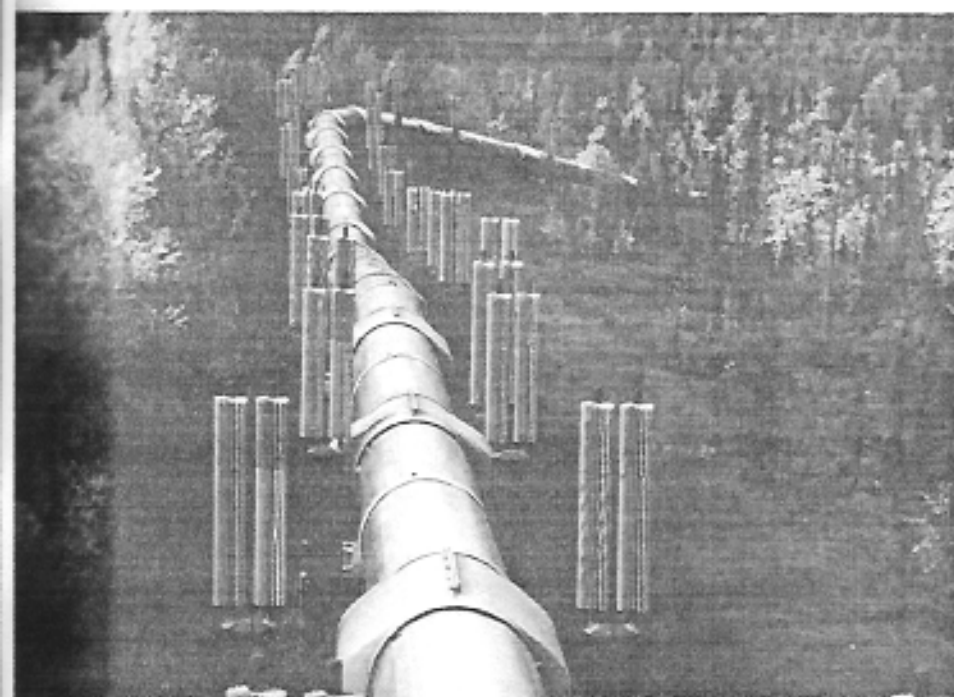




Propriedades Térmicas e Processos Térmicos

- 20-1 Expansão Térmica
- 20-2 A Equação de van der Waals e Isotermas Líquido-Vapor
- 20-3 Diagramas de Fase
- 20-4 A Transferência de Calor

Quando um corpo absorve calor, várias mudanças podem ocorrer em suas propriedades físicas. Por exemplo, a temperatura do corpo pode aumentar, ao mesmo tempo em que ele expande ou contrai, ou o corpo pode se fundir ou vaporizar, enquanto sua temperatura permanece constante.

Muitos cientistas e engenheiros industriais precisam levar em consideração as mudanças provocadas nos corpos associadas à temperatura. Engenheiros civis que projetam pontes e rodovias incluem juntas de expansão para permitir pequenas variações de comprimento das rodovias, resultantes de variações da temperatura. Outros engenheiros criam produtos para proteger objetos de variações extremas de temperatura. Materiais são usados para manter a energia térmica em aquecedores de água, fornos e turbinas de navios, bem como para proteger os automóveis e seus ocupantes do aquecimento proveniente do sistema de exaustão do carro.

Neste capítulo examinamos algumas das propriedades térmicas da matéria e alguns processos importantes envolvendo calor.

CAPÍTULO

20

O OLEODUTO DO ALASCA TRANSPORTA ÓLEO ATRAVÉS DE 800 MILHAS EM UM DUTO DE AÇO DE 48 IN DE DIÂMETRO. ZIGUEZAGUES FAZEM PARTE DO OLEODUTO PARA PERMITIR A EXPANSÃO TÉRMICA. (OS ZIGUEZAGUES TAMBÉM PERMITEM O MOVIMENTO OCASIONADO POR ATIVIDADE SÍSMICA.) O OLEODUTO FOI PROJETADO PARA SUPOORTAR TEMPERATURAS VARIANDO DE -60°F A 145°F (A TEMPERATURA DO OLEODUTO ERA DE -60°F ANTES DE SE INICIAR O FLUXO DE ÓLEO). (© Pniensen/Dreamstime.com.)



Qual foi a variação do comprimento de uma seção de 720 ft do oleoduto, quando a temperatura variou de -60°F para 145°F ? (Veja o Exemplo 20-2.)

20-1 EXPANSÃO TÉRMICA

Quando a temperatura de um corpo aumenta, geralmente ele expande. Considere um longo bastão de comprimento L à temperatura T . Quando a temperatura de um sólido varia de ΔT , a variação relativa do comprimento, $\Delta L/L$, é proporcional a ΔT :

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha \Delta T \quad 20-1$$

onde α , chamado de **coeficiente de expansão linear**, é a razão entre a variação relativa do comprimento e a variação da temperatura:

$$\alpha = \frac{\Delta L/L}{\Delta T} \quad 20-2$$

A unidade SI para o coeficiente de expansão linear é o inverso do kelvin ($1/K$), que é igual ao inverso do grau Celsius ($1/^\circ\text{C}$). O valor de α pode variar com a pressão e com a temperatura. A Equação 20-2 fornece o valor médio em um intervalo de temperatura ΔT , com a pressão mantida constante. O coeficiente de expansão linear, a uma dada temperatura T , é determinado tomando-se o limite quando ΔT tende a zero:

$$\alpha = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta L/L}{\Delta T} = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \quad 20-3$$

DEFINIÇÃO: COEFICIENTE DE EXPANSÃO LINEAR

A precisão obtida usando-se o valor médio de α sobre um grande intervalo de temperatura é suficiente para a maior parte dos casos.

Para um líquido ou um sólido, o **coeficiente de expansão volumétrica** β é definido como a razão entre a variação relativa do volume e a variação da temperatura (à pressão constante):

$$\beta = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta V/V}{\Delta T} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad 20-4$$

DEFINIÇÃO: COEFICIENTE DE EXPANSÃO VOLUMÉTRICA

Tanto α quanto β podem variar com a pressão e com a temperatura, mas qualquer variação com a pressão é, tipicamente, desprezível. Valores médios de α e β para várias substâncias são apresentados na Tabela 20-1.

Para um dado material, $\beta = 3\alpha$. Podemos mostrar esta relação considerando uma caixa com dimensões L_1 , L_2 e L_3 . Seu volume a uma temperatura T é

$$V = L_1 L_2 L_3$$

A taxa de variação do volume com relação à temperatura é

$$\frac{\partial V}{\partial T} = L_1 L_2 \frac{\partial L_3}{\partial T} + L_1 \frac{\partial L_2}{\partial T} L_3 + \frac{\partial L_1}{\partial T} L_2 L_3$$

Dividindo cada lado da equação pelo volume, obtemos

$$\beta = \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T} = \frac{1}{L_1} \frac{\partial L_1}{\partial T} + \frac{1}{L_2} \frac{\partial L_2}{\partial T} + \frac{1}{L_3} \frac{\partial L_3}{\partial T}$$

Podemos ver que cada termo do lado direito da equação precedente é igual a α e, portanto, temos

$$\beta = 3\alpha \quad 20-5$$

Na dedução da Equação 20-5 consideramos o coeficiente de expansão linear independente da direção. (Esta hipótese é aproximadamente verdadeira para a maioria dos materiais e será usada para os cálculos neste livro.) Uma dedução semelhante mostra que o coeficiente de expansão superficial é o dobro do coeficiente de expansão linear.

Tabela 20-1

Valores Aproximados para os Coeficientes de Expansão Térmica de Várias Substâncias

Ar	$3,67 \times 10^{-3}$	β, K^{-1}
Acetona	$1,5 \times 10^{-3}$	
Álcool	$1,1 \times 10^{-3}$	
Água (20°C)	$0,207 \times 10^{-3}$	α, K^{-1}
Mercurio	$0,18 \times 10^{-3}$	
Gelo	51×10^{-6}	
Alumínio	24×10^{-6}	
Latão	19×10^{-6}	
Cobre	17×10^{-6}	
Aço	11×10^{-6}	
Vidro (comum)	9×10^{-6}	
Grafite	$7,9 \times 10^{-6}$	
Vidro (Pirex)	$3,2 \times 10^{-6}$	
Diamante	$1,2 \times 10^{-6}$	
Invar	1×10^{-6}	

Exemplo 20-1

Buracos se Expandem?

Conceitual

Seja um objeto de aço com um orifício circular. Se a temperatura do objeto aumenta, o metal se expande. O diâmetro do orifício aumenta ou diminui?

SITUAÇÃO O aumento de tamanho de qualquer parte de um objeto, para um dado aumento de temperatura, é proporcional ao tamanho original daquela parte do objeto (de acordo com a Equação 20-2). Como objeto, considere uma régua de aço com um orifício de 1 cm de diâmetro centrado na marca de 3,5 cm.

SOLUÇÃO

1. Como objeto, considere uma régua de aço com um orifício de 1 cm de diâmetro centrado na marca de 3,5 cm:
Se a régua de aço tem um orifício de 1 cm de diâmetro centrado na marca de 3,5 cm, então a borda do orifício tocará as marcas de 3 cm e de 4 cm.
2. Quando a temperatura da régua aumenta de uma determinada quantidade, ela se expande uniformemente:
A distância entre as marcas de 3 cm e de 4 cm aumentará.
3. A borda do orifício continuará tocando as marcas de 3 cm e de 4 cm enquanto a régua se expande:
Se a distância entre as marcas de 3 cm e de 4 cm aumenta, então

o diâmetro do orifício aumenta.

CHECAGEM Na perfuração para feitura do orifício, o material removido seria um disco de aço de 1 cm de diâmetro. Se a temperatura deste disco fosse elevada tanto quanto a temperatura da régua, então o disco encaixaria no orifício perfeitamente.

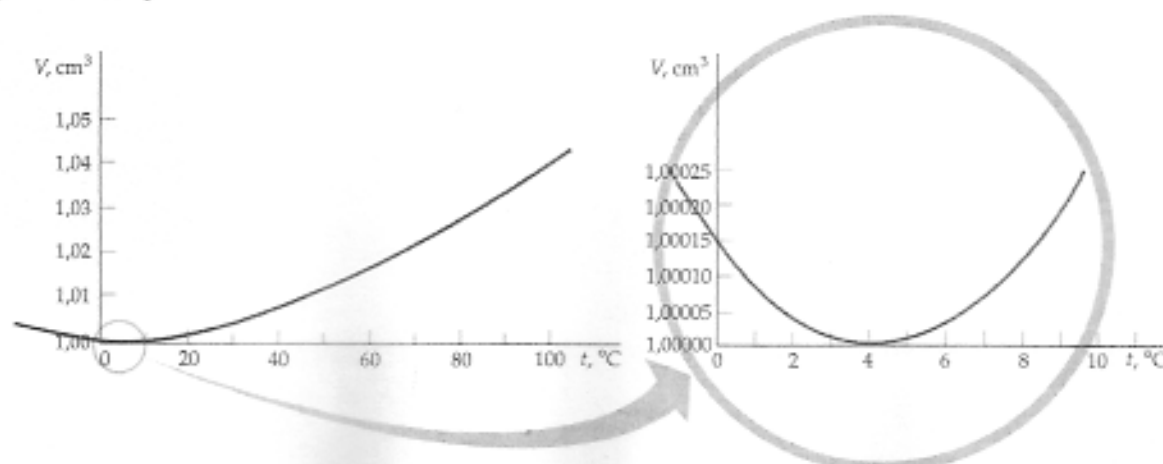
INDO ALÉM Um dispositivo para demonstrar que um orifício expande quando aquecido é mostrado na Figura 20-1.



FIGURA 20-1 Quando a bola e o anel estão à temperatura ambiente, a bola é grande demais para passar pelo anel. O anel se expande quando aquecido e, enquanto o anel está quente, a bola, que se manteve à temperatura ambiente, passa através do orifício. (Richard Megna/Fundamental Photographs.)

A maioria dos materiais se expande quando aquecida e se contrai quando resfriada. A água, entretanto, é uma importante exceção. A Figura 20-2 mostra o volume ocupado por 1 g de água como função da temperatura. O volume mínimo e, portanto, a massa específica máxima, está a 4,00°C. Assim, quando a água a 4,00°C é resfriada, ela se expande em vez de se contrair. Esta propriedade da água tem consequências importantes para a ecologia de lagos. A temperaturas acima de 4,00°C, a água em um lago se torna mais densa enquanto é resfriada e, portanto, afunda. Porém, ao ser resfriada abaixo de 4,00°C, ela se torna menos densa e sobe à superfície. Esta é a razão pela qual o gelo se forma primeiro na superfície de um lago. A água também se expande quando congela. Como o gelo é menos denso do que a água líquida, ele permanece na superfície e atua como uma camada isolante para a água que está abaixo. Se a água se comportasse como a maioria das substâncias e contraísse enquanto congela, então o gelo afundaria e deixaria mais água exposta na superfície, para ser congelada. Os lagos se encheriam de gelo do fundo para cima e seria muito provável que congelassem completamente no inverno.

FIGURA 20-2 Volume de 1 g de água à pressão atmosférica versus temperatura. O volume mínimo, que corresponde à máxima massa específica, ocorre a 4,0°C. Para temperaturas abaixo de 0,0°C, a curva mostrada é para água super-resfriada. (Água super-resfriada é água não solidificada abaixo do ponto de congelamento normal.)



Exemplo 20-2 Uma Expansão

Uma seção retilínea com 720 ft (219 m) de comprimento do oleoduto do Alasca estava a uma temperatura de -60°F antes de ser cheia de óleo com uma temperatura máxima de 145°F . O oleoduto é coberto com uma camada isolante, para que o óleo e o duto de aço tenham a mesma temperatura. (a) Qual foi o valor da expansão desta seção, quando a temperatura variou de -60°F para 145°F ? (b) As seções do oleoduto que estão acima do solo têm um comprimento de 420 mi (676 km). Se a temperatura de uma seção inteira de 420 mi aumentasse de -60°F para 145°F , de quanto ela se expandiria?

SITUAÇÃO Use $\alpha = 11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, da Tabela 20-1, e calcule ΔL com a Equação 20-1.

SOLUÇÃO

(a) 1. A variação de comprimento para uma dada variação de temperatura é o produto de α , L e ΔT :

$$\Delta L = \alpha L \Delta T$$

2. A variação da temperatura é 205°F . Converta esta variação de graus Fahrenheit para kelvins (multiplicando por $5/9$):

$$\Delta T = \frac{5 \text{ K}}{9^{\circ}\text{F}} (205^{\circ}\text{F}) = 114 \text{ K}$$

3. Calcule a variação do comprimento:

$$\Delta L = \alpha L \Delta T = (11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1})(720 \text{ ft})(114 \text{ K}) = 0,90 \text{ ft} = 11 \text{ in}$$

(b) A variação do comprimento é proporcional ao comprimento. Use isto para calcular a variação do comprimento da seção de 420 mi que está acima do solo:

$$\frac{\Delta L_2}{L_2} = \frac{\Delta L_1}{L_1} \Rightarrow \Delta L_2 = \frac{L_2}{L_1} \Delta L_1$$

$$\Delta L_2 = \frac{(420 \text{ mi})(5280 \text{ ft/mi})}{720 \text{ ft}} (0,90 \text{ ft}) = 2800 \text{ ft} = 0,5 \text{ mi}$$

CHECAGEM A variação de 0,5 mi (0,8 km) no comprimento é um pouco maior do que um décimo de 1 por cento do comprimento de 420 mi. Isto parece razoável, para uma variação tão ampla de temperatura e para um comprimento tão grande.

