quantidade de nitrogênio líquido em seu ponto de ebulição (-196°C). Sabendo-se que o calor latente de vaporização do nitrogênio é de 48 cal/g , calcule a massa desta substância que se vaporiza (considere o calor específico do gelo igual a $0,50\text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$.)
30. Um tipo bastante conhecido de higrômetro consiste basicamente em dois termômetros. Um deles, usado para medir a temperatura ambiente, é denominado *termômetro seco*. No bulbo do outro termômetro, que é recoberto com tecido fino ou com uma camada de algodão, goteja-se lentamente um pouco de éter. A evaporação do éter ocasiona um resfriamento do bulbo e, em determinado momento, o vapor d'água do ar se condensa sobre ele (por este motivo, este termômetro é denominado *termômetro molhado* ou *termômetro úmido*). Determine a umidade relativa de um ambiente no qual a leitura do termômetro seco é de 40°C e a do termômetro molhado, no momento da condensação, é de 20°C .

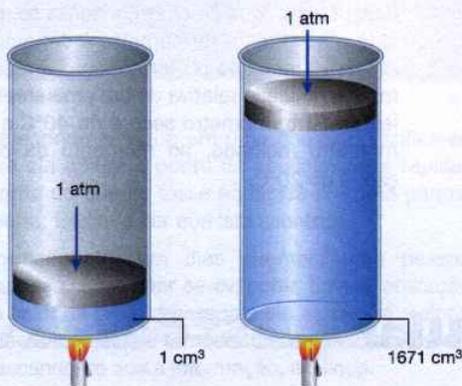
Problemas de vestibular

As questões de vestibular se encontram no final do livro.

Problemas suplementares

- Uma barra de ferro, de massa igual a $6,0\text{ kg}$, é tirada de um forno à temperatura de $1\ 000^{\circ}\text{C}$ e colocada imediatamente em um balde contendo 10 kg de água a 60°C . Calcule a massa de vapor d'água que se formará.
- Em um calorímetro de capacidade térmica desprezível são misturados $4,0\text{ g}$ de vapor d'água a 100°C com 100 g de água a 20°C e 100 g de gelo a 0°C .
 - Determine a temperatura final da mistura.
 - Calcule as massas de vapor, água e gelo que constituem a mistura após a temperatura de equilíbrio ter sido atingida.
- Uma bala de chumbo, com temperatura de 127°C , atinge uma placa de aço e funde-se totalmente (sem elevação da temperatura após a fusão). Supondo desprezível a energia transferida para a placa de aço, calcule a velocidade da bala. Tome, para o chumbo, calor específico $c = 0,03\text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$ e calor de fusão $L = 6\text{ cal/g}$ (considere $1\text{ cal} = 4\text{ J}$).
- A temperatura de um ambiente é de 20°C e a umidade relativa do ar ali é de 60% . Supondo que o vapor d'água se comporte como um gás ideal, calcule o valor da umidade absoluta em g/m^3 , neste ambiente.
- Um recipiente com água é colocado em uma sala fechada cujo volume é de 60 m^3 . A temperatura da sala é de 30°C . Calcule, em g/m^3 , a umidade absoluta da sala após ter sido atingida a situação de equilíbrio. (Considere que, na tabela 13-4, os valores da pressão variam linearmente entre duas temperaturas fornecidas.)

6. Uma barra de cobre, cuja condutividade térmica é $k = 0,90 \text{ cal/cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$, tem 30 cm de comprimento e 10 cm^2 de secção reta. Uma das extremidades desta barra está em contato com vapor d'água a 100°C e, a outra, com gelo a 0°C . Sabendo-se que a barra está isolada termicamente em sua superfície lateral, determine, após 5,0 min nestas condições:
- A massa de gelo que se funde.
 - A massa de vapor que se condensa.
7. Sob pressão atmosférica normal, 1 g de água a 100°C , ocupando inicialmente um volume de 1 cm^3 , absorve calor e se transforma em 1671 cm^3 de vapor à mesma temperatura (veja a figura deste problema). Considere $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$ e calcule a variação da energia interna do sistema neste processo.



Problema suplementar 7.

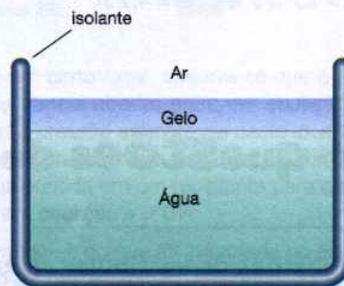
8. Uma pessoa, geralmente, sente uma certa sensação de frio quando sai de uma piscina e da água do mar. Qual é a causa fundamental desta sensação de frio?
9. Em uma experiência para se determinar o calor latente de fusão do gelo colocam-se 200 g de água em um recipiente de ferro de massa também igual a 200 g, ambos à temperatura inicial de 30°C . Acrescentam-se pequenos pedaços de gelo a 0°C ao recipiente, até que o conjunto atinja a temperatura de 10°C . Neste instante, pesando-se o recipiente, encontra-se uma massa total de 452 g. Sabe-se que a temperatura ambiente é 20°C .
- Considerando-se desprezíveis as trocas de calor com o ambiente, calcule o valor do calor de fusão do gelo obtido nesta experiência.

- Por que é razoável desprezar as trocas de calor entre o recipiente e o meio ambiente?
- Qual é o erro percentual cometido nesta experiência em relação ao valor tabelado?

10. Na secção 13.6 (fig. 13-19) descrevemos uma experiência na qual um gás real é comprimido em um cilindro. Mostre, de maneira aproximada, em um diagrama $p \times V$, a variação da pressão dentro do cilindro, à medida que o êmbolo se desloca da posição A até ultrapassar ligeiramente a posição D.

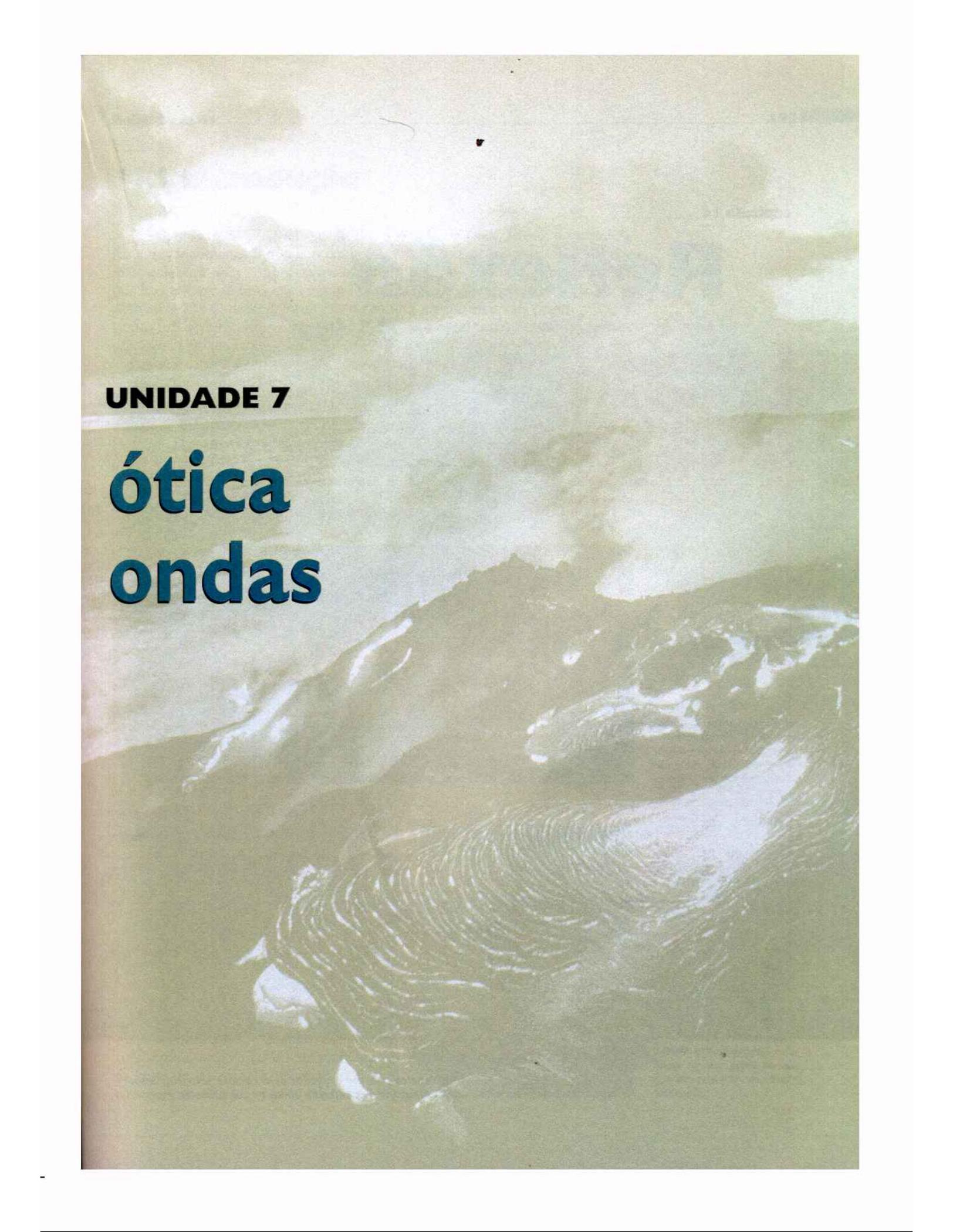
11. Em uma região de inverno rigoroso, um tanque com água é deixado ao ar livre até que se forme sobre a superfície da água uma camada de gelo com espessura igual a 5,0 cm (veja a figura deste problema). Sabendo-se que o ar acima do gelo está a -10°C , calcule a velocidade com que a espessura da camada de gelo está crescendo naquele instante. Apresente sua resposta em cm/h e considere os seguintes valores para o gelo:

condutividade térmica = $0,0040 \text{ cal/s} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$
 densidade = $0,92 \text{ g/cm}^3$
 calor latente de fusão = 80 cal/g



Problema suplementar 11.

12. Quando se retira calor lentamente de uma certa massa de um líquido, mantido em repouso, sem nenhuma perturbação, é possível fazer com que o líquido seja resfriado abaixo de seu ponto de fusão, sem que ele se solidifique. Nesta situação, diz-se que o líquido está em estado de *sobrefusão*. Este estado é altamente instável, pois basta uma pequena agitação para fazer com que o líquido retorne à sua temperatura de fusão e parte dele se solidifique imediatamente.
- Suponha que em um recipiente tenhamos 800 g de água, em estado de sobrefusão, a $-5,0^\circ\text{C}$. Agitando o recipiente, qual a massa de gelo que será formada?



UNIDADE 7

ótica ondas

capítulo 14

Reflexão

da luz



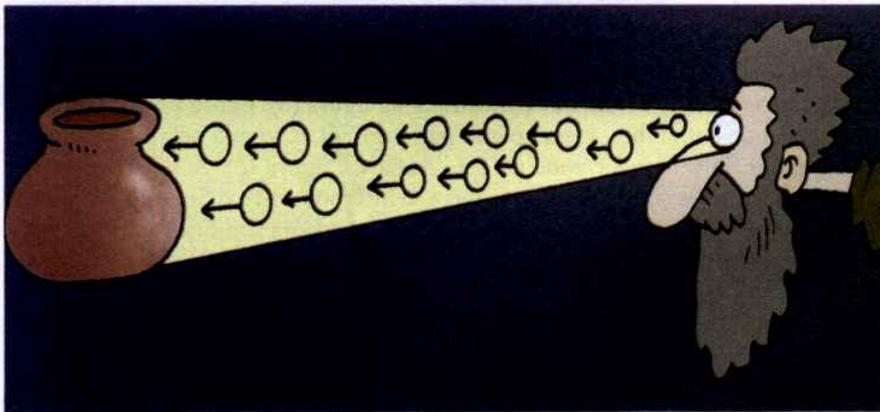
Stock Photos

Os belos reflexos captados pela câmara fotográfica são consequência da reflexão da luz na superfície da água.

14.1. Introdução

Estamos iniciando, neste capítulo, o estudo da *Ótica*, isto é, o estudo da luz e dos fenômenos luminosos em geral. Dos nossos sentidos, a visão é o que mais colabora para conhecermos o mundo que nos rodeia e, provavelmente por isto, a Ótica é uma ciência muito antiga. Filósofos gregos, como Platão e Aristóteles, já se preocupavam em responder a perguntas tais como: por que vemos um objeto? o que é a luz? etc. Platão, por exemplo, supunha que nossos olhos emitiam pequenas partículas que, ao atingirem os objetos, tornavam-nos visíveis. Aristóteles considerava a luz um fluido imaterial que se propagava entre o olho e o objeto visto.

Não sendo possível, com essas hipóteses, explicar um grande número de fenômenos luminosos que ocorrem na natureza, vários físicos notáveis, como Newton, Huyghens, Young e Maxwell, procuraram modificá-las, lançando novas idéias sobre a natureza da luz. Em nosso curso, teremos oportunidade de apresentar algumas das idéias destes cientistas, mas, antes disto, vamos procurar estudar alguns fenômenos óticos, as leis experimentais que descrevem o comportamento da luz nesses fenômenos e algumas de suas aplicações.



Alguns filósofos gregos acreditavam que os objetos se tornavam visíveis ao serem atingidos por partículas emitidas por nossos olhos.

PROPAGAÇÃO RETILÍNEA DA LUZ

Observando os corpos 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 facilmente sobre o comportamento da luz é que, quando ela se propaga em um meio homogêneo, a sua propagação é retilínea. Isto pode ser constatado quando a luz do Sol passa através da fresta de uma janela, penetrando em um quarto escurecido (fig. 14-1). Sabendo que a

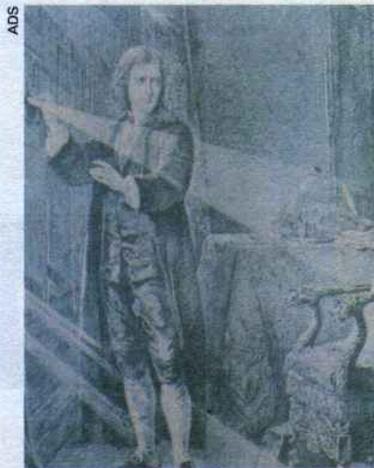


Fig. 14-1: Newton observando a propagação retilínea de um feixe de luz que penetra por uma fresta da janela.

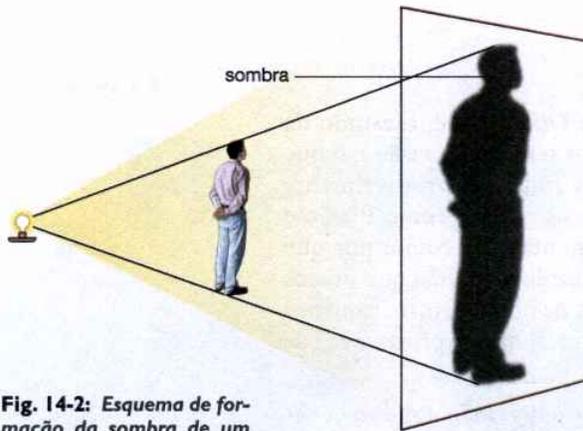
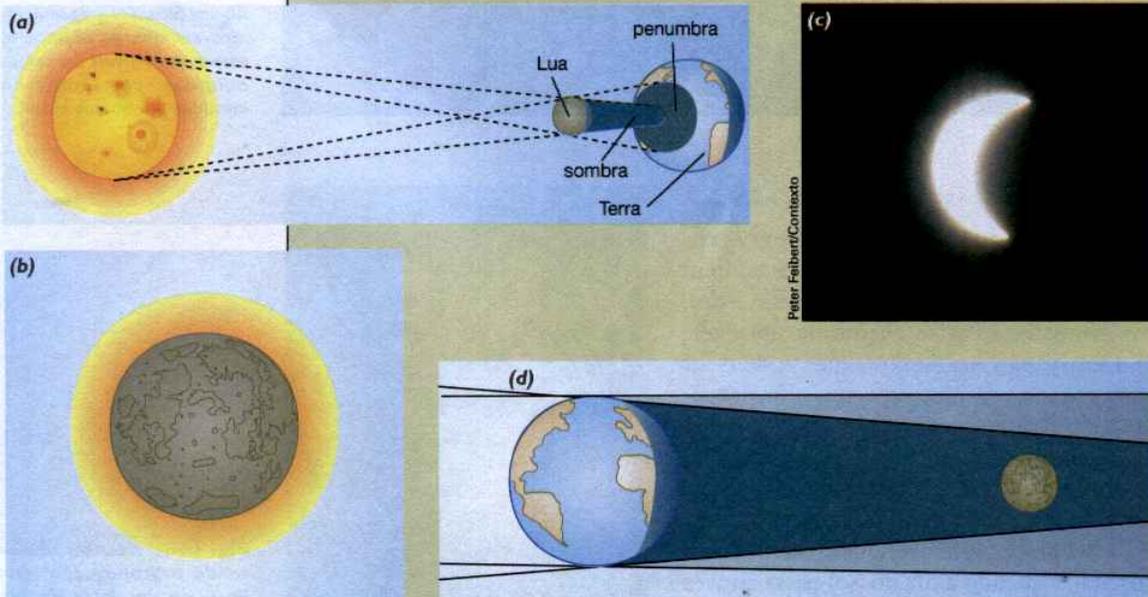


Fig. 14-2: Esquema de formação da sombra de um objeto iluminado por uma pequena lâmpada.

luz se propaga em linha reta, podemos determinar o tamanho e a posição da sombra de um objeto sobre um anteparo. Na fig. 14-2, por exemplo, uma pequena lâmpada emite luz que se propaga em linha reta em todas as direções. Um objeto opaco, colocado entre a fonte e um anteparo, interrompe a passagem de parte desta luz, originando a sombra. O contorno desta sombra é definido pelas retas que saem da fonte e tangenciam o objeto.

Eclipse do Sol e da Lua

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 (a). Para uma pessoa situada na região totalmente escura, temos 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 (b). Outra pessoa, situada na região de penumbra, veria apenas parte do Sol eclipsada pela Lua (eclipse parcial do Sol), como vemos na fotografia da figura (c). A figura (d) está mostrando o que ocorre quando a Terra se interpõe entre o Sol e a Lua: neste caso, como a Lua não recebe luz solar (está situada na sombra da Terra), não pode ser vista por um observador na Terra, isto é, temos um eclipse da Lua.



RAIOS E FEIXES DE LUZ

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 fig. 14-3. Estas linhas são denominadas *raios de luz*.

Na fig. 14-4-a estamos representando uma parte dos raios de luz que são emitidos por uma fonte. Este conjunto de raios constitui um *feixe luminoso divergente*. Este feixe divergente, depois de passar por alguns processos (que veremos oportunamente), pode se transformar em um *feixe convergente*, como aquele mostrado na fig. 14-4-b, ou em um *feixe de raios paralelos* (fig. 14-4-c).

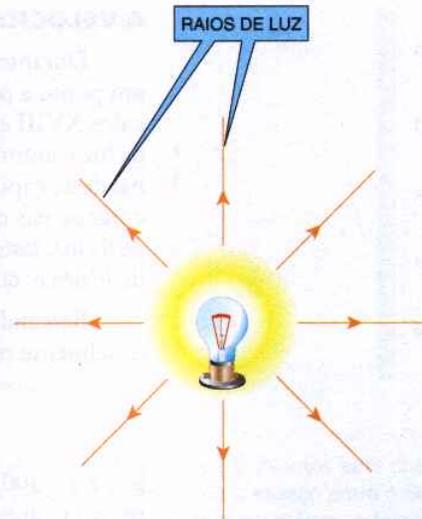
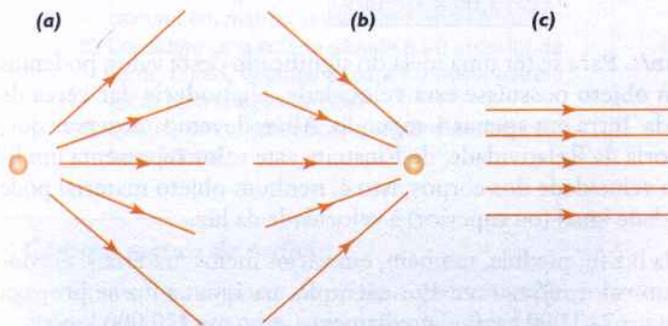


Fig. 14-3: Os raios luminosos indicam as direções de propagação da luz.

Fig. 14-4: Os feixes luminosos podem ser constituídos por raios divergentes, convergentes ou paralelos.

O feixe de luz que é 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 (fig. 14-5). 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 – fig. 14-6).

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 cruzado, isto é, um feixe não perturba a propagação do outro (fig. 14-7). Por este motivo, vários observadores em uma sala enxergam nitidamente os objetos aí existentes, apesar de os raios luminosos que levam as imagens a seus olhos estarem se cruzando.

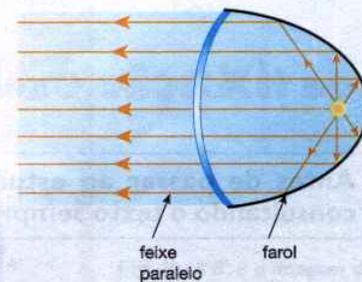


Fig. 14-5: Em um farol, um feixe luminoso divergente se transforma em um feixe de raios paralelos.



Fig. 14-6: Um feixe de luz solar que atinge a Terra é constituído de raios luminosos praticamente paralelos.

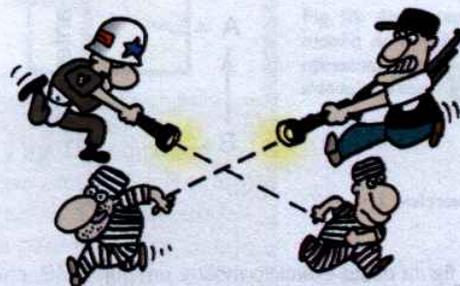


Fig. 14-7: O fato de dois raios luminosos se cruzarem não afeta suas direções de propagação.

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 é infinita. No Tópico Especial, apresentado no final deste capítulo, estão descritas algumas experiências, realizadas por grandes cientistas, nas quais eles conseguiram obter, com boa precisão, o valor da velocidade da luz. Este valor desempenha um papel muito importante no desenvolvimento da Física e, em várias ocasiões, teremos oportunidade de trabalhar com ele.

Baseando-se em medidas atuais, o valor da velocidade da luz *no vácuo* (que é usualmente representado por c) pode ser considerado como sendo

$$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$$

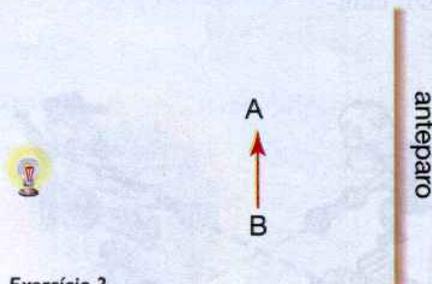
isto é, $c = 300\,000 \text{ km/s}$. Para se ter uma idéia do significado deste valor, podemos ressaltar que, se um objeto possuísse esta velocidade, ele poderia dar cerca de 7,5 voltas ao redor da Terra em apenas 1 segundo. Aliás, devemos observar que, de acordo com a Teoria da Relatividade, de Einstein, este valor representa um limite superior para a velocidade dos corpos, isto é, nenhum objeto material pode alcançar uma velocidade igual (ou superior) à velocidade da luz.

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 $v = 220\,000 \text{ km/s}$ e, no diamante, com $v = 120\,000 \text{ km/s}$.

Ícios de fixação **exErcÍcios de fixação** **exErcÍcios de fix**

Antes de passar ao estudo da próxima secção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

- É correto afirmar que a Lua é uma fonte de luz?
 - Então, por que podemos enxergar a Lua?

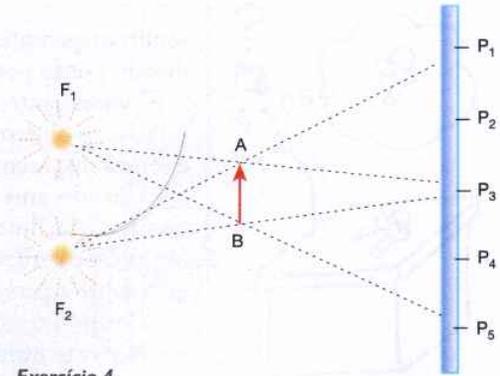


Exercício 2.

- A figura deste exercício mostra um objeto AB , colocado em frente a uma pequena lâmpada acesa. Atrás do objeto existe um anteparo opaco, situado paralelamente a AB .

- Desenhe, em uma cópia da figura, a sombra $A'B'$ do objeto, projetada sobre o anteparo.
 - Indique, na cópia da figura, a região do espaço que fica escura, isto é, que não recebe luz da fonte.
 - Se o objeto for aproximado da fonte, o tamanho de sua sombra aumentará, diminuirá ou não se modificará? (Trace um diagrama para justificar sua resposta.)
- 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. Nestas condições:
 - Como seria o feixe de raios luminosos, provenientes da fonte, que alcançam o objeto?
 - Desenhe, na cópia da figura, a sombra do objeto sobre o anteparo. Ela é maior, menor ou igual ao objeto?

4. Duas pequenas fontes luminosas, F_1 e F_2 , estão situadas em frente a um objeto opaco AB , como mostra a figura deste exercício. Lembrando-se da propagação retilínea da luz e considerando os pontos assinalados no anteparo, responda:
- Quais deles estão recebendo luz das duas fontes?
 - Qual deles recebe luz apenas da fonte F_1 ?
 - Qual deles recebe luz apenas da fonte F_2 ?
 - Qual deles não recebe luz de nenhuma das duas fontes?
5. O ano-luz é uma unidade de comprimento muito usada em Astronomia. O seu valor é igual à distância que a luz percorre, no vácuo, durante o tempo de 1 ano.
- Sabendo-se que em 1 ano temos $3,2 \times 10^7$ s, calcule, em metros, o valor de 1 ano-luz.
 - Considere uma estrela situada a 20 anos-luz da Terra. Então, quantos anos a luz desta estrela gasta para chegar até nós?
 - Qual é, em quilômetros, a distância desta estrela à Terra?



Exercício 4.

6. 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 d'água, o tempo que a luz solar gastaria para chegar até nós seria maior, menor ou igual a 8 minutos?

Câmara escura de orifício

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 o pequeno orifício, com uma agulha ou alfinete (veja a fig. I). Com este dispositivo pode-se obter a imagem de um objeto, usando o fato de que a luz se propaga em linha reta.

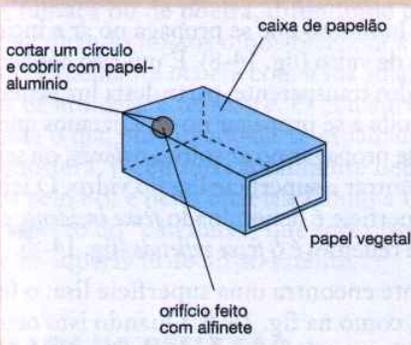


Fig. I: Uma câmara escura de orifício pode ser facilmente construída.

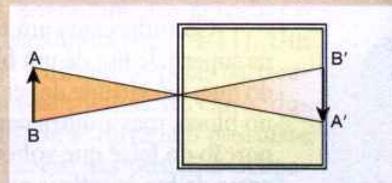


Fig. II: $A'B'$ é a imagem do objeto AB fornecida por uma câmara escura de orifício muito pequeno.

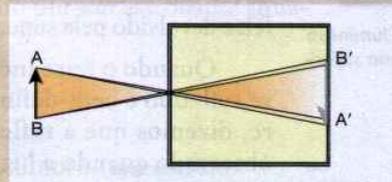


Fig. III: Aumentando-se o tamanho do orifício, a imagem apresenta-se com maior luminosidade, mas com menor nitidez.

Para que você entenda como isso ocorre, observe a fig. II na qual um objeto AB é 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' . É fácil perceber que a qualquer outro ponto do objeto corresponderá sobre a parede

semitransparente 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. Observe, na fig. II, que esta imagem é invertida em relação ao objeto e que uma pessoa poderá observá-la, uma vez que a parede é semitransparente.

Usando uma caixa de papelão e orientando-se pela fig. I, você poderá construir facilmente 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 muita 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 muito 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, neste caso, como vemos na fig. III, 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 adaptado em seu interior um filme fotográfico. Nestas condições e com um tempo suficiente de exposição, é possível obter boas fotos de um objeto. Tente isto!

14.2. Reflexão da luz

REFLEXÃO

Consideremos um feixe luminoso que se propaga no ar e incide na superfície lisa de um bloco de vidro (fig. 14-8). É um fato conhecido que, em virtude de ser o vidro transparente, parte desta luz penetra no bloco, mas a 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* (fig. 14-8).

Quando o feixe incidente encontra uma superfície lisa, o feixe refletido é bem-definido, como na fig. 14-8. Quando isto ocorre, dizemos que a reflexão é *especular*, porque este fenômeno é observado quando a luz é refletida em um espelho.

DIFUSÃO DA LUZ

Suponha que um feixe de luz incida em uma superfície irregular (fig. 14-9). Neste caso, cada pequena porção da superfície reflete a luz numa determinada direção e, conseqüentemente, 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.

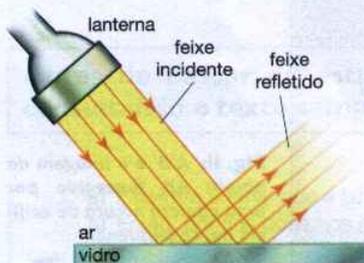


Fig. 14-8: Esquema de um feixe luminoso sofrendo reflexão ao encontrar uma superfície lisa.

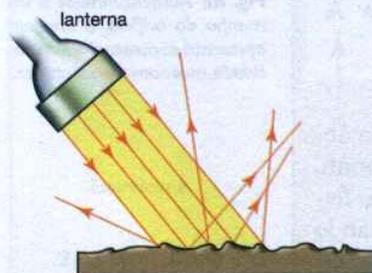


Fig. 14-9: Esquema de um feixe luminoso sofrendo reflexão ao encontrar uma superfície irregular.

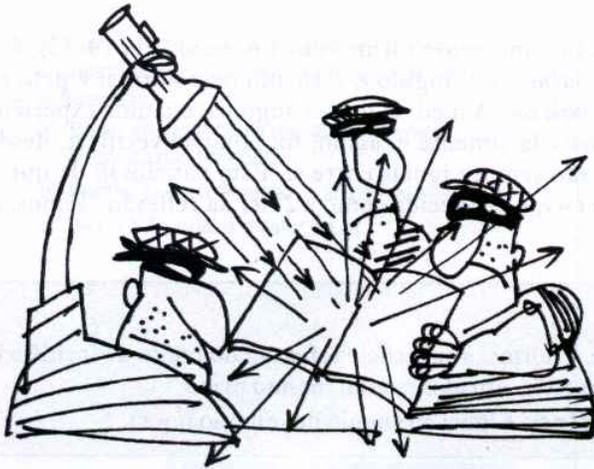


Fig. 14-10: A folha de um livro difunde a luz que recebe podendo, então, ser vista de várias posições diferentes.



Um objeto só pode ser visto quando a luz que ele emite atinge nossos olhos.

A maioria dos corpos reflete difusamente a luz que incide sobre eles. Assim, esta 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. Quando esta luz penetra em nossos olhos, nós enxergamos o objeto. 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, apesar de situadas em posições diferentes em torno dele (fig. 14-10).

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 fumaça ou poeira em suspensão no ar. Neste caso, as partículas de fumaça ou de poeira, difundindo a luz, permitem-nos perceber o feixe quando nossos olhos recebem a luz espalhada (fig. 14-11). 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.



Fig. 14-11: As partículas de fumaça (ou poeira) difundem a luz, tornando visível o feixe luminoso.

AS LEIS DA REFLEXÃO

Na fig. 14-12 mostramos um raio luminoso (um estreito feixe de luz) que incide no ponto P de uma superfície refletora. Traçando a normal a esta superfície no ponto P (NP), vemos que ela e o raio incidente determinam um plano (na fig. 14-12, este 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 neste mesmo plano. Portanto, na fig. 14-12, o raio refletido, assim como o raio incidente e a normal NP , estarão todos situados no plano da folha de papel. Esta observação experimental é conhecida como a 1ª lei da reflexão.

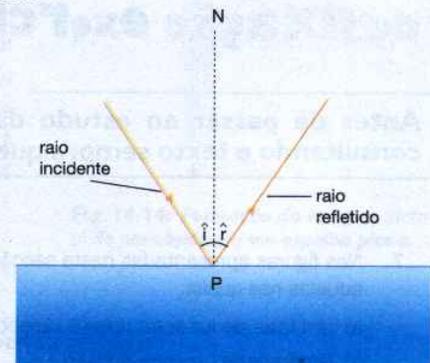


Fig. 14-12: Quando um raio de luz se reflete, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.

O ângulo \hat{i} , que o raio incidente forma com a normal (fig. 14-12), é denominado *ângulo de incidência* e o ângulo \hat{r} , formado pela normal e pelo raio refletido, é o *ângulo de reflexão*. A medida desses ângulos, em uma experiência de reflexão, pode ser feita facilmente e, assim, foi possível verificar, desde a Antiguidade, que eles 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 ($\hat{i} = \hat{r}$).

Estas leis serão usadas, nas secções seguintes, no estudo da formação de imagens nos espelhos planos e curvos.

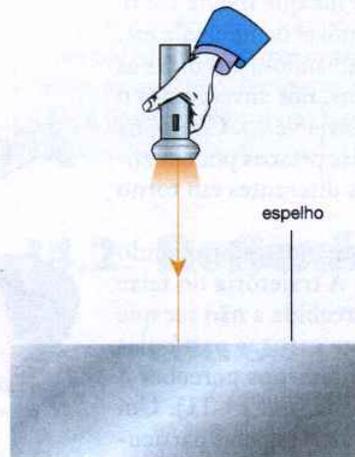


Fig. 14-13: Para o exemplo da secção 14.2.

Exemplo

Uma pessoa faz com que um estreito feixe luminoso incida perpendicularmente à superfície de um espelho (fig. 14-13).

- a) Qual é o valor do ângulo de incidência?

Como o ângulo de incidência é formado pelo raio incidente e a normal, é claro que, neste caso, temos $\hat{i} = 0$, pois o feixe está incidindo ao longo da normal.

- b) Qual é a direção do feixe refletido?

Como, na reflexão da luz, temos sempre $\hat{i} = \hat{r}$, teremos, neste caso, $\hat{r} = 0$. Isto significa que o feixe refletido voltará dirigido também ao longo da normal.

exercícios de fixação

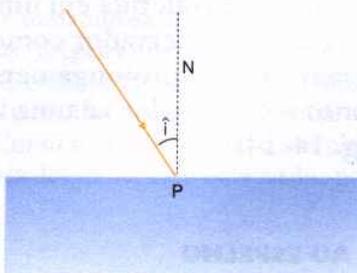
Antes de passar ao estudo da próxima secção, **responda** às questões seguintes, **consultando o texto** sempre que julgar **necessário**.

7. Nas figuras apresentadas nesta secção, identifique aquelas nas quais:
 - a) Um feixe de luz sofre reflexão especular.
 - b) Um feixe de luz sofre difusão.
8. a) A maioria dos objetos que nos rodeiam (paredes, árvores, pessoas etc.) não são fontes 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 que o Sol esteja brilhando (isto é, quando é "dia", na Lua). Na Terra, como você sabe, durante o dia o céu se apresenta totalmente claro. Explique a causa desta diferença.

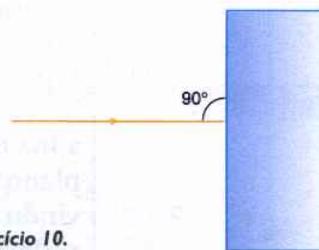
9. A figura deste exercício mostra um raio de luz incidindo em uma superfície refletora (NP é normal à superfície).
- Trace, em uma cópia da figura, a posição aproximada do raio refletido.
 - Mostre, em seu desenho, o ângulo de reflexão \hat{r} .
 - Se $\hat{i} = 32^\circ$, qual é o valor de \hat{r} ?



Exercício 9.

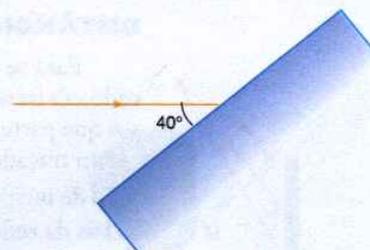
10. Considere um raio luminoso que incide sobre uma superfície refletora da maneira indicada na figura deste exercício.
- Trace, em uma cópia da figura, a normal à superfície no ponto de incidência.
 - Qual é o valor do ângulo de incidência?

- Qual será o valor do ângulo de reflexão?
- Desenhe, então, na cópia da figura, a direção do raio refletido.



Exercício 10.

11. Responda às mesmas questões do exercício anterior, considerando agora a figura deste exercício.



Exercício 11.

14.3. 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 fig. 14-14, colocado em frente a um espelho plano EE' . A luz que sai do objeto e incide no espelho é refletida. Tracemos, a partir de O , alguns raios luminosos incidentes no espelho. Usando as leis da reflexão, podemos desenhar os raios refletidos correspondentes, como foi feito na fig. 14-14, e verificamos que estes raios refletidos formam um feixe divergente. Entretanto, traçando os prolongamentos destes raios, veremos que eles passarão todos 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.

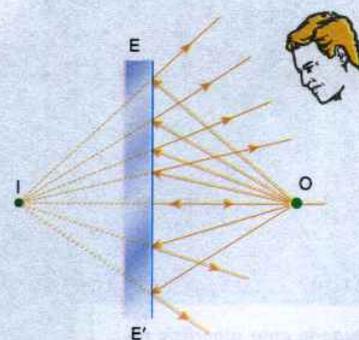


Fig. 14-14: Formação da imagem virtual de um objeto em um espelho plano.

IMAGEM VIRTUAL

Suponha um observador, situado em frente ao espelho, recebendo em seus olhos uma certa parte do feixe refletido (fig. 14-14). Este 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. É por este motivo que o observador enxerga, na-

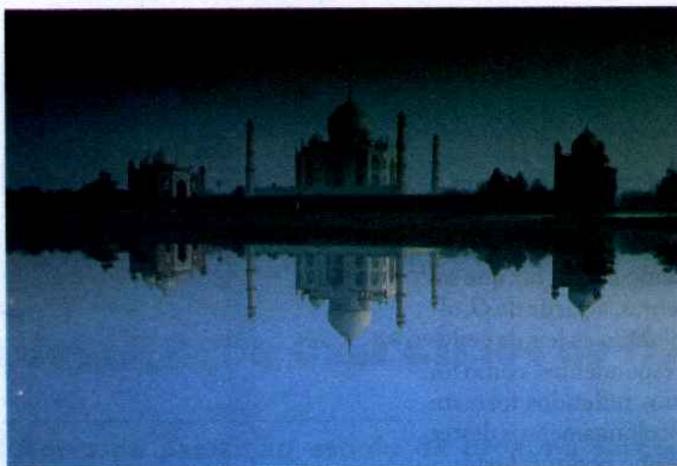
aquele ponto, uma *imagem* do objeto O . Observe que a imagem I está situada atrás do espelho, no ponto de encontro dos *prolongamentos* dos raios refletidos. Dizemos que I é uma *imagem virtual* do objeto O .

É evidente que não veremos a imagem virtual se nos localizarmos atrás do espelho. Para que ela seja vista, teremos 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. Neste ponto o observador vê uma imagem virtual do objeto (fig. 14-14).

DISTÂNCIA DA IMAGEM AO ESPELHO

Para se 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. Isto foi feito na fig. 14-15, onde foram traçados os raios incidentes OA (perpendiculares 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 estes raios refletidos.



Quando uma superfície refletora forma uma imagem virtual, tudo se passa como se os raios refletidos fossem emitidos desta imagem (por isto, é possível fotografar a imagem virtual de um objeto).

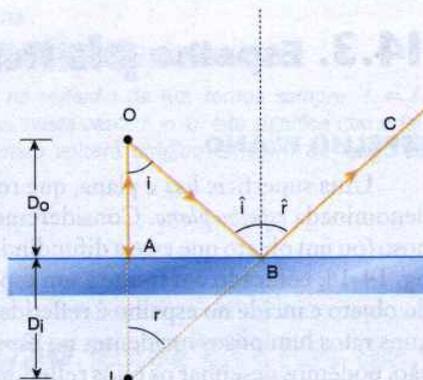


Fig. 14-15: Em um espelho plano, a distância da imagem ao espelho é igual à distância do objeto a este espelho.

Sejam D_o e D_i , respectivamente, as distâncias do objeto e da imagem até o espelho (fig. 14-15). Como $\hat{r} = \hat{i}$, concluímos facilmente 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 do objeto em relação ao espelho, isto é, ela está situada sobre a perpendicular ao espelho tirada do objeto, e as distâncias da imagem e do objeto até o espelho são iguais. Desta maneira, se você colocar uma lâmpada de lanterna a uma distância de 30 cm de um espelho plano, a sua imagem se formará atrás do espelho e também a 30 cm de distância dele.

IMAGEM DE UM OBJETO EXTENSO

Acabamos de aprender como determinar a imagem de um objeto de pequenas dimensões, ou seja, de um objeto pontual. Suponhamos, agora, que se deseje determinar a imagem de um objeto extenso, como a seta AB da fig. 14-16, situado em frente a um espelho plano. Esta imagem será obtida determinando-se a imagem de cada ponto do objeto, como já aprendemos. 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 $A'B'$ (fig. 14-16) é, então, a imagem de AB . Observe que esta imagem é do mesmo tamanho que o objeto e simétrica dele em relação ao espelho. Como o espelho plano é um objeto de nosso uso diário, estes fatos já devem ter sido observados por você.

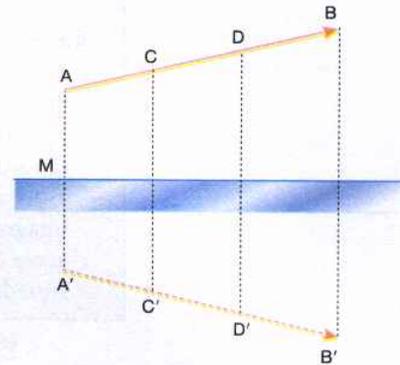


Fig. 14-16: Em um espelho plano, a imagem tem o mesmo tamanho do objeto e é simétrica dele em relação ao espelho.

Exemplo

Um objeto O e dois observadores, A e B , estão situados nas proximidades de um espelho plano, como mostra a fig. 14-17. Estes 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. Traçando-se o raio OP , que atinge a extremidade do espelho, e usando as leis da reflexão, obteremos um raio refletido PM , que passa à esquerda dos olhos de A . Qualquer outro raio que incide no espelho, como OQ , OR etc., reflete-se à esquerda de PM e, portanto, não atinge os olhos do observador A . Logo, este observador não poderá ver a imagem do objeto O .

Como o observador B está situado à esquerda do raio limite PM , é evidente, pela fig. 14-17, que haverá um feixe de luz refletida que atinge o olho deste observador. Assim, B verá a imagem de O , localizada no ponto de encontro dos prolongamentos dos raios refletidos pelo espelho.

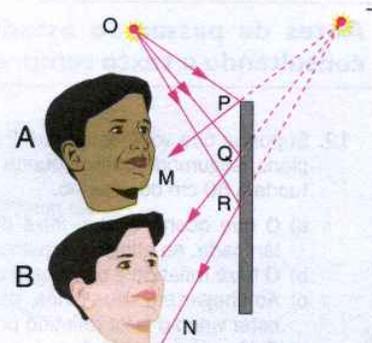


Fig. 14-17: Para o exemplo da seção 14.3.

Uma experiência simples

Para determinarmos experimentalmente algumas características da imagem fornecida por um espelho plano, vamos fazer a experiência mostrada na fig. I.

Uma vela acesa é colocada em frente a uma placa de vidro semitransparente (ou semi-escurecida), que funciona como um espelho plano, dando origem a uma imagem desta vela (situada atrás da placa). Peça a um colega para deslocar uma 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 (nesta posição, você terá a impressão de que a vela apagada está acesa).



Agostinho de Paula

Fig. I: A imagem virtual, fornecida por um espelho plano, é do mesmo tamanho que o objeto e simétrica dele em relação ao espelho.

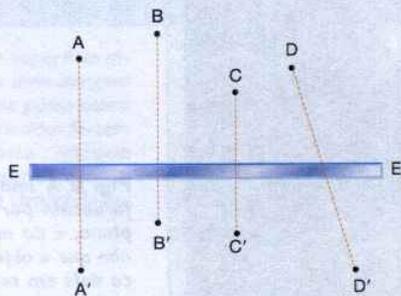
Realizando esta experiência, você poderá chegar às seguintes conclusões sobre a imagem de um objeto, fornecida por um espelho plano:

- a vela apagada coincide exatamente com a imagem da vela acesa. Logo, o tamanho da imagem é igual ao tamanho do objeto;
- um ponto qualquer da vela acesa (do objeto) e sua respectiva imagem estão situados sobre uma mesma reta perpendicular ao espelho;
- a distância do objeto (vela acesa) ao espelho é igual à distância de sua imagem (onde está a vela apagada) ao espelho. Então, na fig. I, se a vela acesa estiver, por exemplo, a 50 cm da placa (espelho), sua imagem estará situada a 50 cm atrás do espelho.

Exercícios de fixação

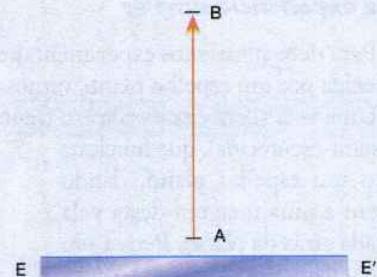
Antes de passar ao estudo da próxima seção, **responda** às questões seguintes, **consultando o texto sempre que julgar necessário**.

12. Suponha que você esteja em frente a um espelho plano, segurando uma pequena lâmpada acesa situada a 50 cm do espelho.
- O que ocorre com o feixe de luz emitido pela lâmpada, ao atingir o espelho?
 - O feixe refletido é convergente ou divergente?
 - Ao chegar em seus olhos, de que ponto parece estar vindo o feixe refletido pelo espelho?
 - Então, o que você vê neste ponto?
 - Faça uma figura ilustrando suas respostas.
13. a) Uma pessoa está situada a uma distância de 2 m de um espelho plano. Qual é a distância da pessoa à sua imagem?
b) Se a pessoa se aproximar do espelho, o tamanho de sua imagem aumentará, diminuirá ou não variará?
14. A figura deste exercício mostra um espelho plano EE' e os pares de pontos AA' , BB' , CC' e DD' . Entre estes pares de pontos, indique aqueles que podem estar representando um pequeno objeto e sua imagem.



Exercício 14.

15. Em uma cópia de cada uma das figuras deste exercício, desenhe a imagem $A'B'$ do objeto AB , fornecida pelo espelho EE' .



Exercício 15.

16. Explique, sucintamente, por que o observador A da fig. 14-17 não enxerga a imagem I do objeto O .

14.4. Espelhos esféricos

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 fig. 14-18-a, dizemos que o espelho é *côncavo*, e se a reflexão ocorrer na superfície externa (fig. 14-18-b), dizemos que o espelho é *convexo*.

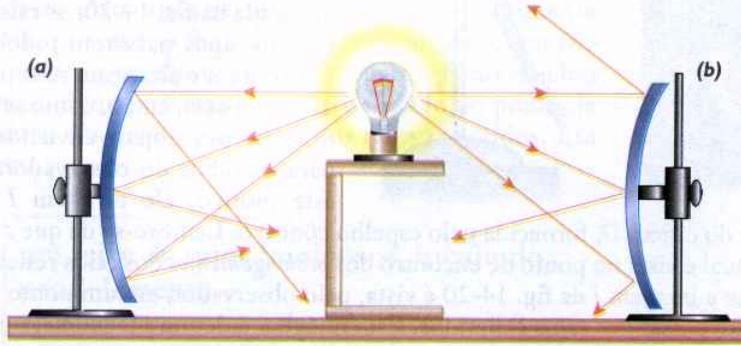


Fig. 14-18: Esquema de raios luminosos se refletindo em um espelho côncavo (a) e em um espelho convexo (b).

Alguns elementos importantes de um espelho esférico estão mostrados na fig. 14-19. São os seguintes:

- 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).

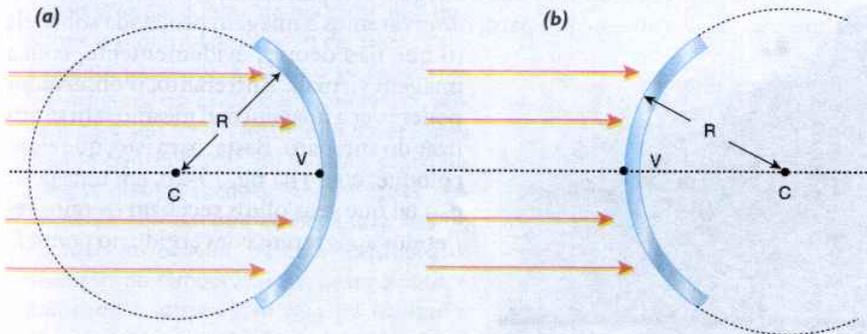


Fig. 14-19: O vértice, V , o centro de curvatura, C , e o raio, R , de um espelho côncavo (a) e de um espelho convexo (b).

IMAGEM REAL

Suponha que um pequeno objeto O seja colocado sobre o eixo do espelho côncavo, como mostra a fig. 14-20. 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 fig. 14-20). A normal ao espelho, neste 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 $\hat{r} = \hat{i}$. Re-

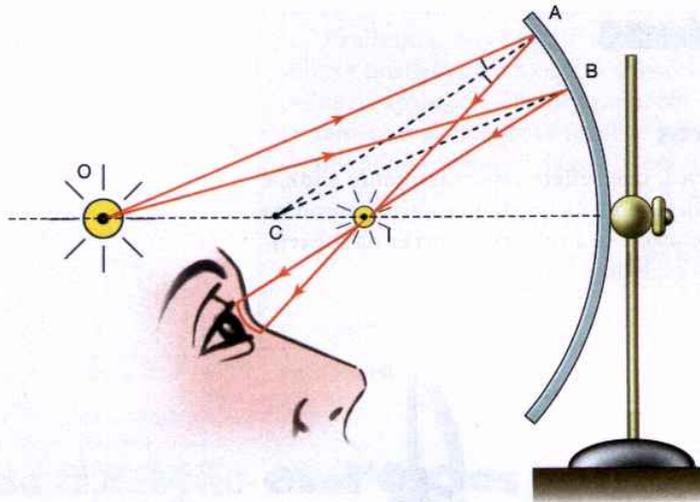


Fig. 14-20: Esquema de formação de uma imagem real (I') de um objeto (O) por um espelho côncavo.

imagem do objeto O , fornecida pelo espelho côncavo. Lembre-se de que a imagem virtual é vista no ponto de encontro dos *prolongamentos* dos raios refletidos, enquanto a imagem I' da fig. 14-20 é vista, pelo observador, em um ponto onde realmente passam os raios refletidos. Esta 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, neste ponto, a formação de uma imagem real do objeto (fig. 14-20).

Como na posição onde se forma a imagem real passam raios luminosos, se colocarmos, nesta posição, um anteparo, observaremos a imagem projetada sobre ele (o que não ocorre, evidentemente, com a imagem virtual). Entretanto, o observador poderá ver a imagem real mesmo sem se utilizar do anteparo. Basta, para isto, que ele se coloque, como na fig. 14-20, em uma posição tal que seus olhos recebam os raios refletidos após terem convergido no ponto I' .

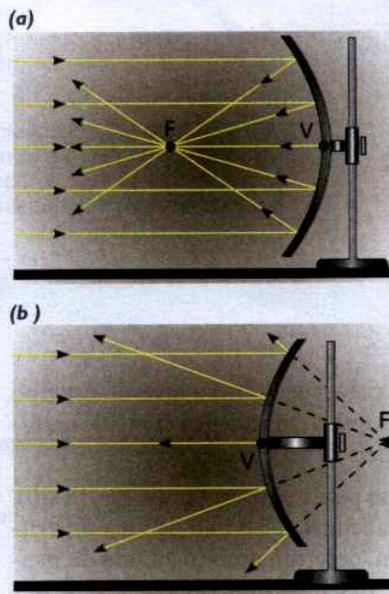


Fig. 14-21: Foco de um espelho côncavo (a) e de um espelho convexo (b).

petindo este 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 seja emitido por O e se reflita no espelho.

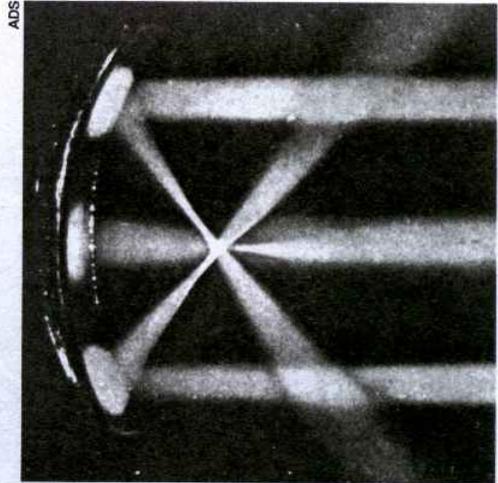
Se um observador se colocar em frente ao espelho, na posição mostrada na fig. 14-20, os raios refletidos, após passarem todos por I' , divergem e alcançam seus olhos. Tudo se passa, então, como se em I' existisse um objeto enviando luz para os olhos do observador. Por este motivo, ele *verá* em I' uma

FOCO DE UM ESPELHO

A fig. 14-21-a 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 este 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 (fig. 14-21-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 isto, o foco do espelho côncavo é um *foco real* (pode ser recebido em um anteparo). Já no espelho convexo, o foco é *virtual*, pois está situado no ponto de encontro dos prolongamentos dos raios refletidos. Em resumo,



um feixe de raios luminosos, incidindo paralelamente ao eixo de um espelho côncavo, é refletido convergindo para um foco real e, incidindo em um espelho convexo, diverge, após a reflexão, como se fosse emitido de um foco virtual (fig. 14-21).

UM GRANDE ESPELHO CÔNCAVO, construído em uma região da França onde a incidência de luz do Sol é intensa, é usado como "forno solar".

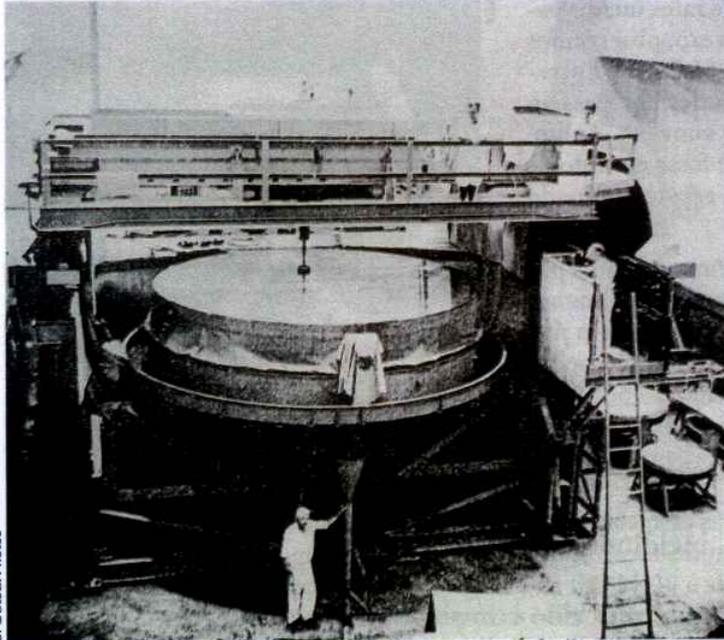
Como a distância do Sol à Terra é muito grande, o feixe de luz solar que nos atinge é sempre constituído de raios praticamente paralelos. Então, ao se refletirem no espelho, os raios desse feixe convergem para seu foco. Neste foco haverá uma grande concentração de energia, tanto luminosa quanto térmica (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 irá utilizar a energia concentrada. Se a distância focal do espelho for, por exemplo, $f = 10$ m, esse dispositivo deverá ser colocado a 10 m do vértice do espelho (sobre o foco).



Espelho convergente, construído na França, para ser usado como "forno solar".

O TELESCÓPIO E O HOLOFOTE

Os espelhos côncavos são utilizados nos 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 muito afastados da Terra, a luz que

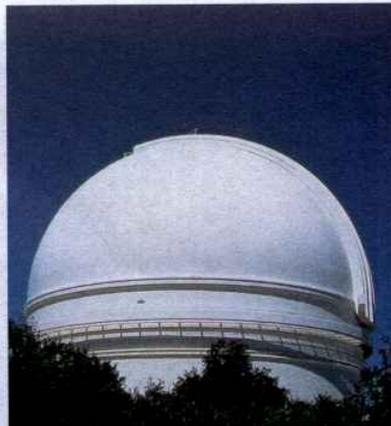


SPL/Stock Photos

O espelho côncavo do telescópio Hale em fase de construção.

o maior espelho côncavo do mundo. Este espelho, 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.

Fig. 14-22: O telescópio Hale do Observatório de Monte Palomar (Estados Unidos) utiliza um enorme espelho côncavo, com cerca de 5 m de diâmetro. Com ele, é possível fotografar objetos celestes situados a milhões de anos-luz da Terra.



Alex Bartel/SPL/Stock Photos

Vista da cúpula sob a qual foi montado o telescópio Hale, do Observatório de Monte Palomar.



Hale Observatories/SPL/Stock Photos

Galáxia fotografada com auxílio do telescópio Hale.

No início deste capítulo fizemos referência aos holofotes, apresentando-os como dispositivos capazes de nos fornecer um feixe de raios luminosos paralelos. Isto é possível porque um holofote é constituído, basicamente, de um espelho côncavo, no foco do qual se coloca uma lâmpada (fig. 14-23). Como já sabemos, 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 (fig. 14-23). O holofote permite melhor iluminação de objetos distantes porque a luz que ele emite é praticamente paralela, não se espalhando em várias direções, como acontece com a luz emitida por uma fonte luminosa comum.

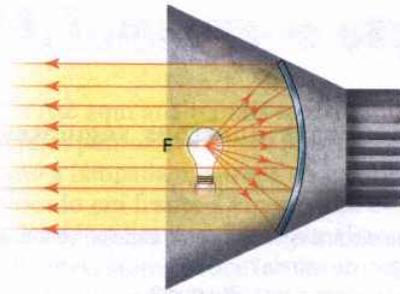


Fig. 14-23: Em um holofote, a lâmpada deve ficar no foco do espelho côncavo, para que o feixe refletido seja constituído de raios paralelos.

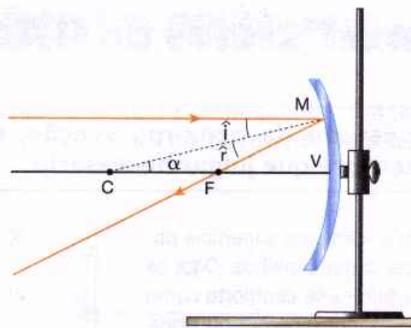


Fig. 14-24: A distância focal de um espelho esférico é igual à metade de seu raio de curvatura ($f = R/2$).

DISTÂNCIA FOCAL

Na fig. 14-21-a e b 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 isto, consideremos um raio luminoso, paralelo ao eixo de um espelho côncavo, incidindo neste espelho no ponto M (fig. 14-24).

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 ângulo \hat{r} igual ao ângulo de incidência \hat{i} . Como sabemos, o ponto em que este raio corta o eixo CV é o foco, F , do espelho. O triângulo CFM da fig. 14-24 é isósceles, porque $\hat{r} = \hat{\alpha}$ (temos $\hat{\alpha} = \hat{i}$ porque são alternos internos). Logo, $CF = FM$. A partir deste instante, vamos supor que os raios luminosos sempre incidem no espelho próximos ao seu vértice. Nestas condições, 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 $f = R/2$. Este resultado é válido, também, para um espelho convexo. Então, podemos destacar:

a distância focal, f , de um espelho esférico é 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 e o vértice deste espelho?

Sabemos que a lâmpada de um farol (holofote) deve estar situada no foco do espelho côncavo, para que saia do farol 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 , deste espelho. Mas, 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.

Exercícios de fixação

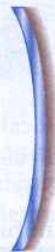
Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

17. 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:

- Superfície interna de uma colher.
- Calota de um automóvel.
- Bola de árvore de Natal.
- Espelho do farol de um automóvel.

18. A figura deste exercício mostra um espelho côncavo, de raio $R = 6,0$ cm.

- Mostre, em uma cópia da figura, a posição do vértice V do espelho.
- Desenhe o eixo do espelho.
- Indique a posição do centro, C , do espelho.
- Mostre onde está localizado o foco, F , do espelho.



Exercício 18.

19. Responda às questões do exercício anterior para o espelho convexo, de raio $R = 6,0$ cm, mostrado na figura deste exercício.



Exercício 19.



Exercício 20.



20. Considere os espelhos côncavos, I e II, mostrados na figura deste exercício.

- Para qual deles o valor do raio R é maior?
- Então, qual deles possui menor distância focal?

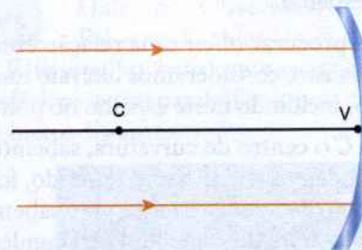
21. Suponha que o espelho côncavo de um telescópio tenha um raio $R = 5,0$ m e que esteja sendo usado para fotografar uma certa estrela.

- Como é o feixe de raios luminosos, proveniente da estrela, que chega ao telescópio?

- A que distância do vértice do espelho se forma a imagem da estrela?
- Esta imagem é real ou virtual?

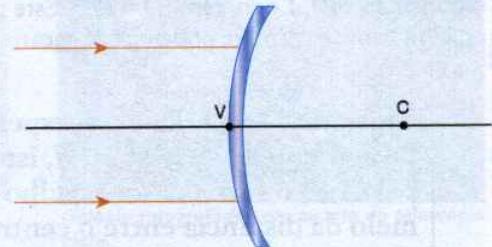
22. A figura deste exercício mostra um espelho côncavo, o seu centro C e dois raios luminosos que incidem no espelho paralelamente ao eixo CV .

- Mostre, em uma cópia da figura, onde se localiza o foco do espelho.
- Este foco é real ou virtual?
- Trace, em sua cópia do desenho, a trajetória dos raios após serem refletidos pelo espelho.
- Diga se o espelho é convergente ou divergente.



Exercício 22.

23. Responda às questões do exercício anterior para o espelho convexo mostrado na figura deste exercício.



Exercício 23.

24. Observando a fig. 14-20, responda:

- O feixe de luz, proveniente do objeto, logo após ser refletido pelo espelho, é convergente ou divergente?
- O feixe de luz que penetra no olho do observador é convergente ou divergente?
- Para o observador, tudo se passa como se o feixe que penetra em seus olhos estivesse sendo emitido de que ponto?
- Então, o que o observador vê neste ponto?

14.5. Imagem de um objeto extenso

Até aqui analisamos apenas a formação de imagens de pequenos objetos (objetos pontuais) nos espelhos esféricos. Consideremos um objeto não pontual, como a lâmpada mostrada na fig. 14-25, colocado em frente a um espelho esférico. Para localizarmos a imagem deste objeto, deveríamos procurar determinar a posição da imagem de cada um de seus pontos. Entretanto, não é difícil perceber que, localizando-se apenas a imagem da extremidade *A*, será possível visualizar a imagem de todo o objeto, como vamos mostrar nesta secção.

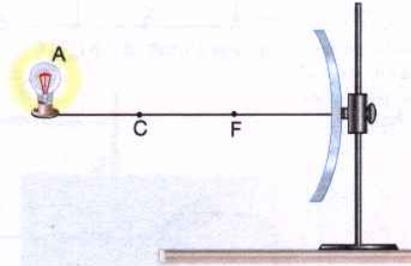


Fig. 14-25: Um objeto extenso situado em frente a um espelho côncavo.

RAIOS PRINCIPAIS

Podemos localizar, com maior facilidade, a posição da imagem de um ponto nos espelhos esféricos, fazendo uso de determinados raios luminosos, denominados *raios principais*, os quais serão apresentados a seguir:

1.º Um raio luminoso que incide em um espelho côncavo, paralelamente ao seu eixo, reflete-se passando pelo foco (fig. 14-26-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 (fig. 14-26-b).

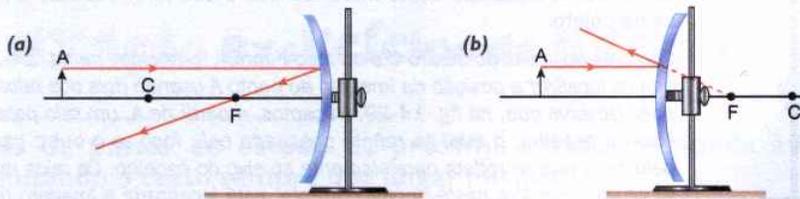


Fig. 14-26: Reflexão de um raio luminoso, que incide em um espelho côncavo e em um espelho convexo, paralelamente aos eixos destes espelhos.

2.º Um raio luminoso que incide em um espelho côncavo, passando por seu foco, reflete-se paralelamente ao eixo do espelho (fig. 14-27-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 (fig. 14-27-b).

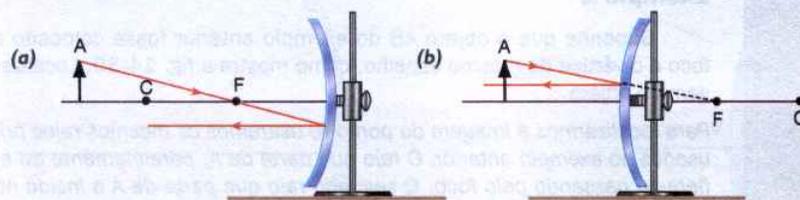


Fig. 14-27: Reflexão de um raio luminoso, que incide em um espelho côncavo e em um espelho convexo, de tal modo que sua direção passe pelo foco destes espelhos.

3.º Um raio luminoso que incide em um espelho côncavo, passando pelo seu centro de curvatura, reflete-se sobre si mesmo (este raio incide perpendicularmente ao espelho – fig. 14-28-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 (fig. 14-28-b).

Fig. 14-28: Reflexão de um raio luminoso, que incide em um espelho côncavo e em um espelho convexo, de tal modo que sua direção passe pelo centro de curvatura destes espelhos.

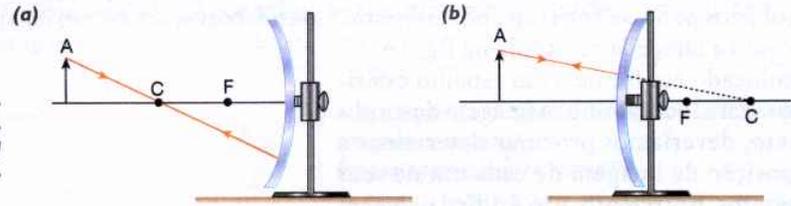
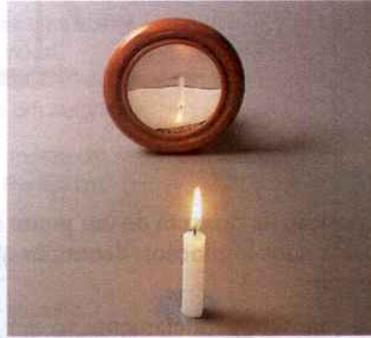


Imagem real e invertida de uma vela, colocada em frente a um espelho côncavo.



Agostinho de Paula

A partir de agora, sempre que quisermos localizar a posição da imagem de um ponto (situado fora do eixo do espelho), usaremos apenas *dois* raios principais que são emitidos pelo ponto. Nos exemplos seguintes mostraremos o uso deste método para localizar a imagem de um ponto da extremidade de um objeto extenso. Como dissemos, a localização da imagem deste ponto nos permitirá visualizar a imagem de todo o objeto.

Exemplo 1

O objeto AB da fig. 14-29 encontra-se em frente a um espelho côncavo, a uma distância deste maior do que o seu raio. Localize a imagem deste objeto.

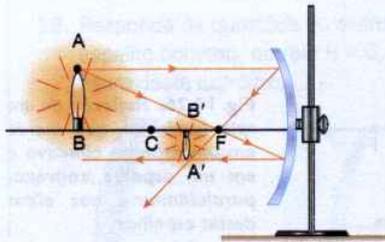


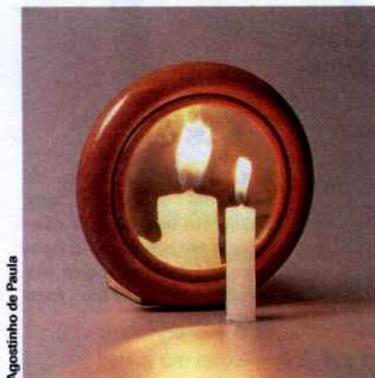
Fig. 14-29: Para o exemplo 1.

Como as posições do centro C e do foco F foram fornecidas na fig. 14-29, podemos localizar a posição da imagem do ponto A usando dois dos raios principais. Observe que, na fig. 14-29, traçamos, a partir de A , um raio paralelo ao eixo do espelho, o qual se reflete passando pelo foco, e o outro passando pelo foco, que se reflete paralelamente ao eixo do espelho. Os raios refletidos se cruzam em A' e neste 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) e, assim, fica determinada a imagem $A'B'$, como mostra a fig. 14-29. Observe que, neste caso, a imagem do objeto AB , fornecida pelo espelho côncavo, é real, menor do que o objeto e invertida em relação a ele.

Exemplo 2

Suponha que o objeto AB do exemplo anterior fosse colocado entre o foco e o vértice do mesmo espelho, como mostra a fig. 14-30. Localize a imagem do objeto.

Para localizarmos a imagem do ponto A , usaremos os mesmos raios principais usados no 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 fig. 14-30. 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, pois, a imagem



Agostinho de Paula

Imagem virtual de uma vela situada entre o foco e o vértice do espelho côncavo.

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. Pela fig. 14-30 vemos que, neste caso, o espelho côncavo fornece uma imagem virtual, maior do que o objeto e direta, isto é, não invertida em relação ao objeto.

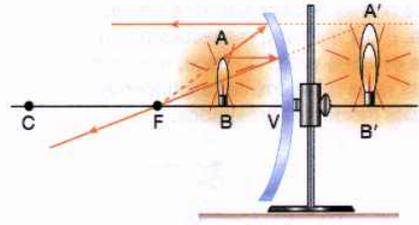


Fig. 14-30: Para o exemplo 2.

Exemplo 3

Consideremos um objeto AB diante de um espelho convexo, como mostra a fig. 14-31. Como será a sua imagem?

Tiremos, 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 que se reflete paralelamente ao eixo. Vemos, pela fig. 14-31, que, também neste caso, os raios refletidos não se cruzam, mas os seus prolongamentos se encontram em A' . É fácil perceber, então, que em $A'B'$ temos a imagem do objeto AB. Esta imagem é virtual, menor do que o objeto e direta.

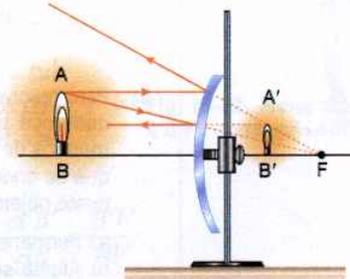


Fig. 14-31: Para o exemplo 3.



Agostinho de Paula

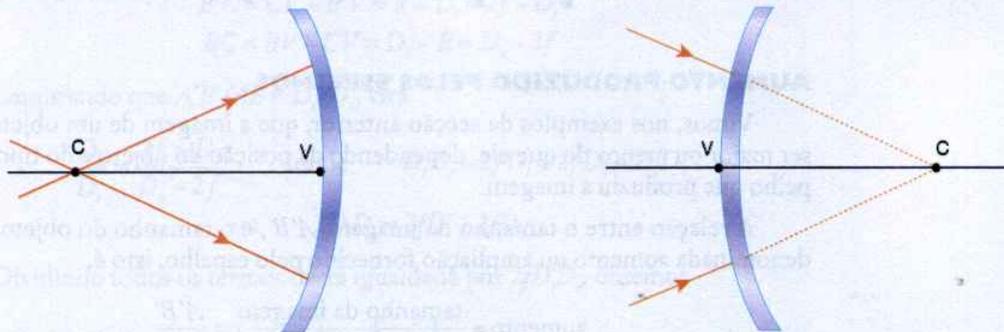
A imagem da vela, fornecida pelo espelho convexo, é virtual, direta e menor que o objeto.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

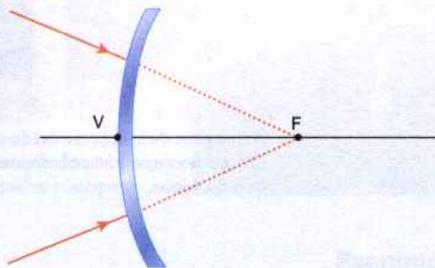
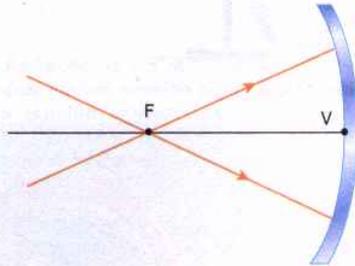
25. A figura deste exercício mostra dois espelhos, um côncavo e o outro convexo. O centro de curvatura de cada espelho está em C, e V é o vértice de cada um.

- Para cada um dos raios luminosos mostrados, qual é o valor do ângulo de incidência?
- Indique, em uma cópia da figura, a trajetória de cada um desses raios após se refletirem nos espelhos.



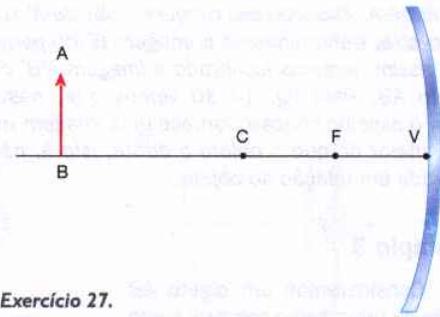
Exercício 25.

26. Considere os espelhos esféricos mostrados na figura deste exercício. F e V indicam, respectivamente, o foco e o vértice de cada espelho. Trace, em uma cópia da figura, os raios refletidos correspondentes a cada um dos raios incidentes mostrados.



Exercício 26.

27. a) Orientando-se pelos exemplos resolvidos nesta seção, faça um diagrama para localizar a imagem do objeto AB , colocado em frente a um espelho côncavo, na posição mostrada na figura deste exercício.
 b) Aproxime, do espelho, o objeto AB da questão anterior, colocando-o entre o centro e o foco. Faça um novo diagrama para localizar a imagem do objeto nesta nova posição.



Exercício 27.

28. Para resolver este exercício, observe os diagramas que você traçou no exercício anterior. Ao aproximarmos do foco de um espelho côncavo um objeto que se encontrava afastado do espelho, a imagem deste objeto:
- Permanece sempre real?
 - Afasta-se do espelho, aproxima-se dele ou permanece na mesma posição?
 - Aumenta, diminui ou permanece com o mesmo tamanho?
 - É sempre invertida em relação ao objeto?
29. Suponha que o objeto AB do exercício 27 seja colocado sobre o foco F do espelho. Nestas condições, não se formará uma imagem do objeto. Por quê?
30. Considerando, ainda, o objeto AB do exercício 27, suponha, agora, que ele seja colocado entre o foco e o vértice do espelho. Faça um diagrama para localizar a imagem do objeto para esta situação e responda:
- A imagem obtida é real ou virtual?
 - Ela é maior, menor ou do mesmo tamanho que o objeto?
 - É direta ou invertida?
 - Localize a figura desta seção cujo diagrama corresponde à situação deste exercício.

14.6. A equação dos espelhos esféricos

AUMENTO PRODUZIDO PELOS ESPELHOS

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 fornecido pelo espelho, isto é,

$$\text{aumento} = \frac{\text{tamanho da imagem}}{\text{tamanho do objeto}} = \frac{A'B'}{AB}$$

Evidentemente, um aumento menor do que 1 indica que a imagem é menor do que o objeto.

Para obter uma maneira de calcular este aumento, vamos analisar a fig. 14-32. Nesta figura, a imagem, $A'B'$, do objeto AB foi localizada usando-se o raio principal que passa pelo centro, sendo, então, refletido sobre si mesmo, e o raio AV , que incide no vértice do espelho, refletindo-se de tal modo que $\hat{i} = \hat{r}$. Desta 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. Este processo pode ser usado para calcular o aumento tanto no espelho côncavo, quanto no convexo.

A EQUAÇÃO DOS ESPELHOS ESFÉRICOS

Analisando ainda a fig. 14-32, 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 fig. 14-32, vemos que

$$B'C = CV - B'V = R - D_i = 2f - D_i$$

$$BC = BV - CV = D_o - R = D_o - 2f$$

Lembrando que $A'B'/AB = D_i/D_o$, virá

$$\frac{D_i}{D_o} = \frac{2f - D_i}{D_o - 2f} \quad \text{donde} \quad D_i D_o - 2f D_i = 2f D_o - D_i D_o$$

$$\text{ou} \quad 2D_i D_o = 2f D_i + 2f D_o$$

Dividindo todos os termos desta igualdade por $2f D_i D_o$, obtemos

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i}$$

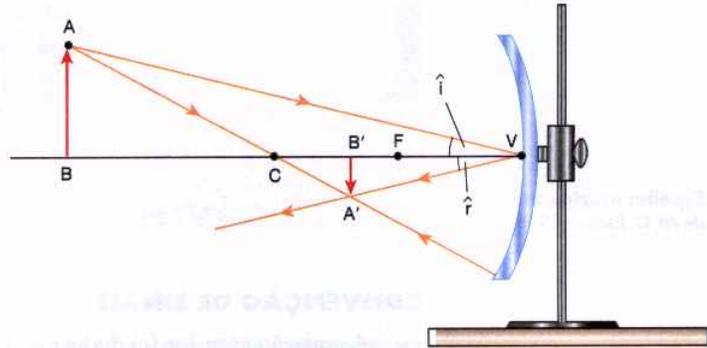
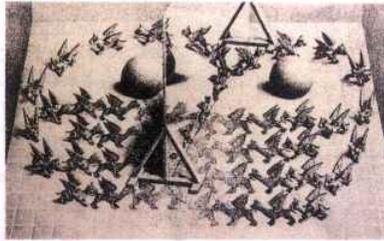


Fig. 14-32: Nesta figura, o triângulo ABV é semelhante ao triângulo $A'B'V$ e o triângulo ABC é semelhante ao triângulo $A'B'C$.



Espelho mágico, litografia de M. C. Escher, 1946.

Esta relação é denominada *equação dos espelhos esféricos*. Ela nos permite calcular a que distância do espelho se formará a imagem, quando conhecemos a distância focal do espelho e a distância do objeto a ele.

CONVENÇÃO DE SINAIS

A equação anterior foi deduzida para a situação mostrada na fig. 14-32, 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

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i}$$

Nesta 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.

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 $1/f = 1/D_o + 1/D_i$ 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 e, como se trata de um espelho côncavo, f também é positivo, ou seja, $f = 20$ cm. Então, vem

$$\frac{1}{20} = \frac{1}{10} + \frac{1}{D_i} \quad \text{donde} \quad \frac{1}{D_i} = \frac{1}{20} - \frac{1}{10}$$

$$\text{ou} \quad \frac{1}{D_i} = -\frac{1}{20} \quad \text{donde} \quad D_i = -20 \text{ cm}$$

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 fig. 14-30. Observe que o diagrama confirma os resultados que encontramos algebricamente: a imagem é virtual, direta e está situada atrás do espelho. Em problemas como este, o traçado do diagrama de formação da imagem nos ajuda a visualizar a solução algébrica e, por isto, recomendamos que ele sempre seja feito.

c) Qual o aumento produzido pelo espelho?

Como vimos, o aumento é dado por

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{D_i}{D_o} \quad \text{logo} \quad \frac{A'B'}{AB} = \frac{20}{10} \quad \text{ou} \quad \frac{A'B'}{AB} = 2$$

Este resultado significa que a imagem é duas vezes maior do que o objeto, como pode ser confirmado pela fig. 14-30. (Observe que, no cálculo do aumento, não é necessário considerar o sinal de D_r .)

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 tropas romanas. Por isso, ele contratou Arquimedes para projetar e construir dispositivos de guerra, destinados a defender e contra-atacar o inimigo.

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. A concentração da luz solar provoca uma grande elevação de temperatura e, assim, teria sido possível incendiar a esquadra inimiga.



Conta-se que Arquimedes incendiou uma esquadra romana usando espelhos côncavos para concentrar os raios solares sobre os navios.

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 $1,5 \text{ m} \times 1 \text{ m}$) dispostos em um semicírculo, de modo a fazerem convergir 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! (Veja o Tópico Especial do capítulo 7 — volume 1 —, que analisa outros aspectos da vida e obra de Arquimedes.)

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

31. Suponha que, na figura do exercício 27, 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.
- Usando a equação dos espelhos esféricos, determine a distância, D_i , da imagem ao espelho.
 - Tendo em vista o resultado encontrado na questão anterior, você conclui que a imagem é real ou virtual?
 - Calcule o aumento fornecido pelo espelho. Qual o significado deste resultado?
 - Os resultados que você encontrou neste exercício estão de acordo com o diagrama traçado no exercício 27-a?
32. Responda às questões (a), (b) e (c) do exercício anterior supondo, agora, que o objeto tenha sido colocado à distância $D_o = 15$ cm do vértice do mesmo espelho. Verifique se suas respostas concordam qualitativamente com o diagrama que você traçou no exercício 27-b.
33. Em frente a um espelho côncavo, de distância focal f , é colocado um objeto, exatamente sobre o centro de curvatura, C , do espelho (isto é, $D_o = 2f$).
- Usando a equação dos espelhos esféricos, determine o valor de D_i em função de f .
 - Então, em que posição está localizada a imagem?
 - A imagem é real ou virtual?
 - Qual é, neste caso, o valor do aumento? O que significa este resultado?
34. a) Trace o diagrama para obter a imagem na situação mencionada no exercício anterior e verifique se ele concorda com as respostas que você encontrou.
b) A imagem obtida é direta ou invertida?
35. Um objeto é colocado a uma distância de 36 cm do vértice de um espelho convexo, cuja distância focal vale 12 cm.
- Usando a equação dos espelhos esféricos (lembre-se da convenção de sinais), determine D_i .
 - Tendo em vista o resultado encontrado na questão anterior, você conclui que a imagem é real ou virtual?
 - Calcule o aumento fornecido pelo espelho.
 - Então, se o tamanho do objeto é $AB = 4$ cm, qual é o tamanho, $A'B'$, da imagem?
36. Trace o diagrama de formação da imagem na situação correspondente ao exercício anterior. Verifique se ele está em concordância com os resultados que você encontrou.

um tópico especial para você aprender um pouco mais

14.7. 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. Esta crença foi duramente criticada por Galileu, que julgava falhos os argumentos apresentados pelos defensores daquela idéia.