INDO ALÉM As extremidades das seções do oleoduto que estão acima do solo não se movem com variações de temperatura porque o zigzague (Figura 20-3) resulta em movimentos laterais que “absorvem a expansão.”

FIGURA 20-3 O zigzague do oleoduto permite a expansão térmica dos dutos. (Paul A. Souder/Corbis.)



Podemos calcular a tensão que resultaria em uma ponte de aço com 1000 m de comprimento sem juntas de expansão (Figura 20-4) usando o módulo de Young (Equação 12-1):

$$Y = \frac{\text{Tensão}}{\text{Deformação relativa}} = \frac{F/A}{\Delta L/L}$$

Então,

$$\frac{F}{A} = Y \frac{\Delta L}{L} = Y \alpha \Delta T$$

Para $\Delta T = 30 \text{ K}$, $\Delta L/L = \alpha \Delta T = (11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1})(30 \text{ K}) = 3,3 \times 10^{-4} = 0,33 \text{ m}/1000 \text{ m}$. Então, usando $Y = 2,0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ (da Tabela 12-1),

$$\frac{F}{A} = Y \frac{\Delta L}{L} = (2,0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2) \frac{0,33 \text{ m}}{1000 \text{ m}} = 6,6 \times 10^7 \text{ N/m}^2$$

Esta tensão é aproximadamente um terço da tensão de ruptura para o aço sob compressão. Uma tensão de compressão desta magnitude provocaria uma dobra na ponte de aço, que ficaria permanentemente deformada.

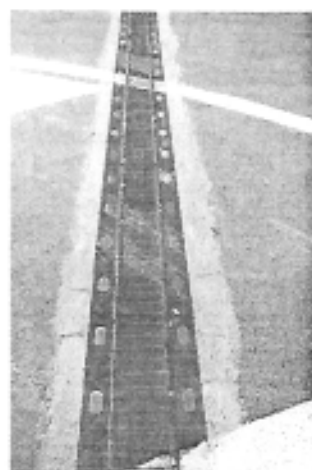


FIGURA 20-4 Juntas de expansão, como esta, permitem que as pontes se expandam com o aumento da temperatura. (© Photobooks/Dreamstime.com.)

Exemplo 20-3 Um Copo Completamente Cheio

Trabalhando no laboratório, você enche um frasco de vidro pirex de 1,000 L até a borda, com água a 10°C. Você aumenta a temperatura da água e do frasco para 30°C. Quanta água derramará do frasco?

SITUAÇÃO A água e o frasco expandem quando aquecidos, mas 1,000 L de água expande mais do que 1,000 L de vidro e, portanto, alguma água será derramada. Calculamos a quantidade de água derramada através das variações de volume para $\Delta T = 20$ K usando $\Delta V_{\text{água}} = \beta V_i \Delta T$, com $\beta = 0,207 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ para a água (da Tabela 20-1), e $\Delta V_{\text{vidro}} = \beta V_i \Delta T = 3\alpha V_i \Delta T$, com $\alpha = 3,25 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ para o vidro Pirex, onde $V_i = 1,000$ L. A diferença entre estas variações de volume é igual ao volume da água derramada.

SOLUÇÃO

1. O volume de água derramada $V_{\text{derramada}}$ é a diferença entre as variações de volume da água e do vidro:

$$V_{\text{derramada}} = \Delta V_{\text{água}} - \Delta V_{\text{vidro}}$$
2. Determine o aumento do volume da água:

$$\Delta V_{\text{água}} = \beta_{\text{água}} V_i \Delta T$$
3. Determine o aumento do volume do frasco de vidro:

$$\Delta V_{\text{vidro}} = \beta_{\text{vidro}} V_i \Delta T = 3\alpha_{\text{vidro}} V_i \Delta T$$
4. Subtraia para determinar a quantidade de água derramada:

$$\begin{aligned} V_{\text{derramada}} &= \Delta V_{\text{água}} - \Delta V_{\text{vidro}} = \beta_{\text{água}} V_i \Delta T - \beta_{\text{vidro}} V_i \Delta T \\ &= (\beta_{\text{água}} - \beta_{\text{vidro}}) V_i \Delta T = (\beta_{\text{água}} - 3\alpha_{\text{vidro}}) V_i \Delta T \\ &= [0,207 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1} - 3(3,25 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1})](1,000 \text{ L})(20 \text{ K}) \\ &= 3,95 \times 10^{-3} \text{ L} = \boxed{4,0 \text{ mL}} \end{aligned}$$

CHECAGEM O derramamento de 4,0 mL representa apenas 0,4 por cento do volume inicial de 1,000 L. É plausível que esta pequena quantidade resulte de um aumento de temperatura de 20 K.

INDO ALÉM O frasco expande, o que torna maior o seu interior, como se o frasco fosse um pedaço sólido de vidro Pirex.

Exemplo 20-4 Quebrando o Cobre**Rico em Contexto**

Durante um projeto de encanamento doméstico, você aquece um pedaço de cano de cobre até a 300°C. Então, você prende o cano entre dois pontos fixos de maneira a evitar que ele contraia. Se a tensão de ruptura do cobre é 230 MN/m², para qual temperatura a barra quebrará enquanto esfria?

SITUAÇÃO Enquanto o cano de cobre esfria, a variação de comprimento ΔL que ocorreria se ele pudesse contrair é compensada pelo alongamento devido à tensão de tração no cano. A tensão F/A está relacionada ao alongamento ΔL por $Y = (F/A)(\Delta L/L)$, onde o módulo de Young para o cobre é $Y = 110 \text{ GN/m}^2$ (da Tabela 12-1). O alongamento máximo permitido ocorrerá quando F/A for igual a 230 MN/m². Determinamos, então, a variação de temperatura que produzirá esta contração máxima.

SOLUÇÃO

1. Calcule a variação do comprimento ΔL_1 que ocorreria se o cano pudesse contrair enquanto esfria:

$$\Delta L_1 = \alpha L \Delta T$$
2. Uma tensão de tração F/A alonga o cano de ΔL_2 :

$$Y = \frac{F/A}{\Delta L_2/L} \quad \text{logo} \quad \Delta L_2 = L \frac{F/A}{Y}$$
3. Substitua os resultados do passo 1 e do passo 2 em $\Delta L_1 + \Delta L_2 = 0$ e resolva para ΔT , com a tensão igual ao valor de ruptura:

$$\begin{aligned} \Delta L_1 + \Delta L_2 &= 0 \\ \alpha L \Delta T + L \frac{F/A}{Y} &= 0 \\ \text{logo} \quad \Delta T &= -\frac{F/A}{\alpha Y} = -\frac{230 \times 10^6 \text{ N/m}^2}{(17 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1})(110 \times 10^9 \text{ N/m}^2)} \\ &= -123 \text{ K} = -123^\circ\text{C} \end{aligned}$$
4. Some este resultado à temperatura original para determinar a temperatura final na qual o cano quebrará:

$$t_f = t_i + \Delta t = 300^\circ\text{C} - 123^\circ\text{C} = 177^\circ\text{C} = \boxed{180^\circ\text{C}}$$

CHECAGEM Se você observar um encanamento de cobre, verá que os canos não estão presos de maneira rígida. Além disso, no encanamento doméstico o aquecedor de água é geralmente ajustado para que a temperatura da água não exceda 60°C (140°F) e a água fria deve estar no mínimo a 0°C, caso contrário ocorrerá congelamento. Portanto, não ocorrem variações de temperatura maiores do que 60°C em encanamentos domésticos. Não deve ser surpreendente que os canos projetados para encanamento doméstico podem não resistir se expansão ou contração forem impedidas de ocorrer, e se as variações de temperatura forem muito maiores do que as esperadas em uma casa.

20-2 A EQUAÇÃO DE VAN DER WAALS E ISOTERMAS LÍQUIDO-VAPOR

A pressões ordinárias, a maioria dos gases se comporta como um gás ideal. Entretanto, este comportamento ideal deixa de existir quando a pressão é alta o suficiente ou a temperatura é baixa o suficiente para que a massa específica do gás seja alta e as moléculas estejam, em média, mais próximas entre si. Uma equação de estado chamada de equação de van der Waals descreve o comportamento da maioria dos gases reais em uma ampla faixa de pressões de maneira mais precisa do que a equação de estado dos gases ideais ($PV = nRT$). A equação de van der Waals para n moles de gás é

$$\left(P + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - bn) = nRT \quad 20-6$$

A EQUAÇÃO DE ESTADO DE VAN DER WAALS

A constante b nesta equação surge porque as moléculas do gás não são partículas pontuais, mas objetos com tamanho finito; portanto, o volume disponível para cada molécula é reduzido. A magnitude de b é o volume de um mol de moléculas de gás. O termo an^2/V^2 surge da atração entre as moléculas. Quando uma molécula se aproxima da parede do recipiente, ela é puxada de volta pelas moléculas da vizinhança com uma força que é proporcional à massa específica dessas moléculas, n/V . Como o número de moléculas que atinge a parede em um dado intervalo de tempo também é proporcional à massa específica das moléculas, a diminuição de pressão devida à atração das moléculas é proporcional ao quadrado da massa específica e, portanto, a n^2/V^2 . A constante a depende do gás e é pequena para gases inertes, que apresentam interações químicas muito fracas. Os termos bn e an^2/V^2 são desprezíveis quando o volume V é grande e, assim, para pequenas massas específicas a equação de van der Waals se aproxima da lei dos gases ideais. Para grandes massas específicas, a equação de van der Waals fornece uma descrição muito melhor para o comportamento de gases reais do que a lei dos gases ideais.

A Figura 20-5 mostra curvas PV isotermas para uma substância em várias temperaturas. Exceto para a região na qual o líquido e o vapor coexistem, estas curvas são descritas com boa precisão pela equação de van der Waals e podem ser usadas para determinar as constantes a e b . Por exemplo, os valores destas constantes que melhor ajustam as curvas experimentais para o nitrogênio são $a = 1,370 \text{ L}^2 \cdot \text{atm/mol}^2$ e $b = 38,7 \text{ mL/mol}$. Este volume de 38,7 mL/mol é aproximadamente 0,2 por cento do volume de 22,4 L ocupado por 1 mol de gás ideal em condições normais. Como a massa molar do nitrogênio é 28,02 g/mol, se 1 mol de moléculas de nitrogênio fosse colocado em um volume de 38,7 mL, então a massa específica seria

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{28,0 \text{ g}}{38,7 \text{ mL}} = 0,724 \text{ g/mL} = 0,724 \text{ kg/L}$$

que é aproximadamente a mesma massa específica do nitrogênio líquido, 0,80 kg/L.

O valor da constante b pode ser usado para estimar o tamanho de uma molécula. Como 1 mol (N_A moléculas) de nitrogênio ocupa um volume de 38,7 cm³, o volume

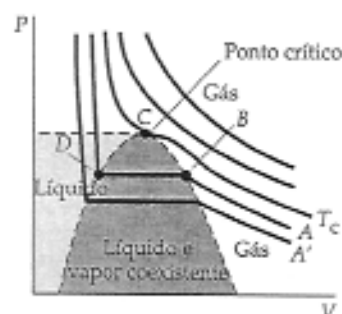


FIGURA 20-5 Isothermas no diagrama PV para uma substância. Para temperaturas acima da temperatura crítica T_c , a substância permanece gasosa para todos os valores de pressão. Exceto para a região onde o líquido e o vapor coexistem, estas curvas são muito bem descritas pela equação de van der Waals. A pressão para as porções horizontais das curvas na região sombreada é a pressão de vapor, na qual o vapor e o líquido estão em equilíbrio. Na região sombreada mais clara, à esquerda da região sombreada mais escura, a substância é um líquido e praticamente incompressível.

de uma molécula de nitrogênio é

$$V = \frac{b}{N_A} = \frac{38,7 \text{ cm}^3/\text{mol}}{6,02 \times 10^{23} \text{ moléculas/mol}} \\ = 6,43 \times 10^{-23} \text{ cm}^3/\text{molécula}$$

Se supomos que cada molécula ocupa um cubo de lado d , obtemos

$$d^3 = 6,43 \times 10^{-23} \text{ cm}^3$$

ou

$$d = 4,0 \times 10^{-8} \text{ cm} = 0,4 \text{ nm}$$

que é uma estimativa plausível para o "diâmetro" de uma molécula de nitrogênio.

Valores para as constantes a e b que resultam do melhor ajuste de curvas experimentais estão listados na Tabela 20-2.

Tabela 20-2

Os Coeficientes a e b de van der Waals para Vários Gases

	a (L ² · atm/mol ²)	b (mL/mol)
He	0,0346	23,80
Ne	0,211	17,1
Ar	1,34	32,2
Kr	2,32	39,8
Xe	4,19	51,0
H ₂	0,244	26,6
N ₂	1,370	38,70
O ₂	1,382	31,86
H ₂ O	5,46	30,5
CO ₂	3,59	42,7

Exemplo 20-5

Hélio em Alta Massa Específica

Um tanque de 20,0 L contém 300 moles de hélio a uma pressão de 400 atm. (a) Qual é o valor de an^2/V^2 , e a que fração da pressão ele corresponde? (b) Qual é o valor de bn , e a que fração do volume do recipiente ele corresponde? (c) Qual é a temperatura do hélio?

SITUAÇÃO Para determinar a temperatura, use a equação de van der Waals (Equação 20-6). Os coeficientes a e b para o hélio são encontrados na Tabela 20-2.

SOLUÇÃO

(a) Calcule an^2/V^2 e compare com 400 atm:

$$\frac{an^2}{V^2} = \frac{(0,0346 \text{ L}^2 \cdot \text{atm/mol}^2)(300 \text{ mol})^2}{(20,0 \text{ L})^2} \\ = 7,785 \text{ atm} = \boxed{7,79 \text{ atm}}$$

(7,785 atm é aproximadamente 2 por cento de 400 atm)

(b) Calcule bn e compare com 20 L:

$$bn = (0,0238 \text{ L/mol})(300 \text{ mol}) = \boxed{7,14 \text{ L}}$$

(7,14 L é aproximadamente 36 por cento de 20 L)

(c) 1. A equação de van der Waals pode ser resolvida para a temperatura:

$$\left(P + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - bn) = nRT$$

2. Obtenha os coeficientes a e b para o hélio na Tabela 20-2:

$$a = 0,0346 \text{ L}^2 \cdot \text{atm/mol}^2 \\ b = 0,0238 \text{ L/mol}$$

3. Substitua os valores e resolva para a temperatura. Com a pressão em atmosferas e o volume em litros, usamos $R = 0,082057 \text{ L} \cdot \text{atm}/(\text{mol} \cdot \text{K})$:

$$T = \frac{\left(P + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - bn)}{nR} = \frac{\left(400 + \frac{0,0346 \times 300^2}{20,0^2}\right)(20,0 - 0,0238 \times 300)}{300 \times 0,082057} \\ = \boxed{213 \text{ K}}$$

CHECAGEM Na equação de van der Waals, a correção de 2 por cento para o termo de pressão [Parte (a)] é muito pequena em comparação à correção de 36 por cento para o termo de volume [Parte (b)]. Isto está de acordo com o esperado. A correção para o termo de pressão é particularmente pequena para o hélio, porque a interação de atração entre os átomos de hélio é mais fraca do que para a maioria dos outros átomos.

A temperaturas abaixo de T_c , a equação de van der Waals descreve as partes das isotermas que estão fora da região sombreada da Figura 20-5, mas não aquelas dentro da região sombreada. Seja um gás a uma temperatura abaixo de T_c que, inicialmente, tem uma baixa pressão e um grande volume. Começamos a comprimir o gás mantendo a temperatura constante (isoterma A, na figura). Inicialmente a pressão aumenta,



Nuvem se formando atrás de uma aeronave enquanto ela rompe a barreira do som. Enquanto a aeronave se move no ar, uma região de baixa pressão se forma atrás dela. Quando a pressão desta parcela de ar cai abaixo da pressão de vapor d'água no estado gasoso, a água no ar se condensa para formar a nuvem. Diferentes condições atmosféricas fazem com que o fenômeno ocorra para diferentes velocidades da aeronave. (© Steve Skinner/Dreamstime.com.)

mas, quando atingimos o ponto B da curva tracejada, a pressão deixa de aumentar e o gás começa a se liquefazer à pressão constante. Ao longo da linha horizontal BD, na figura, gás e líquido estão em equilíbrio. Se continuamos comprimindo o gás, cada vez mais gás será liquefeito, até o ponto D da curva tracejada, onde teremos apenas líquido. Se tentamos, então, comprimir a substância ainda mais, a pressão aumentará rapidamente porque um líquido é aproximadamente incompressível.

Considere, agora, a injeção de um líquido, como água, em um recipiente selado a vácuo. Como parte da água evapora, moléculas de vapor d'água preenchem o espaço previamente vazio no recipiente. Algumas dessas moléculas colidirão com a superfície do líquido e se religarão à água líquida durante um processo chamado de *condensação*. A taxa de evaporação será inicialmente maior do que a taxa de condensação mas, finalmente, equilíbrio será atingido. A pressão na qual um líquido está em equilíbrio com seu próprio vapor é chamada de **pressão de vapor**. Se, agora, aquecemos o recipiente levemente, o líquido entrará em ebulição, mais líquido evaporará e um novo equilíbrio será estabelecido em uma pressão de vapor maior. A pressão de vapor depende, portanto, da temperatura. Podemos ver isto na Figura 20-5. Se tivéssemos começado a comprimir o gás a uma temperatura mais baixa, como na isoterma A' da Figura 20-5, a pressão de vapor seria menor, como indicado pela linha horizontal de pressão constante para A', a um valor menor de pressão. A temperatura na qual a pressão de vapor para uma substância é igual a 1 atm é o **ponto normal de ebulição** daquela substância. Por exemplo, a temperatura na qual a pressão de vapor d'água é 1,00 atm é 373 K (= 100°C); logo, esta temperatura é o ponto normal de ebulição da água. A altitudes maiores, tal como no topo de uma montanha, a pressão é menor do que 1,00 atm e, portanto, a água ferve a uma temperatura menor do que 373 K. A Figura 20-6 fornece as pressões de vapor d'água para várias temperaturas.

A temperaturas maiores do que a temperatura crítica T_c , um gás não condensará para nenhuma pressão. A temperatura crítica para o vapor d'água é 647 K (374°C). O ponto no qual a isoterma crítica intercepta a curva tracejada (ponto C) é chamado de **ponto crítico**.

20-3 DIAGRAMAS DE FASE

A Figura 20-7 é um gráfico de pressão *versus* temperatura, a volume constante, para a água. Este tipo de gráfico é chamado de **diagrama de fase**. A porção do diagrama

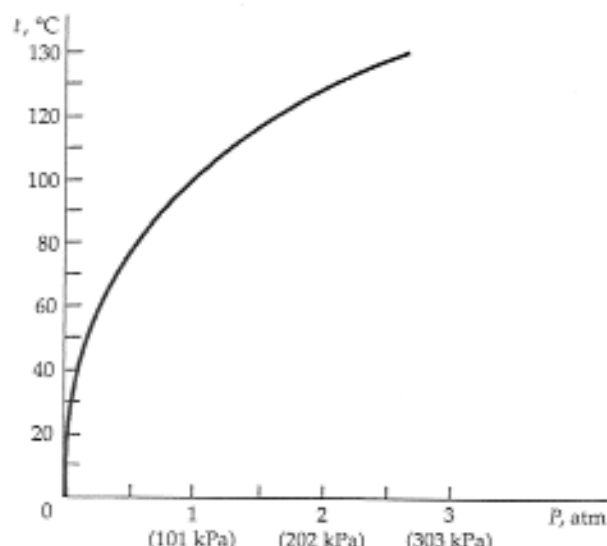


FIGURA 20-6 Ponto de ebulição da água versus pressão.

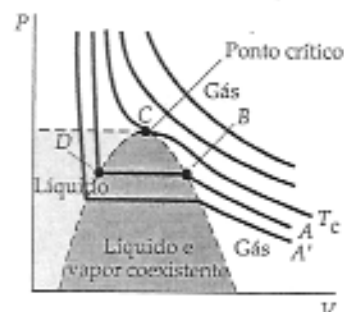


FIGURA 20-5 (repetida) Isothermas no diagrama PV para uma substância.

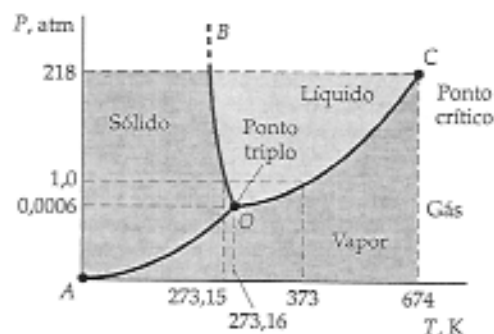


FIGURA 20-7 Diagrama de fase para a água. As escalas de pressão e de temperatura não são lineares e estão comprimidas para mostrar os pontos de interesse. A curva OC é a curva de pressão de vapor *versus* temperatura. A curva OB é a curva de fusão e a curva OA é a curva de sublimação.

entre os pontos O e C mostra a pressão de vapor *versus* temperatura. À medida que aquecemos o recipiente, a massa específica do líquido diminui e a massa específica do vapor aumenta. No ponto C do diagrama, estas massas específicas são iguais. O ponto C é chamado de *ponto crítico*. Neste ponto, e acima dele, não há distinção entre o líquido e o gás. Temperaturas de ponto crítico T_c para várias substâncias, são listadas na Tabela 20-3. A temperaturas maiores do que a temperatura crítica, um gás não condensará para nenhum valor de pressão.

Se, agora, resfriamos nosso recipiente, parte do vapor condensa em líquido enquanto voltamos pela curva OC da Figura 20-7 até que a substância atinja o ponto O. Neste ponto, o líquido começa a se solidificar. O ponto O é o *ponto triplo*, no qual as fases de vapor, líquido e sólido de uma substância podem coexistir em equilíbrio. Toda substância tem um ponto triplo único em valores específicos de temperatura e de pressão. A temperatura de ponto triplo para a água é 273,16 K (0,01°C) e a pressão de ponto triplo é 4,58 mmHg.

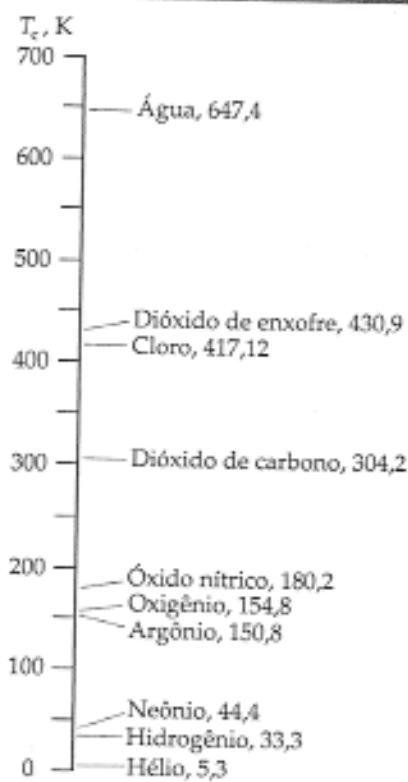
A temperaturas e pressões abaixo do ponto triplo, o líquido não pode existir. A curva OA do diagrama de fase da Figura 20-7 identifica as pressões e as temperaturas para as quais o sólido e o vapor coexistem em equilíbrio. A mudança direta de um sólido para um vapor é chamada de *sublimação*. Você pode observar a sublimação colocando pequenos cubos de gelo soltos no compartimento do congelador de um refrigerador que tenha a função de autodescongelamento. Com o tempo, o tamanho dos cubos de gelo diminuirá e, finalmente, eles desaparecerão devido à sublimação. Isto acontece porque a pressão atmosférica está muito acima da pressão do ponto triplo da água e, assim, o equilíbrio nunca é estabelecido entre o gelo e o vapor d'água. A temperatura e a pressão do ponto triplo do dióxido de carbono (CO_2) são 216,55 K e 3880 mmHg (5,1 atm), o que significa que só pode existir CO_2 líquido a pressões acima de 5,1 atm. Portanto, a pressões atmosféricas normais, CO_2 líquido não pode existir em nenhuma temperatura. Quando o sólido CO_2 se "funde", ele sublima diretamente para CO_2 gasoso, sem passar pela fase líquida, justificando o termo "gelo seco".

A curva OB da Figura 20-7 é a curva de fusão separando as fases líquida e sólida. Para uma substância como a água, para a qual a temperatura de fusão diminui com o aumento da pressão, a inclinação da curva OB é para cima e para a esquerda, a partir do ponto triplo, como na figura. Para a maioria das outras substâncias, a temperatura de fusão aumenta com o aumento da pressão. Para tais substâncias, a inclinação da curva OB é para cima e para a direita, a partir do ponto triplo.

Para que uma molécula escape (evapore) de uma substância no estado líquido, é necessária energia para romper as atrações intermoleculares na superfície do líquido. A vaporização resfria o líquido que ficou para trás. Se uma caneca de água é aquecida até ferver, sobre uma placa aquecida, este efeito de resfriamento mantém a temperatura do líquido constante no ponto de ebulição. Esta é a razão pela qual o ponto de ebulição de uma substância pode ser usado para calibrar termômetros. Entretanto, a água também pode chegar à ebulição sem aquecimento, evacuando-se o ar acima dela e diminuindo-se, portanto, a pressão aplicada. A energia necessária para a vaporização é, então, obtida da água que restou. Como resultado, a água resfriará, podendo mesmo chegar ao ponto de se formar gelo no topo da água fervente!

Tabela 20-3

Temperaturas Críticas T_c para Várias Substâncias



20-4 A TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Calor é a transferência de energia devida a uma diferença de temperatura. Esta transferência de uma posição para outra acontece através de três processos distintos: condução, convecção e radiação.

Durante a *condução*, a energia é transferida através de interações entre átomos ou moléculas, onde os átomos ou moléculas não são, eles próprios, transportados. Por exemplo, se uma extremidade de um bastão maciço é aquecida, os átomos na extremidade quente vibram com maior energia do que os da extremidade fria. A interação dos átomos mais energéticos com os menos energéticos faz com que esta energia seja transportada ao longo do bastão.*

* Se o sólido é um metal, a transferência de calor é facilitada por elétrons não localizados, que podem se mover através do metal.

Durante a **convecção**, o calor é transferido por transporte direto de matéria. Por exemplo, o ar aquecido em uma região de uma sala se expande, sua massa específica diminui e a força de empuxo exercida sobre ele pelo ar da vizinhança faz com que ele suba. A energia é, assim, transportada para cima com as moléculas de ar aquecido.

Durante a **radiação**, a energia é transferida através do espaço na forma de ondas eletromagnéticas que se movem com a rapidez da luz. Ondas de infravermelho, ondas de luz visível, ondas de rádio, ondas de televisão e raios X são, todas, formas de radiação eletromagnética que diferem entre si nos seus comprimentos de onda e frequências.

Durante todos os mecanismos de transferência de calor, a taxa de resfriamento de um corpo é aproximadamente proporcional à diferença de temperatura entre o corpo e sua vizinhança. Este resultado é conhecido como **lei de Newton para o resfriamento**.

Em muitas situações reais, todos os três mecanismos de transferência de energia ocorrem simultaneamente, apesar de um mecanismo poder ser dominante sobre os outros. Por exemplo, um aquecedor de ambiente comum usa tanto a radiação quanto a convecção. Se o elemento aquecedor é quartzo, então o mecanismo principal de transferência é a radiação. Se o elemento aquecedor é metálico (que não irradia de maneira tão eficiente quanto o quartzo), então a convecção é o mecanismo principal pelo qual a energia é transferida, com o ar aquecido subindo para ser substituído pelo ar mais frio. Geralmente, os aquecedores possuem ventiladores para acelerar o processo de convecção.

CONDUÇÃO

A Figura 20-8a mostra um bastão maciço uniforme e isolado, com seção reta de área A . Se mantemos uma extremidade do bastão a uma temperatura elevada e a outra extremidade a uma temperatura baixa, a energia será conduzida através do bastão da extremidade quente para a extremidade fria. Em regime estacionário, a temperatura varia linearmente da extremidade quente até a extremidade fria. A taxa de variação da temperatura ao longo da barra, dT/dx , é chamada de **gradiente de temperatura**.*

Seja dT a diferença de temperatura ao longo de um pequeno segmento de comprimento dx (Figura 20-8b). Se dQ é a quantidade de calor conduzida através de uma seção reta do segmento durante um intervalo de tempo dt , então a taxa de condução de calor dQ/dt é chamada de **corrente térmica** I . Foi observado experimentalmente que a corrente térmica é proporcional ao gradiente de temperatura e à área de seção reta A :

$$I = \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx}$$

20-7

DEFINIÇÃO: CORRENTE TÉRMICA

! Calor transporta energia de uma região de maior temperatura para uma região de menor temperatura; logo, a corrente térmica é no sentido da diminuição da temperatura.



FIGURA 20-8 (a) Um bastão condutor isolado com suas extremidades a duas temperaturas diferentes. (b) Um segmento do bastão de comprimento dx . A taxa na qual o calor é conduzido através de uma seção reta do segmento é proporcional à área de seção reta do bastão e à queda de temperatura dT ao longo do segmento, e é inversamente proporcional ao comprimento do segmento.