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 colocarem, ele e um assistente, sobre duas colinas distanciadas de cerca de 2 km, cada um munido de uma lanterna (fig. 14-33). Galileu descobria sua lanterna e seu assistente, ao perceber a luz enviada por ela, descobria sua própria lanterna. Então, Galileu tentava me-

dir 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. Evidentemente, conhecendo este tempo e a distância entre as duas colinas, ele poderia determinar o valor da velocidade da luz.

Apesar de, em princípio, estar correto o método empregado por Galileu, ele não obteve êxito em sua experiência. Como sabemos atualmente, a velocidade da luz é muito grande ($c = 300\,000\text{ km/s}$) e, assim, na experiência de Galileu, a luz gastava cerca de 10^{-5} s para efetuar o percurso de ida e volta entre as duas colinas. Este tempo, extremamente pequeno, era impossível de ser medido com os aparelhos de que dispunha Galileu, sendo esta a causa do fracasso de sua experiência.

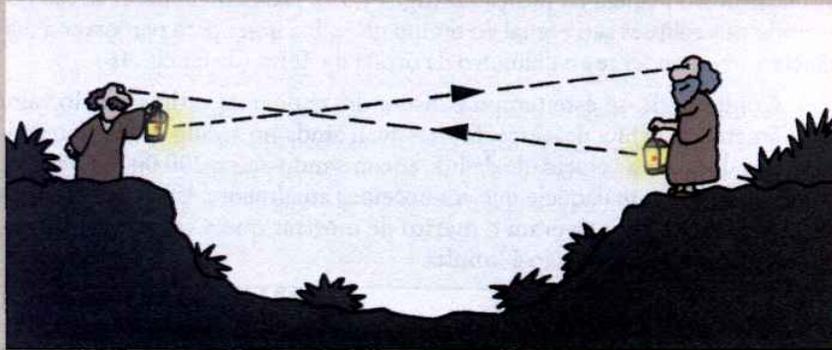


Fig. 14-33: Galileu tentou medir o valor da velocidade da luz, mas não foi bem-sucedido.

A VELOCIDADE DA LUZ NÃO É INFINITA

A primeira evidência de que a luz não se propaga instantaneamente foi obtida através das observações do astrônomo dinamarquês, Ole Roemer, alguns anos após a morte de Galileu.

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. Estas 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 Copenhagen.

ADS



Roemer, observando o movimento de um dos satélites de Júpiter em torno deste planeta, verificou que periodicamente ele se ocultava atrás de Júpiter, isto é, o satélite era eclipsado pelo planeta. Mediu, então, o intervalo de tempo entre dois eclipses sucessivos, verificando que era igual a 42,5 h. Suponha que quando a Terra se encontrava na posição *A* da fig. 14-34 (mais próxima de Júpiter) Roemer tenha determinado a hora exata em que ocorreu um destes eclipses. Sabendo que o eclipse seguinte ocorreria 42,5 h mais tarde e assim sucessivamente, ele organizou uma tabela de horários dos eclipses que ocorreriam durante o ano inteiro.

Fig. 14-34: Diagrama que mostra a posição da Terra e de Júpiter durante um eclipse de um dos satélites de Júpiter.

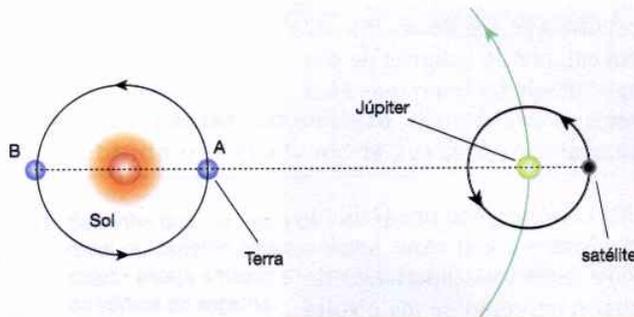


Fig. 14-34: A luz proveniente do satélite de Júpiter gasta mais tempo para alcançar a Terra, quando ela está na posição B, do que quando ela está na posição A.

desloca-se muito pouco, permanecendo praticamente na mesma posição em sua órbita. Então, a luz proveniente do satélite tem de percorrer uma certa distância para chegar à Terra na posição A e uma distância adicional, AB , para alcançar nosso planeta na posição B (fig. 14-34). Desta maneira, o atraso observado nos eclipses seria igual ao tempo que a luz gasta para percorrer a distância correspondente ao diâmetro da órbita da Terra (distância AB).

Conhecendo-se este tempo e dispondo-se de uma estimativa do valor do diâmetro da órbita da Terra, foi possível, ainda no século XVII, determinar um valor para a velocidade da luz, encontrando-se $c = 200\,000$ km/s. Este valor difere bastante daquele que conhecemos atualmente. Entretanto, as observações de Roemer tiveram o mérito de mostrar que a velocidade da luz, apesar de muito grande, não é infinita.



Louis Fizeau (1819-1896)

Físico francês cujo trabalho mais notável consistiu em determinar, com boa precisão, o valor da velocidade da luz, realizando experiências na superfície da Terra (não astronômicas). Desenvolveu diversos trabalhos sobre o calor e a luz, sendo o primeiro a interpretar corretamente o efeito Doppler observado com a luz proveniente de estrelas. Em 1860 tornou-se membro da Academia Francesa de Ciências e foi indicado, em 1863, para professor de Física na Escola Politécnica de Paris.

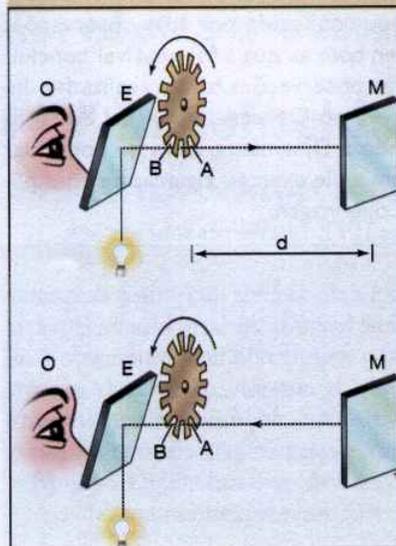


Fig. 14-35: Esquema do dispositivo usado por Fizeau para medir a velocidade da luz.

A EXPERIÊNCIA DO FÍSICO FRANCÊS L. FIZEAU

No século XIX, o físico francês Fizeau conseguiu medir a velocidade da luz com bastante precisão, fazendo um feixe luminoso percorrer uma distância relativamente pequena (cerca de 16 km) sobre a superfície da Terra. Para isto, ele usou o dispositivo mostrado na fig. 14-35, que lhe permitiu medir o intervalo de tempo muito pequeno que a luz gastou para percorrer esta distância.

Fizeau fez um feixe de luz incidir sobre uma lâmina de vidro E (fig. 14-35) na qual ele era parcialmente refletido, sendo dirigido para um espelho distante M , após

passar no intervalo A entre os dentes de uma roda dentada em rotação. A velocidade desta roda era ajustada de tal maneira que o feixe de luz, após se refletir em M , voltava à roda dentada, passando exatamente pelo intervalo B (consecutivo de A e ocupando, neste instante, a posição antes ocupada por A), sendo então recebido pelo observador O . Assim, o tempo que a luz gastava para efetuar o percurso de ida e volta, entre a roda e o espelho M , era igual ao tempo, t , que a roda gastava para girar de um ângulo correspondente à distância entre dois intervalos consecutivos (arco AB).

Conhecendo o número de rotações que a roda efetuava por segundo e o número de dentes que ela possuía, Fizeau obteve facilmente o valor de t . Como a distância d entre a roda e o espelho M era conhecida, foi possível obter o valor da velocidade da luz pela relação $c = 2d/t$. Em 1849, Fizeau divulgou os resultados de suas experiências, apresentando o valor $c = 3,13 \times 10^8$ m/s.

OS TRABALHOS DE FOUCAULT E MICHELSON

Outro cientista francês, Foucault, aprimorou substancialmente o método usado por Fizeau, substituindo a roda dentada por um sistema de espelhos em rotação. Com este processo, ele conseguiu realizar medidas bem mais precisas do que aquelas feitas por Fizeau. Já em 1862 Foucault obtinha, para a velocidade da luz, o valor $c = 2,98 \times 10^8$ m/s, bastante próximo do valor que hoje se conhece.

Leon Foucault (1819-1868)

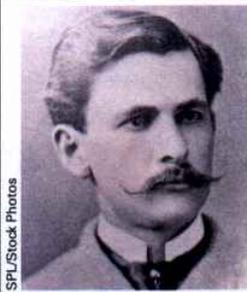
Cientista francês que, tendo sido educado inicialmente para ser médico, acabou tornando-se um físico experimental de grande habilidade. Trabalhou com Fizeau, desenvolvendo técnicas de grande precisão para a medida da velocidade da luz. Um de seus trabalhos mais conhecidos é aquele realizado com um pêndulo, no Panteon de Paris, demonstrando experimentalmente a rotação da Terra em torno de seu eixo (pêndulo de Foucault). Por este trabalho, ele recebeu um prêmio da Real Academia de Ciências de Londres, sendo designado físico do Observatório Imperial de Paris.



SPU/Stock Photos

Outro resultado muito importante foi obtido por Foucault: usando seu método dos espelhos girantes, ele conseguiu medir a velocidade da luz fazendo-a percorrer distâncias muito menores do que as usadas por Fizeau. Desta maneira, foi possível, pela primeira vez, medir o valor da velocidade da luz em meios materiais. Foucault, fazendo um feixe de luz propagar-se na água, verificou que a luz se desloca neste líquido com uma velocidade $v = 2,23 \times 10^8$ m/s, valor este, portanto, inferior a c . Este resultado causou um enorme impacto na época, pois muitos cientistas (adeptos das idéias sobre a natureza da luz lançadas por Newton muitos anos antes) acreditavam que a luz se propagava, nos meios materiais, com velocidade maior do que no vácuo.

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 este objetivo. O resultado das últimas medidas realizadas por Michelson, $c = 2,9977 \times 10^8$ m/s, publicado em 1932, mostra a grande precisão alcançada por ele em suas experiências.



SPU/Stock Photos

Albert Michelson (1852-1931)

Formado em Física pela Academia Naval dos Estados Unidos, em 1873; foi professor de Ciências de 1875 a 1879. Durante os dois anos seguintes especializou-se, na Europa, em métodos de medidas óticas de alta precisão, com a finalidade de obter medidas rigorosas para a velocidade da luz. As experiências que ele realizou, juntamente com seu colega E. Morley, além de fornecerem valores altamente precisos para a velocidade da luz, serviram de base para o estabelecimento da Teoria da Relatividade, proposta por Einstein em 1905. Recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1907.

Graças à continuidade destes 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 desta grandeza, os físicos chegaram à conclusão de que, atualmente, o melhor valor para representar a velocidade da luz é:

$$c = 2,997925 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Estes números são fornecidos a título de ilustração e 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 $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$.

AS ENORMES DIMENSÕES DO UNIVERSO

A velocidade da luz é usada na definição de uma unidade de comprimento, denominada 1 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 (esta distância vale cerca de 10^{13} km!).

Para que você tenha uma idéia das enormes dimensões do Universo conhecido pelo homem, apresentaremos, a seguir, alguns exemplos de distâncias entre corpos celestes, expressando-as em anos-luz e procurando interpretar o seu significado.

Assim, a distância que nos separa da estrela visível a olho nu, mais próxima de nós (alfa do Centauro), é de 4,2 anos-luz. Isto significa que a luz enviada por esta estrela gasta 4,2 anos para chegar à Terra. Em outras palavras, quando observamos esta estrela, estamos realmente vendo-a como ela era há 4,2 anos atrás. Então, se uma nave espacial partisse da Terra, em direção à alfa do Centauro, e pudesse desenvolver uma velocidade igual à da luz (a máxima velocidade que, de acordo com a Teoria da Relatividade, poderia ser alcançada por um corpo material), ela somente chegaria ao seu destino após ter viajado durante mais de 4 anos (a título de comparação, informamos que a luz do Sol gasta cerca de 8 minutos para chegar à Terra).

Os astrônomos verificaram que as estrelas encontram-se, no espaço, agrupadas em enormes aglomerações, denominadas *galáxias*, constituídas, cada uma, por bilhões e bilhões de estrelas. O nosso sistema solar, por exemplo, pertence a uma galáxia, denominada Via-láctea (veja a fig. 14-36), cujo diâmetro vale cerca de 100 000 anos-luz. O Sol está situado a 30 000 anos-luz do centro da Via-láctea.

O número de galáxias já observadas no Universo é muito grande. Entre elas, uma das mais próximas da Via-láctea é a galáxia (ou nebulosa) de Andrômeda,

que se encontra a uma distância de 2 milhões de anos-luz (fig. 14-36). Portanto, quando ocorre uma explosão em alguma estrela desta galáxia, somente após 2 milhões de anos este fato será percebido aqui na Terra.

Outras galáxias encontram-se muito mais afastadas de nós, já tendo sido detectados corpos celestes a distâncias de centenas de milhões de anos-luz.

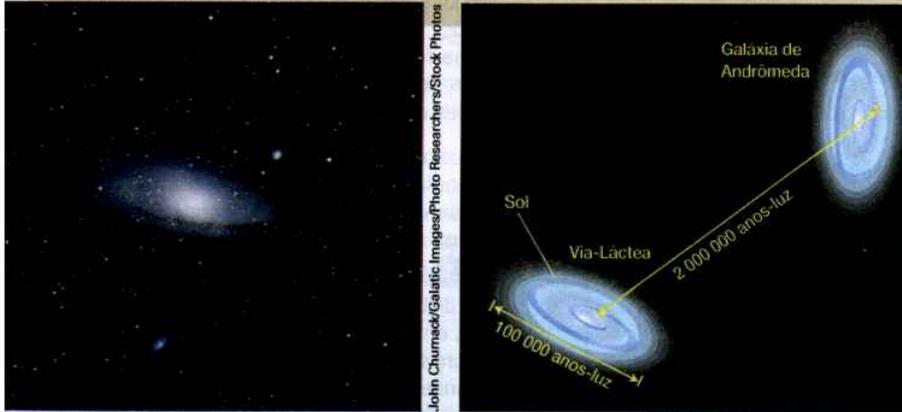


Foto da galáxia de Andrômeda, a galáxia mais próxima da Terra.

Fig. 14-36: Ilustração esquemática. A galáxia mais próxima de nós está situada a uma distância de 2 milhões de anos-luz, isto é, a luz emitida por esta galáxia gasta 2 milhões de anos para chegar à Terra.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima secção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

37. a) Calcule, com dois algarismos significativos, o valor do intervalo de tempo que Galileu tentou medir na experiência mostrada na fig. 14-33 (apresente sua resposta em microssegundos = μs).
b) O menor intervalo de tempo que os cientistas já conseguiram medir é da ordem de 10^{-23} s, que corresponde ao tempo que a luz gasta para percorrer o diâmetro do próton. Calcule a ordem de grandeza deste diâmetro.
38. Como vimos, Roemer observou que, quando a Terra se deslocava da posição A para a posição B, representadas na fig. 14-34, havia um atraso de vários minutos na observação de um eclipse de um satélite de Júpiter.
 - a) Este atraso era devido ao tempo que a luz gasta para percorrer o diâmetro do Sol, da Terra, ou da órbita da Terra?
 - b) Consultando a tabela no final deste volume e lembrando que $c = 3,00 \times 10^8$ m/s, determine, em minutos, o valor deste atraso.
39. Suponha que, na experiência de Fizeau, representada na fig. 14-35, a distância entre a roda dentada e o espelho M fosse $d = 9,0$ km. Considerando que a roda possuísse 500 dentes, bem próximos uns dos outros e que sua rotação tivesse sido ajustada da maneira descrita no texto, determine:
 - a) O tempo que cada dente gastaria para passar diante do olho do observador.
 - b) O período do movimento da roda.
 - c) O número de rotações por minuto (rpm) efetuadas pela roda.
40. Calcule a diferença percentual entre o valor obtido por Fizeau para a velocidade da luz e o valor $c = 3,00 \times 10^8$ m/s, obtido em medidas mais precisas realizadas posteriormente.
41. a) Foucault encontrou para a velocidade da luz na água um valor maior, menor ou igual a c ?
b) Por que este resultado provocou um grande impacto entre os físicos da época?
42. 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 este fato? (Veja a pequena biografia de Michelson apresentada.)
43. Pode-se definir, de maneira semelhante ao ano-luz, outras unidades de distância tais como 1 hora-luz, 1 minuto-luz etc.
 - a) Qual é, em minutos-luz, a distância da Terra ao Sol?

- b) Sabendo-se que a distância de Netuno ao Sol é de 30 u.a., expresse essa distância em horas-luz. (1 u.a. = 1 unidade astronômica = distância da Terra ao Sol.)
- c) Quanto tempo a luz do Sol gasta para chegar a Netuno?
44. O raio da órbita de Júpiter, em torno do Sol, é de 5,2 u.a. Considere Júpiter ao passar por sua posição mais próxima da Terra. Nestas condições:
- a) Qual é, em minutos-luz, a distância entre a Terra e Júpiter?
- b) Ocorrendo uma explosão luminosa em Júpiter, depois de quanto tempo ela será percebida na Terra?
45. A galáxia Andrômeda se encontra a 2 milhões de anos-luz da Terra. Todas as alternativas apresentam conclusões corretas a partir dessa informação, exceto:
- 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 foto de Andrômeda, hoje, forneceria informações sobre como era a galáxia há 2 milhões de anos.
46. 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 por extenso (com palavras) a ordem de grandeza do tempo que a luz de um quasar gasta para chegar à Terra.

Revisão Revisão Revisão Revisão Revisão Revisão

As questões seguintes foram formuladas para que você faça uma revisão dos pontos mais importantes abordados neste capítulo. Ao respondê-las, volte ao texto sempre que tiver dúvidas.

- a) Lembrando-se da propagação retilínea da luz, faça um desenho mostrando como podemos localizar, sobre um anteparo, a sombra de um objeto opaco, iluminado por uma pequena fonte de luz.

b) O que você entende por raio luminoso?

c) Desenhe feixes luminosos constituídos por:

 - raios divergentes
 - raios convergentes
 - raios paralelos

d) No texto foram citadas duas maneiras para se obter um feixe de raios paralelos. Quais são elas?

e) Explique em que consiste a *independência de propagação dos raios luminosos*.
- a) Qual é o valor da velocidade de propagação da luz no vácuo?

b) A velocidade de propagação da luz em um meio material qualquer é maior, menor ou igual à sua velocidade no vácuo?
- a) Explique, com suas palavras, o que é a *reflexão* da luz.

b) Quando dizemos que a reflexão é *especular*? Dê exemplos.

c) O que é *difusão* da luz? Dê exemplos.
- Enuncie as duas leis da reflexão. Faça um desenho para ilustrar sua resposta.
- a) Um pequeno objeto encontra-se em frente a um espelho plano. Explique como e por que se forma uma imagem deste objeto. Ilustre sua explicação com um diagrama.

b) Descreva as características da imagem de um objeto extenso, colocado em frente a um espelho plano.
- a) Faça um diagrama mostrando um espelho côncavo, seu vértice, seu centro de curvatura e seu eixo. Faça o mesmo para um espelho convexo.

b) Mostre, por meio de um diagrama, como se forma a imagem real de uma pequena lâmpada, colocada sobre o eixo de um espelho côncavo.
- a) O que é foco de um espelho côncavo? E de um espelho convexo? Qual deles é real e qual é virtual?

b) Como se relacionam a distância focal de um espelho esférico e o seu raio?

8. a) Por meio de diagramas, mostre como os raios, denominados *raios principais*, refletem-se ao incidirem em um espelho côncavo.
b) Faça o mesmo para um espelho convexo.
9. Analise atentamente os exemplos apresentados na seção 14.5, procurando compreender como foram usados dois raios principais para localizar a imagem de um objeto em espelhos esféricos.
10. a) Como se define o *aumento* fornecido por um espelho?
b) Em um espelho esférico, como podemos calcular o aumento se conhecemos os valores de D_i e D_o ?
c) Escreva a equação dos espelhos esféricos. Explique o significado de cada símbolo que aparece nesta equação.
d) Qual a convenção de sinais que devemos adotar para que a equação dos espelhos esféricos seja válida tanto para os espelhos côncavos quanto para os convexos, quer a imagem seja real, quer seja virtual?

algumas experiências simples

Para você fazer

Primeira experiência

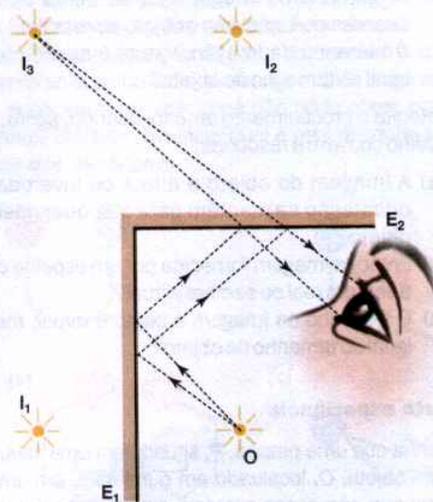
- 1º) Tome um lápis ou uma caneta e desloque lentamente sua ponta em direção a uma superfície metálica plana e bem-polida (fechadura, tesoura etc.), observando a imagem da ponta fornecida pela superfície. Quando a ponta encostar na superfície, observe qual é a distância entre ela e sua imagem.
- 2º) 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 uma espessura de 2 mm, qual será a distância entre a imagem e a ponta quando esta estiver encostada no espelho?

Segunda experiência

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. Como sabemos, 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 estes raios, após sofrerem 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).



Segunda experiência.

- 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 imagens 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, verificando que sua montagem é muito simples, você poderá construir um para observar as belas e interessantes figuras que neles se formam.

Terceira experiência

Nesta experiência, vamos observar algumas características das imagens fornecidas pelos espelhos côncavos e convexos. Se não conseguir obter estes tipos de espelhos, você poderá usar uma colher bem-polida, utilizando sua face interna como espelho côncavo e a face externa como espelho convexo.

1º) Coloque um objeto (uma caneta ou lápis, por exemplo) a uma distância relativamente grande de um espelho côncavo. Aproxime lentamente o objeto até que ele encoste no espelho. Observe continuamente a imagem fornecida por ele e descreva suas observações, respondendo:

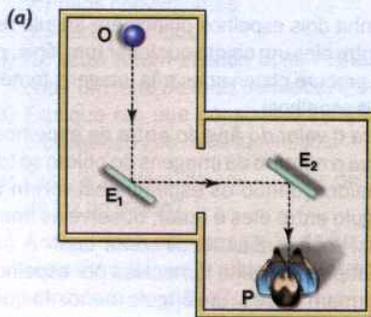
- Quando o objeto está afastado, a imagem é direta ou invertida? E quando o objeto está muito próximo do espelho?
- Então, inicialmente, você observa uma imagem real ou virtual? E na segunda situação?
- O tamanho da imagem real aumenta ou diminui quando você aproxima o objeto do espelho?
- O tamanho da imagem virtual é maior, menor ou igual ao tamanho do objeto?

2º) Repita o procedimento anterior usando, agora, um espelho convexo e responda:

- A imagem do objeto é direta ou invertida? Esta orientação se mantém para qualquer posição do objeto?
- Então, a imagem fornecida por um espelho convexo é sempre real ou sempre virtual?
- O tamanho da imagem é sempre maior, menor ou igual ao tamanho do objeto?

Quarta experiência

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) desta experiência). Ela conseguirá seu intento usando dois espelhos planos, E_1 e E_2 , dispostos da maneira mostrada na figura (a).



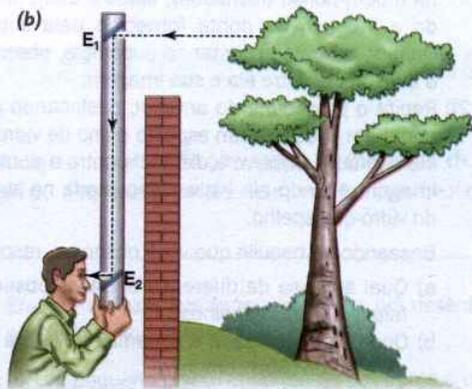
Quarta experiência.

- 1º) Tente reproduzir a situação descrita: escolha um objeto O de uma sala e disponha dois espelhos planos, E_1 e E_2 , da maneira indicada na figura (quanto maior for o

tamanho dos espelhos, maior facilidade você encontrará para realizar suas observações). Colocando-se na posição P , você poderá observar a imagem final fornecida por E_2 (o espelho E_1 forma uma primeira imagem de O e esta funciona como um objeto para E_2). Responda:

- A imagem que você vê em E_2 é real ou virtual?
 - Ela apresenta inversão da direita com a esquerda, como acontece em um espelho plano qualquer?
- 2º) A formação da imagem, por reflexão em dois espelhos, que você observou na primeira parte desta experiência, é utilizada na construção dos periscópios que, como você sabe, são amplamente empregados nos submarinos, quando submersos, para observar objetos na superfície da água.

Na figura (b) desta experiência mostramos o esquema de um periscópio muito 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.



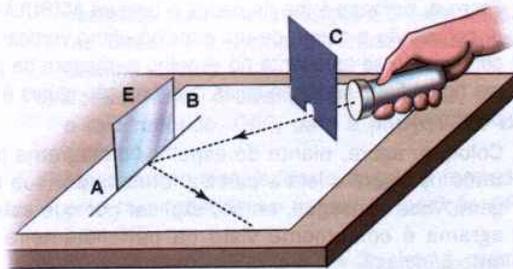
Quarta experiência.

Quinta experiência

Como foi visto neste capítulo, uma das leis da reflexão nos diz que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão. A seguir, vamos procurar verificar experimentalmente esta lei.

- 1º) Coloque um cartão opaco C , no qual foi feita uma fenda bem estreita, sobre uma folha de papel branco, como mostra a figura desta experiência. Dispondo uma lanterna acesa atrás do cartão, da maneira indicada, um estreito feixe luminoso passará através da fenda. A trajetória desse feixe torna-se visível sobre a folha de papel e poderá ser considerada praticamente como um raio luminoso. Procure realizar a experiência em um local escurecido (para tornar o raio luminoso mais visível) e, movimentando a lanterna e o cartão, tente obter um feixe o mais estreito possível e bem nítido.

- 2º) Trace, no papel, uma linha AB e coloque, sobre ela, um pequeno espelho plano E (veja a figura). Faça o feixe que você obteve incidir sobre o espelho (raio incidente) e observe, sobre a folha, o raio refletido correspondente. Usando um lápis, marque cuidadosamente, na folha de papel, as direções dos raios incidente e refletido.
- 3º) Desfazendo a montagem, tome a folha de papel e trace a normal à linha AB no ponto de incidência do raio luminoso. Usando o transferidor, meça, com cuidado, o ângulo de incidência, \hat{i} , e o ângulo de reflexão, \hat{r} .
- 4º) Repita a experiência usando outros valores para o ângulo de incidência. Os resultados que você obteve confirmam, com razoável aproximação, que $\hat{i} = \hat{r}$?



Quinta experiência.

Sexta experiência

As fases da Lua foram analisadas na solução do problema 29 deste capítulo. Nesta experiência você irá usar um modelo simples para perceber melhor como ocorrem aquelas fases. Para representar a Lua, tome uma bola branca (de voleibol, por exemplo) em suas mãos e leve-a para uma sala escurecida, onde apenas uma janela esteja aberta.

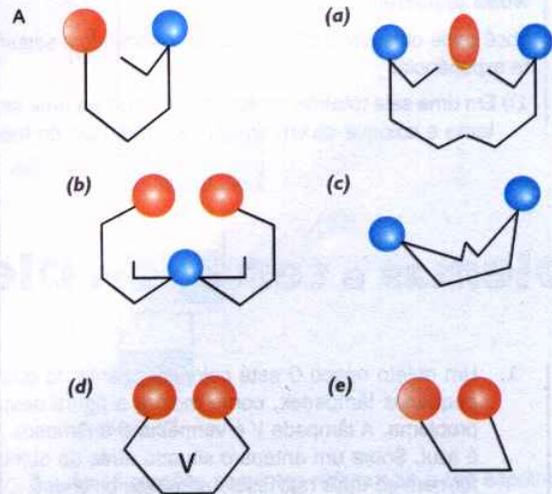
- 1º) Segure a bola no nível de seus olhos e volte-se para a janela, como mostra a figura desta experiência. Observe a parte escura da bola que, nesta posição, estará correspondendo à Lua em situação de "lua nova".
- 2º) Gire seu corpo e a bola para a esquerda e pare quando seu lado estiver voltado para a janela. Observe a parte iluminada da bola que corresponde à situação da Lua em "quarto crescente".
- 3º) Continuando a girar, efetue um quarto de volta. Observe agora a bola na posição correspondente à "lua cheia".
- 4º) Dê mais um quarto de volta e você verá a situação correspondente ao "quarto minguante". Procure observar a Lua, no céu, durante um período aproximado de um mês, identificando as diversas fases percebidas com este modelo.



Sexta experiência.

Sétima experiência

Observe a figura desta experiência e analise o desenho A e os demais, de (a) até (e). Tome um espelho plano colocando-o convenientemente sobre o desenho A (perpendicularmente à folha de papel), tente obter configurações semelhantes a cada um dos desenhos apresentados de (a) até (e). (Observe a junção da parte do desenho A que fica em frente ao espelho, com sua imagem.) Há um dos desenhos, entre (a) e (e), que você não pode obter, por mais que tente. Procure identificar qual é este desenho e explique por que isto ocorre.

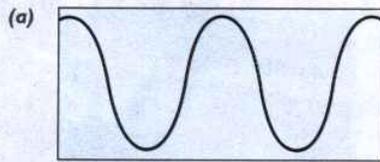


Sétima experiência.

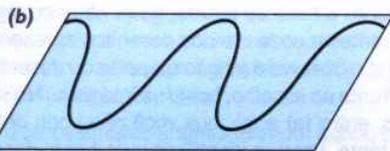
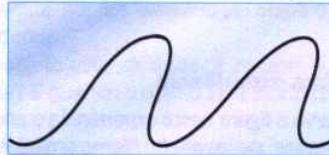
Oitava experiência

Procure verificar a habilidade de uma pessoa de entender a formação da imagem em um espelho plano, desafiando-a a realizar a seguinte atividade: desenhe uma figura qualquer, como uma senóide, por exemplo (fig. (a)), em uma folha de papel e coloque-a em frente a um espelho plano vertical, não muito pequeno (fig. (b)). Cubra o desenho com um livro disposto paralelamente ao espelho (verticalmente) e coloque a pessoa atrás do livro, de modo que ela veja a imagem fornecida pelo espelho, mas não enxergue o próprio desenho. Peça à pessoa para tentar

recobrir este desenho com um lápis (de preferência de cor diferente da usada na senóide), observando apenas sua imagem. De maneira geral, as pessoas têm grande dificuldade na realização desta tarefa.



Espelho



Oitava experiência.

Nona experiência

Você pode observar a difusão da luz, realizando a seguinte experiência:

1º) Em uma sala totalmente escurecida, acenda uma lanterna e coloque-se em uma posição ao lado do feixe

luminoso que ela emite. Observe que, apesar do feixe de luz estar passando diante de seus olhos, você não conseguirá vê-lo, porque não há nenhum raio luminoso desse feixe atingindo diretamente seus olhos.

2º) No mesmo ambiente da situação anterior, peça a um colega para espalhar um pouco de talco (ou pó de giz) na região onde passa a luz. As pequenas partículas do pó espalhado *difundem* a luz (refletem a luz em todas as direções) e, assim, você passará a enxergar a trajetória do feixe. Isto ocorre porque agora seus olhos estão recebendo luz proveniente de vários pontos do feixe luminoso (a fumaça ou a poeira também *difundem* a luz, produzindo o mesmo efeito do talco).

Décima experiência

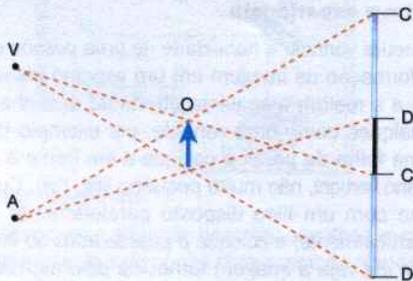
Escreva, em uma folha de papel, a palavra AMBULÂNCIA e, colocando-a diante de um espelho plano vertical, observe como se apresenta no espelho a imagem da palavra (identifique as letras cujas imagens são iguais à própria letra).

Coloque, agora, diante do espelho, o diagrama mostrado na figura e leia a palavra formada por sua imagem. Você consegue, então, explicar por que este diagrama é comumente visto na parte dianteira das ambulâncias?

AMBULÂNCIA

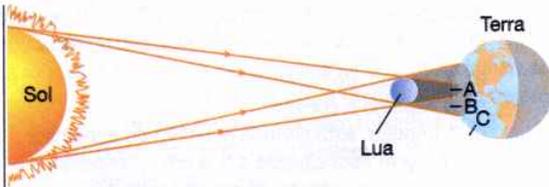
problemas e testes problemas e testes problemas

- Um objeto opaco O está colocado diante de duas pequenas lâmpadas, como mostra a figura deste problema. 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?



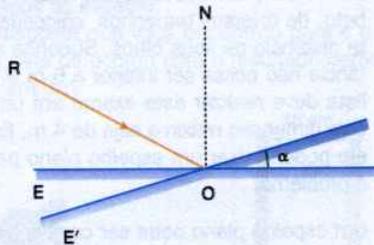
Problema 1.

- 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). Nestas condições, em certa região da Terra haverá eclipse total do Sol, isto é, para um observador nesta 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 deste problema, responda:
 - Qual deles observará um eclipse total do Sol?
 - Para qual deles o Sol será parcialmente eclipsado?
 - Qual deles poderá enxergar totalmente o disco solar?



Problema 2.

3. Um raio luminoso RO incide sobre um espelho plano colocado na posição EO mostrada na figura deste problema. Sendo ON a normal a este espelho:
 - a) Trace cuidadosamente, em uma cópia da figura, o raio refletido OR' (use um transferidor para medir os ângulos).
 - b) O espelho foi girado de um ângulo $\alpha = 15^\circ$, passando para a nova posição $E'O$ (veja a figura). Desenhe a normal ON' nesta 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'' .
 - 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 este resultado?



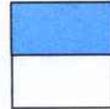
Problema 3.

4. Vimos que o aumento de um espelho é dado pela relação: $\text{aumento} = D_i/D_o$.
 - a) Usando esta relação, determine o aumento fornecido por um espelho plano.
 - b) O que significa o resultado encontrado na questão anterior?
 - c) Este resultado está de acordo com o que você aprendeu ao estudar o espelho plano?
5. Considere um espelho convexo cujo valor da distância focal é de 5 cm. Um objeto é colocado diante deste 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?

6. É desejável que, ao se barbear, uma pessoa possa perceber maiores detalhes em seu rosto. Para isto, ela deveria usar um espelho côncavo, convexo ou plano? Explique.

7. O objeto mostrado na figura deste problema é colocado em frente a um espelho côncavo, entre o centro e o foco deste espelho. Entre as figuras seguintes, indique no caderno aquela que melhor representa a imagem do objeto fornecido pelo espelho.

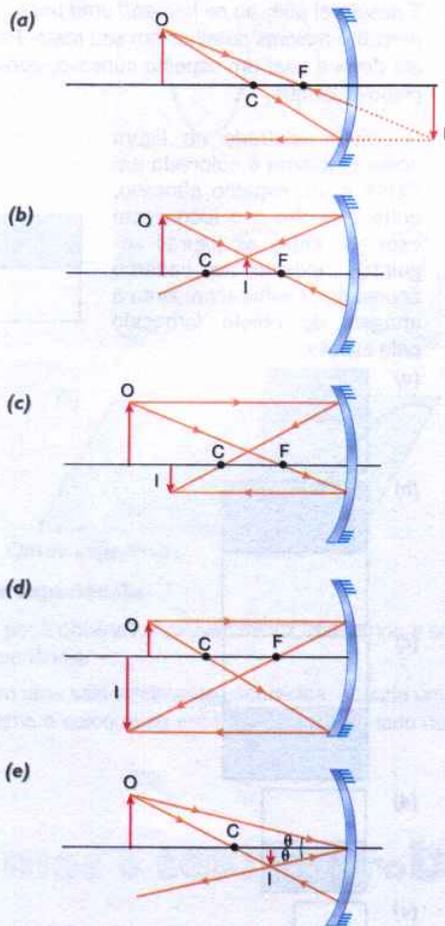


- (a)
- (b)
- (c)
- (d)
- (e)

Problema 7.

8. As afirmações seguintes referem-se a um espelho côncavo, cujo raio de curvatura é de 30 cm. indique no caderno aquela que é errada.
 - a) Um objeto, situado a 20 cm do espelho, terá sua imagem formada praticamente sobre o foco.
 - b) Os raios luminosos que incidem num espelho, passando pelo centro de curvatura, são refletidos paralelamente ao seu eixo.
 - c) A imagem de um objeto, situado a 10 cm do espelho, será virtual.
 - d) Um raio incidente e o respectivo raio refletido formam ângulos iguais com a reta que liga o ponto de incidência ao centro de curvatura.
 - e) A imagem de um objeto, situado a 35 cm do espelho, será real.

9. Um objeto O está colocado diante de um espelho esférico, de centro C e foco F . Indique no caderno o diagrama que nos permite localizar corretamente a imagem I do objeto.



Problema 9.

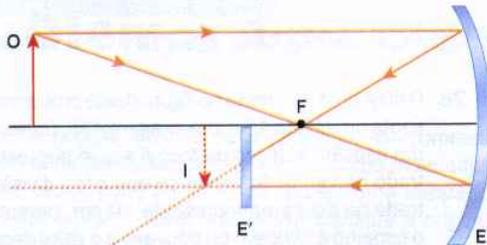
10. Considere os seguintes dados referentes a um objeto e sua imagem fornecida por um certo espelho:
 distância do objeto ao espelho: 6 cm
 aumento: 5
 imagem: invertida
 Baseando-se nestas informações indique no caderno quais, entre as afirmativas seguintes, são corretas.
- A imagem do objeto é virtual.
 - A imagem está situada a 30 cm do espelho.
 - A distância focal do espelho vale 2,5 cm.
 - O espelho é côncavo.
 - O raio de curvatura do espelho vale 5 cm.
11. Considere os seguintes dados referentes a um objeto e sua imagem fornecida por um certo espelho:
 valor da distância focal do espelho: 20 cm
 aumento: 0,10
 imagem: direta

Baseando-se nestas informações indique no caderno quais, entre as afirmativas seguintes, são corretas.

- A imagem do objeto é virtual.
 - O espelho é convexo.
 - A imagem está situada a 18 cm do espelho.
 - O objeto está situado a 1,8 cm do espelho.
 - O raio de curvatura do espelho vale 10 cm.
12. Considere os seguintes dados referentes a um objeto e sua imagem fornecida por um certo espelho:
 distância do objeto ao espelho: 10 cm
 aumento: 1
 imagem: virtual
 Baseando-se nestas informações indique no caderno quais, entre as afirmativas seguintes, são corretas
- A imagem é invertida em relação ao objeto.
 - A imagem está situada a 10 cm do espelho.
 - O espelho é plano.
 - A distância focal do espelho é nula.
 - O raio de curvatura do espelho é infinito.
13. Se, durante o dia, uma pessoa dentro de casa olha através de uma vidraça, ela vê o que está lá fora. À noite (quando o exterior da casa está escuro), a mesma pessoa, olhando através da mesma vidraça, vê sua imagem refletida e não enxerga praticamente nada do que está lá fora. Explique a causa da diferença entre as duas observações.
14. Como você sabe, em um exame de vista, o paciente deve ser capaz de identificar letras do alfabeto, de diversos tamanhos, colocadas a uma certa distância de seus olhos. Suponha que esta distância não possa ser inferior a 6 m e que um oculista deva realizar este exame em um consultório cuja dimensão máxima seja de 4 m. Explique como ele poderia usar um espelho plano para contornar o problema.
15. Um espelho plano pode ser considerado como um caso particular de um espelho esférico.
- Sob este ponto de vista, qual seria o valor do raio de curvatura e da distância focal de um espelho plano?
 - Usando a equação dos espelhos esféricos e considerando a resposta da questão anterior, determine a relação entre D_i e D_o para um espelho plano.
 - O resultado que você encontrou em (b) confirma o estudo dos espelhos planos feitos na seção 14.3?
16. Neste problema, você encontrará uma situação na qual um espelho plano fornece uma imagem real. O espelho côncavo E , mostrado na figura deste problema, forneceria a imagem I do objeto O se o espelho plano E' não interrompesse a trajetória dos raios luminosos refletidos por E . Nestas condições,

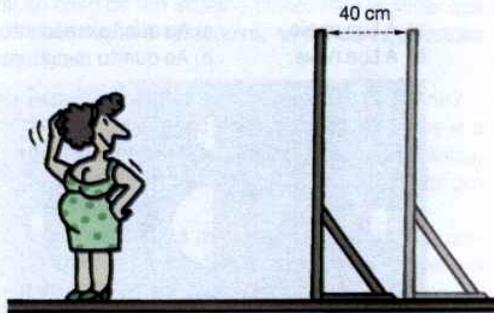
estes raios luminosos incidem sobre E' e são novamente refletidos.

- A figura mostra dois raios luminosos incidindo sobre E' . Trace, numa cópia do diagrama, a trajetória destes raios após serem refletidos por E' .
- Desenhe, então, a imagem I' do objeto O fornecida, agora, por E' .
- Esta imagem é real ou virtual?



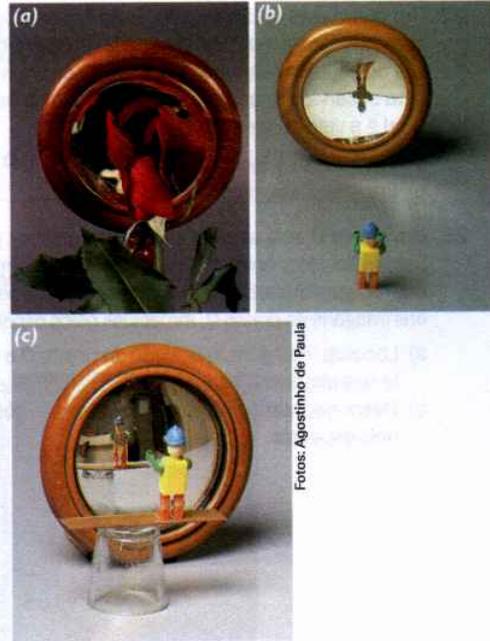
Problema 16.

- Uma pessoa, em pé no chão, encontra-se a uma distância de 120 cm de um espelho plano vertical. Afastando-se o espelho da pessoa de uma distância igual a 40 cm (veja a figura deste problema), determine o deslocamento que irá sofrer a imagem da pessoa.
 - Para generalizar o resultado da questão (a), suponha que a pessoa esteja a uma distância qualquer do espelho plano. Deslocando-se o espelho de uma distância d , a imagem da pessoa sofrerá um deslocamento D . Mostre que $D = 2d$, qualquer que seja a distância inicial da pessoa ao espelho.
 - A resposta que você encontrou para a questão (a) está de acordo com o resultado demonstrado em (b)?



Problema 17.

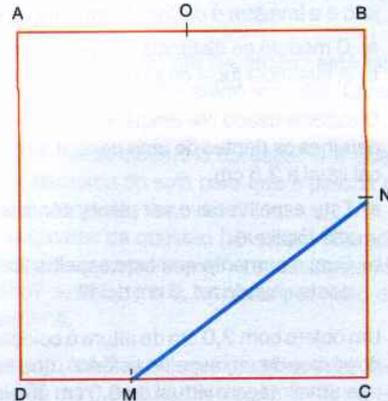
- Suponha que um feixe de luz pudesse dar a volta em torno da Terra, ao longo do Equador. Quantas voltas esse feixe efetuaria em 1,0 s?
- As figuras deste problema apresentam fotos de um objeto e sua imagem fornecida por um espelho esférico. Em cada foto, identifique o tipo do espelho, a natureza da imagem e a posição do objeto em relação ao foco do espelho.



Fotos: Agostinho de Paula

Problema 19.

- Um observador O encontra-se no meio da parede AB de uma sala quadrada $ABCD$, na qual existe um espelho plano vertical MN (veja a figura deste problema). Identifique, entre os cantos A , B e D da sala, aqueles cujas imagens podem ser vistas pelo observador através do espelho MN .



Problema 20.

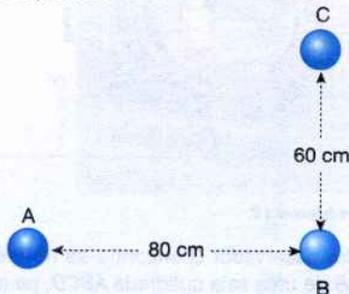
- Um objeto desloca-se, com velocidade constante, ao longo do eixo de um espelho côncavo. Para cada um dos trechos seguintes, percorridos pelo objeto, diga se a velocidade média da imagem é maior, menor ou igual à velocidade do objeto:
 - O objeto se desloca do infinito até o centro do espelho.
 - O objeto se desloca do centro ao foco do espelho.
 - O objeto se desloca do foco ao vértice do espelho.

22. Um automóvel está se deslocando em uma estrada retilínea, com velocidade constante de 60 km/h. Através do espelho retrovisor plano deste carro, o motorista observa a imagem de um poste fixo na estrada. Qual é a velocidade desta imagem:

- Em relação à Terra?
- Em relação ao motorista?

23. Um objeto O está situado entre dois espelhos planos perpendiculares entre si. Os pontos A , B e C , mostrados na figura deste problema, representam as posições das imagens do objeto O , fornecidas pelos espelhos.

- Localize, na figura, a posição do objeto O e calcule sua distância à imagem B .
- Desenhe, numa cópia da figura, as posições dos dois espelhos.



Problema 23.

24. Um espelho esférico fornece uma imagem virtual de um objeto real. O tamanho da imagem é igual à metade do tamanho do objeto e a distância entre o objeto e a imagem é d . Calcule em função de d :

- O módulo da distância da imagem ao espelho.
- A distância focal do espelho (módulo e sinal).

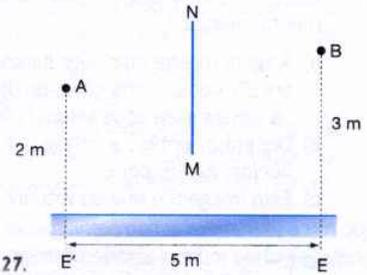
25. O espelho usado por um dentista para observar com detalhes os dentes de uma pessoa tem distância focal igual a 2,5 cm.

- Este espelho deve ser plano, côncavo ou convexo? Explique.
- Qual o aumento que este espelho fornece de um dente situado a 1,5 cm dele?

26. Um objeto com 2,0 cm de altura é colocado a 10 cm do vértice de um espelho esférico, que forma do objeto uma imagem virtual de 6,0 cm de altura.

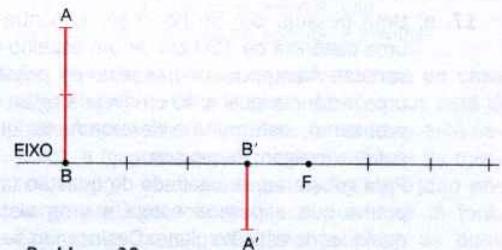
- Para que outra posição do objeto o espelho forneceria uma imagem também com 6,0 cm de altura?
- Qual a natureza da imagem fornecida pelo espelho na situação encontrada em (a)?

27. Na figura deste problema, A é uma fonte de luz e B é um ponto que deve ser iluminado por luz proveniente de A , após refletir-se no espelho plano EE' , pois MN é um obstáculo que impede a luz de A incidir diretamente em B . Mostre numa cópia da figura a trajetória do raio que parte de A e atinge B e determine o ângulo com que este raio incide no espelho.



Problema 27.

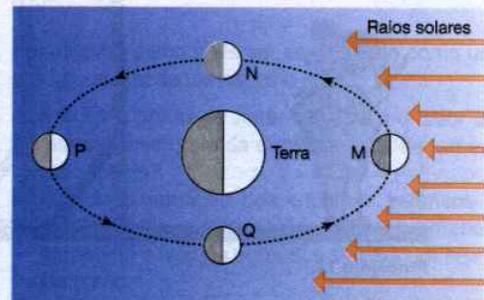
28. O diagrama mostrado na figura deste problema representa um objeto AB e sua imagem $A'B'$, fornecida por um espelho esférico de foco F e cujo eixo está mostrado na figura. Sabendo-se que cada divisão mostrada no diagrama representa 10 cm, determine se o espelho é côncavo ou convexo e o valor de sua distância focal.



Problema 28.

29. A figura deste problema representa a Lua girando em torno da Terra, recebendo e refletindo os raios solares. Nas diversas posições ocupadas por ela, mostradas na figura, em uma volta completa em torno da Terra (cuja duração é cerca de 28 dias), identifique aquelas que correspondem:

- À Lua cheia.
- À Lua nova.
- Ao quarto crescente.
- Ao quarto minguante.



Problema 29.

30. Descreva o que aconteceria com a imagem formada em uma câmara escura de orifício se ocorresse cada uma das seguintes alterações:

- O comprimento da câmara fosse aumentado.
- O orifício circular fosse substituído por um orifício triangular, mas ainda muito pequeno.
- A área do orifício fosse aumentada.

Resolva as questões de vestibular questões de vestibular

As questões de vestibular se encontram no final do livro.

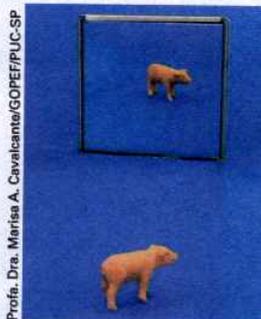
Resolva os problemas suplementares problemas suplementares

1. Uma pessoa, ao lado de um espelho, fica surpresa ao perceber duas sombras de seu corpo projetadas no chão, pois, na sala, há apenas uma lâmpada (veja a figura deste problema). Explique a origem das duas sombras.



Problema suplementar 1.

2. Sejam X_o e X_i as distâncias de um objeto e de sua imagem ao foco de um espelho esférico. Mostre que a equação dos espelhos esféricos, em termos de X_o e X_i , toma a seguinte forma: $X_o X_i = f^2$ (esta relação costuma ser denominada equação de Newton).
3. A equação dos espelhos esféricos pode ser aplicada ao caso de um espelho plano. Para verificar que esta afirmação é verdadeira, responda às questões seguintes:
 - a) Qual é a distância focal de um espelho plano?
 - b) Usando a equação dos espelhos esféricos e a resposta da questão (a), determine a distância, D_i , da imagem de um objeto fornecida por um espelho plano.
 - c) Tendo em vista a resposta da questão (b), responda: qual é a natureza da imagem e qual é o aumento fornecido por um espelho plano?
 - d) As respostas das questões (b) e (c) estão de acordo com aquilo que você estudou sobre os espelhos planos, na secção 14.3?
4. A fotografia, mostrada na figura deste problema, apresenta um objeto e sua imagem fornecida por um espelho plano. Por que a imagem parece ser menor do que o objeto?
5. Uma pessoa mediu o comprimento da sombra de um edifício projetada no chão (horizontal), encontrando um valor de 20 m. Desejando obter a altura do edifício, ela lembrou que os raios solares,



Prof. Dra. Marisa A. Cavalcante/GOPEF/PUC-SP

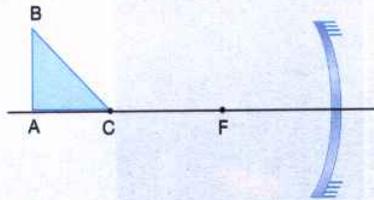
Problema suplementar 4.

- ao chegarem à Terra, são praticamente paralelos entre si. Colocou, então, uma haste vertical de 100 cm de altura ao lado do edifício e verificou que ela projetou, naquele momento, uma sombra de 40 cm. Qual era a altura do edifício? Justifique o seu raciocínio.
6. Uma pessoa, de 160 cm de altura, está situada em frente a um espelho plano vertical. (Considere desprezível a altura da testa da pessoa.)
 - a) Qual o menor tamanho do espelho e qual sua posição acima do solo para que a pessoa possa se ver completamente nele?
 - b) As respostas da questão (a) seriam alteradas se a pessoa se aproximasse ou se afastasse do espelho? Justifique sua resposta por meio de um diagrama.
 7. O diâmetro da Lua é aproximadamente igual a $3,5 \times 10^3$ km e sua distância à Terra é de $3,80 \times 10^5$ km. Qual deve ser a distância focal de um espelho côncavo para que ele forneça uma imagem da Lua de 2,0 cm de diâmetro?
 8. Em um terreno plano e horizontal estão situados um observador, um poste vertical e um espelho plano colocado no chão, com a face refletora voltada para cima. O centro do espelho está a 2,80 m dos pés do observador e a 8,40 m da base do poste. O observador, ao visar o centro do espelho, vê a imagem do ponto mais alto do poste. Sabendo-se que os olhos do observador estão a 1,80 m do chão, determine a altura do poste.

9. Um ponto luminoso desloca-se com uma velocidade $v_p = 2,0$ m/s ao longo de um eixo OX fixo na Terra. Um espelho plano, perpendicular a OX, também se desloca na direção de OX com uma velocidade $v_E = 3,0$ m/s. Determine a velocidade da imagem do ponto luminoso, em relação à Terra, nos seguintes casos:

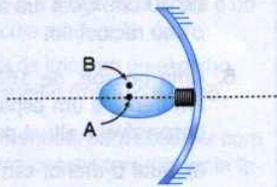
- \vec{v}_p e \vec{v}_E têm o sentido de OX positivo.
- \vec{v}_p tem o sentido de OX positivo e \vec{v}_E , o de OX negativo.

10. A figura deste problema mostra um triângulo retângulo ABC situado em frente a um espelho côncavo, de centro C e distância focal igual a 6,0 cm. Sabendo-se que $AB = 8,0$ cm e $AC = 6,0$ cm, determine a área da imagem do triângulo ABC, fornecida pelo espelho.



Problema suplementar 10.

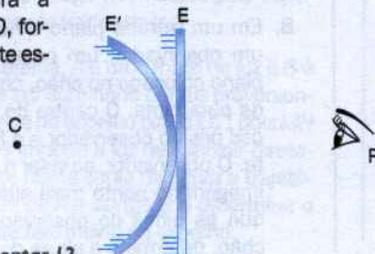
11. A lâmpada do farol de um automóvel possui dois filamentos, A e B, como mostra a figura deste problema. O filamento A está exatamente no foco do espelho côncavo e B, um pouco acima de A. Faça um diagrama mostrando como são os raios luminosos, que partem de A e B, após serem refletidos no espelho (raios que emergem do farol). Por que razão são usados os dois filamentos neste farol?



Problema suplementar 11.

12. Na figura deste problema, P representa o olho de um observador, O é uma fonte de luz e E é um espelho plano.

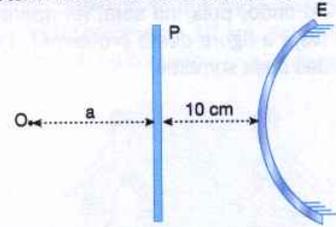
- Verifique se o observador consegue enxergar a imagem de O fornecida pelo espelho E.
- Suponha que o espelho E fosse substituído pelo espelho convexo E' , de centro C. O observador verá a imagem de O, fornecida por este espelho?



Problema suplementar 12.

- Tendo em vista as respostas das questões (a) e (b), explique por que os espelhos convexos costumam ser usados como retrovisores, em lugar de espelhos planos.

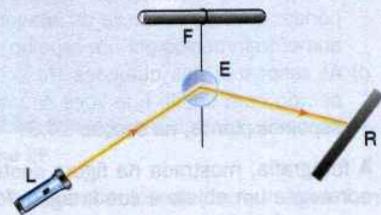
13. Uma placa plana P, semitransparente (reflete parte da luz incidente e deixa-se atravessar pela parte restante), de espessura desprezível, está situada a 10 cm de distância de um espelho convexo, cuja distância focal é igual a 30 cm como mostra a figura deste problema. Uma fonte de luz O é colocada a uma distância a da placa, de modo que sua imagem, fornecida pelos raios refletidos em P, coincide com a imagem desta fonte fornecida pelos raios refletidos em E. Determine o valor da distância a.



Problema suplementar 13.

14. Na figura deste problema, uma lanterna L envia estreito feixe de luz sobre o espelho plano E, preso a um fio F. O feixe, após se refletir em E, é recebido em uma escala R, afastada do espelho. Quando F gira de um pequeno ângulo (em virtude de uma torção, por exemplo) a mancha luminosa na escala se desloca apreciavelmente. Por esta razão, este dispositivo é usado para amplificar pequenas rotações, como ocorre na balança de torção de Cavendish. Em uma experiência na qual esta montagem foi usada, a distância de E a R era de 80 cm e o deslocamento da mancha luminosa na escala foi de 4,0 mm. Tendo em vista o resultado do problema 3, da série Problemas e Testes deste capítulo, determine aproximadamente, em graus, o ângulo de giro do fio F.

Sugestão: Considere o deslocamento da mancha sobre a escala igual ao arco que corresponde ao ângulo de rotação do raio refletido e lembre-se de que $1 \text{ rad} = 57,3^\circ$.

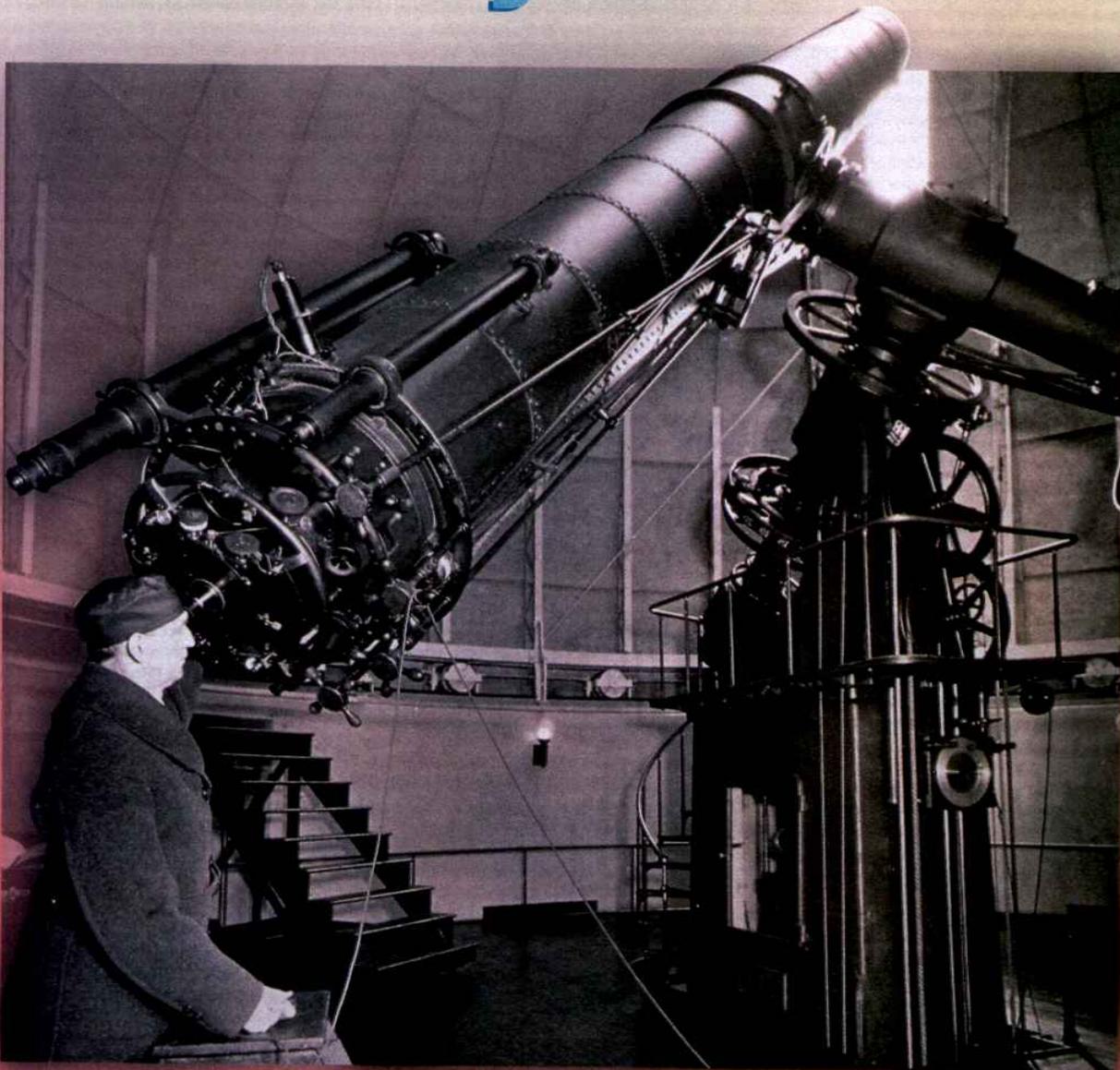


Problema suplementar 14.

15. A chama de uma vela, de 6,0 cm de altura, é colocada em frente a uma câmara escura, a 45 cm de distância do orifício. Observa-se uma imagem da chama na parede posterior vertical da câmara, situada a 15 cm da parede anterior. Determine a altura da imagem.

capítulo 15

Refração da luz

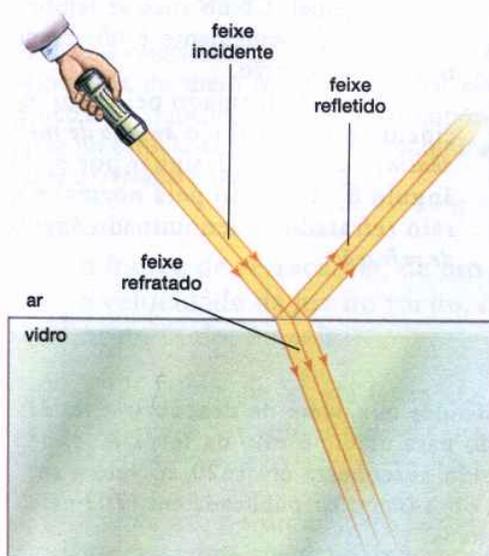


Vários aparelhos óticos, como os telescópios, têm seu funcionamento baseado na refração da luz. Este grande telescópio refrator já se encontrava em operação no ano de 1937, nos Estados Unidos.

15.1. Refração da luz

O QUE É REFRAÇÃO

Vimos, no capítulo anterior, que se um feixe de luz, propagando-se no ar, encontra a superfície de um bloco de vidro (fig. 15-1), parte do feixe é refletida e parte penetra no bloco. A parte do feixe que se reflete já foi estudada naquele capítulo e, agora, vamos analisar o feixe luminoso que passa a se propagar no vidro.



Um feixe luminoso, emitido por uma lanterna no ar, refrata-se ao penetrar na água.

Fig. 15-1: Quando um feixe de luz, propagando-se no ar, incide em um bloco de vidro, parte do feixe é refletida e parte se refrata ao penetrar no vidro. Ilustração esquemática.

Verifica-se experimentalmente que este feixe se propaga em uma direção diferente da direção do feixe incidente, isto é, a direção de propagação da luz é alterada quando ela passa do ar para o vidro, como mostra a fig. 15-1. Quando isto acontece, dizemos que a luz sofreu uma *refração*, ou seja, a luz se *refrata* ao passar do ar para o vidro.*

De um modo geral, a refração ocorre quando a luz passa de um meio para outro, nos quais ela se propaga com velocidades diferentes. Assim, na fig. 15-2, 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 de direção de propagação de um feixe de luz ao passar de um meio para outro. Isto só pode ocorrer quando a luz se propaga com velocidades diferentes nos dois meios.

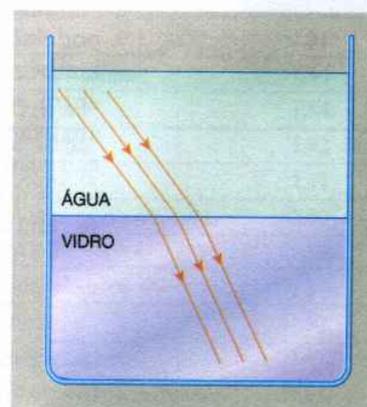


Fig. 15-2: Como as velocidades de propagação da luz na água e no vidro são diferentes, um feixe luminoso se refrata ao passar da água para o vidro. Ilustração esquemática.

* Do latim, *refractus*, que significa "girado para o lado" ou "quebrado".

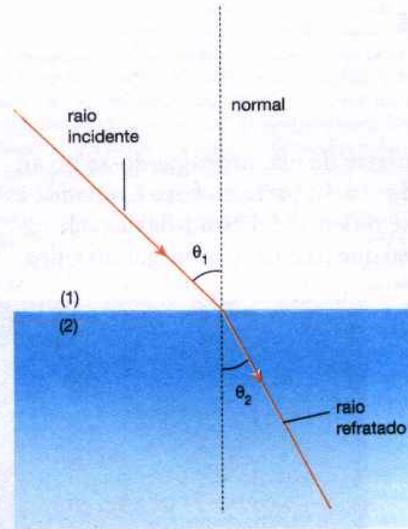


Fig. 15-3: Quando um raio luminoso se refrata, tem-se $\text{sen } \theta_1 / \text{sen } \theta_2 = \text{constante}$.

AS LEIS DA REFRAÇÃO

Na fig. 15-3, representamos um raio luminoso se refratando ao incidir na superfície de separação de dois meios (1) e (2). Tracemos a normal a esta superfície no ponto de incidência. Observe que esta normal, o raio incidente e o raio refratado estão situados em um mesmo plano. Na fig. 15-3, este plano é o da folha de papel. Como você se lembra, um resultado semelhante é observado também na reflexão.

O ângulo formado pelo raio incidente e a normal é o *ângulo de incidência*, que vamos designar por θ_1 . O ângulo θ_2 , formado pela normal e o raio refratado, é denominado *ângulo de refração*.

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 através da obra *Dioptrica*, publicada em 1703 pelo físico, também holandês, C. Huyghens.

Como mostra a fig. 15-3, os ângulos θ_1 e θ_2 *não* são iguais entre si e pode-se verificar experimentalmente que, aumentando-se θ_1 , o ângulo θ_2 também aumenta. Durante muitos séculos tentou-se descobrir uma relação entre estes 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 destes ângulos. Em outras palavras, Snell descobriu que, quando a luz se refrata ao passar de um meio (1) para um meio (2), tem-se

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \text{constante}$$

Esta constante é característica dos dois meios e, portanto, para cada par de meios ela tem um valor diferente. No capítulo seguinte, quando estudarmos o movimento ondulatório, mostraremos que o valor desta constante é igual ao quociente v_1/v_2 , entre as velocidades da luz nos dois meios.

Portanto, quando a luz sofre refração, passando de um meio (1), no qual sua velocidade é v_1 , para outro meio (2), no qual ela se propaga com velocidade v_2 , temos:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

ÍNDICE DE REFRAÇÃO

Consideremos um caso particular importante no qual um raio luminoso, propagando-se no vácuo, sofre refração ao penetrar em um meio material qualquer (fig. 15-4). Para este caso, pelo que acabamos de aprender, teremos

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{c}{v}$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo e v é a velocidade no meio material no qual ela penetra. O quociente c/v é muito importante no estudo da refração e se denomina *índice de refração* do meio, isto é,

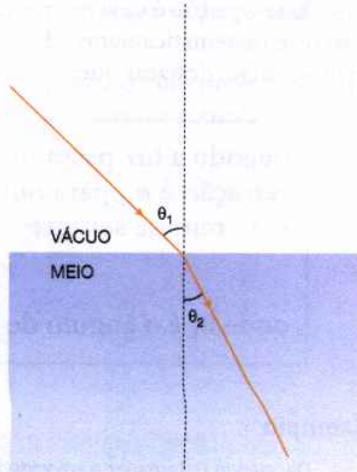


Fig. 15-4: O índice de refração de um meio é o quociente entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz neste meio, isto é, $n = c/v$.

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 , neste meio, ou seja

$$n = \frac{\text{velocidade da luz no vácuo}}{\text{velocidade da luz no meio}} \quad \text{ou} \quad n = \frac{c}{v}$$

Observe que n é um número puro (sem unidades) pois é o quociente entre duas grandezas da mesma espécie (duas velocidades). Seu valor é maior do que 1 para qualquer meio material, uma vez que a velocidade da luz no vácuo ($3,0 \times 10^8$ 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 $3,0 \times 10^8$ m/s. A tabela 15-1 apresenta os valores do índice de refração para diversas substâncias.

Retomando a expressão

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

vamos escrevê-la da seguinte maneira

$$\frac{1}{v_1} \text{sen } \theta_1 = \frac{1}{v_2} \text{sen } \theta_2$$

Multiplicando ambos os membros desta igualdade por c , vem

$$\frac{c}{v_1} \text{sen } \theta_1 = \frac{c}{v_2} \text{sen } \theta_2$$

Mas c/v_1 é n_1 (índice de refração do meio 1) e c/v_2 é n_2 (índice de refração do meio 2). Então

$$n_1 \text{sen } \theta_1 = n_2 \text{sen } \theta_2$$

Índices de refração

Substância

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

Tabela 15-1.

Esta equação é uma das formas mais comuns de se apresentar a lei de Snell e descreve matematicamente, de uma 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

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$$

onde θ_1 é o ângulo de incidência e θ_2 é o ângulo de refração.

Exemplo

Desejando determinar a velocidade da luz em um certo tipo de vidro, fizemos um estreito feixe de luz, propagando-se no ar, incidir sobre um bloco daquele vidro com um ângulo $\theta_1 = 30^\circ$ (fig. 15-5). Medindo o ângulo de refração, encontramos $\theta_2 = 19^\circ$.

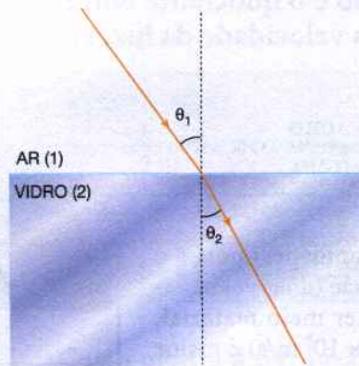


Fig. 15-5: Para o exemplo da secção 15.1.

a) Qual é o valor do índice de refração do vidro usado na experiência?

Vimos que, na refração, temos $n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$. 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

$$1,0 \times \operatorname{sen} 30^\circ = n_v \times \operatorname{sen} 19^\circ \text{ donde } n_v = \frac{\operatorname{sen} 30^\circ}{\operatorname{sen} 19^\circ}$$

Consultando a tabela de funções trigonométricas no final deste volume e efetuando os cálculos, encontramos $n_v = 1,5$.

b) Qual é o valor da velocidade de propagação da luz neste vidro?

Pela definição de índice de refração, podemos escrever

$$n_v = \frac{\text{velocidade da luz no vácuo}}{\text{velocidade da luz no vidro}} \text{ ou } n_v = \frac{c}{v_v}$$

donde obtemos

$$v_v = \frac{c}{n_v} = \frac{3,0 \times 10^8 \text{ m/s}}{1,5} \text{ donde } v_v = 2,0 \times 10^8 \text{ m/s}$$

COMENTÁRIOS

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, $n_1 < n_2$. Estes meios poderiam ser, por exemplo, o ar ($n_1 = 1,0$) e o vidro ($n_2 = 1,5$), como na fig. 15-6-a. Então, como $n_1 < n_2$, e devemos ter $n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$, concluímos que

$$\operatorname{sen} \theta_1 > \operatorname{sen} \theta_2 \text{ donde } \theta_1 > \theta_2$$

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 inci-

dência ou, em outras palavras, o raio se refrata aproximando-se da normal, como mostra a fig. 15-6-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 fig. 15-6-b.

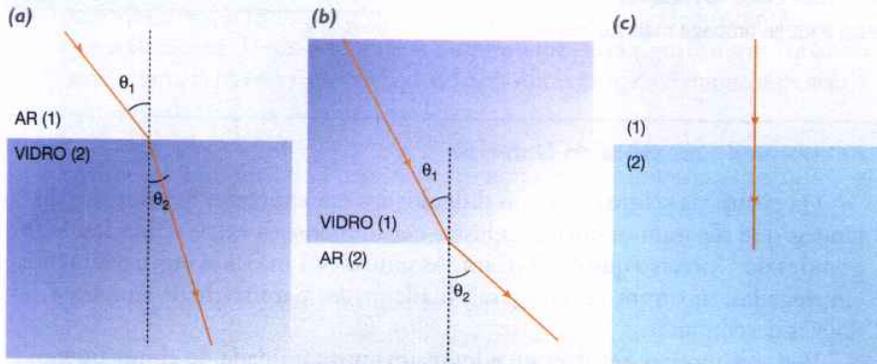


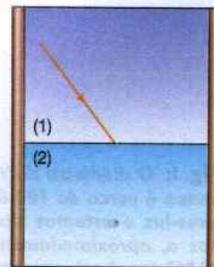
Fig. 15-6: Em (a), dizemos que o raio refratado se aproximou da normal e, em (b), que ele se afastou da normal. Em (c), o raio luminoso não se desvia porque o ângulo de incidência é nulo.

Observe, entretanto, que, quaisquer que sejam os valores de n_1 e n_2 , se um raio luminoso incidir com um ângulo $\theta_1 = 0^\circ$, teremos, pela lei de Snell ($n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$), também $\theta_2 = 0^\circ$, isto é, o raio luminoso não sofre nenhum desvio ao passar de um meio para o outro (fig. 15-6-c).

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

- Sabe-se que a luz se propaga em um certo cristal com uma velocidade $v = 1,5 \times 10^8$ m/s. Qual é o valor do índice de refração deste cristal?
 - Consultando a tabela 15-1, calcule a velocidade de propagação da luz no diamante.
- Observe os valores dos índices de refração da tabela 15-1. Em qual dos meios ali relacionados a luz se propaga:
 - Com maior velocidade?
 - Com menor velocidade?
- Um raio luminoso, propagando-se no ar, refrata-se ao passar deste meio para a glicerina. O ângulo de incidência do raio luminoso é de 30° .
 - Considere a lei de Snell e diga, para a situação descrita, quanto valem n_1 , θ_1 e n_2 . (Consulte a tabela 15-1.)
 - Determine o valor do ângulo de refração θ_2 . (Consulte a tabela de funções trigonométricas, no final deste volume.)
 - Usando um transferidor, faça um desenho mostrando corretamente as direções do raio incidente e do raio refratado.
- A figura deste exercício mostra um raio luminoso incidindo na superfície de separação de dois meios (1) e (2). Mostre, em uma cópia da figura, a direção aproximada do raio refratado supondo que:
 - $n_2 > n_1$
 - $n_2 < n_1$



Exercício 4.

Procure perceber o enorme valor dessa unidade, lembrando-se de que, em praticamente 1 s, a luz se desloca da Terra à Lua e, em 1 ano, temos aproximadamente 30 milhões de segundos.

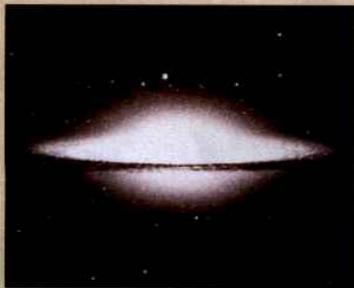
Com essa unidade, podemos expressar mais comodamente as distâncias que nos separam de alguns corpos celestes:

- 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. Isto 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 alfa da constelação do Centauro. Sua distância até nós é de 4,2 anos-luz. Portanto, a luz gasta 4,2 anos para vir da alfa do Centauro até a Terra. Sendo assim, quando olhamos para essa estrela, nós a estamos vendo como ela era 4,2 anos atrás!;
- 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 nosso sistema solar, por exemplo, pertence a uma galáxia denominada *Via-láctea*, cujo diâmetro vale cerca de 100 000 anos-luz. Veja, na figura I, uma representação de nossa galáxia e a indicação aproximada da posição que nela ocupamos;
- o número de galáxias já observadas pelos cientistas é muito grande (avalia-se que existem mais galáxias no Universo que habitantes na Terra). Uma das mais próximas da Via-láctea é a galáxia (ou nebulosa) de Andrômeda (figura II). Os astrônomos conseguiram determinar nossa distância até Andrômeda e verificaram que ela é de, aproximadamente, 2 milhões de anos-luz! (figura I). 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. Algumas delas, como a galáxia mostrada na figura III, encontram-se a uma distância de dezenas (ou centenas) de milhões de anos-luz. Corpos celestes, afastados de nós alguns bilhões de anos-luz, já foram detectados, mostrando que o Universo tem dimensões extraordinariamente elevadas, muito maiores do que se poderia imaginar;
- uma observação astronômica que teve grande repercussão quando foi anunciada, no início do século XX, refere-se à *expansão do Universo*: analisando a luz emitida por galáxias distantes, os cientistas verificaram, por meio do efeito Doppler (que será analisado no capítulo seguinte), que essas galáxias



Renald Royer/SPL/Stock Photos

Fig. II: Foto da nebulosa de Andrômeda, a galáxia mais próxima da Terra.

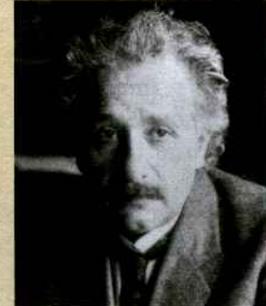


NOAO/SPL/Stock Photos

Fig. III: Esta galáxia, que em virtude de sua forma é denominada Sombrero, está situada a 40 milhões de anos-luz da Terra.

estão se afastando rapidamente umas das outras, de modo que as dimensões do Universo estão se tornando maiores a cada momento. Estes resultados mostravam, com bastante clareza, que o Universo *não era estacionário*, como acreditava, até então, uma grande parte da comunidade científica.

Fig. IV: O grande físico Albert Einstein, considerado uma das personalidades mais importantes do século XX, nasceu na Alemanha em 1879 e faleceu nos Estados Unidos em 1955. Em 1905, com apenas 26 anos de idade, Einstein lançou as bases de sua famosa Teoria da Relatividade. Por meio dessa teoria, ele propunha novas idéias para analisar o movimento de partículas com velocidades muito elevadas, pois já havia sido observado que a mecânica de Newton não era obedecida por essas partículas. Uma importante consequência da Teoria da Relatividade é que nenhum corpo material pode ter uma velocidade igual (ou superior) à velocidade da luz. Nos grandes laboratórios do mundo, este fato tem sido amplamente comprovado experimentalmente. Cerca de 10 anos mais tarde, em 1916, ampliando seus estudos, Einstein apresentou uma nova teoria, denominada Teoria da Relatividade Geral, que deu origem a idéias revolucionárias sobre a evolução do Universo. A constatação de que o Universo está em expansão, mencionada no texto, é uma das consequências dessa teoria.



É interessante destacar que a concepção de um Universo não-estacionário está de acordo com as idéias propostas pelo famoso físico Albert Einstein (figura IV), e sua Teoria da Relatividade Geral, na qual ele apresentou novas idéias sobre a gravitação universal, alterando profundamente o trabalho de Newton nesse campo.

Na figura V, mostramos um modelo muito simples (imaginando um Universo em duas dimensões), para que você possa ter uma idéia das concepções de Einstein: a superfície do balão representa o próprio Universo em que vivemos, e as pintas são galáxias distribuídas nesse Universo. Sua expansão corresponde ao aumento das dimensões do balão ao ser soprado. Quando isso ocorre, as “galáxias” (as pintas) se afastam umas das outras.

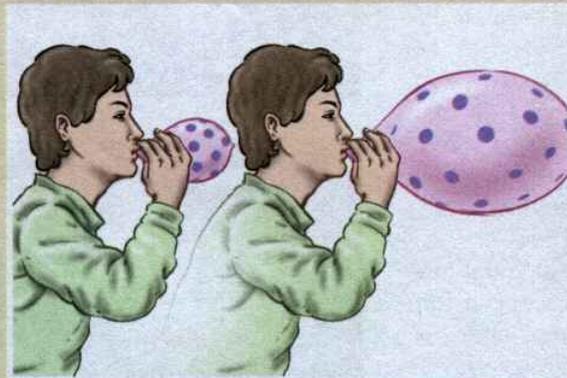


Fig. V: Um modelo simples que pode auxiliar na compreensão da proposta de Einstein sobre o Universo em expansão.

A observação do Universo em expansão levou os cientistas a novas teorias sobre a origem do Universo. Entre elas, a mais conhecida e de maior aceitação é a *teoria da grande explosão* ou *teoria do big-bang* (em inglês, *big-bang* significa “grande explosão”). De acordo com essa teoria, há cerca de 15 bilhões de anos toda a matéria e energia do Universo estariam concentradas em uma região muito pequena. Após uma enorme e súbita explosão, a matéria e a energia foram se espalhando, dando origem a um Universo em expansão. A situação atual nada mais seria do que um momento desse processo.

Veja o Tópico Especial do capítulo 14, onde são analisados outros fatos interessantes relacionados com a velocidade da luz.

15.2. Alguns fenômenos relacionados com a refração

A refração da luz é responsável por muitos fenômenos que podem ser observados em nossa vivência diária. Vamos descrever alguns destes fenômenos e procurar analisá-los tomando como base as leis da refração que estudamos na secção anterior.

FORMAÇÃO DE IMAGEM POR REFRAÇÃO

A fig. 15-7 mostra um pequeno objeto *O*, colocado a uma certa profundidade, dentro d'água. Os raios luminosos que são emitidos pelo objeto, ao passarem da água para o ar, sofrem refração, afastando-se da normal, como já sabemos. Como se pode ver pela fig. 15-7, os 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 objeto. Na realidade, o que ele enxerga é uma *imagem do objeto*, na posição *I*, situada acima da posição ocupada pelo objeto. Esta imagem *I* é *virtual*, porque está localizada no ponto de encontro dos *prolongamentos* dos raios refratados.

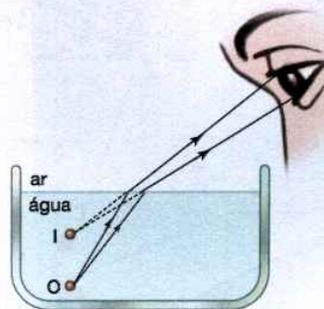


Fig. 15-7: Imagem virtual de um objeto situado dentro d'água.



Agostinho de Paula

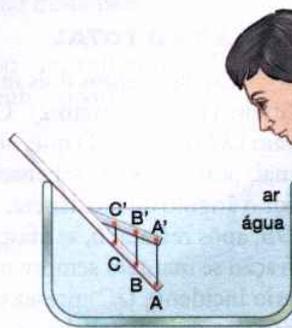


Fig. 15-8: Uma barra de metal, mergulhada na água, parece estar quebrada.

COMENTÁRIOS

- 1) Quando estamos na beira de uma piscina de águas tranqüilas, ela nos parece mais rasa, como você já deve ter observado. Este fato pode ser entendido pelo que acabamos de aprender: o que estamos vendo não é o fundo da piscina, 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.
- 2) Quando parte de uma barra de metal é mergulhada, obliquamente, dentro d'água, parece estar quebrada. A fig. 15-8 esclarece por que isto ocorre: a parte mergulhada não é vista por nós, mas sim a sua imagem virtual, situada acima da posição real do objeto.
- 3) Quando a luz proveniente de uma estrela penetra na atmosfera terrestre, ela encontra camadas de ar cada vez mais densas e, conseqüentemente, com índices de refração cada vez maiores. Em virtude disto, esta luz sofre refrações

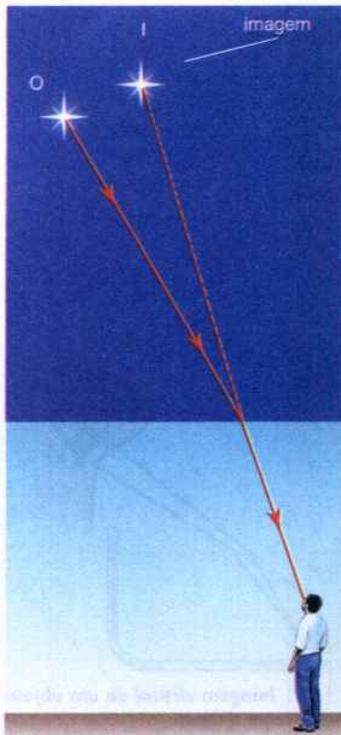


Fig. 15-9: A luz proveniente de uma estrela se refrata ao atravessar a atmosfera terrestre.

sucessivas, aproximando-se da normal, como mostra a fig. 15-9. Então, quando um observador recebe a luz da estrela, tudo se passa como se esta luz fosse proveniente do ponto I (fig. 15-9), 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 este 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 fig. 15-10. Da mesma forma, ao amanhecer, começamos a ver uma imagem do Sol antes que ele alcance a linha do horizonte. Desta maneira, se não existisse atmosfera, o dia terrestre seria um pouco mais curto.

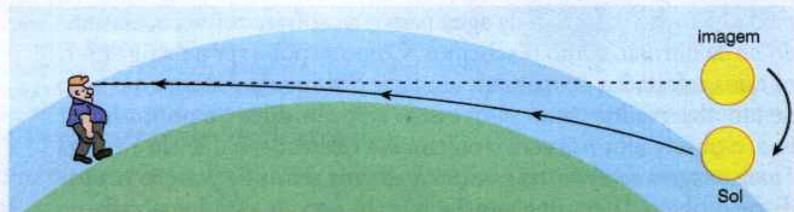


Fig. 15-10: A duração do dia é prolongada em virtude da refração da luz solar na atmosfera terrestre.

REFLEXÃO TOTAL

Consideremos dois meios 1 e 2, tais que $n_1 > n_2$, como, por exemplo, a água (meio 1) e o ar (meio 2). Um objeto luminoso O , situado no meio 1, emite um raio OA (fig. 15-11) que, ao passar para o meio 2, se refrata afastando-se da normal, pois $n_1 > n_2$. Já sabemos, pela equação $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ 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 este raio é de 90° (fig. 15-11). O ângulo de incidência do raio que se refrata desta maneira é denominado *ângulo limite*, L , como está indicado na fig. 15-11.

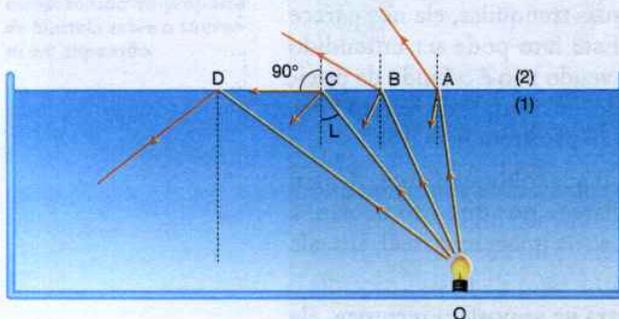


Fig. 15-11: Os raios OA e OB são parcialmente refletidos e parcialmente refratados. O raio OD é totalmente refletido.

Qualquer outro raio luminoso que parta de O e cujo ângulo de incidência seja maior do que L , como, por exemplo, o raio OD , não emergirá no meio 2. Verifica-se que este raio é *totalmente refletido* na superfície de separação dos dois meios, voltando a se propagar no meio 1. Este fenômeno é denominado *reflexão total* porque, nestas 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 obter uma expressão que nos permite calcular o valor do ângulo limite L . A fig. 15-11 nos mostra que, para o raio OC , temos $\theta_1 = L$ e $\theta_2 = 90^\circ$. Logo

$$n_1 \text{ sen } L = n_2 \text{ sen } 90^\circ \quad \text{donde} \quad \text{sen } L = \frac{n_2}{n_1}$$

Assim, concluímos que:

um raio luminoso, propagando-se em um meio 1 e incidindo na superfície de separação deste 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

$$\text{sen } L = n_2/n_1.$$

COMENTÁRIOS

- Um prisma de vidro, como o da fig. 15-12-a, cuja secção é um triângulo retângulo isósceles, é usado para refletir totalmente a luz, substituindo os espelhos em alguns instrumentos óticos. A fig. 15-12-b mostra, em corte, como isto ocorre: a luz penetra perpendicularmente à face AB , encontra a face BC com um ângulo de incidência de 45° , sofrendo reflexão total nesta face e saindo perpendicularmente à face AC .

Podemos entender por que o raio luminoso se refletiu totalmente em BC , calculando o ângulo limite entre o vidro e o ar. Na equação $\text{sen } L = n_2/n_1$, temos

$$n_2 = 1,0 \text{ (ar)} \quad \text{e} \quad n_1 = 1,5 \text{ (vidro)}. \quad \text{Teremos}$$

$$\text{sen } L = \frac{1,0}{1,5} = 0,67 \quad \text{donde} \quad L = 42^\circ$$

Então, como o ângulo de incidência na face BC (45°) é superior ao valor do ângulo limite (42°), o raio luminoso é totalmente refletido nesta face.

- O índice de refração do diamante é muito maior do que o do vidro (ver a tabela 15-1). Conseqüentemente, o ângulo limite entre o diamante e o ar (24°) é bem menor do que o do vidro (42°). Este 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 este motivo, o diamante apresenta o seu brilho característico, que o torna de grande valor como jóia.
- Quando estamos viajando em uma estrada asfaltada, em dias quentes, olhando ao longo do asfalto, temos às vezes a impressão de que ele está molhado. Isto ocorre porque, estando o asfalto muito aquecido, as camadas de ar próximas a ele apresentam densidade menor e, por causa disto, menor índice de refração do que as camadas situadas um pouco mais acima. Assim, a luz solar incidente sofre sucessivas refrações nas camadas

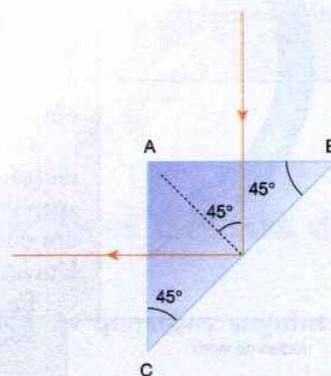
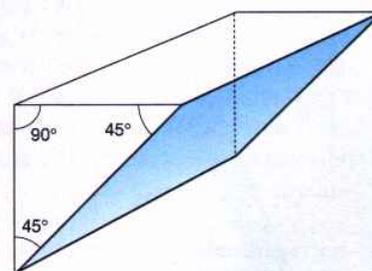
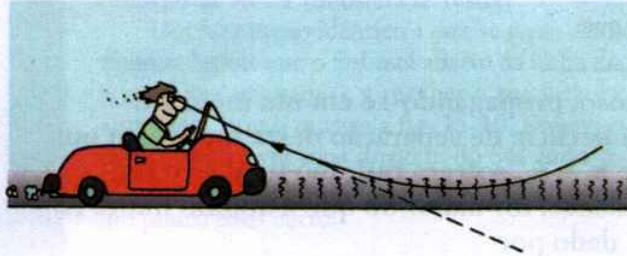


Fig. 15-12: Um prisma como o da figura pode ser usado para substituir, com vantagens, os espelhos porque reflete totalmente a luz.

de ar com índices de refração diferentes (como mostra a fig. 15-13), alcançando as camadas mais baixas com incidência superior ao ângulo limite e, portanto, sofrendo reflexão total antes de atingir o solo. Esta luz refletida, ao chegar em nossos olhos, dá origem a reflexos luminosos que parecem vir do asfalto, dando-nos a impressão de que ele está molhado.

Fig. 15-13: Em um dia quente, um observador tem a impressão de que uma estrada asfaltada está molhada.



Este mesmo fenômeno causa as miragens, vistas pelos viajantes nos desertos, quando julgam existir água sobre a areia aquecida.

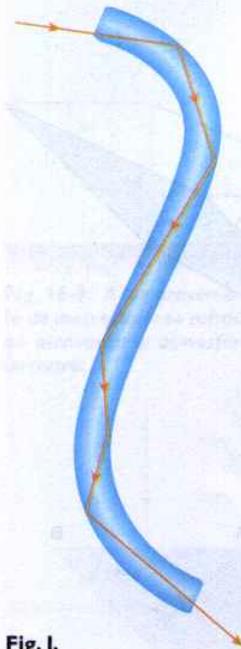


Fig. I.

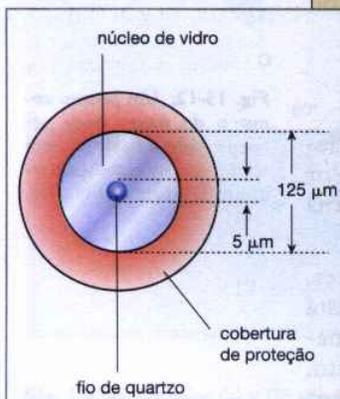


Fig. II.

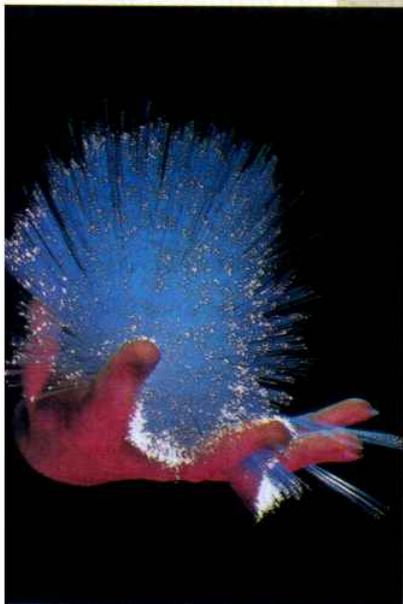
A fibra ótica

A fibra ótica é um material que utiliza a reflexão total da luz para transmiti-la através dele (fig. I). A possibilidade de construí-la surgiu com o desenvolvimento da tecnologia do quartzo, que propiciou a obtenção de fios muito finos e perfeitamente transparentes, que podem ser encurvados sem se romperem. Assim, por reflexão total nas paredes da fibra, a luz, ou outra radiação eletromagnética qualquer, pode ser conduzida por qualquer trajetória. A transparência quase absoluta do quartzo de grande pureza é uma propriedade fundamental para a construção destes dispositivos. Um fio de vidro, por exemplo, pode ser utilizado, mas não serviria a estes propósitos pois não apresenta a transparência desejada para as aplicações mais comuns da fibra ótica. Na fig. II, que apresenta uma secção reta deste material, pode-se perceber sua constituição e dimensões: o fio de quartzo muito fino (cerca de 5 milionésimos do metro) é envolvido por duas camadas, uma de vidro e outra de plástico, para sua proteção.

Os principais usos da fibra ótica são encontrados na Medicina e em comunicação (televisão e telefone). Na Medicina, são usadas nos endoscópios, aparelhos que facilitam o exame de órgãos internos, ou em cirurgias. São usados dois feixes de fibras óticas, introduzidos através da garganta do paciente. Um leva o sinal luminoso e, o outro, traz a imagem do órgão para o médico. A fonte de luz utilizada é sempre de laser, por sua grande potência e por poder ser transmitida por meio de feixes muito finos.

Na comunicação, a fibra ótica 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 ainda é freqüentemente feita por corrente elétrica, através de fios de cobre. A fibra ótica permite transmitir informações com maior eficiência e maior economia do que os fios de cobre (podem, em igualdade de condições, enviar 100 000 vezes mais informações). Entretanto, a velocidade da transmissão dos sinais na fibra ótica (200 000 km/s) é menor do que a dos sinais na corrente elétrica nos fios de cobre (cerca de 300 000 km/s). Outra vantagem da fibra ótica, em relação aos fios de cobre, é que os repetidores e amplificadores dos sinais se fazem necessários apenas a distâncias de cerca de 100 km, enquanto,

Adam Hart-Davis/SPL/Stock Photos



Feixe de fibras óticas. Observe que a luz branca que está penetrando pela parte inferior do feixe (parte comum às fibras) não atravessa a superfície lateral das fibras, emergindo na extremidade superior de cada uma (pontos brancos vistos na foto).

para os fios de cobre, eles devem ser instalados de 4 km em 4 km, aproximadamente. Outra desvantagem é sua menor resistência (quebram com facilidade), pois os fios de cobre resistem melhor a depredações de peixes, da própria água e de outros fatores. Na fonte de sinais, quase sempre são usadas radiações infravermelhas (menos absorvidas pelo quartzo) e na forma de laser (pelos motivos já citados).

As fibras óticas têm sido utilizadas, também, em um tipo especial de telescópio, que permite fazer observações simultâneas de vários astros. O aparelho possui vários braços mecânicos, controlados por motores independentes, e a cada um é adaptado uma fibra ótica (no projeto Argus, um dos mais modernos já construído, instalado no Observatório Interamericano de Cerro Tololo, no Chile, existem 24 desses braços e no Hydra, projeto americano desenvolvido no Arizona, há 96 braços). Com uma câmara de TV, cada fibra ótica é apontada para a posição onde se supõe existir uma galáxia (geralmente cerca de 100 milhões de anos-luz da Terra). Como a fibra é muito fina, normalmente ela só capta a luz de uma galáxia, reduzindo a superposição com a luz de estrelas mais próximas e da própria atmosfera. Com este processo está sendo possível construir um mapa do Universo que, por enquanto, consta de poucos milhares de galáxias, número ainda muito pequeno diante do valor estimado, que é

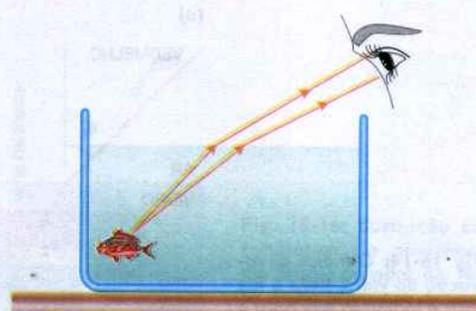
de 100 bilhões (até o ano 2000 os astrônomos prevêem que cerca de 1 milhão de galáxias estarão catalogadas). Este trabalho permitirá aos cientistas compreender melhor como o Universo está evoluindo e, a partir daí, construir um modelo mais adequado de sua origem.

No nosso dia-a-dia, as fibras óticas são pouco usadas, podendo ser encontradas na confecção de certos tipos de lâmpadas de mesa, apenas com efeito decorativo. Em algumas casas de brinquedos, costumam ser encontradas lanternas, às quais foram adaptadas fibras óticas.

exercícios de fixação

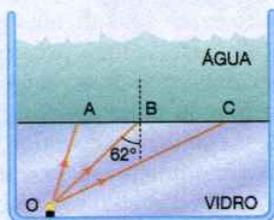
Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

6. Um pequeno peixe encontra-se dentro de um aquário. A figura deste exercício mostra raios luminosos que partem do peixe e se refratam ao passarem da água para o ar.
 - a) Mostre, em uma cópia da figura, onde está situada a imagem do peixe vista pelo observador.
 - b) Esta imagem é real ou virtual? Explique.
 - c) Se o observador desejar fisgar o peixe com um pequeno arpão, ele deverá apontar a arma para um ponto situado acima ou abaixo da posição onde ele vê o peixe?



Exercício 6.

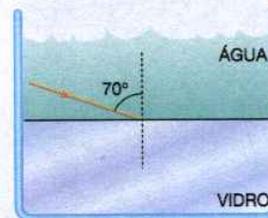
7. Uma estrela é vista, no céu, em uma certa posição acima do horizonte. A estrela se encontra realmente em uma posição mais afastada ou mais próxima do horizonte?
8. Imagine que a Terra perdesse totalmente a sua atmosfera. Nestas condições:
- O nascer do sol se daria mais cedo ou mais tarde do que atualmente?
 - E o pôr-do-sol?
 - Então, a duração do dia passaria a ser maior, menor ou não se alteraria?
9. a) Consultando a tabela 15-1, determine o valor do ângulo limite, L , para um raio de luz que passa do vidro para a água.
b) Copie a figura deste exercício em seu 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.



Exercício 9.

10. Vimos, no exercício anterior, que o ângulo limite entre o vidro e a água vale $L = 62^\circ$. Baseando-se nesta informação, podemos afirmar que o raio lu-

minoso, mostrado na figura deste exercício, será totalmente refletido? Explique.



Exercício 10.

11. Considere um diamante lapidado e sua imitação feita de vidro comum.
- O ângulo limite entre o diamante e o ar é maior ou menor do que o ângulo limite entre o vidro e o ar?
 - Sendo ambos iluminados com a mesma fonte de luz, em qual deles maior porcentagem desta luz será totalmente refletida nas faces internas?
 - Use a resposta da questão anterior para explicar por que o diamante brilha mais do que a imitação de vidro.
12. a) Nos desertos, em um dia de Sol muito quente, as camadas de ar próximas à areia têm índice de refração maior ou menor do que as camadas superiores?
b) Tendo em vista a resposta da questão anterior, explique por quê, no deserto, uma pessoa costuma ter a impressão de que existe um lençol d'água sobre a areia.

15.3. Dispersão da luz

O ÍNDICE DE REFRAÇÃO VARIA COM A COR DA LUZ

Suponha que, em uma experiência, fizéssemos incidir um raio de luz vermelha sobre um bloco de vidro e medíssemos o ângulo de incidência, θ_1 , e o ângulo de refração, θ_2 (fig. 15-14-a). Repetindo a experiência, fazendo incidir sobre o mesmo bloco, com o mesmo ângulo de incidência θ_1 , um raio de luz azul, observaríamos que este raio se refrataria com um ângulo de refração θ'_2 *um pouco menor* do que θ_2

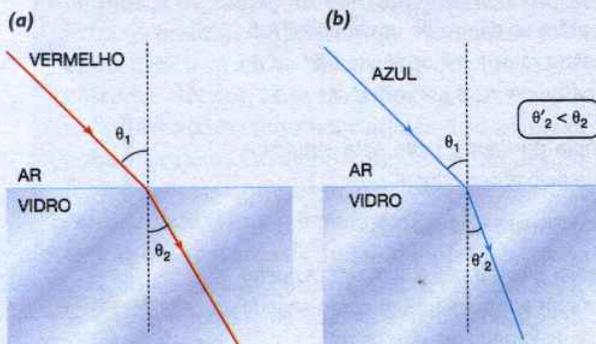


Fig. 15-14: O índice de refração do vidro, para a luz azul, é maior do que para a luz vermelha.

(fig. 15-14-b). Em outras palavras, a luz azul, ao se refratar, sofre maior desvio, aproximando-se mais da normal do que a luz vermelha. Este fato indica que o vidro apresenta um índice de refração maior para a luz azul do que para a luz vermelha.

Se repetirmos esta experiência usando luz de outra cor, observaremos que, para cada cor, o vidro apresenta um índice de refração diferente. Estas diferenças, entretanto, são muito pequenas, como se pode ver pela tabela 15-2. Qualquer outro meio material (água, plástico etc.) apresenta um comportamento semelhante ao do vidro, isto é, tem um índice de refração diferente para cada cor.

Índice de refração do vidro "Crown" para diversas cores	
COR	n
Vermelho	1,513
Amarelo	1,517
Verde	1,519
Azul	1,528
Violeta	1,532

Tabela 15-2.

DISPERSÃO DA LUZ BRANCA

Consideremos, agora, um estreito feixe de luz branca, como, por exemplo, a luz solar, incidindo em um bloco de vidro (fig. 15-15). Observa-se que esta luz branca, ao penetrar no vidro, refrata-se dando origem a um feixe colorido, no qual é possível perceber as seguintes cores: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil e violeta. A cor vermelha é a que sofre menor desvio e a violeta é a mais desviada de todas (fig. 15-15).

Esta experiência nos mostra, então, que a luz branca é constituída pela superposição de todas estas cores. Ao penetrar superpostas no vidro, cada cor sofre um desvio diferente, pois, como vimos, o índice de refração do vidro é diferente para cada uma delas. Por este motivo, o feixe refratado se apresenta colorido. Este fenômeno, no qual a luz branca se separa em várias cores, é denominado *dispersão da luz*. Portanto, ao se refratar, a luz branca se dispersa nas cores que a constituem.

A separação das cores em uma experiência como a da fig. 15-15 é pequena e, às vezes, difícil de ser observada. Podemos conseguir uma dispersão mais acentuada da luz branca se fizermos o feixe passar por duas refrações sucessivas. Isto ocorre quando se faz um feixe de luz branca incidir em um prisma de vidro, como mostra a fig. 15-16. O feixe se refrata ao penetrar no prisma e, novamente, ao emergir dele, o que provoca maior separação das cores. Este conjunto de cores, denominado espectro da luz branca, pode ser mais facilmente observado se for recebido em um anteparo (fig. 15-16).



Fig. 15-15: A luz branca, ao penetrar no vidro, sofre dispersão, separando-se nas diversas cores que a compõem.

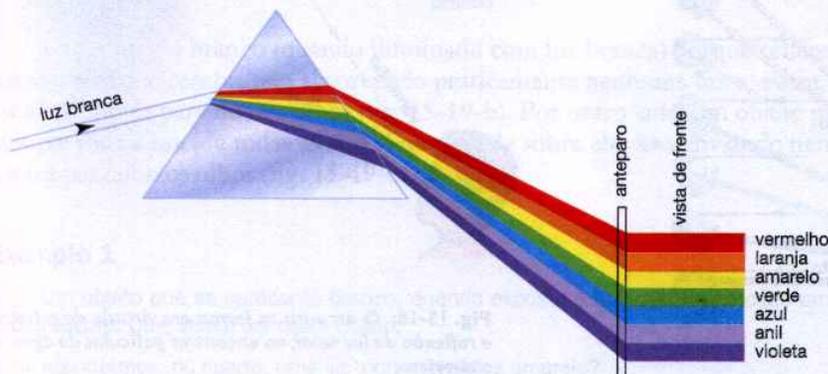


Fig. 15-16: Ilustração esquemática. Ao atravessar um prisma de vidro, um feixe de luz branca se decompõe, dando origem a um espectro colorido.

Recombinando todas as cores do espectro mostrado na fig. 15-16, obteremos novamente a luz branca. A fig. 15-17 mostra uma maneira de se obter esta recomposição: o feixe colorido, que emerge de um prisma, atravessa um segundo prisma invertido, o que provoca a superposição das cores, regenerando a luz branca.

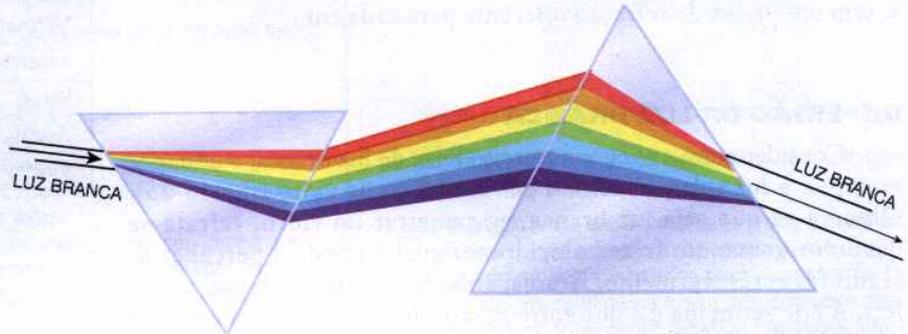


Fig. 15-17: Ilustração esquemática. Podemos obter luz branca, recombinando as cores do espectro.

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 isto, dizemos que cada feixe colorido do espectro é constituído de luz *monocromática*, ou seja, “luz de uma só cor”.

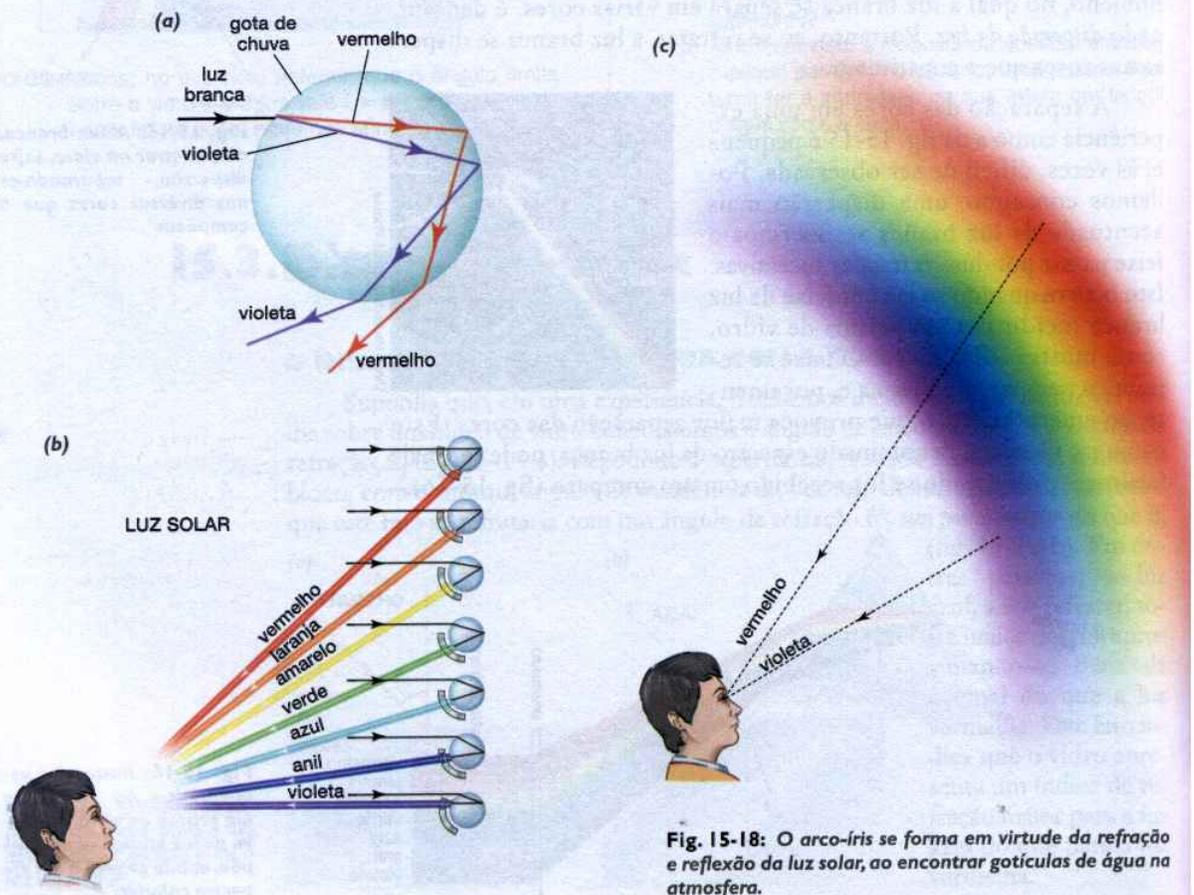
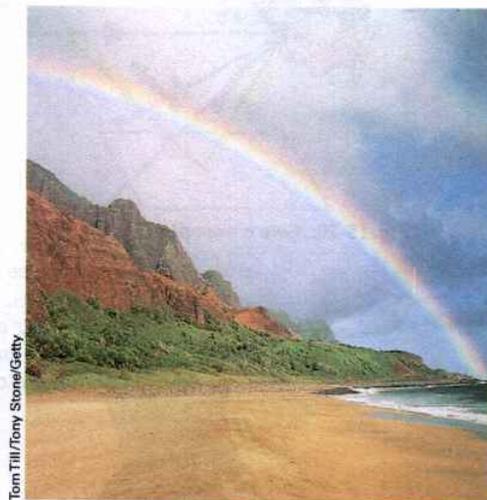


Fig. 15-18: O arco-íris se forma em virtude da refração e reflexão da luz solar, ao encontrar gotículas de água na atmosfera.

O ARCO-ÍRIS

Uma das conseqüências interessantes da dispersão da luz é a formação do arco-íris. Como você sabe, o arco-íris se forma quando a luz do Sol incide em gotículas de água em suspensão na atmosfera, durante ou após a chuva. 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 fig. 15-18-a, e, ao emergir, se refrata novamente, o que causa maior separação das cores. Evidentemente, esta 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 estas cores, ao atingirem o solo, estão muito separadas umas das outras. Como se pode ver pela fig. 15-18-b, 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, são provenientes de gotas situadas entre estes extremos.



Tom Till/Tony Stone/Getty

A COR DE UM OBJETO

De um modo geral, 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 verde, por exemplo, porque ele reflete preferencialmente a luz verde, absorvendo quase totalmente as demais cores, isto é, ele envia para nossos olhos apenas luz verde (fig. 15-19-a). Do mesmo modo, um objeto vermelho é aquele que reflete a luz vermelha e absorve todas as outras cores, podendo-se dizer o mesmo para um objeto azul, amarelo etc.

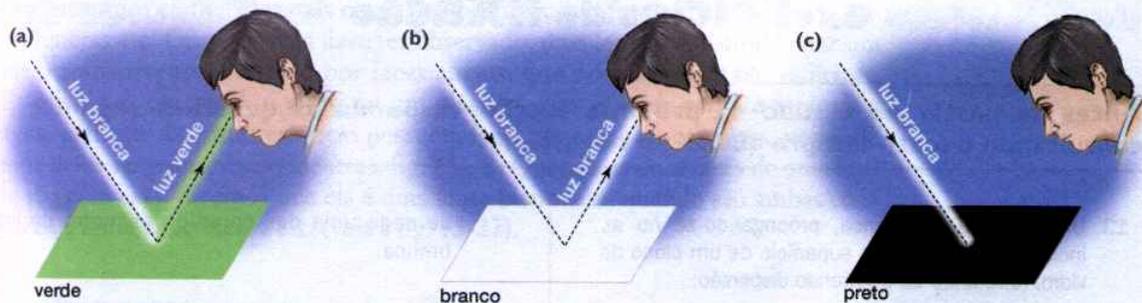


Fig. 15-19: Quando um objeto é iluminado com luz branca, ele absorve algumas cores e reflete outras.

Um objeto é branco (quando iluminado com luz branca) porque reflete todas as cores que recebe, não absorvendo praticamente nenhuma luz e, assim, envia a luz branca para nossos olhos (fig. 15-19-b). 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 (fig. 15-19-c).

Exemplo 1

Um objeto que se apresenta branco, quando exposto à luz solar, é colocado em um quarto escuro. Qual será a cor deste objeto:

- a) Se acendermos, no quarto, uma luz monocromática amarela?

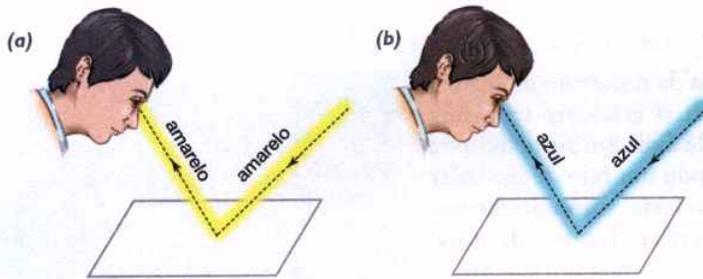


Fig. 15-20: Para o exemplo 1.

É claro que, se o objeto reflete todas as cores e está recebendo apenas o azul, ele refletirá esta cor e se apresentará com cor azul (fig. 15-20-b).

Concluímos, assim, que a cor de um objeto depende não apenas do objeto (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.

Se o objeto é branco quando exposto à luz solar, é porque ele tem a propriedade de refletir todas as cores. No quarto, este objeto estará recebendo apenas luz amarela e, evidentemente, só poderá refletir esta cor (fig. 15-20-a). Então, nestas condições, o objeto será visto com cor amarela.

b) Se acendermos, no quarto, uma luz monocromática azul?



Fig. 15-21: Para o exemplo 2.

Exemplo 2

Um objeto que se apresenta amarelo quando exposto à luz solar é colocado em um quarto escuro. Qual será a cor deste objeto se acendermos, no quarto, uma luz monocromática azul?

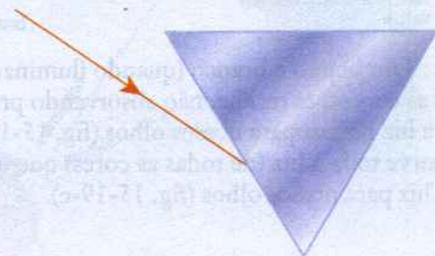
Este objeto, como sabemos, tem a propriedade de refletir apenas a luz amarela e absorver as demais cores do espectro da luz branca. Ao receber apenas luz azul, ele a absorverá (fig. 15-21). Assim, o objeto não enviará nenhuma luz para nossos olhos e se apresentará escuro.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

13. Um feixe de luz branca, propagando-se no ar, incide obliquamente na superfície de um bloco de vidro, refratando-se e sofrendo dispersão.
 - a) Qual a cor que sofre maior desvio?
 - b) Para qual cor o ângulo de refração é maior?
 - c) Para qual cor o índice de refração do vidro é maior?
14. a) A figura deste exercício mostra um raio de luz monocromática incidindo em um prisma de vidro. Mostre, em uma cópia da figura, a trajetória aproximada que este raio segue até atingir o anteparo.
 - b) Suponha que este raio de luz monocromática fosse substituído por um feixe de luz branca. Complete o desenho, mostrando a dispersão da luz e indique, sobre o anteparo, a posição

de cada uma das cores do espectro da luz branca.



Exercício 14.

15. Por que, ao observarmos um diamante iluminado com luz branca, é possível perceber cintilações coloridas?

16. Como vimos, a luz que incide em uma gota d'água em suspensão na atmosfera sofre dispersão, emergindo dela sob a forma de um feixe colorido. Na figura deste exercício estão mostrados os raios externos do feixe que emerge da gota d'água. Orientando-se pela fig. 15-18, responda:
- Qual é a cor do raio luminoso que está incidindo no olho do observador?
 - 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?
17. Você sabe que o círculo central da bandeira do Brasil, quando iluminado com luz branca, apresenta-se azul. Então, qual a cor preferencialmente refletida pelo círculo? E quais as cores que ele absorve?
18. 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:
- o círculo central;
 - o losango;
 - a faixa do círculo central e as estrelas;
 - o restante da bandeira.



Exercício 16.

15.4. Lentes esféricas

O QUE É UMALENTE

As lentes são dispositivos empregados em um grande número de instrumentos muito conhecidos, tais como óculos, máquinas fotográficas, microscópios, lunetas etc. Como você já deve ter observado, uma lente é constituída por um meio transparente, limitado por faces curvas, que normalmente são esféricas. Este 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 mostra a fig. 15-22. Quando as duas faces de uma lente são convexas, dizemos que ela é uma lente biconvexa; quando são ambas côncavas, a lente é bicôncava etc. (veja a fig. 15-22).

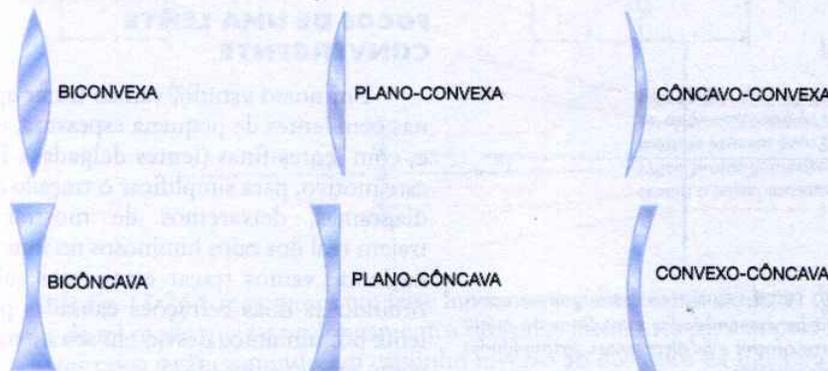


Fig. 15-22: Diversos tipos de lentes.

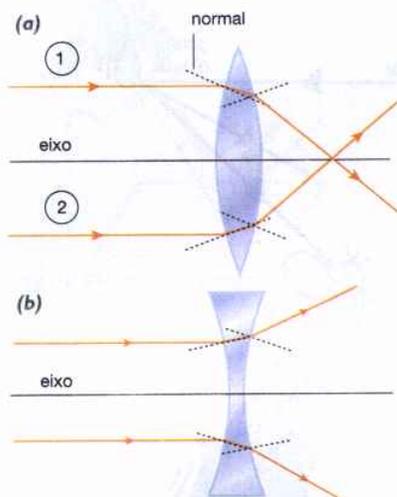


Fig. 15-23: Em (a) temos uma lente convergente e, em (b), uma lente divergente.

LENTE CONVERGENTES E DIVERGENTES

Uma reta perpendicular a ambas as faces de uma lente é denominada *eixo da lente*. Na fig. 15-23, mostramos, em (a), o eixo de uma lente biconvexa e, em (b), o eixo de uma lente bicôncava.

Considere um raio luminoso, como o raio 1 da fig. 15-23-a, incidindo na lente biconvexa, paralelamente ao seu eixo. Ao penetrar na lente, este raio se refrata, aproximando-se da normal e, ao emergir dela, torna a se refratar, afastando-se da normal. Então, o raio se desvia, como mostra a fig. 15-23-a, 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, esta lente *converge* para um ponto de seu eixo os raios luminosos que nela incidem paralelamente a ele. Por este motivo, a lente mostrada na fig. 15-23-a é denominada *lente convergente*.

A fig. 15-23-b mostra o que acontece com os raios que incidem paralelamente ao eixo de uma lente bicôncava. Observe que, neste caso, os raios são desviados de modo a se tornarem *divergentes*. Por isto mesmo, dizemos que a lente bicôncava é uma *lente divergente*. De um 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.

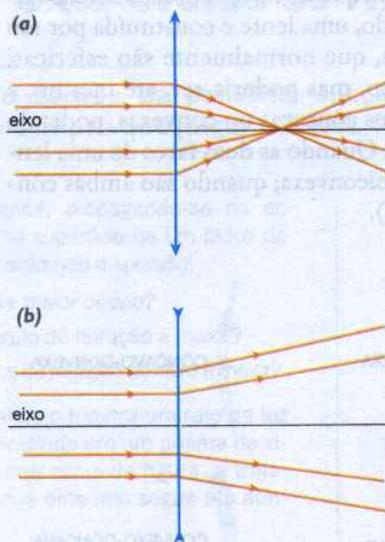


Fig. 15-24: As lentes convergentes apresentam extremidades mais finas do que a parte central e as divergentes, extremidades mais espessas.

As lentes costumam ser representadas da maneira indicada na fig. 15-24. Em (a), temos uma lente convergente, com as setas procurando dar a idéia de que ela é mais fina nas extremidades. Em (b), procura-se dar a idéia de que a lente é mais espessa nas extremidades (lente divergente).

FOCOS DE UMA LENTE CONVERGENTE

Em nosso estudo, vamos tratar apenas com lentes de pequena espessura, isto é, com lentes finas (lentes delgadas). Por este motivo, para simplificar o traçado dos diagramas, deixaremos de mostrar o trajeto real dos raios luminosos no interior da lente: vamos traçar estes raios substituindo as duas refrações causadas pela lente por um único desvio em seu interior, como mostra a fig. 15-25.

Na fig. 15-25-a, mostramos um feixe de luz, paralelo ao eixo, incidindo em uma lente convergente. Como já sabemos, este feixe, após atravessá-la, converge para um ponto do eixo. Este 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 fig. 15-25-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.

É fácil concluir que, se colocarmos uma fonte de luz em qualquer um dos focos da lente (fig. 15-25-c), os raios luminosos seguirão o caminho inverso, isto é, partindo do foco, atravessam a lente e emergem paralelamente ao seu eixo.

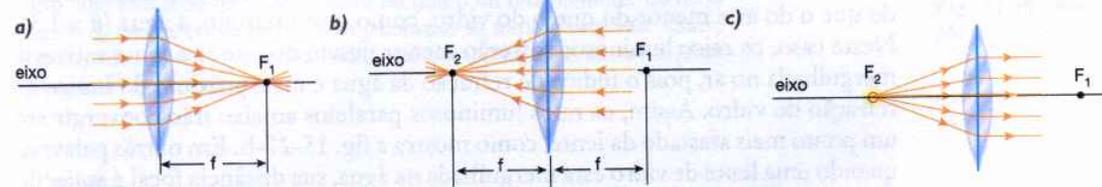


Fig. 15-25: Raios paralelos ao eixo de uma lente convergente, após atravessá-la, convergem para o foco (foco F_1 , em (a) e F_2 , em (b)). Os raios luminosos provenientes de um foco, após atravessarem a lente, tornam-se paralelos ao eixo (c).

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 de tal modo que seus prolongamentos se encontram sobre um ponto F_1 do eixo (fig. 15-26-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 (fig. 15-26-b) teremos raios emergentes que divergem de tal modo que seus prolongamentos se encontram no ponto F_2 . Este ponto é o 2º foco da lente divergente e está situado sobre o seu eixo a uma distância da lente também igual a f .

Profª Dra. Marisa A. Cavalcante/GOPEF/PUC-SP

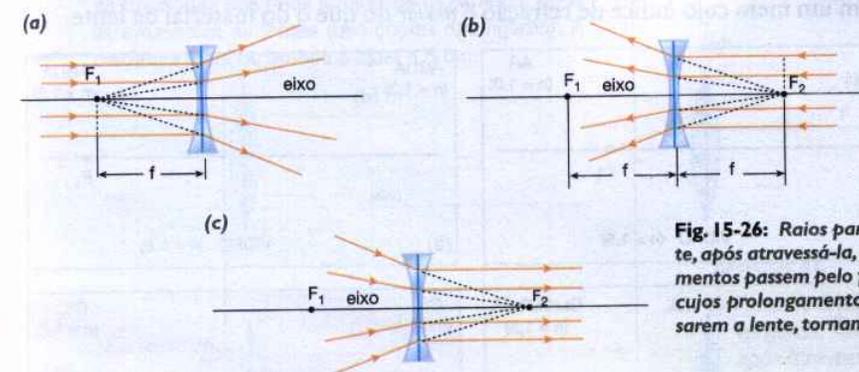
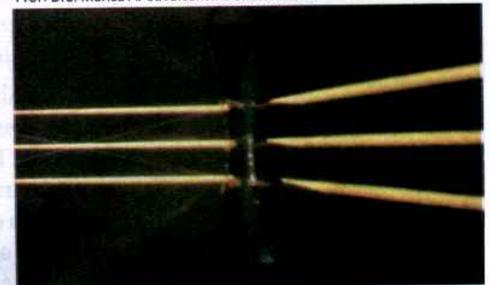


Fig. 15-26: Raios paralelos ao eixo de uma lente divergente, após atravessá-la, divergem de modo que seus prolongamentos passem pelo foco (foco F_1 , em (a) e F_2 , em (b)). Raios cujos prolongamentos passam por um foco, após atravessarem a lente, tornam-se paralelos ao eixo (c).

Na fig. 15-26-c mostramos um feixe luminoso incidindo em uma lente divergente, de tal modo que os prolongamentos dos raios incidentes passem pelo foco F_2 . Estes raios estão seguindo um caminho inverso ao dos raios da fig. 15-26-b.

Portanto, após atravessarem a lente, eles emergem paralelamente ao seu eixo. Este mesmo resultado seria obtido se os prolongamentos dos raios incidentes passassem pelo foco F_1 (caminho inverso ao dos raios da fig. 15-26-a).

A DISTÂNCIA FOCAL DEPENDE DO MEIO QUE ENVOLVE ALENTE

Até aqui, supusemos que as lentes que estudamos estavam envolvidas por ar. Vamos examinar, agora, o que ocorrerá quando a lente estiver mergulhada em um 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 (fig. 15-27-a).

Suponha esta lente mergulhada em um meio cujo índice de refração é maior do que o do ar e menor do que o do vidro, como, por exemplo, a água ($n = 1,3$). Neste caso, os raios luminosos sofrerão menor desvio do que se a lente estivesse mergulhada 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 irão convergir em um ponto mais afastado da lente, como mostra a fig. 15-27-b. Em outras palavras, quando uma lente de vidro está mergulhada na água, sua distância focal é *maior* do que se ela estivesse no ar.

Examinemos o caso em que a lente está imersa em um meio de índice de refração igual ao do vidro (a glicerina, por exemplo). Nestas condições, 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 (fig. 15-27-c), isto é, a distância focal da lente torna-se infinitamente grande.

Finalmente, consideremos a lente envolvida por um meio cujo índice de refração é *maior* do que o do vidro, como, por exemplo, o bissulfeto de carbono ($n = 1,6$). Temos, agora (índice de refração do meio maior do que o da lente), uma situação inversa àquela representada na fig. 15-27-b (índice de refração do meio menor do que o da lente). Observaremos, então, que um feixe de raios luminosos, paralelos ao eixo, irá divergir ao atravessar a lente (fig. 15-27-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.

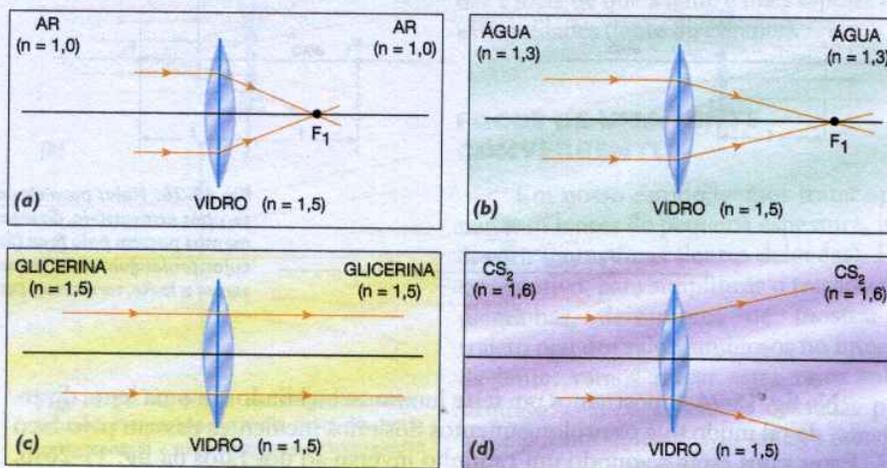


Fig. 15-27: A distância focal de uma lente depende do meio no qual ela está mergulhada.

Efeitos semelhantes são observados se uma lente divergente (no ar) for mergulhada em outros meios materiais. Por exemplo: se uma lente de vidro ($n = 1,5$), que é divergente no ar, for mergulhada em bissulfeto de carbono ($n = 1,6$), ela passará a ser uma lente convergente.

Exemplo

Suponha que, no interior de um bloco de vidro, exista uma bolha de ar, de faces convexas, como mostra a fig. 15-28. Se fizermos um feixe de luz atravessar a bolha, ela se comportará como uma lente. Esta "lente de ar" biconvexa é convergente ou divergente?

Sabemos que uma lente biconvexa de vidro, mergulhada no ar, é convergente. Em nosso caso, temos uma situação inversa: uma lente de ar envolvida por vidro, isto é, temos uma lente biconvexa mergulhada em um meio cujo índice de refração é maior do que o da própria lente. Como já sabemos, nestas condições a lente biconvexa se torna divergente. Assim, a bolha de ar, envolvida por vidro, se comportará como uma lente divergente (fig. 15-28).

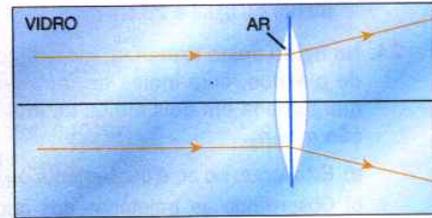


Fig. 15-28: Para o exemplo da seção 15.4.

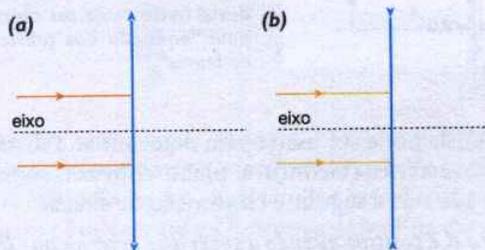
exercícios de fixação **exercícios de fixação** exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

19. Mostre, com um desenho, o aspecto das lentes seguintes, dizendo se cada uma delas é convergente ou divergente:

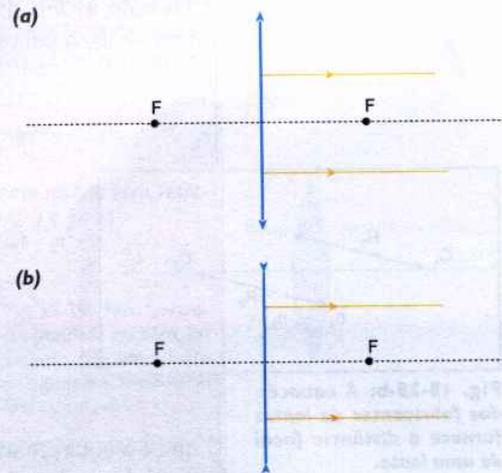
- a) lente plano-convexa
- b) lente bicôncava
- c) lente côncavo-convexa

20. Complete as figuras deste exercício, desenhando as trajetórias dos raios luminosos mostrados, após atravessarem as lentes (use cópias das figuras). A distância focal de ambas é igual a 5 cm.



Exercício 20.

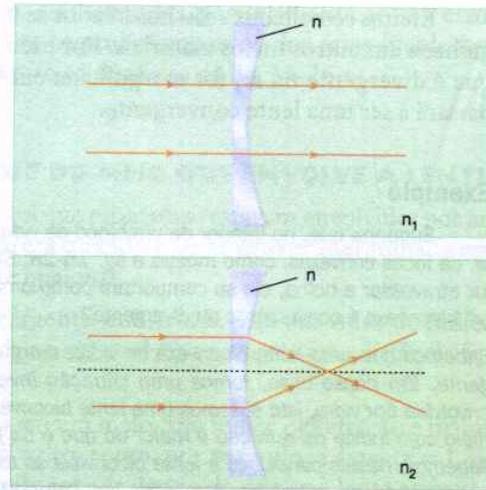
21. Na figura deste exercício mostramos duas lentes, as posições de seus focos e raios luminosos que emergem dessas lentes. Desenhe, em uma cópia da figura, os raios incidentes que deram origem a estes raios emergentes.



Exercício 21.

22. a) Fazendo a luz solar incidir sobre uma lente convergente, verifica-se que os raios luminosos, após atravessá-la, convergem para um ponto situado a 10 cm dela. Qual é o valor da distância desta lente? Por quê?
- b) Virando-se a lente, isto é, fazendo a luz solar incidir na outra face, a que distância da lente irão convergir os raios solares? Por quê?

23. Uma lente plano-convexa é feita de vidro, cujo índice de refração vale 1,5. No ar, a distância focal desta lente é de 20 cm.
- Esta lente, no ar, é convergente ou divergente?
 - E quando mergulhada no álcool, ela é convergente ou divergente (consulte a tabela 15-1)?
 - A distância focal desta lente, no álcool, é maior, menor ou igual a 20 cm?
24. Na figura deste exercício, 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 .
- Esta lente, no ar, é convergente ou divergente?
 - Observando as trajetórias dos raios luminosos mostrados na figura, diga se o valor de n_1 é maior, menor ou igual a 1,7.
 - E o valor de n_2 , é maior, menor ou igual a 1,7?



Exercício 24.

Equação dos fabricantes de lentes

Na secção 15.4 analisamos, de maneira qualitativa, a influência do meio que envolve a lente no valor de sua distância focal. O estudo quantitativo desta 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 fig. 15-28-b). Usando as leis da refração, é possível mostrar que a distância focal dessa lente é dada pela seguinte equação:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

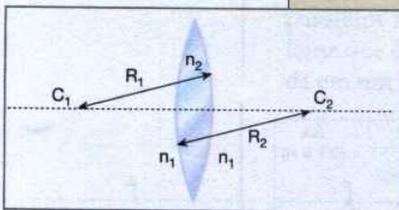


Fig. 15-28-b: A equação dos fabricantes de lentes fornece a distância focal de uma lente.

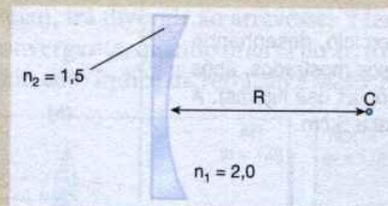


Fig. 15-28-c: A distância focal desta lente pode ser calculada pela “equação dos fabricantes de lentes”.

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 é positivo quando a superfície externa que limita a lente for convexa e, negativo, quando ela for côncava.

Para ilustrar o uso desta equação, resolveremos o seguinte exemplo: 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 desta lente?

Uma lente deste tipo está mostrada na fig. 15-28-c. 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:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{1,5}{2,0} - 1 \right) \left(\frac{1}{\infty} - \frac{1}{50} \right) = (0,75 - 1) (0 - 0,02)$$

logo, $\frac{1}{f} = 0,0050$ donde $f = 200$ cm

Observe que, apesar de ter essa lente as extremidades (os bordos) mais espessas do que sua parte central, ela é convergente (f é positivo). Isto 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 deste assunto.

15.5. 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 destas imagens pode ser feito através de diagramas ou de equações, como fizemos para os espelhos esféricos. Para a construção dos diagramas usaremos, também aqui, os raios principais, que nos permitem localizar com maior facilidade a posição da imagem de um ponto.

RAIOS PRINCIPAIS NAS LENTES

Sabemos que para localizar a imagem de um ponto precisamos conhecer a trajetória de apenas *dois* raios luminosos que são emitidos pelo ponto. Então, vamos usar, no traçado de nossos diagramas, os dois raios que apresentaremos a seguir e cujo comportamento, ao atravessarem a lente, já foi visto anteriormente.

1º) Um raio luminoso que incide em uma lente convergente, paralelamente ao seu eixo, refrata-se passando pelo 1º foco F_1 (fig. 15-29-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 (fig. 15-29-b).

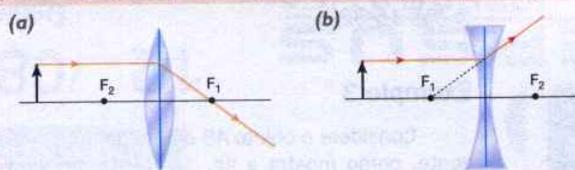


Fig. 15-29: Raio luminoso, paralelo ao eixo, incidindo em uma lente convergente e em uma lente divergente.

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 (fig. 15-30-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 (fig. 15-30-b).

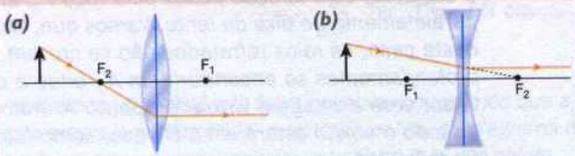


Fig. 15-30: Raios luminosos que emergem paralelamente ao eixo, após atravessarem uma lente convergente e uma lente divergente.

Nos exemplos seguintes, usaremos estes dois raios principais para localizar a imagem de um objeto fornecida por uma lente.

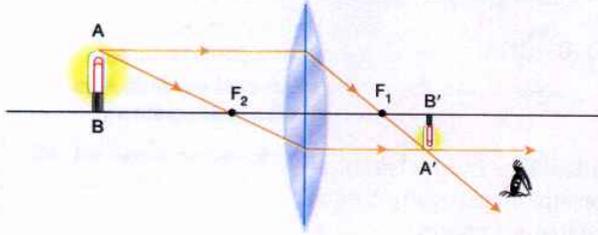


Fig. 15-31: Para o exemplo 1.

Para localizar a imagem do ponto A (extremidade do objeto) traçamos, a partir deste 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 fig. 15-31, tudo se passa como se estes 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, é fácil perceber 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. Evidentemente, poderíamos receber esta imagem em um anteparo colocado na posição $A'B'$.

Exemplo 1

O objeto AB da fig. 15-31 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 deste 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 fig. 15-31, tudo se passa como se estes 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, é fácil perceber 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. Evidentemente, poderíamos receber esta imagem em um anteparo colocado na posição $A'B'$.

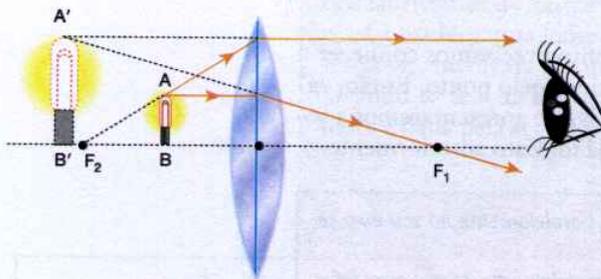


Fig. 15-32: Para o exemplo 2.

Exemplo 2

Suponha que o objeto AB do exemplo anterior fosse colocado, agora, entre o foco e a lente, como mostra a fig. 15-32. 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 estes 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 (fig. 15-32).

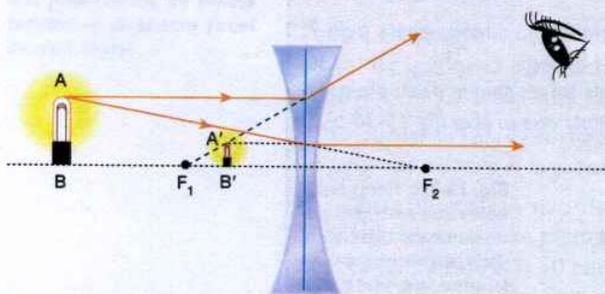


Fig. 15-33: Para o exemplo 3.

Exemplo 3

Considere o objeto AB diante de uma lente divergente, como mostra a fig. 15-33. Como será a sua imagem?

Observe na fig. 15-33 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, cuja direção passa pelo foco F_2 , emerge paralelamente ao eixo da lente. Vemos que, também neste 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 fig. 15-33, é virtual, direta e menor do que o objeto.

A EQUAÇÃO DAS LENTES

Com raciocínio semelhante ao desenvolvido no capítulo anterior, é possível demonstrar que as relações estabelecidas para os espelhos esféricos, na secção 14.6, 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 (fig. 15-34), 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

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i}$$

Esta equação poderá ser aplicada tanto a lentes convergentes como a lentes 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

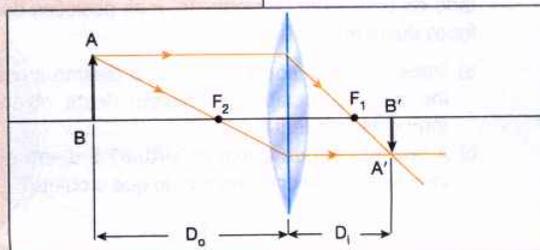


Fig. 15-34: A equação $1/f = 1/D_o + 1/D_i$ é válida também para as lentes.

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, virá

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{D_i}{D_o} \text{ ou } \frac{3,0}{15} = \frac{D_i}{30} \quad \text{donde} \quad D_i = 6,0 \text{ cm}$$

Logo, a imagem está situada a 6,0 cm da lente.

b) Qual é a distância focal da lente?

A equação $1/f = 1/D_o + 1/D_i$ nos permitirá calcular f , pois conhecemos D_o e D_i . Ao substituir os valores numéricos nesta 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,

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i} \text{ ou } \frac{1}{f} = \frac{1}{30} + \frac{1}{(-6,0)}$$

$$\frac{1}{f} = -\frac{4,0}{30} \text{ ou } f = -7,5 \text{ cm}$$

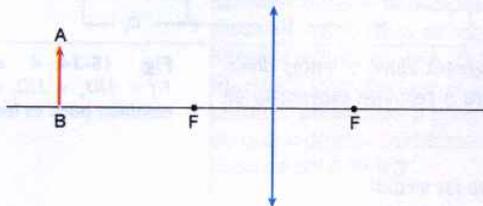
Como obtivemos uma distância focal negativa, concluímos que a lente é divergente. A situação deste exemplo corresponde, qualitativamente, ao diagrama da fig. 15-33: uma lente divergente formando uma imagem virtual, menor do que o objeto.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima secção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

25. A figura deste exercício mostra um objeto AB , afastado de uma lente convergente, e as posições dos focos desta lente.

- Trace, em uma cópia da figura, o diagrama que lhe permite localizar a imagem deste objeto fornecida pela lente.
- A imagem obtida é real ou virtual? É direta ou invertida? É maior ou menor do que o objeto?



Exercício 25.

26. Suponha que o objeto do exercício anterior fosse aproximado da lente, sendo colocado a uma distância D_o compreendida entre f e $2f$.

- Trace o diagrama, localizando a imagem do objeto.
- 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?

27. Considere, ainda, a lente e o objeto do exercício 25. Coloque, agora, AB entre o foco e a lente.

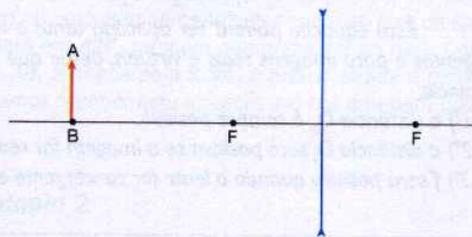
- Localize, construindo um diagrama, a imagem do objeto nesta posição.
- Descreva as características desta imagem.

28. Um objeto AB encontra-se diante de uma lente divergente, como mostra a figura deste exercício.

a) Construa um diagrama para obter a imagem deste objeto e descreva as características desta imagem.

b) Aproxime o objeto, colocando-o entre o foco e a lente. Trace o diagrama, localize a imagem e descreva suas características.

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?



Exercício 28.

29. No exercício 25, 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.

- Usando a equação das lentes, determine a distância, D_i , da imagem à lente.
- Qual o aumento fornecido pela lente?
- Qual o significado da resposta à questão (b)?
- Suas respostas deste exercício concordam com o diagrama traçado no exercício 25?

30. Na figura do exercício 28, suponha que a distância focal da lente seja de 4 cm e que o objeto esteja a 12 cm dela.

- Calcule a distância D_i da imagem à lente.
- Determine o aumento fornecido pela lente.
- Se o tamanho do objeto é $AB = 10$ cm, qual é o tamanho da imagem $A'B'$?

15.6. Instrumentos óticos

Nesta secção, vamos analisar o funcionamento de alguns instrumentos óticos mais simples, usando os conhecimentos que adquirimos sobre a formação de imagens nas lentes. Iniciaremos com o estudo simplificado do olho humano, que, sem dúvida, é um instrumento ótico muito importante para nós.

O OLHO HUMANO

De maneira simplificada, podemos considerar o olho humano como constituído de uma lente biconvexa, denominada *cristalino*, situada na região anterior do globo ocular (fig. 15-35). No fundo deste 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*.

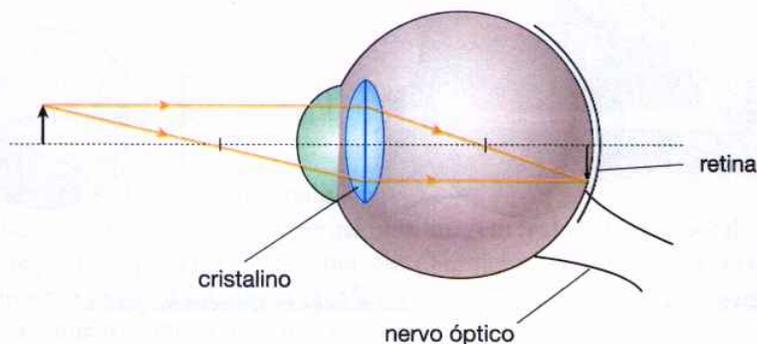


Fig. 15-35: Esquema mostrando a formação da imagem em um olho humano.

Quando olhamos para um objeto, o cristalino (lente convergente) forma uma imagem real e invertida deste objeto, localizada exatamente sobre a retina (fig. 15-35) e, nestas condições, enxergamos nitidamente o objeto. Embora a imagem formada na retina seja invertida, a mensagem levada ao cérebro passa por processos complicados, 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. Isto 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 isto ocorra, a distância focal do cristalino deve ser diferente para cada posição do objeto. Este efeito é produzido pela ação dos músculos do olho, que, atuando sobre o cristalino, provocam alterações em sua curvatura. Esta propriedade do olho é denominada *acomodação visual*.

Para muitas pessoas, a imagem de um objeto não se forma exatamente sobre a retina e, assim, estas pessoas não enxergam nitidamente o objeto. O motivo pelo qual isto ocorre pode ser ou uma deformação do globo ocular, ou uma acomodação defeituosa do cristalino.

Em algumas pessoas, a imagem se forma na frente da retina: estas são as pessoas *miopes* (fig. 15-36-a). Para se corrigir este defeito, isto é, para que se tenha a imagem do objeto formada sobre a retina, uma pessoa que tem miopia deve usar óculos com lentes *divergentes* (fig. 15-36-b).

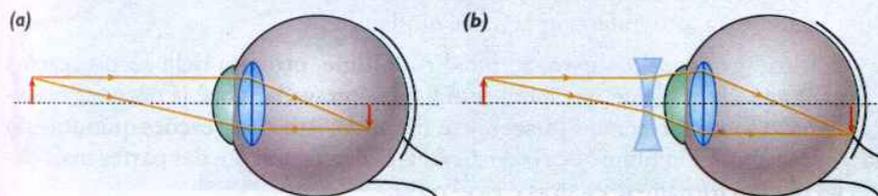
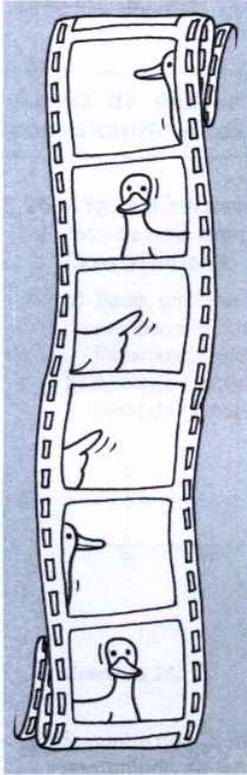


Fig.15-36: Uma pessoa míope deve usar óculos com lentes divergentes.



A retina de nossos olhos, ao ser sensibilizada pela luz proveniente de um objeto, conserva esta imagem durante cerca de 0,1 s. Então, quando duas ou mais imagens se superpõem na retina, com intervalo igual ou inferior a este, temos a sensação de continuidade. Este fato é usado na televisão e no cinema para nos dar a impressão de que os objetos que aparecem na tela estão em movimento. Por exemplo: na figura, vemos vários instantâneos sucessivos de um objeto em movimento. Se esses instantâneos forem projetados, de tal modo que o intervalo de tempo entre a projeção de cada um e o seguinte seja inferior a 0,1 s, veremos o objeto na tela como se estivesse em movimento.

Por outro lado, em outras pessoas, os raios luminosos são interceptados pela retina antes de se formar a imagem (a imagem se formaria atrás da retina – fig. 15-37-a). Isso ocorre porque essas pessoas têm um globo ocular mais curto do que o normal (*hipermetropia*) ou uma perda da capacidade de acomodação do olho com a idade (“vista cansada”). Este defeito é corrigido usando-se óculos com lentes *convergentes* (fig. 15-37-b).

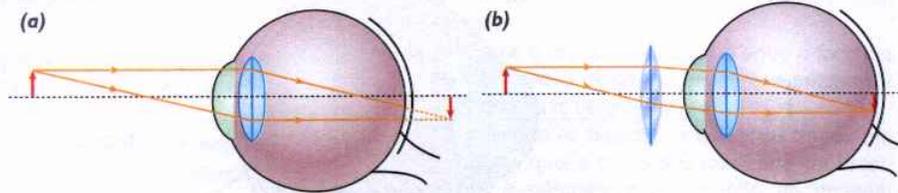


Fig. 15-37: Uma pessoa hipermetrope deve usar óculos com lentes convergentes.

A MÁQUINA FOTGRÁFICA

A fig. 15-38 mostra esquematicamente a formação da imagem em uma máquina fotográfica. Este instrumento, como se pode perceber, funciona de maneira muito semelhante ao olho humano. Um sistema de lentes, denominado *objetiva* da máquina, comporta-se como uma lente convergente que forma 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.

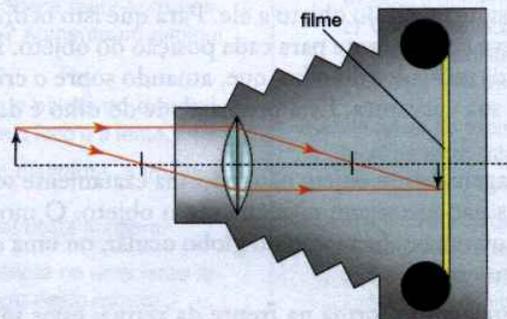


Fig. 15-38: Ilustração esquemática. Na máquina fotográfica, a imagem real de um objeto se forma sobre o filme.

Quando a focalização não é bem feita, a imagem não se forma exatamente sobre o filme 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. Você já deve ter observado que o filme apresenta 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.

O PROJETOR

Do mesmo modo que a máquina fotográfica, o projetor de diapositivos (projetor de *slides*) possui um sistema de lentes que atua como uma lente convergente para formar uma imagem real de um objeto. Neste caso, o objeto é um *slide*, fortemente iluminado, colocado próximo ao foco da lente, como mostra a fig. 15-39.

Nestas condições, vemos pelo diagrama que a lente do projetor forma uma imagem real e muito maior do que o *slide*, que pode ser projetada sobre uma tela. O projetor também possui um dispositivo que nos permite aproximar ou afastar a lente do *slide*, para que a imagem se forme exatamente sobre a tela, ou seja, para que a projeção se faça com nitidez.

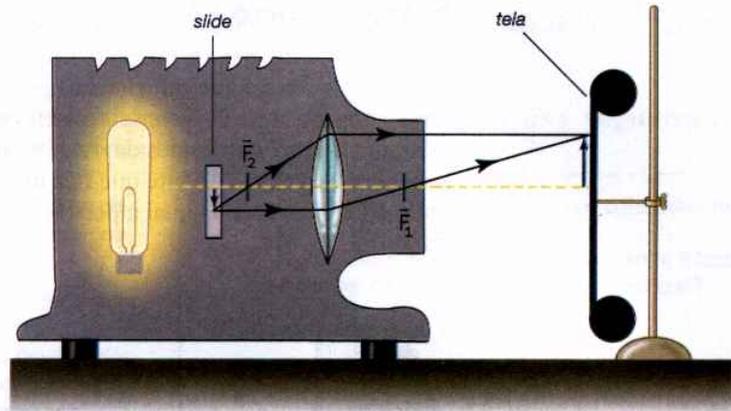


Fig. 15-39: O projetor fornece uma imagem real, aumentada e invertida, do slide.

A LUPA

Vimos, no exemplo 2 da secção anterior, que, quando um objeto é colocado entre uma lente convergente e o seu foco, obtém-se uma imagem virtual e maior do que o objeto (fig. 15-32). 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 nestas condições, produzindo uma imagem virtual aumentada, dizemos que ela é uma *lupa* ou, como se diz vulgarmente, uma *lente de aumento* (fig. 15-40).



Fig. 15-40: Usando uma lupa podemos ver uma imagem virtual e aumentada do objeto.

O MICROSCÓPIO

Quando desejamos observar objetos muito pequenos, necessitando de um aumento maior do que o fornecido pelas lupas, usamos um *microscópio*. Os microscópios são aparelhos complexos mas que, simplificada, podem ser considerados como 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* (fig. 15-41).

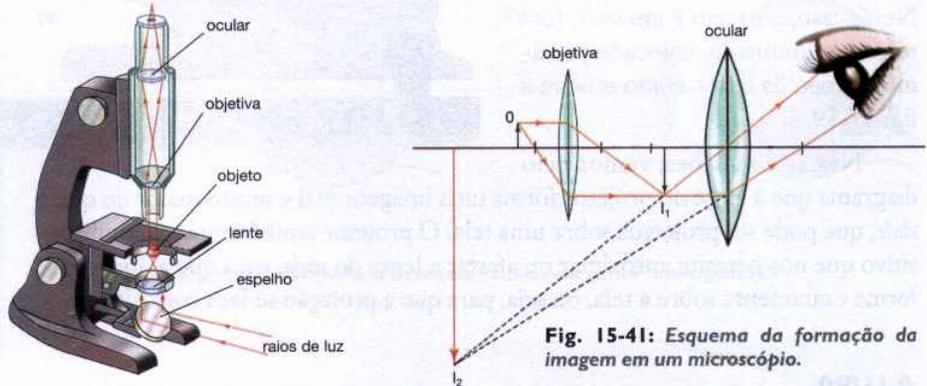


Fig. 15-41: Esquema da formação da imagem em um microscópio.

O objeto é colocado próximo ao foco da objetiva, que forma uma primeira imagem, I_1 , real e ampliada, como mostra a fig. 15-41. Esta imagem I_1 forma-se entre a ocular e o seu foco e funciona como um objeto para esta lente. Então, a ocular fornece uma imagem final, I_2 , virtual, ainda mais ampliada. Em resumo, a ocular atua como uma lupa, ampliando a imagem fornecida pela objetiva, que já era ampliada em relação ao objeto. Então, se, por exemplo, 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.

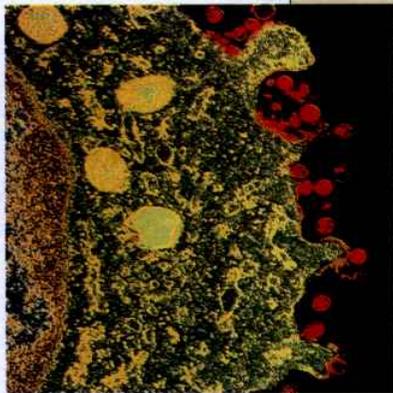


Imagem do vírus da Aids (pequenas esferas vermelhas), fornecida por um microscópio eletrônico. A área verde é o citoplasma de um linfócito infectado pelo vírus.

Microscopia moderna

Com o microscópio que acabamos de analisar, que costuma ser designado como microscópio óptico, o máximo aumento que se consegue é cerca de 2 000 vezes. Conseqüentemente, não podemos usar esse tipo de microscópio para examinar, com nitidez, objetos de dimensões inferiores a $4\,000 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 1 \text{ angstrom} = 0,0000000001 \text{ m} = 10^{-10} \text{ m}$). A maioria das células vivas tem dimensões superiores a este valor e, portanto, o microscópio óptico pode ser usado para seu estudo.

Existem, entretanto, muitas estruturas que são bem menores que $4\,000 \text{ \AA}$, como as moléculas complexas que forma 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 obterem-se aumentos de até 1 milhão de vezes, permitindo, então, que sejam observadas estruturas da ordem de 10 \AA , como um vírus ou uma grande molécula.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, **responda** às questões seguintes, **consultando o texto** sempre que julgar necessário.

31. Uma pessoa não consegue ver nitidamente os objetos porque suas imagens se formam entre o cristalino e a retina.
- Como se denomina o defeito de visão desta pessoa?
 - Para corrigir este defeito, a pessoa deverá usar óculos com lentes convergentes ou divergentes?
32. Suponha que você esteja observando nitidamente um objeto distante. Logo após, você passa a observar, também nitidamente, um objeto próximo. Na acomodação de seu olho, a distância focal do cristalino aumentou ou diminuiu?
33. a) Para se fotografar um objeto, ele poderia ser colocado entre a objetiva da máquina e o seu foco? Por quê?
 b) Ao revelarmos um filme, as partes mais escuras do negativo foram aquelas que receberam mais luz ou menos luz?
 c) Então, as partes mais escuras do negativo correspondem às partes mais claras ou mais escuras do objeto fotografado?
34. a) No projetor, os *slides* devem ser colocados de cabeça para baixo. Por quê?
 b) Além disso, o *slide* deve estar situado entre o foco e o dobro da distância focal da lente. Por quê?
35. Considerando a fig. 15-40, responda:
- A lupa que a pessoa está usando é constituída por uma lente convergente ou divergente?
 - A lagarta, observada através da lupa, está situada a uma distância da lente maior, menor ou igual à sua distância focal?
 - A imagem da lagarta, vista pelo observador, é real ou virtual?
36. a) No microscópio, o objeto é normalmente colocado muito próximo da objetiva. A distância do objeto a esta lente, entretanto, deve ser maior, menor ou igual à sua distância focal? Por quê?
 b) Qual é o objeto para a ocular de um microscópio?
 c) A imagem final, fornecida pela ocular do microscópio, é real ou virtual?
 d) A imagem final, vista por um observador em um microscópio, é direta ou invertida em relação ao objeto colocado diante da objetiva?

um tópico especial para você aprender um pouco mais

15.7. As idéias de Newton sobre a natureza da luz e as cores dos corpos

Embora os trabalhos de Newton relacionados com a Mecânica tenham sido aqueles que lhe deram maior renome, os estudos e teorias que ele elaborou no campo da Ótica foram também muito importantes. Em sua obra, *Opticks*, publicada em 1704, Newton desenvolveu um estudo bastante amplo sobre os fenômenos luminosos. Duas das idéias defendidas por Newton neste tratado serão apresentadas e comentadas a seguir: sua concepção sobre a natureza da luz e uma teoria das cores dos corpos.

ORIGEM DA POLÊMICA NEWTON X HUYGHENS

Conforme foi dito no início do capítulo 15, desde a Antiguidade alguns filósofos gregos acreditavam que a luz fosse constituída de pequenas partículas, propagando-se em linha reta com velocidade muito grande. Estas idéias 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.



SPL/Stock Photos

Christian Huygens (1629-1695)

Filho de uma rica e importante família holandesa, estudou na Universidade de Leiden, morou vários anos em Paris, sendo 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 corpos.

Estas 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 idéia 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). Esta divisão de opiniões provocou uma intensa polêmica entre estes dois eminentes cientistas, que se tornou célebre na história da Física. Um esclarecimento para esta disputa só veio a ser alcançado no século XIX, muitos anos após a morte de Huyghens e de Newton.

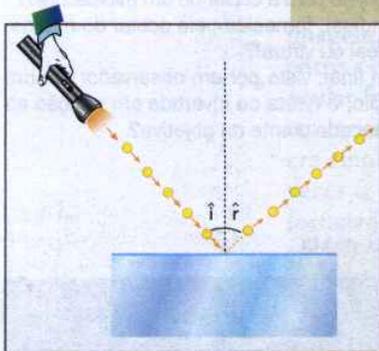


Fig. 15-42: Esquema de reflexão da luz segundo o modelo corpuscular de Newton.

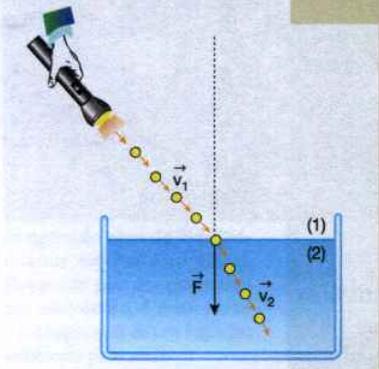


Fig. 15-43: De acordo com a teoria corpuscular, a velocidade da luz na água deveria ser maior do que no ar.

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 encontrarem uma superfície lisa (fig. 15-42).

Para descrever como Newton explicava o fenômeno da refração, consideremos a fig. 15-43.

Nesta figura, um feixe luminoso, propagando-se no ar (meio 1) refrata-se ao penetrar na água (meio 2), aproximando-se da normal, como já sabemos. Segundo Newton, isto 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 (fig. 15-43). Portanto, a ação desta força sobre as partículas seria responsável pela refração do feixe luminoso.

Observe que, como consequência desta ação, as partículas teriam sua velocidade aumentada ao penetrarem na água, isto é, deve-se ter $v_2 > v_1$ na fig. 15-43. 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 esta conclusão era correta, pois não eram conhecidos métodos capazes de medir a velocidade da luz com precisão suficiente.

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, isto é, 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* (que também será estudado no capítulo 16). 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 esta disputa que vinha se prolongando por mais de 150 anos. Como foi mencionado no Tópico Especial do capítulo anterior, neste 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, conforme vimos, ao explicar a refração, previa exatamente o contrário. Desta maneira, as idéias 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.

NEWTON OBSERVA A DISPERSÃO DA LUZ BRANCA

O primeiro trabalho científico publicado por Newton (em 1672) apresentava suas idéias sobre a natureza das cores. A interpretação dada por ele, neste trabalho, sobre a dispersão da luz branca e sua teoria sobre as cores dos corpos permanece aceita até os dias atuais, ao contrário do que ocorreu com o 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 o aparecimento das cores era devido a impurezas que o feixe recebia ao atravessar o vidro.

Trabalhando no polimento de algumas peças de vidro para estudos de Ótica, Newton conseguiu obter um prisma triangular, interessando-se em realizar a famosa experiência da dispersão da luz branca, sobre a qual ele já tinha ouvido falar. Descreveu, então, esta experiência com as seguintes palavras:

“... tendo escurecido o meu quarto, fiz um pequeno orifício na janela, de modo a deixar penetrar uma quantidade conveniente de luz solar. Coloquei o prisma em frente ao orifício, de maneira que a luz, ao se refratar, incidisse na parede oposta. Foi um agradável divertimento observar as intensas e vivas cores ali projetadas...” (veja a fig. 15-44).