* O gradiente de temperatura é, na verdade, um vetor. A orientação deste vetor é no sentido do aumento mais rápido da temperatura, e a magnitude deste vetor é a taxa de variação da temperatura em relação à distância, ao longo dessa orientação.

A constante de proporcionalidade k , chamada de *condutividade térmica*, depende da composição do bastão.* O calor é transferido no sentido da diminuição da temperatura. Isto é, se a temperatura aumenta com o aumento de x , então a transferência de calor é no sentido negativo da direção x , e vice-versa. No SI, a corrente térmica é expressa em watts e a condutividade térmica é expressa em $W/(m \cdot K)$.[†] Em cálculos práticos realizados nos Estados Unidos, a corrente térmica geralmente é expressa em Btu por hora, a área é expressa em pés quadrados, o comprimento (ou espessura) é expresso em polegadas e a temperatura é expressa em graus Fahrenheit. A condutividade térmica é, então, dada em $Btu \cdot in/(h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F)$. A Tabela 20-4 fornece a condutividade térmica para vários materiais.

Se resolvemos a Equação 20-7 para a diferença de temperatura, obtemos

$$|\Delta T| = I \frac{|\Delta x|}{kA} \quad 20-8$$

ou

$$\Delta T = IR \quad 20-9$$

QUEDA DE TEMPERATURA VERSUS CORRENTE

onde ΔT é a queda de temperatura no sentido da corrente térmica e $|\Delta x|/(kA)$ é a resistência térmica R :

$$R = \frac{|\Delta x|}{kA} \quad 20-10$$

DEFINIÇÃO: RESISTÊNCIA TÉRMICA

Tabela 20-4 Condutividades Térmicas k para Vários Materiais

k , Btu·in/(h·ft ² ·°F)		k , W/(m·K)
(2980)	Prata	(429)
(2780)	Cobre	(401)
(2450)	Chumbo	(353)
(2200)	Ouro	(318)
(1644)	Alumínio	(237)
(558)	Ferro	(80,4)
(319)	Aço	(46)
(6-9)	Concreto	(0,19-1,3)
(5-6)	Vidro	(0,7-0,9)
(4,22)	Água a 27°C	(0,609)
(4,11)	Gelo	(0,592)
(1,02)	Carvalho	(0,15)
(0,78)	Pinho	(0,11)
(0,18)	Ar a 27°C	(0,026)

PROBLEMA PRÁTICO 20-1

Calcule a resistência térmica de uma barra de alumínio de 15,0 cm² de área de seção reta e 2,00 cm de espessura.

PROBLEMA PRÁTICO 20-2

Que espessura seria necessária para uma barra de prata ter a mesma resistência térmica de uma camada, de mesma área, de 1,00 cm de espessura de ar?

Em muitos problemas práticos, estamos interessados na taxa de transferência de calor através de dois ou mais condutores (ou isolantes) em série. Por exemplo, podemos desejar saber o efeito de adicionar um material isolante de certas espessura e condutividade térmica no espaço entre duas camadas de uma parede. A Figura 20-9 mostra duas barras de materiais condutores térmicos com seção reta de mesma área, mas feitas de materiais diferentes e com espessuras diferentes. Seja T_1 a temperatura no lado mais quente, T_2 a temperatura na interface entre as barras e T_3 a temperatura no lado mais frio. Em condições estacionárias de transferência de calor, a corrente térmica I através de cada barra deve ser a mesma. Isto é consequência da conservação da energia; para transferência estacionária, a taxa na qual a energia entra em qualquer região deve ser igual à taxa na qual ela sai da região.

Se R_1 e R_2 são as resistências térmicas das duas barras, aplicando a Equação 20-9 obtemos, para cada barra,

$$T_1 - T_2 = IR_1$$



CHECAGEM CONCEITUAL 20-1

Em uma sala refrigerada, o tampo de uma mesa metálica parece mais frio ao ser tocado do que uma superfície de madeira, mesmo tendo a mesma temperatura. Por quê?

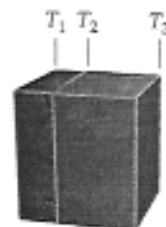


FIGURA 20-9 Duas barras condutoras térmicas de materiais diferentes, ligadas em série. A resistência térmica equivalente das barras em série é a soma das resistências térmicas individuais. A corrente térmica é a mesma em ambas.

* Não confunda a condutividade térmica com a constante de Boltzmann, que também é representada por k .

[†] Em algumas tabelas, a energia pode ser dada em calorias ou em quilocalorias e a espessura em centímetros.

e

$$T_2 - T_3 = IR_2$$

Somando estas equações obtemos

$$\Delta T = T_1 - T_3 = I(R_1 + R_2) = IR_{eq}$$

ou

$$I = \frac{\Delta T}{R_{eq}} \quad 20-11$$

onde R_{eq} é a **resistência equivalente**. Portanto, para resistências térmicas em série, a resistência equivalente é a soma das resistências individuais:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots \quad 20-12$$

RESISTÊNCIAS TÉRMICAS EM SÉRIE

Este resultado pode ser estendido a qualquer número de resistências em série. No Capítulo 25 (Volume 2) veremos que a mesma fórmula se aplica a resistências elétricas em série.

Para calcular a taxa na qual a energia está saindo de uma sala por meio de condução de calor, precisamos saber quanto calor é liberado através das paredes, das janelas, do chão e do teto. Para este tipo de problema, no qual há vários caminhos para a transferência de calor, dizemos que as resistências estão em **paralelo**. A diferença de temperatura é a mesma para cada caminho, mas a corrente térmica é diferente. A corrente térmica total é a soma das correntes térmicas através de cada um dos caminhos paralelos:

$$I_{total} = I_1 + I_2 + \dots = \frac{\Delta T}{R_1} + \frac{\Delta T}{R_2} + \dots = \Delta T \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \right)$$

ou

$$I_{total} = \frac{\Delta T}{R_{eq}} \quad 20-13$$

onde a resistência térmica equivalente é dada por

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \quad 20-14$$

RESISTÊNCIAS TÉRMICAS EM PARALELO

Encontraremos esta equação novamente no Capítulo 25 (Volume 2), ao estudarmos a condução elétrica através de resistências em paralelo. Observe que, para resistores em série (Equação 20-11) e para resistores em paralelo (Equação 20-13), I é proporcional a ΔT , o que está de acordo com a lei de Newton para o resfriamento.

ESTRATÉGIA PARA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS**Calculando a Corrente Térmica**

SITUAÇÃO Verifique se os objetos para os quais você está procurando a corrente térmica total estão em série ou em paralelo.

SOLUÇÃO

1. Usando $R = |\Delta x|/(kA)$ (Equação 20-10), determine a resistência térmica de cada objeto.
2. Para os objetos em série, use $R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots$ (Equação 20-12) para calcular a resistência equivalente.
3. Para os objetos em paralelo, use $\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$ (Equação 20-14) para determinar a resistência equivalente.

- Repita os passos 2 e 3 até que você tenha calculado a resistência equivalente de todo o sistema de objetos condutores.
- Usando $\Delta T = I_{\text{total}} R_{\text{eq}}$ (Equação 20-9), calcule a corrente térmica total.

CHECAGEM Para cada combinação de objetos em paralelo certifique-se de que a resistência equivalente é menor do que a resistência do objeto de menor resistência. Para cada combinação de objetos em série certifique-se de que a resistência equivalente é maior do que a resistência do objeto de maior resistência.

Exemplo 20-6 Duas Barras Metálicas em Série

Dois barras metálicas isoladas, cada uma com 5,0 cm de comprimento e seção reta retangular com lados de 2,0 cm e de 3,0 cm, estão calçadas entre duas paredes, uma mantida a 100°C e a outra a 0,0°C (Figura 20-10). As barras são feitas de chumbo e de prata. Determine (a) a corrente térmica total através da combinação das duas barras e (b) a temperatura na interface.

SITUAÇÃO As barras são resistores térmicos conectados em série. (a) Você pode determinar a corrente térmica total a partir de $I = R_{\text{eq}}/\Delta T$, onde a resistência equivalente R_{eq} é a soma das resistências individuais. Usando a Equação 20-10 e as condutividades térmicas dadas na Tabela 20-4, as resistências individuais podem ser determinadas. (b) Você pode determinar a temperatura na interface aplicando $I = R_1/\Delta T$, apenas à barra de chumbo, e resolvendo para ΔT em termos do valor de I encontrado na Parte (a).

SOLUÇÃO

- (a) 1. Use $\Delta T = IR$ (Equação 20-13) para relacionar a corrente térmica com a diferença de temperatura:

$$I = \frac{\Delta T}{R}$$

2. Usando $R = |\Delta x|/(kA)$ (Equação 20-10), escreva cada resistência térmica em termos das condutividades térmicas individuais e dos parâmetros geométricos:

$$R_{\text{Pb}} = \frac{|\Delta x_{\text{Pb}}|}{k_{\text{Pb}} A_{\text{Pb}}} \quad R_{\text{Ag}} = \frac{|\Delta x_{\text{Ag}}|}{k_{\text{Ag}} A_{\text{Ag}}}$$

$$R_{\text{Pb}} = \frac{0,050 \text{ m}}{353 \text{ W/(m} \cdot \text{K)} \times (0,020 \text{ m} \times 0,030 \text{ m})} = 0,236 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{Ag}} = \frac{0,050 \text{ m}}{429 \text{ W/(m} \cdot \text{K)} \times (0,020 \text{ m} \times 0,030 \text{ m})} = 0,194 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{eq}} = R_{\text{Pb}} + R_{\text{Ag}} = 0,236 + 0,194 = 0,430 \text{ K/W}$$

3. Determine R_{eq} usando a fórmula para resistores em série:

4. Use $\Delta T = IR$ (Equação 20-13) para determinar a corrente térmica:

$$I = \frac{\Delta T}{R_{\text{eq}}} = \frac{100 \text{ K}}{0,430 \text{ K/W}} = 232 \text{ W} = \boxed{0,23 \text{ kW}}$$

- (b) 1. Calcule a diferença de temperatura através da barra de chumbo usando a corrente e a resistência térmica determinadas na Parte (a):

$$\Delta T_{\text{Pb}} = IR_{\text{Pb}} = 232 \text{ W} \times 0,236 \text{ K/W} = 54,9 \text{ K} = 54,9^\circ\text{C}$$

2. Use o resultado obtido no passo anterior para determinar a temperatura na interface:

$$T_{\text{if}} = 100^\circ\text{C} - \Delta T_{\text{Pb}} = \boxed{45^\circ\text{C}}$$

CHECAGEM Conferimos o resultado para a Parte (b) calculando a queda de temperatura ao longo da barra de prata. Isto é, $\Delta T_{\text{Ag}} = IR_{\text{Ag}} = 232 \text{ W} \times 0,194 \text{ K/W} = 45^\circ\text{C}$, que está de acordo com o resultado da Parte (b). Observe que a resistência equivalente (0,43 K/W) é maior do que as resistências individuais (0,24 K/W e 0,19 K/W).

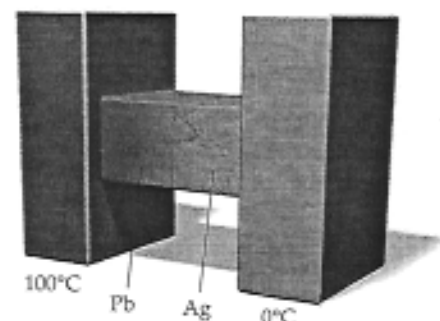


FIGURA 20-10 Duas barras de materiais condutores térmicos diferentes ligadas em série.

Exemplo 20-7 As Barras Metálicas em Paralelo

As barras metálicas do Exemplo 20-6 são, agora, dispostas como mostrado na Figura 20-11. Determine (a) a corrente térmica em cada barra, (b) a corrente térmica total e (c) a resistência térmica equivalente do sistema de duas barras.

SITUAÇÃO A corrente em cada barra é determinada por $I = \Delta T/R$, onde R é a resistência térmica da barra (determinada no Exemplo 20-6). A corrente total é a soma das correntes. A resistência equivalente pode ser encontrada a partir da Equação 20-14 ou de $I_{\text{total}} = \Delta T/R_{\text{eq}}$.

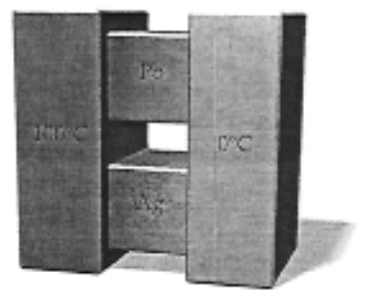


FIGURA 20-11

SOLUÇÃO

(a) Calcule a corrente térmica para cada barra:

$$I_{Pb} = \frac{\Delta T}{R_{Pb}} = \frac{100 \text{ K}}{0,236 \text{ K/W}} = 424 \text{ W} = \boxed{0,42 \text{ kW}}$$

$$I_{Ag} = \frac{\Delta T}{R_{Ag}} = \frac{100 \text{ K}}{0,194 \text{ K/W}} = 515 \text{ W} = \boxed{0,52 \text{ kW}}$$

(b) Some os resultados para determinar a corrente térmica total:

$$I_{\text{total}} = I_{Pb} + I_{Ag} = 424 \text{ W} + 515 \text{ W} = 938 \text{ W} = \boxed{0,94 \text{ kW}}$$

(c) 1. Use a Equação 20-14 para calcular a resistência equivalente das duas barras em paralelo:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_{Pb}} + \frac{1}{R_{Ag}} = \frac{1}{0,236 \text{ K/W}} + \frac{1}{0,194 \text{ K/W}}$$

$$\text{logo } R_{eq} = 0,107 \text{ K/W} = \boxed{0,11 \text{ K/W}}$$

2. Confira seu resultado usando $I_{\text{total}} = \Delta T/R_{eq}$:

$$I_{\text{total}} = \frac{\Delta T}{R_{eq}}$$

$$R_{eq} = \frac{\Delta T}{I_{\text{total}}} = \frac{100 \text{ K}}{938 \text{ W}} = \boxed{0,11 \text{ K/W}}$$

CHECAGEM Com as barras em paralelo, a diferença de temperatura é de 100 K para cada uma delas e, portanto, a corrente térmica através de cada uma é muito maior do que a corrente térmica através de cada barra do Exemplo 20-6, onde as barras estavam em série, o que fazia com que a diferença de temperatura em cada barra fosse consideravelmente menor do que 100 K. Além disso, no Exemplo 20-7 a corrente total é igual à soma das correntes nas barras, enquanto no Exemplo 20-6 a corrente total é igual à corrente em cada uma das barras. Assim, é plausível que a corrente total (938 W) no caso das barras em paralelo seja mais do que quatro vezes maior do que a corrente total (232 W) no caso das barras em série.

INDO ALÉM Observe que a resistência equivalente é menor do que cada uma das resistências individuais. Este é sempre o caso para resistores em paralelo.