Fig. 15-44: 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 este conjunto de cores. Como não estivesse de acordo com a idéia de que as cores são produzidas por impurezas acrescentadas à luz branca, ele realizou uma experiência que mostrou ser falsa esta antiga teoria: deixando apenas uma das cores do espectro passar através de um segundo prisma, Newton verificou que este 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 idéias de Newton são até hoje consideradas corretas, tendo sido apresentadas na seção 15.3 deste capítulo.

A TEORIA DE NEWTON SOBRE AS CORES DOS CORPOS

No mesmo trabalho em que apresentou esta idéia 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 15.3. Em suas próprias palavras, Newton afirmava:

“As cores de todos os corpos da natureza são devidas simplesmente ao fato de que eles refletem a luz de uma certa cor em maior quantidade do que as outras.”

Isto significa, como vimos, que um corpo iluminado com luz branca se apresenta verde, por exemplo, porque ele absorve grande parte das demais cores que constituem a luz branca, refletindo preferencialmente a luz verde.

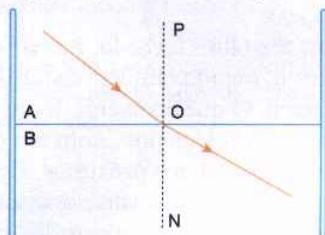
A teoria das cores de Newton encontrou violenta oposição por parte de vários cientistas da época, especialmente do físico inglês R. Hooke. Estas objeções causaram tamanhos dissabores a Newton que ele, para evitar envolver-se em outras polêmicas, resolveu não mais divulgar seus trabalhos. Isto fez com 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*, contendo suas teorias sobre as propriedades da luz, ele aguardou a morte de Hooke. De fato, Hooke faleceu em 1703 e esta obra de Newton só veio a ser editada em 1704.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

- | | |
|---|--|
| <p>37. Qual foi a comparação feita por Leonardo da Vinci que o levou a sugerir que a luz poderia ter uma natureza ondulatória?</p> <p>38. Explique, sucintamente, a origem da polêmica entre Newton e Huyghens.</p> | <p>39. De acordo com o modelo corpuscular, a velocidade da luz:</p> <p>a) Na água deveria ser maior, menor ou igual à sua velocidade no ar?</p> <p>b) No vidro deveria ser maior, menor ou igual à sua velocidade na água?</p> |
|---|--|

40. A figura deste exercício representa um feixe de luz sofrendo refração ao passar do meio A para o meio B.



Exercício 40.

- 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?
- 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?
- De acordo com o estudo feito neste capítulo, medidas experimentais da velocidade da luz em A e B confirmariam a resposta da questão (b)?

- Por que a experiência de Foucault, descrita no Tópico Especial do capítulo anterior, fez com que fosse definitivamente abandonado o modelo corpuscular da luz?
- Algumas pessoas costumam afirmar que Newton foi o primeiro a observar a dispersão da luz branca, ao atravessar um prisma de vidro. Consulte o texto deste Tópico e verifique se isto é verdadeiro.
- Descreva a experiência realizada por Newton, na qual ficou evidenciado que um prisma de vidro não acrescenta impurezas à luz que passa através dele.
- Por que razão a obra *Opticks* de Newton, foi publicada tardiamente, em 1704, muitos anos após ter ele elaborado as idéias que ali foram apresentadas?
- Faça uma pesquisa procurando descobrir por que Newton usou a palavra *espectro* para designar o que foi observado por ele, ao realizar a experiência da dispersão da luz branca em um prisma (consulte um dicionário etimológico, por exemplo).

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 um olho apenas, você só percebe duas dimensões (largura e altura de um objeto, como se ele fosse chato). Com os dois olhos, você consegue perceber a profundidade. Em outras palavras, com os dois olhos você consegue perceber onde o objeto se encontra (sua distância) e suas dimensões. Chama-se a este fenômeno de “visão binocular” ou “visão estereoscópica” (estéreo = relevo e escópio = visão).

As experiências seguintes são muito interessantes e lhe permitirão verificar este fenômeno.

Experiência A: Feche um dos olhos e aponte com um dedo um objeto situado do outro lado da sala onde você está. Sem mexer com a mão, feche o olho aberto e abra aquele que estava fechado. Você verá que seu dedo não estará mais apontando o objeto. Parece que seu dedo sofreu uma brusca mudança de direção.

Experiência B: Coloque sua mão verticalmente, a cerca de 10 cm de seu nariz, perpendicularmente a seu rosto (fig. I). 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? Quando seus dois olhos estão abertos, seu cérebro combina as duas imagens que viu separadamente, fornecendo-lhe a imagem tridimensional de sua mão. Verifique.

Os filmes 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 (você já deve ter visto revistas de quadrinhos, com desenhos em 2 cores,

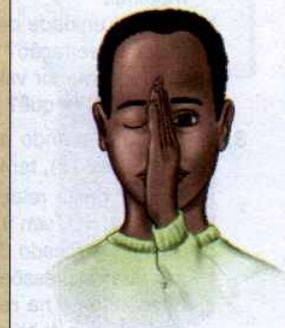


Fig. I: Experiência B.



Fig. II: Experiência D.

ligeiramente defasadas, para serem observadas com óculos também de 2 cores que nos dão a ilusão de 3 dimensões).

Experiência C: Tente, mantendo um dos olhos fechado, acertar o dedo indicador de um colega, colocado na vertical, usando também seu dedo indicador, trazendo-o, do alto para baixo, na vertical. O que ocorrerá? Tente várias vezes. Você verá que errará a posição do dedo do colega pois, com um olho apenas, torna-se mais difícil avaliar as distâncias de objetos próximos. Esta dificuldade é menos acentuada para objetos distantes. Para avaliar as distâncias desses objetos, como montanhas, o horizonte e outros objetos situados a mais de 9 m de distância, não sendo possível ver, com cada olho, separadamente, ângulos diferentes do objeto (como na experiência anterior), nós lançamos mão de outras referências. Por exemplo: a paralaxe (deslocar um pouco a cabeça para um lado e para outro para verificar se a posição do objeto muda em relação a outros mais próximos), a luminosidade do objeto, ou o seu tamanho, para nos fornecer aquelas informações.

Experiência D: Enrole uma folha de papel, formando um tubo de aproximadamente 25 cm. Ponha o tubo diante de seu olho direito (veja a fig. II). Coloque sua mão aberta, com a palma voltada para você, ao lado do tubo (encostada a ele). Aproxime lentamente a mão de seus olhos. Numa certa posição, você verá um furo em sua mão. Seu cérebro mistura a visão da imagem fornecida por um olho, com a visão fornecida pelo outro, levando-o a esta ilusão.

isã reVisão reVisão reVisão reVisão reVisão reVisão

As questões seguintes foram formuladas para que você faça uma revisão dos pontos mais importantes abordados neste capítulo. Ao respondê-las, volte ao texto sempre que tiver dúvidas.

- Explique o que é a refração da luz.
 - Qual é a condição para que a luz se refrate ao passar de um meio para outro?
- Dê a definição de índice de refração de um meio material.
 - Em que unidade devemos expressar o valor do índice de refração?
 - Qual é o menor valor possível para o índice de refração? Por quê?
- Vimos que, quando a luz passa de um meio (1) para um meio (2), temos $\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = v_1 / v_2$.

 - A partir desta relação, mostre que a igualdade $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ é verdadeira.
 - Diga o significado de cada símbolo que aparece nas duas expressões anteriores.
 - Baseando-se na relação $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, diga em que condições um raio luminoso, ao se refratar, aproxima-se ou afasta-se da normal.
- Faça um diagrama mostrando que a imagem de um objeto, mergulhado na água, forma-se acima do objeto.
 - Para que seja possível a um raio luminoso sofrer reflexão total, ao passar de um meio (1) para outro meio (2), devemos ter $n_1 > n_2$ ou $n_1 < n_2$?
 - Explique o que é ângulo limite entre dois meios. Mostre como se calcula o seu valor.
 - Descreva alguns fenômenos que sejam relacionados com a reflexão total.
- Em que consiste o fenômeno da dispersão da luz branca?
 - Qual é a causa da dispersão da luz branca?
 - Faça um desenho mostrando a luz branca ao sofrer dispersão através de um prisma. Mostre a distribuição das cores no espectro recebido em um anteparo.
 - Explique, resumidamente, a formação do arco-íris.

6. a) Explique por que um objeto se apresenta com uma determinada cor ao ser iluminado com luz branca.
b) Diga qual será a cor deste objeto ao ser iluminado, sucessivamente, com luz monocromática de diversas cores.
7. a) O que é uma lente?
b) O que é uma lente convergente? E uma lente divergente?
c) Como podemos, observando a espessura de uma lente, saber se ela é convergente ou divergente?
8. a) Explique o que são os focos e o que é a distância focal de uma lente convergente.
b) Faça o mesmo para uma lente divergente.
c) O meio que envolve uma lente tem influência no valor de sua distância focal? E no fato de ser ela convergente ou divergente? Explique.
9. a) Faça um desenho mostrando as trajetórias dos raios principais ao atravessarem uma lente convergente.
b) Faça o mesmo para uma lente divergente.
- c) Reproduza as figuras 15-31, 15-32 e 15-33, procurando entender como foram obtidas as imagens dos objetos ali mostrados.
10. a) Como podemos calcular o aumento $A'B'/AB$, fornecido por uma lente, quando conhecemos D_i e D_o ?
b) Escreva a equação das lentes, explicando o significado de cada símbolo que nela aparece.
c) Qual é a convenção de sinais que deve ser adotada ao se usar esta equação?
11. a) Descreva, sucintamente, o olho humano e mostre como e onde se forma a imagem de um objeto para o qual estamos olhando.
b) O que é miopia? E hipermetropia? Como são corrigidos estes defeitos da visão?
12. a) Descreva, sucintamente, a máquina fotográfica, o projetor, a lupa e o microscópio.
b) Mostre, construindo um diagrama, como se forma a imagem de um objeto em cada um destes instrumentos.
c) Em quais destes instrumentos a imagem final é real? Em quais ela é virtual?

algumas experiências simples

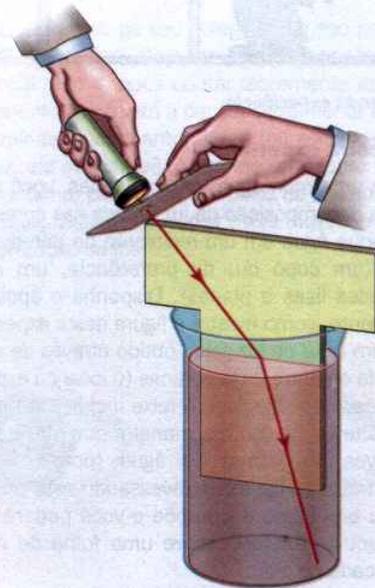
Para você fazer

Primeira experiência

Você poderá observar facilmente a refração de um feixe luminoso reproduzindo a montagem mostrada na figura desta experiência. Encha um copo com água e introduza nele um cartão ou cartolina branca, cortado e apoiado no recipiente da maneira mostrada na figura.

Usando uma lanterna e um anteparo com uma fenda colocado diante dela, você obterá um estreito feixe de luz. Faça este feixe incidir ao longo do cartão, procurando torná-lo o mais bem definido possível (para isto, 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 esta experiência usando estes materiais.



Primeira experiência.

Segunda experiência

Conforme vimos na seção 15.2, quando olhamos para um objeto colocado dentro da água, devido à refração da luz temos a impressão de que ele se encontra situado acima de sua verdadeira posição. Nesta experiência, você irá fazer duas observações relacionadas com este fato.

- 1.º Introduza inclinadamente um lápis, uma régua ou outro objeto semelhante qualquer em um recipiente com água. Observe que o objeto parece estar quebrado. A parte mergulhada parece estar quebrada para baixo ou para cima? Sua observação concorda com o que está mostrado na fig. 15-8?
- 2.º Ponha uma moeda no interior de um prato e coloque-se em uma posição tal que sua linha de visão tangencie a beirada do prato, mas de modo que a moeda não seja visível para você (veja a figura desta experiência).

Peça a um colega para derramar água lentamente no prato e observe que a moeda irá se tornando gradualmente visível. Quando a água no prato atingir um certo nível, você verá totalmente a moeda, como se ela estivesse flutuando na água. Você está vendo a moeda propriamente dita, uma imagem real ou uma imagem virtual dela? Explique por que a moeda se tornou visível.



Segunda experiência.

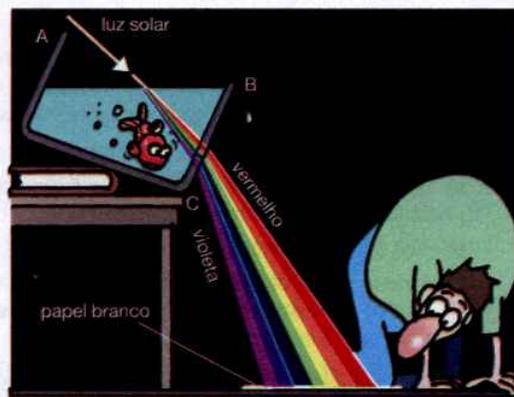
Terceira experiência

Com uma montagem muito simples, você poderá observar a decomposição da luz branca nas cores do espectro. Coloque água em um recipiente de paredes transparentes (um copo ou, de preferência, um recipiente de paredes lisas e planas). Disponha-o apoiando inclinadamente, como mostra a figura desta experiência, diante de um feixe de luz solar, obtido através de uma fresta de janela ou entre duas cortinas (o local da experiência deve ser escurecido). Faça o feixe incidir diretamente na superfície do líquido, de maneira que sua trajetória passe através do prisma de água (porção ABC da água mostrada na figura). Atravessando este prisma de água, a luz branca se decompõe e você poderá observar seu espectro projetado sobre uma folha de papel branco, colocada no chão.

Quantas cores é possível distinguir no espectro que você obteve? Qual a cor que sofreu menor desvio? Qual a que

se desviou mais? Estas observações estão de acordo com o que está mostrado na fig. 15-16?

Se você dispuser de um prisma de vidro, esta experiência poderá ser repetida usando este prisma. Neste caso, você verá que a dispersão da luz branca será mais acentuada, porque o índice de refração do vidro é maior que o da água.



Terceira experiência.

Quarta experiência

Procure conseguir uma lente convergente (lupa ou lente de aumento) que poderá ser obtida no laboratório de sua escola ou adquirida, a baixo custo, em uma papelaria ou em casas comerciais similares.

Usando esta lente, faça um feixe de luz solar convergir sobre uma placa de isopor branco colocada em seu foco (posição na qual o feixe de luz se concentra praticamente em um ponto). Observe que, apesar da grande concentração dos raios solares naquela pequena região, não haverá combustão do isopor.

A seguir, faça uma pequena mancha escura sobre o isopor, usando um lápis ou uma caneta azul ou preta. Repita a experiência, concentrando a luz solar, agora, sobre esta mancha. Você verá que, nestas condições, o isopor entra imediatamente em combustão naquele local. Procure explicar a diferença de comportamento do isopor nas duas situações (lembre-se do que você aprendeu neste capítulo sobre a absorção de luz por objetos de cores diferentes).

Quinta experiência

Como vimos na seção 15.6, o olho humano tem a capacidade de se acomodar para observar nitidamente tanto objetos distantes quanto próximos. Entretanto, mesmo para pessoas que possuem visão normal, esta capacidade de acomodação é limitada: quando um objeto é aproximado gradualmente do olho de uma pessoa, verifica-se que há uma certa distância abaixo da qual a pessoa não consegue mais enxergar nitidamente o objeto (o cristalino atingiu o seu limite de acomoda-

ção). Esta distância é denominada *distância mínima de visão distinta*.

Aproxime gradualmente um objeto do olho de uma pessoa de visão normal. Peça à pessoa para lhe informar o momento em que ela deixa de enxergar nitidamente o objeto. Se necessário, repita algumas vezes esta operação para definir melhor a posição procurada. Medindo a distância desta posição ao olho da pessoa, você terá determinado o valor de sua distância mínima de visão distinta (se você não possuir defeito de visão, esta experiência poderá ser feita com seu próprio olho). Obtenha esta distância para outras pessoas de visão normal. Os valores encontrados diferem muito entre si? Repita a experiência, agora, com uma pessoa míope e, em seguida, com uma pessoa mais idosa (que tenha "vista cansada"). Em qual dos casos a distância mínima de visão distinta tem menor valor? Em qual dos casos ela é maior?

Sexta experiência

Nesta experiência você irá determinar a distância focal de uma lente convergente, usando dois processos diferentes. Você poderá trabalhar com a mesma lente que foi usada na 4ª experiência.

- 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. Nestas condições, o anteparo estará situado no foco da lente. Meça, então, a distância focal desta 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 de chama, a 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 estes valores, calcule o valor da distância focal, f , da lente.

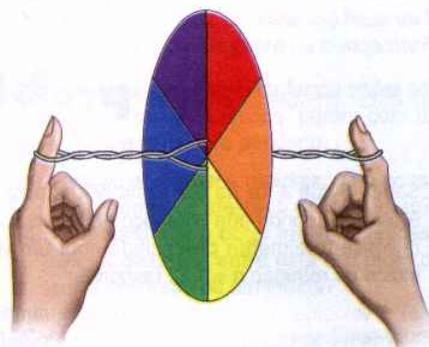
Os dois processos de medida forneceram resultados razoavelmente concordantes para a distância focal desta lente? Caso isto não aconteça, repita a experiência, procurando realizá-la com mais cuidado.

Sétima experiência

Nossos olhos, ao serem sensibilizados pela luz proveniente de um objeto, conservam esta imagem durante cerca de 0,1 s. Então, quando duas ou mais imagens se superpõem na retina, com intervalo igual ou inferior a

este, temos a sensação de continuidade (é graças a esta propriedade que, ao recebermos no cinema imagens sucessivas de um acontecimento, projetadas na tela, temos a sensação de que há movimento). A experiência seguinte está relacionada a isto.

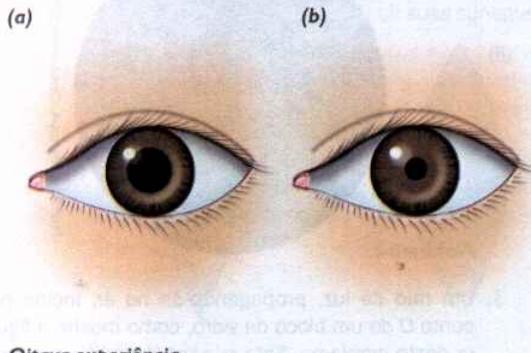
Para comprovar que a luz branca é uma mistura de várias cores, tome um disco de cartão branco, faça dois furos no cartão e enfie nele um cordão, formando um brinquedo denominado corrupio (veja a figura desta experiência). Colorindo os diversos setores do corrupio com cores diversas, como está mostrado (vermelho, alaranjado, amarelo, verde, azul e violeta) e fazendo-o girar, você verá o disco tornar-se praticamente branco. Tente analisar o que está acontecendo, baseando-se no fenômeno da retenção da imagem na retina.



Sétima experiência.

Oitava experiência

Procure observar o olho de seu colega (ou o seu próprio, por meio de um espelho). Peça-lhe para fechar os olhos, cobri-los com a mão e, após contar lentamente até 10, abri-los de repente. Você verá a pupila, inicialmente aberta (fig. a), contrair-se rapidamente (fig. b) (no escuro, ela se dilata e, à luz, ela se contrai). Aproxime uma fonte de luz (como uma lanterna) para perto dos olhos de seu colega e afaste-a a seguir, tentando observar estes movimentos de abertura e contração da íris.



Oitava experiência.

Nona experiência

Em cada um de nossos olhos existe uma pequena região, denominada ponto cego, localizada onde o nervo óptico deixa a retina. Nessa região não há células sensíveis à luz e, por isso, não vemos um objeto quando sua imagem se localiza no ponto cego da retina.

Para você verificar que existe realmente este ponto cego em seu olho, faça a seguinte experiência: coloque a figura dessa experiência em frente a seu rosto, segurando o livro com o braço direito estendido. Feche o olho esquer-



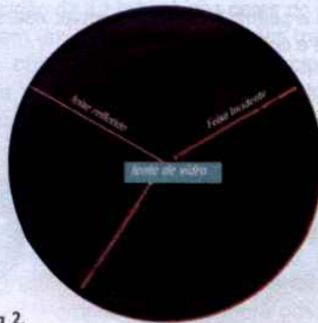
Nona experiência.

do e observe o X com o olho direito, percebendo a letra O com o canto desse olho. Aproxime a figura de seu rosto, continuando a fixar sua atenção no X. Em uma determinada posição da figura, você perceberá que a letra O desaparece (sua imagem estará, então, se formando sobre o ponto cego de seu olho direito). Continuando a aproximar a figura de seu rosto, a letra O tornar-se-á novamente visível.

Fechando o olho direito e fixando seu olho esquerdo na letra O, repita a experiência para verificar que também esse olho apresenta um ponto cego.

problemas e testes problemas e testes problemas e

- 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 velocidade da luz neste vidro é quantas vezes menor do que a velocidade da luz no vácuo?
 - Então, neste caso, qual seria o tempo que a luz solar gastaria para chegar à Terra?
- A figura deste problema mostra a fotografia de um estreito feixe de luz se refratando ao passar do ar para o vidro.
 - Qual é o valor do ângulo de incidência, θ_1 , para este feixe? E do ângulo de refração θ_2 ?
 - A partir dos valores obtidos em (a), determine o índice de refração daquele vidro.



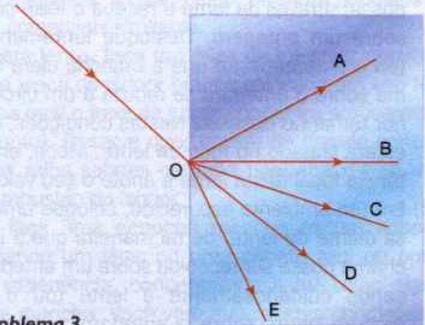
Problema 2.

Prof. Dra. Marisa A. Cavalcante/GOPEF/PUC-SP

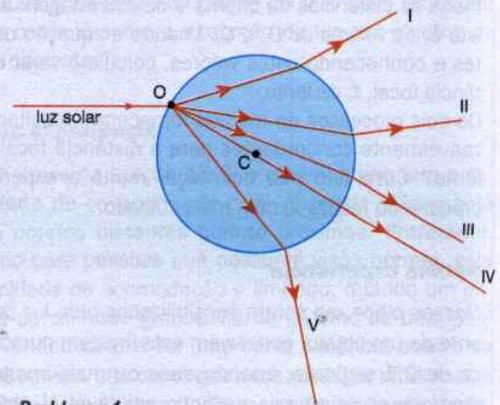
- Um raio de luz, propagando-se no ar, incide no ponto O de um bloco de vidro, como mostra a figura deste problema. Este raio, após se refratar, terá

sua trajetória no interior do vidro mais bem representada pelo raio:

- a) OA b) OB c) OC d) OD e) OE

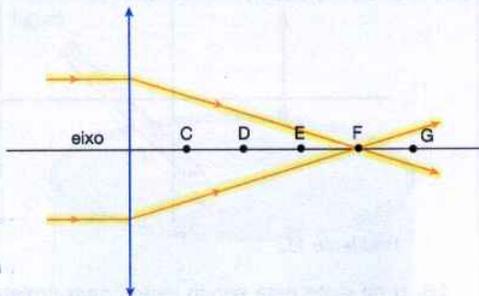


Problema 3.



Problema 4.

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 deste problema mostra cinco trajetórias, desenhadas por um estudante, tentando representar o percurso seguido por este raio luminoso ao atravessar a gota. Apenas uma destas trajetórias está correta. Qual delas?
5. O inverso da distância focal de uma lente é denominado *convergência* desta lente. Então, representando a convergência por C , temos $C = 1/f$. Quando a distância focal é medida em metros, obtemos a convergência em uma unidade denominada *dioptria*.
 - a) Se a distância focal de uma lente é $f = 2,0$ m, qual é, em dioptrias, o valor de sua convergência?
 - b) E se a distância focal da lente for $f = 50$ cm?
 - c) Um oculista receitou, para uma pessoa, óculos com lentes de 5,0 dioptrias (na linguagem cotidiana, costuma-se dizer 5,0 graus). Qual é a distância focal destas lentes?
6. Um feixe luminoso, de raios paralelos, incide sobre uma lente, cuja distância focal vale 20 cm, convergindo no ponto F (veja a figura deste problema). 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.)



Problema 6.

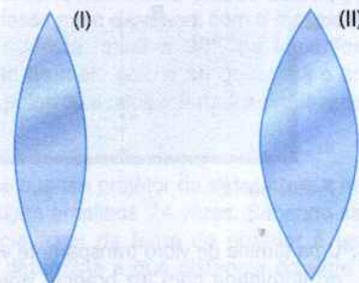
7. Suponha que um espelho côncavo e uma lente convergente, inicialmente no ar, sejam ambos mergulhados em água. Podemos concluir que:
 - a) A distância focal do espelho não varia e a da lente aumenta.
 - b) A distância focal do espelho e a da lente, ambas aumentam.
 - c) A distância focal do espelho e a da lente, ambas diminuem.
 - d) A distância focal do espelho aumenta e a da lente diminui.
 - e) A distância focal do espelho diminui e a da lente não se altera.
8. Os dados seguintes se referem a um objeto colocado em frente a uma lente e à imagem deste objeto

fornecida por ela:

- distância do objeto à lente: 10 cm;
- aumento: 0,50;
- imagem: direta.

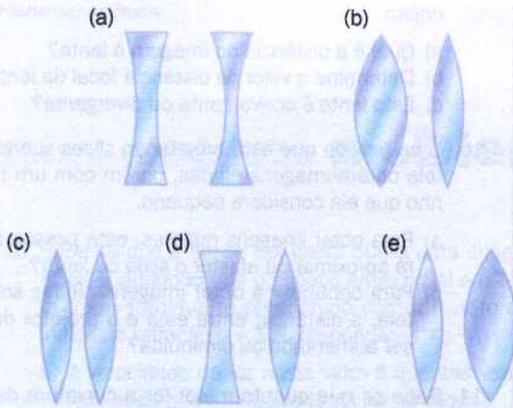
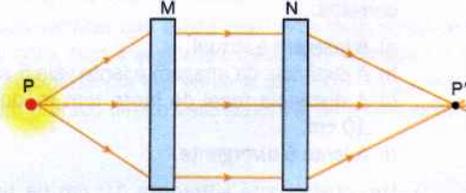
Analise as afirmativas seguintes relacionadas com esta situação e assinale aquelas que estão corretas.

- a) A imagem é virtual.
 - b) A distância da imagem à lente vale 5 cm.
 - c) A distância focal da lente tem módulo igual a 10 cm.
 - d) A lente é divergente.
9. Um objeto está situado a 10 cm de uma lente. Sabe-se que sua imagem, fornecida pela lente, é real e tem uma altura igual à metade da altura do objeto.
 - a) Qual é a distância da imagem à lente?
 - b) Determine o valor da distância focal da lente.
 - c) Esta lente é convergente ou divergente?
 10. Uma pessoa que está projetando *slides* sobre uma tela obtém imagens nítidas, porém com um tamanho que ela considera pequeno.
 - a) Para obter imagens maiores, esta pessoa deverá aproximar ou afastar o *slide* da lente?
 - b) Para continuar a obter imagens nítidas sobre a tela, a distância entre esta e o projetor deverá ser aumentada ou diminuída?
 11. Sabe-se que quanto maior for a curvatura das faces de uma lente biconvexa ou bicôncava (isto é, quanto menor forem os raios de suas faces), menor será o módulo da distância focal destas lentes. Tendo em vista esta informação, responda:
 - a) Qual das duas lentes mostradas na figura deste problema (feitas com o mesmo tipo de vidro) possui maior distância focal?
 - b) Qual dessas lentes possui convergência maior (veja o problema 5)?
 - c) Qual dessas lentes fornecerá maior ampliação ao ser usada como uma lupa?
 - d) Então, quando seu olho se acomoda para observar objetos mais próximos, os músculos oculares estão atuando sobre as faces do cristalino de modo a aumentar ou a diminuir suas curvaturas?



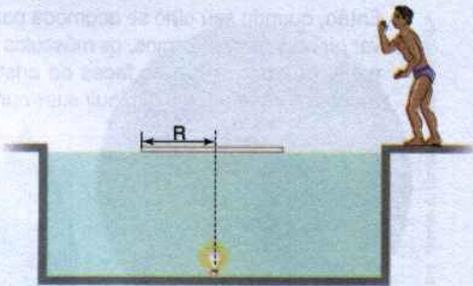
Problema 11.

12. A figura deste problema mostra uma fonte P emitindo raios luminosos que passam através de duas lentes, representadas pelos retângulos M e N . Assinale, entre as alternativas, aquela que melhor representa as formas das duas lentes correspondentes, respectivamente, aos retângulos M e N .



Problema 12.

13. Uma pequena lâmpada está instalada na parte central do fundo de uma piscina, de profundidade igual a $2,0$ m. Um disco de isopor, de raio R , está flutuando na superfície da água, como mostra a figura deste problema. Qual deve ser o menor valor de R para que a lâmpada não seja vista por um observador situado fora da água, qualquer que seja a posição deste observador?

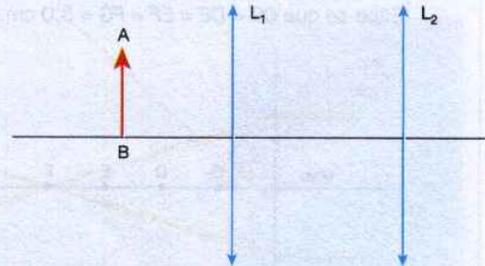


Problema 13.

14. Uma lâmina de vidro transparente vermelha (quando iluminada com luz branca) apresenta-se com esta cor porque ela absorve todas as demais cores

do espectro, deixando-se atravessar apenas pela luz vermelha. Dizemos que esta lâmina é um "filtro vermelho". Do mesmo modo, meios transparentes às cores amarelo, verde, azul etc. são denominados, respectivamente, filtros amarelo, verde, azul etc. Considerando estas informações, responda às questões seguintes:

- Uma pessoa observa, através de um filtro vermelho, um objeto branco iluminado com luz branca. Com que cor o objeto é visto por esta pessoa?
 - Qual a cor com que uma pessoa vê um objeto vermelho (iluminado com luz branca) e observado através de um filtro azul?
15. Um pequeno objeto AB está situado a $5,0$ cm da lente L_1 , cuja distância focal vale $4,0$ cm (veja a figura deste problema). A lente L_2 , de distância focal igual a 10 cm, está situada a 25 cm de L_1 .
- Determine a posição e a natureza da imagem dada pela lente L_1 .
 - Determine a posição e a natureza da imagem final dada pela lente L_2 .
 - Qual o aumento fornecido por este sistema ótico?
 - Qual dos instrumentos óticos, descritos no texto, é semelhante a este sistema?

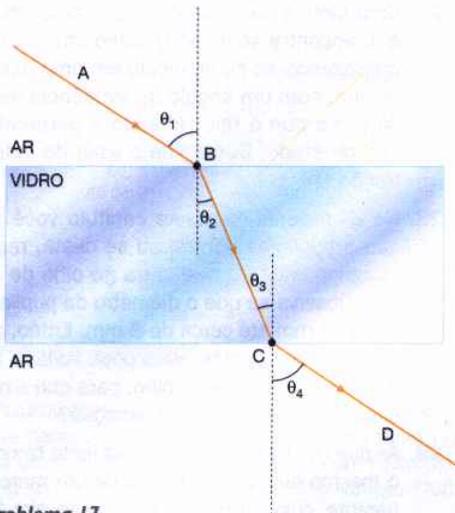


Problema 15.

16. Uma lente está sendo usada para projetar, sobre um anteparo, a imagem real de um objeto. Se metade da lente for recoberta com uma tinta opaca, que alterações serão observadas na imagem projetada no anteparo?

17. Um raio luminoso, AB , propagando-se no ar, incide em uma das faces de uma lâmina de vidro de faces paralelas. Após sofrer duas refrações, o raio de luz emerge da lâmina para o ar (raio CD), como mostra a figura deste problema.

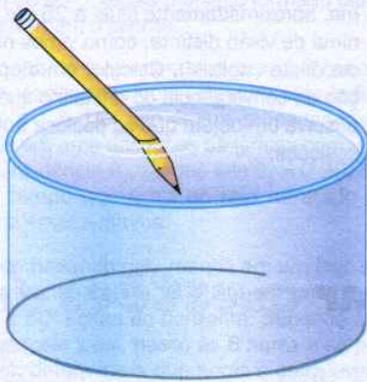
- Usando a lei de Snell, determine a relação existente entre os ângulos θ_1 e θ_4 mostrados na figura.
- Tendo em vista a resposta da questão (a), que relação existe entre as direções dos raios AB e CD ?



Problema 17.

18. Em um livro de Física, muito usado em universidades americanas, encontra-se o desenho reproduzido na figura deste problema. Neste desenho procura-se mostrar como é visto, por um observador fora da água, olhando de cima, um lápis parcialmente mergulhado neste líquido.

- a) Há um engano no desenho. Por quê?
- b) Localize, neste capítulo, a figura na qual se mostra corretamente como o objeto seria visto. Certifique-se de que você entendeu claramente a análise, feita no texto, relacionada com esta figura.



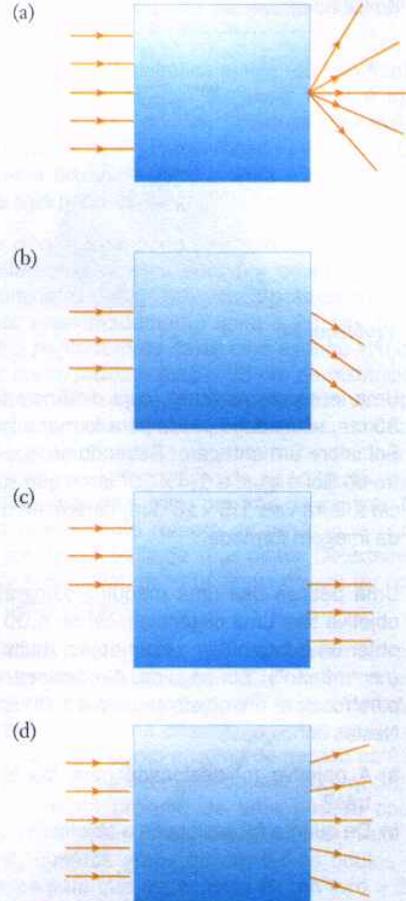
Problema 18.

19. Suponha que o prisma de vidro da fig. 15-12 estivesse totalmente mergulhado em água.

- a) Qual é o valor do ângulo limite entre o vidro do prisma e a água?
- b) O raio luminoso mostrado na fig. 16-12 seria totalmente refletido na face BC? Explique.

20. Uma pessoa olha para uma lente biconvexa e observa duas imagens de seu rosto, uma delas direta e, a outra, invertida. Explique por que se formam estas duas imagens.

21. Em cada um dos diagramas da figura deste problema, são mostrados feixes luminosos que incidem e emergem de um sistema óptico representado pelo quadrado. Identifique, em uma cópia de cada diagrama, o sistema óptico que poderia produzir os efeitos mostrados.

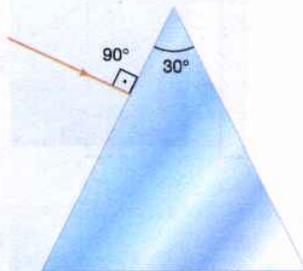


Problema 21.

22. Suponha que o índice da refração de um dado meio seja igual a $\sqrt{2}$ para a luz vermelha e igual a $\sqrt{3}$ para a luz violeta. Dois raios luminosos monocromáticos, um vermelho e o outro violeta, propagam-se nesse meio e incidem com o mesmo ângulo de incidência, igual a 30° , na superfície de separação do meio com o ar. Qual será o ângulo formado pelos dois raios refratados propagando-se no ar?

23. Deseja-se que um projetor de slides projete na tela uma imagem ampliada 24 vezes. Sabendo-se que a distância focal da lente do projetor é igual a 9,6 cm, determine a que distância do slide deve ser colocada a tela.

24. O prisma de vidro, mostrado na figura deste problema, situado no ar, tem índice de refração igual a 1,50. Um raio de luz monocromática incide perpendicularmente a uma das faces do prisma e emerge da outra face, propagando-se novamente no ar. Sendo de 30° o ângulo do prisma (veja a figura), determine o desvio angular sofrido pelo raio de luz ao atravessar este prisma.



Problema 24.

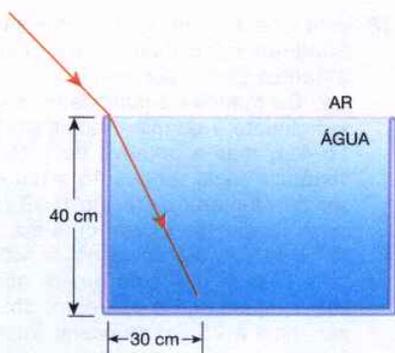
25. Uma lente convergente, cuja distância focal vale 30 cm, está sendo usada para formar a imagem do Sol sobre um anteparo. Sabendo-se que o diâmetro do Sol é igual a $1,4 \times 10^6$ km e que sua distância à Terra vale $1,5 \times 10^8$ km, determine o diâmetro da imagem formada.
26. Uma pessoa usa uma máquina fotográfica, cuja objetiva tem uma distância focal de 5,00 cm, para obter uma foto nítida de um objeto muito afastado (no "infinito"). Em seguida, ela desloca a objetiva para focalizar um objeto situado a 1,00 m da lente. Nestas condições:
- A objetiva foi deslocada para frente ou para trás?
 - De quanto foi deslocada a objetiva?
27. Uma lâmina transparente, cujo índice de refração é n , encontra-se no ar. Quando um raio luminoso, propagando-se no ar, incide em uma das faces da lâmina, com um ângulo de incidência de 60° , observa-se que o raio refletido é perpendicular ao raio refratado. Determine o valor do índice de refração n .
28. Na 8ª experiência deste capítulo você aprendeu que a pupila se contrai ou se dilata, regulando a quantidade de luz que entra no olho de uma pessoa. Observa-se que o diâmetro da pupila pode variar de 2 mm até cerca de 8 mm. Então, aproximadamente de quantas vezes pode variar a intensidade de luz que incide no olho, para que a pupila seja capaz de compensar esta variação?
29. As duas faces esféricas de uma lente biconvexa têm o mesmo raio R e ela é feita de um material transparente, cujo índice de refração é igual a 1,30.
- Esta lente, no ar, tem uma distância focal de 50 cm. Qual é o valor do raio R ?
 - Qual será, em dioptrias, a convergência desta lente se ela estiver totalmente mergulhada em um líquido de índice de refração igual a 2,0? Nestas condições, ela é divergente ou convergente? (O conceito de convergência foi analisado no problema nº 5.)
30. O olho de uma pessoa normal é capaz de se acomodar, variando sua distância focal, de modo a ver nitidamente desde objetos muito afastados (no infinito), até aqueles situados a uma distância mínima, aproximadamente igual a 25 cm (distância mínima de visão distinta, como vimos na 5ª experiência deste capítulo). Calcule, em dioptrias, a variação da convergência do cristalino quando a pessoa observa um objeto que se desloca entre estas duas posições.

questões de vestibular

As questões de vestibular se encontram no final do livro.

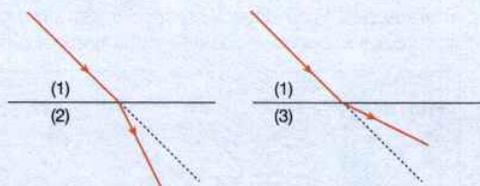
problemas suplementares

- A imagem do Sol, fornecida por uma lente convergente, forma-se a 10 cm de distância da lente. Se um objeto está situado a 30 cm desta lente, a que distância dela será formada a imagem do objeto?
- O tanque mostrado na figura deste problema está cheio de água ($n = 1,3$). Um raio de luz incide rasante à lateral do tanque, refratando-se como mostra a figura. Determine o valor do ângulo de incidência deste raio.



Problema suplementar 2.

3. As figuras deste problema representam o que ocorre na passagem de um raio de luz de um meio (1) para um meio (2) e do meio (1) para um meio (3). Sabe-se que um destes meios é o vácuo. Qual deles? Explique.

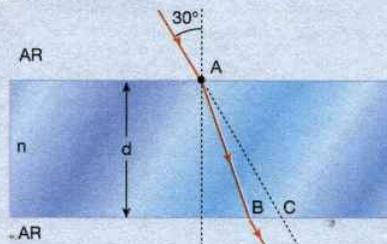


Problema suplementar 3.

4. Um raio luminoso incide perpendicularmente a uma das faces de um prisma transparente, cujo índice de refração é $n = 2,0$. Se o raio emerge da outra face do prisma para o ar, com um ângulo de refração de 90° , calcule o ângulo formado pelas faces que formam o prisma.
5. Uma lâmina de faces paralelas tem 8,0 cm de espessura, sendo feita com um vidro cujo índice de refração é 1,5. Um raio de luz, propagando-se no ar, incide em uma das faces da lâmina com um ângulo de incidência θ_1 , tal que $\sin \theta_1 = 0,90$. Determine o tempo que a luz do raio refratado gasta para atravessar a lâmina.
6. Um peixe, nadando pela manhã em um lago calmo de água transparente, vê o Sol em uma posição situada a 60° acima do horizonte. Sabendo-se que o Sol, naquele local, nasce às 6 horas e se põe às 18 horas, determine a que horas o peixe avistou o Sol na posição mencionada (índice de refração da água, $n = 4/3$).
7. Uma lâmpada está situada a 100 cm de distância de uma parede, sobre a qual deseja-se projetar uma imagem da lâmpada, usando-se uma lente de distância focal igual a 22 cm. Determine a que distância da parede deve ser colocada a lente para se obter uma imagem nítida e ampliada da lâmpada.
8. Uma lente plano-convexa, cuja convergência, no ar, é igual a 8,0 dioptrias, passa a ter uma convergência de 1,0 dioptria quando totalmente mergulhada

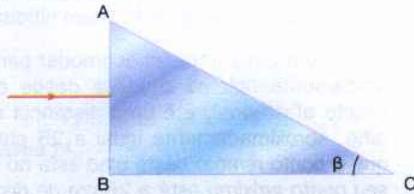
na água (índice de refração igual a $4/3$). Calcule o índice de refração, n , da lente e o raio, R , de sua face convexa.

9. Uma lente bicôncava é feita com um material transparente cujo índice de refração é 1,40 e suas duas faces têm o mesmo raio R . No ar, esta lente forma uma imagem virtual de um objeto situado a 30 cm dela. Se a distância da imagem à lente é 10 cm, determine o valor de R .
10. Uma máquina fotográfica antiga (do tipo fole) possui uma objetiva cuja distância focal é igual a 12 cm. Por meio do fole, obtém-se uma distância máxima de 14 cm entre a objetiva e o filme. Qual a mínima distância entre a lente e um objeto para que seja possível fotografá-lo com nitidez?
11. Um olho normal pode se acomodar para enxergar nitidamente objetos situados desde o "infinito" (muito afastados), até uma distância mínima do olho, aproximadamente igual a 25 cm. Dizemos que o *ponto remoto* deste olho está no infinito e o seu *ponto próximo* está a 25 cm de distância. Em uma pessoa míope, o olho consegue ver objetos próximos, mas não consegue se acomodar para enxergar nitidamente objetos muito afastados, de modo que o ponto remoto de seu olho não está no infinito, mas bem mais próximo da pessoa. Suponha que o ponto remoto de um míope esteja a 40 cm de distância de seus olhos. Determine, em valor e em sinal, quantos graus devem ter os óculos desta pessoa.
12. Os olhos de uma pessoa com hipermetropia ou com presbitia ("vista cansada") conseguem ver nitidamente objetos afastados, mas não conseguem se acomodar para enxergar objetos muito próximos, isto é, o ponto próximo da pessoa está situado a uma distância maior do que 25 cm. Supondo que o ponto próximo de uma pessoa esteja a 100 cm de seus olhos, determine, em valor e em sinal, quantos graus devem ter os óculos desta pessoa para que ela consiga ler um livro a 25 cm de distância.
13. Uma pessoa míope está usando óculos cujas lentes são de $-1,5$ grau. Sabendo-se que o ponto remoto desta pessoa está situado a 60 cm de seus olhos, determine a máxima distância de um objeto para que ela consiga enxergá-lo nitidamente com estes óculos.



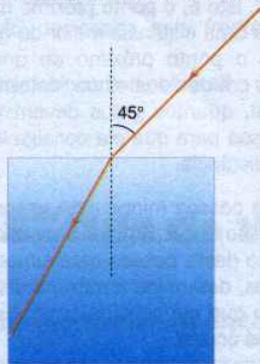
Problema suplementar 14.

14. Um raio de luz, propagando-se no ar, incide, com um ângulo de 30° , em uma das faces de uma lâmina feita com um material transparente, cujo índice de refração é n , como mostra a figura deste problema. A linha AC é o prolongamento do raio incidente e tem-se $d = (2\sqrt{3})\text{ cm}$ e $BC = 1,0\text{ cm}$. Calcule o valor de n .
15. Um mastro vertical, cujo comprimento é de $2,00\text{ m}$, está fixado no fundo de uma piscina cuja profundidade é igual a $1,50\text{ m}$. Sabendo-se que os raios solares estão incidindo ao longo de uma direção que forma um ângulo de 45° com a horizontal, determine o comprimento da sombra do mastro no fundo da piscina.



Problema suplementar 16.

16. O prisma de vidro mostrado na figura deste problema está totalmente imerso em álcool etílico e um raio de luz incide no prisma perpendicularmente à face AB .
- Determine os valores do ângulo β para os quais o raio luminoso sofre reflexão total na face AC .
 - Qual seria a resposta da questão (a) se o prisma estivesse imerso em bissulfeto de carbono?
17. Um raio de luz incide em um cubo, feito com um material transparente e situado no ar, da maneira mostrada na figura deste problema. Determine os valores do índice de refração, n , do cubo para que o raio de luz seja totalmente refletido em sua face vertical.



Problema suplementar 17.

18. Uma luneta, como você já deve saber, é um instrumento óptico usado para observar objetos distantes como, por exemplo, os corpos celestes. De maneira simplificada, sua estrutura é semelhante à do microscópio (mostrada na fig. 15-41), mas a objetiva deve ter uma grande distância focal, enquanto a lente ocular deve ser de pequena distância focal. Suponha que estas distâncias focais, em uma luneta, sejam $f_1 = 80,0\text{ cm}$ (objetiva) e $f_2 = 4,0\text{ cm}$ (ocular). Uma pessoa usa esta luneta para observar a Lua e, ajustando o aparelho, obtém uma imagem final a 25 cm da ocular (distância de melhor visão distinta). Qual é, nestas condições, o comprimento do tubo da luneta (distância entre suas lentes)?

Os problemas de 19 a 23 referem-se ao quadro apresentado a seguir. Em cada coluna deste quadro são apresentadas algumas informações relacionadas com a formação de imagem em uma lente. A partir destas informações, você deverá preencher, em uma cópia do quadro, os espaços vazios da coluna considerada.

Problema	19	20	21	22	23
Tipo	Convergente	/	/	/	/
Convergência (em dioptrias)	10	10	/	/	/
f (em cm)	/	/	/	/	-10
D_o (em cm)	20	5,0	10	10	20
D_i (em cm)	/	/	/	/	/
Aumento	/	> 1	0,50	0,50	/
Imagem real?	/	/	/	sim	/
Imagem invertida?	/	/	não	/	/

capítulo 16

Movimento

ondulatório



O som, assim como as ondas que se formam na superfície de um líquido, são ondas mecânicas que se propagam em um meio material.

16.1. Movimento harmônico simples

O QUE É UM MOVIMENTO HARMÔNICO SIMPLES

Suponha que um corpo, apoiado sobre uma superfície horizontal, sem atrito, esteja preso na extremidade de uma mola, como mostra a fig. 16-1-a. A outra extremidade da mola está fixada em uma parede e o ponto O representa a posição de equilíbrio do corpo, isto é, nesta posição a mola não exerce força sobre ele, pois ela não está deformada (nem comprimida, nem esticada).

Se empurrarmos o corpo, comprimindo a mola de uma distância A , até a posição B (fig. 16-1-b), a mola passará a exercer sobre o corpo uma força \vec{F} , dirigida para a posição de equilíbrio. Abandonando-se o corpo, ele será acelerado por esta força e sua velocidade crescerá à medida que ele se aproximar do ponto O (fig. 16-1-c). A força \vec{F} , como vimos no capítulo 9, é proporcional à deformação, X , da mola e dada por $F = kX$, onde k é a constante elástica da mola. Assim, à medida que o corpo se afasta de B , o valor de \vec{F} diminui, anulando-se quando ele atinge o ponto O .

Em virtude da velocidade adquirida, o corpo ultrapassa a posição de equilíbrio e a mola, estando agora esticada, passa a exercer uma força ainda dirigida para o ponto O e, portanto, de sentido contrário à velocidade do corpo (fig. 16-1-d). O movimento é, então, retardado e, no ponto B' simétrico de B , a velocidade do corpo se anula (fig. 16-1-e). Partindo de B' , o corpo é novamente acelerado para O , ultrapassa este ponto, sendo, então, retardado pela mola até alcançar o ponto B . Como não há atrito, este movimento de vaivém, entre os pontos B e B' , continua indefinidamente.

Quando um corpo executa um movimento como este, indo e voltando sobre uma mesma trajetória, dizemos que ele está *vibrando* ou *oscilando* entre os pontos B e B' . No caso particular, mostrado na fig. 16-1, no qual a força que atua no corpo é proporcional à sua distância até a posição de equilíbrio ($F = kX$), o movimento vibratório é denominado *movimento harmônico simples*.

AMPLITUDE, FREQUÊNCIA E PERÍODO

Além do exemplo analisado na fig. 16-1, podemos encontrar, na natureza, várias outras situações em que um corpo executa um movimento vibratório (ou oscilatório): a extremidade de uma lâmina em vibração (fig. 16-2-a), um ponto de uma corda esticada posta a oscilar (fig. 16-2-b), um pêndulo de relógio em movimento (fig. 16-2-c) etc. Em todos estes casos, o corpo 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, como acontecia com o corpo preso à mola. Por este motivo, esta força que faz com que o corpo oscile é denominada *força restauradora*.

A distância entre a posição de equilíbrio e a posição extrema ocupada por um corpo que oscila é denominada amplitude, A , do movimento.

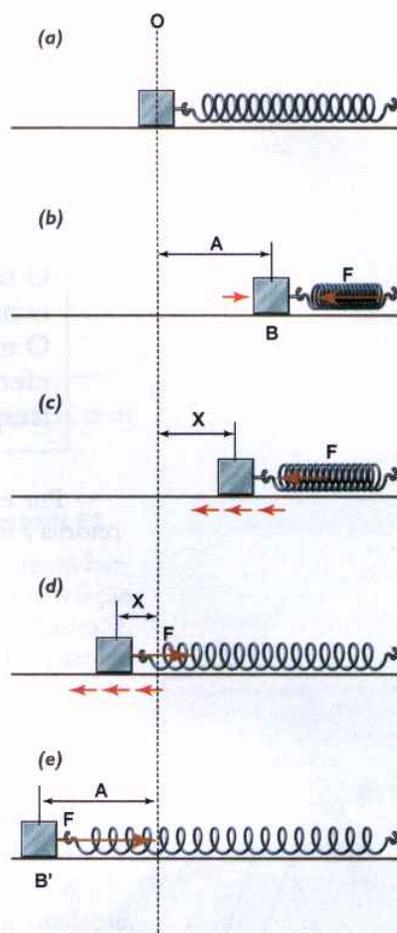


Fig. 16-1: Um corpo, preso à extremidade de uma mola, oscila executando um movimento harmônico simples.

Na fig. 16-1, mostramos a amplitude (OB ou OB') do corpo que oscila preso à mola. Observe, na fig. 16-2, a amplitude de cada um dos corpos em oscilação. Quando não há atrito, a amplitude do movimento oscilatório se mantém constante. Entretanto, quando o atrito não é desprezível, a amplitude diminui gradativamente, até que o corpo chegue ao repouso. Nestas condições, o movimento é denominado *movimento amortecido*.

Quando o corpo vai de uma posição extrema a outra e retorna à posição inicial (vai de B a B' e retorna a B nas figs. 16-1 e 16-2), dizemos que ele efetuou uma *vibração completa* ou *um ciclo*.

O tempo que o corpo gasta para efetuar uma vibração completa é denominado período, T , do movimento. O número de vibrações completas que o corpo efetua por unidade de tempo é denominado frequência, f , do movimento.

Por exemplo, se a extremidade da lâmina da fig. 16-2-a vai de B a B' e retorna a B 5 vezes em 1 segundo, a frequência deste movimento é

$$f = 5 \text{ vibrações/s} \quad \text{ou} \quad f = 5 \text{ ciclos/s}$$

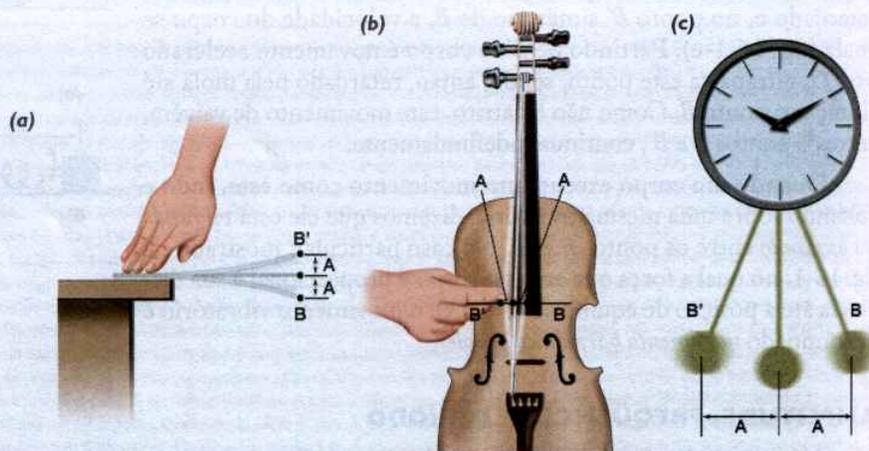


Fig. 16-2: Na natureza encontramos várias situações em que um corpo executa movimento vibratório.



Hulton/Getty Images

Heinrich Hertz (1857-1894)

Doutorou-se em Física em 1880 na Universidade de Berlim sendo, mais tarde, designado professor de Física na Universidade de Bonn. Foi o primeiro cientista que conseguiu produzir e receber ondas de rádio (ondas eletromagnéticas), mostrando que elas possuíam as mesmas propriedades da luz. Como consequência, ele estabeleceu definitivamente que a luz é uma onda eletromagnética. Em homenagem a Hertz, durante muitos anos as ondas de rádio foram denominadas "ondas hertzianas".

A unidade 1 vibração/s ou 1 ciclo/s é denominada 1 hertz, em homenagem a H. Hertz, famoso físico alemão do século passado. Assim, dizemos que a frequência da lâmina é $f = 5$ hertz. Evidentemente, se a lâmina executa 5 vibrações em 1 segundo, o tempo que ela gasta para efetuar 1 vibração é de 0,2 s, ou seja, o seu período T é

$$T = \frac{1\text{ s}}{5} \quad \text{ou} \quad T = 0,2\text{ s}$$

Generalizando, podemos dizer que

se um corpo oscila com uma frequência, f , o seu período de vibração, T , é dado por

$$T = \frac{1}{f}$$

Desta relação, podemos concluir que quanto maior for a frequência com que um corpo oscila, menor será o seu período e vice-versa.

CÁLCULO DO PERÍODO DO MOVIMENTO HARMÔNICO SIMPLES

Aplicando-se a 2ª lei de Newton a um corpo que executa movimento harmônico simples, como o bloco da fig. 16-1, é possível estabelecer uma relação entre o período, T , do movimento, a massa, m , do corpo e a constante elástica, k , da mola. Através de cálculos matemáticos (os quais não vamos nos preocupar em desenvolver aqui), podemos chegar à seguinte relação:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

Esta equação nos permite calcular o período, T , do movimento harmônico simples quando conhecemos os valores de m e k . Analisando esta expressão, vemos que:

- 1) Quanto maior for a massa do corpo, maior será o seu período de oscilação, isto é, um corpo de maior massa oscila com menor frequência (oscila 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 corpo oscila.
- 3) A amplitude, A , não aparece na expressão $T = 2\pi\sqrt{m/k}$. Logo, o período não depende da amplitude. Este fato pode ser facilmente verificado prendendo-se um corpo na extremidade de uma mola e fazendo-o oscilar com uma amplitude $A = 10$ cm, por exemplo. Se repetirmos esta experiência, fazendo com que o corpo oscile com uma amplitude maior (digamos, $A = 20$ cm), verificaremos que o período de oscilação é o mesmo em ambos os casos.

O PÊNDULO SIMPLES

Suponha que um pequeno corpo, de massa m , esteja preso na extremidade de um fio de peso desprezível, cujo comprimento é L , oscilando em um plano vertical, como mostra a fig. 16-3. Este dispositivo constitui um *pêndulo simples* em oscilação. A força restauradora que mantém o corpo em oscilação é a componente de seu peso tangente à trajetória (fig. 16-3).

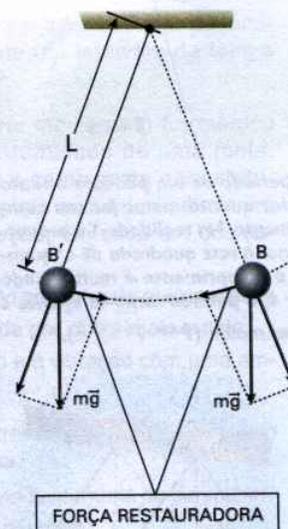
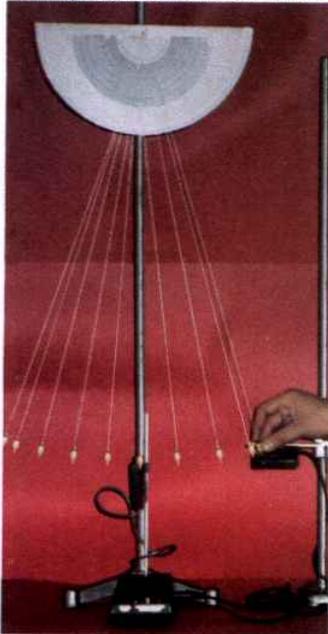
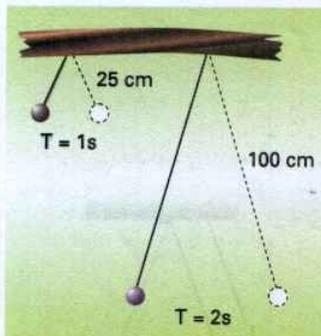


Fig. 16-3: Um pêndulo simples, oscilando com pequena amplitude, executa um movimento harmônico simples.

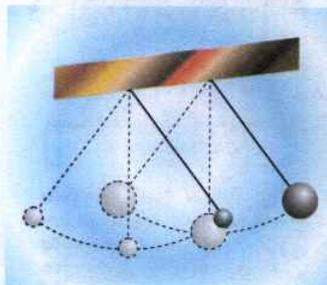
Profª Dra. Marisa A. Cavalcante/GOPEF/PUC-SP



Fotografia de exposição múltipla de um pêndulo simples em oscilação.



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 apenas 2 vezes maior (pois $\sqrt{4} = 2$).



Se a amplitude do movimento do pêndulo não for muito grande, a trajetória curva, BB' , descrita pelo corpo que oscila, pode ser considerada como sendo um segmento de reta horizontal. Com esta simplificação, é possível demonstrar que a força restauradora é proporcional à distância do corpo à posição de equilíbrio, isto é, para pequenas amplitudes o pêndulo executa um movimento harmônico simples. Nestas condições, através de um desenvolvimento matemático semelhante ao que é feito para o caso de um corpo preso a uma mola, podemos chegar à seguinte expressão que nos permite calcular o período de oscilação do pêndulo simples:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Esta expressão nos mostra que:

- 1) Quanto maior for o comprimento do pêndulo, maior será o seu período.
- 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), pois estas grandezas não aparecem na expressão de T .

Construindo um pêndulo simples e medindo o seu período, você poderá facilmente comprovar estes resultados.

Exemplo

Em uma experiência com um pêndulo simples, como o da fig. 16-3, verificou-se que o corpo suspenso, saindo de B , deslocava-se até B' e retornava a B , 20 vezes em 10 s.

- a) Qual é o período deste pêndulo?

Como sabemos, o período do pêndulo é o tempo que ele gasta para ir de B a B' e retornar a B , isto é, o tempo necessário para executar uma vibração completa. Como o pêndulo executou 20 vibrações completas em 10 s, é claro que o 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 vibrações em 10 s, o número de vibrações que ele executa em 1 s, ou seja, a sua frequência, será, evidentemente

$$f = \frac{20 \text{ vibrações}}{10 \text{ s}} = 2,0 \text{ vibrações/s} \quad \text{ou} \quad f = 2,0 \text{ hertz}$$

Este mesmo resultado pode ser obtido a partir da relação $T = 1/f$, da qual tiramos

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,50} \quad \text{ou} \quad f = 2,0 \text{ hertz}$$

Os dois pêndulos da figura têm o mesmo comprimento, mas suas massas são diferentes. Procura-se ilustrar que, partindo juntos de uma mesma altura, eles oscilam juntos, isto é, os dois pêndulos têm o mesmo período.

- 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, multi-

plicando L por 4 $\rightarrow T$ fica multiplicado por $\sqrt{4} = 2$

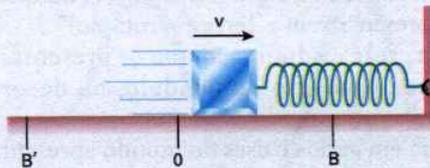
Assim, o período deste pêndulo será 2 vezes maior do que o do pêndulo da primeira experiência, isto é,

$$T = 2 \times 0,50 \text{ s} \quad \text{ou} \quad T = 1,0 \text{ s}$$

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, **responda** às questões seguintes, **consultando o texto** sempre que julgar necessário.

- Um bloco, preso a uma mola, oscila (sem atrito) entre os pontos B e B' mostrados na figura deste exercício. 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:
 - Qual é o sentido da força restauradora que a mola exerce no bloco?
 - Então, qual é o sentido da aceleração que o bloco possui?
 - O movimento do bloco é acelerado ou retardado?



Exercício 1.

- Considerando o movimento do bloco do exercício anterior, diga em que ponto (ou pontos):
 - O módulo da força que atua no bloco é máximo.
 - A força que atua no bloco é nula.
 - O módulo da velocidade do bloco é máximo.
 - A velocidade do bloco é nula.
 - A força que atua no bloco muda de sentido.
- 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 vibração completa (1 ciclo)?
 - Um estudante, observando o movimento do bloco, verificou que ele, após passar pelo ponto O em um certo instante, tornou a passar

- 100 vezes consecutivas por este mesmo ponto. Quantos ciclos o bloco completou?
 - Considerando que o bloco tivesse gasto 100 s para efetuar os ciclos mencionados na questão anterior, qual seria a frequência deste movimento?
 - Então, qual seria o valor do período do movimento do bloco?
- Suponha que, na fig. 16-2-a, a distância BB' seja igual a 10 cm. Então, qual é o valor da amplitude de vibração da extremidade da lâmina?
 - Qual é a distância que a extremidade da lâmina percorre durante um intervalo de tempo igual a 2 períodos?
- Um corpo executa um movimento harmônico simples, preso à extremidade de uma mola. Diga se o tempo que o corpo gasta para efetuar uma vibração completa aumentará, diminuirá ou não sofrerá alteração, em cada um dos seguintes casos:
 - O corpo é substituído por outro de massa menor.
 - A mola é substituída por outra mais macia.
 - O corpo é colocado em vibração com uma amplitude menor.
- Suponha que um astronauta levasse um relógio de pêndulo para a Lua.
 - O período do pêndulo aumentaria ou diminuiria?
 - E a frequência do pêndulo?
 - Então, o relógio se adiantaria ou se atrasaria?
 - Para acertar o relógio, o astronauta deveria aumentar ou diminuir o comprimento do pêndulo?

O pêndulo de Foucault

Em uma famosa experiência, realizada em 1852, o cientista francês Léon Foucault utilizou um pêndulo para demonstrar, de modo convincente, que a Terra está em rotação.

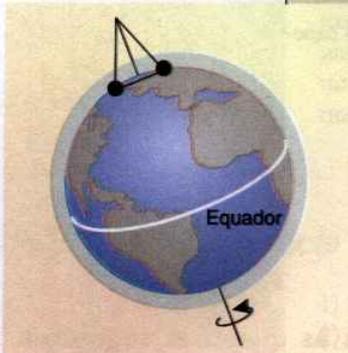


Fig. I: Representação de um pêndulo posto a oscilar no pólo norte.

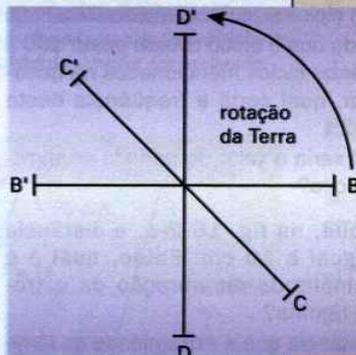


Fig. II: Em virtude da rotação da Terra, o plano de oscilação de um pêndulo parece girar em sentido contrário a essa rotação.

Para você entender a experiência do “pêndulo de Foucault”, considere a figura I, que mostra um pêndulo oscilando exatamente no pólo 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 através da suspensão.

Suponha que o pêndulo da figura I seja colocado a oscilar ao longo da linha BB' (figura II). 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'). Evidentemente, após 12 horas (a Terra completou $1/2$ volta de sua rotação completa), o pêndulo estaria oscilando novamente na direção BB' .

Tendo essas idéias em mente, Foucault construiu um grande pêndulo, com massa aproximadamente igual a 30 kg, sustentado por um fio de aço com cerca de 70 m de comprimento. Esse pêndulo foi suspenso na cúpula do famoso Pantéon de Paris. A altura do saguão desse prédio permitia a instalação de um pêndulo com comprimento tão elevado. 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.

16.2. ondas em uma corda

PROPAGAÇÃO DE UM PULSO

A fig. 16-4-a mostra uma corda presa em uma de suas extremidades e esticada horizontalmente por uma pessoa. Se esta pessoa movimentar sua mão para cima e, em seguida, para baixo, retornando à posição inicial, verifica-se que um distúrbio, ou *pulso*, propaga-se ao longo da corda, com uma certa velocidade, como procuramos mostrar na fig. 16-4.

Fixando nossa atenção em um ponto qualquer da corda (marcando o ponto com tinta ou giz, por exemplo), poderemos perceber que este ponto desloca-se para cima e para baixo, reproduzindo o movimento da mão, enquanto o pulso

passa por ele (fig. 16-4-d). Em outras palavras, é apenas o pulso (a perturbação) que se desloca ao longo da corda, enquanto seus pontos simplesmente sobem e descem à medida que o pulso passa por eles.

O QUE É UMA ONDA

Imaginemos, agora, que a pessoa, ao segurar a corda, deslocasse sua mão continuamente para cima e para baixo da posição inicial. Neste caso, teremos uma série de pulsos, voltados alternadamente para cima e para baixo, propagando-se ao longo da corda, como mostra a fig. 16-5. Dizemos que esta série de pulsos constitui uma *onda* propagando-se na corda. Os pontos mais altos dos pulsos que estão voltados para cima são denominados *cristas* da onda e os pontos mais baixos dos pulsos inferiores são os *vales* da onda (fig. 16-5).

Um ponto qualquer do meio material (no caso a corda), ao ser atingido pela onda, inicia um movimento vibratório, oscilando enquanto a onda passa por ele. Por exemplo, o ponto *P* da fig. 16-5 vibra, 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 vibração deste 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 vibrações de um ponto do meio no qual ela se propaga.

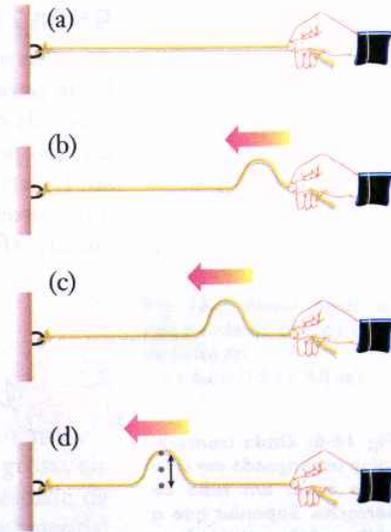


Fig. 16-4: Propagação de um pulso ao longo de uma corda esticada.

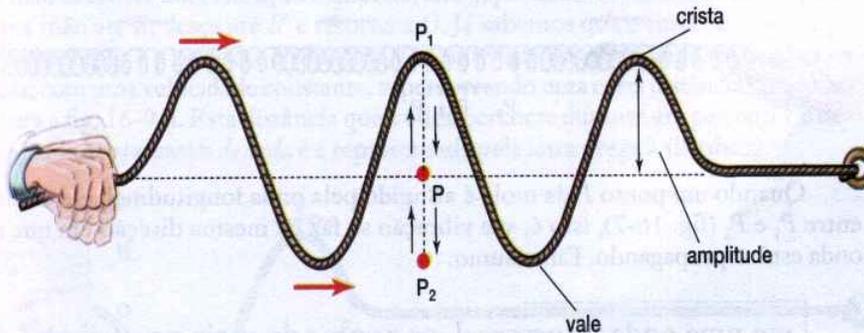


Fig. 16-5: Uma onda é constituída de cristas e vales que se propagam ao longo da corda.

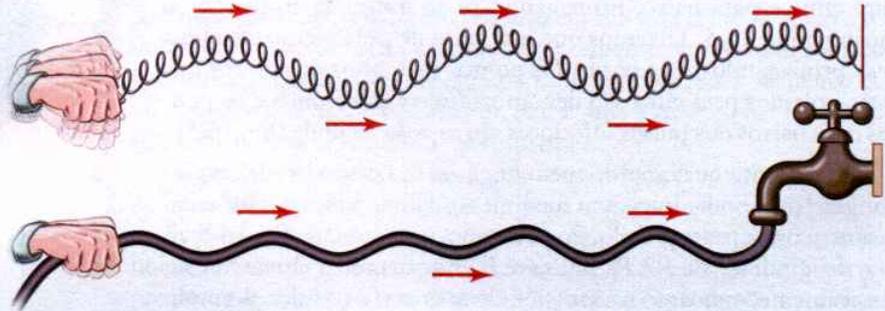
Assim, na fig. 16-5, a amplitude da onda é *PP*₁ (ou *PP*₂) e a frequência da onda é o número de vibrações que o ponto *P* executa em 1 segundo.

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. Isto significa que se a pessoa desejar produzir uma onda de maior amplitude, ela deverá simplesmente aumentar a amplitude de vibração 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. Evidentemente, 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 $f = 1/T$, que já conhecemos.

ONDA TRANSVERSAL E ONDA LONGITUDINAL

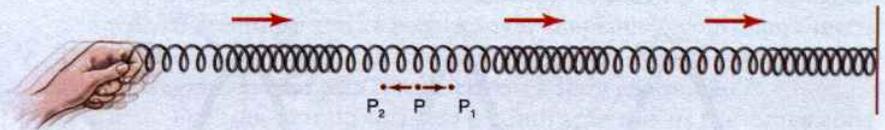
No movimento ondulatório mostrado na fig. 16-5, os pontos da corda vibram para cima e para baixo enquanto a onda se propaga, para a direita, ao longo da corda. Uma onda como esta, em que a vibração dos pontos se faz em direção perpendicular à direção de propagação, é denominada *onda transversal*. É claro que podemos fazer uma onda como esta se propagar não apenas em uma corda, mas também em uma mola esticada, em um longo tubo de borracha etc. (fig. 16-6).

Fig. 16-6: Onda transversal se propagando em uma mola e em um tubo de borracha. Suponha que a onda esteja atingindo o obstáculo 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 esta 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 (fig. 16-7). Um distúrbio como este propagando-se na mola é denominado uma *onda longitudinal*.

Fig. 16-7: Onda longitudinal se propagando em uma mola.



Quando um ponto P da mola é atingido pela onda longitudinal, ele oscila entre P_1 e P_2 (fig. 16-7), isto é, sua vibração 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 vibram perpendicularmente à direção de propagação da onda.

Em uma onda longitudinal, os pontos do meio no qual ela se propaga vibram paralelamente à direção de propagação da onda.

VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE UMA ONDA

A velocidade de uma onda em um meio é a velocidade com que os pulsos da onda se propagam neste meio. Assim, se uma pessoa produzir um pulso na extremidade de uma corda, cujo comprimento é de 6,0 m (fig. 16-8-a), e o pulso atin-

gir a outra extremidade depois de 1,5 s (fig. 16-8-b), concluímos que a velocidade de propagação da onda nesta corda é

$$v = \frac{6,0 \text{ m}}{1,5 \text{ s}} \quad \text{ou} \quad v = 4,0 \text{ m/s}$$

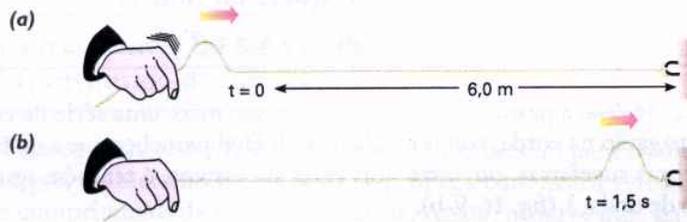


Fig. 16-8: Nesta corda, a velocidade de propagação do pulso foi $v = 6,0 \text{ m}/1,5 \text{ s} = 4,0 \text{ m/s}$.

De um modo geral, a velocidade de uma onda depende do meio no qual ela se propaga. Para uma corda, por exemplo, verifica-se que quanto mais grossa ela for (maior massa por unidade de comprimento), menor será a velocidade da onda. Esta velocidade depende, também, da tensão a que a corda está submetida: quanto mais esticada ela estiver, maior será a velocidade de propagação da onda nesta corda.

Oportunamente, estudaremos as ondas sonoras que se propagam no ar, na água, no ferro etc., e veremos que a velocidade de propagação é diferente para cada um desses meios.

COMPRIENTO DE ONDA

Suponha que uma pessoa, segurando a extremidade de uma corda esticada, faça sua mão executar uma vibração completa, isto é, partindo de O , na fig. 16-9-a, eleve sua mão até B , desça até B' e retorne a O . Já sabemos que o intervalo de tempo desta oscilação é o período, T , da onda. Durante este tempo, a onda se propaga na corda, com uma velocidade constante, v , percorrendo uma certa distância OP , como mostra a fig. 16-9-a. Esta distância que a onda percorre durante um período T é denominada *comprimento de onda* e é representada pela letra grega λ (lâmbda).

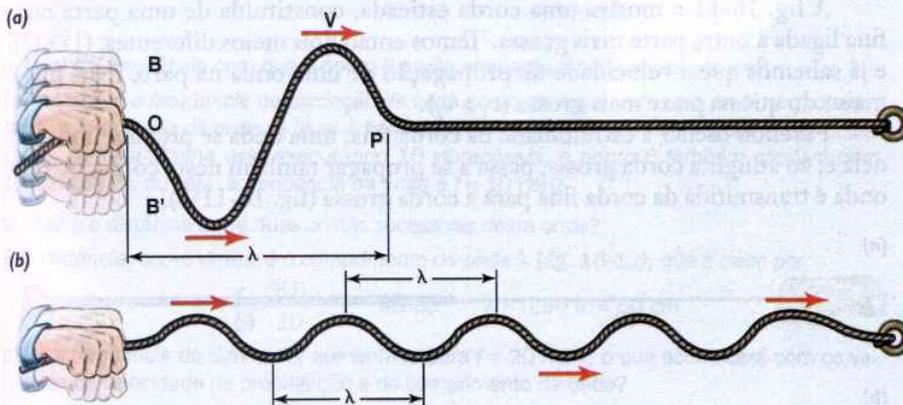


Fig. 16-9: O comprimento de onda é a distância que a onda percorre durante o tempo de um período. Logo, temos $\lambda = vT$.

É claro que, como a onda se propaga com velocidade, v , constante, podemos escrever

$$\lambda = vT \quad \text{e como} \quad T = \frac{1}{f} \quad \text{vem} \quad \lambda = \frac{v}{f}$$

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

$$\lambda = vT \quad \text{ou} \quad \lambda = v/f$$

Se, na fig. 16-9-a, a pessoa continuar a oscilar sua mão, uma série de cristas e vales se propagarão na corda, como já sabemos. É fácil perceber que a distância entre duas cristas sucessivas, ou entre dois vales sucessivos, é também igual ao comprimento de onda, λ (fig. 16-9-b).

Já vimos que, em um dado meio (submetido a condições invariáveis), 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 a produz. Então, na relação $\lambda = v/f$, como v é fixo para um dado meio, vemos que 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 (fig. 16-10).

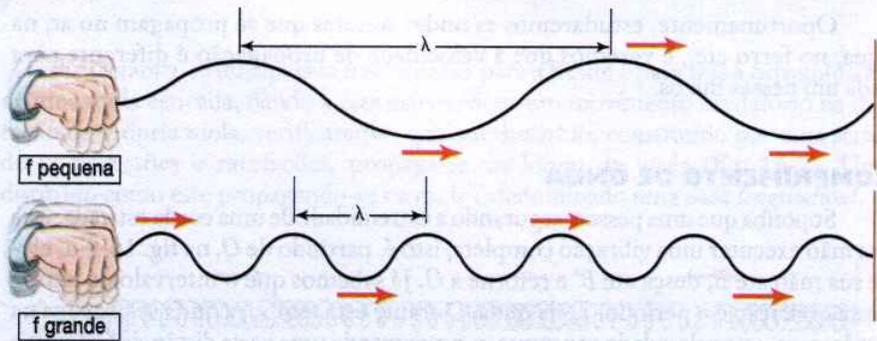


Fig. 16-10: Em um dado meio, quanto maior for a frequência de uma onda, menor será o seu comprimento de onda.

PASSAGEM DE UMA ONDA DE UM MEIO PARA OUTRO

A fig. 16-11-a mostra uma corda esticada, constituída de uma parte mais fina ligada a outra parte mais grossa. Temos então dois meios diferentes, (1) e (2), e já sabemos que 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 nesta corda, isto é, a onda é transmitida da corda fina para a corda grossa (fig. 16-11-b).

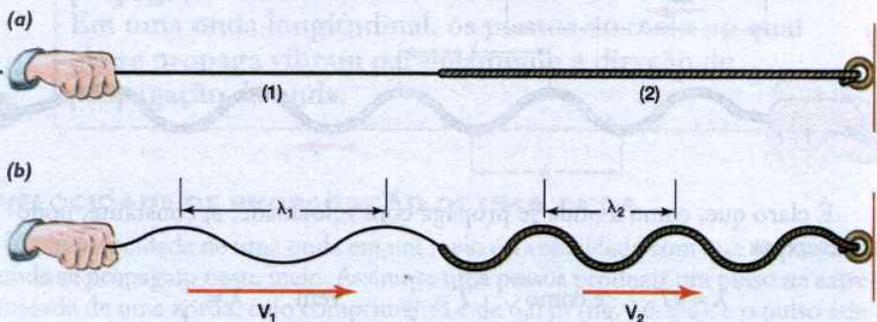


Fig. 16-11: Quando uma onda passa de um meio para outro, sua frequência não se altera.

É fácil perceber que, se a corda fina estiver vibrando, por exemplo, com uma frequência de 10 vibrações/s, teremos 10 pulsos por segundo chegando ao ponto de união das duas cordas e, conseqüentemente, 10 pulsos por segundo irão se propagar na corda grossa. Concluimos, então, que:

a frequência de uma onda não se altera quando ela é transmitida de um meio para outro.

Pela equação $\lambda = v/f$, sendo o valor de f o mesmo para os meios (1) e (2), vemos que, no meio no qual a onda se propaga com maior velocidade, ela terá maior comprimento de onda e vice-versa. Assim, observe que, na fig. 16-11-b, como $v_2 < v_1$, temos $\lambda_2 < \lambda_1$.

Exemplo

A lâmina de vibração de uma campainha elétrica está presa à extremidade de uma corda esticada. Ligando-se a campainha, a lâmina passa a vibrar, executando 10 oscilações/s, dando origem a uma onda que se propaga na corda com uma velocidade $v = 5,0$ m/s (fig. 16-12).

a) Quanto tempo a onda gasta para atingir um ponto P, situado à distância $d = 10$ m da lâmina?

Designando por t este tempo e sendo constante a velocidade de propagação da onda na corda, podemos escrever que

$$d = vt \quad \text{donde} \quad t = \frac{d}{v} = \frac{10}{5,0} \quad \text{ou} \quad t = 2,0 \text{ s}$$

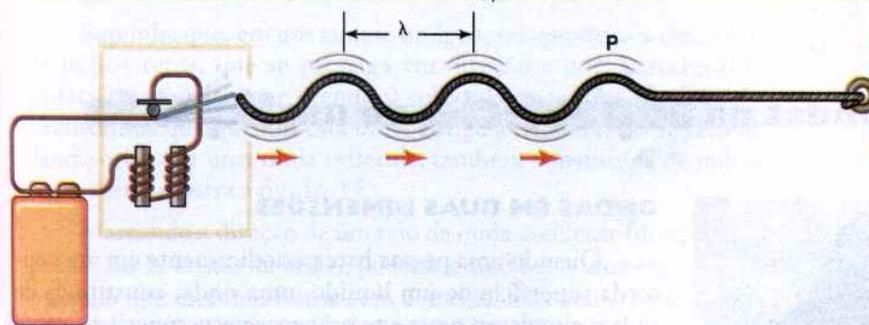


Fig. 16-12: Para o exemplo da secção 16.2.

b) Qual é a frequência com que o ponto P oscila enquanto a onda passa por ele?

Sabemos que a frequência de oscilação de cada ponto do meio onde uma onda se propaga, isto é, a frequência da onda, é igual à frequência do dispositivo que deu origem a esta onda. Então, como a lâmina está executando 10 vibrações/s, o ponto P também oscilará com 10 vibrações/s, ou seja, a frequência da onda é $f = 10$ hertz.

c) Qual é a distância entre duas cristas sucessivas desta onda?

Esta distância, como vimos, é o comprimento de onda λ (fig. 16-12), que é dado por

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{5,0}{10} \quad \text{donde} \quad \lambda = 0,50 \text{ m} = 50 \text{ cm}$$

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), concluímos que a velocidade de propagação da onda não se modificará, continuando com o mesmo valor $v = 5,0$ m/s.