Na indústria da construção, a resistência térmica de um material com uma área de seção reta de um pé quadrado é chamada de **fator R** , R_f . Considere uma lâmina de 32 ft² de um material isolante com espessura Δx e com R_f valendo 7,2. Isto é, cada pé quadrado tem uma resistência térmica de 7,2°F/(Btu/h). Os 32 pés quadrados estão em paralelo, de forma que a resistência resultante R_{res} é calculada usando-se a Equação 20-14, o que dá

$$\frac{1}{R_{\text{res}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots = \frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_f} + \dots = \frac{32}{R_f} \quad \text{logo} \quad R_{\text{total}} = \frac{R_f}{32}$$

Assim, a resistência térmica total R , em °F/(Btu/h), é igual ao fator R dividido pela área A em pés quadrados. Isto é,

$$R_{\text{res}} = \frac{R_f}{A}$$

Como a resistência resultante (total) R_{res} está relacionada à condutividade k por $R_{\text{res}} = |\Delta x|/(kA)$ (Equação 20-10), podemos expressar o fator R como

$$R_f = R_{\text{res}} A = \frac{|\Delta x|}{k} \quad 20-15$$

DEFINIÇÃO: FATOR R

onde $|\Delta x|$ é a espessura em polegadas e k é a condutividade em Btu · in/(h · ft² · °F). A Tabela 20-5 lista os fatores R para vários materiais. Em termos do fator R , a Equação 20-9 para a corrente térmica é escrita como

$$\Delta T = IR_{\text{res}} = \frac{I}{A} R_f \quad 20-16$$

Para lâminas de material isolante de mesma área e em série, R_f é substituído pelo fator R equivalente, $R_{f,eq}$

$$R_{f,eq} = R_{f1} + R_{f2} + \dots$$



FIGURA 20-12 Para uma polegada de espessura deste material, $R_i = 7.2$. (Cortesia de Eugene Mosca.)

Tabela 20-5 Fatores R , $|\Delta x|/k$, para Vários Materiais de Construção

Material	Espessura, in	R_i , $h \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{F}^\circ/\text{Btu}$
Chapa divisória		
Gesso ou estuque	0,375	0,32
Madeira compensada (pinho)	0,5	0,62
Painel de madeira ou de compensado	0,75	0,93
Aglomerado de massa específica média	1,0	1,06
Materiais de acabamento para piso		
Forração e revestimento fibroso	1,0	2,08
Piso cerâmico		0,5
Madeira de qualidade	0,75	0,68
Isolamento de telhado	1,0	2,8
Material para telhado		
Manta asfáltica para telhado		0,15
Telha revestida de asfalto		0,44
Janelas		
Vidraça simples		0,9
Vidraça dupla		1,8

Para placas paralelas, calculamos a corrente térmica através de cada camada e somamos todas essas correntes para obter a corrente total.

Exemplo 20-8 Perda de Calor Através do Telhado

Rico em Contexto

Você está auxiliando a família de seu amigo a colocar novas telhas revestidas de asfalto no telhado do chalé de inverno. O telhado, de $60 \text{ ft} \times 20 \text{ ft}$ ($18 \text{ m} \times 6 \text{ m}$), é feito de chapas de madeira de pinho, de 1,0 in (20 cm) de espessura, cobertas com telhas revestidas de asfalto. Há um espaço disponível de 8,0 in para isolamento do telhado e a família de seu amigo está se perguntando qual seria a diferença, na conta de energia, se eles instalassem uma camada de duas polegadas de isolamento. Sabendo que você estuda física, eles pedem sua opinião.

SITUAÇÃO Para avaliar a situação, primeiro você calcula o fator R para cada camada de telhado. Como as camadas estão em série, o fator R equivalente é apenas a soma dos fatores R individuais. O objetivo é calcular o fator R equivalente do telhado com e sem o isolamento. Os fatores R para as telhas revestidas de asfalto e para o isolamento de telhado são encontrados na Tabela 20-5. O fator R para o pinho é calculado a partir de sua condutividade térmica, que é encontrada na Tabela 20-4. Observe que, quando você cobre um telhado, as telhas se sobrepõem, o que faz com que haja duas camadas de telhas revestidas de asfalto no telhado.

SOLUÇÃO

1. Para uma combinação em série, o fator R equivalente é a soma dos fatores R individuais: $R_{\text{eq}} = R_{\text{pin}} + R_{\text{asf}} + R_{\text{isol}}$

- O fator R para a dupla camada de telhas é o dobro do fator R para uma camada:
- O fator R para um isolamento de telhado de 2,0 in (5,0 cm) é o dobro do de 1,0 in (2,5 cm):
- O fator R para uma espessura de 1,0 in de pinho é obtido da condutividade:
- O fator R equivalente sem o isolamento é:
- O fator R equivalente com isolamento é:
- Comparamos os dois fatores R equivalentes escrevendo a razão entre eles:
- Adicionando-se o isolamento, a taxa de perda de calor por pé quadrado é reduzida em 72 por cento. Trata-se de 72 por cento de uma grande perda de calor ou de uma pequena perda de calor? Usando a Equação 20-16, calculamos a corrente térmica I' através de todo o telhado:
- Para completar o cálculo, estimamos que a temperatura no interior do chalé seja mantida a 70°F e que a temperatura no lado de fora durante o inverno seja, tipicamente, 40°F mais fria:
- A instalação do isolamento do telhado com 2,0 in de espessura reduz a perda de calor através do telhado em 16.000 Btu/h. O chalé é aquecido com propano e o conteúdo de energia do propano é de 92.000 Btu/galão. O isolamento do telhado reduz o consumo em aproximadamente 4,2 galões de propano a cada 24 h de uso.

$$R_{\text{tel}} = 2(0,44 \text{ h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}/\text{Btu}) = 0,88 \text{ h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}/\text{Btu}$$

$$R_{\text{isol}} = 2(2,8 \text{ h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}/\text{Btu}) = 5,6 \text{ h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}/\text{Btu}$$

$$R_{\text{pin}} = \frac{\Delta x_p}{k_p} = \frac{1,0 \text{ in}}{0,78 \text{ Btu} \cdot \text{in}/(\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F})} = 1,28 \text{ h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}/\text{Btu}$$

$$R'_{\text{eq}} = R_{\text{pin}} + R_{\text{tel}} = 1,28 \text{ h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}/\text{Btu} + 0,88 \text{ h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}/\text{Btu} = 2,16 \text{ h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}/\text{Btu} = 2,2 \text{ h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}/\text{Btu}$$

$$R_{\text{eq}} = R_{\text{pin}} + R_{\text{tel}} + R_{\text{isol}} = R'_{\text{eq}} + R_{\text{isol}} = 2,16 \text{ h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}/\text{Btu} + 5,6 \text{ h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}/\text{Btu} = 7,76 \text{ h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}/\text{Btu}$$

$$\frac{R'_{\text{eq}}}{R_{\text{eq}}} = \frac{2,16}{7,76} = 0,28$$

$$\Delta T = IR_{\text{eq}} = \frac{I}{A} R_{\text{eq}}$$

$$I' = \frac{A}{R'_{\text{eq}}} \Delta T = \frac{(60 \text{ ft})(20 \text{ ft})}{2,16 \text{ h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}/\text{Btu}} \Delta T = [556 \text{ (Btu/h)/}^\circ\text{F}] \Delta T = [5,6 \times 10^2 \text{ (Btu/h)/}^\circ\text{F}] \Delta T$$

$$I' = [556 \text{ (Btu/h)/}^\circ\text{F}] \Delta T = [556 \text{ (Btu/h)/}^\circ\text{F}] (40^\circ\text{F}) = 22.200 \text{ Btu/h}$$

$$e \quad I = 0,28 I' = 0,28 (22.200 \text{ Btu/h}) = 6.200 \text{ Btu/h}$$

logo, a redução causada pelo isolamento é

$$I' - I = 22.200 \text{ Btu/h} - 6.200 \text{ Btu/h} = 16 \times 10^3 \text{ Btu/h}$$

O propano custa cerca de \$3,00 o galão; logo, isto representa uma economia de aproximadamente \$12,60 por dia, ou \$376 por mês durante os meses frios. A família de seu amigo está impressionada com o potencial de economia (e as vantagens de seus conhecimentos em física). Eles decidem instalar a camada de 2,0 in de isolamento no telhado.

CHECAGEM Não deve ser surpreendente o fato de que a instalação de algum isolamento reverte em uma economia significativa.

INDO ALÉM Estas estimativas de custo não incluem o custo de aquisição e instalação do isolamento.

PROBLEMA PRÁTICO 20-3 Que economia adicional seria possível acrescentando-se mais isolamento ao telhado?

A condutividade térmica do ar é muito pequena, se comparada à de materiais sólidos, o que faz do ar um isolante térmico muito bom. Entretanto, quando há um grande espaço com ar — digamos, entre uma janela externa de proteção e uma janela interna — a eficiência do isolamento do ar é enormemente reduzida pela convecção. Sempre que houver uma diferença de temperatura entre diferentes partes do espaço contendo ar, correntes de convecção rapidamente equalizarão a temperatura e, portanto, a condutividade efetiva aumentará significativamente. Para janelas externas de proteção, espaçamentos de ar de cerca de 1 a 2 cm são o mais indicado. Espaçamentos maiores de ar acabam por reduzir a resistência térmica de uma janela dupla, devido à convecção.

As propriedades isolantes do ar são aproveitadas de maneira mais eficiente quando o ar é aprisionado em pequenos bolsões que previnem a ocorrência da convecção. Este é o princípio por trás das excelentes propriedades isolantes das penas de ganso e do isopor.

Se você tocar a superfície interior de uma janela de vidro quando está frio no lado de fora, você observará que a superfície está consideravelmente mais fria do que

o ar no interior. A resistência térmica das janelas é devida, principalmente, a filmes finos de ar isolante que aderem a cada um dos lados da superfície de vidro. A espessura do vidro tem pouco efeito sobre a resistência térmica total. Os filmes de ar tipicamente adicionam um fator R de cerca de 0,45 para cada lado. Assim, o fator R de uma janela com N vidraças separadas é aproximadamente $0,90N$, devido aos dois lados de cada vidraça. Quando venta, o filme de ar do lado de fora pode ser significativamente reduzido, reduzindo o fator R da janela.

CONVECÇÃO

Convecção é a transferência de calor por transporte do próprio meio material. Esta propriedade térmica é responsável pelas grandes correntes dos oceanos, como também pela circulação global da atmosfera. No caso mais simples, a convecção surge quando um fluido (gás ou líquido) é aquecido embaixo. O fluido aquecido então se expande e sobe, enquanto o fluido mais frio desce. A descrição matemática da convecção é muito complexa, porque o fluxo depende da diferença de temperatura em diferentes partes do fluido e esta diferença de temperatura também é afetada pelo próprio fluxo.

O calor transferido de um objeto para sua vizinhança, por convecção, é aproximadamente proporcional à área do objeto e à diferença de temperatura entre o objeto e o fluido que o cerca. É possível escrever uma equação para o calor transferido por convecção e definir um coeficiente de convecção, mas as análises de problemas práticos envolvendo convecção são bastante complexas e não são discutidas aqui.

RADIAÇÃO

Todos os objetos emitem e absorvem radiação eletromagnética. Quando um objeto está em equilíbrio térmico com sua vizinhança, ele emite e absorve radiação na mesma taxa. A taxa na qual um objeto irradia energia é proporcional à área de sua superfície e à quarta potência de sua temperatura absoluta. Este resultado, determinado empiricamente por Josef Stefan em 1879 e deduzido teoricamente por Ludwig Boltzmann cerca de cinco anos mais tarde, é chamado de **lei de Stefan-Boltzmann**:

$$P_r = \epsilon \sigma A T^4 \quad 20-17$$

LEI DE STEFAN-BOLTZMANN

onde P_r é a potência irradiada, A é a área da superfície, σ é uma constante universal chamada de constante de Stefan, que vale

$$\sigma = 5,6703 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4) \quad 20-18$$

e ϵ é a **emissividade** da superfície que irradia, uma quantidade adimensional entre 0 e 1 que é dependente da composição da superfície do objeto.

Quando a radiação eletromagnética atinge um objeto opaco, parte da radiação é refletida e parte é absorvida. Objetos coloridos refletem a maior parte da radiação visível, enquanto objetos escuros absorvem a maior parte dela. A taxa na qual um objeto absorve radiação é dada por

$$P_a = \epsilon \sigma A T_0^4 \quad 20-19$$

onde T_0 é a temperatura da fonte de radiação e ϵ é a emissividade da superfície do objeto que está absorvendo.

Seja um corpo a uma temperatura T cercado por corpos a uma temperatura T_0 . Se o corpo emite energia radiante a uma taxa maior do que absorve, então ele se resfria enquanto sua vizinhança absorve radiação e se aquece. Se o corpo absorve energia radiante a uma taxa maior do que emite, então ele se aquece e sua vizinhança se resfria. A potência resultante irradiada por um corpo a uma temperatura T em um ambiente a uma temperatura T_0 é

$$P_{\text{res}} = \epsilon \sigma A (T^4 - T_0^4) \quad 20-20$$

Quando um corpo está em equilíbrio térmico com sua vizinhança, $T = T_0$ e o corpo emite e absorve radiação à mesma taxa.

Um corpo que absorve toda a radiação incidente sobre ele tem uma emissividade igual a 1 e é chamado de **corpo negro**. Um corpo negro é, também, um radiador ideal.

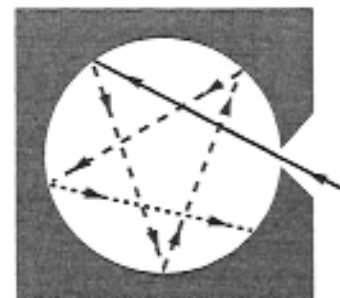


FIGURA 20-13 Um orifício em uma cavidade se aproxima de um corpo negro ideal. A radiação que entra na cavidade tem pouca chance de sair dela antes de ser completamente absorvida. A radiação emitida pelo orifício (não mostrada) é, portanto, característica da temperatura das paredes da cavidade.

O conceito de corpo negro é importante porque as características da radiação emitida por este tipo de corpo ideal podem ser calculadas teoricamente. Materiais como o veludo preto estão muito próximos de serem corpos negros ideais. A melhor aproximação prática de um corpo negro ideal é um pequeno orifício em uma cavidade, como um buraco de fechadura na porta de um armário (Figura 20-13). A radiação incidente sobre o orifício tem pouca chance de ser refletida para fora antes que as paredes a absorvam. Assim, a radiação emitida pelo orifício é característica da temperatura das paredes da cavidade.

A radiação emitida por um corpo a temperaturas abaixo de aproximadamente 600°C não é visível a olho nu. A radiação de corpos à temperatura ambiente está concentrada em comprimentos de onda muito maiores do que os da luz visível. Quando um corpo é aquecido, a taxa de emissão de energia aumenta e a energia irradiada atinge frequências maiores (e menores comprimentos de onda). Entre 600°C e 700°C, aproximadamente, uma quantidade suficiente da energia irradiada está no espectro visível e o corpo brilha com uma coloração vermelho-escuro. A temperaturas mais elevadas, ele pode emitir um vermelho mais vivo ou, até mesmo, um "branco quente". A Figura 20-14 mostra a potência irradiada por um corpo negro como função do comprimento de onda, para três temperaturas diferentes. O comprimento de onda para o qual a potência é máxima varia inversamente com a temperatura, um resultado conhecido como lei do deslocamento de Wien:

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}}{T} \quad 20-21$$

LEI DO DESLOCAMENTO DE WIEN

Esta lei é usada para determinar a temperatura das superfícies de estrelas pela análise de sua radiação. Ela também pode ser usada para mapear a variação de temperatura em diferentes regiões da superfície de um corpo. Tal mapa é chamado de termograma. Os termogramas podem ser usados para detectar câncer, pois o tecido canceroso provoca um aumento da circulação, o que produz um pequeno aumento da temperatura da pele.

As curvas de distribuição espectral mostradas na Figura 20-14 desempenharam um papel importante na história da física. Foi a discrepância entre os cálculos teóricos (usando termodinâmica clássica) usados para gerar as distribuições espectrais de corpo negro e as medidas experimentais das distribuições espectrais que conduziram às primeiras idéias de Max Planck sobre a quantização da energia em 1900.

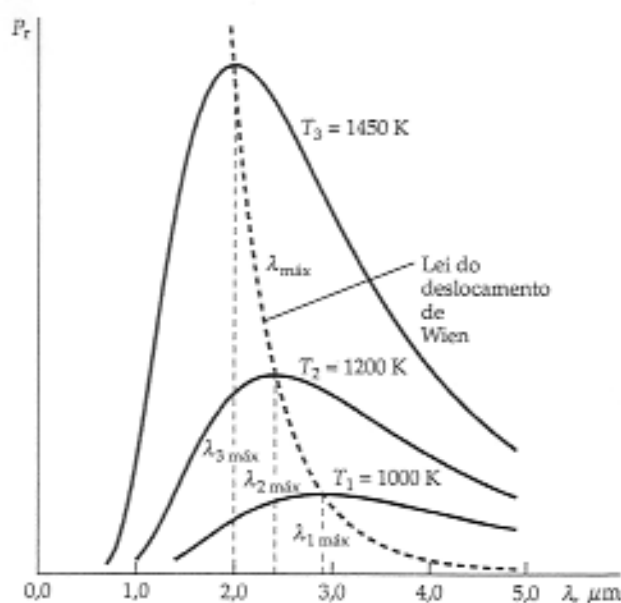


FIGURA 20-14 Potência irradiada versus comprimento de onda para a radiação emitida por um corpo negro. A temperatura da superfície emissora está indicada em cada curva do gráfico. O comprimento de onda $\lambda_{\text{máx}}$ para o qual a potência emitida é máxima varia inversamente com a temperatura absoluta T da superfície do corpo negro.

Exemplo 20-9 A Radiação do Sol

(a) A radiação emitida pela superfície do Sol tem uma potência máxima em um comprimento de onda de 500 nm. Supondo que o Sol seja um emissor do tipo corpo negro, qual é a temperatura de sua superfície? (b) Calcule $\lambda_{\text{máx}}$ para um corpo negro à temperatura ambiente, $T = 300 \text{ K}$.

SITUAÇÃO A temperatura da superfície e o comprimento de onda de máxima emissão de potência estão relacionados por $\lambda_{\text{máx}} = 2,898 \text{ mm} \cdot \text{K} / T$ (Equação 20-21).

SOLUÇÃO

(a) Podemos determinar T , conhecendo $\lambda_{\text{máx}}$ e usando a lei do deslocamento de Wien:

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}}{T} \quad \text{logo}$$

$$T = \frac{2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}}{\lambda_{\text{máx}}} = \frac{2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}}{500 \text{ nm}} = \boxed{5800 \text{ K}}$$

(b) Podemos determinar $\lambda_{\text{máx}}$ para $T = 300 \text{ K}$, usando a lei do deslocamento de Wien:

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}}{300 \text{ K}} = 9,66 \times 10^{-6} \text{ m} = \boxed{9,66 \mu\text{m}}$$

CHECAGEM O resultado da Parte (b) para $\lambda_{\text{máx}}$ é 19 vezes maior do que 500 nm (o valor de $\lambda_{\text{máx}}$ para o Sol) e o resultado da Parte (a), de 5800 K para a temperatura da superfície do Sol, é 19 vezes maior do que 300 K, a temperatura da superfície do corpo na Parte (b). A lei de Wien diz que $\lambda_{\text{máx}}$ é inversamente proporcional à temperatura do emissor; logo, os resultados calculados estão de acordo com o esperado.

INDO ALÉM O comprimento de onda do pico para o Sol está no espectro visível. O espectro de radiação de corpo negro descreve o espectro de radiação do Sol muito bem; logo o Sol é, de fato, um bom exemplo de corpo negro.

Para $T = 300$ K, o espectro tem um pico no infravermelho, em comprimentos de onda muito maiores do que os comprimentos de onda visíveis. As superfícies que não são negras aos nossos olhos podem se comportar como corpos negros para irradiação e absorção no infravermelho. Por exemplo, foi experimentalmente verificado que a pele de todos os seres humanos absorve toda a radiação no infravermelho; assim, a emissividade da pele é 1,00 para este processo de radiação.

Exemplo 20-10 Radiação do Corpo Humano

Tente Você Mesmo

Calcule a taxa resultante de calor perdido como energia de radiação para uma pessoa nua em uma sala a 20°C, supondo que a pessoa seja um corpo negro com uma área superficial de 1,4 m² e uma temperatura superficial de 33°C (= 306 K). (A temperatura superficial do corpo humano é levemente menor do que a temperatura interna de 37°C, por causa da resistência térmica da pele.)

SITUAÇÃO Use $P_{\text{res}} = \epsilon \sigma A(T^4 - T_0^4)$ com $\epsilon = 1$, $T = 306$ K e $T_0 = 293$ K, para determinar a diferença entre as potências emitida e absorvida.

SOLUÇÃO

Cubra a coluna da direita e tente por si só antes de olhar as respostas.

Passos

Use $P_{\text{res}} = \epsilon \sigma A(T^4 - T_0^4)$ com $\epsilon = 1$, $T = 306$ K e $T_0 = 293$ K.

Respostas

$$P_{\text{res}} = 111 \text{ W} = \boxed{0,11 \text{ kW}}$$

CHECAGEM Uma taxa de 0,11 kW é igual a 2300 kcal/dia. Esta é a ordem de grandeza correta.

INDO ALÉM Esta grande perda de energia é aproximadamente igual à taxa metabólica basal de cerca de 120 W. Nós nos protegemos desta grande perda de energia usando roupas que, devido à sua baixa condutividade térmica, têm uma temperatura externa muito menor e, portanto, uma taxa muito menor de radiação térmica.

Quando a temperatura T de um corpo não é tão diferente da temperatura T_0 de sua vizinhança, o corpo ao irradiar obedece à lei de Newton para o resfriamento. Podemos ver isto escrevendo a Equação 20-20 como

$$\begin{aligned} P_{\text{res}} &= \epsilon \sigma A(T^4 - T_0^4) = \epsilon \sigma A(T^2 + T_0^2)(T^2 - T_0^2) \\ &= \epsilon \sigma A(T^2 + T_0^2)(T + T_0)(T - T_0) \end{aligned}$$

Quando $T - T_0$ é pequeno, podemos substituir T por T_0 nas duas somas, sem mudar muito o resultado. Então,

$$P_{\text{res}} \approx \epsilon \sigma A(T_0^2 + T_0^2)(T_0 + T_0)(T - T_0) = 4\epsilon \sigma AT_0^3 \Delta T$$

A potência resultante irradiada é aproximadamente proporcional à variação da temperatura, em concordância com a lei de Newton para o resfriamento. Este resultado também pode ser obtido usando-se a aproximação diferencial:

$$\Delta P_r \approx \left. \frac{dP_r}{dT} \right|_{T=T_0} (T - T_0)$$

onde $P_r = \epsilon \sigma A(T^4 - T_0^4)$. Para uma pequena variação da temperatura $T - T_0$, temos

$$\Delta P_r = \epsilon \sigma A 4T_0^3 \left| \frac{d}{dT} \right|_{T=T_0} (T - T_0) = 4\epsilon \sigma AT_0^3 \Delta T$$

Ilhas Urbanas de Calor: Noites Quentes na Cidade

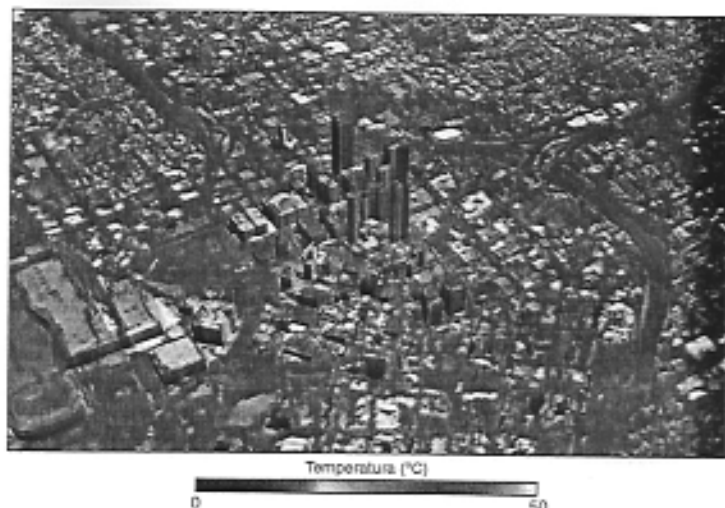
Em 1820, Luke Howard publicou registros com listagens da temperatura de Londres e de seus subúrbios durante o dia e a noite, ao longo de vários anos. Seus registros mostraram que Londres era mais quente do que sua vizinhança suburbana e de áreas rurais, e que esta diferença era mais pronunciada durante a noite. Ele descobriu que Londres era, em média, 2,1°C mais quente à noite do que a área rural dos arredores.⁴ Em 2004, observações mostraram que, no verão, Fênix (nos EUA) poderia estar 10°C mais quente à noite do que sua vizinhança.⁵ Londres e Fênix são ilhas urbanas de calor. Em geral, as cidades com ruas pavimentadas e muitos edifícios são mais quentes do que sua vizinhança rural.

Um fator importante na formação dessas ilhas urbanas é a falta de árvores e de outras plantas. Durante o dia, as plantas resfriaram a área ao seu redor, devido à quantidade de água que elas liberam, que tem um grande calor latente. Nas áreas rurais, e mesmo em áreas verdes dentro das cidades, muita energia é usada para suprir o calor latente da água, em vez de aumentar a temperatura da superfície.⁶ Além disso, as plantas refletem boa parte dos comprimentos de onda na região do infravermelho (calor) da radiação solar, enquanto o asfalto, o aço, o vidro, o concreto e o alumínio absorvem e retêm os comprimentos de onda do infravermelho. Outro fator é a geometria de uma cidade. Cânions urbanos, formados por edifícios altos nos dois lados das ruas, refletem o infravermelho para outras superfícies absorventes.⁷ Áreas abertas permitem que o calor seja irradiado do solo e das estruturas próximas.

Além do calor irradiado, a água das chuvas em áreas urbanas pode ser aquecida por condução, ao escoar. Em agosto de 2001, uma tempestade no estado de Iowa, nos Estados Unidos, aumentou a temperatura de um rio em 10,5°C em uma hora, o que matou muitos peixes.⁸ A água da chuva, enquanto caía, estava mais fria do que a do rio, mas a maior parte da água que entrava no rio naquela primeira hora tinha escoado sobre pavimento quente. Aumentos súbitos de temperatura desse tipo têm sido observados em rios urbanos em Minnesota, Wisconsin, Oregon,⁹ e Califórnia.¹

Em 1996, para dar suporte às Olimpíadas, um esforço de medidas meteorológicas sem precedentes ocorreu próximo de Atlanta, na Geórgia (EUA).¹⁰ Uma revelação interessante deste esforço foi que ocorreram mais precipitações na área da cidade que não recebia diretamente o vento, em virtude das alterações de padrões climáticos causadas por convecções típicas de ilhas urbanas de calor.¹¹ Fenômenos semelhantes também foram observados em outras cidades.¹² Estas alterações são complexas, mas seus efeitos são mensuráveis.

Planejadores urbanos estão implementando maneiras de resfriar as ilhas urbanas de calor.¹³ Em Chicago (EUA), a prefeitura agora tem um "telhado verde" com plantas e calçadas refletoras. A temperatura do teto é monitorada e comparada com o teto asfaltado de um edifício próximo. A temperatura do teto com plantas pode ser mais de 33°C menor que a do teto asfaltado.¹⁴ Muitas cidades estimulam o plantio de árvores¹⁵ e outras estimulam o uso de superfícies refletoras,¹⁶ pavimentos permeáveis e telhados verdes.¹⁷ Ilhas urbanas de calor estão sendo controladas por tecnologias frias.



Os lados dos edifícios opostos ao Sol aparecem mais escuros, neste termograma de Atlanta, na Geórgia. Isso acontece porque esses lados são mais resfriados do que aqueles que recebem diretamente a luz do Sol. As regiões mais claras correspondem às temperaturas mais altas. (Nasa/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio.)

- ⁴ Howard, Luke, *The Climate of London, Deduced from Meteorological Observations Made in the Metropolis and Various Places around It*, 2nd ed. London: Harvey and Darton, 1833.
- ⁵ Fast, J. D., Turcotte, J. C., and Redman, R., "Pseudovertical Temperature Profiles and the Urban Heat Island Measured by a Temperature Datalogger Network in Phoenix, Arizona," *Journal of Applied Meteorology*, Jan. 2005, Vol. 44, No. 1, 3–13.
- ⁶ Souch, C., and Grimmond, S., "Applied Climatology: Urban Climate," *Progress in Physical Geography*, Feb. 2006, Vol. 30, No. 2, 270–279.
- ⁷ Kusaka, H., and Kimura, F., "Thermal Effects of Urban Canyon Structure on the Nocturnal Heat Island: Numerical Experiment Using a Mesoscale Model Coupled with an Urban Canopy Model," *Journal of Applied Meteorology*, Dec. 2004, Vol. 43, No. 12, 1899–1910.
- ⁸ Boshart, R., "Urban Trout Stream Still in Works—DNR Targeting McCloud Run in C. R., Despite Recent Fish Kill," *The Gazette*, Aug. 9, 2001, B1+.
- ⁹ Frazer, Lance, "Paving Paradise: The Perils of Impervious Surfaces," *Environmental Health Perspectives*, Jul. 2005, Vol. 113, No. 7, 456–462.
- ¹⁰ Fowler, B., and Rasmus, J., "Seaside Solution," *Civil Engineering*, Dec. 2005, 44–49.
- ¹¹ Skindrud, Erik, "Georgia on Their Minds," *Science News*, Jul. 13, 1996. <http://www.sciencenews.org/>
- ¹² Dixon, P. G., and Mole, T. L., "Patterns and Causes of Atlanta's Urban Heat Island-Initiated Precipitation," *Journal of Applied Meteorology*, Sept. 2003, Vol. 42, No. 9, 1273–1284.
- ¹³ Shepard, J., Pierce, H., and Negri, A., "Rainfall Modification by Major Urban Areas: Observations from Spaceborne Rain Radar on the TRMM Satellite," *Journal of Applied Meteorology*, Jul. 2002, Vol. 41, No. 7, 689–701 e "Urban-related Weather Anomalies," *Science News*, Mar. 5, 1977, Vol. 111, No. 10, 152.
- ¹⁴ Wade, B., "Putting the Freeze on Heat Islands," *American City & County*, Feb. 2000, 30–40.
- ¹⁵ "Monitoring the Rooftop Garden's Benefits," City of Chicago Department of Environment, <http://chicagoecotops.notlong.com>
- ¹⁶ Duncan, H., "Trees, Please: More Cities Enacting Tree Ordinances, but Enforcement Is the Age-Old Problem," *Maclean's*, July 6, 2006, A1.
- ¹⁷ "NASA Assesses Strategies to Turn Off the Heat in New York City," *Engineered Systems*, April 2006, 79–80.
- ¹⁸ Hoffman, L., "Green Roof Storm Water Modeling," *BioCycle*, Feb. 2006, 38–40.