Entretanto, o comprimento de onda tornar-se-á menor (porque f aumentou), passando a valer

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{5,0}{20} \quad \text{donde} \quad \lambda = 0,25 \text{ m} = 25 \text{ cm}$$

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima secção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

Os exercícios seguintes se referem à fig. 16-11 que, como vimos, mostra uma onda se propagando em uma corda (1), mais fina, e sendo transmitida para uma corda (2), mais grossa.

7. 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 a frequência com que um ponto qualquer da corda (1) está oscilando?
 - b) Qual é o tempo que a mão da pessoa gasta para efetuar uma vibração completa?
 - c) Quantas vibrações por segundo efetua o ponto de união das duas cordas?
 - d) Qual é a frequência da onda que se propaga na corda (2)?
8. Sendo $v_2 = 1,0$ m/s a velocidade de propagação

da onda na corda (2), determine a distância entre duas cristas consecutivas nesta corda.

9. Considere que um pulso seja produzido pela mão, em um certo instante, no início da corda (1). Sabendo-se que o comprimento de cada corda é igual a 120 cm, quanto tempo este pulso gastará para alcançar a extremidade da corda (2) ligada à parede?
10. Suponha que a frequência de oscilação da mão da pessoa seja aumentada. Nestas condições:
 - a) A frequência da onda na corda (1) aumentará, diminuirá ou não sofrerá alteração? E a frequência da onda na corda (2)?
 - b) Os valores de v_1 e v_2 se modificarão? Explique.
 - c) Os valores dos comprimentos de onda nas duas cordas serão aumentados, diminuídos ou não se alterarão?

16.3. ondas na superfície de um líquido

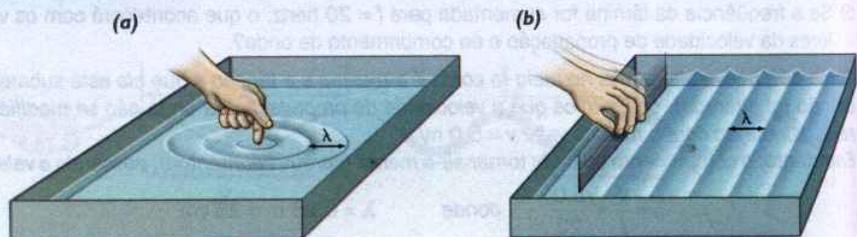
Laurení Fochetto



ONDAS EM DUAS DIMENSÕES

Quando uma pessoa bate periodicamente em um ponto da superfície de um líquido, uma onda, constituída de pulsos circulares, passa a se propagar nesta superfície, como você já deve ter observado várias vezes (fig. 16-13-a). De maneira semelhante, podemos produzir uma onda de pulsos retos, batendo periodicamente com uma régua na superfície do líquido, como mostra a fig. 16-13-b. Observe que estas ondas estão se propagando em duas dimensões (a superfície do líquido), enquanto as ondas em uma corda, estudadas na secção anterior, propagam-se apenas em uma dimensão (ao longo da corda).

Fig. 16-13: Batendo na superfície de um líquido, podemos produzir pulsos circulares ou pulsos retos.



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 também diferentes.
- 2º) A distância entre duas cristas sucessivas é o comprimento de onda λ (fig. 16-13).
- 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 neste meio.

Na fig. 16-14 mostramos uma maneira simplificada de representar as ondas na superfície de um líquido. Observe que, nesta representação, são traçadas apenas as cristas da onda: pulsos circulares em (a) e retos em (b). Nesta 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 e cada raio indica uma dessas direções (fig. 16-14-a). A onda de pulsos retos se propaga em uma única direção e, conseqüentemente, os raios desta onda são paralelos entre si, como mostra a fig. 16-14-b.

REFLEXÃO DE UMA ONDA

Suponha 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 (fig. 16-15). Verificamos que quando esta onda atinge a barreira, ela se reflete, dando origem a uma onda refletida, também constituída de pulsos retos, como mostra a fig. 16-15.

Marcando a direção de um raio da onda incidente (direção perpendicular às cristas da onda), podemos medir, em uma experiência, o ângulo que este raio forma com a normal à barreira. Este ângulo, que está representado por \hat{i} na fig. 16-15, é denominado *ângulo de incidência*, de maneira semelhante ao que foi feito na reflexão da luz. Do mesmo modo, podemos marcar a direção do raio da onda refletida e medir o ângulo \hat{r} , de reflexão (fig. 16-15). Repetindo a experiência para diversas inclinações da onda incidente, verificamos que obtemos sempre $\hat{i} = \hat{r}$, isto é: *quando uma onda se reflete em uma barreira, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão*.

Conforme sabemos, este mesmo resultado é obtido quando se estuda experimentalmente a reflexão da luz. Observando coincidências como esta, os físicos do século XVII começaram a suspeitar que a luz poderia ser um tipo de movimento ondulatório.

REFRAÇÃO DE UMA ONDA

Consideremos um tanque de água no qual temos duas regiões: uma mais profunda e outra mais rasa (regiões (1) e (2) na fig. 16-16). Fazendo uma onda propagar-se na superfície da água deste tanque, verificamos que a velocidade

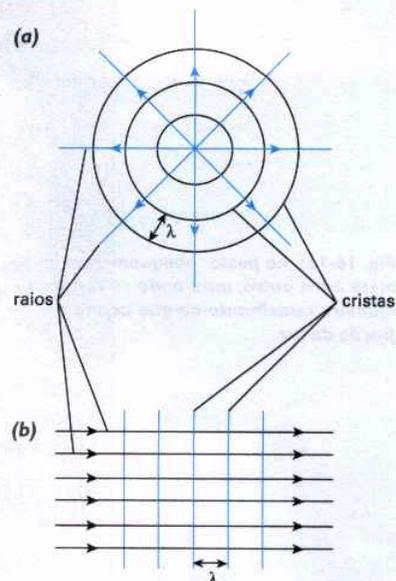


Fig. 16-14: Representação esquemática de uma onda de pulsos circulares (a) e de pulsos retos (b).

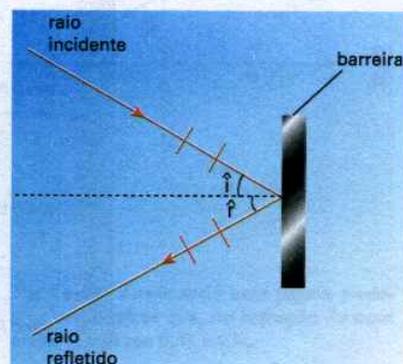


Fig. 16-15: Quando uma onda se reflete, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.

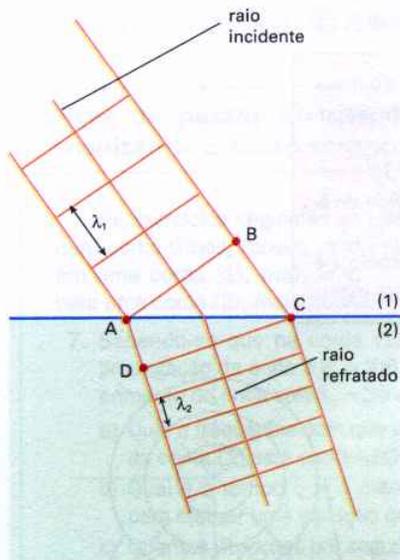


Fig. 16-16: Ao passar obliquamente de um meio para outro, uma onda se refrata de maneira semelhante ao que ocorre na refração da luz.

da onda na região mais profunda é maior do que na região mais rasa ($v_1 > v_2$ na fig. 16-6). Assim, estas duas regiões se comportam como dois meios diferentes para a propagação da onda.

Suponha que uma onda reta esteja se propagando no meio (1), incidindo obliquamente na linha de separação entre os dois meios (fig. 16-16). Quando a extremidade *A*, de um pulso *AB*, atinge esta linha, este ponto do pulso passa a se propagar no meio (2), com uma velocidade v_2 , enquanto outros pontos do pulso (como a extremidade *B*) ainda estão se propagando no meio (1), com uma velocidade $v_1 > v_2$. Assim, no intervalo de tempo em que a extremidade *B* percorre a distância *BC*, a extremidade *A* terá percorrido uma distância *AD* menor do que *BC*. Em virtude disto, quando o pulso passa a se propagar no meio (2), sua direção de propagação se modifica e, conseqüentemente, os raios desta onda também terão direções diferentes nos dois meios (fig. 16-16). Em outras palavras, a onda sofre *refração* ao passar obliquamente de um meio para outro, nos quais ela se propaga com velocidades diferentes. Como você se lembra, a luz também se refrata e este fato vem reforçar a idéia de que a luz, talvez, seja uma onda.

Na secção anterior aprendemos que a freqüência de uma onda não se altera quando ela passa de um meio para outro. Então, na fig. 16-16, a onda tem a mesma freqüência nos meios (1) e (2). Lembre-se, entretanto, que, sendo $\lambda = v/f$, devemos ter $\lambda_2 < \lambda_1$, conforme está representado na figura, pois $v_2 < v_1$.

Modelo mecânico da refração de uma onda

Na figura I, as linhas paralelas representam as cristas de uma onda qualquer (como uma onda sonora) propagando-se em um meio *A*, penetrando em outro meio *B* (no qual sua velocidade de propagação é diferente) e voltando a se propagar no meio *A*.

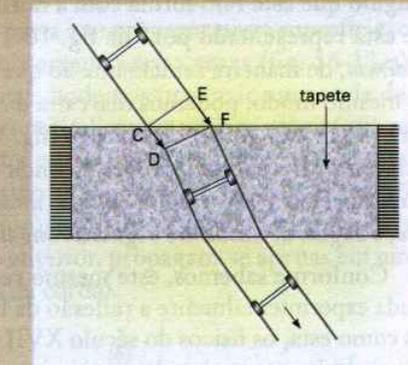
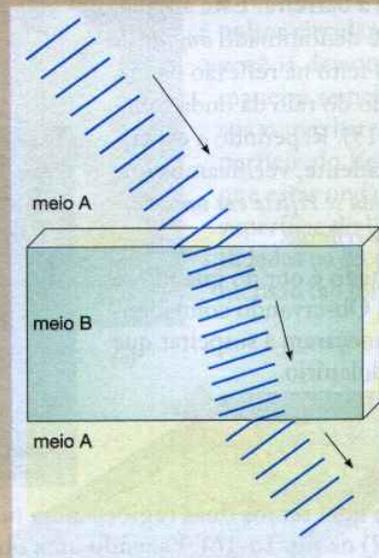


Fig. II: Modelo que nos permite perceber por que uma onda se refrata.

Fig. I: A direção de propagação de uma onda é alterada quando ela passa obliquamente de um meio para outro.

Observe que, quando a onda passa de um meio para outro, ela sofre uma *mudança em sua direção de propagação*. Esse fenômeno é denominado *refração*: dizemos que a onda se refrata ao passar de um meio para outro (o termo “refratar” tem origem na palavra latina *refractus*, que significa “quebrado” ou “girado para o lado”).

Podemos entender por que uma onda se refrata analisando um modelo mecânico muito simples (figura II):

- duas pequenas rodas, ligadas por um eixo rígido, estão se deslocando em uma superfície lisa (representando uma das cristas da onda se propagando no meio A);
- um tapete, no qual a velocidade das rodas é menor que na superfície lisa, é colocado em seu caminho, de modo que elas incidam inclinadamente em sua borda e passem a se deslocar sobre ele (correspondendo à passagem da onda para o meio B);
- uma das rodas atinge o tapete no ponto C e passa a se deslocar nele com menor velocidade, percorrendo a distância CD. Nesse mesmo intervalo de tempo, a outra roda está ainda se deslocando na superfície lisa e percorre, então, uma distância EF maior que CD. Em virtude disso, vemos claramente que as rodas passam a se deslocar sobre o tapete em uma direção diferente da anterior (esse fato corresponde à refração que a onda sofre, ao passar do meio A para o meio B, também em virtude de sua velocidade ter valores diferentes nesses dois meios);
- quando as rodas passam do tapete para a superfície lisa, ocorre um fenômeno semelhante, mas, como agora há um aumento em suas velocidades, elas se desviam em sentido contrário ao desvio anterior (correspondendo à passagem da onda novamente para o meio A, na figura I).

A LEI DA REFRAÇÃO DE UMA ONDA

A fig. 16-17 reproduz parte da fig. 16-16, mostrando o pulso AB no instante em que sua extremidade A atinge a linha de separação dos meios (1) e (2) e este mesmo pulso após um intervalo de tempo Δt, quando a extremidade B atinge esta linha de separação, isto é, neste intervalo de tempo, B se deslocou para C e A para D. É claro, então, que

$$AD = v_2 \Delta t \quad \text{e} \quad BC = v_1 \Delta t$$

Como você sabe, θ₁ é o ângulo de incidência e θ₂ é o ângulo de refração da onda. Na fig. 16-17, vemos que o ângulo BAC é igual a θ₁ (lados respectivamente perpendiculares) e o ângulo ACD é igual a θ₂ (pelo mesmo motivo). Assim, temos:

— 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 estas igualdades, virá:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{BC}{AC} \times \frac{AC}{AD} \quad \text{ou} \quad \frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{BC}{AD}$$

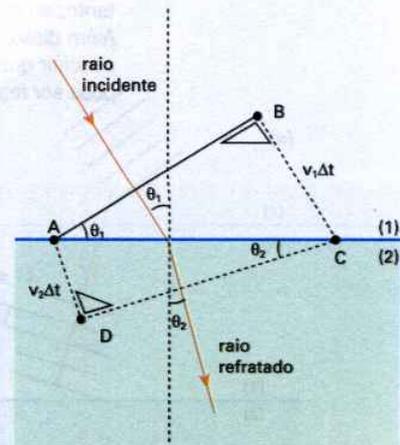


Fig. 16-17: Analisando esta figura, podemos demonstrar que, na refração de uma onda, temos $\text{sen } \theta_1 / \text{sen } \theta_2 = v_1 / v_2$.

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 meio para outro, os ângulos de incidência e de refração são tais que:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \text{constante}$$

Este resultado é idêntico ao que foi obtido por Snell, quando estudou experimentalmente a refração da luz.

O estudo que fizemos da reflexão e 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, leva-nos à suposição de que a luz talvez seja um movimento ondulatório.

Em seções seguintes, veremos como o estudo de outros fenômenos permitiu concluir que esta hipótese é verdadeira.

Exemplo

Uma onda, propagando-se na superfície de um líquido, em uma região (1), com uma velocidade v_1 , incide na linha de separação desta região com uma região (2), na qual sua velocidade de propagação é v_2 (fig. 16-18-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, ao contrário do que ocorre na fig. 16-16, os raios da onda vão se afastar da normal. Além disso, como a frequência é a mesma nas duas regiões, a relação $\lambda = v/f$ 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 fig. 16-18-b.

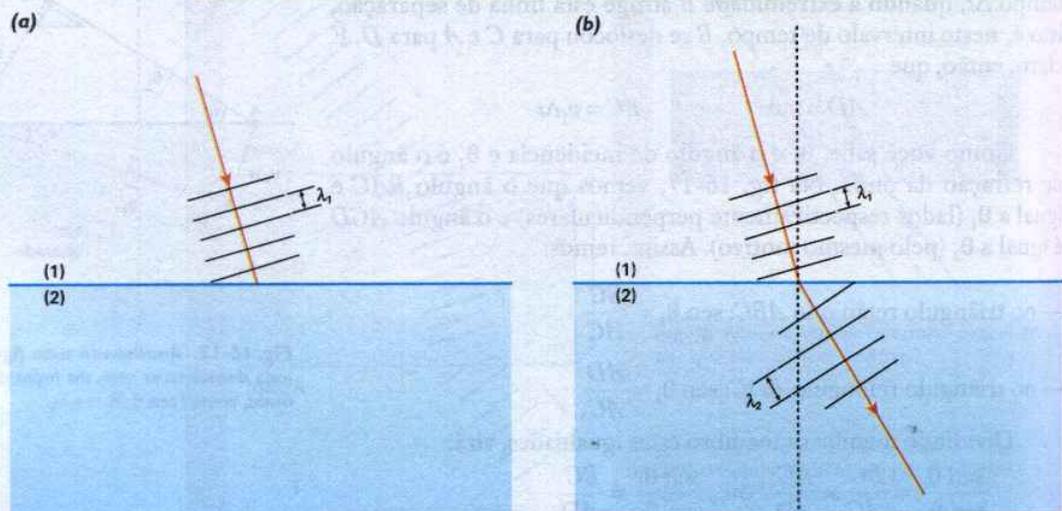
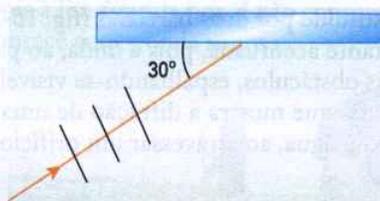


Fig. 16-18: Para o exemplo da seção 16.3.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

11. A figura deste exercício representa as cristas de uma onda propagando-se na superfície de um líquido em direção a uma barreira.
- Qual é o valor do ângulo de incidência desta onda sobre a barreira?
 - E o valor do ângulo de reflexão?
 - Desenhe, em uma cópia da figura, o raio refletido correspondente ao raio incidente mostrado.
 - Desenhe as cristas da onda refletida.
 - O comprimento de onda aumenta, diminui ou não varia após a reflexão? Explique.



Exercício 11.

12. Um tanque, contendo água, apresenta três regiões A, B e C, tais que as profundidades de A e C são iguais e a região intermediária, B, é mais profunda. Uma onda, produzida em A, é transmitida para B, propagando-se, em seguida, para C.
- Em qual região a velocidade de propagação da onda é maior?
 - A frequência da onda aumenta, diminui ou não varia quando ela passa de A para B? E de B para C?
 - Em qual região o valor do comprimento de onda seria maior?
13. 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.

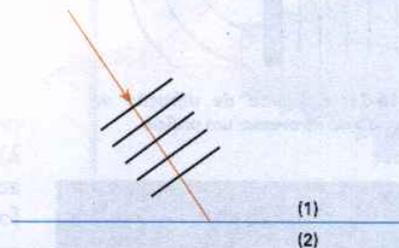
- Qual é o período da onda?
- Descreva o movimento da rolha enquanto a onda passa por ela.
- Quantas vibrações por segundo a rolha efetua em seu movimento?
- Qual é a velocidade de propagação da onda?

14. Suponha que, no exercício anterior, o intervalo de tempo entre duas batidas consecutivas da régua na água fosse diminuindo. Diga se cada uma das grandezas seguintes aumentaria, diminuiria ou não sofreria alteração.

- A frequência da onda.
- A frequência de oscilação da rolha.
- A velocidade de propagação da onda.
- O comprimento de onda.

15. Na figura deste exercício está representada uma onda se propagando em um meio (1), em direção ao meio (2), no qual sua velocidade de propagação é maior do que em (1).

- Em (2), o comprimento de onda será maior ou menor do que em (1)?
- A onda se aproximará ou se afastará da normal ao penetrar em (2)?
- Reproduza a figura deste exercício em seu caderno e complete-a mostrando os pulsos que se propagam em (2).



Exercício 15.

16.4. Difração

DIFRAÇÃO DE UMA ONDA

Consideremos que uma onda, propagando-se na superfície de um líquido, encontre uma barreira que interrompa a propagação de parte desta onda, como mostra a fig. 16-19.

Observamos, então, um fato curioso: a parte da onda que não foi interrompida não se mantém na sua direção inicial de propagação, pois os pulsos, ao pas-

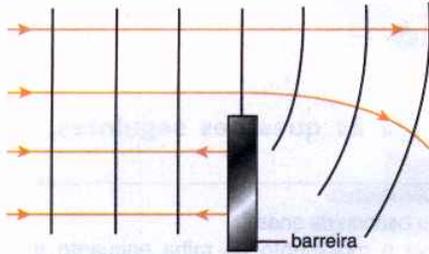


Fig. 16-19: Quando uma onda encontra um obstáculo, ela o contorna, isto é, sua propagação deixa de ser retilínea.

sarem pela barreira, contornam o obstáculo, da maneira indicada na fig. 16-19. Quando isto 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.

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 outra pessoa *B*, situada atrás do muro, porque as ondas sonoras, emitidas por *A*, em virtude da difração, contornam o obstáculo, alcançando o ouvido de *B* (fig. 16-20).

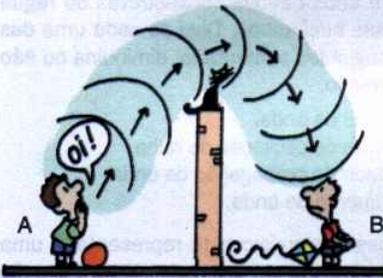


Fig. 16-20: Difração de uma onda sonora em torno de um muro.

DIFRAÇÃO POR UM ORIFÍCIO

Imagine, agora, que uma onda estivesse se propagando em direção a um orifício, constituído por duas barreiras (fig. 16-21). Neste caso, a difração é bastante acentuada, pois a onda, ao passar pelo orifício, contorna os dois obstáculos, espalhando-se visivelmente. A fig. 16-22 é uma fotografia que mostra a difração de uma onda, na superfície de um tanque de água, ao atravessar um orifício formado por duas barreiras.

Se, no tanque mostrado na fig. 16-21, mantendo a mesma largura do orifício, produzirmos uma onda de menor comprimento de onda (maior frequência), verificaremos que, ao passar pelo orifício, a difração desta onda será menos acentuada (fig. 16-23).

Esta experiência nos mostra que, ao passar por um dado orifício, a difração de uma onda será tanto mais acentuada quanto maior for o seu comprimento de onda. Este resultado se aplica também à difração em torno de um obstáculo, mostrada na fig. 16-19: se a onda que atinge a barreira possuir um comprimento de onda menor, sua difração também seria menor.

Outro fator que influi na difração de uma onda é a largura do orifício. Observando a difração de uma onda (com um dado valor de λ) através de vários orifícios, verificamos que a difração é tanto mais acentuada quanto *menor* for a largura do orifício. 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.

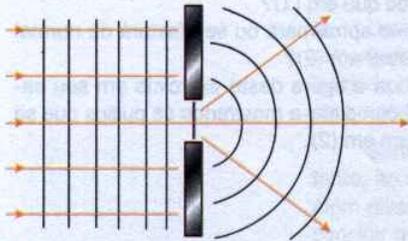


Fig. 16-21: Esquema de difração de uma onda ao atravessar um orifício.

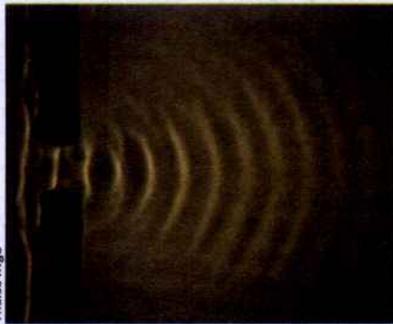


Fig. 16-22: Fotografia mostrando uma onda, na superfície da água, sofrendo difração ao passar por um orifício.

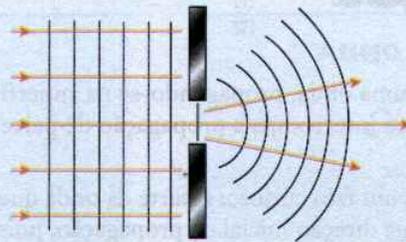
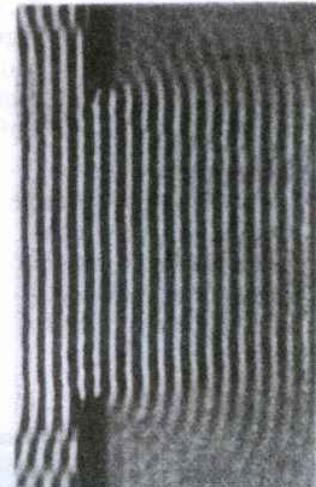


Fig. 16-23: Quanto menor for o valor de λ , menos acentuada será a difração da onda.

Observe, então, que, se o comprimento de onda for muito menor do que a largura do orifício, a onda praticamente não se difrata, isto é, sua direção de propagação não é alterada quando ela passa pelo orifício.



Uma onda praticamente não se difrata ao passar por um orifício cuja largura é muito maior que seu comprimento de onda.

DIFRAÇÃO DA LUZ

Na secção anterior foi levantada a hipótese de que a luz poderia ser um tipo de movimento ondulatório, uma vez que a luz e uma onda se refletem e se refratam de maneiras semelhantes. Se esta hipótese for verdadeira, a luz deveria também se difratar, ao passar por um orifício, pois isto ocorre com qualquer tipo de onda.

Normalmente, porém, quando a luz passa por um orifício (como por exemplo, o buraco de uma fechadura), observa-se que não há difração, pois a luz continua a se propagar na mesma direção inicial, após atravessar o orifício (fig. 16-24). Da mesma forma, na fig. 16-20, embora a pessoa B possa ouvir a pessoa A (em virtude da difração do som), ela não poderá ver esta pessoa, pois a luz emitida por A não contorna o muro, isto é, não se difrata, como acontece com a onda sonora.

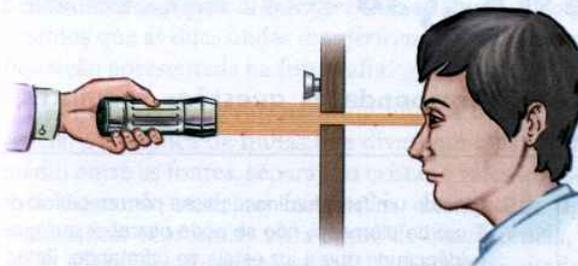
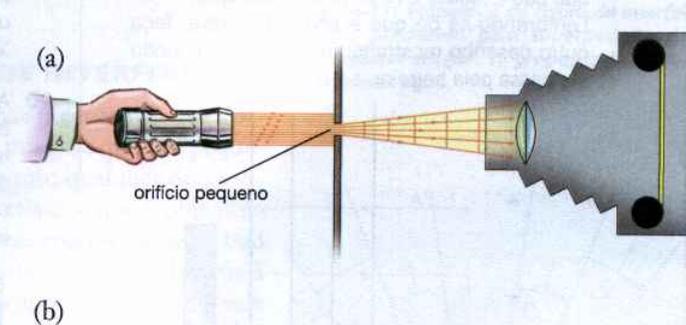


Fig. 16-24: Não se percebe difração da luz quando ela passa através de orifícios como, por exemplo, o buraco de uma fechadura.

Devemos nos lembrar, entretanto, de que não percebemos a difração de uma onda quando ela passa por um orifício muito maior do que o seu comprimento de onda. Isto poderia estar ocorrendo com a luz nas situações normais citadas, isto é, o seu comprimento de onda pode ser muito menor do que o tamanho, por exemplo, de um buraco de fechadura. Esta suposição é confirmada através da seguinte experiência: faz-se um feixe de luz paralelo passar por um pequeno orifício e fotografa-se o feixe emergente. Se a luz se difrata, como foi representado na fig. 16-25-a, as dimensões do orifício na fotografia parecerão maiores do que são na realidade. Na fig. 16-25-b, apresentamos fotografias obtidas da maneira que acabamos de descrever. A primeira fotografia é de uma fenda, cuja largura é de 1,5 mm. Nas fotos seguintes, a abertura da fenda foi reduzi-



Profª Dra. Marisa A. Cavalcante/GOPEF/PUC-SP



Fig. 16-25: A luz se difrata quando passa através de orifícios muito pequenos. Em uma fotografia, as dimensões do orifício parecem ser maiores do que as dimensões reais.

da, sucessivamente, para 0,7 mm, 0,4 mm, 0,2 mm e 0,1 mm. Observando as fotografias, vemos claramente que *houve difração da luz*, pois as dimensões das fotos não correspondem às dimensões reais das fendas citadas. Justamente a última fotografia, que corresponde à fenda mais estreita, é que se apresenta mais larga, isto é, nela a difração é mais acentuada.

Assim, o fato de observarmos a difração da luz, através de pequenos orifícios, permite-nos concluir que:

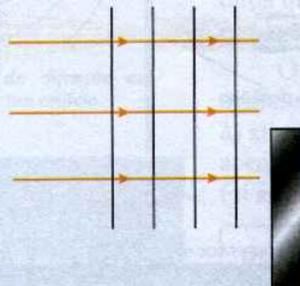
a luz é um movimento ondulatório cujo comprimento de onda é muito pequeno.

Nas seções seguintes, analisando o fenômeno de interferência, veremos como o físico inglês, T. Young, no século passado, conseguiu medir o comprimento de onda da luz.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

16. a) Copie a figura deste exercício em seu caderno e complete-a, desenhando a trajetória seguida pela onda após passar pela barreira, supondo que não existisse o fenômeno da difração. Lembrando-se de que a onda se difrata, faça outro desenho mostrando o que ocorre quando ela passa pela barreira.



Exercício 16.

17. Verifica-se que as ondas de rádio, ao contornarem uma montanha, sofrem uma difração mais acentuada do que as ondas de TV. Então, qual destas duas ondas tem maior comprimento de onda?
18. Considerando a difração da onda mostrada na fotografia da fig. 16-22, diga se esta difração seria mais acentuada ou menos acentuada nos seguintes casos:
- Se a abertura do orifício fosse menor.
 - Se a frequência da onda fosse maior.

19. 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, aproximadamente igual ou muito menor do que 1 cm?

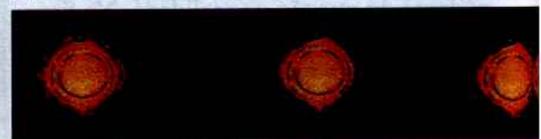
20. A figura deste exercício mostra duas fotografias de feixes luminosos emergindo de quatro orifícios existentes em um anteparo opaco. Na foto (b), os orifícios possuem diâmetros menores do que em (a). Então, por que os tamanhos dos orifícios parecem ser maiores em (b)?

(a)



Prof. Dra. Marisa A. Cavalcante/GOPEF/PUC-SP

(b)



Exercício 20.

16.5. Interferência

FIGURA DE INTERFERÊNCIA

Batendo-se periodicamente com dois pequenos objetos na superfície de um líquido, duas ondas circulares se propagarão nesta superfície, como mostra a fig. 16-26. Os dois objetos, F_1 e F_2 , são as fontes que dão origem a estas ondas. Suponhamos que estas fontes vibrem com a mesma frequência e batam simultaneamente no líquido, isto é, no instante em que uma produz uma crista, a outra também gera uma crista e, quando uma produz um vale, a outra também o faz. Nestas condições, dizemos que as duas fontes estão *em fase*. Além disso, vamos supor que as ondas produzidas pelas duas fontes tenham a mesma amplitude.

Evidentemente, as duas ondas, originadas em F_1 e F_2 , irão se superpor ao se propagarem na superfície do líquido. Em virtude desta superposição, a superfície do líquido adquire o aspecto mostrado na fotografia da fig. 16-27. Esta configuração é o que denominamos *figura de interferência*, ou, em outras palavras, dizemos que as duas ondas *interferiram*, dando origem à configuração apresentada na fotografia.

Podemos observar, na fotografia da figura de interferência, a presença de linhas que divergem a partir do ponto médio entre as fontes, separando cristas e vales que se propagam afastando-se destas fontes. No desenho da fig. 16-28 procuramos reproduzir uma figura de interferência, onde A , A' , B , B' etc. representam as linhas divergentes citadas.

POR QUE SE FORMA UMA FIGURA DE INTERFERÊNCIA

Analisemos, em primeiro lugar, as linhas divergentes que aparecem na figura de interferência. Para isto, imagine que um pequeno objeto fosse colocado flutuando em um ponto qualquer dessas linhas, como o ponto P da fig. 16-28. Observaríamos que o objeto ficaria em repouso, mostrando *que este ponto não está em vibração*. Isto ocorre porque as duas ondas alcançam o ponto P se opondo uma à outra (por exemplo, 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 e este ponto é denominado um *nó*. Todos os pontos das linhas A , A' , B , B' etc. são *nós* e, por este motivo, estas linhas são denominadas *linhas nodais*.

Suponhamos, agora, que o pequeno objeto fosse colocado a flutuar em um ponto situado entre duas linhas nodais, como o ponto P' da fig. 16-28. Neste caso, verificaríamos que o objeto *oscila* com uma amplitude duas vezes maior do que se fosse atingido apenas por uma das ondas. Isto acontece porque as duas ondas chegam em P' reforçando-se mutuamente (a crista de uma onda chega em P' junto com a crista da outra, originando uma dupla crista e, logo depois, chegam a este ponto os vales das duas ondas, originando um

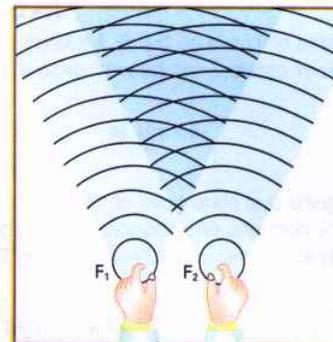


Fig. 16-26: Esquema de superposição de duas ondas se propagando em um mesmo meio.

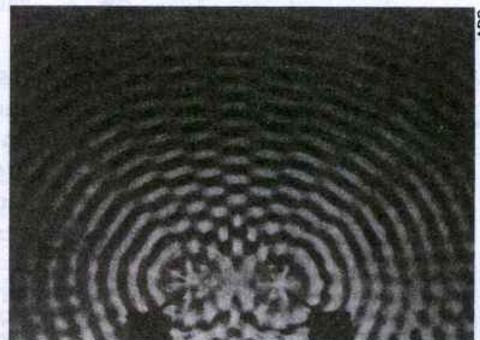


Fig. 16-27: Fotografia da figura de interferência produzida pela superposição de duas ondas em fase se propagando na superfície da água.

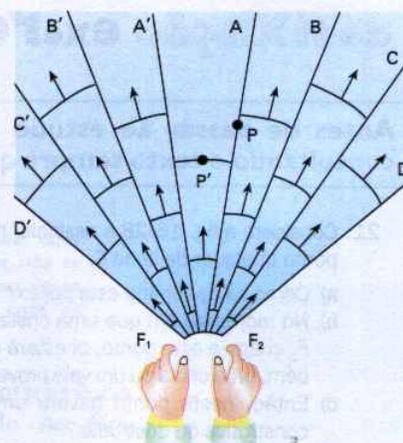


Fig. 16-28: Uma figura de interferência apresenta linhas nodais e duplas cristas (e duplos vales) se propagando entre elas.

duplo vale etc.). Dizemos que, em P , há uma *interferência construtiva* das duas ondas. Esta *interferência construtiva* ocorre em todos os pontos médios situados entre duas linhas nodais, observando-se a propagação de duplas cristas e duplos vales entre estas 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) se propagando entre as linhas nodais.

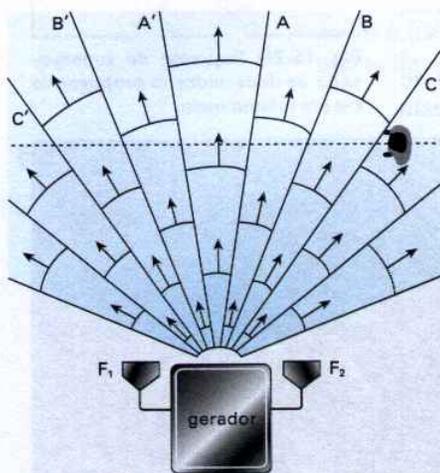


Fig. 16-29: O fenômeno de interferência pode ser observado com qualquer tipo de onda, inclusive com as ondas sonoras.

COMENTÁRIOS

O fenômeno de interferência, que acabamos de analisar, 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.

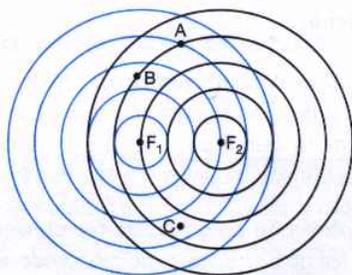
Em particular, podemos obter interferência com ondas sonoras, por exemplo, da seguinte maneira: dois alto-falantes, F_1 e F_2 , separados por uma certa distância, como mostra a fig. 16-29, emitem ondas sonoras de mesma amplitude e em fase. Estas duas ondas, propagando-se no ar, vão se superpor, originando uma configuração de interferência, isto é, 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 fig. 16-29, ela não perceberá som algum ao cruzar as regiões nodais, C , B , A , A' etc. Entretanto, ao passar entre estas regiões, a pessoa escutará um som que, no ponto médio, é muito forte, pois, aí, estarão chegando duplas cristas e duplos vales em seu ouvido.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

- | | |
|---|--|
| <p>21. Considere a fig. 16-28 e assinale, nesta figura, um ponto qualquer da linha C.</p> <ol style="list-style-type: none"> Como se denomina este ponto? No momento em que uma crista proveniente de F_1 chega a este ponto, aí estará chegando, também, uma crista ou um vale proveniente de F_2? Então, neste ponto haverá uma interferência construtiva ou destrutiva? Um pequeno pedaço de cortiça, colocado a flutuar neste ponto, terá algum movimento ao ser atingido pelas ondas provenientes de F_1 e F_2? | <p>22. Assinale, agora, na fig. 16-28, um ponto situado no meio das linhas nodais B' e C.</p> <ol style="list-style-type: none"> Quando neste ponto chega uma crista, vinda de F_1, estará chegando, vindo de F_2, uma crista ou um vale? E quando chega a este ponto um vale vindo de F_1? Então, neste ponto haverá uma interferência construtiva ou destrutiva? Descreva o movimento de um pedaço de cortiça colocado a flutuar neste ponto. |
|---|--|

23. Os círculos mostrados na figura deste exercício 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.



Exercício 23.

- a) No ponto A estão chegando, naquele instante, duas cristas, dois vales ou uma crista e um vale?
 b) E no ponto B?
 c) E no ponto C?
24. 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. c) Um nó.
 b) Um duplo vale.
25. Supondo que a amplitude de cada onda que chega aos pontos A, B e C mencionados no exercício 23 seja igual a 2,5 cm, diga qual será a amplitude de vibração:
 a) Do ponto A. c) Do ponto C.
 b) Do ponto B.

16.6. Interferência com a luz

PODEMOS OBTER INTERFERÊNCIA COM A LUZ?

Na seção 16.4 chegamos à conclusão de 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 duas lâmpadas, como na fig. 16-30, *não* teremos êxito em nossa experiência: colocando um anteparo em frente às duas fontes, ele se apresentará uniformemente iluminado, isto é, *não* observaremos regiões claras e escuras, como ocorreria se houvesse interferência das ondas luminosas provenientes das duas lâmpadas.

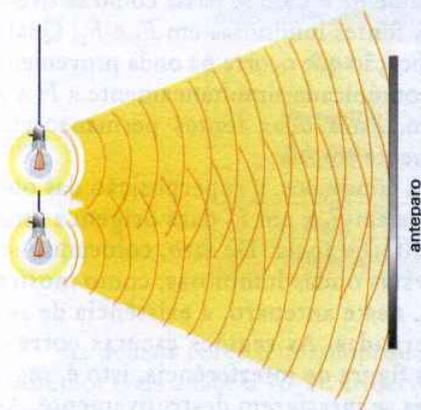
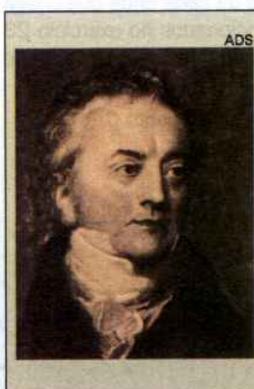


Fig. 16-30: Usando duas lâmpadas distintas, não se consegue obter uma figura de interferência com as ondas luminosas.

Devemos, porém, nos lembrar de que, nas experiências de interferência analisadas anteriormente, as fontes utilizadas estavam vibrando *em fase*. Observamos, ainda, que figuras de interferência semelhantes poderiam também ser obtidas se as fontes mantivessem, entre si, uma diferença de fase constante. Acontece que as duas lâmpadas da fig. 16-30 *não* satisfazem a esta condição,

pois as ondas luminosas são emitidas aleatoriamente pelos átomos de seus filamentos, sendo impossível manter as duas fontes em fase (ou com uma diferença de fase constante). 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 elas. A seguir, veremos como este problema foi resolvido.

A EXPERIÊNCIA DE YOUNG



ADS

T. Young (1773-1829)

Médico e físico inglês, conhecido sobretudo pelo fato de ter conseguido obter interferência com a luz. Diz-se que foi uma criança prodígio, tendo aprendido a ler aos dois anos de idade e que, aos quatro anos, já havia lido a Bíblia por duas vezes. 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).

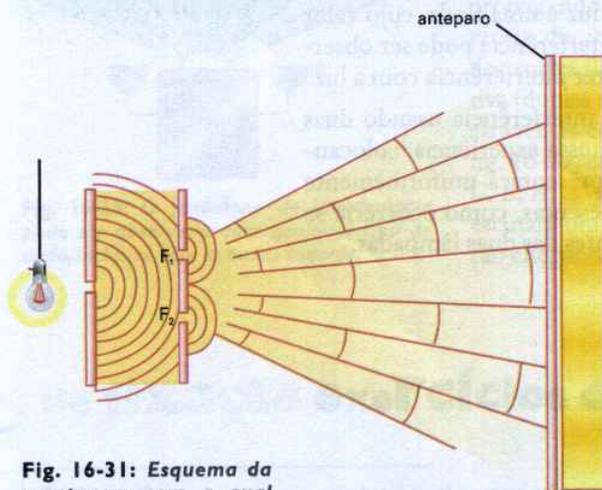


Fig. 16-31: Esquema da montagem com a qual Young obteve interferência com a luz.

O cientista inglês Thomas Young, em 1800, descobriu uma maneira simples de se obter duas fontes de luz em fase. A fig. 16-31 mostra uma montagem semelhante à que foi usada por ele. Uma lâmpada emite luz que se difrata ao passar pelo pequeno orifício O e a onda luminosa difratada se propaga em direção aos orifícios F_1 e F_2 , equidistantes de O . Nestes 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 é comunicada simultaneamente a F_1 e a F_2 e, assim, estas duas fontes permanecerão constantemente em fase.

Nestas 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 estas ondas luminosas, como mostra a fig. 16-31, observaremos, neste anteparo, a existência de regiões claras e escuras, alternadas. 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 pelas duplas cristas e duplos vales, ou seja, regiões onde as ondas luminosas se interferem construtivamente. A figura 16-32 é uma fotografia que se obtém se o anteparo da figura 16-31 for substituído por uma chapa fotográfica. As faixas claras e escuras vistas nesta fotografia são denominadas *franjas de interferências*.

Profª Dra. Marisa A. Cavalcante/GOPEF/PUC-SP



Fig. 16-32: Fotografia de franjas circulares observadas na interferência com a luz de um laser vermelho em uma repetição moderna da experiência de Young.

O sucesso da experiência de Young, mostrando ser possível obter interferência com a luz, teve uma grande repercussão entre os cientistas no início do século passado, pois ela veio estabelecer, de maneira praticamente definitiva, que a luz é um movimento ondulatório.

COR E COMPRIMENTO DE ONDA

Repetindo a sua experiência com luz de cores diferentes, Young verificou que a separação entre as franjas de interferência variava conforme a cor utilizada. Sabe-se, porém, que em uma figura de interferência é possível estabelecer a seguinte relação entre a separação, Δx , de duas linhas nodais consecutivas (veja a fig. 16-33) e o comprimento de onda λ usado na experiência:

$$\Delta x = L \frac{\lambda}{d}$$

onde d é a separação entre as fontes F_1 e F_2 e L é a distância destas fontes ao anteparo (fig. 16-33). Então, como para cada cor corresponde um valor diferente de Δx , Young concluiu que:

para cada cor, corresponde um comprimento de onda λ diferente.

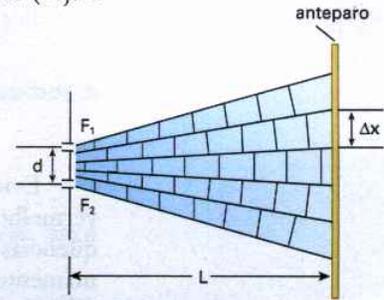


Fig. 16-33: Em uma figura de interferência, a separação entre duas linhas nodais é dada por $\Delta x = L\lambda/d$.

Medindo, cuidadosamente, em suas experiências, os valores de Δx , L e d , Young pôde calcular (usando a expressão $\Delta x = L\lambda/d$) os valores λ correspondentes às diversas cores do espectro. Verificou que a luz vermelha é aquela que possui maior comprimento de onda e que o menor valor de λ corresponde à luz violeta. Estes valores são:

$$\lambda (\text{vermelho}) = 6,5 \times 10^{-7} \text{ m} \quad \text{e} \quad \lambda (\text{violeta}) = 4,5 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Comprimento de onda das cores (no ar)	
Cor	λ (m)
Vermelho	$6,5 \times 10^{-7}$
Amarelo	$5,7 \times 10^{-7}$
Verde	$5,4 \times 10^{-7}$
Azul	$4,8 \times 10^{-7}$
Violeta	$4,5 \times 10^{-7}$

Tabela 16-1.

As demais cores têm comprimentos de onda compreendidos entre estes extremos (veja a tabela 16-1). Observe que estes valores encontrados para λ são muito pequenos, como já havíamos destacado na seção 16.4.

COR E FREQUÊNCIA DA LUZ

As experiências de Young foram feitas no ar e, portanto, os valores de λ a que nos referimos correspondem à luz se propagando neste meio. Como conhecemos a velocidade de propagação da luz no ar ($v = 3,0 \times 10^8$ m/s), podemos usar

a relação conhecida, $f = v/\lambda$, para calcular as freqüências correspondentes a cada cor. Para o vermelho e o violeta obtemos:

$$f(\text{vermelho}) = 4,6 \times 10^{14} \text{ hertz} \quad \text{e} \quad f(\text{violeta}) = 6,7 \times 10^{14} \text{ hertz}$$

Freqüência das cores	
Cor	f (hertz)
Vermelho	$4,6 \times 10^{14}$
Amarelo	$5,3 \times 10^{14}$
Verde	$5,6 \times 10^{14}$
Azul	$6,3 \times 10^{14}$
Violeta	$6,7 \times 10^{14}$

Tabela 16-2.

Evidentemente, ao violeta corresponde a maior freqüência (menor λ) e, ao vermelho, a menor freqüência (maior λ). A tabela 16-2 mostra os valores das freqüências das demais cores (observe que os valores destas freqüências são extremamente elevados).

A experiência nos mostra que a cor de um feixe de luz monocromática não se altera quando este feixe passa de um meio transparente para outro. Por exemplo: um feixe de luz vermelha, no ar, continua com esta cor ao penetrar na água ou no vidro. Sabemos que, quando isto acontece, o comprimento de onda e a velocidade da onda se modificam, mas sua freqüência permanece a mesma. Assim, é recomendável que a cor de um feixe de luz seja caracterizada por sua freqüência e 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 freqüência não se modificam nestas condições.

Podemos, pois, destacar que:

a luz é um movimento ondulatório cujas freqüências são muito elevadas (cerca de 10^{14} hertz). A cada cor do espectro da luz branca corresponde uma freqüência diferente e a ordem crescente destas freqüências é a mesma ordem de distribuição das cores no espectro: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil e violeta.

Após concluirmos que a luz é um movimento ondulatório, deveríamos procurar descobrir qual é a natureza de uma onda luminosa. Em outras palavras, deveríamos tentar responder à seguinte pergunta: o que está vibrando quando uma onda luminosa se propaga?

Young e os físicos de sua época não souberam dar uma resposta satisfatória para esta pergunta. Mais tarde, ao desenvolvermos o estudo do Eletromagnetismo, veremos que o físico escocês J. C. Maxwell, no final do século XIX, conseguiu responder adequadamente a esta indagação, mostrando que *a luz é uma onda eletromagnética*, da mesma natureza que os raios X, as ondas de rádio, de TV etc.

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 destes orifícios 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:

$$\lambda = \frac{d \cdot \Delta x}{L} = \frac{0,02 \times 0,35}{130}$$

$$\text{donde } \lambda = 5,4 \times 10^{-5} \text{ cm} \quad \text{ou} \quad \lambda = 5,4 \times 10^{-7} \text{ m}$$

b) Calcule a frequência desta luz e identifique a sua cor.

A relação $\lambda = v/f$ nos fornece $f = v/\lambda$. Em nosso caso, temos $v = 3,0 \times 10^8$ m/s (velocidade da luz no ar) e $\lambda = 5,4 \times 10^{-7}$ m. Assim:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{3,0 \times 10^8}{5,4 \times 10^{-7}} \quad \text{donde} \quad f = 5,6 \times 10^{14} \text{ hertz}$$

Consultando a tabela 16-2, verificamos que esta 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, qual seriam sua frequência e sua cor no interior do bloco?

Já sabemos que, 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 $f = 5,6 \times 10^{14}$ hertz.

d) Sabendo-se que, no bloco de vidro, a velocidade de propagação da luz é $v = 2,0 \times 10^8$ m/s, qual será o comprimento de onda da luz verde no interior do bloco?

Como já conhecemos os valores de v e f para a luz verde ao se propagar no vidro, a relação $\lambda = v/f$ nos fornecerá:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{2,0 \times 10^8}{5,6 \times 10^{14}} \quad \text{donde} \quad \lambda = 3,6 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Observe que o comprimento de onda diminui quando a luz passa do ar para o vidro.

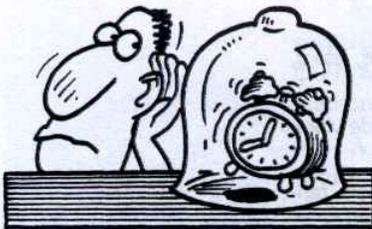
Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, **responda** às questões seguintes, **consultando o texto** sempre que julgar **necessário**.

- | | |
|---|--|
| <p>26. a) Em uma sala existem duas lâmpadas, ambas projetando luz sobre uma mesma parede. Observaremos franjas de interferência sobre esta parede? Por quê?</p> <p>b) Por que Young conseguiu obter franjas de interferência em sua experiência?</p> <p>27. 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.</p> | <p>a) Qual desses feixes tem maior comprimento de onda?</p> <p>b) Então, qual dos dois feixes tem maior frequência? Por quê?</p> <p>28. Um feixe monocromático de luz violeta, propagando-se no ar, passa a se propagar na água. Quando ocorre esta passagem de um meio para o outro:</p> <p>a) A velocidade do feixe aumenta, diminui ou não se altera?</p> |
|---|--|

- b) A frequência do feixe aumenta, diminui ou não se altera?
 c) O comprimento de onda do feixe aumenta, diminui ou não se altera?
 d) A cor do feixe se modifica?
 e) Então, é mais adequado caracterizar a cor de um feixe luminoso pela sua velocidade, por seu comprimento de onda ou por sua frequência?
29. Considere feixes luminosos monocromáticos com as seguintes cores: verde, amarelo, azul, violeta e vermelho. Coloque estes feixes em ordem crescente de suas frequências.

30. 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.
 b) Determine a frequência desta luz.
 c) Usando uma das tabelas apresentadas nesta seção, identifique a cor desta luz.



Retirando-se o ar do interior da campânula de vidro, a pessoa não poderá escutar a campainha do despertador, porque o som não se propaga no vácuo.

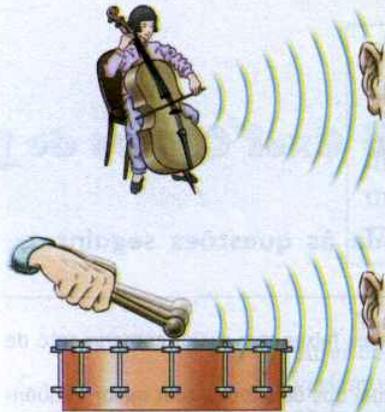


Fig. 16-34: Os objetos materiais, ao vibrem, produzem ondas que, ao alcançarem nosso ouvido, provocam sensações sonoras.

16.7. ondas SONORAS

O QUE É O SOM

Os fenômenos sonoros estão relacionados com as vibrações dos corpos materiais. Sempre que escutamos um som, há um corpo material que vibra, produzindo este som. Por exemplo: quando uma pessoa fala, o som que ela emite é produzido pelas vibrações de suas cordas vocais; quando batemos em um tambor, em um pedaço de madeira ou de metal, estes corpos vibram e emitem som; as cordas de um piano ou de um violão também emitem som quando estão em vibração etc.

Todos estes corpos são fontes sonoras que, ao vibrarem, produzem ondas que se propagam no meio material (sólido, líquido ou gasoso) situado entre elas e o nosso ouvido. Ao penetrarem no ouvido, estas ondas provocam vibrações que nos causam as sensações sonoras (fig. 16-34).

Analisemos a situação mostrada na fig. 16-35. Uma lâmina, colocada em vibração, provoca no ar compressões e rarefações sucessivas que se propagam neste meio, de maneira semelhante ao que acontece em uma mola quando ela vibra longitudinalmente (como foi mostrado na fig. 16-7). Quando uma molécula do ar, situada em P (fig. 16-35), é atingida por esta onda de compressões e rarefações, ela vibra entre os pontos P_1 e P_2 , isto é, ela vibra na mesma direção em que a onda se propaga. Logo, a onda emitida pela lâmina em vibração é uma *onda longitudinal*.

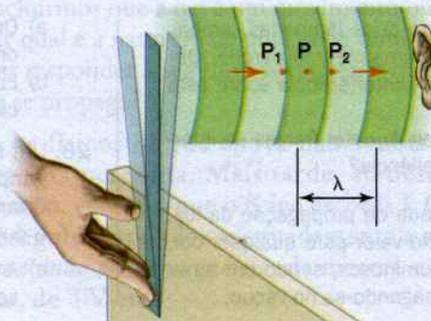


Fig. 16-35: As ondas sonoras são ondas longitudinais que se propagam em um meio material.

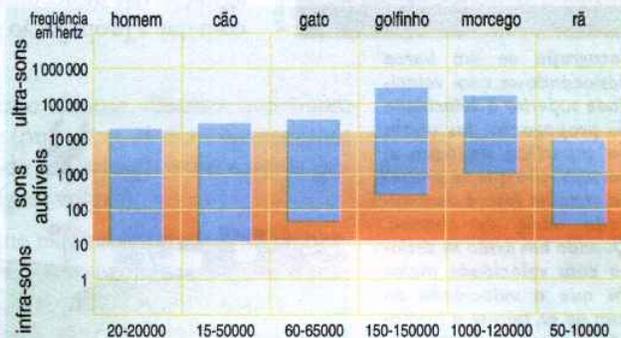
Se a lâmina estiver vibrando com uma frequência menor do que 20 hertz ou maior do que 20 000 hertz, verifica-se que, ao atingir o ouvido de uma pessoa, a onda não provocará nenhuma sensação sonora. Para que a pessoa perceba uma sensação sonora, é necessário que a frequência da onda esteja compreendida entre aqueles limites. Na realidade, as frequências audíveis não estão situadas rigorosamente entre 20 hertz e 20 000 hertz, pois estes limites variam um pouco de uma pessoa para outra. Chegamos, então, à conclusão seguinte:



O morcego emite uma onda de ultra-som que, após ser refletida por um inseto, volta para ele, possibilitando-lhe a localização desse inseto. Ilustração esquemática.

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 20 000 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 um corpo em vibração e o seu ouvido.



Intervalos de frequências sonoras percebidas por alguns animais.

INFRA-SOM E ULTRA-SOM

Uma onda longitudinal propagando-se em um meio material com frequência inferior a 20 hertz é denominada *infra-som* e, se sua frequência for superior a 20 000 hertz, ela é denominada *ultra-som*. Como vimos, estas ondas não provocam sensação sonora ao atingirem o ouvido de uma pessoa.

Entretanto, sabe-se que alguns animais são capazes de perceber os ultra-sons. Experiências recentes mostraram que um cachorro, por exemplo, é capaz de perceber ultra-sons cujas frequências alcançam até 50 000 hertz. É por isto que cães amestrados atendem a apitos de ultra-sons, que uma pessoa não consegue perceber. Sabe-se também que os morcegos, mesmo no escuro, podem voar sem colidir com obstáculos, porque emitem ultra-sons que são captados por seus ouvidos, após se refletirem nestes obstáculos. As frequências dos ultra-sons que os morcegos emitem e ouvem podem chegar a 120 000 hertz. Em um dispositivo, denominado *sonar*, os ultra-sons são utilizados para localizar um objeto e medir a distância até ele, de modo semelhante ao que é feito pelos morcegos. Por exemplo: um cardume de peixes, um submarino ou um ponto no fundo do mar podem ser localizados ao refletirem os ultra-sons emitidos pelo sonar de um navio (fig. 16-36).

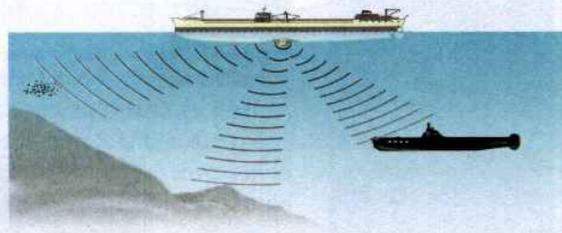
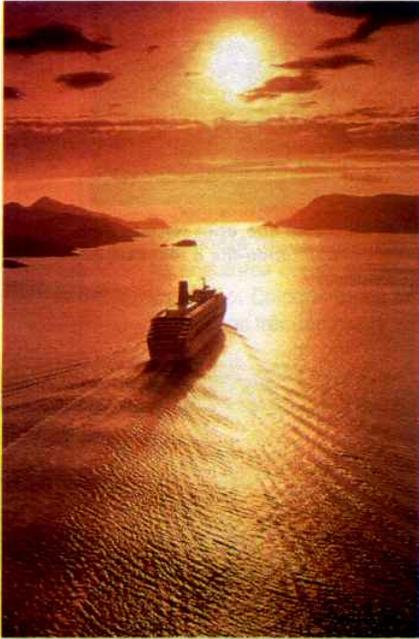


Fig. 16-36: O sonar é um dispositivo que utiliza os ultra-sons para localizar a posição de objetos. Ilustração esquemática.



Keystone

Fotografia de um barco deslocando-se com velocidade superior à velocidade de propagação das ondas na superfície da água. A perturbação que se propaga, vista na foto, é denominada onda de choque. Quando um avião se desloca com velocidade maior do que a velocidade do som no ar, tem-se a formação de uma onda de choque, de maneira semelhante ao que ocorre na situação mostrada na figura.

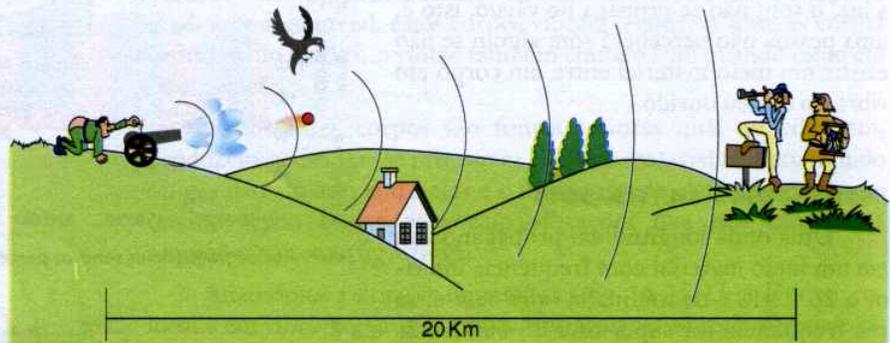


Fig. 16-37: A figura ilustra o método usado no século XVII para determinar o valor da velocidade do som no ar.

VELOCIDADE DO SOM

Você já deve ter percebido que, em uma tempestade, embora um relâmpago e o trovão sejam produzidos no mesmo instante, só ouvimos o trovão um certo tempo após termos visto o relâmpago. Já sabemos que a velocidade da luz é muito grande (300 000 km/s) e, portanto, o relâmpago é visto praticamente no mesmo instante em que ele é produzido. Logo, o intervalo entre a percepção do relâmpago e a do trovão representa o tempo gasto pela onda sonora para chegar até nós.

Uma situação semelhante a esta foi usada por cientistas do século XVII para determinar a velocidade do som no ar: uma pessoa detonava um canhão e, a uma distância de aproximadamente 20 km, outra pessoa media o tempo entre a percepção do clarão e a do som produzidos pelo tiro. Como esta medida representava o tempo que o som levou para percorrer a distância de 20 km, foi possível calcular a velocidade do som no ar (fig. 16-37). Medidas mais recentes, realizadas com maior precisão, mostram que esta velocidade é de 340 m/s, se o ar estiver a 20°C. Esta especificação é necessária porque verifica-se que, quanto maior for a temperatura de um gás, maior a velocidade com que a onda sonora nele se propaga. De fato, a agitação das moléculas de um gás aumenta com a temperatura, fazendo com que a propagação da onda sonora seja mais rápida.

Velocidade do som	
Meio	Velocidade (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

Tabela 16-3.

A velocidade de propagação de uma onda depende do meio no qual ela está se propagando e isto ocorre também com o som. Por exemplo: na água, o som se propaga com uma velocidade de 1 450 m/s, no ferro, com uma velocidade de 5 100 m/s etc. (veja a tabela 16-3).

COMENTÁRIOS

É evidente que todas as propriedades que estudamos para as ondas em geral são também válidas para as ondas sonoras (inclusive para os infra-sons e ultras-sons). Assim, uma onda sonora se *reflete* de tal modo que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão e vários fenômenos, como o eco por exemplo, são causados pela reflexão do som. 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, ainda aqui, a lei de Snell. Como já vimos (fig. 16-20 e 16-29), a *difração* e a *interferência* são fenômenos observados com as ondas sonoras, assim como acontece com qualquer tipo de onda. Além disso, a relação $\lambda = v/f$ é válida para as ondas sonoras e a frequência de um som não se altera quando ele passa de um meio para outro.

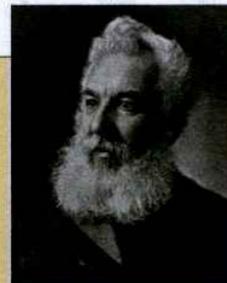
INTENSIDADE DO SOM

Quando um rádio está ligado com seu máximo volume, dizemos que o som emitido por ele é um som de grande *intensidade* (ou, como se diz vulgarmente, “um som forte”). Por outro lado, o tique-taque de um relógio é um som de pequena intensidade (ou um “som fraco”, na linguagem vulgar).

A intensidade é uma propriedade do som que está relacionada com a energia de vibração da fonte que emite a onda sonora. Ao se propagar, a onda transporta esta energia, distribuindo-a em todas as direções. Quanto maior for a quantidade de energia (por unidade de tempo) que a onda sonora transportar até nosso ouvido, maior será a intensidade do som que perceberemos.

Graham Bell (1847-1922)

Cientista inglês que viveu muitos anos nos Estados Unidos, trabalhando inicialmente no campo da dicção e correção da fala. Fundou, na cidade de Boston, uma escola para treinamento de professores de surdos sendo, então, designado professor de fisiologia vocal na universidade desta cidade. Desenvolvendo trabalhos no campo da telegrafia, seus estudos culminaram com a invenção do telefone, que ele patenteou em 1876.



Hulton/Getty Images

Sabe-se que a quantidade de energia transportada por uma onda é tanto maior quanto maior for a *amplitude* da onda. Podemos, então, concluir que:

a intensidade de um som é tanto maior quanto maior for a amplitude da onda sonora.

A intensidade do som é medida em uma unidade denominada 1 bel (em homenagem a Graham Bell). Na prática, usa-se mais comumente um submúltiplo

desta unidade: 1 decibel = 1 dB = 0,1 bel. A título de ilustração, na tabela 16-4 apresentamos a intensidade de alguns sons, em decibéis. Os sons de grande intensidade, de maneira geral, são desagradáveis ao ouvido humano e, como mostra a tabela 16-4, quando atingem uma intensidade próxima de 140 dB, começam a produzir sensações dolorosas.

Intensidades sonoras	
Folhas agitadas por uma brisa	20 dB
Rádio ou TV (em fraco volume)	40 dB
Conversação comum	60 dB
Tráfego intenso	70 dB
Rebitador ou perfuratriz	100 dB
Buzina de automóvel	120 dB
Limiar da sensação dolorosa	140 dB

Tabela 16-4.

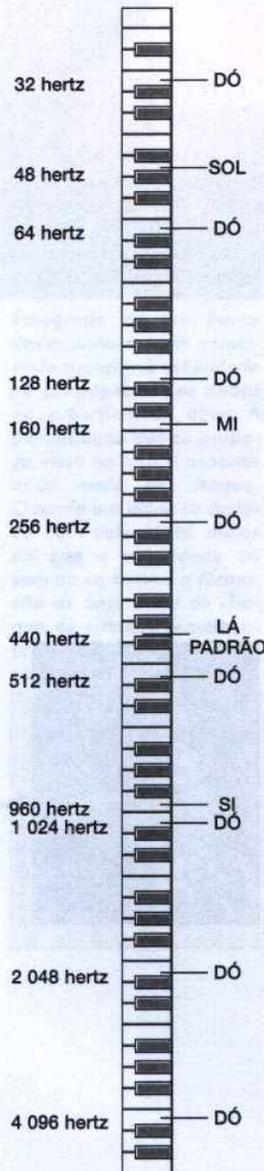


Fig. 16-38: Frequências de algumas notas da escala musical.

ALTURA DO SOM

Altura é a qualidade do som que nos permite classificá-lo como *grave* ou *agudo*. De um modo geral, os homens têm voz grave (voz “grossa”) e, as mulheres, voz aguda (voz “fina”). Em linguagem musical, diz-se que um som agudo é *alto* e um som grave é *baixo* (observe que, na linguagem vulgar, os termos “alto” e “baixo” costumam ser usados referindo-se à intensidade do som, o que deve ser evitado).

Verifica-se que a altura de um som está relacionada com a *freqüência*, f , da onda sonora, de tal modo que quanto mais agudo for o som, maior é a sua *freqüência*. Assim, podemos concluir que a freqüência da voz masculina é, em geral, menor do que a freqüência da voz feminina (as cordas vocais dos homens vibram com freqüência menor do que as cordas vocais das mulheres). Em resumo, temos:

a altura de um som é caracterizada pela freqüência da onda sonora. Um som de pequena freqüência é grave (baixo) e um som de grande freqüência é agudo (alto).

Uma nota musical é caracterizada por sua freqüência, isto é, quando um instrumento musical emite notas diferentes, ele está emitindo sons de *freqüências diferentes*. Em um piano, por exemplo, a cada tecla corresponde um som de freqüência diferente. As teclas à esquerda do pianista correspondem às notas de freqüências menores (sons graves) e, as da direita, às notas de freqüências mais elevadas (sons agudos). Observe, na fig. 16-38, a representação do teclado de um piano, no qual estão indicadas as freqüências de algumas notas.

Os cantores de música clássica são classificados de acordo com as freqüências das notas que eles são capazes de emitir: os *baixos* (voz grave – homem), os *tenores* (voz aguda – homem), os *sopranos* (voz aguda – mulher) etc. As freqüências das notas que estes cantores são capazes de emitir variam desde cerca de 100 hertz (baixo) até cerca de 1 200 hertz (soprano).

TIMBRE

Se tocarmos uma certa nota de um piano e se esta mesma nota (mesma frequência) for emitida, com a mesma intensidade, por um violino, seremos capazes de distinguir uma da outra, isto é, sabemos dizer claramente qual a nota que foi emitida pelo piano e qual foi emitida pelo violino. Dizemos, então, que estas notas têm *timbres* diferentes.

Isto acontece porque a nota emitida pelo piano é o resultado da vibração não só da corda acionada, mas também de várias outras partes do piano (madeira, colunas de ar, outras cordas etc.) que vibram juntamente com ela. Assim, a onda sonora emitida terá uma forma própria, característica do piano. De modo semelhante, a onda emitida pelo violino é o resultado de vibrações características deste instrumento e, por isso, apresenta uma *forma diferente* da onda emitida pelo piano. Na fig. 16-39 mostramos, em (a), a forma resultante de uma onda sonora, cuja frequência é 440 hertz, emitida por um violino e, em (b), a mesma nota (440 hertz) emitida pelo piano. Então, sons de mesma frequência, mas de timbres diferentes, correspondem a ondas sonoras cujas formas são diferentes. Portanto, podemos dizer que:

nosso ouvido é capaz de distinguir dois sons, de mesma frequência e mesma intensidade, desde que as formas das ondas sonoras correspondentes a estes sons 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 (fig. 16-40). 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 este motivo que podemos identificar uma pessoa pela sua voz.

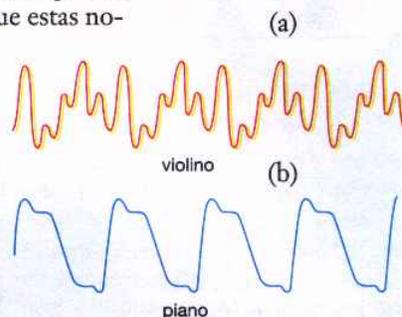


Fig. 16-39: A forma da onda sonora de um violino é diferente da forma da onda de um piano. Por isso, os sons destes instrumentos apresentam timbres diferentes.

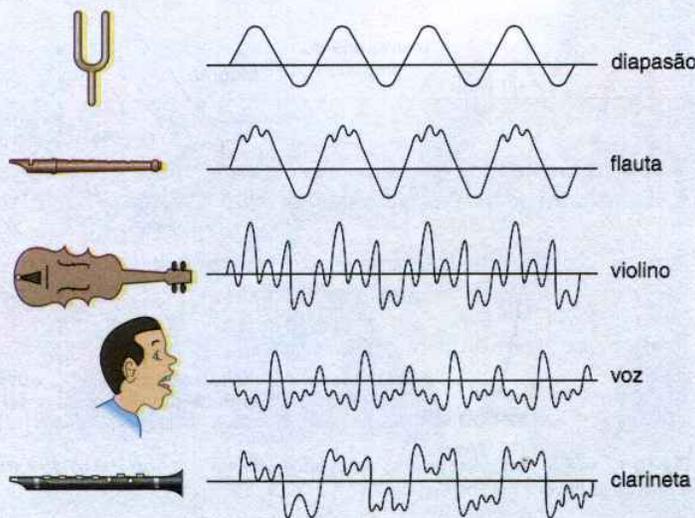


Fig. 16-40: Formas das ondas correspondentes a alguns sons.

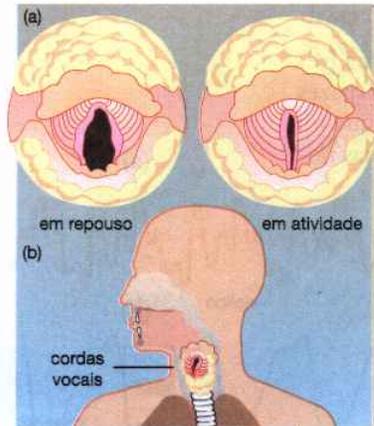


Fig. I: a) Vista de cima das duas cordas vocais. b) Um esquema do aparelho vocal humano.

A fala humana

A voz emitida pelo ser humano tem sua origem nas vibrações de duas membranas, denominadas cordas vocais (figura I-a), que estão dispostas na posição mostrada na figura I-b.

As cordas vocais entram em vibração 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 cordas vocais. As vibrações 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 vibrações determina o timbre da voz, que é característico de cada pessoa.

O ouvido humano

Como vemos na figura II, a maior parte do aparelho auditivo está localizada no interior da cabeça.

As ondas sonoras, ao atingirem a orelha, são dirigidas para o interior do canal auditivo, na extremidade do qual existe uma membrana, semelhante à pele de um tambor, denominada tímpano. O tímpano é tão delicado e sensível que variações de pressão muito pequenas da onda sonora são suficientes para colocá-lo 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 vibrar um terceiro osso, denominado estribo (observe, na figura II, a forma desse osso). Com esse processo, as vibrações são sucessivamente ampliadas (ou amplificadas), tornando nosso ouvido capaz de perceber sons de intensidade muito baixa.

Finalmente, as vibrações amplificadas chegam ao ouvido interno (ou cóclea), que tem a forma de um caracol. A cóclea é revestida por pêlos muito pequenos e, em seu interior, existe um líquido que facilita a propagação do som. As ondas sonoras, na cóclea, colocam os pequenos pêlos em vibração, estimulando células nervosas que, por meio do nervo auditivo, enviam os sinais ao cérebro. Dessa maneira, a pessoa tem a percepção do som.

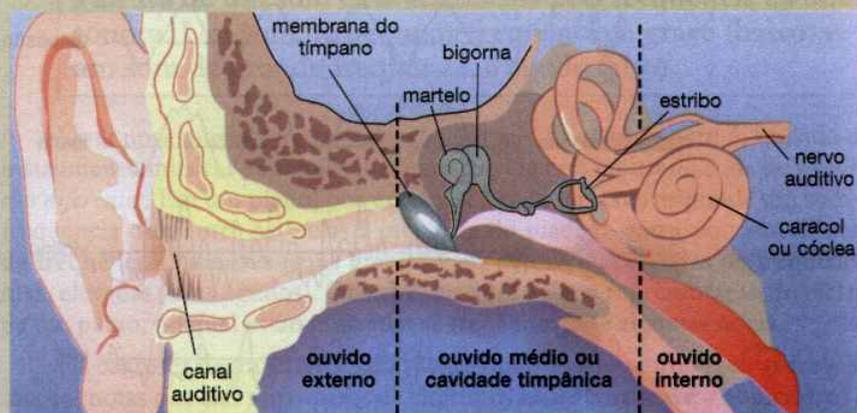


Fig. II: O ouvido humano costuma ser subdividido em três partes: ouvido externo, ouvido médio e ouvido interno.

s de fixação exercícios de fixação exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima secção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

31. a) Durante uma tempestade, uma pessoa observa um relâmpago e somente após 10 s ela escuta o barulho do trovão correspondente. A que distância ocorreu a descarga elétrica que provocou o relâmpago e o trovão?
 b) Na experiência mostrada na fig. 16-37, qual foi, aproximadamente, o intervalo de tempo medido pela pessoa que usou a ampulheta?
32. a) Qual é, no ar, o comprimento de onda do som mais agudo que o ouvido humano pode perceber?
 b) E o do som mais grave?
 c) Uma onda longitudinal, no ar, com $\lambda = 10$ mm, seria um infra-som, um som ou um ultra-som?
33. Uma pessoa bate na tecla de um piano que corresponde ao lá padrão. Consultando a fig. 16-38 e a tabela 16-3, responda:
 a) Qual é o comprimento de onda deste som no ar?
 b) Qual é a frequência deste som ao atingir o ouvido de uma pessoa mergulhada em uma piscina próxima ao piano?
 c) Qual é o comprimento de onda deste som na água?
34. a) A sucessão das notas dó, ré, mi, fá, sol, lá, si constitui uma escala musical. Observando a fig. 16-38, diga quantas vezes a frequência da nota dó de uma escala é maior do que a frequência da nota dó da escala imediatamente anterior.
 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?
35. Em uma orquestra, uma flauta está emitindo um som bastante agudo enquanto uma tuba está emitindo um som grave.
 a) Qual destes instrumentos está emitindo som de menor comprimento de onda?
 b) Então, qual das duas ondas sonoras sofrerá difração mais acentuada ao contornar um obstáculo?
 c) Portanto, qual dos dois instrumentos será mais bem ouvido por uma pessoa situada atrás do obstáculo?
36. 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?
 b) A frequência do som emitido pela flauta é maior, menor ou igual à frequência do som emitido pela clarineta?
 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?
 e) A pessoa perceberá sons de mesmo timbre ou de timbres diferentes?

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 esta onda transporta através de uma área A , em um intervalo de tempo Δt (fig. I). Tem-se, por definição,

$$I = \frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t}$$

No Sistema Internacional, a unidade para a medida de I será:

$$1 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = \frac{\text{J/s}}{\text{m}^2} = 1 \text{W/m}^2$$

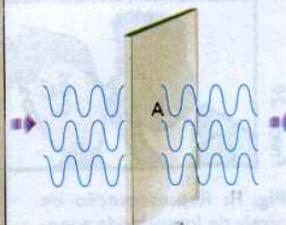


Fig. I: Energia transportada por uma onda sonora, incidindo em uma área A .



Fig. II: Representação de níveis de intensidade sonora, em dB, observados em algumas situações de nossa vida diária.

Existe um valor mínimo da intensidade sonora capaz de sensibilizar o aparelho auditivo. Este valor mínimo depende da frequência do som, variando também de uma pessoa para outra. Para uma frequência aproximada de 1 000 hertz e para um ouvido normal, este limite mínimo é cerca de 10^{-12} W/m^2 . Para você perceber que este valor é muito pequeno, informamos que esta intensidade corresponde a uma amplitude de vibração de 10^{-9} cm (menor do que o raio de um átomo). Vemos, então, que nosso ouvido é um detector extraordinariamente sensível, capaz de perceber um deslocamento desta ordem de grandeza.

Por outro lado, ondas sonoras cujas intensidades possuem valores próximos de 1 W/m^2 podem chegar a causar dores e danos ao ouvido. Esta intensidade corresponde a uma amplitude de vibração 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 das intensidades dos diversos sons, como veremos a seguir ($I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$).

Os pesquisadores que estudaram os fenômenos relacionados com a intensidade do som perceberam que a “sensação” produzida em nosso ouvido, pelo som de uma certa intensidade I , não varia proporcionalmente a esta intensidade. Por exemplo, um som de intensidade $I_2 = 2I_1$ não produz, em nosso ouvido, uma “sensação” duas vezes mais intensa do que aquela produzida por I_1 . Na realidade, os cientistas verificaram que esta sensação varia com o logaritmo da intensidade sonora.

Por esta razão, para medir esta característica do nosso ouvido, foi definida uma grandeza, β , denominada *nível de intensidade*, da seguinte maneira:

$$\beta = \log \frac{I}{I_0}$$

onde I é a intensidade da onda sonora e $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

A unidade para medida dessa grandeza foi denominada 1 bel = 1 B (como vimos, em homenagem a Graham Bell). Observe, então, que:

$$\text{Se } I = I_0, \text{ temos } \beta = \log \frac{I_0}{I_0} = \log 1 \text{ donde } \beta = 0$$

$$\text{Se } I = 10I_0, \text{ temos } \beta = \log \frac{10I_0}{I_0} = \log 10 \text{ donde } \beta = 1 \text{ B}$$

$$\text{Se } I = 100I_0, \text{ temos } \beta = \log \frac{100I_0}{I_0} = \log 100 \text{ donde } \beta = 2 \text{ B}$$

$$\text{Se } I = 1\,000I_0, \text{ temos } \beta = \log \frac{1\,000I_0}{I_0} = \log 1\,000 \text{ donde } \beta = 3 \text{ B}$$

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 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 $\beta = 1 \text{ B} = 10 \text{ dB}$, $\beta = 2 \text{ B} = 20 \text{ dB}$ e $\beta = 3 \text{ B} = 30 \text{ dB}$ (veja a fig. II).

Dissemos, no início deste capítulo, que uma pessoa de ouvido 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 nível mínimo de intensidade, abaixo do qual o som não é percebido. No gráfico da fig. III, a curva denominada *limiar de audição* nos mostra, exatamente, estes valores mínimos. Por exemplo, se um som de 100 hertz possuir 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 esta 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 $I < 10^{-12} \text{ W/m}^2$).

Na fig. III, vemos ainda a curva que indica o limiar da sensação dolorosa para as diversas frequências audíveis. Observe que este limiar é aproximadamente constante e vale cerca de 120 dB para qualquer frequência.

Conforme dissemos, o gráfico da fig. III refere-se ao ouvido normal. Entretanto, as curvas ali apresentadas podem variar bastante de uma pessoa para outra, principalmente em função de sua idade.

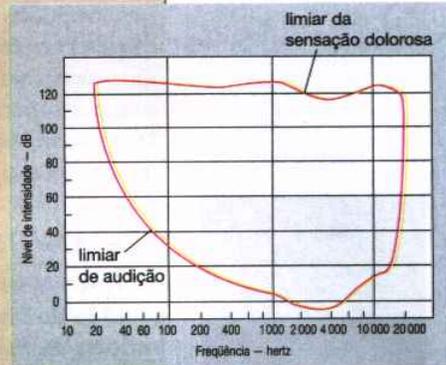


Fig. III: Gráfico de níveis de intensidade necessários para a percepção das diversas frequências audíveis, para uma pessoa de ouvido normal.

um tópico especial para você aprender um pouco mais

16.8. o efeito Doppler

O QUE É O EFEITO DOPPLER

Considere uma pessoa nas proximidades de um automóvel parado, cuja buzina está emitindo um som de frequência f_0 . Esta pessoa, estando também em repouso, perceberá um som de uma certa altura, caracterizado pela frequência f_0 . Em outras palavras, o número de cristas, por segundo, que chegam ao ouvido da pessoa é igual a f_0 .

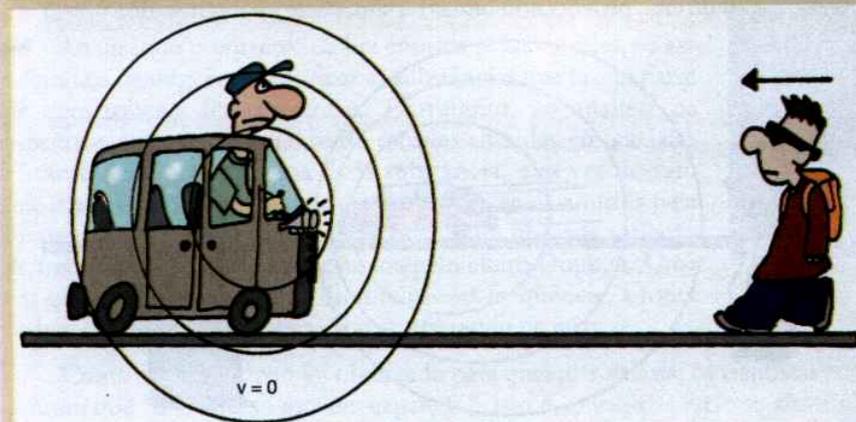


Fig. 16-41: O som de uma fonte sonora parece mais agudo para um observador que se movimenta em direção a ela.

Suponha, agora, que a pessoa passe a se movimentar em direção ao automóvel, que continua parado e buzinando, como mostra a fig. 16-41. É claro que, nestas condições, o número de cristas que irão chegar ao ouvido 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 buzina tornou-se mais agudo.



ADS

C. Doppler (1803-1853)

Físico austríaco que estudou e descreveu o efeito que leva seu nome. Foi educado no Instituto Politécnico de Viena, tornando-se, mais tarde, diretor do Instituto de Física e professor de Física Experimental na Universidade de Viena. Escreveu seus primeiros trabalhos no campo da Matemática, mas, em 1842, publicou uma obra, intitulada *Sobre as cores da luz emitida pelas estrelas duplas*, na qual ele apresenta os fundamentos do efeito Doppler, tanto com o som quanto com a luz.

Naturalmente, se a pessoa estivesse se afastando do automóvel, o número de cristas que iria chegar ao seu ouvido, por segundo, seria menor do que f_0 e, assim, a pessoa perceberia um som mais grave (frequência menor). Esta variação da frequência de uma onda, causada pelo movimento do observador (ou da fonte, como veremos a seguir) foi analisada, no século passado, pelo físico austríaco Christian Doppler e, por isso, este fenômeno é denominado *efeito Doppler*. Você poderá constatar este efeito quando estiver em um automóvel em movimento, aproximando-se e em seguida afastando-se de uma fonte sonora (uma sirene, por exemplo).

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 um automóvel buzinando e em movimento, as cristas da onda sonora que ele emite tornam-se mais próximas umas das outras à frente do automóvel e mais separadas na região situada atrás do carro (veja a fig. 16-42). A fig. 16-43 é uma fotografia que ilustra este fato, mostrando um objeto em movimento, para a direita, provocando ondas na superfície de um líquido.

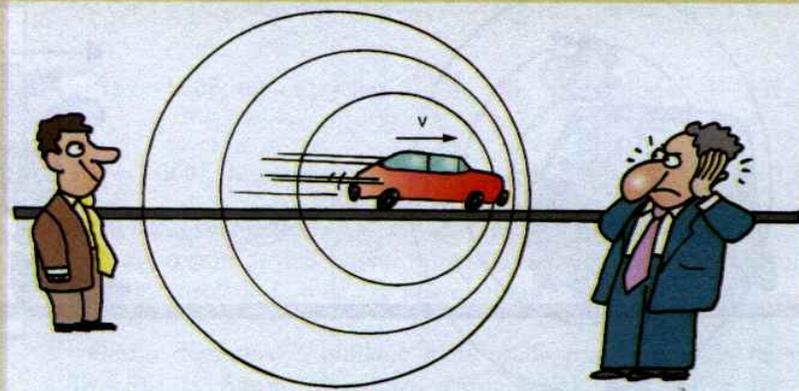


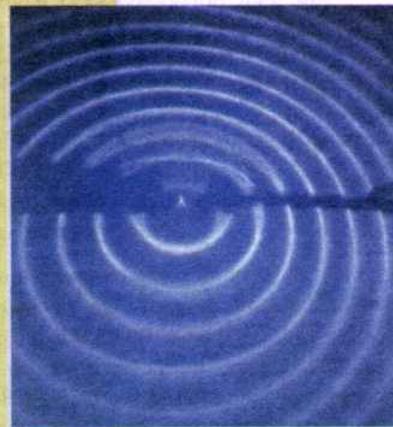
Fig. 16-42: Quando uma fonte sonora se movimenta, a frequência do som percebida pelo observador é diferente da frequência real emitida pela fonte.

Analisando a fig. 16-42, concluímos, então, que se um observador se encontrar à frente do automóvel, ele receberá uma onda sonora de menor comprimento de onda (maior frequência), isto é, um som mais agudo. É claro que um observador situado atrás do automóvel receberá uma onda sonora de maior comprimento de onda e, portanto, um som mais grave (menor frequência).

O EFEITO DOPPLER OCORRE TAMBÉM COM A LUZ

É possível observar o efeito Doppler não apenas com o som, mas também com qualquer outro tipo de onda. Como vemos, a fotografia da fig. 16-43 evidencia o efeito Doppler ocorrendo com uma onda na superfície de um líquido.

É de esperar, então, que o efeito Doppler possa ser observado com a luz que, como sabemos, é também um movimento ondulatório. Neste caso, o efeito Doppler, consistindo em uma variação de frequência, se manifestaria como uma mudança na cor da luz recebida pelo observador. Por exemplo: se uma pessoa se movimentar em direção a um sinal de trânsito que está vermelho, ela irá receber uma onda luminosa de frequência maior do que se estivesse parada. Em princípio, se a pessoa pudesse desenvolver velocidades muito grandes, ela poderia até mesmo ter a impressão de que o sinal estivesse verde (lembre-se de que a frequência da luz verde é maior do que a da luz vermelha). Entretanto, a efeito Doppler com a luz é muito difícil de ser percebido, porque, para isto, seria necessário que o observador, ou a fonte, estivesse se movendo com velocidades comparáveis à velocidade da luz. Assim, mesmo que uma pessoa estivesse no interior de um foguete, dos mais velozes existentes na atualidade, seria impossível que ela enxergasse com a cor verde um sinal luminoso vermelho.



Prof^a Dra. Marilisa A. Cavalcante/COPEF/PUC-SP

Fig. 16-43: Fotografia mostrando o efeito Doppler nas ondas que se propagam na superfície de um líquido.

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 destas estrelas. Entretanto, ao analisar os espectros da luz proveniente de estrelas situadas em galáxias distantes, emitida por uma dada substância, eles verificaram que sua frequência era menor do que a frequência emitida pela mesma substância aqui na Terra. Concluíram que esta variação de frequência só poderia ser causada pelo efeito Doppler. Uma vez que era constatada uma diminuição na frequência, a fonte de luz, isto é, a galáxia, devia estar se afastando de nós.

Como este fenômeno foi observado para qualquer galáxia, os cientistas concluíram 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 estas velocidades tanto maiores quanto mais distantes elas se encontrarem (fig. 16-44).

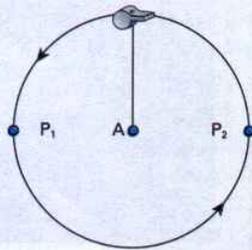


Fig. 16-44: Foto de uma galáxia situada a 130 milhões de anos-luz da Terra. Analisando a luz proveniente desta galáxia, os cientistas concluíram, através do efeito Doppler, que ela está se afastando de nós com uma velocidade de 20 000 km/s.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

37. Uma pessoa A, tendo em sua mão um barbante preso a um apito, que emite um som de frequência f_0 , coloca este apito em rotação num círculo horizontal, acima de sua cabeça (veja a figura deste exercício). Um observador O, a uma certa distância de A, recebe o som emitido pelo apito. A frequência do som percebida por O será maior, menor ou igual a f_0 , quando o apito:
- Passa por P_1 ?
 - Passa por P_2 ?



Exercício 37.

38. No exercício anterior, diga se o som percebido por O será mais grave ou mais agudo do que o som de frequência f_0 quando o apito está passando:
- Em P_1 .
 - Em P_2 .
39. Um carro está parado a uma certa distância de um sinal luminoso de trânsito (semáforo) que, em um certo instante, torna-se verde. O motorista arranca rapidamente e, no entanto, não consegue perceber nenhuma alteração na cor verde do sinal devido ao efeito Doppler. Por quê?
40. 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:
- 300 m/s (velocidade do som)?

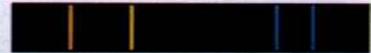
- 30 000 km/h (velocidade de um foguete moderno)?
- 30 000 km/s (10% da velocidade da luz)?

41. Imagine que uma pessoa estivesse em um foguete (do futuro), aproximando-se de uma fonte luminosa, com uma velocidade comparável à velocidade da luz.
- Supondo que a fonte de luz fosse amarela, seria possível que a pessoa a percebesse com cor azul?
 - E se a fonte fosse violeta, a pessoa poderia percebê-la verde?
42. Um piano, em uma sala de concertos, emite a nota lá. Uma pessoa correndo, na sala, escuta esta nota como se ela fosse um ré, da mesma escala. Esta pessoa está se aproximando ou se afastando do piano?
43. O espectro da luz emitida por uma substância gasosa, a alta temperatura, é constituído por várias linhas coloridas, como aquelas mostradas na figura deste exercício. 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?

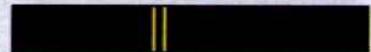
Espectro contínuo



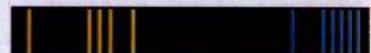
Lítio



Sódio



Cálcio



Exercício 43.

44. Observando a luz emitida pelas galáxias, os astrônomos costumam dizer que é observado, no espectro desta luz, um "deslocamento para o vermelho". Por que os astrônomos usam esta expressão?
45. Observa-se que a luz emitida por certas estrelas da Via-láctea apresenta um "deslocamento para o violeta".
- Que conclusão pode-se tirar acerca do movimento destas estrelas, em relação à Terra?
 - Estas estrelas poderiam pertencer a outra galáxia? Explique.

visão reVisão reVisão reVisão reVisão reVisão reVI

As questões seguintes foram formuladas para que você faça uma revisão dos pontos mais importantes abordados neste capítulo. Ao respondê-las, volte ao texto sempre que tiver dúvidas.

- Cite exemplos de movimentos vibratórios que você já teve oportunidade de observar.
 - Descreva o que ocorre com o valor da velocidade de um corpo, em movimento harmônico simples, enquanto ele efetua um ciclo.
 - Faça o mesmo para o valor da aceleração e da força que atua no corpo.
- Para um corpo em movimento vibratório, diga o que é:
 - Um ciclo (ou uma vibração completa).
 - A amplitude do movimento.
 - O período, a frequência e como se relacionam estas grandezas.
 - 1 hertz.
- Escreva a equação que nos permite calcular o período do movimento harmônico simples. Explique o significado de cada símbolo que nela aparece.
 - Faça o mesmo para a equação que nos permite calcular o período de oscilação do pêndulo simples.
- Descreva o movimento de um ponto de uma corda, à medida que a crista e o vale de uma onda passam por ele.
 - A frequência de vibração deste ponto é maior, menor ou igual à frequência da fonte que produziu a onda?
 - Explique o que é uma onda transversal e uma onda longitudinal.
- O que é comprimento de onda?
 - Escreva a relação entre o comprimento de onda (λ), a velocidade de propagação (v) e a frequência (f) de uma onda.
 - Quando uma onda passa de um meio para outro, diga se as grandezas λ , v e f variam ou permanecem constantes.
- Faça um desenho representando as cristas e os raios de uma onda de pulsos retos (na superfície de um líquido). Faça o mesmo para uma onda de pulsos circulares.
 - Explique por que o fenômeno de reflexão de uma onda levou os físicos a suspeitarem que a luz deveria ser um movimento ondulatório.
- Faça um diagrama mostrando a refração de uma onda de pulsos retos ao passar obliquamente de um meio (1) para um meio (2) tal que $v_2 < v_1$.
 - Repita o diagrama supondo $v_2 > v_1$.
 - Analisando a fig. 16-16 explique, com suas palavras, por que a onda muda de direção (se refrata) ao passar do meio (1) para o meio (2).
 - Uma onda, ao se refratar, obedece às mesmas leis da refração da luz?
- Faça um desenho mostrando a difração de uma onda em torno de um obstáculo e ao passar através de um orifício.
 - Quais os fatores que fazem com que a difração de uma onda, através de um orifício, seja mais acentuada ou menos acentuada?
 - Explique por que o fenômeno da difração nos leva a concluir que a luz é um movimento ondulatório de comprimento de onda muito pequeno.
- Na fotografia da fig. 16-27, mostre onde se localizam as linhas nodais e indique as regiões onde existem cristas e vales se propagando.
 - Explique em que condições ocorrerá, em um ponto, uma interferência destrutiva. E uma interferência construtiva?
 - Indique em quais regiões da fig. 16-27 a interferência foi destrutiva e em quais regiões ela foi construtiva.
- Descreva sucintamente a experiência realizada por Young, na qual ele conseguiu obter interferência com a luz.
 - Explique por que a experiência de Young teve uma grande repercussão no início do século passado.
 - A relação $\Delta x = L\lambda/d$ foi apresentada na seção 16.6 ao se analisar a experiência de Young. Explique o significado de cada símbolo que nela aparece.
 - Explique como Young chegou à conclusão de que a cada cor corresponde um λ diferente.

- e) Por que é mais adequado caracterizar a cor de um feixe luminoso monocromático por sua frequência do que por seu comprimento de onda?
11. a) O som é uma onda transversal ou longitudinal?
 b) A onda sonora se propaga no vácuo?
 c) Quais são, aproximadamente, o menor e o maior valor das frequências que o ouvido humano pode perceber?
 d) O que é infra-som? E ultra-som?
12. a) Explique, através de exemplos, o que é intensidade do som. Qual a grandeza da onda sonora que está relacionada com sua intensidade?
 b) Explique, através de exemplos, o que é um som grave e um som agudo. Qual é a grandeza da onda sonora que determina se um som é grave ou agudo?
 c) Explique, através de exemplos, o que é o timbre de um som. Qual a característica da onda sonora que determina o seu timbre?

algumas experiências simples

Para você fazer

Primeira experiência

Construa um pêndulo simples amarrando, na extremidade de um barbante (fino e resistente), um corpo pesado de pequenas dimensões (uma pedra, uma bola metálica etc.).

- 1ª) Penda a extremidade livre do barbante a um suporte qualquer (por exemplo: um prego preso a uma parede), de modo que o comprimento do pêndulo seja cerca de 50 cm. Coloque-o a oscilar e, usando um cronômetro ou um relógio que marque os segundos, meça o tempo necessário para o pêndulo efetuar 20 (ou mais) vibrações completas. A partir desta medida, calcule o período do pêndulo.
- 2ª) Aumente o comprimento do pêndulo para cerca de 2 m e repita o procedimento descrito no item anterior, determinando o novo valor do período de oscilação. O período do pêndulo aumentou, diminuiu ou não se alterou quando o seu comprimento foi aumentado? Este resultado está de acordo com o que você aprendeu na seção 16.1?
- 3ª) Substitua o corpo suspenso no barbante por outro de massa diferente, sem alterar o comprimento do pêndulo, e meça o seu período. O período do pêndulo tornou-se maior, menor ou praticamente não se modificou quando alteramos o valor da massa suspensa no barbante? Este resultado está de acordo com o que você aprendeu na seção 16.1?
- 4ª) Meça cuidadosamente o comprimento do pêndulo do item anterior e, como você já conhece o período deste pêndulo, use a equação $T = 2\pi \sqrt{L/g}$ para obter o valor local da aceleração da gravidade. O valor de g que você encontrou está razoavelmente próximo de $9,8 \text{ m/s}^2$?

Segunda experiência

Como vimos na seção 16.1, o período de um corpo em movimento harmônico simples é dado por $T = 2\pi \sqrt{m/k}$. Esta equação nos mostra que o período

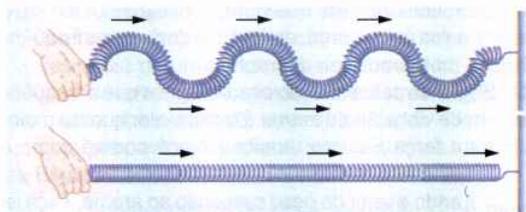
é tanto maior quanto maior for a massa m do corpo que executa o movimento e tanto menor quanto maior for o valor da constante k . Realizando esta experiência, você poderá verificar que estes fatos são verdadeiros.

- 1ª) Suspenda verticalmente uma mola, pendurando-a por uma de suas extremidades a um suporte qualquer. Penda um corpo na outra extremidade, colocando-o a oscilar na direção vertical. Observe o período (ou a frequência) com que o corpo está oscilando.
- 2ª) Substitua o corpo por outro de massa bem maior, coloque-o a oscilar e observe o seu período. Foi possível perceber que o período aumentou com o aumento da massa?
- 3ª) Suspenda, agora, o corpo do item anterior em uma mola mais dura (maior valor de k). Nesta nova situação, observe o período de oscilação do corpo. O período tornou-se maior ou menor? Sua observação confirma o que foi dito no início desta experiência?

Terceira experiência

Não será difícil para você obter, em lojas de brinquedos infantis, uma mola como a da figura (denominada "mola slinki").

- 1ª) Apóie a mola no chão e penda uma de suas extremidades em um ponto fixo (um móvel pesado, por exemplo).
- 2ª) Mantendo a mola esticada, segurando-a pela outra extremidade, provoque nela um pulso de onda transversal (movimente sua mão para o lado e volte rapidamente à posição inicial). Observe o pulso se propagar ao longo da mola. Observe, também, sua reflexão ao atingir o ponto fixo e o pulso refletido, que se propaga na mola em sentido contrário.
- 3ª) Provoque, agora, um pulso longitudinal na mola (movimente sua mão para a frente e para trás, rapidamente, ao longo da mola). Repita as observações que você acabou de fazer para a onda transversal.



Em uma mola, podem-se propagar tanto ondas transversais quanto ondas longitudinais.

Quarta experiência

Suspenda um objeto metálico — uma colher, um cabide etc. — por meio de um cordão. Introduza as duas extremidades do cordão em seu ouvido, mantendo-as nessa posição com seus dedos. Curvando-se para a frente, deixe o objeto metálico colidir várias vezes contra um obstáculo rígido (mesa, parede etc.) As vibrações do metal, geradas nas colisões, se propagam até seu ouvido através do cordão, produzindo ondas sonoras no ar existente no canal do ouvido externo. Você ouvirá, então, belos sons, semelhantes ao badalar de um sino distante.

Repita a experiência sem colocar o cordão em seus ouvidos e compare os sons que você percebe nas duas situações. Procure uma explicação para a diferença percebida.



Quarta experiência.

Agostinho de Paula

Quinta experiência

Coloque água em uma banheira ou em um grande recipiente de plástico de fundo plano. A altura da água deverá ser de alguns centímetros (de 5 cm a 10 cm). Usando uma lâmpada ou uma lanterna, colocada acima do recipiente, ilumine diretamente a superfície da água, procurando evitar a presença de outras fontes de luz no ambiente.

- 1º) Batendo com a ponta de seu dedo na superfície da água, você provocará um pulso circular que se propagará na superfície do líquido. Observe a crista deste pulso projetada sob a forma de uma faixa circular clara que se desloca no fundo do recipiente. Batendo, agora, com uma régua na superfície da água, você poderá observar, da mesma forma, a propagação de pulsos retos pela projeção de suas cristas no fundo do recipiente.
- 2º) Para provocar uma onda periódica, bata lenta e sucessivamente na superfície da água. Observe, no

fundo do recipiente, o comprimento de onda (distância entre duas faixas claras consecutivas). Aumente a frequência das batidas da régua e observe o que ocorre com o comprimento de onda. Você esperava este resultado?

- 3º) Coloque, no recipiente, uma barreira plana (um pedaço de madeira, uma régua etc.). Provoque um pulso paralelo à barreira, isto é, que incida sobre ela com ângulo de incidência nulo. Observe a reflexão deste pulso ao atingir a barreira. O pulso refletido é, também, paralelo à barreira? Então, qual é o valor do ângulo de reflexão? Faça incidir sobre a barreira alguns pulsos com ângulos de incidência diversos (incidências oblíquas). Observe as reflexões destes pulsos na barreira e procure ilustrar suas observações por meio de diagramas.

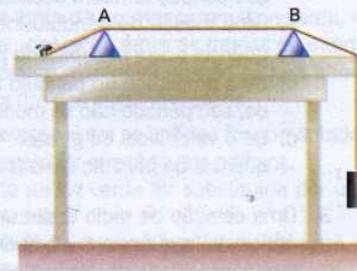


Ondulações na água. (Gravura por M. C. Escher, 1950.)

- 4º) Envie uma onda de pulsos retos em direção a uma barreira que intercepte apenas parcialmente cada pulso que passa por ela, como mostra a fig. 16-19. Observe a forma da onda após passar pela barreira. Veja que ela contorna esta barreira, isto é, a onda sofre difração ao passar pelo obstáculo. Agora, disponha no recipiente dois obstáculos de maneira a formar um orifício entre eles (veja a fig. 16-21). Faça uma onda de pulsos retos se propagar em direção ao orifício e observe a forma da onda após passar por ele. Você percebe nitidamente que a onda se difratou ao passar pelo orifício?

Sexta experiência

Faça uma montagem semelhante à da figura desta experiência: um arame fino, preso por uma extremidade, esticado entre dois suportes móveis A e B por meio de um corpo pesado preso à outra extremidade.



Sexta experiência.

Acionando o arame no ponto médio entre A e B e deixando-o vibrar livremente, ele oscilará com uma frequência f e emitirá uma onda sonora com esta mesma frequência. Pode-se mostrar que, sendo L o comprimento da parte vibrante do arame (segmento AB), F a força que estica o arame (em nosso caso, o peso nele suspenso) e μ a massa por unidade de comprimento do arame, o valor de f é dado por

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

- 1ª) Vemos, por esta equação, que a frequência de vibração do arame é tanto menor quanto maior for o comprimento de sua parte que vibra.

Para verificar que isto é verdadeiro, coloque os suportes A e B próximos um do outro e faça o arame vibrar, prestando atenção ao som emitido. Repita a operação com os suportes A e B mais distanciados (maior L). Procure perceber que, então, o som emitido será mais grave (menor frequência).

Você já deve ter observado que, em alguns instrumentos de corda, como o violão, o instrumentista lança mão desta propriedade para obter notas diferentes com uma mesma corda: prendendo a corda com o dedo em pontos diferentes, ele varia o compri-

mento da parte que vibra, conseguindo, assim, com uma única corda, emitir sons de diversas frequências (notas musicais diferentes).

- 2ª) Ainda pela equação citada, vemos que a frequência f de vibração do arame é tanto maior quanto maior for a força F que o tensiona. Você poderá comprovar este fato mantendo constante a distância AB e variando o valor do peso suspenso ao arame. Faça isto e observe que, colocando o arame em vibração, o som por ele emitido será tanto mais agudo (maior f) quanto maior for o peso suspenso.

Baseando-se nesta observação, procure explicar a finalidade das cravelhas de um violão.

- 3ª) Finalmente, observe que o valor de f depende também da massa por unidade de comprimento do arame: quanto maior for μ , menor será f .

Tensione, com a mesma força, duas cordas de mesmo comprimento, sendo uma, porém, mais grossa do que a outra (diferentes valores de μ). Colocando ambas em vibração, você perceberá que a corda mais grossa (maior μ) emitirá um som mais grave (menor f).

Esta propriedade também é utilizada nos instrumentos de corda. Você já deve ter observado que as cordas de um violão apresentam diâmetros diferentes, isto é, valores diferentes da massa por unidade de comprimento.

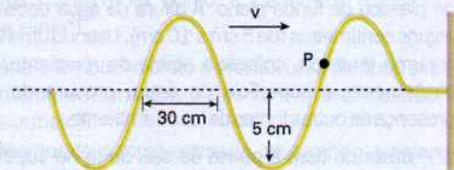
problemas e testes problemas e testes problemas

- Um corpo 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.
 - Calcule o período de oscilação do corpo.
 - Determine a frequência deste movimento.
 - Qual seria o período do movimento se sua amplitude fosse reduzida para 5 cm?
- Considere um pêndulo simples oscilando com pequena amplitude. Entre as afirmativas seguintes, assinale aquela que é correta:
 - Se o comprimento do pêndulo for duplicado, seu período também duplicará.
 - Se a massa do pêndulo for triplicada, sua frequência ficará multiplicada por $\sqrt{3}$.
 - Se a amplitude do pêndulo for reduzida à metade, seu período não se modificará.
 - Se o valor local de g fosse 4 vezes maior, a frequência do pêndulo seria 2 vezes menor.
- Uma estação de rádio emite uma onda eletromagnética de frequência $f = 1\,500$ quilohertz. Sabe-se que a velocidade de propagação desta onda, no ar,

é igual à velocidade da luz. Calcule o valor de λ para esta onda de rádio.

4. A figura deste problema 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:

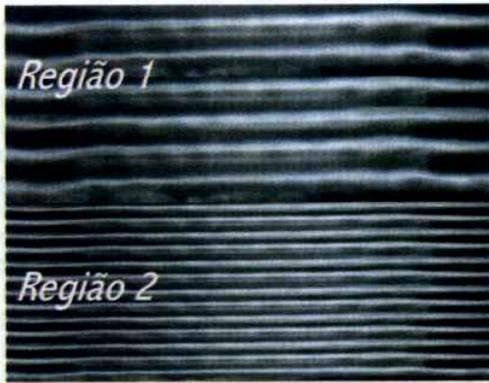
a) \rightarrow b) \uparrow c) \nearrow d) \searrow e) \downarrow



Problema 4.

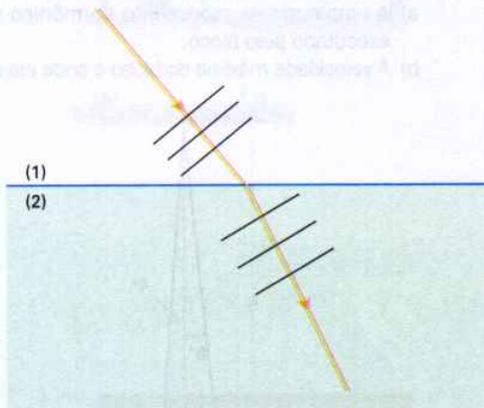
5. Sabe-se que a frequência da onda do problema anterior é $f = 2,0$ hertz. Então, quais das afirmações seguintes estão corretas?
- O período da onda é de 0,50 s.
 - A amplitude da onda é igual a 5 cm.
 - O comprimento de onda desta onda vale 60 cm.
 - A velocidade de propagação da onda é de 120 cm/s.

6. Na fotografia mostrada na figura deste problema vemos as cristas (faixas claras) e os vales (faixas escuras) de uma onda que se propaga na superfície de um líquido, passando de uma região (1) para outra região (2) de profundidades diferentes. Indique, entre as afirmativas seguintes, aquelas que estão *erradas*:
- O comprimento de onda na região (1) é maior do que em (2).
 - A frequência na região (1) é maior do que em (2).
 - A velocidade da onda na região (1) é maior do que em (2).
 - A região (1) tem menor profundidade do que a região (2).
 - A direção de propagação da onda não se alterou, ao passar de (1) para (2), porque o ângulo de incidência é nulo.



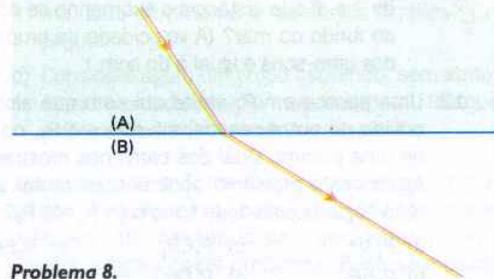
Problema 6.

7. Uma onda, ao passar de uma região (1) para outra região (2), sofreu refração, aproximando-se da normal. Para representar esta refração, um estudante traçou o diagrama mostrado na figura deste problema. Há um erro neste diagrama. Analise a figura e diga qual é o erro.



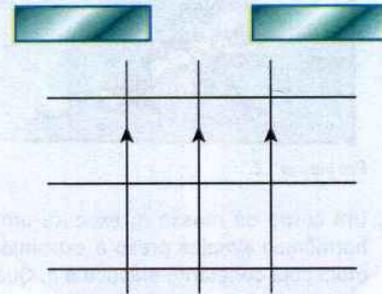
Problema 7.

8. A figura deste problema mostra um feixe luminoso se refratando ao passar do meio A para o meio B. Quais das afirmativas seguintes estão *corretas*?
- O índice de refração de A é maior do que o de B.
 - A frequência da onda luminosa tem o mesmo valor nos dois meios.
 - A velocidade da luz é menor em A do que em B.
 - O comprimento de onda da luz é menor em A do que em B.



Problema 8.

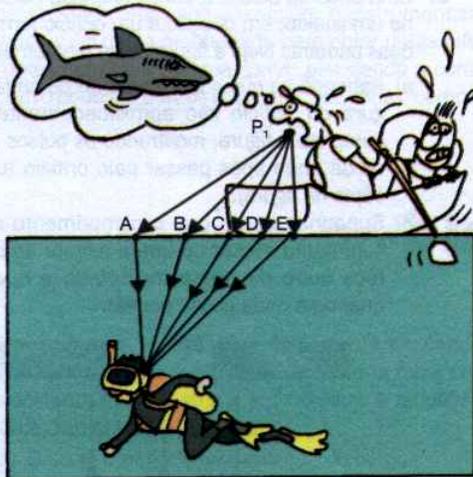
9. Uma onda de pulsos retos se propaga, na superfície de um líquido, em direção a um orifício formado por duas barreiras (veja a figura deste problema).
- Sabendo-se que o comprimento de onda e a largura do orifício são aproximadamente iguais, complete a figura, mostrando os pulsos e os raios da onda após passar pelo orifício (use uma cópia da figura).
 - Suponha, agora, que o comprimento de onda seja muito menor do que a largura do orifício e faça outro diagrama mostrando o que ocorre quando a onda passa por ele.



Problema 9.

10. Uma repetição da experiência de Young foi realizada com uma fonte de luz monocromática verde, no ar. Diga se a separação entre as franjas de interferência aumentará, diminuirá ou não sofrerá alteração em cada um dos seguintes casos:
- Se a separação entre os orifícios for aumentada.
 - Se o anteparo for afastado dos orifícios.
 - Se a fonte de luz verde for substituída por uma fonte de luz azul.
 - Se a experiência for realizada dentro da água.
 - Se a intensidade da luz verde for aumentada.

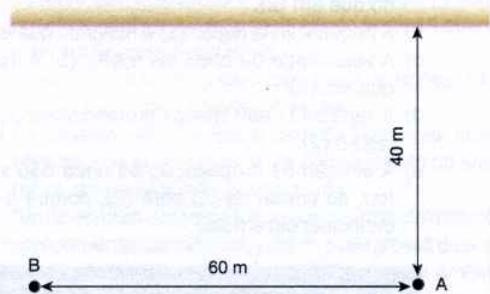
11. a) Dois sons que chegam a uma pessoa só podem ser percebidos distintamente se alcançarem o seu ouvido separados por um intervalo de tempo de, no mínimo, 0,1 s. Então, se uma pessoa consegue perceber o eco de um som que ela emitiu, qual é a mínima distância que deve existir entre a pessoa e o anteparo que produziu o eco?
- b) Um pulso de sonar é emitido verticalmente, de um submarino, em direção ao fundo do mar. Se o eco deste 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 ultra-sons é igual à do som.)
12. Uma pessoa em P_1 emite um som que alcança o ouvido de outra pessoa, situada em P_2 , no fundo de uma piscina. Qual dos caminhos mostrados na figura deste problema poderia representar a trajetória seguida pela onda sonora de P_1 até P_2 ?
- a) P_1AP_2 c) P_1CP_2 e) P_1EP_2
 b) P_1BP_2 d) P_1DP_2



Problema 12.

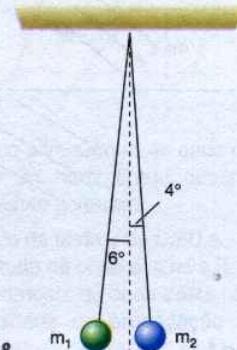
13. Um corpo de massa m executa um movimento harmônico simples preso à extremidade de uma mola cuja constante elástica é k . Qual deve ser o comprimento L de um pêndulo simples para que ele oscile com um período igual ao do corpo preso à mola?
14. Dois pequenos objetos, F_1 e F_2 , batem em fase na superfície de um líquido, produzindo ondas de mesmo comprimento de onda λ . Considerando um ponto P qualquer na superfície do líquido, diga se neste ponto haverá interferência construtiva ou destrutiva em cada um dos seguintes casos:
- a) $PF_1 = PF_2$
 b) $PF_1 - PF_2 = \lambda$
 c) $PF_1 - PF_2 = \lambda/2$

15. 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 deste problema). O observador B ouviu um monossílabo emitido por A e $1/8$ s depois ouviu o seu eco produzido pelo paredão. Baseando-se nestas medidas, qual o valor que as pessoas obtiveram para a velocidade do som?



Problema 15.

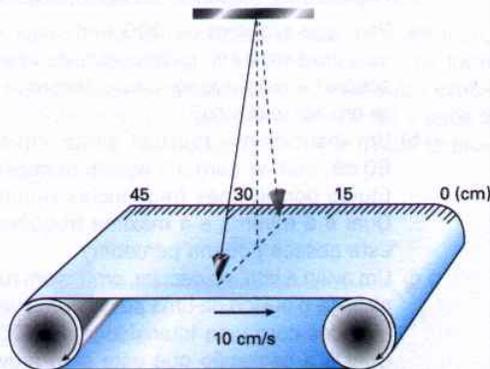
16. Uma mola, de comprimento igual a 10,0 cm, está suspensa verticalmente em um ponto fixo, por uma de suas extremidades. Prende-se, em sua extremidade livre, um corpo de massa $m = 100$ g, verificando-se que, na posição de equilíbrio, seu comprimento atinge 15,0 cm. Puxando-se, em seguida, o corpo até 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.
 b) A amplitude do movimento efetuado pelo corpo.
 c) O período e a frequência deste movimento.
17. 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.
 b) A velocidade máxima do bloco e onde ela ocorre.



Problema 18.

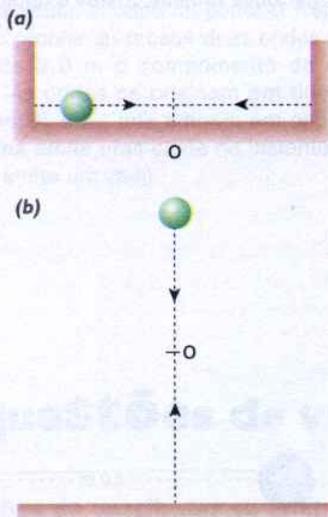
18. Dois pêndulos simples, de mesmo comprimento, são abandonados, simultaneamente, a partir do repouso, das posições assimétricas mostradas na figura deste problema. Ao colidirem, as massas dos pêndulos realizam um choque completamente inelástico. Sabendo-se que o período de oscilação do pêndulo de massa m_1 é de 3,0 s responda, justificando:

- Em que posição m_1 e m_2 colidem?
- Quanto tempo decorre até a colisão?
- Com qual período as duas esferas passam a oscilar após a colisão?



Problema 19.

19. Um funil, contendo areia seca, é pendurado em um fio e colocado a oscilar transversalmente a uma esteira, graduada em centímetros, que se move com velocidade constante $v = 10 \text{ cm/s}$, conforme mostra a figura deste problema. Sabendo-se que o período do pêndulo constituído pelo funil pendurado é de 1,5 s e que ele oscila com amplitude de 6,0 cm, faça um desenho mostrando a forma da curva que a areia, que cai do funil, traça sobre a esteira.



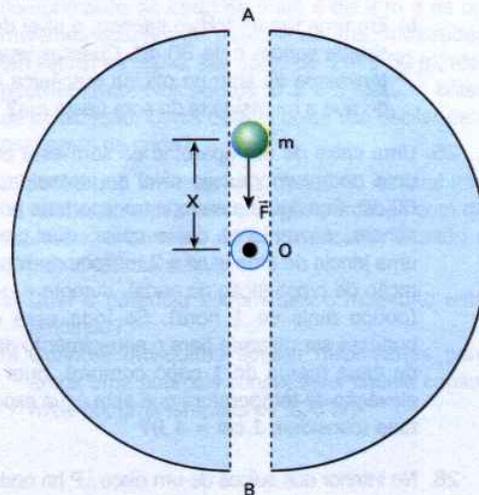
Problema 20.

20. a) A figura (a) deste problema mostra uma bola deslocando-se, sem atrito, sobre uma superfície horizontal, entre dois obstáculos verticais. Em virtude das colisões elásticas da bola com estes obstáculos, ela oscila indefinidamente entre eles. Este movimento é harmônico simples? Explique.

b) Uma bola, abandonada de uma certa altura, colide elasticamente com o chão e retorna ao ponto de partida, continuando indefinidamente neste vaivém, como ilustra a figura (b) deste problema. Este movimento é harmônico simples? Explique.

c) Considere agora um corpo oscilando, sem atrito, na extremidade de uma mola horizontal. Por que este movimento é harmônico simples?

21. Suponha que a Terra fosse uma esfera homogênea e que fosse possível cavar um túnel retilíneo, AB, passando pelo seu centro, como mostra a figura deste problema. Pode-se mostrar que uma partícula de massa m , situada neste túnel, a uma distância X do centro O , ficaria sob a ação de uma força \vec{F} , dirigida para O , devida à ação gravitacional da massa terrestre. O módulo dessa força é dado por $F = (4/3) \pi G m \rho X$, onde G é a constante de gravitação universal e ρ é a densidade da Terra.



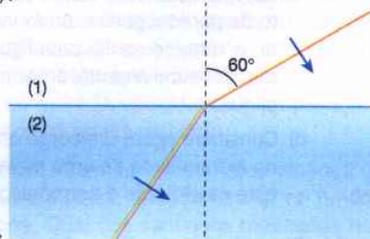
Problema 21.

a) Se o corpo de massa m fosse abandonado no ponto A, na ausência de atrito, ele ficaria oscilando indefinidamente entre as extremidades A e B do túnel. Este movimento é harmônico simples? Explique.

b) Determine a expressão que fornece o tempo, Δt , que o corpo de massa m gastaria para se deslocar de uma extremidade a outra do túnel AB (expresse sua resposta em termos de π , ρ e G).

22. A figura deste problema representa o pulso de uma onda (frente de onda) se refratando 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?
b) Calcule o ângulo de refração da onda no meio (2).



Problema 22.

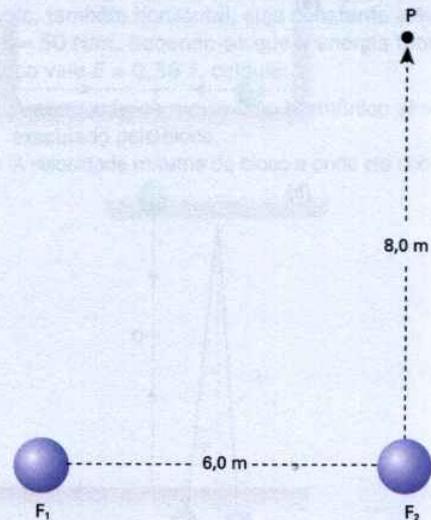
23. Em um lago, o vento produz ondas periódicas cujo comprimento de onda é $\lambda = 10$ m e que se propagam com velocidade $v = 2,0$ m/s. Determine a frequência de oscilação de um barco, supondo que ele:
- a) Esteja ancorado no lago.
b) Esteja se movendo em sentido contrário ao de propagação das ondas, com velocidade de 8,0 m/s.
24. a) Em uma oficina mecânica, a intensidade do som ambiente é de 10^{-3} W/m². Qual é, em B e dB, o nível de intensidade sonora nesta oficina?
b) Em uma rua de tráfico intenso, o nível de intensidade sonora é de 80 dB. Quantas vezes a intensidade do som na oficina mecânica é maior do que a intensidade do som nesta rua?
25. Uma caixa de um aparelho de som está emitindo uma onda sonora cujo nível de intensidade é de 60 dB. Considere a energia transportada pela onda sonora, proveniente desta caixa, que passa por uma janela de área igual a 2 m² (perpendicular à direção de propagação da onda), durante 4×10^3 s (pouco mais de 1 hora). Se toda essa energia pudesse ser utilizada para o aquecimento de 200 g de água (cerca de 1 copo comum), qual seria a elevação de temperatura que esta água experimentalmente (considere 1 cal = 4 J)?
26. No interior dos sulcos de um disco LP há ondulações produzidas durante a gravação. A reprodução do som gravado, como sabemos, ocorre pelas oscilações de uma agulha que passa pelas ondulações dos sulcos, à medida que o disco gira. A frequência e a amplitude do som produzido correspondem às frequências e amplitudes das oscilações da agulha. Suponha que um determinado sulco de um disco esteja passando sob a agulha com uma velocidade de 0,30 m/s. Se os picos das ondulações no sulco, nesta posição, estão separados de 0,20 mm, determine a frequência do som que está sendo produzido.

27. a) O barulho de um rebatedor, em uma obra, atinge o nível de 90 dB. Se dois rebatedores idênticos a este estiverem operando simultaneamente, qual será o nível de intensidade no local? (Considere $\log 2 = 0,3$.)
b) Um coral de 50 vozes está interpretando uma canção com um nível de intensidade sonora de 70 dB. Supondo que todas as vozes tenham a mesma intensidade (como deve ser em um bom coral), qual é o nível de cada uma?

28. Consultando o gráfico da fig. III (apresentado após a seção 16.7), responda às seguintes questões:

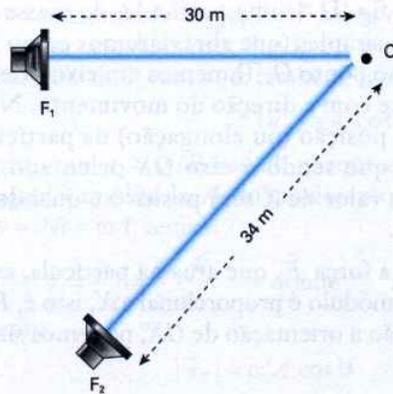
- a) Para que um som de 200 hertz seja audível, qual deve ser o seu mínimo nível de intensidade sonora? E para que ele cause sensação dolorosa em nosso ouvido?
b) Um instrumento musical emite um som de 60 dB, audível para um ouvido normal e constituído por diversas frequências simultâneas. Qual é a mínima e a máxima frequência que esta pessoa poderia perceber?
c) Um avião a jato, ao decolar, produz um ruído que alcança o ouvido de uma pessoa em suas proximidades com uma intensidade de 100 W/m². Qual é a sensação que este som provoca na pessoa?

29. Duas pequenas fontes, F_1 e F_2 , idênticas, constantemente em fase, emitem ondas que são detectadas no ponto P , mostrado na figura deste problema. Suponha que, em diversas experiências realizadas com estas fontes, o comprimento de onda das ondas emitidas tenha adquirido os seguintes valores: $\lambda_1 = 4,0$ m, $\lambda_2 = 3,0$ m, $\lambda_3 = 2,0$ m, $\lambda_4 = 1,0$ m, $\lambda_5 = 0,80$ m e $\lambda_6 = 0,50$ m. Quais destes comprimentos de onda dariam origem, em P , a uma interferência construtiva (duplas cristas e duplos vales)?



Problema 29.

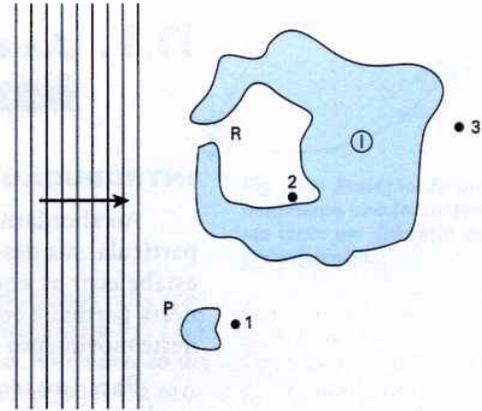
30. No problema anterior, indique os valores de λ para os quais o ponto P seria um nó (interferência destrutiva).
31. Um feixe de luz monocromático está se propagando em um certo tipo de vidro, cujo índice de refração é $n = 1,42$.
- Sendo o comprimento de onda desse feixe, no vidro, igual a $4,5 \times 10^{-7}$ m, qual é a cor da luz do feixe? (Consulte uma tabela conveniente.)
 - Se o feixe mencionado passar do vidro para o ar, quais serão, neste meio, sua frequência, seu comprimento de onda e sua cor?
32. Em uma das extremidades de um trilho retilíneo, de comprimento igual a 68 m, é dada uma forte martelada. Uma pessoa, situada na outra extremidade, ouve dois sons, um deles 0,18 s após o outro. Qual é a velocidade com que o som se propaga no trilho?



Problema 33.

33. Um observador, situado no ponto O (veja a figura deste problema) recebe duas ondas sonoras, sendo de 2,0 m o comprimento de onda de ambas. As ondas se originam em duas fontes idênticas, F_1 e F_2 , que emitem em oposição de fase (uma emite uma crista no instante em que a outra emite um vale).

- No ponto O está ocorrendo uma interferência construtiva ou destrutiva?
- Qual o deslocamento mínimo que deve ser dado a F_1 , ao longo da reta OF_1 , para que a interferência em O seja construtiva?



Problema 34.

34. Na figura deste problema, ondas planas na superfície do mar se propagam no sentido indicado pela seta e vão atingir uma pedra P e uma pequena ilha I , cujo contorno apresenta uma reentrância R . O comprimento de onda da onda é de 3 m e as dimensões lineares da pedra e da ilha, mostradas em escala na figura, são cerca de 5 m e 50 m, respectivamente. Nos pontos 1, 2 e 3 existem bóias de sinalização. Quais dessas bóias vão oscilar pela passagem da onda?
35. Suponha que em uma sala tranqüila, na qual não há ruídos, uma pessoa consegue perceber, com dificuldade, o zumbido de um mosquito, situado a 1 m de distância dela.
- Qual a potência sonora que o mosquito está emitindo?
 - Quantos mosquitos seriam necessários para emitir uma potência sonora igual àquela consumida por uma lâmpada de 100 W?

Resolva questões de vestibular questões de vestibular

As questões de vestibular se encontram no final do livro.

apêndice

D.1. As equações do movimento harmônico simples

INTRODUÇÃO

Ao abordarmos, na secção 16.1, o movimento harmônico simples de uma partícula, sua descrição foi feita de maneira qualitativa, sem a preocupação de estabelecer as equações que fornecem a posição, a velocidade e a aceleração desta partícula em cada instante. Nesta secção, faremos o estudo quantitativo deste movimento e estabeleceremos aquelas equações.

Para isto, consideremos na fig. D-1 uma partícula, de massa m , executando um movimento harmônico simples (que abreviaremos como MHS) entre os pontos B e B' , com centro no ponto O . Tomemos um eixo orientado OX , como mostra a figura, coincidente com a direção do movimento. Neste eixo a distância X , de m a O , fornece a posição (ou elongação) da partícula em um dado instante. É fácil perceber que sendo o eixo OX orientado, quando a partícula estiver à direita de O , o valor de X será positivo e quando m estiver à esquerda de O , X será negativo.

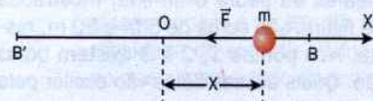


Fig. D-1: Uma partícula, sob a ação de uma força restauradora $F \propto X$, executa um MHS.

Já sabemos que a força \vec{F} , que atua na partícula, está sempre dirigida para O e seu módulo é proporcional a X , isto é, $F = kX$. Levando em consideração a orientação de OX , podemos sintetizar estes fatos escrevendo:

$$F = -kX$$

De fato, nesta equação, se $X > 0$ (partícula à direita de O) temos $F < 0$ (força dirigida para a esquerda) e se $X < 0$ (partícula à esquerda de O) temos $F > 0$ (força dirigida para a direita).

Pela 2ª lei de Newton, a aceleração da partícula será dada por:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{-kX}{m} \quad \text{ou} \quad a = -\left(\frac{k}{m}\right)X$$

Então, em um movimento harmônico simples a aceleração também é diretamente proporcional a X e está dirigida para o ponto O .

PROJEÇÃO DO MOVIMENTO CIRCULAR UNIFORME SOBRE UM DIÂMETRO

Consideremos uma partícula descrevendo um movimento circular uniforme, de raio R e velocidade angular ω constante. Quando a partícula passa por uma posição, A , qualquer (veja a fig. D-2), podemos projetar sua posição sobre um diâmetro qualquer PP' , obtendo-se assim o ponto A' . Enquanto a partícula

se desloca sobre a circunferência, a projeção de sua posição vai se deslocando sobre o diâmetro: por exemplo, quando a partícula está em B , a projeção está em B' ; quando ela está em C , a projeção está em C' etc. Vemos então que à medida que a partícula descreve sua trajetória circular, a projeção de sua posição percorre o diâmetro PP' , indo de P para P' , voltando de P' para P e assim sucessivamente. Em outras palavras, a projeção executa um *movimento oscilatório* sobre o diâmetro. É evidente que a amplitude, A , deste movimento oscilatório é igual ao raio, R , da trajetória circular e o seu período será igual ao período, T , do movimento circular uniforme da partícula.

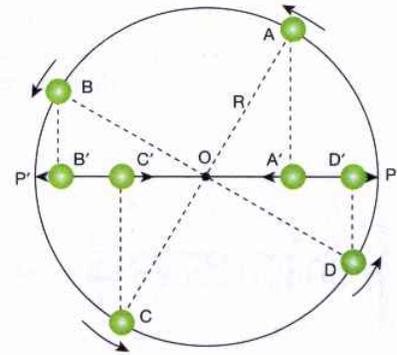


Fig. D-2: Projeção de um movimento circular uniforme sobre um diâmetro da circunferência.

O MOVIMENTO OSCILATÓRIO DA PROJEÇÃO É HARMÔNICO SIMPLES

Sabemos que a partícula em movimento circular uniforme possui uma aceleração centrípeta \vec{a}_c , dirigida para o centro O , como está mostrado na fig. D-3 para o ponto M , ocupado pela partícula em um dado instante. A aceleração do movimento oscilatório da projeção M' sobre o diâmetro OX será \vec{a}_x , que é a projeção de \vec{a}_c sobre este diâmetro. Sendo θ o ângulo de OM com OX (fig. D-3), vemos que o ângulo de \vec{a}_c com \vec{a}_x é, também, igual a θ . Logo, o módulo de \vec{a}_x será:

$$|\vec{a}_x| = a_c \cos \theta$$

Sabemos que $a_c = v^2/R = v^2/A$, porque o raio, R , da trajetória circular é igual à amplitude, A , do movimento oscilatório. Além disso, como $v = \omega R = \omega A$, temos:

$$a_c = \frac{v^2}{A} = \frac{\omega^2 A^2}{A} \quad \text{donde} \quad a_c = \omega^2 A$$

Portanto,

$$|\vec{a}_x| = \omega^2 A \cos \theta$$

No triângulo OMM' vemos que $A \cos \theta = X$ e como \vec{a}_x está sempre apontando para o ponto O (tem sinal contrário a X), podemos escrever

$$a_x = -\omega^2 X$$

Mas ω^2 é constante, porque o movimento é circular uniforme. Logo a aceleração \vec{a}_x é diretamente proporcional a X . Como vimos, isto é uma característica do MHS e, assim, podemos concluir

a projeção de um movimento circular uniforme sobre um diâmetro da circunferência executa um movimento harmônico simples.

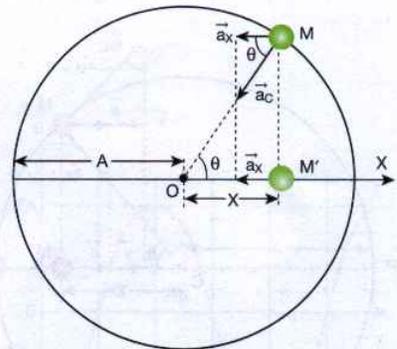


Fig. D-3: A projeção M' , de M sobre um diâmetro, executa um MHS.

CÁLCULO DO PERÍODO DO MHS

Suponhamos um bloco de massa m , descrevendo um MHS, preso à extremidade de uma mola, de constante elástica k . Como vimos, é sempre possível imaginar um movimento circular uniforme, acoplado ao MHS, tal que sua projeção sobre um diâmetro oscile acompanhando exatamente as posições do bloco em seu movimento (na fig. D-4, a projeção M' acompanha a oscilação

do bloco preso à mola). Vimos que a aceleração da projeção é dada por $a_x = -\omega^2 X$ e que a aceleração do bloco preso à mola, em MHS, é $a = -(k/m)X$. Como essas duas expressões se referem à mesma aceleração vem:

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad \text{ou} \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Sendo T o período do movimento circular, que é igual ao do MHS, podemos escrever:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{donde} \quad T = \frac{2\pi}{\omega}$$

Então

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

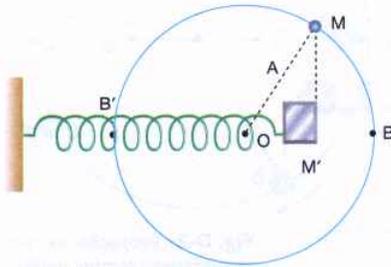


Fig. D-4: É sempre possível imaginar um movimento circular uniforme, cuja projeção acompanha uma partícula que executa um MHS.

Este resultado já havia sido apresentado, sem demonstração, na secção 16.1.

A relação $\omega = 2\pi/T$ nos fornece

$$\omega = 2\pi\left(\frac{1}{T}\right) \quad \text{donde} \quad \omega = 2\pi f$$

A velocidade angular ω do movimento circular está, então, diretamente ligada à frequência f do MHS a ele acoplado. Por este motivo quando ω aparece nas equações do MHS, essa grandeza é usualmente denominada *frequência angular* (costuma-se também usar, para denominar ω , o termo *pulsação*).

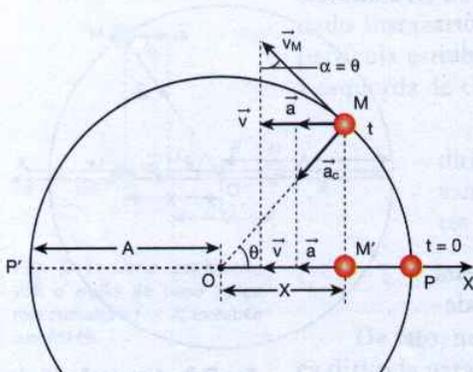


Fig. D-5: Esquema de posição, velocidade e aceleração de uma partícula em MHS.

CÁLCULO DA POSIÇÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO

Na fig. D-5 mostramos uma partícula M em movimento circular uniforme, com velocidade angular ω e a projeção, M' , de sua posição sobre o eixo OX , que como acabamos de mostrar, executa um MHS sobre esse diâmetro. Vamos considerar $t = 0$ no instante em que a partícula está em P , isto é, quando a posição de M' é $X = A$. Em um instante t qualquer, M terá descrito um ângulo $\theta = \omega t$ e a posição X de M' será dada por (veja o triângulo OMM' , na fig. D-5):

$$X = A \cos \theta \quad \text{ou} \quad X = A \cos \omega t$$

Com esta equação podemos calcular a posição X de uma partícula em MHS, em qualquer instante t , se conhecermos os valores de ω e A .

CÁLCULO DA VELOCIDADE EM FUNÇÃO DO TEMPO

Ainda na fig. D-5 mostramos a velocidade \vec{v}_M da partícula M , no instante t . A velocidade \vec{v} , do MHS de M' , será obtida projetando-se \vec{v}_M sobre OX . Observe que o ângulo α mostrado nesta figura é igual a θ (seus lados são respectivamente perpendiculares) e que, no instante considerado, v é negativo, enquanto θ é positivo. Assim, no triângulo que tem \vec{v}_M e \vec{v} como lados, obtemos:

$$v = -v_M \sin \theta \quad \text{ou} \quad v = -v_M \sin \omega t$$

e lembrando que $v_M = \omega A$, vem

$$v = -\omega A \sin \omega t$$

CÁLCULO DA ACELERAÇÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO

Já mostramos que a projeção \vec{a}_x da aceleração centrípeta em um movimento circular uniforme é dada por $a_x = -\omega^2 X$ e esta é a própria aceleração \vec{a} do MHS. Logo

$$a = -\omega^2 X \quad \text{ou} \quad a = -\omega^2 A \cos \omega t$$

COMENTÁRIOS

1) As expressões

$$X = A \cos \omega t, \quad v = -\omega A \sin \omega t \quad \text{e} \quad a = -\omega^2 A \cos \omega t$$

nos permitem construir os gráficos $X \times t$, $v \times t$ e $a \times t$ para um MHS. Estes gráficos estão mostrados na fig. D-6. Naturalmente, eles têm formas senoidais (ou co-senoidais) em virtude das equações citadas. Examine os gráficos, observando onde cada uma das grandezas atinge seu valor máximo, onde ela se anula e onde ela muda de sinal.

2) Suponhamos uma situação em que o início da contagem de tempo, isto é, instante $t = 0$, não coincida com a posição P da partícula, ou seja, com o instante em que $X = A$. Na fig. D-7 mostramos uma situação como esta: o raio que acompanha a partícula no movimento circular, no instante $t = 0$, forma um ângulo θ_0 com o eixo OX . É fácil ver que, neste caso, em um instante t qualquer, o ângulo θ é dado por $\theta = \omega t + \theta_0$. Então, as equações que fornecem X , v e a tomam as seguintes formas:

$$X = A \cos(\omega t + \theta_0), \quad v = -\omega A \sin(\omega t + \theta_0) \quad \text{e} \\ a = -\omega^2 A \cos(\omega t + \theta_0)$$

O ângulo $\theta = \omega t + \theta_0$ costuma ser denominado *fase do movimento* e θ_0 é a *fase inicial*. Entretanto, como em nosso *Curso de Física* vamos trabalhar com apenas uma partícula em MHS, poderemos, sem perda de generalidade, supor sempre o instante $t = 0$ coincidindo com a partícula na posição $X = A$. Em outras palavras, vamos considerar sempre a fase inicial nula, isto é, $\theta_0 = 0$ e as equações aqui deduzidas tomarão as formas estabelecidas anteriormente:

$$X = A \cos \omega t, \quad v = -\omega A \sin \omega t \quad \text{e} \quad a = -\omega^2 A \cos \omega t.$$

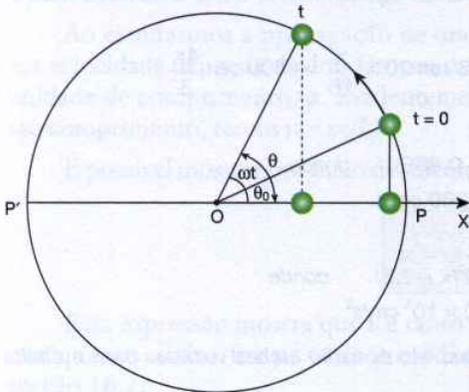


Fig. D-7: O ângulo θ é a fase do MHS e θ_0 é denominado fase inicial.

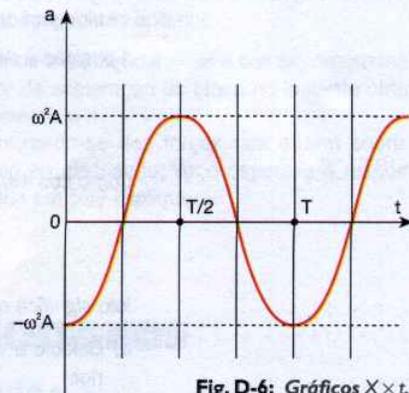
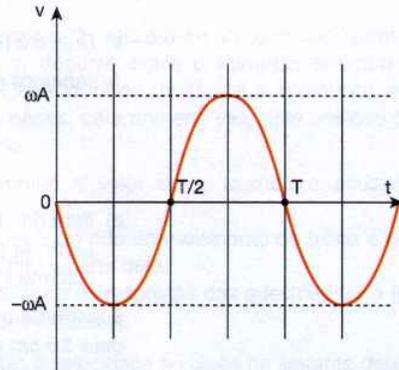
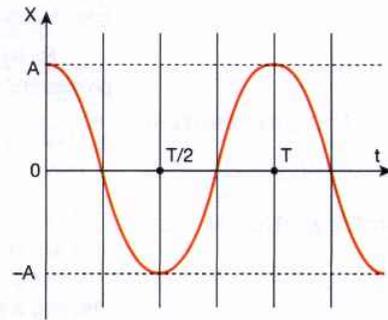


Fig. D-6: Gráficos $X \times t$, $v \times t$ e $a \times t$ para o MHS.

Exemplo 1

Na fig. D-4, suponha que a mola tenha uma constante elástica $k = 80 \text{ N/m}$ e que o corpo oscilando, preso à sua extremidade, tenha massa $m = 200 \text{ g}$.

- a) Qual é a velocidade angular do movimento circular uniforme, cuja projeção coincide com o movimento oscilatório do corpo de massa m ?

Esta velocidade angular é a frequência angular (ou pulsação) do MHS executado por m . Vimos que $\omega = \sqrt{k/m}$, logo

$$\omega = \sqrt{\frac{80}{0,200}} \quad \text{donde} \quad \omega = 20 \text{ rad/s}$$

- b) Qual é o período do MHS?

Já sabemos que $\omega = 2\pi/T$. Logo,

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{20} = \frac{\pi}{10} \quad \text{ou} \quad t = 0,314 \text{ s}$$

- c) Para dar início às oscilações, suponha que o corpo preso à mola tenha sido deslocado, a partir da posição de equilíbrio, de 15 cm para a direita e abandonado desta posição no instante $t = 0$. Qual é a amplitude do MHS que o corpo passa a descrever?

É evidente que o corpo passará a oscilar em torno da posição de equilíbrio, afastando-se dela 15 cm para a direita e 15 cm para a esquerda. Então, a amplitude do movimento é $A = 15 \text{ cm}$.

- d) Considerando, na fig. D-4, um eixo OX, orientado para a direita, determine a posição (ou elongação) do corpo no instante $t = (\pi/15) \text{ s}$.

A posição é dada por $X = A \cos \omega t$. Logo,

$$X = 15 \cos 20 \cdot \frac{\pi}{15} = 15 \cos \frac{4\pi}{3}$$

Como $\cos 4\pi/3 = -\sin \pi/6 = -0,50$, vem

$$X = 15(-0,50) \quad \text{donde} \\ X = -7,5 \text{ cm}$$

Isto significa que o corpo se encontra, naquele instante, 7,5 cm à esquerda de O.

- e) Calcule a velocidade e a aceleração do corpo, no instante considerado na questão anterior.

Temos

$$v = -\omega A \sin \omega t = -20 \times 15 \sin 20 \times \frac{\pi}{15} = -300 \sin \frac{4\pi}{3}$$

Como $\sin 4\pi/3 = -\sin \pi/3 = -0,866$, vem

$$v = -300 \times (-0,866) \quad \text{donde} \\ v = 260 \text{ cm/s}$$

Para a aceleração teremos

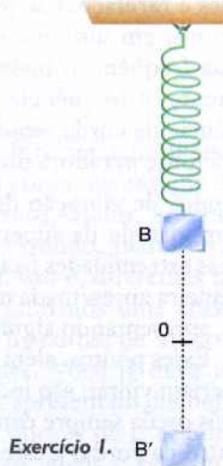
$$a = -\omega^2 X = -20^2 \times (-7,5) \quad \text{donde} \\ a = 3,0 \times 10^3 \text{ cm/s}^2$$

Observe que tanto v quanto a são positivas, isto é, estão ambas voltadas para a direita, na fig. D-4.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima secção, **responda** às questões seguintes, **consultando o texto** sempre que julgar necessário.

- Um bloco é preso à extremidade de uma mola vertical, como mostra a figura deste exercício. Uma pessoa sustenta o bloco na posição B , na qual a mola não está deformada. Deixando o bloco baixar lentamente, verifica que sua posição de equilíbrio, após abandonado, é o ponto O , onde a mola apresenta uma deformação de 10 cm. Fazendo o corpo voltar à posição B e abandonando-o em seguida, ele passa a oscilar verticalmente, entre os pontos B e B' .



- Qual é a amplitude do movimento do bloco?
 - Observa-se experimentalmente que o bloco executa 20 vibrações completas em 10 s. Qual é a frequência angular (ou pulsação) deste movimento?
- Sabe-se que a constante elástica da mola do exercício anterior é $k = 40 \text{ N/m}$. Qual é o valor da massa do bloco preso a ela? (Considere $\pi^2 = 10$.)
 - Considere, na situação descrita no exercício 1, um eixo OX orientado verticalmente para cima (veja a figura). Suponha que o início da contagem do tempo

($t = 0$) seja o instante em que o bloco foi abandonado em B . No instante $t = 0,25 \text{ s}$:

- Qual é a fase do movimento?
 - Qual é a posição do corpo?
 - Indique, em uma cópia da figura, a posição que o corpo estará ocupando.
- No exercício 1, deseja-se determinar quanto tempo, t , decorre entre o instante em que o bloco é abandonado de B até o momento em que ele passa, pela primeira vez, pela posição de equilíbrio.
 - Determine o valor de t , usando a equação $X = A \cos \omega t$.
 - Calcule o período do movimento do bloco e determine t a partir dele.
 - Verifique se as respostas das questões (a) e (b) são coincidentes.
 - Calcule a velocidade do bloco no instante determinado no exercício anterior.
 - Explique o significado do sinal negativo encontrado na questão anterior.
 - Usando a equação $a = -\omega^2 A \cos \omega t$, determine o valor da aceleração do bloco no instante obtido no exercício 4.
 - Lembrando-se das forças que atuam sobre o bloco em oscilação, você esperava a resposta obtida em (a)? Explique.

D.2. 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 . Evidentemente, 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

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Esta 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 secção 16.2.

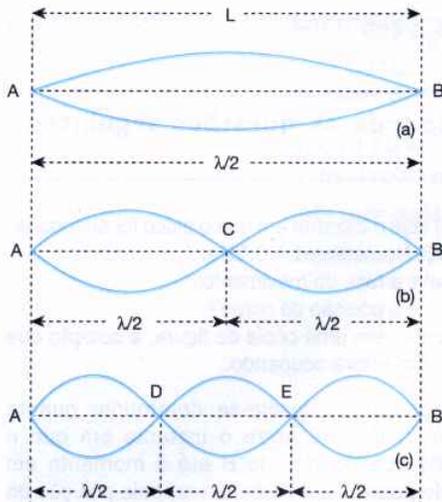


Fig. D-8: Representação de modos de vibração de uma corda fixa em suas extremidades (1°, 2° e 3° harmônicos).

EMIÇÃO DE SOM POR UMA CORDA EM VIBRAÇÃO

Como você já deve ter observado várias vezes, cordas esticadas, como as de um violão ou de um violino, emitem sons quando são postas em vibração. Isto ocorre porque a corda, ao vibrar (como está representado na fig. D-8), provoca compressões e rarefações no ar que a envolve. Essas compressões e rarefações se propagam no ar constituindo-se, como sabemos, em uma onda longitudinal que, conforme o valor de sua frequência, poderá sensibilizar o nosso ouvido. Evidentemente, a frequência da onda sonora é determinada pela frequência da corda, sendo igual a ela. Portanto, a corda vibrante é a fonte geradora do som produzido.

Os modos de vibração da corda, mostrados na fig. D-8, ocorrem em virtude da superposição das ondas incidentes e refletidas nas extremidades fixas A e B da corda. Ela pode vibrar tanto da maneira apresentada na fig. (a), quanto na fig. (b) ou na fig. (c) etc., apresentando alguns pontos que não vibram, isto é, são nós das ondas mostradas. Esses pontos, além dos pontos fixos da corda A e B , que evidentemente não poderiam vibrar, são indicados na fig. D-8 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 este ponto é denominado *ventre* (ou *antínó*). Em todos os modos de vibração apresentados dizemos que se tem na corda uma onda *estacionária*, porque a energia de vibração das ondas fica sempre confinada no espaço entre dois nós, não se propagando através desses pontos.

FREQÜÊNCIAS DOS SONS EMITIDOS PELA CORDA VIBRANTE

Quando a corda vibra do modo mostrado na fig. D-8-a, ela está oscilando com a menor frequência entre os modos possíveis de vibração que pode apresentar. Esta frequência, que vamos designar por f_1 , é denominada *freqüência fundamental* da corda e este modo de vibração é chamado *1° harmônico*.

Se λ_1 o comprimento de onda correspondente a este modo, temos, na fig. D-8-a:

$$\frac{\lambda_1}{2} = L \quad \text{donde} \quad \lambda_1 = 2L$$

Como já sabemos que $f_1 = v/\lambda_1$, vem

$$f_1 = \frac{v}{2L} \quad \text{ou} \quad f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

O modo de vibração mostrado na fig. D-8-b é denominado *2° harmônico*. Para esse caso, temos (veja a figura) $\lambda_2 = L$. Então,

$$f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{v}{L} \quad \text{ou} \quad f_2 = 2f_1$$

De modo semelhante, dizemos que o modo de vibração da fig. D-8-c é o *3° harmônico*. Temos,

$$3 \left(\frac{\lambda_3}{2} \right) = L \quad \text{ou} \quad \lambda_3 = \frac{2L}{3}$$

Então,

$$f_3 = \frac{v}{\lambda_3} = 3\left(\frac{v}{2L}\right) \quad \text{donde} \quad f_3 = 3f_1$$

A corda pode apresentar, também, outros modos de vibração denominados 4º harmônico, 5º harmônico etc., cujas frequências são $f_4 = 4f_1$, $f_5 = 5f_1$ etc.

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. 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. Você já deve ter observado, também, que diferentes cordas apresentam diâmetros diferentes, isto é, apresentam diferentes valores de μ e, portanto, mesmo que elas tenham comprimentos iguais e estejam sob a mesma tensão, emitirão notas diferentes (frequências diferentes). Observe, finalmente, que com uma mesma corda o músico consegue obter notas diferentes, prendendo-a em pontos diferentes do seu comprimento, de modo a fazê-la vibrar com diferentes valores de L .
- 2) De maneira geral, quando uma corda é posta em vibração, ela vibra com uma forma determinada, que é o resultado da superposição dos diversos harmônicos que ela pode emitir. Como sabemos, a forma da onda é característica do timbre do som emitido. Assim, o timbre do som é caracterizado pelos harmônicos presentes na vibração.



As cordas de uma harpa possuem comprimentos diferentes para emitirem notas diferentes.



Na figura estão destacados os três fatores que podemos usar para fazer variar a frequência dos sons emitidos pelas cordas de um violão.

Exemplo 2

A montagem mostrada na fig. D-9 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 vibrador cuja frequência f é conhecida. Na outra extremidade é suspenso um peso, cujo valor pode-se variar até que uma onda estacionária seja estabelecida na corda. Suponha que a frequência do vibrador 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?

Sabemos que a distância entre dois nós consecutivos é $\lambda/2$. Logo

$$\frac{\lambda}{2} = 5,0 \quad \text{donde} \\ \lambda = 10 \text{ cm}$$

Então

$$v = f\lambda = 36 \times 10 \quad \text{ou} \quad v = 360 \text{ cm/s}$$

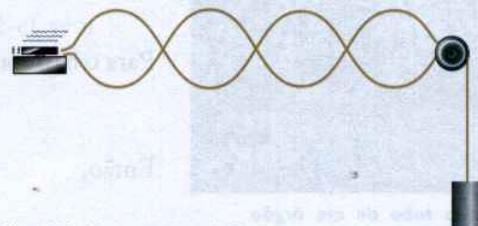


Fig. D-9: Para o exemplo 2.

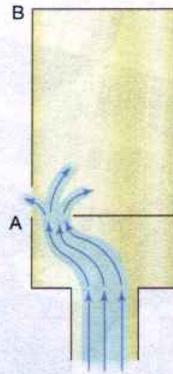


Fig. D-10: Esquema de fluxo de ar que origina ondas estacionárias em um tubo sonoro fechado.



A frequência do som emitido por uma coluna de ar em vibração depende do comprimento da coluna.

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, tais como: órgão, flauta, clarineta, pistom etc. Esses tubos possuem sempre uma de suas extremidades aberta, na qual um jato de ar é introduzido (soprado) provocando vibrações que se propagam na coluna de ar, no interior do tubo. A fig. D-10 mostra um modelo usado em certos tipos de órgão, onde A é a extremidade aberta do tubo. Vamos supor que a outra extremidade, B , esteja fechada. Então, nesta extremidade, as partículas de ar não podem vibrar e, assim, B é sempre um nó da onda estacionária que se forma no interior do tubo. A extremidade aberta, onde o ar é soprado, será um ventre de vibração.

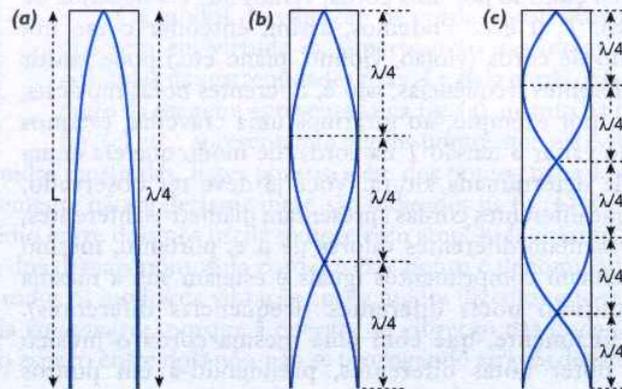


Fig. D-11: Modos de vibração da coluna de ar em um tubo sonoro fechado.

Na fig. D-11 estão representados modos de vibração 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 vibração, representamos as ondas estacionárias que se formam no ar contido no tubo, estabelecendo uma analogia com uma corda em vibração. É evidente, entretanto, que não há corda alguma no interior do tubo e, como sabemos, as vibrações 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 de vibração, é tal que (fig. D-11-a):

$$L = \frac{\lambda_1}{4} \quad \text{donde} \quad \lambda_1 = 4L$$

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 fig. D-11-b, temos

$$L = 3\left(\frac{\lambda_2}{4}\right) \quad \text{donde} \quad \lambda_2 = \frac{4L}{3}$$

Então,

$$f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = 3\left(\frac{v}{4L}\right) \quad \text{ou} \quad f_2 = 3f_1$$



Cada tubo de um órgão emite uma nota diferente.

De modo semelhante, para o harmônico representado na fig. D-11-c, vem

$$L = 5\left(\frac{\lambda_3}{4}\right) \quad \text{donde} \quad \lambda_3 = \frac{4L}{5}$$

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 vibração, cujas freqüências 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 freqüências $2f_1$, $4f_1$, $6f_1$ etc., isto é, este tubo só pode emitir os harmônicos de ordem ímpar.

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 mostra a fig. D-12. Na fig. D-12-a está representado o 1º harmônico, no qual a coluna de ar está vibrando com a freqüência fundamental f_1 . Temos, observando esta figura,

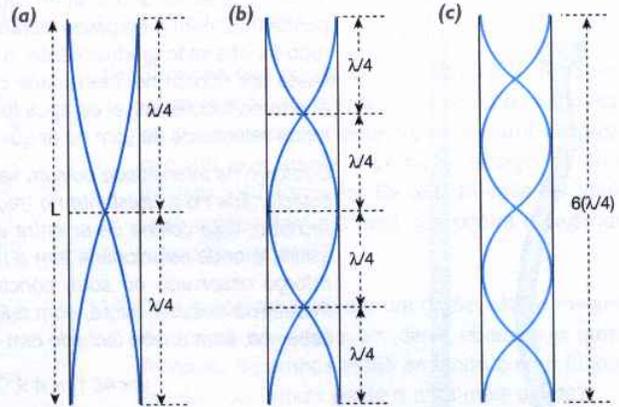


Fig. D-12: Representação de modos de vibração da coluna de ar em um tubo sonoro aberto.

$$L = 2\left(\frac{\lambda_1}{4}\right) \quad \text{donde} \quad \lambda_1 = 2L$$

Então,

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} \quad \text{ou} \quad f_1 = \frac{v}{2L}$$

Para o 2º harmônico (fig. D-12-b), temos

$$L = 4\left(\frac{\lambda_2}{4}\right) \quad \text{donde} \quad \lambda_2 = L$$

Então,

$$f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{v}{L} \quad \text{ou} \quad f_2 = 2f_1$$

De maneira semelhante, para o 3º harmônico (fig. D-12-c), vem

$$L = 6\left(\frac{\lambda_3}{4}\right) \quad \text{donde} \quad \lambda_3 = \frac{2L}{3}$$

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 vibração (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.

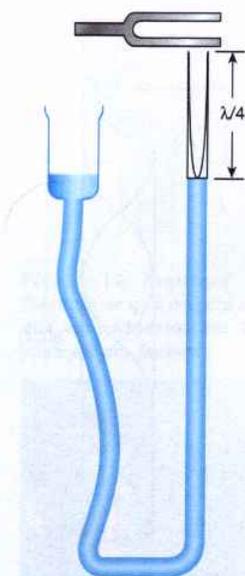


Fig. D-13: Para o exemplo 3.

Exemplo 3

Na fig. D-13 mostramos um dispositivo que permite medir a velocidade do som no ar: um diapasão em vibração, colocado próximo a um tubo, ligado a um reservatório, contendo água. Pode-se variar o nível da água no tubo, suspendendo ou abaixando o reservatório. Suponha que, com o diapasão vibrando 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. Neste momento, a distância entre a extremidade aberta do tubo e o nível da água foi medida, encontrando-se o valor $L = 35$ cm.* 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. Este trecho funciona como um tubo sonoro fechado, cuja coluna de ar entra em vibração pela ação das vibrações 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 vibrando com a menor frequência possível, isto é, com a frequência fundamental f_1 , como mostra a fig. D-13. Como sabemos, para o tubo fechado tem-se $f_1 = v/4L$. Então,

$$v = 4L f_1 = 4 \times 0,35 \times 245 \quad \text{donde} \quad v = 343 \text{ m/s}$$

Esta é, pois, a velocidade do som obtida na experiência descrita.

INSTRUMENTOS DE PERCUSSÃO

Os instrumentos de percussão estão sempre presentes em orquestras ou em conjuntos musicais e foram muito usados pelos povos primitivos. Os sons por eles emitidos podem ter sua origem nas vibrações 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 de comportamento para eles (como pode ser feito para os instrumentos de corda e de sopro). Por isso, esse comportamento não será analisado em nosso curso.

Exercícios de fixação

Antes de passar ao estudo da próxima seção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

7. 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?
 - c) Qual é a frequência de vibração correspondente ao seu 2º harmônico? E ao seu 5º harmônico?

* 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.

8. Suponha que uma das cordas de um piano esteja vibrando e emitindo a nota dó, de 512 hertz (veja fig. 16-38). Para esta corda emitir a nota dó da escala imediatamente superior:
- Variando-se apenas o seu comprimento, ele deverá ser aumentado ou diminuído? Quantas vezes?
 - Variando-se apenas a tensão à qual ela está submetida, esta tensão deve ser aumentada ou diminuída? Quantas vezes?
9. 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 vibrando com sua frequência fundamental e que são feitas do mesmo material, responda:
- A corda que emite o som mais grave é a mais grossa ou a mais fina? Explique.
 - Quantas vezes a área da secção reta de uma das cordas é maior que a da outra?
10. Para a corda apresentada na fig. D-8:
- Faça um desenho mostrando o modo de vibração correspondente ao 5º harmônico.
 - Analisando o desenho feito em (a), determine o valor de λ_5 em função de L para o 5º harmônico.
 - Usando a resposta da questão (b), obtenha a relação entre a frequência f_5 e a frequência fundamental f_1 .
11. Um tubo sonoro fechado emite um som fundamental de 500 hertz à temperatura de 20 °C.
- Qual é o comprimento deste tubo?
 - Entre as frequências seguintes, assinale aquelas que este tubo *não* é capaz de emitir: 250 hertz, 1 000 hertz, 1 500 hertz, 2 000 hertz e 2 500 hertz.
12. Para o tubo da fig. D-12:
- Faça um desenho mostrando o modo de vibração correspondente ao 4º harmônico.
 - Analisando o desenho feito em (a), determine o valor de λ_4 em função de L , para o 4º harmônico.
 - Usando a resposta da questão (b), obtenha a relação entre a frequência f_4 e a frequência fundamental f_1 .
13. Suponha que na fig. D-13 (exemplo 3, resolvido nesta secção), 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 neste som?
14. 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?
15. Um dispositivo, denominado *apito de Galton*, consiste em um tubo fechado em uma de suas extremidades, podendo esta ser deslocada, de modo a variar o comprimento, L , do tubo. Assim, usando este 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.
- 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 ouvido normal deixa de escutar o som emitido.
 - Suponha que este apito foi acionado com um comprimento de 2,5 mm. Ele seria ouvido por uma pessoa? E por um cachorro?

D.3. As equações do efeito Doppler

No Tópico Especial deste capítulo (secção 16.8), analisamos o efeito Doppler, isto é, as variações da frequência de uma onda qualquer (sonora, luminosa, na água etc.), causadas pelo movimento da fonte 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 fig. 16-41, onde uma fonte, emitindo um som de frequência f_0 , está em repouso e o receptor (uma pessoa, por exemplo) se aproxima desta fonte com uma velocidade v_R . Se o receptor estivesse em repouso, já sabemos que ele iria receber, por segundo, um número de pulsos igual a f_0 , sendo $f_0 = v/\lambda$, onde 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 o número de pulsos da onda contido nessa distância é, evidentemente, 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 secção 16.8. Naturalmente, 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, neste caso, f será menor do que f_0 , como já era do nosso conhecimento.

Essas duas equações podem ser apresentadas sob a forma única seguinte:

$$f = f_0 \left(\frac{v \pm v_R}{v} \right)$$

onde 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 fig. 16-42 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, estes 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, numa distância numericamente igual a $v - v_F$. O comprimento de onda será então menor e dado por $\lambda' = (v - v_F)/f_0$. Este 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:

$$\frac{v}{f} = \frac{v - v_F}{f_0} \quad \text{donde} \quad f = f_0 \left(\frac{v}{v - v_F} \right)$$

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 estiver se afastando de um receptor em repouso, é fácil mostrar que 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:

$$f = f_0 \left(\frac{v}{v \mp v_F} \right)$$

Quando o receptor e a fonte sonora se movimentam simultaneamente (ao longo de uma mesma reta), a frequência que será detectada pelo receptor dependerá, naturalmente, das velocidades de ambos e não é difícil mostrar que, neste caso, ela será dada por

$$f = f_0 \left(\frac{v \pm v_R}{v \mp v_F} \right)$$

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 as ondas luminosas, desde que as velocidades da fonte e do receptor sejam muito menores do que a velocidade da luz no vácuo. Quando isto não ocorre as equações sofrem alterações em virtude de efeitos relativísticos.

COMENTÁRIOS

- 1) As medidas de frequência, em geral, podem ser realizadas com grande precisão. Em virtude disto é possível, usando-se o efeito Doppler, detectar velocidades muito pequenas de fontes ou receptores sonoros em movimento. Um exemplo de aplicação dessas idéias é a medida da velocidade do sangue nas artérias, cujo valor máximo é de apenas 0,4 m/s. Esta medida é feita dirigindo-se um feixe de ultra-som, de frequência conhecida, para uma artéria e medindo-se a frequência deste feixe após ser refletido pelas células sanguíneas em movimento. Observe que estas células, por estarem em movimento, recebem o feixe de ultra-som com uma frequência alterada. Por sua vez, ao refletir o ultra-som, 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.
- 2) 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, neste caso, a onda usada é de natureza eletromagnética (microonda), que será analisada no capítulo 24 do nosso *Curso de Física*. Estas 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 fig. D-14).

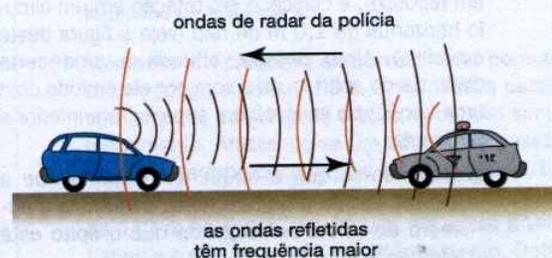


Fig. D-14: A polícia determina a velocidade de um automóvel por meio do efeito Doppler.