Resumo

TÓPICO	EQUAÇÕES RELEVANTES E OBSERVAÇÕES
1. Expansão Térmica	
Coefficiente de expansão linear	$\alpha = \frac{\Delta L/L}{\Delta T} \quad 20-2$
Coefficiente de expansão volumétrica	$\beta = \frac{\Delta V/V}{\Delta T} = 3\alpha \quad 20-4, 20-5$
2. A Equação de Estado de van der Waals	A equação de estado de van der Waals descreve o comportamento de gases reais em um amplo intervalo de temperatura e pressão, levando em conta o espaço ocupado pelas próprias moléculas do gás e a atração entre elas. $\left(P + \frac{an^2}{v^2}\right)(V - bn) = nRT \quad 20-6$
3. Pressão de Vapor	A pressão de vapor é a pressão na qual as fases líquida e gasosa de uma substância estão em equilíbrio a uma dada temperatura. O líquido ferve na temperatura para a qual a pressão externa é igual à pressão de vapor.
4. O Ponto Triplo	O ponto triplo é um dos valores únicos de temperatura e pressão nos quais as fases gasosa, líquida e sólida de uma substância podem coexistir em equilíbrio. Em temperaturas e pressões abaixo do ponto triplo, a fase líquida de uma substância não pode existir.
5. Transferência de Calor	Os três mecanismos pelos quais energia é transferida devido à diferença de temperatura são radiação, condução e convecção.
Lei de Newton para o resfriamento	Para todos os mecanismos de transferência de calor, se a diferença de temperatura entre um corpo e sua vizinhança for pequena, a taxa de resfriamento do corpo é aproximadamente proporcional à diferença de temperatura.
6. Condução de Calor	
Corrente	A taxa de condução de calor é dada por $I = \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad 20-7$ onde I é a corrente térmica, k é o coeficiente de condutividade térmica e dT/dx é o gradiente de temperatura.
Resistência térmica	$\Delta T = IR \quad 20-9$ onde ΔT é o decréscimo da temperatura no sentido da corrente térmica e R é a resistência térmica: $R = \frac{ \Delta x }{kA} \quad 20-10$
Resistência equivalente:	
em série	$R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots \quad 20-12$
em paralelo	$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \quad 20-14$
Fator R	O fator R é a resistência térmica em unidades de $\text{in} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}/(\text{Btu}/\text{h})$ para um pé quadrado de uma lâmina de um material $R_1 = R_{ma}A = \frac{ \Delta x }{k} \quad 20-15$
7. Radiação Térmica	
Taxa de potência irradiada	$P_r = e\sigma AT^4 \quad 20-17$ onde $\sigma = 5,6703 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ é a constante de Stefan e e é a emissividade, que varia entre 0 e 1 (dependendo da composição da superfície do corpo). Materiais que são bons absorvedores de calor também são bons irradiadores de calor.

TÓPICO	EQUAÇÕES RELEVANTES E OBSERVAÇÕES
Potência resultante irradiada por um corpo à temperatura T para a sua vizinhança à temperatura T_0	$P_{\text{res}} = \epsilon \sigma A(T^4 - T_0^4)$ 20-20
Corpo negro	Um corpo negro tem uma emissividade de 1. Ele é um radiador perfeito e absorve toda a radiação que sobre ele incide.
Lei de Wien	O espectro de potência da energia eletromagnética irradiada por um corpo negro tem um máximo em um comprimento de onda $\lambda_{\text{máx}}$ que varia inversamente com a temperatura absoluta do corpo: $\lambda_{\text{máx}} = \frac{2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}}{T}$ 20-21

Resposta da Checagem Conceitual

- 20-1 A madeira é um mau condutor de calor e o metal é um bom condutor de calor. Quando seu dedo toca o metal, este retira calor de seu dedo mais rapidamente; logo, o dedo é resfriado a uma taxa maior do que se você tocasse a madeira.

Respostas dos Problemas Práticos

- 20-1 $0,0563 \text{ K/W} = 56,3 \text{ mK/W}$
 20-2 $\Delta x = (1 \text{ cm})(429)/(0,026) = 16500 \text{ cm} = 165 \text{ m}$
 20-3 A corrente térmica é de 6200 Btu/h com $2,0 \text{ in}$ de isolamento. Assim, a economia máxima adicional é de 6200 Btu/h , o que economizaria um gasto adicional de $\$146$ por mês, durante os meses frios.

Problemas

Em alguns problemas, você recebe mais dados do que necessita; em alguns outros, você deve acrescentar dados de seus conhecimentos gerais, fontes externas ou estimativas bem fundamentadas.

Interprete como significativos todos os algarismos de valores numéricos que possuem zeros em sequência sem vírgulas decimais.

- Um só conceito, um só passo, relativamente simples
 - Nível intermediário, pode requerer síntese de conceitos
 - Desafiante, para estudantes avançados
- Problemas consecutivos sombreados são problemas pareados.

PROBLEMAS CONCEITUAIS

- Por que o nível de mercúrio de um termômetro primeiro diminui levemente quando o termômetro é colocado em água aquecida?
- Uma grande lâmina de metal tem um orifício no meio. Quando a lâmina é aquecida, a área do orifício (a) permanecerá inalterada, (b) sempre aumentará, (c) sempre diminuirá, (d) aumentará se o orifício não estiver exatamente no centro da lâmina, (e) diminuirá apenas se o orifício estiver exatamente no centro da lâmina.
- Por que é uma má idéia colocar no congelador uma garrafa de vidro fechada, completamente cheia d'água, para fazer gelo?
- As janelas de seu laboratório de física são deixadas abertas durante a noite, quando a temperatura exterior cai bem abaixo do ponto de congelamento. Uma régua de aço e uma régua de madeira foram deixadas no peitoril da janela e, quando você chega pela manhã, elas estão, ambas, muito frias. O coeficiente de expansão linear da madeira é de aproximadamente $5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Qual das régua você deveria usar para realizar medidas mais precisas de comprimento? Explique sua resposta.
- **APLICAÇÃO EM ENGENHARIA** Tiras bimetalicas são usadas em termostatos e em disjuntores de circuitos elétricos. Elas consistem de um par de finas tiras de metais de diferentes coeficientes de expansão térmica, coladas para formar uma única tira com o dobro da espessura. Suponha que uma tira bimetalica seja construída com uma tira de aço e uma tira de cobre, e que ela seja curvada para formar um arco circular, com a tira de aço no lado externo. Se a tempe-

ratura diminui, a tira bimetalica tenderá a se retificar ou a se curvar mais ainda?

- O metal A tem um coeficiente de expansão linear três vezes maior do que o coeficiente de expansão linear do metal B. Como se comparam os coeficientes de expansão volumétrica β ? (a) $\beta_A = \beta_B$, (b) $\beta_A = 3\beta_B$, (c) $\beta_A = 6\beta_B$, (d) não é possível responder com os dados fornecidos.
- O topo do Monte Rainier está $14\,410 \text{ ft}$ (4392 m) acima do nível do mar. Os alpinistas dizem que lá não é possível cozinhar um ovo. Esta afirmação é verdadeira porque, no topo do Monte Rainier, (a) a temperatura do ar é muito baixa para ferver a água, (b) a pressão do ar é muito baixa para que o álcool do fogareiro queime, (c) a temperatura de ebulição da água não é alta o suficiente para cozinhar o ovo, (d) a quantidade de oxigênio no ar é muito baixa para que haja combustão, (e) os ovos sempre quebram nas mochilas dos alpinistas.
- Quais os gases da Tabela 20-3 que não podem ser condensados aplicando-se pressão a 20°C ? Explique sua resposta.
- Do diagrama de fase da Figura 20-15 podemos tirar a informação de como variam, com a altitude, os pontos de ebulição e de fusão da água. (a) Explique como esta informação pode ser obtida. (b) Como esta informação pode influenciar os procedimentos de cozimento nas montanhas?
- Esboce um diagrama de fase para o dióxido de carbono, usando informações da Seção 20-3.
- Explique por que o dióxido de carbono em Marte encontra-se no estado sólido nas regiões polares, mesmo sabendo que a

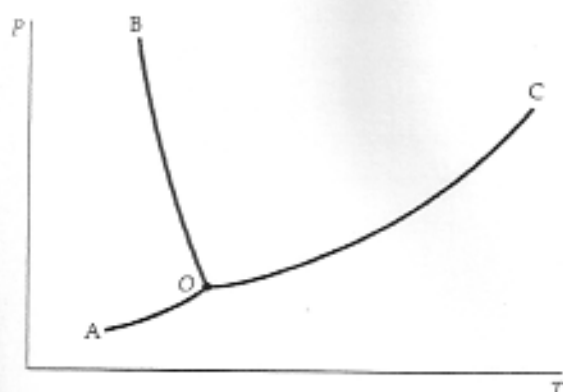


FIGURA 20-15 Problema 9

pressão atmosférica na superfície de Marte é apenas cerca de 1 por cento da pressão atmosférica na superfície da Terra.

12 •• Explique por que diminuir a temperatura de sua casa à noite, no inverno, pode economizar os gastos com aquecimento. Por que o custo do combustível consumido para reaquecer a casa, pela manhã, não é igual à economia feita mantendo-a fria durante a noite?

13 •• Dois cilindros maciços, feitos dos materiais A e B, têm o mesmo comprimento; seus diâmetros estão relacionados por $d_A = 2d_B$. Quando a mesma diferença de temperatura é mantida entre as extremidades dos cilindros, eles conduzem calor com a mesma taxa. As condutividades deles estão, portanto, relacionadas por: (a) $k_A = k_B/4$, (b) $k_A = k_B/2$, (c) $k_A = k_B$, (d) $k_A = 2k_B$, (e) $k_A = 4k_B$.

14 •• Dois cilindros maciços, feitos dos materiais A e B, têm o mesmo diâmetro; seus comprimentos estão relacionados por $L_A = 2L_B$. Quando a mesma diferença de temperatura é mantida entre as extremidades dos cilindros, eles conduzem calor com a mesma taxa. As condutividades deles estão, portanto, relacionadas por: (a) $k_A = k_B/4$, (b) $k_A = k_B/2$, (c) $k_A = k_B$, (d) $k_A = 2k_B$, (e) $k_A = 4k_B$.

15 •• Se você tocar a superfície de uma vidraça simples voltada para o interior de uma sala durante um dia muito frio, ela estará fria, mesmo se a temperatura da sala for confortável. Supondo a temperatura da sala igual a $20,0^\circ\text{C}$ e a temperatura no exterior igual a $5,0^\circ\text{C}$, construa um gráfico de temperatura versus posição, iniciando em um ponto 5,0 m atrás da vidraça (no interior da sala) e terminando em um ponto 5,0 m em frente à vidraça. Explique os mecanismos de transferência de calor que ocorrem ao longo deste caminho.

16 •• A reforma de casas antigas em um local de clima frio revelou espaços de 3,5 in (9,0 cm) de espessura entre as paredes e o revestimento externo cheios apenas de ar (sem isolamento). O preenchimento desses espaços com um material isolante certamente reduz os custos com aquecimento e refrigeração, apesar de o material isolante ser melhor condutor de calor do que o ar. Explique por que o uso do isolante térmico é uma boa idéia.

ESTIMATIVA E APROXIMAÇÃO

17 •• Você está fervendo água para preparar uma massa. A receita diz que devem ser usados pelo menos 4,0 L de água. Você coloca os 4,0 L de água à temperatura ambiente dentro da panela e observa que esta quantidade atinge a borda da panela. Conhecendo física, você conta com a expansão volumétrica da panela de aço para manter toda a água dentro, enquanto ela é aquecida até ferver. Sua hipótese está correta? Explique. Se sua hipótese não está correta, quanta água transborda da panela durante a expansão térmica da água?

18 •• Hélio líquido é armazenado em reservatórios contendo um "superisolamento" de 7,00 cm de espessura, que consiste em

várias camadas de lâminas de Mylar aluminizadas muito finas. A taxa de evaporação do hélio líquido em um reservatório de 200 L é de aproximadamente 0,700 L por dia, quando o reservatório é armazenado à temperatura ambiente (20°C). A massa específica do hélio líquido é $0,125 \text{ kg/L}$ e o calor latente de vaporização é $21,0 \text{ kJ/kg}$. Estime a condutividade térmica do superisolamento.

19 •• APLICAÇÃO BIOLÓGICA Estime a condutividade térmica da pele humana.

20 •• Visitando a Finlândia com um colega de faculdade, alguns amigos finlandeses os convidam para participar de um tradicional exercício finlandês, que consiste em sair da sauna, vestindo apenas a roupa de banho, e sair correndo no frio do inverno finlandês. Estime a taxa na qual você inicialmente perde energia para o ar frio. Compare esta taxa de perda inicial de energia com a taxa metabólica de repouso de um ser humano típico, em condições normais de temperatura. Explique a diferença.

21 •• Estime a taxa de condução de calor através de uma porta de madeira de 2,0 in de espessura, em um dia de inverno rigoroso. Inclua a maçaneta de latão. Qual é a razão entre o calor que escapa pela maçaneta e o calor que escapa através de toda a porta? Qual é o fator R total para a porta, incluindo a maçaneta? A condutividade térmica do latão é $85 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$.

22 •• Estime a emissividade efetiva da Terra a partir da seguinte informação. A constante solar, que é a intensidade de radiação solar incidente na Terra, é cerca de $1,37 \text{ kW/m}^2$. Setenta por cento desta energia são absorvidos pela Terra, e a temperatura média da superfície da Terra é 288 K . (Suponha que a área efetiva que absorve a luz seja πR^2 , onde R é o raio da Terra, enquanto a área de emissão de corpo negro é $4\pi R^2$.)