Exemplo 4

A freqüência do apito de uma locomotiva é de 1 000 hertz.

- a) A locomotiva, apitando, está se aproximando, com uma velocidade de 40 m/s, de uma pessoa parada na estação. Qual a freqüência 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:

$$f = f_0 \left(\frac{v}{v - v_F} \right) = 1\,000 \left(\frac{340}{340 - 40} \right) \quad \text{donde} \quad f = 1\,132 \text{ hertz}$$

- b) Suponha, agora, que a locomotiva, ainda apitando, esteja parada e que a pessoa, em um automóvel, se aproxima dela com velocidade de 40 m/s. Qual será, neste caso, a freqüência que a pessoa escutará?

Temos, para este caso, em que a fonte está em repouso e o receptor se aproximando dela, a seguinte expressão para a freqüência detectada:

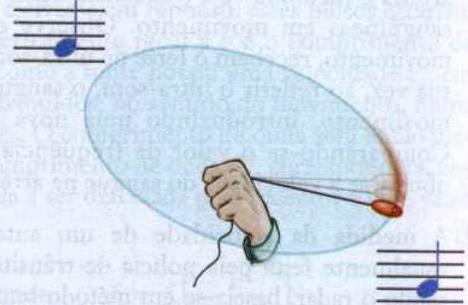
$$f = f_0 \left(\frac{v + v_R}{v} \right) = 1\,000 \left(\frac{340 + 40}{340} \right) \quad \text{donde} \quad f = 1\,117 \text{ hertz}$$

Observe que em ambos os casos a pessoa ouvirá sons de freqüências superiores a 1 000 hertz. Entretanto, a alteração na freqüência 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 perceber analisando as figs. 16-41 e 16-42.

Ícios de fixação **exercícios de fixação** exercícios de f

Antes de passar ao estudo da próxima secção, responda às questões seguintes, consultando o texto sempre que julgar necessário.

16. No exemplo 4, resolvido nesta secção, determine a freqüência que seria ouvida pela pessoa supondo que:
- Na questão (a), a locomotiva esteja se afastando dela.
 - Na questão (b), a pessoa esteja se afastando da locomotiva.
17. 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 deste exercício). Uma pessoa, situada a uma certa distância do apito, ouve o som por ele emitido com uma freqüência variável, ora superior, ora inferior a 500 hertz.
- Sabendo-se que a freqüência máxima que a pessoa escuta é de 515 hertz, determine o número de voltas por segundo que o apito está efetuando.
 - Qual é o valor da freqüência mínima que a pessoa irá detectar?



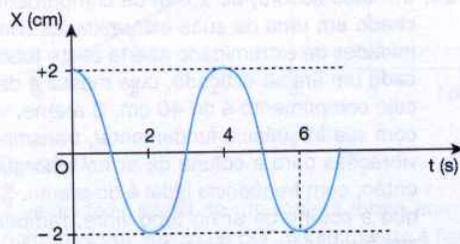
Exercício 17.

18. Consultando a tabela 16-2, 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 este caso, as equações deduzidas nesta secção para as ondas mecânicas).

19. Analisando o espectro da luz proveniente de uma certa galáxia distante, os cientistas mediram o comprimento de onda de uma dada radiação deste espectro, encontrando o valor $\lambda = 4\,360 \times 10^{-8}$ cm. Sabendo que o comprimento de onda da radiação, se a galáxia estivesse em repouso em relação à Terra, seria $\lambda_0 = 4\,340 \times 10^{-8}$ cm, eles puderam calcular a velocidade da galáxia. Responda:
- Tendo em vista as informações fornecidas, você pode concluir que a galáxia está se afastando ou se aproximando da Terra? Explique.
 - Qual é o valor da velocidade da galáxia em relação à Terra? (Use as equações obtidas nesta secção.)
- 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, neste caso de efeito Doppler com a luz?
20. Imagine que a locomotiva de um trem-bala japonês passe apitando pela plataforma de uma estação. Uma pessoa, nesta 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 velocidade do trem-bala.
 - A frequência do apito que a pessoa escutaria se o trem estivesse parado.

problemas suplementares problemas suplementares

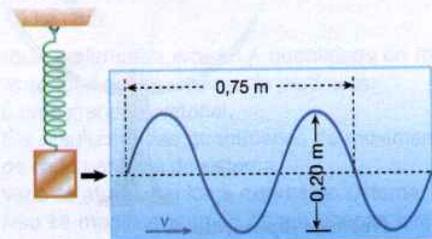
- Um corpo executa um MHS, cuja amplitude é A . Determine a posição ocupada pelo corpo no instante em que sua energia cinética é igual à sua energia potencial (apresente a resposta em função de A).
- A equação que fornece a posição de uma partícula em MHS é $X = 0,30 \cos \pi t$, onde X é dado em metros, t em segundos e o ângulo em radianos. Determine, para este movimento:
 - A amplitude.
 - A frequência.
 - A velocidade da partícula no instante $t = (1/6)$ s.
- A figura deste problema mostra o gráfico $X \times t$ para um corpo em MHS. Escreva (com valores numéricos) a equação que fornece a posição em função do tempo para este movimento.



Problema suplementar 3.

- Um cubo de madeira, de densidade ρ e aresta L , flutua em um líquido de densidade ρ' (sendo $\rho < \rho'$), com suas faces superior e inferior horizontais. O cubo é empurrado para baixo, de modo que sua face superior permaneça fora do líquido. Abandonando-se o cubo e desprezando-se os atritos:

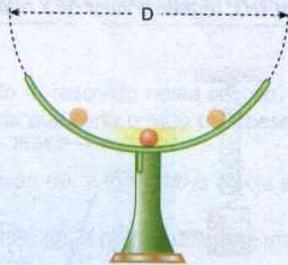
- Mostre que o cubo passará a executar um MHS.
 - Calcule o período de oscilação do cubo.
5. Um corpo de massa igual a 2,0 kg oscila livremente, suspenso a uma mola de massa desprezível. As posições ocupadas pelo corpo são registradas, por meio de um estilete preso a ele, em uma fita de papel vertical que se desloca com velocidade horizontal constante $v = 0,20$ m/s (veja a figura deste problema).
- Determine o valor da constante elástica da mola.
 - Escreva a equação que fornece a posição X do corpo, em função de t , sabendo-se que, quando $t = 0$, tem-se o valor de X máximo.



Problema suplementar 5.

- Mediante um processo eletromecânico, percutese um gongo a cada 0,50 s. Uma pessoa parada bem próxima ao gongo vê e ouve as batidas simultaneamente. Afastando-se um pouco, ela passa a ouvir o som um pouco depois de ver a batida. Entretanto, quando a pessoa se encontra afastada de 172 m do gongo, novamente ela passa a ver a batida e a escutar o som simultaneamente. Determine a velocidade do som nas condições desta experiência.

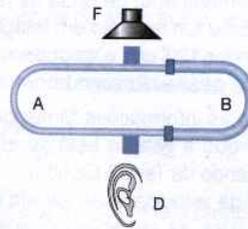
7. Um cachorro, ao latir, emite ondas sonoras com potência aproximada de 1,0 mW. Suponha que esta potência seja distribuída uniformemente em uma superfície hemisférica (cujo centro se situa na boca do cachorro).
- Determine, em dB, o nível de intensidade sonora a 5,0 m do cachorro.
 - Qual seria o nível de intensidade naquela posição se cinco cachorros latisses simultaneamente?
8. Na questão (b), do problema 35 (da série Problemas e Testes) deste capítulo, suponha que o total de mosquitos ali mencionados emita uma potência sonora que se irradia uniformemente em todas as direções. Lembrando que o limiar de sensação dolorosa para o ouvido de uma pessoa é de 120 dB, determine a que distância mínima uma pessoa pode se aproximar do enxame de mosquitos sem sentir dor.
9. Uma bolinha de vidro é colocada no interior de uma taça com forma de uma calota esférica de diâmetro $D = 12,8$ cm (veja a figura deste problema). Afastando-se ligeiramente a bolinha de sua posição de equilíbrio e abandonando-a, ela passa a oscilar em torno desta posição.
- Faça um diagrama, mostrando as forças que atuam na bolinha. Com qual dos sistemas oscilantes, analisados neste capítulo, é possível identificar o movimento da bolinha?
 - Desprezando-se os atritos e considerando $g = 10$ m/s², determine o período de oscilação da bolinha.



Problema suplementar 9.

10. A figura deste problema mostra um dispositivo, constituído por dois tubos curvos, cheios de ar, que pode ser usado para a medida da frequência de uma onda sonora, usando o fenômeno de interferência. O som é emitido por uma fonte F e recebido por um detector D . O comprimento do percurso FAD é fixo, mas o de FBD pode ser alterado pelo deslocamento do tubo B . Para uma certa posição de B o detector recebe um som de intensidade mínima e à medida que este tubo é deslocado para a direita, a intensidade cresce continuamente, atingindo um máximo em uma

posição na qual o tubo B encontra-se deslocado de 1,7 cm, em relação à primeira posição. Determine a frequência do som emitido pela fonte F , nesta experiência.



Problema suplementar 10.

- Duas fontes sonoras estão separadas por uma distância igual a 8,0 m e emitem sons com a mesma amplitude e mesma frequência $f = 85$ hertz. Sabendo-se que as fontes estão em fase, determine os pontos situados sobre o segmento que une as duas fontes nos quais ocorre interferência destrutiva das duas ondas sonoras.
- Resolva o problema anterior supondo que as duas fontes sonoras estão defasadas de 180° , isto é, quando uma delas está emitindo uma crista, a outra está emitindo um vale e reciprocamente.
- Uma das cordas de um violino, cujo comprimento é de 50 cm, vibrando com sua frequência fundamental, foi afinada para emitir o lá padrão (vibrando com seu comprimento total).
 - A que distância de sua extremidade superior ela deve ser presa para emitir o dó de frequência imediatamente superior à do lá padrão? (Consulte a fig. 16-38.)
 - Sem alterar a tensão na corda, seria possível fazê-la emitir o dó de frequência imediatamente inferior à do lá padrão? Explique.
- Um tubo sonoro, de 1,0 m de comprimento, é fechado em uma de suas extremidades. Nas proximidades da extremidade aberta deste tubo é colocado um arame esticado, cuja massa é de 10 g e cujo comprimento é de 40 cm. O arame, vibrando com sua frequência fundamental, transmite essas vibrações para a coluna de ar no tubo que vibra, então, com frequência igual à do arame. Supondo que a coluna de ar no tubo vibre, também, com sua frequência fundamental, calcule:
 - A frequência de oscilação da coluna de ar.
 - O valor da tensão no arame esticado.
- Uma sirene, emitindo um som de frequência igual a 1 000 hertz, afasta-se de uma pessoa, em repouso, com uma velocidade de 20 m/s, aproximando-se de um muro vertical liso. A pessoa ouvirá dois sons de frequências diferentes. Explique por que isto ocorre e calcule os valores dessas duas frequências.

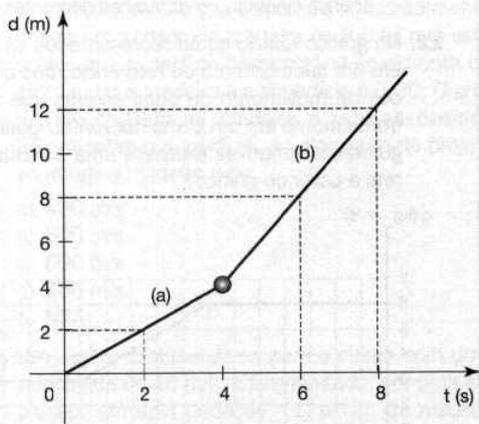
Selecionar questões de vestibular questões de vestibular

As questões seguintes foram selecionadas em provas de concursos vestibulares das principais universidades e faculdades de vários estados brasileiros. Seu objetivo é transmitir ao estudante uma idéia de como são formuladas as provas de Física dos exames vestibulares em nosso país.

CAPÍTULO 9 - Conservação da quantidade de movimento

1. Uma partícula, de massa $m = 5,0$ g, desloca-se ao longo de uma reta com movimento representado na figura, na parte (a) do gráfico. Em certo instante, durante um curto intervalo de tempo Δt , ela sofre a ação de uma força impulsiva e o seu movimento, na mesma reta, passa a se fazer de acordo com a parte (b) do gráfico. O impulso da força sobre a partícula foi de:

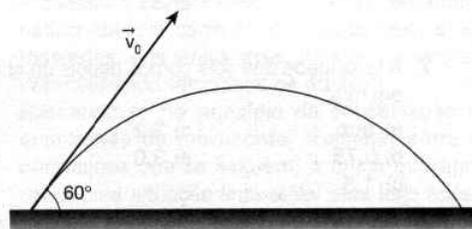
- a) 15×10^{-3} J
- b) $(7,5 \times 10^{-3}/\Delta t)$ N
- c) $7,5$ N · s
- d) $2,5 \times 10^{-3}$ N · s
- e) $5,0 \times 10^{-3}$ kg · m/s



Questão 1.

2. A velocidade inicial de um projétil forma com a horizontal um ângulo de 60° , como mostra a figura ao lado. Desprezando-se a resistência do ar, qual dos vetores abaixo representa melhor a variação da quantidade de movimento do projétil, entre o instante em que ele atinge o ponto mais alto da trajetória e o instante de lançamento?

- a) ↓
- b) ↑
- c) ↙
- d) ↗
- e) Vetor de módulo zero.



Questão 2.

3. Uma bola de tênis, de massa igual a 100 g, é atirada contra uma parede, onde chega horizontalmente com a velocidade de 20 m/s. Refletindo na parede ela volta com a mesma velocidade horizontal. Sabendo-se que a força média devida à parede que atua sobre a bola durante o impacto é de 40 N, qual é, aproximadamente, a variação da quantidade de movimento que a bola sofre, na vertical, devido à ação da gravidade, no intervalo de tempo do impacto?

- a) $4,0$ kg · m/s
- b) $0,4$ kg · m/s
- c) $0,1$ kg · m/s
- d) $0,04$ kg · m/s
- e) 10 kg · m/s

4. Marque a afirmativa errada: A quantidade do movimento total de um sistema de partículas:

- a) É uma grandeza vetorial.
- b) É a resultante das quantidades de movimento de cada partícula do sistema.
- c) Varia se atuar uma força externa no sistema.
- d) Não se modifica quando atuam apenas forças internas.
- e) Varia se existir atrito entre as partículas do sistema.

5. Suponha que uma pessoa, cuja massa é de 60 kg, encontre-se no meio de um lago gelado, sem atrito. Esta pessoa tem, em suas mãos, uma caixa cuja massa é de 5,0 kg. Arremessando a caixa horizontalmente, a pessoa adquire uma velocidade, em sentido contrário, de 0,50 m/s. Ela então conclui que a caixa foi arremessada com uma velocidade de:

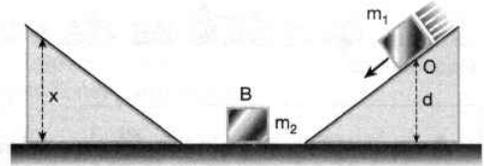
- a) 6,0 m/s
- b) 0,50 m/s
- c) 60 m/s
- d) 10 m/s
- e) 2,0 m/s

As questões 6, 7 e 8 referem-se ao seguinte enunciado:

Sobre uma mesa sem atrito, um corpo de 3 kg que se move a 4 m/s para a direita choca-se com um corpo de 8 kg que se move a 1,5 m/s para a esquerda. Depois do choque os dois corpos se mantêm unidos.

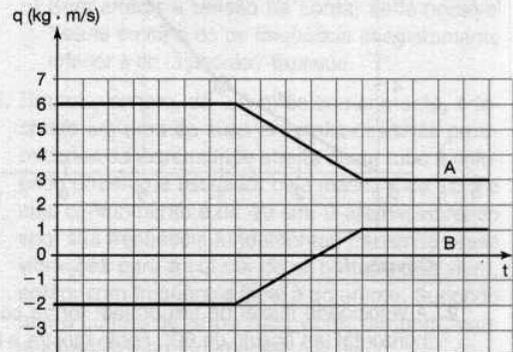
6. A quantidade de movimento total dos dois corpos antes do choque é, em $\text{kg} \cdot \text{m/s}$:
- a) zero d) 24
b) 12 e) 33
c) 16
7. A velocidade dos dois corpos depois do choque é, em m/s:
- a) zero d) 2,2
b) 0,75 e) 3,0
c) 1,5
8. A energia mecânica convertida em calor no choque é, em joules:
- a) zero d) 24
b) 12 e) 33
c) 16
9. Um automóvel realiza uma colisão completamente inelástica com outro automóvel de mesma massa e inicialmente em repouso. Qual é a porcentagem da energia cinética inicial que se transforma em outras formas de energia?
- a) 100%
b) 50%
c) 25%
d) 10%
e) 1%
10. Um corpo A de massa igual a m_1 é abandonado no ponto O e escorrega por uma rampa. No plano horizontal, choca-se com outro corpo, B, de massa igual a m_2 , que estava em repouso. Os dois ficam grudados e continuam o movimento na mesma direção até atingir uma outra rampa na qual o conjunto pode subir. Considere o esquema da figura e despreze o atrito. Qual a altura x que os corpos atingirão na rampa?

- a) $x = \left(\frac{m_1}{m_1 + m_2} \right)^2 gd$
b) $x = \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1} \right)^2 d$
c) $x = \left(\frac{m_1}{m_1 + m_2} \right)^2 d$
d) $x = \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1} \right)^2 d$
e) $x = \frac{m_1}{(m_1 + m_2)} d$



Questão 10.

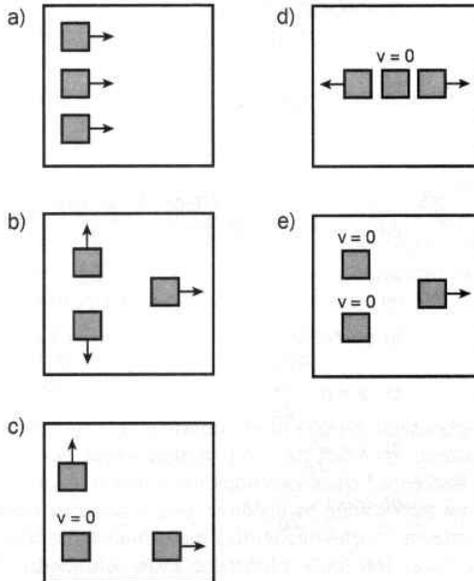
11. Um carro parado (massa de 600 kg) é trombado por um caminhão (massa de 1 400 kg), com velocidade de 72 km/h, que o arrasta, continuando a se movimentar na mesma direção de sua velocidade primitiva. Podemos afirmar:
- a) A variação da quantidade de movimento e a variação da energia cinética do sistema carro-caminhão são ambas nulas.
b) A quantidade de movimento do sistema permanece constante, mas sua energia cinética varia cerca de 8×10^4 J.
c) A energia cinética do sistema permanece constante, mas sua quantidade de movimento varia cerca de $2,8 \times 10^4$ kg · m/s.
d) A quantidade de movimento do sistema e sua energia cinética variam ambas, mas não temos condição de calcular estas variações.
e) A variação da quantidade de movimento do sistema é numericamente igual à variação de sua energia cinética, sendo ambas diferentes de zero.
12. No gráfico abaixo estão representados os valores, em um dado sistema de referência, das quantidades de movimento de duas esferas que colidem frontalmente em um plano horizontal. Qual das seguintes alternativas expressa uma conclusão correta a partir do gráfico?



Questão 12.

- a) A relação entre os módulos das velocidades iniciais das esferas é, necessariamente, de 1 para 3.
b) Depois do choque, as esferas deslocam-se em sentidos opostos aos iniciais.
c) O módulo da soma das quantidades de movimento das esferas é igual a $4,0$ kg · m/s.
d) O choque foi totalmente elástico.
e) Uma das esferas estava inicialmente parada.

13. Sobre uma superfície horizontal e sem atrito, um objeto, inicialmente em repouso, explode em três partes idênticas. Qual das figuras desta questão representa melhor o fenômeno após a explosão?



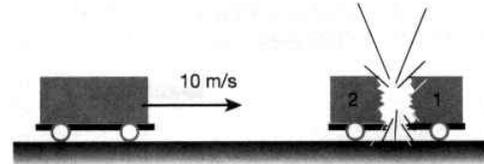
Questão 13.

14. Um projétil de 5,0 g é disparado horizontalmente contra um pedaço de madeira de 3,0 kg que está sobre uma superfície horizontal. O coeficiente de atrito entre a madeira e a superfície é 0,20. O projétil se engasta na madeira e esta se desloca 25 cm sobre a superfície. A velocidade do projétil ao atingir a madeira é de:

- a) 400 m/s
- b) 500 m/s
- c) 600 m/s
- d) 700 m/s
- e) NRA

15. Um vagão, deslocando-se para a direita com uma velocidade de 10 m/s, é fragmentado, por uma explosão, em dois pedaços, (1) e (2), de massas iguais (veja a figura). Sejam \vec{v}_1 e \vec{v}_2 as velocidades respectivas dos dois fragmentos, logo após a explosão. Das opções abaixo, assinale aquela que não poderia corresponder aos movimentos de (1) e (2) depois da explosão:

- a) $v_1 = 20$ m/s para a direita
 $v_2 = 0$
- b) $v_1 = 15$ m/s para a direita
 $v_2 = 5,0$ m/s para a direita
- c) $v_1 = 30$ m/s para a direita
 $v_2 = 10$ m/s para a esquerda
- d) $v_1 = 25$ m/s para a direita
 $v_2 = 5,0$ m/s para a direita
- e) $v_1 = 50$ m/s para a direita
 $v_2 = 30$ m/s para a esquerda



Questão 15.

16. Um carro M, de massa igual a 1,0 tonelada, freia bruscamente diante de um obstáculo imprevisto e quando sua velocidade reduz-se a 10 km/h é batido por um carro N, de massa igual a 2,0 toneladas, que vinha atrás, no mesmo sentido, desenvolvendo velocidade de 40 km/h.

Baseando-se no princípio da conservação da quantidade de movimento, assinale, entre as afirmações que se seguem, a única que apresenta uma situação impossível para logo após a batida:

- a) M e N movem-se juntos, com velocidade de 30 km/h, no sentido de movimento inicial.
- b) M avança com velocidade de 40 km/h e N continua no mesmo sentido, com velocidade de 25 km/h.
- c) M avança com velocidade de 40 km/h e N move-se, no mesmo sentido, com velocidade de 10 km/h.
- d) M avança com velocidade de 90 km/h e N pára.
- e) M avança com velocidade de 100 km/h e N move-se, em sentido contrário ao do movimento inicial, com velocidade de 5 km/h.

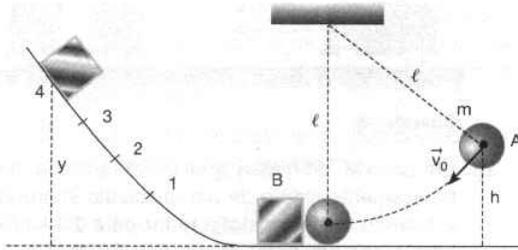
17. Um objeto que se move com a velocidade de 10 m/s explode, partindo-se em dois fragmentos de igual massa e que se movem perpendicularmente entre si. Um dos fragmentos move-se com a velocidade de 12 m/s. Qual a velocidade do outro fragmento?

- a) 2 m/s
- b) 22 m/s
- c) 16 m/s
- d) 6,5 m/s
- e) Nenhum dos valores acima.

18. Uma granada é lançada obliquamente com uma velocidade v_0 e sua velocidade vale $v = 10$ m/s, para a direita, quando ela atinge o ponto mais alto da trajetória. Neste momento, a granada explode em dois fragmentos de mesma massa. Verifica-se que um dos fragmentos cai verticalmente sem velocidade inicial. A velocidade do segundo fragmento, logo após a explosão, deve ser:

- a) Igual a 20 m/s, horizontal, para a direita.
- b) Igual a 10 m/s, horizontal, para a direita.
- c) Igual a 20 m/s, vertical, para cima.
- d) Igual a 20 m/s, vertical, para baixo.
- e) Igual à velocidade do primeiro fragmento.

As questões de 19 a 23 referem-se ao enunciado e à figura que se seguem:



Uma esfera A de massa m , amarrada na extremidade de um cordão de comprimento l , é lançada de uma altura h , com velocidade inicial v_0 (veja figura). A esfera vai colidir elasticamente com o bloco B, também de massa m . Despreze os atritos e considere o plano horizontal, onde B inicialmente se apóia, como o nível zero de energia potencial.

19. A energia cinética da esfera A, imediatamente antes de colidir com o bloco B, é:

- $\frac{mv_0^2}{2}$
- $mg l$
- $\frac{1}{2}mv_0^2 + mg l$
- $mg h$
- $\frac{mv_0^2}{2} + mg h$

20. A energia cinética E_A da esfera e a E_B do bloco, imediatamente após a colisão, são respectivamente:

- $E_A = \text{zero}$ e $E_B = mg h$
- $E_A = \text{zero}$ e $E_B = \frac{mv_0^2}{2} + mg h$
- $E_A = E_B = \frac{mv_0^2}{4} + \frac{mg h}{2}$
- $E_A = \text{zero}$ e $E_B = mg l$
- $E_A = E_B = \frac{mv_0^2}{4} + \frac{mg l}{2}$

21. Durante a colisão, os módulos das forças de interação, F_A , que A exerce sobre B e F_B , que o bloco B exerce sobre a esfera A, guardam entre si a seguinte relação:

- $F_A \neq 0$ e $F_B = 0$
- $F_A > F_B$ e ambas diferentes de zero.
- $F_A = F_B = 0$
- $F_A = F_B$ e ambas diferentes de zero.
- $F_B \neq 0$ e $F_A = 0$

22. A velocidade do bloco B, imediatamente após o choque, é:

- $\sqrt{2gl}$
- $\sqrt{v_0^2 + 2gl}$
- v_0
- $\sqrt{v_0^2 + 2gh}$
- $\sqrt{2gh}$

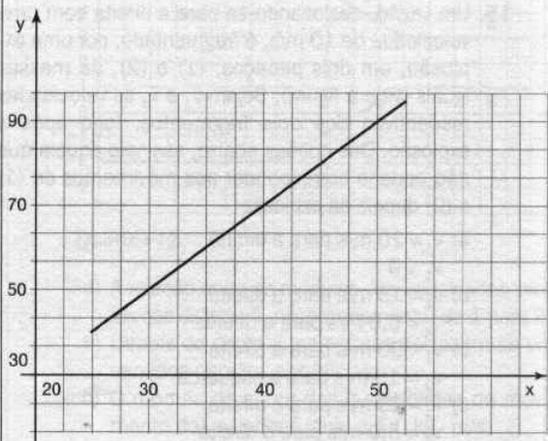
23. Depois do choque, o bloco B atingirá sobre a rampa uma altura y , tal que:

- $y = l$
- $y = h$
- $y = h + \frac{v_0^2}{2a}$
- $y = \frac{v_0^2}{2g}$
- $y = l + \frac{v_0^2}{2a}$

Capítulo 10 - Temperatura e dilatação

1. No gráfico desta questão está representada a relação entre os valores de medidas de temperaturas com dois termômetros x e y de escalas lineares diferentes. Dentre os valores seguintes, o que mais se aproxima do valor indicado por y quando x indica 42,5 é:

- 70
- 72
- 75
- 79
- 82

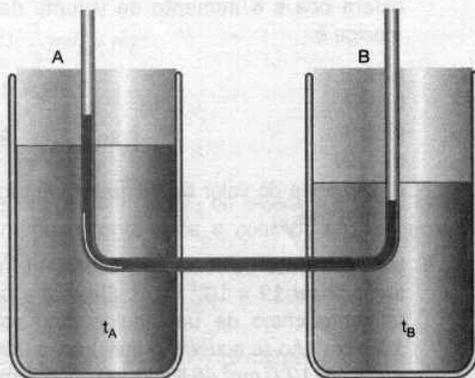


Questão 1.

11. Em relação à densidade da água, a afirmação correta é:
- No estado líquido, a 0°C, ela é máxima.
 - Enquanto a temperatura diminui de 4°C para 0°C, ela aumenta.
 - À medida que a temperatura da água diminui, sua densidade também diminui.
 - À 4°C ela é mínima.
 - À temperatura ambiente (cerca de 23°C), ela é maior do que após ser aquecida.

12. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que estão corretas:

- O coeficiente de dilatação de uma substância é uma constante característica desta substância e o seu valor é o mesmo em qualquer escala termométrica.
- Dois vasos comunicantes A e B contêm um mesmo líquido, estando submetidos, respectivamente, às temperaturas t_A °C e t_B °C. Pela figura podemos concluir que $t_A > t_B$.
- Se dois corpos estão a temperaturas diferentes, podemos dizer que possui maior calor aquele cuja temperatura for maior.



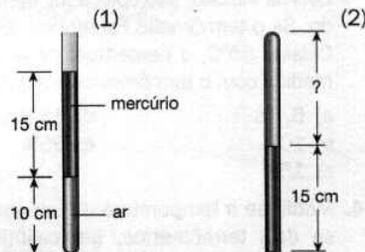
Questão 12.

Capítulo 11 - Comportamento dos gases

1. Uma certa massa gasosa é comprimida isotermicamente até que sua pressão torne-se 4 vezes maior do que o valor inicial. Se a densidade inicial do gás era de 0,2 g/L, sua densidade final será (em g/L):
- 0,8
 - 0,4
 - 0,2
 - 1,0
 - 2,0

2. Dentro de um tubo capilar de vidro, fechado em uma das extremidades, coloca-se um pouco de mercúrio, como mostra a figura desta questão. Sabe-se que a pressão atmosférica vale 75 cmHg. Invertendo-se o tubo (fig. 2), o comprimento da coluna de ar passará a ser de (suponha $t = \text{constante}$):

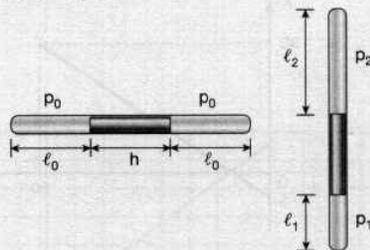
- 5 cm
- 10 cm
- 15 cm
- 20 cm
- 25 cm



Questão 2.

3. Um tubo capilar é fechado em ambas as extremidades. Ele contém ar seco nas extremidades, que são separadas por uma coluna de mercúrio de comprimento h . Quando o tubo está na horizontal, as duas colunas de ar têm o mesmo comprimento ℓ_0 . Quando o tubo está na vertical, as colunas de ar têm comprimentos ℓ_1 e ℓ_2 . As pressões nas colunas de ar são p_0 , p_1 e p_2 , como indicado na figura (d é a densidade do mercúrio). Suponha que a temperatura permaneça a mesma nas duas situações. Quais das afirmativas seguintes são corretas?

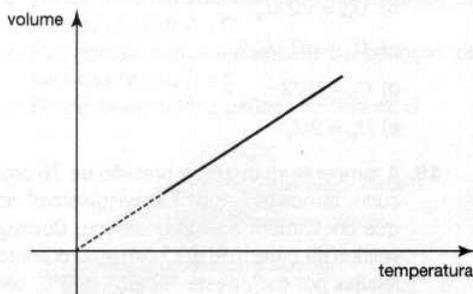
- $p_2 = p_1 - dgh$
- $p_1 \ell_1 = p_0 \ell_0$
- $p_1 \ell_1 = p_2 \ell_2$



Questão 3.

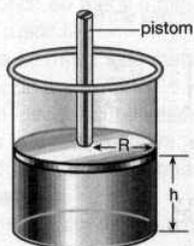
4. Assinale a que temperatura temos que elevar 400 mL de um gás a 15°C para que seu volume atinja 500 mL (suponha constante a pressão do gás):
- 25°C
 - 49°C
 - 69°C
 - 87°C
 - 110°C

5. Para uma transformação isobárica, representando a pressão em ordenadas e a temperatura em abscissas, obtemos:
- Parábola tendendo assintoticamente aos eixos.
 - Reta oblíqua em relação aos eixos.
 - Reta paralela ao eixo das ordenadas.
 - Reta paralela ao eixo das abscissas.
 - Nenhuma afirmativa acima é correta.
6. O gráfico desta questão fornece o volume de uma certa massa de gás ideal, em função da temperatura, sob pressão constante. Pela observação do gráfico você pode concluir que:
- A temperatura só pode estar expressa na escala Celsius.
 - A temperatura só pode estar expressa na escala Kelvin.
 - A temperatura só pode estar expressa na escala Fahrenheit.
 - Qualquer que fosse a escala termométrica escolhida, o gráfico seria o mesmo.
 - O gráfico não poderia ter a forma apresentada, qualquer que fosse a escala utilizada.



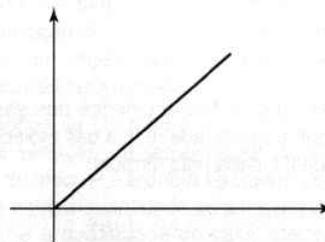
Questão 6.

7. Um cilindro, de raio interno R e contendo ar, é provido de um pistom de massa m que pode deslizar livremente. O sistema está inicialmente em equilíbrio à temperatura de 300 K e a altura h vale $9,0 \times 10^{-2}\text{ m}$. Se o ar for aquecido até atingir um novo estado de equilíbrio à temperatura de 400 K , o novo valor de h será:
- $39,5 \times 10^{-2}\text{ m}$
 - $12,0 \times 10^{-2}\text{ m}$
 - $7,00 \times 10^{-2}\text{ m}$
 - $4,00 \times 10^{-2}\text{ m}$
 - $1,58 \times 10^{-2}\text{ m}$



Questão 7.

8. O gráfico desta questão pode estar representando:
- $p \times T$ para um gás a V constante.
 - $V \times T$ para um gás a p constante.
 - $p \times V$ para um gás a T constante.
- Apenas I está correta.
 - Apenas II está correta.
 - Apenas III está correta.
 - Apenas II e III estão corretas.
 - Apenas I e II estão corretas.



Questão 8.

9. Se uma pessoa lhe disser que colocou 64 g de O_2 em um recipiente, você entenderá que neste recipiente temos:
- 1 mol de O_2 .
 - $2,0\text{ moles}$ de O_2 .
 - 2 moléculas de O_2 .
 - 6×10^{23} moléculas de O_2 .
 - $0,5\text{ mol}$ de O_2 .
10. Na questão anterior, supondo que o volume do recipiente seja $V = 10\text{ L}$, a temperatura do gás seja $T = 300\text{ K}$ e considerando $R = 0,08\text{ atm} \cdot \text{L/mol} \cdot \text{K}$, concluímos que a pressão exercida pelo O_2 é:
- $0,08\text{ atm}$
 - 8 atm
 - 10 atm
 - $4,8\text{ atm}$
 - 300 atm
11. Dispomos de $22,4\text{ L}$ de oxigênio que se acham à pressão de $2,0 \times 10^5\text{ N/m}^2$ ($R = 8,3$ unidades MKS). Podemos afirmar que:
- Sua temperatura é 273 K .
 - Sua temperatura é 546 K .
 - Sua temperatura é $(5,4 \times 10^5)\text{ K}$.
 - Sua temperatura é $(2,7 \times 10^5)\text{ K}$.
 - Não temos dados suficientes para calcular sua temperatura.
12. Um gás é aquecido a volume constante. A pressão exercida pelo gás sobre as paredes do recipiente aumenta porque:
- A massa das moléculas aumenta.
 - A perda de energia cinética das moléculas, nas colisões com a parede, aumenta.
 - O tempo de contato das moléculas com as paredes aumenta.
 - As moléculas passam a se chocar com maior frequência e exercendo maior força sobre as paredes.
 - A distância média entre as moléculas aumenta.

13. Considere dois recipientes, um deles contendo oxigênio e o outro contendo hidrogênio, ambos à mesma temperatura. Sejam E_{co} e E_{ch} as energias cinéticas médias das moléculas de oxigênio e de hidrogênio e v_o e v_H as velocidades médias dessas moléculas. É certo afirmar que:

- a) $E_{co} = E_{ch}$ e $v_o < v_H$
- b) $E_{co} = E_{ch}$ e $v_o = v_H$
- c) $E_{co} < E_{ch}$ e $v_o = v_H$
- d) $E_{co} < E_{ch}$ e $v_o < v_H$
- e) $E_{co} > E_{ch}$ e $v_o = v_H$

14. Através da teoria cinética dos gases, conclui-se que a velocidade média das moléculas de um gás ideal é dada pela fórmula:

$$v = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

onde R é a constante dos gases, T é a temperatura absoluta e M é a massa de um mol do gás. Considerando esta equação, analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que estão corretas:

- I — As velocidades médias das moléculas de gases diferentes, a uma mesma temperatura, são iguais.
- II — Se a pressão de um gás contido em um cilindro for aumentada pela redução de seu volume, a velocidade média das moléculas não se altera, qualquer que seja a maneira pela qual a compressão tenha sido efetuada.
- III — A atmosfera terrestre é pouco rica em hidrogênio porque, devido à sua pequena massa atômica, suas moléculas facilmente atingem velocidades muito altas e conseguem escapar da atração gravitacional.

15. Sendo p a pressão de um gás ideal e V o seu volume, a energia cinética total das moléculas deste gás é dada por:

- a) pV
- b) pV^2
- c) $3pV$
- d) $(3/2)pV$
- e) $(1/3)pV$

As informações seguintes referem-se às questões 16, 17 e 18. Dois balões esféricos M e N , de paredes condutoras, têm o mesmo volume e contêm o mesmo gás ideal, sendo a massa do gás em N o dobro da massa do gás em M . Ambos estão em uma mesma região, em equilíbrio térmico com o ar que os envolve.

16. Sendo T_M e T_N respectivamente as temperaturas Kelvin dos gases dos balões M e N , e T a temperatura Kelvin do ar, a afirmação correta é:

- a) $T_M = 2T_N$
- b) $T_M = T$ e $T_N = 2T$
- c) $T_M = T$ e $T_N = T/2$
- d) $T_M = T_N = T$
- e) $T_M = T_N/2$

17. Sendo P_M e P_N respectivamente as pressões dos gases dos balões M , N , e P a pressão do ar, a afirmação correta é:

- a) $P_M = 2P_N$
- b) $P_M = P$ e $P_N < P$
- c) $P_N = P$ e $P_M > P$
- d) $P_M = P_N = P$
- e) $P_M = P_N/2$

18. Sendo U_M a energia cinética total das moléculas de M e U_N a das moléculas do gás N , a afirmação correta é:

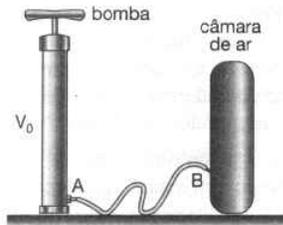
- a) $U_M = U_N$
- b) $U_M = \sqrt{2} U_N$
- c) $U_N = \sqrt{2} U_M$
- d) $U_M = U_N/2$
- e) $U_M = 2U_N$

19. À temperatura de 0°C e pressão de 76 cm de mercúrio, temos $2,7 \times 10^{19}$ moléculas/cm³ dos gases que constituem o ar atmosférico. Conseguem-se vácuos da ordem de 10^{-4} cmHg. O número de moléculas por cm³, neste "vácuo", a 0°C , será da ordem (potência de 10):

- a) 10^3
- b) 10^5
- c) 10
- d) 10^4
- e) Um valor diferente dos anteriores.

20. Na figura temos uma bomba de bicicleta, com que se pretende encher uma câmara de ar de volume V . A e B são válvulas que impedem a passagem do ar em sentido inverso. A operação se faz isotermicamente e o volume da bomba descomprimida (à pressão atmosférica P_0) é V_0 . Inicialmente a câmara está completamente vazia. Após N compressões da bomba, a pressão na câmara será:

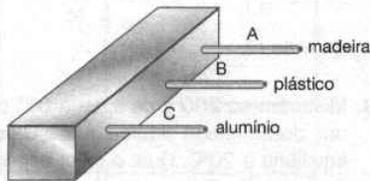
- a) $P_0 \left(1 + N \frac{V}{V_0}\right)$
- b) NP_0
- c) $\frac{NP_0 V}{V_0}$
- d) $\frac{NP_0 V_0}{V}$
- e) $\frac{NP_0 (V + V_0)}{V_0}$



Questão 20.

Capítulo 12 - Primeira lei da Termodinâmica

- Num recipiente, como o mostrado na figura desta questão, são colocadas três barras de materiais diferentes: madeira, plástico e alumínio. Na extremidade de cada barra coloca-se um pedaço de cera. Enchendo-se o recipiente com água fervendo, podemos afirmar:
 - Os três pedaços de cera fundem-se simultaneamente.
 - Funde-se primeiro o pedaço de cera da haste C.
 - Fundem-se simultaneamente os pedaços de cera das hastes A e C.
 - Fundem-se simultaneamente os pedaços de cera das hastes B e C.
 - Funde-se primeiro o pedaço de cera de B.



Questão 1.

- A radiação é o principal processo de transferência de energia no caso:
 - Da chama no fogão para a panela.
 - Do Sol para um satélite de Júpiter.
 - Do ferro de soldar para a solda.
 - Da água para um cubo de gelo flutuando nela.
 - De um mamífero para o meio ambiente.
- Em uma sala de temperatura homogênea, toca-se numa peça de metal e numa peça de madeira; nota-se que o metal parece mais frio que a madeira. Esta diferença de sensação dá-se porque:
 - O calor específico do metal é maior que o calor específico da madeira.
 - A temperatura do metal está mais baixa do que a temperatura da madeira.
 - O coeficiente de condutibilidade térmica do metal é maior que o da madeira.
 - O metal conduz o calor por condução e a madeira por radiação.
 - A madeira é menos densa que o metal.

- Em relação à transmissão de calor, a afirmação errada é:
 - Nos sólidos o calor propaga-se principalmente por condução.
 - A energia térmica pode ser transmitida através do vácuo apenas por meio de radiação.
 - Só haverá transferência de calor de um ponto para outro quando houver diferença de temperatura entre os dois pontos.
 - Na convecção não há transferência de matéria fria ou quente de um ponto a outro.
 - A sensação de quente ou frio que sentimos ao tocar um objeto está relacionada com sua condutibilidade térmica.

- Dois blocos de chumbo P e Q sofrem ambos a mesma variação de temperatura $\Delta t = 50^\circ\text{C}$. A massa do bloco P é o dobro da massa do bloco Q. A razão entre a quantidade de calor absorvida pelo bloco P e a quantidade de calor absorvida pelo bloco Q neste processo é:
 - 4
 - 2
 - 1
 - 1/2
 - Impossível de ser obtida com os dados fornecidos.

- 2,1 kJ de calor foram fornecidos a 0,10 kg de água, cujo calor específico é $4,2 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$. A variação de temperatura sofrida pela água vale:

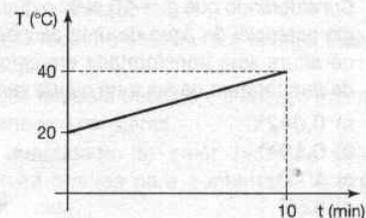
a) 0,50 K	d) 10 K
b) 2,0 K	e) 20 K
c) 5,0 K	

- Um ebulidor elétrico aquece 500 g de água de 30°C a 50°C , em 100 s. A potência média do ebulidor é:

a) $4,18 \times 10^2 \text{ W}$	d) $1,00 \times 10^4 \text{ W}$
b) $1,00 \times 10^2 \text{ W}$	e) $4,18 \times 10^2 \text{ cal/s}$
c) $0,24 \times 10^2 \text{ W}$	

- O gráfico desta questão representa a variação da temperatura de um corpo sólido, em função do tempo, ao ser aquecido por uma fonte que libera energia a uma potência constante de 150 cal/min. Como a massa do corpo é de 100 g, o seu calor específico, em $\text{cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$, será de:

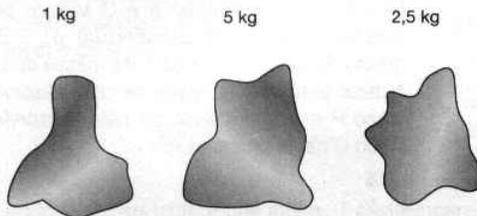
a) 0,75	d) 0,80
b) 3,75	e) 1,50
c) 7,50	



Questão 8.

9. Na figura estão representados três corpos de materiais diferentes, cujas massas estão indicadas. Ao receberem quantidades iguais de calor, estes corpos sofrem mesma variação de temperatura, isto é, possuem a mesma capacidade térmica. Massas iguais destes materiais, recebendo quantidades iguais de calor, sofrerão variações de temperatura Δt_1 , Δt_2 e Δt_3 , respectivamente, cuja relação é:

- $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3$
- $\Delta t_2 > \Delta t_3 > \Delta t_1$
- $\Delta t_1 > \Delta t_3 > \Delta t_2$
- $\Delta t_3 > \Delta t_1 > \Delta t_2$
- $\Delta t_2 > \Delta t_1 > \Delta t_3$



Questão 9.

10. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que estão corretas:

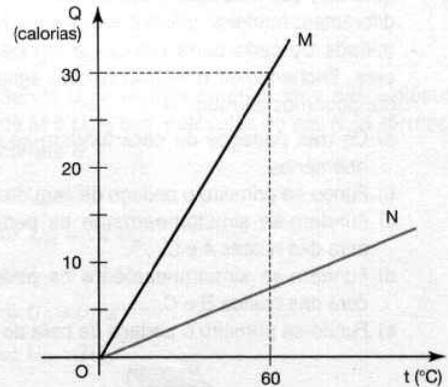
- Uma mesma quantidade ΔQ de calor, fornecida a duas esferas de mesma massa, acarretará nelas uma variação igual de temperatura, ainda que as esferas sejam constituídas de substâncias diferentes.
- Uma esfera de massa m_1 recebe uma quantidade ΔQ_1 de calor. Uma segunda esfera, de massa m_2 , feita da mesma substância da primeira, recebe uma quantidade ΔQ_2 de calor, diferente de ΔQ_1 . Podemos afirmar com certeza que a esfera que recebeu maior quantidade de calor é justamente aquela que nos parecerá mais quente.
- Duas esferas de mesma massa, feitas da mesma substância, recebem cada uma delas quantidades diferentes de calor. Parecerá mais quente justamente aquela que recebeu maior quantidade de calor.

11. Uma quantidade de calor igual a 4,2 J eleva de 1,0°C a massa de água igual a $1,0 \times 10^{-3}$ kg. Considerando que $g \approx 10 \text{ m/s}^2$ e que toda a energia potencial da água de uma cachoeira de 42 m de altura seja transformada em calor, a variação de temperatura da água na queda será de:

- 0,042°C
- 0,10°C
- 10°C
- 42°C
- 100°C

12. O gráfico desta questão mostra as quantidades de calor absorvidas, respectivamente, por dois corpos, M e N, em função das temperaturas que esses corpos adquirem. No intervalo de temperatura mostrado, podemos afirmar:

- Pelo gráfico não podemos saber qual dos dois corpos tem maior calor específico.
- As capacidades térmicas de M e N são iguais.
- O calor específico de M é 0,5 cal/K.
- O calor específico de M é o triplo do calor específico de N.
- Se depois de aquecidos a uma mesma temperatura eles forem abandonados, M se resfriará mais rapidamente do que N.



Questão 12.

13. Misturam-se 200 g de água a 0°C com 250 g de um determinado líquido a 40°C, obtendo-se o equilíbrio a 20°C. Qual o calor específico do líquido, em cal/g · °C?

(Calor específico da água: 1,0 cal/g · °C; desprezam-se trocas de calor com outros sistemas)

- 0,25
- 0,50
- 0,80
- 1,00
- 1,25

14. Um bloco de latão de 100 g de massa, inicialmente a 60°C, é introduzido em um calorímetro de capacidade térmica desprezível, que contém 200 g de água a 20°C. Sabendo-se que o calor específico do latão é 0,094 cal/g · °C, teremos:

- A temperatura da água aumentará, estabilizando-se em torno de 22°C.
- A temperatura da água diminuirá, estabilizando-se em torno de 19°C.
- A água entrará em ebulição a 98°C.
- A temperatura final da água não poderá ser determinada por falta de dados.
- Nenhuma dessas respostas é satisfatória.

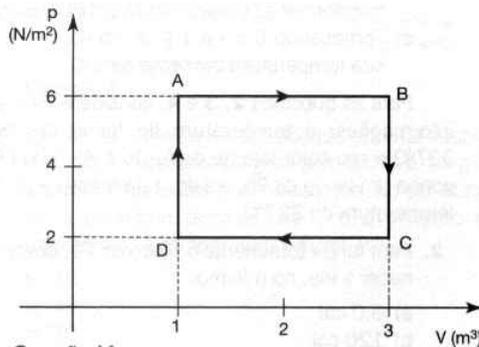
15. Um litro de água entra em ebulição a 100°C sob a pressão de 1 atmosfera. Sob esta pressão constante, a água transforma-se totalmente em vapor, passando a ocupar um volume de cerca de $1,6 \times 10^2$ L. Podemos dizer que o trabalho realizado na expansão de volume é cerca de:

- a) $1,7 \times 10^2$ J
- b) $1,6 \times 10^4$ J
- c) $1,6 \times 10^7$ J
- d) $1,6 \times 10^2$ J
- e) $2,63 \times 10^5$ J

($1 \text{ atm} = 1,03 \times 10^5 \text{ N/m}^2$)

16. Um gás perfeito descreve o ciclo ABCDA como mostra a figura. O trabalho, em joules, realizado pelo gás é:

- a) 2,0
- b) 8,0
- c) 15,0
- d) 18,0
- e) 20,0



Questão 16.

17. A variação de energia interna de um sistema de gás ideal que, ao passar do estado i para o estado f , recebe um trabalho de 150 J e absorve uma quantidade de calor de 320 J é igual a:

- a) -170 J
- b) 170 J
- c) 320 J
- d) 470 J
- e) 150 J

18. Imagine que um gás absorva uma quantidade de calor Q em uma transformação isovolumétrica. Sendo W o trabalho que ele realiza e ΔU a variação de sua energia interna, podemos afirmar que:

- a) $W = Q$ e $\Delta U = 0$
- b) $W = 0$ e $\Delta U = 0$
- c) $W = 0$ e $\Delta U = Q$
- d) $W = Q$ e $\Delta U = Q$
- e) $Q = 0$ e $\Delta U = W$

19. Marque a afirmativa falsa:

- a) Dois corpos, de materiais diferentes, podem ter a mesma capacidade térmica.
- b) Quanto maior for a capacidade térmica de um corpo, maior será a quantidade de calor necessária para elevar de 1°C a temperatura deste corpo.
- c) Se um gás absorve 100 J de calor e realiza um trabalho de 50 J, sua energia interna varia 50 J.
- d) Se o calor absorvido por um gás for igual ao trabalho realizado por ele, sua energia interna não variará.
- e) Em uma expansão adiabática, a temperatura de um gás diminui em virtude do calor que ele libera para a vizinhança.

20. Um colega lhe pergunta: É possível ceder calor a um gás e sua temperatura não sofrer variação? Você deverá responder corretamente:

- a) Sim, porque este calor pode aparecer em forma de aumento na energia interna do gás.
- b) Não, porque sempre que se cede calor a um corpo sua temperatura aumenta.
- c) Sim, porque o gás pode realizar um trabalho sobre sua vizinhança exatamente ao calor fornecido a ele.
- d) Não, porque o calor é uma forma de energia e a energia sempre se conserva.
- e) Sim, porque este calor pode ser empregado no aumento da energia cinética das moléculas do gás.

21. Forneceu-se a um sistema gasoso $5,0 \times 10^4$ calorias e o sistema expandiu-se, vencendo uma pressão externa constante de $7,0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$. Durante o processo, a energia interna do sistema não variou. Qual foi o aumento de volume do sistema?

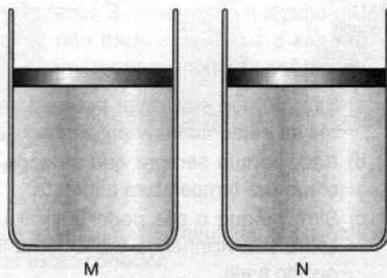
- a) $3,0 \times 10^{-1} \text{ m}^3$
- b) $3,3 \text{ m}^3$
- c) $1,5 \times 10^{11} \text{ m}^3$
- d) $7,1 \times 10^{-4} \text{ m}^3$
- e) $7,1 \times 10^{-2} \text{ m}^3$

22. Um recipiente de volume V contém um gás perfeito. Fornece-se ao gás uma certa quantidade de calor, sem variar o volume. Nestas condições, tem-se que:

- a) O gás realizará trabalho equivalente à quantidade de calor recebida.
- b) O gás realizará trabalho e a energia interna diminuirá.
- c) O gás realizará trabalho e a energia interna permanecerá constante.
- d) A quantidade de calor recebida pelo gás servirá apenas para aumentar a energia interna dele.
- e) Nenhuma das afirmações anteriores é válida.

23. Quantidades iguais de um mesmo gás são colocadas em dois cilindros, *M* e *N*. O gás no cilindro *M* recebe ΔE de calor e sofre uma transformação isobárica. O do cilindro *N* recebe também ΔE de calor e sofre uma transformação isovolumétrica. Sobre a energia interna do gás, ao final das transformações, podemos afirmar que:

- Sofreu aumento em *M*, mas permaneceu constante em *N*.
- Aumentou igualmente nos dois recipientes.
- Aumentou em ambos os recipientes, mas o aumento de *M* foi maior do que em *N*.
- Permaneceu constante em *M*, mas aumentou em *N*.
- Aumentou em ambos os recipientes, mas o aumento em *M* foi menor do que em *N*.



Questão 23.

24. Assinale a afirmativa *incorreta*:

- Numa transformação isotérmica o calor absorvido pelo sistema gasoso é igual ao trabalho que ele realizará sobre a vizinhança.
- Numa transformação isovolumétrica não há realização de trabalho.
- Numa expansão adiabática o sistema gasoso absorve calor da vizinhança.
- Numa compressão adiabática a temperatura do sistema aumenta.
- Numa expansão adiabática a energia interna do sistema diminui.

Para responder às questões **25**, **26** e **27**, relacione o enunciado de cada uma com a opção que lhe parecer mais adequada, dentre as seguintes:

- O trabalho realizado pelo sistema é igual ao módulo da variação de sua energia interna.
- A energia cinética média das moléculas do gás não varia.
- A variação da energia interna do sistema é igual ao calor absorvido por ele.
- A pressão do gás varia em proporção direta a sua temperatura absoluta.
- O enunciado da questão não se relaciona corretamente com nenhuma das alternativas anteriores.

25. Um gás ideal sofre uma transformação isobárica.

26. Um gás ideal sofre uma transformação isotérmica.

27. Um gás qualquer sofre uma transformação adiabática.

28. Um amolador de facas, ao operar um esmeril, é atingido por fagulhas incandescentes, mas não se queima. Isso acontece porque as fagulhas:

- Têm calor específico muito grande.
- Têm temperatura muito baixa.
- Têm capacidade térmica muito pequena.
- Estão em mudança de estado.
- Não transportam energia.

Capítulo 13 - Mudanças de fase

1. O calor da fusão do Pb vale 6 cal/g e sua temperatura de fusão é de 327°C. Estas informações significam que:

- Para elevar a temperatura de 1 g de Pb, de 0°C até 327°C, devemos fornecer-lhe 6 cal.
- Para fundir 6 g de Pb precisamos fornecer-lhe 327 cal.
- 1 g de Pb, a 327°C, só pode estar na fase líquida.
- 1 g de Pb sólido, a 327°C, necessita de 6 cal para transformar-se integralmente em Pb líquido.
- Fornecendo 6 cal a 1 g de Pb sólido, a 327°C, sua temperatura aumenta de 1°C.

Para as questões **2**, **3** e **4**, considere as seguintes informações: a temperatura de fusão do Pb é de 327°C e seu calor latente de fusão é de 6,0 cal/g. Suponha um bloco de Pb, sólido, cuja massa é de 20 g, à temperatura de 327°C.

2. Para fundir totalmente o bloco de Pb, devemos fornecer a ele, no mínimo:

- 6,0 cal
- 120 cal
- 327 cal
- 20 cal
- 100 cal

3. Supondo que tenham sido fornecidas as calorias calculadas na questão anterior, concluímos que o Pb líquido formado estará a uma temperatura de:

- 447°C
- 333°C
- 327°C
- 321°C
- 100°C

4. Se fornecermos ao bloco sólido 200 cal de calor, obteremos 20 g de Pb líquido a uma temperatura de:

- 527°C
- 333°C
- 327°C
- 321°C

e) Impossível calcular sem conhecer o calor específico do Pb.

5. Coloca-se gelo em um calorímetro, com uma resistência fornecendo energia térmica com potência constante. O gráfico desta questão representa a temperatura \times tempo do conteúdo do calorímetro. Quais das seguintes afirmativas podem ser deduzidas do gráfico?

- I — O calor específico do gelo é menor do que o da água.
- II — A temperatura inicial do gelo era menor que 0°C .
- III — O gelo não chegou a fundir totalmente.

- a) I e II
- b) I somente
- c) II e III
- d) I e III
- e) II somente



Questão 5.

6. Em um calorímetro de capacidade térmica desprezível, são colocados 10 g de gelo a 0°C e 10 g de água à temperatura T , de modo que, ao ser atingido o equilíbrio térmico, há 5,0 g de gelo no calorímetro. A temperatura T é, em $^{\circ}\text{C}$:

- a) 40
- b) 45
- c) 50
- d) 80
- e) 100

7. Colocam-se 200 g de gelo a 0°C e 200 g de água a 5°C em um recipiente termicamente isolado. Uma vez atingido o equilíbrio térmico, o recipiente contém:

- a) Gelo a 0°C .
- b) Uma mistura de gelo e água a 0°C .
- c) Uma mistura de gelo e água a 5°C .
- d) Água a $2,5^{\circ}\text{C}$.
- e) Água a 5°C .

8. Em um recipiente, de capacidade térmica desprezível, 200 g de água, a 60°C , foram misturados com 50 g de gelo a 0°C . Qual é a temperatura final de equilíbrio?

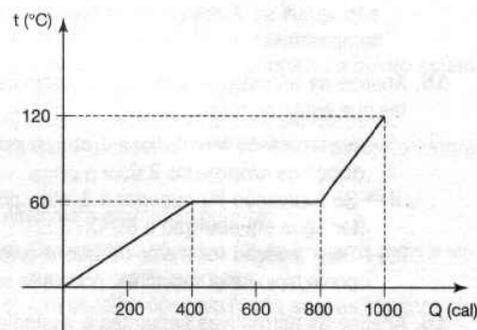
- a) 0°C
- b) 40°C
- c) 24°C
- d) 60°C
- e) 32°C

9. Um esquiador desce uma encosta de 30° com velocidade constante de 15 m/s. A massa total do esquiador e seu equipamento é de 80 kg. Supondo-se que o calor latente de fusão da neve seja 360 joules por grama e todo o calor gerado pelo atrito seja gasto em fundir a neve, a quantidade de neve que se funde em um minuto sob seus esquis é de:

- a) 1,0 kg/min
- b) 13,3 g/min
- c) 20 kg/min
- d) 150 g/min
- e) NRA

10. Uma substância, inicialmente na fase líquida, recebe calor Q e sua temperatura varia de acordo com o gráfico desta questão. A temperatura de ebulição do líquido é:

- a) 120°C
- b) 60°C
- c) 400°C
- d) 800°C
- e) $1\,000^{\circ}\text{C}$



Questão 10.

11. A quantidade total de calor que o líquido da questão anterior absorveu durante a mudança de fase foi:

- a) 60 cal
- b) 120 cal
- c) 400 cal
- d) 800°C
- e) 1 000 cal

12. Sabendo-se que a massa do líquido da questão 10 era de 20 g, concluímos que seu calor latente de vaporização vale:

- a) 3 cal/g
- b) 6 cal/g
- c) 20 cal/g
- d) 40 cal/g
- e) 50 cal/g

13. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que estão *corretas*:

- I — É possível fazer a água ferver à temperatura de 80°C.
- II — O calor específico da água, no estado líquido, sob determinada pressão, é diferente de seu calor específico no estado sólido, sob a mesma pressão.
- III — Para as substâncias que, ao se fundirem, diminuem de volume, um aumento na pressão acarreta um abaixamento na temperatura de fusão.

14. É correto afirmar que:

- a) Em qualquer mudança de fase, a substância absorve calor da vizinhança.
- b) Um aumento de pressão acarreta um aumento na temperatura de fusão de qualquer substância.
- c) O calor específico de uma substância não varia se a substância passar do estado sólido para o estado líquido.
- d) A temperatura de ebulição da água, em um recipiente aberto, é tanto menor quanto maior for a altitude do lugar em que se realiza a experiência.
- e) A velocidade média das moléculas de H_2 e O_2 são iguais se estes gases estiverem à mesma temperatura.

15. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que estão *corretas*:

- I — Se a pressão for inferior a 1 atm, o gelo pode fundir-se próximo de 2°C.
- II — Se a pressão for superior a 1 atm, podemos ter água em ebulição a 80°C.
- III — Se a pressão for maior do que a pressão do ponto triplo, uma substância poderá se sublimar.

16. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que estão *corretas*:

- I — Em uma panela de pressão, ao se cozinhar feijão, a água atinge temperatura superior a 100°C sem entrar em ebulição, pois a pressão da panela é superior a 1 atm.
- II — Todos os líquidos aumentam de volume ao se solidificarem e a prova disto é que uma garrafa bem tampada, e cheia de água, estoura quando deixada no congelador de uma geladeira.
- III — Quando bocejamos em uma manhã fria, o gás que sai de nossa boca aparece esbranquiçado porque ele contém vapor de água que se condensa em contato com a atmosfera fria.

17. Para cozer um determinado alimento, devemos mergulhá-lo em certa quantidade de água pura e submetê-lo por algum tempo à temperatura de 120°C. Que providência devemos tomar para cozê-lo?

- a) Tomar uma panela comum, submetê-la ao fogo, esperando que a água atinja a temperatura de 120°C e, após o tempo necessário, cozer o alimento.
- b) Colocar o alimento dentro de uma panela hermeticamente fechada, diminuir a pressão suficientemente no seu interior, levando-a ao fogo, esperando que a água atinja a temperatura de 120°C e que, após o tempo necessário, o alimento esteja cozido.
- c) Não conseguiríamos nunca cozer este alimento na água, uma vez que seu ponto de ebulição é de 100°C.
- d) Adicionar uma determinada substância à água, elevando assim o seu ponto de ebulição; este é o único procedimento possível para conseguirmos que a água atinja a temperatura de 120°C e, portanto, o alimento esteja cozido.
- e) Colocar o alimento dentro de uma panela hermeticamente fechada, aumentar a pressão suficientemente no seu interior, levando-a ao fogo, esperando que a água atinja a temperatura de 120°C e que, após o tempo necessário, o alimento esteja cozido.

18. Considere os três fenômenos seguintes:

- I — Água de um lago congelando.
- II — Vapor de água condensando no pára-brisa de um automóvel.
- III — Uma bolinha de naftalina sublimando na gaveta de um guarda-roupa.

Assinale a opção que indica corretamente se cada um dos sistemas — água, vapor, naftalina — está cedendo ou recebendo calor do meio ambiente:

	Água	Vapor de água	Naftalina
a)	Cede	Cede	Cede
b)	Cede	Recebe	Recebe
c)	Recebe	Cede	Cede
d)	Cede	Cede	Recebe
e)	Recebe	Recebe	Recebe

19. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que estão *corretas*:

A temperatura crítica do Hg é 1 630°C. Assim:

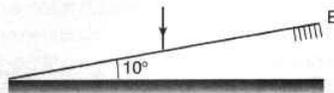
- I — A uma temperatura maior que 1 630°C, teremos sempre Hg gasoso.
- II — A uma temperatura menor que 1 630°C, podemos ter Hg líquido.
- III — A uma temperatura menor que 1 630°C, podemos ter Hg gasoso.

20. Considere as seguintes afirmações:

1º) A tabela seguinte fornece a temperatura t , na qual a água entra em ebulição, em função da pressão p , que é exercida sobre ela.

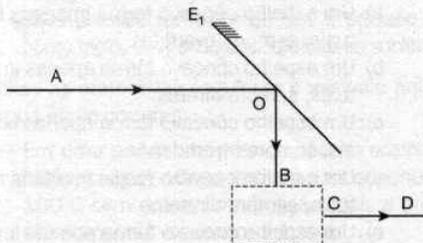
p (cmHg)	150	76	72	67	64	60	56
t (°C)	120	100	98	97	95	93	92

8. Um raio de luz incide verticalmente sobre um espelho plano inclinado de 10° em relação a um plano horizontal (veja a figura desta questão). Pode-se afirmar que:
- O raio refletido também é vertical.
 - O raio refletido forma um ângulo de 5° com o raio incidente.
 - O raio refletido forma um ângulo de 10° com o raio incidente.
 - O ângulo entre o raio refletido e o incidente é de 20° .
 - O ângulo de incidência e o ângulo de reflexão são ambos iguais a 5° .



Questão 8.

9. Um estreito feixe de luz, AO , incide em um espelho plano, E_1 , de forma que o feixe refletido, OB , seja perpendicular a AO , como mostra a figura desta questão. Um outro espelho plano, E_2 , deve ser colocado dentro do retângulo pontilhado de forma que o feixe OB seja refletido na direção CD , paralela a AO . O espelho E_2 deve, então, ser colocado:
- Paralelamente a AO .
 - Perpendicularmente a AO .
 - Perpendicularmente a E_1 .
 - Paralelamente a E_1 .
 - Formando um ângulo de 45° com E_1 .

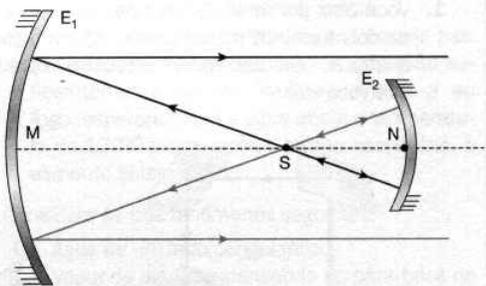


Questão 9.

10. Uma menina, vestindo uma blusa na qual o seu nome estava escrito, colocou-se diante de um espelho plano vertical. Assinale a opção que pode representar a imagem que ela viu de seu nome.
- QVNIÉJV
 - AJEIAD
 - ALEINAD
 - DVNIÉJV
 - AGEIAD

11. Em um farol de automóvel costuma-se usar além do espelho principal E_1 , um outro pequeno espelho esférico E_2 (veja a figura desta questão). Este espelho auxiliar deve ser colocado de tal forma que os raios luminosos que partem da fonte S e nele incidem sejam refletidos sobre si mesmos, para que o máximo de luz desta fonte se transforme em luz paralela, ao emergir do farol. Sabendo-se que E_1 tem $16,0$ cm de raio e o raio de E_2 é igual a $2,0$ cm, as distâncias SM e SN , mostradas na figura, devem valer, respectivamente:

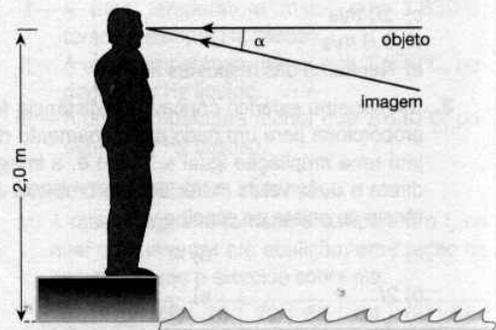
- $8,0$ cm e $1,0$ cm
- $16,0$ cm e $2,0$ cm
- $16,0$ cm e $1,0$ cm
- $8,0$ cm e $4,0$ cm
- $8,0$ cm e $2,0$ cm



Questão 11.

12. Um esportista, próximo à borda de uma piscina, com os olhos a $2,0$ m acima do nível da água, observa simultaneamente um objeto e a imagem deste refletida na água, como mostra a figura desta questão. Sabendo-se que $\sin \alpha = 0,45$ e $\cos \alpha = 0,90$, pode-se concluir que a distância do objeto ao esportista vale:

- $8,0$ m
- $3,6$ m
- $4,0$ m
- $2,0$ m
- $9,0$ m

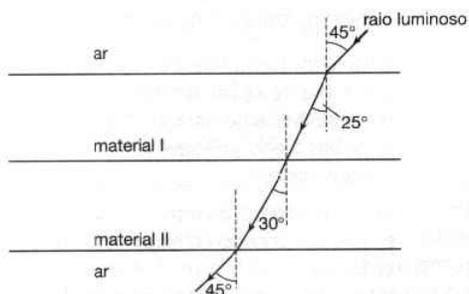


Questão 12.

Capítulo 15 - Refração da luz

As questões 1 e 2 relacionam-se com as informações fornecidas na figura.

- O índice de refração do material I é:
 - Menor que o do ar e menor que o do material II.
 - Maior que o do ar e menor que o do material II.
 - Maior que o do ar e maior que o do material II.
 - Menor que o do ar e maior que o do material II.
 - É o mesmo que o do ar e o do material II.



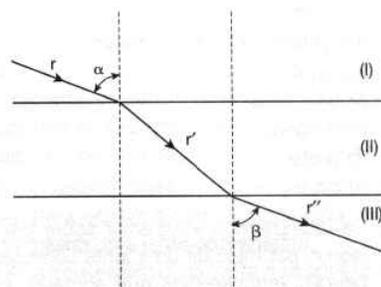
Questões 1 e 2.

- A velocidade da luz do material I é:
 - Menor que no ar e menor que no material II.
 - Maior que no ar e menor que no material II.
 - Maior que no ar e maior que no material II.
 - Menor que no ar e maior que no material II.
 - É a mesma no ar e no material II.
- Um raio de luz propaga-se em um líquido cujo índice de refração é 1,4 e atinge a superfície de separação entre este líquido e o ar. O seno do ângulo de incidência do raio luminoso é 0,80. A partir dos dados acima pode-se afirmar:
 - O raio será totalmente absorvido pelo líquido.
 - O seno do ângulo de refração do raio emergente no ar será menor que 0,80.
 - O raio será totalmente refletido na superfície de separação.
 - O raio será decomposto ao passar para o ar.
 - É impossível prever o comportamento do raio luminoso, por insuficiência de dados.
- É dada a seguinte tabela, de índices de refração absolutos de diversas substâncias:

Substância	Índice de refração absoluto
Vidro	1,5 a 1,9
Quartzo fundido	1,46
Quartzo cristalino	1,54
Diamante	2,42
Glicerina	1,47
Álcool etílico	1,36
Ácido oléico	1,45
Água	1,33

É possível, de acordo com a trajetória dos raios luminosos r , r' e r'' acima ($\alpha > \beta$), que os meios I, II e III sejam, respectivamente:

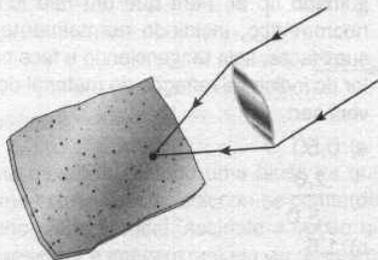
- Água, glicerina e ácido oléico.
- Vidro, água e quartzo.
- Diamante, água e quartzo.
- Vidro, água e álcool etílico.
- Glicerina, diamante e ácido oléico.



Questão 4.

- Um pedaço de vidro cujo índice de refração é igual a 1,6 é colocado em um recipiente que contém bissulfeto de carbono (líquido transparente, de índice de refração também igual a 1,6), totalmente mergulhado no líquido. Verifica-se que o pedaço de vidro torna-se praticamente invisível. Isto ocorre porque:
 - O bissulfeto absorve praticamente toda a luz que iria incidir no vidro.
 - O vidro passa a refletir fortemente a luz que nele incide.
 - A luz refrata-se muito ao passar do bissulfeto para o vidro.
 - A luz que incide no vidro praticamente não sofre reflexão nem refração.
 - Ocorre reflexão total da luz que incide no vidro.
- Considere um prisma de ângulo igual a 30° , mergulhado no ar. Para que um raio luminoso monocromático, incidindo normalmente a uma de suas faces, saia tangenciando a face oposta, o valor do índice de refração do material do prisma deverá ser:
 - 0,50
 - $\frac{2,0}{\sqrt{3,0}}$
 - 1,5
 - 2,0
 - Nenhum dos valores anteriores.
- Um pedaço de tecido vermelho tem essa cor devido, principalmente, à:
 - Reflexão da luz vermelha.
 - Refração da luz vermelha.
 - Absorção da luz vermelha.
 - Transmissão da luz vermelha.
 - Difração da luz vermelha.

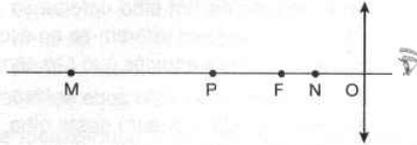
8. O vestido azul de uma moça, em uma boate iluminada com luz vermelha, é visto:
- branco
 - amarelo
 - azul
 - vermelho
 - preto
9. Um feixe de luz branca passa através de um filtro vermelho e incide sobre uma superfície verde. A superfície deve apresentar cor:
- verde
 - vermelha
 - amarela
 - preta
 - azul
10. Se focalizarmos a luz solar sobre um pedaço de isopor, por meio de uma lente convergente (veja a figura), verificaremos que somente após alguns minutos conseguiremos fundir um pequeno volume da substância. No entanto, se fizermos no isopor uma pequena mancha de tinta preta e nela focalizarmos a luz, a fusão ocorrerá quase instantaneamente. Dessa observação podemos concluir:
- A tinta modifica profundamente as propriedades químicas do isopor, baixando seu ponto de fusão.
 - A lente absorve parte da luz solar e a tinta torna o isopor sensível aos raios emergentes da lente.
 - A função da tinta é apenas de preencher os pequenos poros existentes no isopor, transformando uma pequena região dele em sólido.
 - A fusão ocorre rapidamente na região da mancha de tinta porque, sendo esta preta, há aí uma grande absorção de energia luminosa.
 - A mancha de tinta permite que o isopor absorva apenas os raios luminosos de maior energia, o que provoca a fusão.



Questão 10.

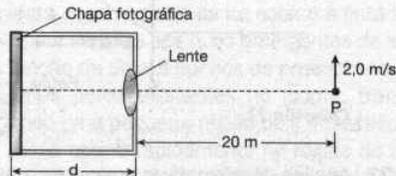
11. Uma colher de plástico transparente, cheia de água, pode funcionar como:
- lente convergente
 - lente divergente
 - espelho côncavo
 - microscópio composto
 - prisma
12. Qual dos fatos descritos abaixo *não* pode ser explicado pelo fenômeno da refração:
- Um menino vai adoçar sua limonada. Ao colocar a colher no copo, tem a impressão de que ela entortou.
 - A Lua não possui luz própria. Ela brilha devido à luz do Sol.
 - Temos a impressão de que as estrelas piscam.
 - Ao olharmos num lago, os objetos do fundo parecem estar mais próximos da superfície.
 - Um menino, usando uma lente, consegue acender um fósforo, focalizando a luz solar sobre ele.
13. Uma lente bicôncava de vidro de índice de refração 1,5 é colocada em um meio líquido transparente de índice de refração 1,8. Um objeto colocado sobre o eixo principal tem uma imagem direta. O objeto está:
- Entre o foco e a lente.
 - Entre o foco e o infinito.
 - No foco.
 - A uma distância $2f$ da lente.
 - Nenhuma das respostas acima é correta.
14. Um feixe de luz monocromático incide sobre uma lente biconvexa. Então:
- Estes raios sempre convergirão, não importando o meio em que a lente está imersa.
 - Estes raios sempre divergirão, não importando o meio em que a lente está imersa.
 - Haverá casos de convergência, dependendo do meio em que a lente está imersa.
 - A luz não sofrerá desvio se a lente for delgada, pois pode-se desprezar a refração em tais casos.
 - A sua convergência ou divergência dependerá exclusivamente dos valores dos raios de curvatura.
15. Você mantém uma lente plano-convexa, feita de vidro de $n = 3/2$, a 20 cm do fundo de uma piscina, com sua face plana na horizontal. A piscina está inicialmente vazia e o Sol está no zênite. A lente concentra os raios solares no fundo da piscina. Após encher a piscina com água ($n = 4/3$), a lente fica totalmente submersa e os raios solares (o Sol ainda no zênite), após atravessarem a lente, terão seu ponto de convergência em um ponto A. Podemos afirmar, exceto:
- O ponto A estará acima do fundo da piscina.
 - A distância focal da lente varia conforme o meio no qual ela estiver mergulhada.
 - A distância focal da lente no ar é 20 cm.
 - Se a piscina fosse cheia com um líquido de índice de refração igual a $3/2$, a distância focal da lente passaria a ser infinita.
 - Uma das afirmações anteriores está errada.

24. A lupa ou microscópio simples é uma lente convergente de pequena distância focal. Para conseguirmos ver a imagem aumentada de um objeto, este deve ser colocado (veja a figura):
- em um ponto M muito afastado do foco F da lente.
 - em um ponto P não muito afastado do foco F da lente.
 - em um ponto N situado entre o centro da lente O e o seu foco F .
 - sobre o foco F da lente.
 - em qualquer ponto à esquerda da lente.



Questão 24.

25. Uma máquina fotográfica é constituída por uma lente de distância focal 10 cm e uma chapa fotográfica, como mostra a figura desta questão. Um objeto P está à distância de 20 m da lente. Para que se obtenha uma imagem nítida do objeto, a distância d deve ser aproximadamente de:
- 20 cm
 - 5 cm
 - 15 cm
 - 25 cm
 - 10 cm



Questão 25.

26. O olho humano não consegue distinguir dois traços separados por uma distância menor que 0,1 mm. Se o objeto P da questão anterior desloca-se com uma velocidade de 2,0 m/s perpendicularmente ao eixo da máquina, para que a fotografia não pareça "borrada", o tempo máximo de exposição deve ser de aproximadamente:
- 0,05 s
 - 0,5 s
 - 0,01 s
 - 1,0 s
 - 0,1 s

Capítulo 16 - Movimento ondulatório

1. Um corpo, de massa $m = 2,0$ kg, oscila sobre uma mesa horizontal lisa, preso a uma mola também horizontal, cuja constante elástica vale $k = 2,0 \times 10^2$ N/m. A amplitude da oscilação vale $A = 10$ cm. Marque a afirmativa *falsa*:
- A energia mecânica total do corpo vale 1,0 J.
 - A velocidade máxima do corpo vale 1,0 m/s.

- A aceleração máxima do corpo vale $5,0$ m/s².
 - O período do corpo é igual ao de um pêndulo simples de 9,8 cm de comprimento.
 - A energia cinética máxima do corpo vale 1,0 J.
2. Um corpo executa MHS (sem atrito). A energia mecânica total do oscilador:
- É máxima em $X = 0$.
 - É mínima em $X = A$.
 - Permanece constante.
 - É nula em $X = 0$.
 - É máxima onde a velocidade é máxima.

3. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que são *corretas*:

Um corpo oscila com movimento harmônico simples de certa amplitude.

- O período de oscilação independe da amplitude.
- A aceleração máxima é proporcional ao quadrado da amplitude.
- A energia potencial máxima é proporcional à amplitude.

4. Dispõe-se de uma mola de massa desprezível, de 1,00 m de comprimento, e de um corpo cuja massa é igual a 2,00 kg. A mola está apoiada horizontalmente, sobre uma mesa, tendo um extremo fixo e outro preso à massa, podendo esta deslizar, sem atrito, sobre a mesa. Puxa-se a massa de modo que a mola tenha 1,20 m de comprimento e verifica-se que, para mantê-la em equilíbrio nessa situação, é preciso aplicar uma força de 1,60 N. Algum tempo depois, solta-se a massa, que passa a executar um movimento oscilatório. Com estes dados, pode-se afirmar que:

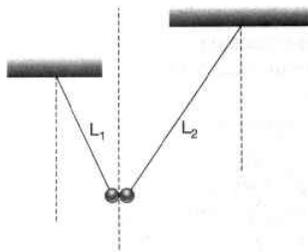
- A energia potencial máxima da mola é 0,32 J.
- A energia cinética máxima do sistema é 2,16 J.
- Não é possível calcular a energia armazenada na mola, pois não se sabe quanto tempo ela ficou distendida.
- A massa executa, depois que passa a oscilar, um movimento harmônico simples de período $T \cong 3,1$ s.
- A energia cinética da massa é 0,16 J quando, em oscilação, a massa estiver a uma distância de 0,80 m do extremo fixo.

5. Para que o período de um pêndulo simples aumente de um fator 2, o comprimento desse pêndulo deve aumentar de um fator:

- $\sqrt{2}$
- 2π
- 2
- 4
- 6

6. Dois pêndulos, de comprimento L_1 e L_2 , conforme a figura, oscilam de tal modo que os dois bulbos encontram-se sempre que são decorridos 6 períodos do pêndulo menor e 4 períodos do pêndulo maior. A relação L_2/L_1 deve ser:

- 9/4
- 3/2
- 2
- 4/9
- 2/3



Questão 6.

7. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que são corretas:

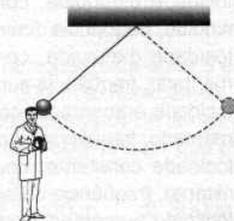
- I — Se a Terra fosse perfeitamente esférica, o valor da aceleração da gravidade não variaria de um ponto para outro da superfície da Terra.
- II — O período de um pêndulo simples é tanto maior quanto maior for a massa do corpo suspenso em sua extremidade.
- III — O período de um corpo em vibração na ponta de uma mola vertical não se alterará se o conjunto for transportado para a Lua.

8. Um pêndulo simples tem período de 2,00 s e 1,00 m de comprimento. A aceleração da gravidade local é, em m/s^2 :

- a) 9,36
- b) 9,80
- c) 9,81
- d) 9,86
- e) 10,0

9. Para motivar os alunos a acreditarem nas leis da Física, um professor costumava fazer a seguinte experiência (veja figura): Um pêndulo de massa razoável (1 kg ou mais) era preso no teto da sala. Trazendo o pêndulo para junto de sua cabeça, ele o abandonava em seguida, permanecendo imóvel, sem temor de ser atingido violentamente na volta da massa. Ao fazer isso, ele demonstrava confiança na seguinte lei física:

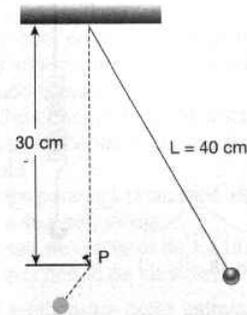
- a) Conservação da quantidade de movimento.
- b) Independência do período de oscilação em relação à amplitude.
- c) Conservação da energia.
- d) Independência do período do pêndulo em relação à massa.
- e) Segunda lei de Newton.



Questão 9.

10. Na figura desta questão está representado um pêndulo simples, de período igual a T . Colocando-se um prego P na posição indicada, o pêndulo, na máxima elongação para a esquerda, fica com a configuração indicada pela linha pontilhada, voltando, depois, à sua configuração inicial. Qual é o período de oscilação desse sistema?

- a) $4T/3$
- b) $3T/2$
- c) $3T/4$
- d) $2T/3$
- e) $2T$



Questão 10.

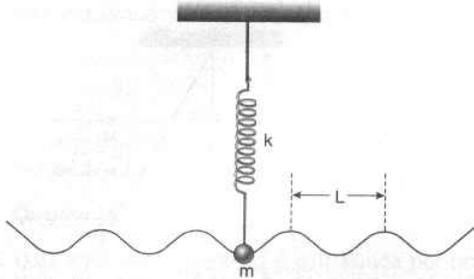
11. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que estão corretas:

- I — Se duas barras quaisquer são feitas do mesmo material e submetidas à mesma elevação de temperatura, ambas sofrerão dilatações iguais.
- II — Um relógio de pêndulo, que foi regulado no inverno, tende a se adiantar quando chega o verão.
- III — A densidade da água é máxima a $4^\circ C$.

12. Duas pessoas estão nas margens opostas de um lago de águas tranqüilas. Para comunicar-se com a outra, uma delas coloca um bilhete dentro de uma garrafa que, depois de arrolhada, é abandonada na água, sem velocidade inicial. A seguir, a pessoa aciona a água periodicamente, produzindo ondas que se propagam. Desta maneira, pensa, à medida que os pulsos atingirem a garrafa, ela será transportada para a outra margem. Em relação a este fato, podemos afirmar:

- a) Se a pessoa provocar ondas de grandes amplitudes, a garrafa será transportada mais depressa.
- b) O tempo do transporte dependerá do peso da garrafa.
- c) Quanto maior for o comprimento de onda, mais depressa se fará o transporte da garrafa.
- d) A garrafa não vai ser transportada, porque o que se propaga é a perturbação e não o meio.
- e) Qualquer que seja a frequência da onda, o tempo que a garrafa gasta para atingir a outra margem será o mesmo.

13. Uma fonte de oscilações harmônicas é constituída de um corpo de massa m , suspenso a uma mola de constante elástica k e massa desprezível. Esta fonte está presa a uma corda de comprimento muito grande e massa desprezível. Quando a fonte é colocada para oscilar, observa-se sobre a corda a propagação de uma onda, como indica a figura. Seja L a distância entre duas cristas consecutivas da onda.



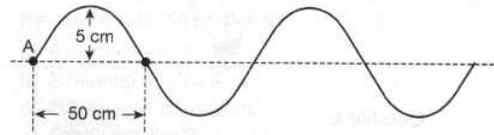
Questão 13.

A velocidade de propagação da onda é:

- a) $v = \frac{L}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$
 b) $v = 2\pi L \sqrt{\frac{m}{k}}$
 c) $v = \frac{L}{\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$
 d) $v = \frac{L}{8\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$
 e) $v = \frac{L}{4\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$
14. Uma corda de aço para piano tem 50 cm de comprimento e 5,0 g de massa. Quando submetida à força tensora de 400 N, a frequência do som fundamental emitido por essa corda é de:
- a) 100 hertz
 b) 200 hertz
 c) 250 hertz
 d) 300 hertz
 e) 400 hertz
15. Uma corda esticada produz um som de frequência fundamental 1 000 hertz. Para que a mesma corda produza um som de frequência fundamental 2 000 hertz, a tensão da corda deve ser:
- a) Quadruplicada.
 b) Dobrada.
 c) Multiplicada por $\sqrt{2}$.
 d) Reduzida à metade.
 e) Reduzida a um quarto.

16. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que estão corretas:

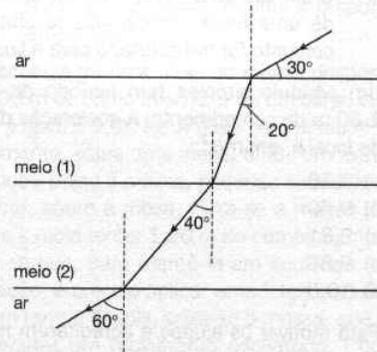
Uma onda é estabelecida numa corda, fazendo-se o ponto A oscilar com uma frequência igual a 1000 hertz (veja a figura):



Questão 16.

- I — Pela figura o comprimento de onda é de 5 cm.
 II — O período da onda é 10^{-3} s.
 III — A velocidade da onda é de 5×10^4 cm/s.

17. Um feixe estreito de luz atravessa dois meios transparentes, (1) e (2), da maneira indicada na figura. Podemos afirmar que:



Questão 17.

- a) O índice de refração do meio (1) é menor do que o do ar.
 b) O período da radiação no meio (1) é menor do que no meio (2).
 c) O comprimento de onda da luz no meio (1) é menor do que no ar e menor do que no meio (2).
 d) A frequência da luz no meio (1) é maior do que no ar e menor do que no meio (2).
 e) O produto da frequência pelo comprimento de onda tem o mesmo valor para os três meios.
18. A luz vermelha, quando passa do vidro para o ar, tem:
- a) Velocidade diminuída, comprimento de onda diminuído, frequência diminuída.
 b) Velocidade diminuída, comprimento de onda aumentado, frequência aumentada.
 c) Velocidade aumentada, comprimento de onda aumentado, frequência constante.
 d) Velocidade constante, comprimento de onda constante, frequência aumentada.
 e) Velocidade aumentada, comprimento de onda diminuído, frequência constante.

19. Sabendo-se que o índice de refração absoluto de uma certa substância, para determinada luz, é 1,50 e conhecendo-se ainda os seguintes dados:

- 1) frequência da luz: $5,00 \times 10^{14}$ hertz;
- 2) velocidade da luz no vácuo: $3,00 \times 10^5$ km/s.

Pergunta-se: Quanto vale o comprimento de onda desta luz, ao se propagar na substância?

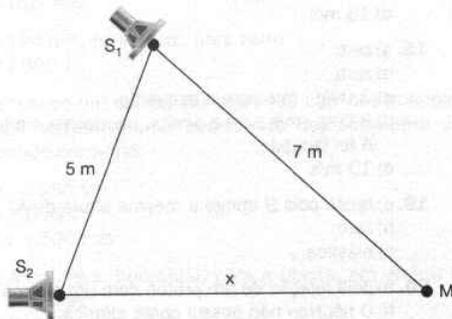
- a) $0,40 \times 10^{-3}$ mm d) $1,7 \times 10^{-3}$ mm
- b) $0,60 \times 10^{-3}$ mm e) $2,5 \times 10^{-3}$ mm
- c) $0,90 \times 10^{-3}$ mm

20. Fazendo-se passar luz monocromática através de duas pequenas fendas, distantes uma da outra cerca de 0,020 cm, observa-se uma figura de interferência num anteparo colocado a 130 cm à frente. Se a distância observada entre as franjas escuras consecutivas for de 0,32 cm, então o comprimento de onda da luz será:

- a) $4,9 \times 10^{-5}$ cm d) 0,00004923 cm
- b) $5,0 \times 10^{-5}$ cm e) $0,49 \times 10^{-6}$ cm
- c) $4,923 \times 10^{-5}$ cm

21. Dois alto-falantes, pequenos e exatamente iguais, encontram-se nos pontos S_1 e S_2 , como mostra a figura, ambos emitindo sons uniformemente em todas as direções. Estão ambos ligados a uma mesma fonte sonora, de modo que emitem os sons em fase. O comprimento de onda do som emitido é de 2,00 m. O ponto M , um ponto nodal, está a 7,00 m de S_1 e pelo menos a 7,00 m de S_2 . A menor distância que pode separar M de S_2 é:

- a) 7,00 m d) 10,0 m
- b) 8,00 m e) 12,0 m
- c) 9,00 m



Questão 21.

22. Uma onda de somar (ultra-som) é emitida com velocidade de 300 m/s. Recebem-se como resposta dois ecos com intervalos de tempo de 2s e 6s respectivamente. Pode-se dizer que os objetos refletos estão a:

- a) 600 m e 1 200 m d) 300 m e 600 m
- b) 600 m e 900 m e) 150 m e 300 m
- c) 300 m e 900 m

23. Na experiência descrita no problema anterior, a relação das intensidades dos sinais que chegam aos objetos refletos é:

- a) 9 vezes maior no mais próximo.
- b) 12 vezes maior no mais próximo.
- c) A mesma nos dois.
- d) 3 vezes menor no mais distante.
- e) 18 vezes menor no mais distante.

24. Marque a afirmativa falsa:

- a) A difração de um feixe de luz, que passa por um orifício, é tanto mais pronunciada quanto maior for a largura do orifício.
- b) Uma lente que, no ar, é convergente, pode tornar-se divergente ao ser mergulhada em um determinado líquido.
- c) Um espelho côncavo pode fornecer uma imagem virtual, aumentada, de um objeto situado à sua frente.
- d) Um som nos parecerá tanto mais agudo quanto maior for a sua frequência.
- e) Na dispersão de um feixe de luz branca, observa-se o maior desvio na luz violeta.

25. A cor da luz emitida por certa estrela nos parece mais avermelhada do que é na realidade. Este fenômeno é devido ao fato de:

- a) A estrela estar muito distante da Terra.
- b) A luz se propagar com velocidade muito grande no vácuo.
- c) A luz sofrer refração na atmosfera.
- d) A estrela estar se afastando da Terra.
- e) A estrela estar se aproximando da Terra.

26. Analise as afirmativas seguintes e assinale aquelas que estão corretas:

I — O som de uma sirene de fábrica alcança um operário 7 s após ter começado a tocar. Se a distância entre o operário e a sirene é de 49 000 comprimentos de onda do som emitido, podemos afirmar: a frequência do som é 7 000 hertz.

II — Sabendo-se que a velocidade do som na água é cerca de quatro vezes a velocidade no ar, podemos afirmar: quando o som passa do ar para a água, sua frequência fica quatro vezes maior.

III — Se um observador está parado, a frequência da buzina de um automóvel que passa por ele aumenta quando o carro se aproxima e cai quando o carro vai se afastando.

27. Com relação ao som e à luz, assinale a afirmativa errada:

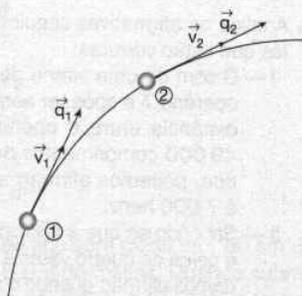
- a) O brilho do Sol, que vemos na lataria de um automóvel, é proveniente da reflexão da luz solar na superfície polida do automóvel.
- b) O eco do barulho de uma explosão provém da reflexão, em algum anteparo, das ondas sonoras provocadas pela explosão.
- c) A onda luminosa precisa de um meio material para se propagar.
- d) A onda sonora só se propaga em um meio material.
- e) O efeito Doppler ocorre com o som e também com a luz.

Respostas dos exercícios

CAPÍTULO 9 - Conservação da quantidade de movimento

Exercícios de Fixação

- $I = 20 \text{ N} \cdot \text{s}$
 - um vetor na mesma direção e sentido de \vec{F}
 - um vetor igual ao vetor \vec{I} .
- um vetor de mesma direção e sentido de \vec{v}_1
 - $q_2 = 30 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$
 - um vetor de mesma direção e sentido de \vec{v}_2
- $q_1 = 0,60 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$; $q_2 = 1,6 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$
 - $I = 1,0 \text{ N} \cdot \text{s}$
 - $F = 0,25 \text{ N}$
- Não, pois o vetor \vec{v} é constante.
 - É nulo.
 - zero
- Veja a figura.
 - Sim, pois \vec{q}_1 e \vec{q}_2 têm módulos iguais, mas suas direções são diferentes.
 - sim



Resposta do exercício 5.

- $8,0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$
 - $5,6 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$
 - $2,4 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$
- $q_a = 2,0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$
 $q_b = 2,0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$
 $q_c = 6,0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$
 - $4,0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ para a esquerda
 - $2,0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ para a direita
- interna b) externa c) externa d) interna
- \vec{F}_2 e \vec{F}_3 b) \vec{F}_1 e \vec{F}_4
- internas
 - Sim, em virtude das forças internas exercidas pelos elásticos.
 - Não, porque estão atuando apenas forças internas ao sistema.

- F_A, F_B
 - P_A, P_B, N_A, N_B
 - zero
 - não
 - sim
- $14 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$, horizontal, para a direita
 - $14 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$, horizontal, para a esquerda
 - zero
 - Sim, pois a quantidade de movimento inicial do sistema era nula.
- para a esquerda
 - para a direita
 - internas
 - Não, ambas variam.
 - sim; não
- para a esquerda
 - externa
 - não; menor
- $4,0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$
 - internas
 - $4,0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$
 - $3,0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$
 - $6,0 \text{ m/s}$
- em (1) sim; em (2) não
 - em (1) elástica; em (2) completamente inelástica
 - Sim, em ambos os casos, pois durante qualquer colisão pode-se considerar constante a quantidade de movimento do sistema.
- central e completamente inelástica
 - $104 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$
 - $104 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$
 - 13 m/s
- zero
 - zero
 - $3,0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ para a esquerda
 - $3,0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ para a direita, na mesma direção em que A foi lançado.
 - 10 m/s
- Igual, pois B atinge a mesma altura de A.
 - zero
 - elástica
- pela ligação de um próton com um elétron
 - O nêutron não possui carga elétrica.
- Com esta hipótese, seriam violadas as leis de conservação da energia e da quantidade de movimento.
 - A radiação seria constituída por nêutrons.
- momento linear do nêutron antes da colisão
 - momento linear do nêutron após a colisão
 - momento linear do próton após a colisão
- energia cinética do nêutron antes da colisão
 - energia cinética do nêutron após a colisão
 - energia cinética do próton após a colisão

24. a) Porque não conhecia a velocidade v do nêutron incidente.
b) Para eliminar a incógnita v .
25. a) v_p , v_N , m_N e m_p
b) $m = (m_p v_p - m_N v_N) / (v_N - v_p)$

Problemas e Testes

- a) $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$
- (b)
- (c)
- a) igual
b) menor
- a) O corpo possuirá energia cinética obrigatoriamente.
b) Sim, por exemplo, um corpo em repouso, preso a uma mola comprimida ou em uma certa altura acima do solo.
- a) $E_{ca} = 19,6 \text{ J}$ e $E_{cb} = 14,0 \text{ J}$
b) $33,6 \text{ J}$
- (c)
- 500 m/s
- (b), (d), (f)
- a) completamente inelástica
b) 18 km/h
- (a), (e)
- (b) é elástica, (c) é inelástica, (d) é completamente inelástica
- (e)
- a) $3,0 \text{ m/s}$; $3,0 \text{ m/s}$
b) $4,2 \text{ m/s}$
- a) $5,0 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$
b) $16,7 \text{ m/s}$
- a) 130 m/s , na vertical, para baixo
b) 1880 J
- Lançando um objeto (ou soprando o ar dos pulmões) você adquiriria uma quantidade de movimento em sentido contrário.
- a) $v = 250 \text{ V}$
b) $2,0 \text{ m/s}$
c) $v = 500 \text{ m/s}$
- a) $4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$, horizontal, para a direita, em ambos os instantes
b) É nula.
c) sim
d) não
- 50 N
- a) $4,0 \text{ kg m/s}$ e zero
b) $0,50 \text{ m/s}$
- a) Diminui.
b) Não se altera.
- $1,0 \text{ m/s}$

24. $2,2 \times 10^3 \text{ m/s}$

25. a) A energia mecânica não se conserva na colisão inelástica da bala com o bloco.
b) $X = mv\sqrt{k(m+M)}$

Problemas Suplementares

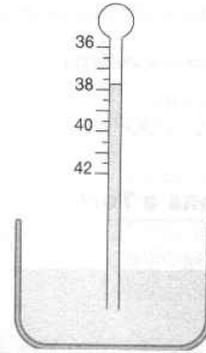
- a) sim
b) sim
- $8,0 \text{ m/s}$
- 8 balas
- 99,6%
- a) $3,6 \times 10^{-23} \text{ m/s}$
b) não
- a) 3 colisões
b) $\vec{V}_A = -\vec{v}_A$ e $V_B = 0$
- a) $I = 2,0 \text{ N} \cdot \text{s}$
b) $I = 0$
- $6,0 \text{ m/s}$
- 240 kg
- a) $1,0 \text{ m/s}$, em sentido contrário à velocidade inicial
b) não
- $v_A = 2,0 \text{ m/s}$, horizontal, para a esquerda
 $v_B = 1,0 \text{ m/s}$, horizontal, para a direita
- a) $0,10 \text{ m/s}$
b) não
- maior
- 60 cm
- $\Delta v = mv/(m+M)$
- $\Delta v = mv_0/M$
- zero e 12 m/s (no mesmo sentido da velocidade da bomba)
- $3,3 \text{ kg}$
- 120°
- $1,03 \text{ m/s}$ e $\theta = 47^\circ$
- a) $1,47 \times 10^4 \text{ N}$
b) não
- sim
- 300 m/s
- a) O peso do carro é o mesmo em ambas as situações.
b) A compressão da roda sobre o pé atua durante um tempo muito curto, exercendo um impulso pequeno nos ossos.

CAPÍTULO 10 - Temperatura e dilatação

Exercícios de Fixação

- 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. a) 310 K
b) $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$
c) 52 K
4. $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, pois os outros dois são inferiores ao zero absoluto.
5. a) 10^{-6} K
b) maior
c) sim (explosão de um fio metálico)
6. a) errado
b) correto
7. 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.
c) Porque o coeficiente de dilatação do vidro pìrex é pequeno.
8. a) $1\text{ }^{\circ}\text{C}$
b) $1\text{ }^{\circ}\text{C}$
c) $29 \times 10^{-6}\text{ cm}$
9. a) Sim, se seus coeficientes de dilatação forem diferentes (materiais diferentes).
b) Sim, se tiverem comprimentos iniciais diferentes.
10. a) 0,15 cm
b) 0,10 cm
11. a) $50 \times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
b) 12 cm^2
12. maior
13. 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 da junta.
14. a) Diminuirá.
b) Diminuirá.
15. a) sim
b) Não; representa a dilatação aparente.
c) maior
d) maior
16. a) $\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 6,9 \times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
b) Não sofrerá alteração.
c) zero
17. a) $1,5\text{ cm}^3$
b) $1,5\text{ cm}^3$
c) zero
18. a) Diminuirá.
b) Aumentará.
c) Diminuirá.
19. a) Aumentará.
b) Diminuirá.
c) Aumentará.
20. Porque ele não permite medir temperaturas.
21. Veja a figura.



Resposta do exercício 21.

22. a) Para medir temperaturas inferiores a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.
b) Para evitar a evaporação do álcool.
23. a) Não, pois os valores atribuídos àquelas temperaturas são totalmente arbitrários.
b) O fato de ela ser centígrada (centesimal).
24. A pessoa estaria com febre ($100\text{ }^{\circ}\text{F} = 37,7\text{ }^{\circ}\text{C}$).
25. Fahrenheit 451
26. $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $-40\text{ }^{\circ}\text{F}$

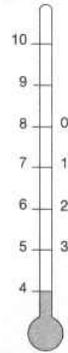
Problemas e Testes

1. a) não
b) $30\text{ }^{\circ}\text{C}$
2. O bulbo de vidro se aquece e se dilata antes do Hg.
3. Quando o gargalo é aquecido, seu diâmetro interno aumenta.
4. (d)
5. (c)
6. (d)
7. A lâmina se encurvará porque as folhas metálicas estão firmemente unidas e o Zn se dilata mais do que o aço.
8. a) maior
b) prejuízo
9. (b)
10. (e)
11. Pode ser usado para medir temperaturas compreendidas entre a temperatura de solidificação e a temperatura de ebulição do Hg.
12. $\alpha_1/\alpha_2 = 1,2$
15. a) $t_c/5 = t_r/4$
b) $t_c = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$
16. a) $200\text{ }^{\circ}\text{X}$
b) $t_c + 20$
c) $100\text{ }^{\circ}\text{X}$
17. igual
18. a) criança A b) 0,55 mm

- 19. Fahrenheit
- 20. $L = L_0(1 + \alpha\Delta t)$
- 21. 187 °C
- 22. Ao se resfriarem, os rebites exercem fortes compressões sobre as peças.

Problemas Suplementares

- 1. a) Veja a figura.
b) Tem-se duas temperaturas diferentes para a mesma altura da coluna de água.
- 2. 108 °F
- 3. -12,5 °C
- 4. a) $\Delta A_1 = \alpha A_0 \Delta t$; $\Delta A_2 = \alpha A_0 \Delta t$;
 $\Delta A_3 = \alpha^2 A_0 (\Delta t)^2$
- 5. 20 m
- 6. a) 0,20%
b) 0,40%
c) 0,60%
d) zero
- 7. $2,0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- 8. a) $t_f/5 = (100 - t_f)/4$
b) 50 °C
- 9. a) $18 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
b) $10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{F}^{-1}$
c) $18 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- 10. a) $t = 5,0 h - 10,0$ (com h em cm e t em °C)
b) 65,0°C
- 11. $\ell_A = 20,0 \text{ cm}$ e $\ell_B = 10,0 \text{ cm}$
- 12. 25 cm³
- 13. 7,5 cm
- 14. 1,2%



Resposta do problema suplementar 1.

CAPÍTULO II - Comportamento dos gases

Exercícios de Fixação

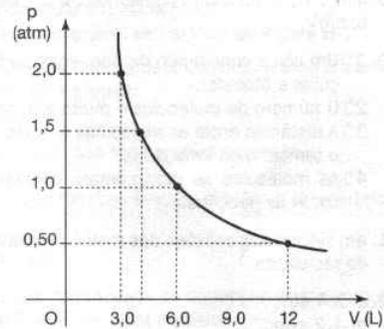
- 1. a) pressão p , volume V , massa m e temperatura T
b) Pelo menos duas das grandezas p , V , m e T variaram.
- 2. a) Aqueles que existem na natureza.
b) Gás cujo comportamento obedeceria rigorosamente às leis que são estudadas neste capítulo.
c) a pressões baixas e temperaturas altas
- 3. a) m e T
b) p e V

4. Veja a tabela abaixo:

Estado	p (atm)	V (litros)	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

Resposta do exercício 4.

- 5. a) Veja a figura.
b) isoterma de um gás ideal



Resposta do exercício 5.

- 6. 4,0 g/L; 6,0 g/L; 8,0 g/L
- 7. a) p e m
b) V e T
- 8. a) o de alumínio
b) Ambos terão o mesmo volume final.
- 9. Veja a tabela abaixo:

Estado	T (°C)	T (K)	V (cm ³)
I	-73	200	150
II	127	400	300
III	327	600	450
IV	527	800	600

Resposta do exercício 9.

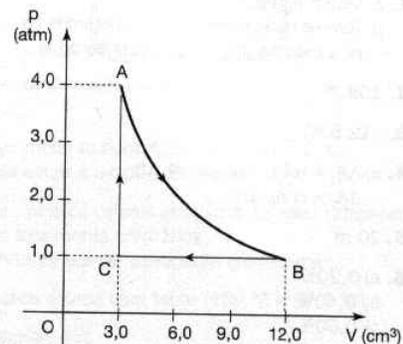
- 10. a) Reta que não passa pela origem.
b) Reta passando pela origem.
c) sim, pois $V \propto T$
- 11. 3,0 g/L; 2,0 g/L; 1,5 g/L
- 12. a) $1,0 \times 10^{24}$ em cada um
b) em A: $1,0 \times 10^{24}$; em B: $2,0 \times 10^{24}$; em C: $3,0 \times 10^{24}$
c) em A: 1,7 g; em B: 3,4 g; em C: 5,1 g

13. a) 360 g
b) $1,2 \times 10^{25}$
c) 3×10^{23} g
14. a) NH_3 , H_2O e HCl
b) $p \propto M$
c) NH_3 , H_2O e HCl
15. a) 26 atm · L
b) 13 L
16. a) 15 moles
b) $R = 8,31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$
c) 241 K
d) $-32 \text{ }^\circ\text{C}$
17. não, pois $pV \neq nRT$
18. a) $p_2V_2/T_2 = p_1V_1/T_1$
b) 6,0 L
19. a) n e V permanecem constantes; p e T variam.
b) nR/V
20. 1ª) Um gás é constituído de pequenas partículas (moléculas e átomos).
2ª) O número de moléculas é muito grande.
3ª) A distância entre as moléculas é muito maior do que o tamanho de uma delas.
4ª) As moléculas se movimentam constantemente em todas as direções.
21. em virtude das colisões das moléculas sobre as paredes do recipiente
22. a) 2,4 atm
b) 1,2 atm
c) 2,4 atm
23. a) $2,07 \times 10^{-20} \text{ J}$
b) por dois
c) zero absoluto
24. a) igual
b) menor
25. a) indivisível
b) na Grécia, no século V a.C.
26. Os átomos dos gases estão em constante movimento.
27. a) Aumenta 5 vezes.
b) Aumenta 5 vezes.
c) 5 vezes
d) sim
28. Newton supunha as moléculas em repouso.
29. a) 480 m/s
b) cerca de 37%
30. a) Joule e Maxwell (inglês), Clausius (alemão) e Boltzmann (austriaco)
b) falsa
31. 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.
32. a) O deslocamento aumenta com a temperatura; é tanto maior quanto menor for a partícula; é tanto menor quanto maior for a viscosidade do fluido.

- b) Jean Perrin (francês)
c) o número de Avogadro; 1926

Problemas e Testes

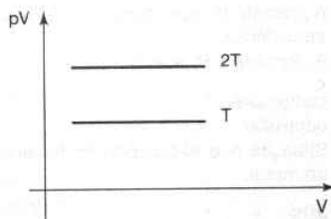
1. a) isotérmica b) 4,0 atm c) 10 cm^3
2. sim, pois $p_1V_1 \neq p_2V_2$
3. (b)
4. Veja a figura.



Resposta do problema 4.

5. a) I é isotérmica; II é isobárica; III é isovolumétrica.
b) I: $pV = \text{constante}$; II: $V/T = \text{constante}$; III: $p/T = \text{constante}$
6. (a), (d)
7. a) isovolumétrica
b) 21,4 libra/pol²
8. (c)
9. (b), (c), (f)
11. a) 6×10^{10} moléculas
b) 12 vezes maior
12. (a), (c)
13. a) reta passando pela origem
b) $(3/2)k$
14. a) $1,09 \times 10^{-21} \text{ J}$
b) $-220 \text{ }^\circ\text{C}$
c) 656 J
15. a) A \bar{E}_c é a mesma para todos eles.
b) CO_2 , O_2 , N_2 , H_2O e H_2
16. a) igual a P
b) maior do que P
17. a) não
b) $T \propto V^2$
19. a) Como as moléculas dos gases de menor massa molecular possuem maior velocidade média, a probabilidade de escaparem da ação gravitacional da Terra é maior.
b) Sim; mesmo os gases cujas moléculas têm menor velocidade (maior massa molecular) podem escapar da atração gravitacional da Lua.
20. $9,0 \times 10^4 \text{ N/m}^2$
21. 10%

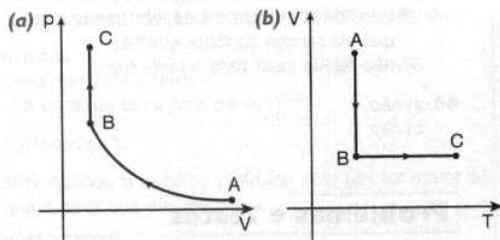
- 22. $n/3$
- 23. a) sim
b) não
c) não
- 24. a) AB é isovolumétrica; BC é isobárica.
b) 300 K
c) em um ponto M, tal que $p_M = 2,0 \text{ atm}$ e $V_M = 24,6 \text{ L}$
d) não
- 25. 4,1 atm
- 26. 6,0 cm
- 27. Os raios são iguais.
- 28. 3,0 atm
- 29. 13 g/L
- 30. Veja a figura.



Resposta do problema 30.

Problemas Suplementares

- 1. 22 g
- 2. Veja a figura.



Resposta do problema suplementar 2.

- 3. $(\rho_j/\rho_H) = 8$
- 4. $(\bar{v}_2/\bar{v}_1) = 2$
- 5. 22,2 cm
- 6. a) $3,85 \times 10^{25}$ moléculas
b) $2,4 \times 10^5 \text{ J}$
c) $2,4 \times 10^4 \text{ m}$ (= 24 km!)
- 7. 76 cm de Hg
- 8. 77 °C
- 9. a) 25 cm
b) O resultado encontrado em (a) não depende da área da seção reta do tubo.
- 10. $2,68 \times 10^{19}$ moléculas/cm³

- 11. 64,8 cm
- 12. a) recipiente H; 14 vezes
b) recipiente H; 14 vezes
c) recipiente H; 3,7 vezes
- 13. 0,74 atm
- 14. 24 cm
- 15. a) 0,66 N · s
b) $2,2 \times 10^2 \text{ N/m}^2$

CAPÍTULO 12 - Primeira lei da Termodinâmica

Exercícios de Fixação

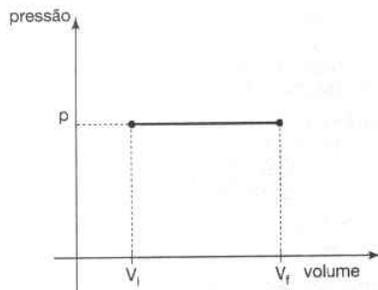
- 1. a) t_A diminuiu e t_B aumentou.
b) Havia passagem de calórico de A para B.
- 2. a) A energia interna de A diminuiu e a de B aumentou.
b) sim; de A para B
c) calor
- 3. a) Sim, pois sua temperatura aumentou.
b) não
c) O bloco recebeu energia mecânica do martelo.
- 4. a) 418 J
b) 200 cal
- 5. a) Não; 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) Porque tornam-se mais densas ao perderem calor para o congelador.
b) Não; o ar em contato com o congelador, sendo mais denso, permaneceria estacionário na região inferior da geladeira.
- 8. Tanto em (a) quanto em (b) haveria dificuldade para a formação das correntes de convecção.
- 9. a) Os corpos muito aquecidos emitem grande quantidade de radiação térmica.
b) O escuro, porque absorve mais radiação térmica solar.
- 10. a) 11 cal/°C
b) Devemos fornecer ao bloco 11 cal para cada 1 °C de elevação de sua temperatura.
- 11. a) 880 cal
b) 1 100 cal
- 12. a) 0,11 cal/g · °C
b) ferro
c) Para elevar a temperatura de 1 g de ferro, de 1 °C, devemos ceder a ele 0,11 cal.
- 13. a) igual
b) maior
c) o bloco A

14. a) maior
b) o Hg
c) a água
15. a) 930 cal
b) 10 °C
16. a) $F = 1,5 \times 10^4$ N
b) $T = 1,5 \times 10^3$ J
17. a) $V_f - V_i = 5,0 \times 10^{-3}$ m³
b) $T = 1,5 \times 10^3$ J
c) sim
18. a) positiva
b) positivo
c) pelo sistema
19. a) negativa
b) negativo
c) sobre o sistema
20. a) $T = -1,5 \times 10^3$ J
b) sobre ele
21. a) sim ($F = p \cdot A$)
b) Aumenta.
c) não
d) $T = 0$
22. a) Aumentar; positivo.
b) Diminuir; negativo.
23. a) Diminuir; positivo.
b) Aumentar; negativo.
24. a) 210 J
b) $\Delta U = -110$ J
c) A energia interna do sistema diminui, porque ele realizou um trabalho maior do que o calor absorvido.
25. igual
26. a) zero
b) $\Delta U = -170$ cal
c) Diminuiu.
27. a) sobre o gás
b) $T = -75$ J
c) $\Delta U = -25$ J
28. a) Q é praticamente nulo.
b) expansão adiabática
c) $\Delta U = -250$ J
d) Diminuiu.
e) Diminuiu.
29. a) Ambas aumentaram.
b) não (compressão adiabática)
c) O trabalho realizado sobre o gás.
30. a) $Q = 630$ J
b) $\Delta U = 0$
c) Ambas não sofreram variação.
d) transformação isotérmica
31. a) igual
b) zero
c) sim
d) sim
e) não
f) maior
32. a) $200 \cdot c \cdot (100 - 30)$
b) zero
c) 500 cal
d) 0,035 cal/g · °C
33. $t_f = 60$ °C
34. a) 150 J
b) energia interna da água
35. a) não
b) trabalho realizado sobre a água
36. 2,6 °C
37. a) Um dispositivo que transforma calor em trabalho mecânico.
b) fonte quente: fornalha
fonte fria: o ar ambiente
38. a) A, aberta e B, fechada
b) A pressão do vapor torna-se menor do que a pressão atmosférica.
c) A, fechada e B, aberta
39. a) compressão
b) admissão
c) Situação que não ocorre no funcionamento normal do motor.
40. a) 20%
b) 80 cal
41. a) 625 cal
b) 375 cal
42. $1,8 \times 10^5$ W
43. É impossível construir uma máquina térmica que, operando em ciclo:
1º) apresente rendimento igual a 100%;
2º) transforme integralmente em trabalho todo o calor que ela recebe da fonte quente;
3º) não rejeite calor para a fonte fria.
44. a) não
b) sim

Problemas e Testes

1. O frio não é uma grandeza física; um corpo se esfria porque perde calor.
2. A água quente, porque libera mais calor ao se esfriar.
3. a) 10^{24} cal $\cong 4 \times 10^{24}$ J
b) 4×10^4 anos (quarenta mil anos)
4. O calor específico da areia é pequeno.
5. a) igual
b) menor
c) não
6. a) 42×10^4 J
b) 42×10^4 J
c) 10×10^4 cal
d) 0,5 °C
7. (c)

8. a) Veja a figura.
b) $p(V_f - V_i)$
c) Trabalho realizado pelo gás.



Resposta do problema 8.

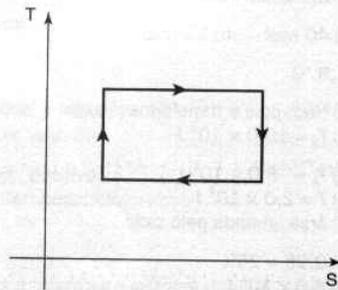
9. (a), (b), (d)
10. (c), (e)
11. (a), (c), (d)
12. a) 600 cal
b) zero
c) 600 cal
d) $0,75 \text{ cal/g} \cdot \text{K}$
13. I é errada e II é correta.
14. $100 \text{ cal/}^\circ\text{C}$
15. a) $0,22 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$
b) alumínio
16. a) Não; o termômetro alteraria sensivelmente a temperatura do corpo.
b) A capacidade térmica do termômetro deve ser desprezível em relação à capacidade térmica do corpo.
17. a) maior
b) do mar para a terra
c) a terra; da terra para o mar
18. $0,18 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$
19. Sim; quando o trabalho realizado pelo gás for maior do que o calor que ele absorve.
20. $0,66 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$
21. $0,25 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$
22. Bloco E
23. $2,4^\circ\text{C}$
24. $1 \text{ cal} = 4,3 \text{ J}$
25. a) Há bastante ar entre as partículas de madeira da serragem.
b) A serragem impede o contato direto da barra com as correntes de convecção do ar.
26. a) $U = 1,26 \times 10^4 \text{ J}$
b) 170°C
27. 930°C
28. $2,1 \times 10^3 \text{ s}$
29. $2,0 \times 10^3 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$

Apêndice C

Exercícios de Fixação

1. a) $1 \text{ kcal/s} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ b) sim
2. a) ar b) prata
3. A camada de ar entre as vidraças reduz a perda de calor por condução.
4. a) 150 cal/s
b) cerca de 6 lâmpadas (630 W)
5. a) $2,0 \text{ cm}$ b) 11 m!
6. a) 1 W/m^2 b) $1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
7. a) 340 W/m^2
b) 510 W
c) zero
d) $4,25$
e) um frio muito intenso (com risco de vida)
8. a) 16 vezes maior
b) $3,1$ vezes maior
9. a) 40 kcal b) 20 kcal
10. $1,9^\circ\text{C}$
11. a) Não, pois a transformação não é isobárica.
b) $T_f = 10,0 \times 10^4 \text{ J}$
12. a) $T_f = -8,0 \times 10^4 \text{ J}$
b) $T = 2,0 \times 10^4 \text{ J}$
c) área limitada pelo ciclo
13. a) $0,25 = 25\%$
b) $6,0 \times 10^4 \text{ J}$
14. a) Os dados não satisfazem à 1ª lei da Termodinâmica.
b) $Q_2 = 300 \text{ cal}$
15. a) 40%
b) não
c) ciclo de Carnot
16. a) 280 K
b) 450 J
c) $Q_1 = 1500 \text{ J}$ e $Q_2 = 1050 \text{ J}$
17. (d)
18. Não; o rendimento máximo é de 65% .
19. a) menor
b) 600 cal
20. Não; a geladeira rejeitou para o ambiente maior quantidade de calor do que absorveu.
21. a) sim
b) aparelho de ar-condicionado
- Problemas Suplementares**
1. $2,2 \times 10^6 \text{ J}$
2. $16,6^\circ\text{C}$
3. a) $T_{AC} = 150 \text{ J}$; $T_{ABC} = 120 \text{ J}$
b) $\Delta U_{AC} = 150 \text{ J}$
c) $Q_{ABC} = 270 \text{ J}$

4. 83% de ouro e 17% de cobre
5. 12,5 m/s
6. a) $U = (3/2) nRT$
b) $C_{Mv} = (3/2)R$
7. em II
8. $4,7 \times 10^9$ cal
9. $2,02 \times 10^3$ W
10. 87 °C
11. a) refrigerador (T , no ciclo, é negativo)
b) $e = 3,0$
12. a) 94 K
b) 47 K
13. Com a boca fechada, o gás se esfria porque se expande mais rapidamente (transformação adiabática).
14. a) +5,86 cal/K
b) Diminuiu.
c) menor
15. Veja a figura.



Resposta do problema suplementar 15.

16. a) $T_B = 2 T_0$; $T_C = 4 T_0$; $T_D = 2 T_0$
b) $Q_1 = (13/2)nRT_0$
c) 15%
17. a) errado
b) certo
c) errado
d) certo
e) certo
18. a) $1,5 \times 10^9$ kcal
b) 22%
19. M_2
20. a) 100%
b) A transformação não é cíclica.
21. A transferência de calor no refrigerador não é espontânea (há realização de trabalho).
22. 21 °C

CAPÍTULO 13 - Mudanças de fase

Exercícios de Fixação

1. a) pressão e temperatura
b) Aumentando sua temperatura ou diminuindo a pressão sobre ele.
2. a) A
b) amorfa
c) B
3. a) As ligações entre os átomos de um líquido são mais fracas.
b) A rede cristalina se desfaz.
c) Porque a força entre as moléculas de um gás é praticamente nula.
4. a) fusão
b) vaporização
c) sublimação
d) condensação (do vapor d'água existente no ar)
5. a) 961 °C
b) não
6. a) 2 100 cal
b) Permanece constante a 961 °C.
c) 961 °C
7. a) 50 g
b) Ambos estarão a 119 °C .
8. a) 2 000 cal
b) maior
9. a) 1 775 °C
b) Permanece constante em 1 775 °C.
c) sim
10. a) 270 cal
b) 1 775 °C
c) 25 °C
11. a) Aumenta.
b) As moléculas mais velozes escapam mais rapidamente do líquido.
12. O éter derramado, porque a velocidade de evaporação aumenta quando a área da superfície livre do líquido é aumentada.
13. a) 357 °C
b) Permanece constante.
c) 600 g
d) 357 °C
14. a) O vapor d'água do ar, no interior do automóvel, condensa-se em contato com a superfície do vidro esfriado pela chuva.
b) O movimento do ar faz com que o vapor d'água condensada torne a se evaporar.
15. $32,5 \times 10^3$ cal
16. a) Aumenta.
b) menor
c) afunda
17. acima
18. a) A água, no interior das rochas, aumenta de volume ao se congelar.
b) menor
c) Porque sua densidade é menor do que a da água do mar.
19. a) Igual, se estiver ao nível do mar e menor se estiver acima.
b) Igual, se estiver ao nível do mar e maior se estiver acima.
20. a) Sim; aumentando-se a pressão sobre ele.
b) 1 500 m
21. a) sólida
b) gasosa

22. a) 20 °C
b) 5,2 atm e -57 °C
23. a) sublimação
b) Deve ser superior a 5,2 atm.
24. a) sólida
b) gasosa
c) Aumentar tanto a temperatura quanto a pressão.
25. O gás real não está se comportando como um gás ideal.
26. a) É a pressão que devemos exercer sobre um gás, a uma certa temperatura, para condensá-lo.
b) 17,5 mmHg
c) 760 mmHg
27. a) igual
b) Igual; parte do líquido se evapora até saturar novamente o ambiente.
28. Para liquefazer o hélio, sua temperatura deve ser reduzida abaixo de 5 K.
29. vapor d'água
30. a) 15 °C
b) 55,1 mmHg
31. $u_r = 100\%$, em ambos os casos
32. $u_r = 22,8\%$
33. 45 mmHg

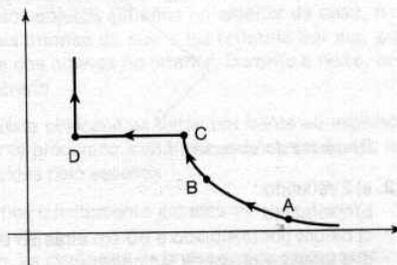
Problemas e Testes

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. (a)
7. (e)
8. (b)
9. (c)
10. a) 4 000 cal
b) 4 000 cal
c) 50 °C
11. a) 12 800 cal
b) 160 g
12. a) 10 000 cal
b) 200 cal/g
c) sim: o álcool
13. a) 2 000 cal
b) 84 cal/g
14. Gotículas de água atravessam os poros e se evaporam ao atingirem a superfície externa, absorvendo calor do recipiente.
15. Na chaleira, o vapor só pode escapar pelo bico e, portanto, haverá menor perda de calor para o ambiente.

16. a) A umidade dificulta a evaporação do suor.
b) A agitação do ar facilita a evaporação do suor.
17. 0 °C
18. apenas água a 0 °C
19. $3,6 \times 10^3$ s
20. A água fria ocasiona uma queda na pressão sobre a água no frasco.
21. a) 355 mmHg
b) 4,6 mmHg
22. maior
23. aproximadamente 12 °C
24. a) 189 cal
b) $1,80 \times 10^3$ cal
c) O vapor libera para a pele uma quantidade de calor quase 10 vezes maior do que a água.
25. 5,1 g
26. 175 g
27. 820 m/s
28. 0,84
29. 741 g
30. 31,7%

Problemas Suplementares

1. 359 g
2. a) 0 °C
b) A mistura é composta por 43 g de gelo e 161 g de água.
3. 310 m/s
4. 10 g/m³
5. 34 g/m³
6. a) 112 g
b) 16,6 g
7. $2,1 \times 10^3$ J
8. Evaporação da camada de água que vem aderida à pele da pessoa.
9. a) 75 cal/g
b) O calor liberado para o ambiente (de 30 °C para 20 °C) é compensado, aproximadamente, pelo calor absorvido (de 20 °C para 10 °C).
c) 6%
10. Veja a figura (AB é uma hipérbole).



Resposta do problema suplementar 10.

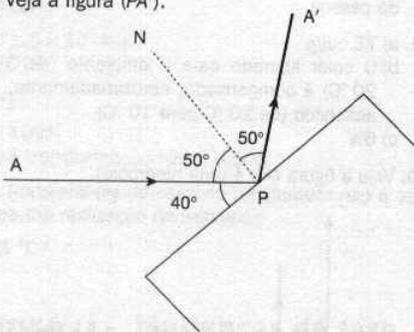
11. 0,39 cm/h

12. 50 g

CAPÍTULO 14 - Reflexão da luz

Exercícios de Fixação

- a) não
b) Porque ela envia para nossos olhos a luz que recebe do Sol.
- a) AA'B'B
c) Aumentará.
- a) feixe de raios paralelos igual
- a) P_1 e P_5
b) P_2
c) P_4
d) P_3
- a) $9,6 \times 10^{15}$ m
b) 20 anos
c) $1,9 \times 10^{14}$ km
- maior
- a) fig. 14-8
b) fig. 14-9, fig. 14-10 e fig. 14-11
- 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 isto não ocorre porque ela não possui atmosfera.
- b) ângulo entre NP e o raio refletido
c) 32°
- b) zero
c) zero
d) na mesma direção do raio incidente, porém em sentido contrário
- a) Veja figura (NP).
b) 50°
d) Veja a figura (PA').



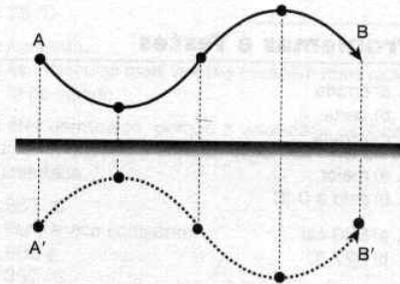
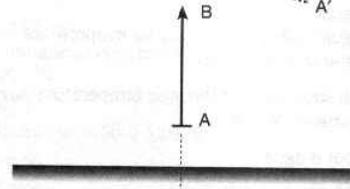
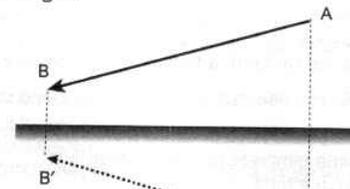
Resposta do exercício 11.

- 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 fig. 14-14

- a) 4 m
b) Não variará.

14. AA' e CC'

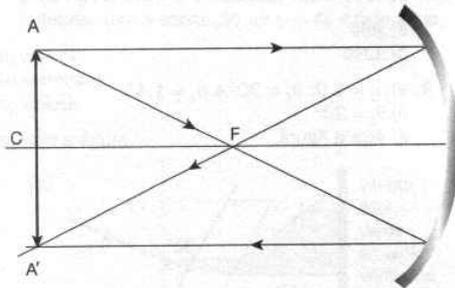
15. Veja a figura.



Resposta do exercício 15.

- Porque a luz, proveniente de O, após refletida pelo espelho, não atinge o olho de A.
- a) côncavo, convergente
b) convexo, divergente
c) convexo, divergente
d) côncavo, convergente
- 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 a esquerda
d) no meio do segmento CV
- As mesmas do exercício 18, mas o centro C e o foco F estão situados à direita do espelho.
- a) I
b) II
- a) feixe de raios paralelos
b) 2,5 m
c) real
- a) no meio do segmento CV
b) real
c) Passam pelo foco.
d) convergente

23. a) no meio do segmento CV
b) virtual
c) Os prolongamentos dos raios refletidos passam pelo foco.
d) divergente
24. a) convergente
b) divergente
c) do ponto I
d) a imagem real do objeto
25. a) $\hat{i} = 0$ para todos eles
b) Refletem-se sobre si mesmos.
26. Os raios refletidos são paralelos ao eixo do espelho.
27. Os dois diagramas são semelhantes ao do exemplo 1 desta secção.
28. a) sim
b) Afasta-se.
c) Aumenta.
d) sim
29. Porque os raios refletidos serão paralelos entre si (costuma-se dizer que a imagem se forma no infinito).
30. a) virtual
b) maior
c) direta
d) fig. 14-30
31. a) $D_i = 12$ cm
b) Real, pois o valor de D_i é positivo.
c) 1/5, isto é, a imagem é 5 vezes menor do que o objeto.
32. a) $D_i = 30$ cm
b) Real, pois o valor de D_i é positivo.
c) 2, isto é, a imagem é 2 vezes maior do que o objeto.
33. a) $D_i = 2f$
b) sobre o centro C
c) real
d) Aumento = 1, isto é, o objeto e a imagem têm o mesmo tamanho.
34. a) Veja a figura.
b) invertida



Resposta do exercício 34.

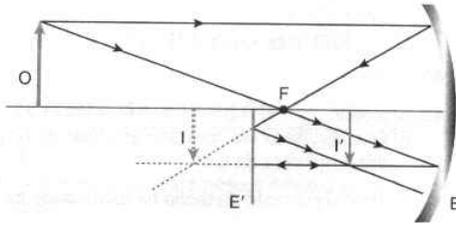
35. a) $D_i = -9,0$ cm
b) Virtual, pois D_i é negativo.
c) aumento = 1/4
d) $A'B' = 1$ cm
36. diagrama semelhante ao da fig. 14-31
37. a) 13 μ s
b) 10^{-15} m

38. a) diâmetro da órbita da Terra
b) 16,5min (16min 30s)
39. a) $6,0 \times 10^{-5}$ s
b) $3,0 \times 10^{-2}$ s
c) 2000 rpm
40. 4,3%
41. a) menor
b) Este resultado era contrário às idéias de Newton, sobre a natureza da luz.
42. O estabelecimento da teoria da relatividade de Einstein.
43. a) 8,2 minutos-luz
b) 4,1 horas-luz
c) 4h 06min
44. a) 34,4 minutos-luz
b) 34min 24s
45. (a)
46. a) 10^{10} anos-luz
b) dez bilhões de anos!

Problemas e Testes

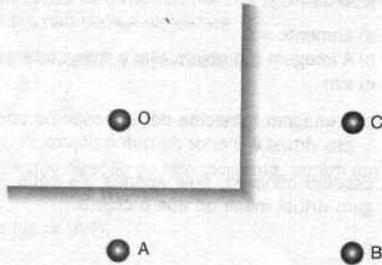
1. CD é vermelha e C'D' é azul.
2. a) A
b) B
c) C
3. d) você deve ter obtido $\beta = 30^\circ$
e) sim ($30^\circ = 2 \times 15^\circ$)
4. a) aumento = 1
b) A imagem e o objeto têm o mesmo tamanho.
c) sim
5. b) A imagem fornecida por um espelho convexo é sempre virtual e menor do que o objeto.
6. Espelho côncavo, pois apenas ele pode fornecer imagem virtual maior do que o objeto.
7. (c)
8. (b)
9. (e)
10. (b), (d)
11. (a), (b), (c)
12. (b), (c), (e)
13. Durante o dia, a luz que atravessa a vidraça, proveniente dos objetos situados no exterior da casa, é muito mais intensa do que a luz refletida por ela, proveniente dos objetos no interior. Durante a noite, ocorre o contrário.
14. O oculista colocaria as letras em frente ao espelho e o paciente procuraria identificar as imagens destas letras fornecidas pelo espelho.
15. a) ambos infinitamente grandes ($R = \infty$ e $f = \infty$)
b) $D_i = -D_o$
c) Sim, as distâncias da imagem e do objeto ao espelho são iguais e a imagem é virtual (D_i é negativo).

16. a) Veja a figura.
 b) Veja a figura.
 c) real



Resposta do problema 16.

17. a) 80 cm
 b) $D = 2d$
 c) sim
18. 7,5 voltas
19. a) côncavo; virtual; objeto entre o foco e o espelho
 b) côncavo; real; objeto além do foco
 c) convexo; virtual; qualquer posição do objeto
20. apenas A
21. a) menor
 b) maior
 c) maior
22. a) 120 km/h
 b) 60 km/h
23. a) 100 cm
 b) Veja a figura.



Resposta do problema 23.

24. a) $d/3$
 b) $-2d/3$
25. a) côncavo
 b) 2,5
26. a) a 20 cm do espelho
 b) real
27. 45°
28. 20 cm, côncavo
29. a) P
 b) M
 c) N
 d) Q
30. a) O tamanho da imagem aumentaria.
 b) Não haverá alteração na imagem.
 c) A imagem perderia nitidez e ganharia luminosidade.

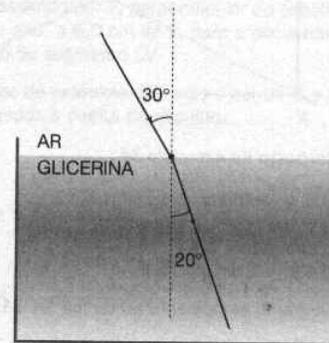
Problemas Suplementares

1. A segunda sombra tem sua origem nos raios refletidos no espelho, como se viessem da imagem da lâmpada.
2. $X_o X_i = f^2$
3. a) $f = \infty$
 b) $D_i = -D_o$
 c) virtual; aumento = 1
 d) sim
4. A imagem está mais afastada da câmara fotográfica do que o objeto.
5. 50 m
6. a) espelho de 80 cm com a extremidade inferior a 80 cm de altura
 b) não
7. 2,17 m
8. 5,40 m
9. a) 4,0 m/s, no sentido OX positivo
 b) 8,0 m/s, no sentido OX negativo
10. $6,0 \text{ cm}^2$
11. filamento A — luz alta
 filamento B — luz baixa
12. a) não
 b) sim
 c) Permitem enxergar imagens de objetos situados em uma região maior do espaço.
13. 26,4 cm
14. $0,14^\circ$
15. 2,0 cm

CAPÍTULO 15 - Refração da luz

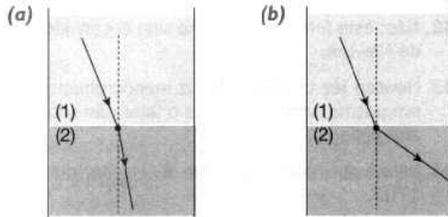
Exercícios de Fixação

1. a) $n = 2,0$
 b) $1,24 \times 10^8 \text{ m/s}$
2. a) gelo
 b) rutilo
3. a) $n_1 = 1,0; \theta_1 = 30^\circ$ e $n_2 = 1,47$
 b) $\theta_2 = 20^\circ$
 c) Veja a figura.



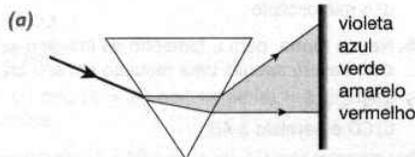
Resposta do exercício 3.

4. a) Veja a figura.
b) Veja a figura.

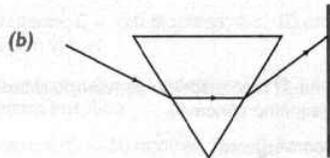


Resposta do exercício 4.

5. a) Afasta-se.
b) $\theta_1 < \theta_2$
c) meio A
d) meio B
6. a) no encontro dos prolongamentos dos raios retratados
b) Virtual, porque está situada no prolongamento dos raios.
c) abaixo
7. mais próxima
8. a) mais tarde
b) mais cedo
c) menor
9. 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.
10. 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.
11. a) menor
b) no diamante
c) Porque maior quantidade de luz (totalmente refletida pelas faces internas) é recebida por um observador.
12. a) menor
b) A luz do Sol sofre reflexão total nas camadas de ar próximas à areia e o observador, recebendo esta luz refletida, tem a sensação de que ali existe água.
13. a) violeta
b) vermelho
c) violeta
14. a) Veja a figura.

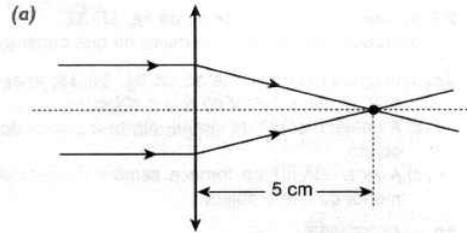


- b) Veja a figura.

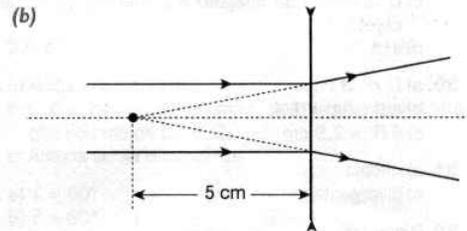


Resposta do exercício 14.

15. A luz branca sofre dispersão ao penetrar e ao emergir do diamante.
16. a) vermelha
b) abaixo
17. Reflete a luz azul e absorve as demais cores do espectro.
18. a) preto
b) amarelo
c) amarelas
d) preto
19. a) convergente
b) divergente
c) convergente
20. a) Veja a figura.

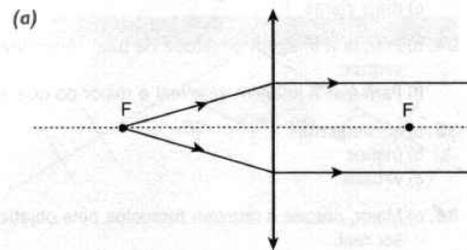


- b) Veja a figura.

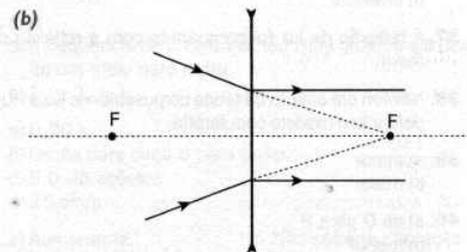


Resposta do exercício 20.

21. a) Veja a figura.



- b) Veja a figura.



Resposta do exercício 21.

22. a) 10 cm, porque a luz solar que chega à Terra é constituída de raios paralelos.
b) A 10 cm, porque os dois focos de uma lente são eqüidistantes dela.
23. a) convergente
b) Continua convergente.
c) maior
24. a) divergente
b) igual
c) maior
25. a) diagrama semelhante ao da fig. 15-31
b) real, invertida e menor do que o objeto
26. b) A imagem mantém-se real, afasta-se da lente e aumenta de tamanho.
27. a) diagrama semelhante ao da fig. 15-32
b) imagem virtual, direta e maior do que o objeto
28. a) diagrama semelhante ao da fig. 15-33; 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.
29. a) $D_i = 6$ cm
b) aumento = 0,5
c) O tamanho da imagem é a metade do tamanho do objeto.
d) sim
30. a) $D_i = -3$ cm
b) aumento = 1/4
c) $A'B' = 2,5$ cm
31. a) miopia
b) divergentes
32. Diminuiu.
33. a) Não, porque sua imagem seria virtual e, portanto, não haveria imagem projetada sobre o filme.
b) mais luz
c) mais claras
34. a) Porque a imagem projetada na tela, sendo real, é invertida.
b) Para que a imagem seja real e maior do que o *slide*.
35. a) convergente
b) menor
c) virtuais
36. a) Maior, porque a imagem fornecida pela objetiva deve ser real.
b) A imagem real fornecida pela objetiva.
c) virtual
d) invertida
37. A reflexão da luz foi comparada com a reflexão do som (eco).
38. Newton era adepto da teoria corpuscular da luz e Huyghens defendia o modelo ondulatório.
39. a) maior
b) maior
40. a) de O para P
b) menor
c) não
41. 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.
42. Não; este fenômeno já tinha sido observado muito antes de Newton.
43. Newton fez um feixe de luz monocromática passar por um prisma, verificando que o feixe não sofreu nenhuma alteração.
44. Para evitar polêmicas com R. Hooke, que morreu em 1703.

Problemas e Testes

1. a) 1,5 vezes menor
b) 750 s
2. a) $\theta_1 = 60^\circ$; $\theta_2 = 35^\circ$
b) $n = 1,5$
3. (c)
4. trajetória III
5. a) $C = 0,5$ dioptria
b) $C = 2,0$ dioptrias
c) $f = 0,20$ m = 20 cm
6. ponto E
7. (a)
8. Todas estão corretas.
9. a) $D_i = 5$ cm
b) $f = 3,3$ cm
c) convergente
10. a) Aproximar.
b) aumentada
11. a) lente I
b) lente II
c) lente II
d) Aumentar.
12. (b)
13. $R = 2,3$ m
14. a) vermelho
b) preto
15. a) imagem real, a 20 cm de L_1
b) imagem virtual, a 10 cm de L_2
c) 8 vezes
d) o microscópio
16. Nem a forma, nem o tamanho da imagem serão alterados; haverá apenas uma redução em seu brilho.
17. a) $\theta_1 = \theta_2$
b) CD é paralelo a AB.
18. a) O lápis devia parecer "quebrado" para cima.
b) fig. 15-8
19. a) 62°
b) não
20. reflexão na 1ª face (espelho convexo) e reflexão na face interna (espelho côncavo)
21. a) lente convergente
b) prisma (luz monocromática)

- c) dois espelhos planos paralelos ou uma lâmina de faces paralelas (como aquela do problema 17)
d) lente divergente

22. 15°
23. 250 cm
24. 19°
25. 2,8 mm
26. a) para a frente
b) 2,6 mm
27. 1,73
28. 16 vezes
29. a) $R = 30$ cm
b) $C = -2,3$ dioptrias (divergente)
30. 4,0 dioptrias

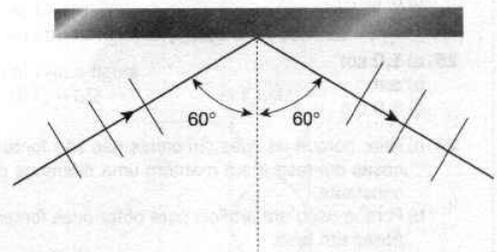
Problemas Suplementares

1. 15 cm
2. 51°
3. meio (3)
4. 30°
5. $5,0 \times 10^{-10}$ s
6. 9h 12min
7. 67,3 cm
8. $n = 1,4$ e $R = 5,0$ cm
9. 12 cm
10. 84 cm
11. $-2,5$ "graus"
12. $+3,0$ "graus"
13. 6,0 m
14. $n = 1,8$
15. 1,43 m
16. a) $\beta < 25^\circ$
b) Não haveria reflexão total em AC qualquer que fosse o valor de β .
17. $n > 1,22$
18. 83,4 cm
19. $f = 10$ cm; $D_i = 20$ cm; aumento = 1; imagem real e invertida
20. convergente; $f = 10$ cm; $D_i = -10$ cm; imagem virtual e direta
21. divergente; $C = -10$ dioptrias; $f = -10$ cm; $D_i = -5,0$ cm; imagem virtual
22. convergente; $C = 30$ dioptrias; $f = 3,3$ cm; $D_i = 5,0$ cm; imagem invertida
23. divergente; $C = -10$ dioptrias; $D_i = -6,7$ cm; aumento = 0,33; imagem virtual e direta

CAPÍTULO 16 - Movimento Ondulatório

Exercícios de Fixação

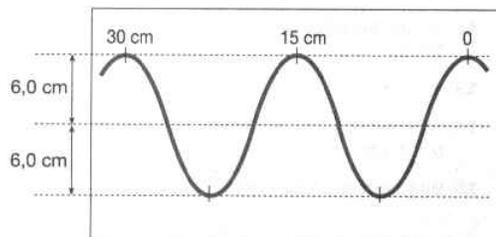
1. a) para a esquerda
b) para a esquerda
c) retardado
2. a) nos pontos B e B'
b) no ponto O
c) no ponto O
d) nos pontos B e B'
e) no ponto O
3. a) sim
b) 50 ciclos
c) 0,50 hertz
d) 2,0 s
4. a) 5,0
b) 40 cm
5. a) Diminuirá.
b) Aumentará.
c) Não sofrerá alteração.
6. a) Aumentaria.
b) Diminuiria.
c) Atrasaria.
d) Diminuiria.
7. a) 5,0 hertz
b) 0,20 s
c) 5,0 vibrações/s
d) 5,0 hertz
8. $\lambda_2 = 20$ cm
9. 2,0 s
10. a) Ambas aumentarão.
b) v_1 e v_2 não se modificarão, porque não houve alteração nos meios (1) e (2).
c) Ambos serão diminuídos.
11. a) $\hat{i} = 60^\circ$
b) $\hat{r} = 60^\circ$
c) Veja a figura.
d) Veja a figura.
e) Não varia, pois a onda continua a se propagar no mesmo meio.



Resposta do exercício 11.

12. a) B
b) A frequência de uma onda não varia quando ela passa de um meio para outro.
c) $\lambda_B > \lambda_A = \lambda_C$
13. a) 0,20 s
b) Oscila para cima e para baixo.
c) 5,0 vibrações/s
d) 25 cm/s
14. a) Aumentaria.
b) Aumentaria.
c) Não sofreria alteração.
d) Diminuiria.

12. (d)
 13. $L = mg/k$
 14. a) construtiva
 b) construtiva
 c) destrutiva
 15. 320 m/s
 16. a) 20 N/m
 b) 5,0 cm
 c) 0,44 s e 2,27 hertz
 17. a) 12 cm
 b) 2,0 m/s em $X = 0$
 18. a) na vertical b) 0,75 s c) 3,0 s
 19. Veja a figura.



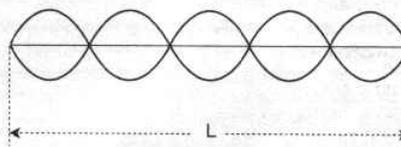
Resposta do problema 19.

20. a) não
 b) não
 c) porque $F \propto X$
 21. a) sim, pois $F \propto X$
 b) $\Delta t = \sqrt{3\pi / 4\rho G}$
 22. a) 30°
 b) 57°
 23. a) 0,20 hertz
 b) 1,0 hertz
 24. a) 9 B = 90 dB
 b) dez vezes maior
 25. $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}$
 26. $1,5 \times 10^3$ hertz
 27. a) 93 dB b) 53 dB
 28. a) aproximadamente 20 dB e 120 dB
 b) aproximadamente 40 hertz e 18 000 hertz
 c) sensação dolorosa (140 dB)
 29. λ_3, λ_4 e λ_6
 30. λ_2 e λ_5
 31. a) vermelha
 b) $f = 4,6 \times 10^{14}$ hertz; $\lambda = 6,5 \times 10^{-7}$ m; vermelha
 32. $3,4 \times 10^3$ m/s
 33. a) destrutiva
 b) 1,0 m
 34. bóias (1) e (2)
 35. a) $1,25 \times 10^{-11}$ W
 b) 8×10^{12} mosquitos! (8 trilhões de mosquitos)

Apêndice D

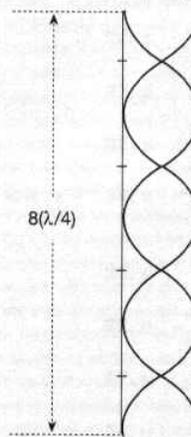
Exercícios de Fixação

1. a) 10 cm
 b) 4π rad/s
 2. 250 g
 3. a) π rad
 b) -10 cm
 c) ponto B'
 4. a) 0,125 s
 b) 0,125 s
 c) sim
 5. a) -40π cm/s
 b) Naquele instante o bloco está se movendo para baixo.
 6. a) zero
 b) Sim; naquela posição a resultante das forças no bloco é nula.
 7. a) $7,5 \times 10^{-3}$ g/cm = $7,5 \times 10^{-4}$ kg/m
 b) 117 hertz
 c) 234 hertz e 585 hertz
 8. a) reduzido à metade
 b) Multiplicado por 4.
 9. a) mais grossa
 b) 4 vezes
 10. a) Veja a figura.
 b) $\lambda_5 = 2L/5$
 c) $f_5 = 5f_1$



Resposta do exercício 10a.

11. a) 17 cm
 b) 250 hertz, 1 000 hertz e 2 000 hertz
 12. a) Veja a figura.
 b) $\lambda_4 = L/2$ c) $f_4 = 4f_1$



Resposta do exercício 12a.

13. 70 cm
 14. o tubo aberto
 15. a) 4,25 mm b) não; sim
 16. a) 894 hertz
 b) 882 hertz
 17. a) 1,5 voltas/s
 b) 485 hertz
 18. 21% da velocidade da luz
 19. a) Afastando.
 b) 1 380 km/s
 c) 0,46%; sim
 20. a) 68 m/s (= 244 km/h)
 b) 360 hertz

Problemas Suplementares

1. $X = \pm A\sqrt{2}/2$
 2. a) 0,30 m
 b) 0,50 hertz
 c) $-0,15\pi$ m/s

3. $X = 2 \cos(\pi/2)t$, com t em s e X em cm
 4. $T = 2\pi\sqrt{\rho L/\rho'g}$
 5. a) 12,6 N/m
 b) $X = 0,10 \cos(0,80\pi t)$, com t em s e X em m
 6. 344 m/s
 7. a) 68 dB
 b) 75 dB
 8. 2,8 m
 9. a) pêndulo simples
 b) $0,16\pi$ s
 10. $5,0 \times 10^3$ hertz
 11. em pontos situados a 1,0 m, 3,0 m, 5,0 m e 7,0 m de uma das fontes
 12. em pontos situados a 2,0 m, 4,0 m e 6,0 m de uma das fontes
 13. a) 7 cm b) não
 14. a) 85 hertz
 b) 115 N
 15. 944 hertz e 1 062 hertz

Respostas das questões de vestibular

capítulo 9 - Conservação da quantidade de movimento

- | | |
|-------|-------|
| 1. e | 13. d |
| 2. a | 14. c |
| 3. c | 15. d |
| 4. e | 16. c |
| 5. a | 17. c |
| 6. a | 18. a |
| 7. a | 19. e |
| 8. e | 20. b |
| 9. b | 21. d |
| 10. c | 22. d |
| 11. b | 23. c |
| 12. c | |

capítulo 10 - Temperatura e dilatação

- | | |
|------|---|
| 1. c | 7. c |
| 2. b | 8. a |
| 3. a | 9. d |
| 4. a | 10. I. errada; II. errada; III. correta |
| 5. b | 11. e |
| 6. b | 12. I. errada; II. correta; III. errada |

capítulo 11 - Comportamento dos gases

- | |
|------|
| 1. a |
| 2. c |

- | | |
|--------------------------|---|
| 3. Todas estão corretas. | 12. d |
| 4. d | 13. a |
| 5. d | 14. I. errada; II. errada; III. correta |
| 6. b | 15. d |
| 7. b | 16. d |
| 8. e | 17. e |
| 9. b | 18. d |
| 10. d | 19. a |
| 11. e | 20. d |

capítulo 12 - Primeira lei da Termodinâmica

- | | |
|--|-------|
| 1. b | 15. b |
| 2. b | 16. b |
| 3. c | 17. d |
| 4. d | 18. c |
| 5. b | 19. e |
| 6. c | 20. c |
| 7. a | 21. a |
| 8. a | 22. d |
| 9. b | 23. e |
| 10. I. errada; II. errada;
III. correta | 24. c |
| 11. b | 25. e |
| 12. a | 26. b |
| 13. c | 27. a |
| 14. a | 28. c |

capítulo 13 - Mudanças de fase

- | | |
|-------|--|
| 1. d | 11. c |
| 2. b | 12. c |
| 3. c | 13. Todas estão corretas. |
| 4. e | 14. d |
| 5. a | 15. I. correta; II. errada; III. errada |
| 6. a | 16. I. correta; II. errada; III. correta |
| 7. b | 17. e |
| 8. e | 18. d |
| 9. a | 19. Todas estão corretas. |
| 10. b | 20. d |

capítulo 14 - Reflexão da luz

- | | |
|------|-------|
| 1. b | 7. a |
| 2. c | 8. d |
| 3. c | 9. d |
| 4. b | 10. b |
| 5. b | 11. e |
| 6. e | 12. a |

capítulo 15 - Refração da luz

- | | |
|-------|---------------------------|
| 1. c | 14. c |
| 2. a | 15. a |
| 3. c | 16. d |
| 4. a | 17. d |
| 5. d | 18. a |
| 6. d | 19. b |
| 7. a | 20. c |
| 8. e | 21. a |
| 9. d | 22. Todas estão erradas. |
| 10. d | 23. Todas estão corretas. |
| 11. a | 24. c |
| 12. b | 25. e |
| 13. a | 26. c |

capítulo 16 - Movimento ondulatório

- | |
|--|
| 1. c |
| 2. c |
| 3. I. correta; II. errada; III. errada |
| 4. d |
| 5. d |
| 6. a |
| 7. I. errada; II. errada; III. correta |
| 8. d |
| 9. c |
| 10. c |
| 11. I. errada; II. errada; III. correta |
| 12. d |
| 13. a |
| 14. b |
| 15. a |
| 16. I. errada; II. correta; III. errada |
| 17. c |
| 18. c |
| 19. a |
| 20. a |
| 21. b |
| 22. c |
| 23. a |
| 24. a |
| 25. d |
| 26. I. correta; II. errada; III. correta |
| 27. c |

Valores das funções trigonométricas									
Ângulo		Seno	Co-seno	Tangente	Ângulo		Seno	Co-seno	Tangente
Graus	Radianos				Graus	Radianos			
0	0,0000	0,000	1,000	0,000					
1	0,0175	018	1,000	018	46	0,8029	719	695	1,036
2	0,0349	035	0,999	035	47	0,8203	731	682	1,072
3	0,0524	052	999	052	48	0,8378	743	669	1,111
4	0,0698	070	998	070	49	0,8552	755	656	1,150
5	0,0873	087	996	088	50	0,8727	766	643	1,192
6	0,1047	105	995	105	51	0,8901	777	629	1,235
7	0,1222	122	993	123	52	0,9076	788	616	1,280
8	0,1396	139	990	141	53	0,9250	799	602	1,327
9	0,1571	156	988	158	54	0,9425	809	588	1,376
10	0,1745	174	985	176	55	0,9599	819	574	1,428
11	0,1920	191	982	194	56	0,9774	829	559	1,483
12	0,2094	208	978	213	57	0,9948	839	545	1,540
13	0,2269	225	974	231	58	1,0123	848	530	1,600
14	0,2443	242	970	249	59	1,0297	857	515	1,664
15	0,2618	259	966	268	60	1,0472	866	500	1,732
16	0,2793	276	961	287	61	1,0647	875	485	1,804
17	0,2967	292	956	306	62	1,0821	883	470	1,881
18	0,3142	309	951	325	63	1,0996	891	454	1,923
19	0,3316	326	946	344	64	1,1170	899	438	2,050
20	0,3491	342	940	364	65	1,1345	906	423	2,145
21	0,3665	358	934	384	66	1,1519	914	407	2,246
22	0,3840	375	927	404	67	1,1694	921	391	2,356
23	0,4014	391	921	425	68	1,1868	927	375	2,475
24	0,4189	407	914	445	69	1,2043	934	358	2,605
25	0,4363	423	906	466	70	1,2218	940	342	2,747
26	0,4538	438	899	488	71	1,2392	946	326	2,904
27	0,4712	454	891	510	72	1,2566	951	309	3,078
28	0,4887	470	883	532	73	1,2741	956	292	3,271
29	0,5061	485	875	554	74	1,2915	951	276	3,487
30	0,5236	500	866	577	75	1,3090	966	259	3,732
31	0,5411	0,515	0,857	0,601	76	1,3265	0,970	0,242	4,011
32	0,5585	530	848	625	77	1,3439	974	225	4,331
33	0,5760	545	839	649	78	1,3614	978	208	4,705
34	0,5934	559	829	675	79	1,3788	982	191	5,145
35	0,6109	574	819	700	80	1,3963	985	174	5,671
36	0,6283	588	809	727	81	1,4137	988	156	6,314
37	0,6458	602	799	754	82	1,4312	990	139	7,115
38	0,6632	616	788	781	83	1,4486	994	122	8,144
39	0,6807	629	777	810	84	1,4661	995	105	9,514
40	0,6981	643	766	839	85	1,4835	996	087	11,43
41	0,7156	656	755	869	86	1,5010	998	070	14,30
42	0,7330	669	743	869	87	1,5184	999	052	19,08
43	0,7505	682	731	933	88	1,5359	999	035	28,64
44	0,7679	695	719	966	89	1,5533	1,000	018	57,29
45	0,7854	707	707	1,000	90	1,5708	1,000	000	∞

Constantes físicas	
Velocidade da luz	$3,0 \times 10^8$ m/s
Constante gravitacional	$6,67 \times 10^{-11}$ N · m ² /kg ²
Massa do elétron (em repouso)	$9,11 \times 10^{-31}$ kg
Massa do próton (em repouso)	$1,67 \times 10^{-27}$ kg
Pressão atmosférica normal	$1,01 \times 10^5$ N/m ²
Raio médio da Terra	$6,37 \times 10^6$ m
Distância média da Terra ao Sol	$1,49 \times 10^8$ km
Distância média da Terra à Lua	$3,8 \times 10^5$ km
Massa da Terra	$5,98 \times 10^{24}$ kg
Massa do Sol	$2,0 \times 10^{30}$ kg
Carga do elétron (carga elementar)	$1,6 \times 10^{-19}$ C
Constante de Boltzmann	$1,38 \times 10^{-23}$ J/K
Constante da lei de Coulomb (para o vácuo)	$9,00 \times 10^9$ N · m ² /C ²
Constante de Planck	$6,63 \times 10^{-34}$ J · s
Constante universal dos gases	8,31 joule/K mol

BIBLIOGRAFIA INDICADA PARA OS ALUNOS

A lista apresentada a seguir é sugerida para tentar ampliar seus conhecimentos e incentivá-los a fazer outras leituras além do livro didático.

Seu(sua) professor(a) poderá orientá-los por onde começar, como ir adquirindo cada obra, como desenvolver um esforço para incorporá-los na biblioteca de sua escola, como desenvolver o hábito e aperfeiçoar a leitura, por exemplo, fazendo discussões em grupo, etc.

Boa leitura!

- ARRIBAS, S. D. *Experiências de física ao alcance da escola*. Passo Fundo: UFP, 1987.
- BERNAL, J. D. *Ciência na história*. V. 1-7. Lisboa: Livros Horizonte, 1969.
- CARVALHO, R. P. *Física do dia-a-dia*. Belo Horizonte: Gutenberg, 2003.
- DAOU, L. e CARUSO, F. *Tirinhas de Física*. Vols. 1 a 6. Rio de Janeiro: Centro Brasileiro de Ensino de Física, 2000-2002.
- DAWKINS, R. *Desvendando o arco-íris*. São Paulo: Companhia das Letras, 2002.
- ECO, U.; DELUMEAU, J.; GOULD, J. S.; CARRIÈRE, J-C. *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!* Lisboa: Gradiva, 1988.
- _____. *P. Física em seis lições*. 6. ed. Rio de Janeiro: Ediouro, 2001.
- FIOLHAIS, C. *Física divertida*. Lisboa: Gradiva, 1991.
- GILMORE, R. *Alice no país do quantum*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2001.
- _____. *O mágico dos quarks*. São Paulo: Jorge Zahar, 2001.
- GLEISER, M. *O fim da terra e do céu*. São Paulo: Schwarcz, 2001.
- GOLDEMBERG, J. *Energia no Brasil*. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos, 1979.
- GONICK, et alii. *Introdução ilustrada à Física*. São Paulo: Harbra, 1994.
- HEWITT, P. G. *Física conceitual*. Porto Alegre: Artmed, 2002.
- MARTINS, J. B. *José Leite Lopes – O homem de ciência*. Rio de Janeiro: Nova Stella, 1990.
- MENEZES, L. C. *Vale a pena ser físico?* São Paulo: Moderna, 1988.
- OKUNO, E. *Radiação ultravioleta: características e efeitos*. São Paulo: Livraria da Física, 2005.
- PANZERA, Á. C. *Estrelas e planetas*. Belo Horizonte: UFMG, 2001.
- PARKER, S. *Marie Curie e a radioatividade*. São Paulo: Scipione, 1997. (Caminhos da Ciência)
- PAULINO, J. O. S. *Raios e trovões*. Belo Horizonte: UFMG, 1997.
- PERELMAN, I. *Física recreativa*. Moscou, 1980.
- PRADO, F. B. L. *Observações astronômicas: como e para quê*. Belo Horizonte: UFMG, s/d.
- PRICE, D. S. *O homem e a ciência – A ciência desde a Babilônia*. Belo Horizonte: Itatiaia, 1976.
- SAGAN, C. *O mundo mal assombrado pelos demônios*. São Paulo: Companhia das Letras, 1997.
- STRATHERN, P. *Arquimedes e a alavanca em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997. (Cientistas em 90 Minutos)
- _____. *Aristóteles em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997. (Filósofos em 90 Minutos)

- _____. *Bohr e a teoria quântica em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997. (Cientistas em 90 Minutos)
- _____. *Einstein e a relatividade em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997. (Cientistas em 90 Minutos)
- _____. *Galileu e o sistema solar em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997. (Cientistas em 90 Minutos)
- _____. *Hawking e os buracos negros em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997. (Cientistas em 90 Minutos)
- _____. *Platão em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997. (Filósofos em 90 Minutos)
- _____. *Sócrates em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997. (Filósofos em 90 Minutos)
- THUILLIER, P. *De Arquimedes a Einstein*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1988. (Ciência e Cultura)
- VALADARES, E. C. *Física mais que divertida*. Belo Horizonte: UFMG, 2000.
- WALKER, J. *O grande circo da física*. Lisboa: Gradiva, 1990.
- ZIMAN, J. *A força do conhecimento*. São Paulo: Edusp, 1981.

Os livros da lista abaixo, apesar de não serem publicados em português, são de leitura bastante interessante e acessível. Se houver disponibilidade e interesse, não será difícil adquiri-los pela Internet.

- ARMSTRONG, T. *Make moving patterns*. Norfolk: Tarquin, 1982.
- BOLTON, L. *Hidden pictures*. New York: Pinguin, 1993.
- CITÉ DES SCIENCES ET DE L'INDUSTRIE. *La lumière démasquée*. Paris:
- ERNST, B. *Le monde des illusions d'optique*. Berlim: Taschen, 1986.
- _____. *Adventure with impossible figures*. Norfolk: Tarquin, 1986.
- JENNINGS, T. *101 illusions d'optique*. Paris: Gründ, 1996.
- HAWKING, S. *Commencement du temp set fin de la physique?* Paris: Flammarion, 1992.
- LINDLEY, D. *The end of physics. The myth of unified theory*. New York: Basic Books, 1993.
- MARCH, R. H. *Physics for poets*. New York: McGraw-Hill, 1998.
- MOSCOVICH, I. *Magio cylinder book*. Norfolk: Tarquin, 1988.
- NORRETRANDERS, T. *The user illusion*. Londres: Penguin, 1999.
- PERELMAN, I. *Física recreativa*. Moscou: Mir, 1980.
- SMITH, A. *The Usborne big book of experiments*. Londres: Usborne, 1996.
- SHOGAKUKAN, I. *Stereogram*. Londres: Boxtree, 1994.
- WATSON, P. *La lumière fantastique*. Paris: Albin Michel Jeunesse, 1982.

Páginas indicadas para pesquisa e consulta

Biblioteca Virtual do Estudante Brasileiro — www.bibvirt.futuro.usp.br/principal.html

Estação Ciência — www.eciencia.com.br: A estação Ciência é um centro de difusão científica, tecnológica e cultural criado pela Pró-Reitoria da USP.

Laboratório de Ensino de Ciências e Tecnologia (USP) — <http://www.darwin.futuro.usp.br/>

Revista *Nova Escola* — www.novaescola.com.br (www.programaescoladigital.com.br) ensina a usar o computador)