23 •• Buracos negros são remanescentes altamente condensados de estrelas. Alguns buracos negros, junto com uma estrela normal, formam sistemas binários. Em tais sistemas, o buraco negro e a estrela normal orbitam em torno do centro de massa do sistema. Uma maneira de se detectar buracos negros a partir da Terra é através da observação do calor gerado pelo atrito dos gases atmosféricos da estrela normal que caem no buraco negro. Esses gases podem atingir temperaturas maiores do que $1,0 \times 10^6 \text{ K}$. Supondo que o gás que está caindo no buraco negro possa ser visto como um corpo negro radiador, estime o $\lambda_{\text{máx}}$ usado na detecção astronômica de um buraco negro. (Esta região está na faixa dos raios X do espectro eletromagnético.)

24 •• APLICAÇÃO EM ENGENHARIA, RICO EM CONTEXTO Seu chalé de inverno tem paredes de toras de pinho com espessura média de cerca de 20 cm. Você decide melhorar o acabamento do interior do chalé, por questão de aparência e para aumentar o isolamento das paredes externas. Você compra um isolamento com um fator R de 31 para recobrir as paredes. Além disso, você reveste o isolamento com uma lâmina de gesso de 1,0 in (2,5 cm) de espessura. Supondo que a transferência de calor ocorra apenas devido à condução, estime a razão entre a corrente térmica através das paredes, durante uma noite fria de inverno antes da reforma, e a corrente térmica através das paredes depois da reforma.

25 •• RICO EM CONTEXTO Você está encarregado de cruzar o país transportando um fígado para uma cirurgia de transplante. O fígado é mantido frio em uma caixa de isopor inicialmente cheia com 1,0 kg de gelo. É crucial que a temperatura do fígado nunca ultrapasse os $5,0^\circ\text{C}$. Supondo que a viagem do hospital de origem até o hospital de destino leve 7,0 h, estime o fator R que as paredes da caixa de isopor devem ter.

EXPANSÃO TÉRMICA

26 •• Você herdou o relógio de pêndulo do avô de seu avô, que foi calibrado quando a temperatura da sala era 20°C . O pêndulo consiste em um fino bastão de latão, de massa desprezível, com um disco maciço e pesado na extremidade. (a) Durante um dia quente, quando a temperatura é 30°C , o relógio anda mais rápido ou anda

mais devagar? Explique. (b) Quanto que ele adianta ou atrasa, durante este dia?

27 •• **APLICAÇÃO EM ENGENHARIA** Você precisa encaixar um anel de cobre firmemente em torno de uma haste de aço com 6,0000 cm de diâmetro a 20°C. O diâmetro interno do anel, nesta temperatura, é 5,9800 cm. Qual deve ser a temperatura do anel de cobre, para que ele encaixe na haste sem folga, supondo que ela permaneça a 20°C?

28 •• **APLICAÇÃO EM ENGENHARIA** Você tem um anel de cobre e uma haste de aço. A 20°C, o anel tem um diâmetro interno de 5,9800 cm e a haste de aço tem um diâmetro de 6,0000 cm. O anel de cobre foi aquecido. Quando seu diâmetro interno excedeu os 6,0000 cm, ele foi encaixado na haste, tendo ficado firmemente preso a ela, depois de retornar à temperatura ambiente. Agora, muitos anos depois, você precisa remover o anel da haste. Para isto, você aquece ambos até conseguir fazer deslizar o anel para fora da haste. Que temperatura deve ter o anel para começar a deslizar pela haste?

29 •• Um recipiente é preenchido até a borda com 1,4 L de mercúrio a 20°C. Enquanto a temperatura do recipiente e do mercúrio aumenta até 60°C, um total de 7,5 mL de mercúrio transborda do recipiente. Determine o coeficiente de expansão linear do material de que é feito o recipiente.

30 •• Um carro, com um tanque de gasolina de aço com capacidade de 60,0 L, é abastecido até a borda com 60,0 L de gasolina quando a temperatura externa é 10°C. Quanta gasolina é derramada do tanque quando a temperatura externa aumenta para 25°C? Leve em conta a expansão do tanque de aço.

31 •• Qual é a tensão de tração no anel de cobre do Problema 27 quando sua temperatura volta aos 20°C?

A EQUAÇÃO DE VAN DER WAALS, ISOTERMAS LÍQUIDO-VAPOR E DIAGRAMAS DE FASE

32 • (a) Calcule o volume de 1,00 mol de um gás ideal à temperatura de 100°C e à pressão de 1,00 atm. (b) Calcule a temperatura na qual 1,00 mol de vapor à pressão de 1,00 atm tem o volume calculado na Parte (a). Use $a = 0,550 \text{ Pa} \cdot \text{m}^6/\text{mol}^2$ e $b = 30,0 \text{ cm}^3/\text{mol}$.

33 •• Usando a Figura 20-16, determine as seguintes quantidades. (a) A temperatura de ebulição da água em uma montanha onde a pressão atmosférica é 70,0 kPa, (b) a temperatura de ebulição da água em um recipiente onde a pressão interna é 0,500 atm e (c) a pressão na qual a água ferve a 115°C.

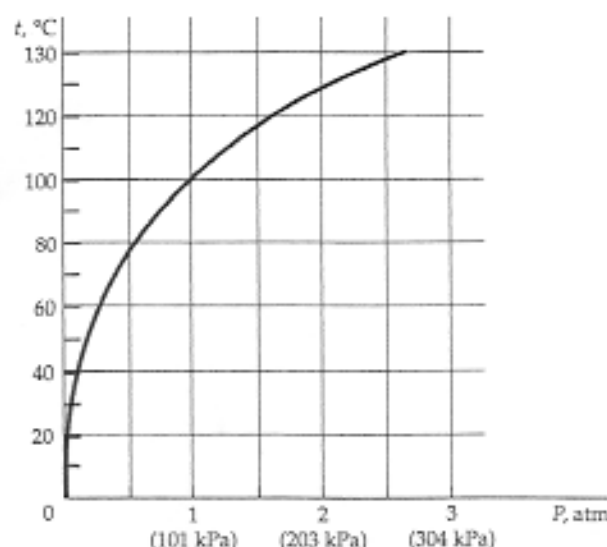


FIGURA 20-16 Problema 33

34 •• As constantes de van der Waals para o hélio são $a = 0,03412 \text{ L}^2 \cdot \text{atm}/\text{mol}^2$ e $b = 0,0237 \text{ L}/\text{mol}$. Use estes dados para determinar o volume ocupado por um átomo de hélio, em centímetros cúbicos. Estime, então, o raio do átomo de hélio.

CONDUÇÃO

35 • Uma lâmina de isolamento, de 20 ft $\times$ 30 ft (6 m $\times$ 9 m), tem um fator R igual a 11. A que taxa o calor é conduzido através da lâmina, se a temperatura em um lado é constante e igual a 68°F e, no outro lado, é constante e igual a 30°F?

36 •• Um cubo de cobre e um cubo de alumínio, cada um com 3,00 cm de aresta, são dispostos como mostrado na Figura 20-17. Determine (a) a resistência térmica de cada cubo, (b) a resistência térmica da combinação dos dois cubos, (c) a corrente térmica I e (d) a temperatura na interface entre os dois cubos.

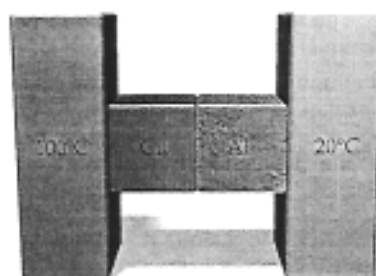


FIGURA 20-17 Problema 36

37 •• Dois cubos metálicos, um de cobre e um de alumínio, cada um com 3,00 cm de aresta, estão dispostos em paralelo, como mostra a Figura 20-18. Determine (a) a corrente térmica em cada cubo, (b) a corrente térmica total e (c) a resistência térmica da combinação dos dois cubos.



FIGURA 20-18 Problema 37

38 •• **APLICAÇÃO EM ENGENHARIA** O custo com a refrigeração de uma casa é aproximadamente proporcional à taxa na qual o calor é absorvido pela casa, de suas vizinhanças, dividida pelo coeficiente de desempenho do aparelho de ar condicionado. Seja ΔT a diferença de temperatura entre o interior da casa e o exterior. Supondo que a taxa na qual o calor é absorvido por uma casa seja proporcional a ΔT e que o aparelho de ar condicionado esteja operando em condições ideais, mostre que o custo com a refrigeração é proporcional a $(\Delta T)^2$ dividido pela temperatura no interior da casa.

39 •• Uma casca esférica de condutividade k tem um raio interno r_1 e um raio externo r_2 (Figura 20-19). O interior da casca é mantido a uma temperatura T_1 e o exterior é mantido a uma temperatura T_2 , com $T_1 < T_2$. Neste problema, você deve mostrar que a corrente térmica através da casca é dada por

$$I = -\frac{4\pi k r_1 r_2}{r_2 - r_1} (T_2 - T_1)$$

onde I é positivo se o calor é transferido no sentido $+r$. Eis uma sugestão de procedimento para chegar a este resultado: (1) obtenha uma expressão para a corrente térmica I através de uma fina casca

esférica de raio r e espessura dr quando há uma diferença de temperatura dT ao longo da espessura da casca; (2) explique por que a corrente térmica é a mesma através de qualquer dessas cascas finas; (3) expresse a corrente térmica I através de um desses elementos de casca em termos da área $A = 4\pi r^2$, da espessura dr e da diferença de temperatura dT através do elemento; e (4) separe as variáveis (resolva para dT em termos de r e dr) e integre.

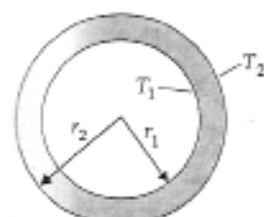


FIGURA 20-19
Problema 39

RADIAÇÃO

40 • **APLICAÇÃO BIOLÓGICA** Calcule λ_{max} (o comprimento de onda no qual a potência emitida é máxima) para a pele humana. Suponha que a pele humana seja um emissor do tipo corpo negro com uma temperatura de 33°C .

41 • O universo está permeado de uma radiação que se acredita ter sido emitida no Big Bang. Supondo que todo o universo seja um corpo negro a uma temperatura de $2,3\text{ K}$, quanto vale o λ_{max} (o comprimento de onda no qual a potência da radiação é máxima) desta radiação?

42 • Qual é a faixa de temperaturas nas superfícies das estrelas para a qual λ_{max} (o comprimento de onda no qual a potência da radiação emitida é máxima) está no intervalo visível?

43 • Os fios de aquecimento de um aquecedor elétrico de $1,00\text{ kW}$ ficam vermelhos a uma temperatura de 900°C . Supondo que 100 por cento do calor liberado seja de radiação e que os fios sejam emissores do tipo corpo negro, qual é a área efetiva da superfície que irradia? (Suponha uma temperatura ambiente de 20°C .)

44 • Uma esfera maciça de cobre escurecida, com raio igual a $4,0\text{ cm}$, é mantida suspensa em um reservatório evacuado cujas paredes estão a uma temperatura de 20°C . Se a esfera está inicialmente a 0°C , determine a taxa inicial na qual sua temperatura varia, supondo que o calor seja transferido apenas por radiação. (Considere a esfera como um emissor do tipo corpo negro.)

45 • A temperatura da superfície do filamento de uma lâmpada incandescente é 1300°C . Se a potência elétrica de alimentação for duplicada, qual será a nova temperatura? Dica: Mostre que você pode desprezar a temperatura do ambiente.

46 • Hélio líquido é armazenado no seu ponto de ebulição ($4,2\text{ K}$) em um recipiente esférico que está separado, por uma região evacuada, de um revestimento que é mantido à temperatura de nitrogênio líquido (77 K). Se o recipiente tem 30 cm de diâmetro e é escurecido no lado externo para que atue como um emissor do tipo corpo negro, quanto hélio ferve por hora?

PROBLEMAS GERAIS

47 • Uma fita de aço é colocada em volta da Terra no equador quando a temperatura é 0°C . Qual será a distância entre a fita e o solo (considerada uniforme) se a temperatura da fita aumentar para 30°C ? Despreze a expansão da Terra.

48 • Mostre que a variação da massa específica ρ de um material isotrópico, devida a um aumento de temperatura ΔT , é dada por $\Delta\rho = -\beta\rho\Delta T$.

49 • A constante solar é a potência recebida do Sol por unidade de área perpendicular aos raios do Sol, na configuração de distância

média entre Terra e Sol. Seu valor, na atmosfera superior da Terra, é de aproximadamente $1,37\text{ kW/m}^2$. Calcule a temperatura efetiva do Sol, se ele irradia como um corpo negro. (O raio do Sol é $6,96 \times 10^8\text{ m}$.)

50 • **APLICAÇÃO EM ENGENHARIA** Trabalhando nas férias como estagiário em uma fábrica de isolamento, você deve terminar o fator R de um certo material isolante. Este material vem em lâminas de $\frac{1}{2}\text{ in}$ ($1,27\text{ cm}$). Com ele, você constrói um cubo oco de 12 in ($30,5\text{ cm}$) de aresta. Você coloca um termômetro e um aquecedor de 100 W no interior da caixa. Depois de atingido o equilíbrio térmico, a temperatura no interior da caixa é 90°C e a temperatura fora da caixa é 20°C . Determine o fator R do material.

51 • (a) Da definição de β , o coeficiente de expansão volumétrica (à pressão constante), mostre que $\beta = 1/T$ para um gás ideal. (b) O valor experimental de β para o gás N_2 a 0°C é $0,003673\text{ K}^{-1}$. Qual é a diferença percentual entre este valor medido de β e o valor obtido supondo o N_2 um gás ideal?

52 • Um bastão de comprimento L_A , feito do material A, é colocado próximo a um bastão de comprimento L_B , feito do material B. Os bastões permanecem em equilíbrio térmico entre si. (a) Mostre que, mesmo que os comprimentos de cada bastão variem com a variação da temperatura ambiente, a diferença entre os dois comprimentos permanecerá constante se os comprimentos L_A e L_B forem escolhidos de maneira tal que $L_A/L_B = \alpha_B/\alpha_A$, onde α_A e α_B são os respectivos coeficientes de expansão linear. (b) Se o material B é o aço, se o material A é o latão e se $L_A = 250\text{ cm}$ a 0°C , qual é o valor de L_B ?

53 • Na média, a temperatura da crosta da Terra aumenta $1,0^\circ\text{C}$ para cada 30 m de profundidade. A condutividade térmica média do material da crosta terrestre é $0,74\text{ J/(m}\cdot\text{s}\cdot\text{K)}$. Qual é a perda de calor da Terra, por segundo, devida à condução a partir do núcleo? Como esta perda de calor se compara com a potência média recebida do Sol?

54 • Uma panela de fundo de cobre, contendo $0,800\text{ L}$ de água fervendo, seca em $10,0\text{ min}$. Supondo que todo o calor seja transferido através do fundo de cobre, que tem um diâmetro de $15,0\text{ cm}$ e uma espessura de $3,00\text{ mm}$, calcule a temperatura externa à base de cobre enquanto ainda há alguma água na panela.

55 • **APLICAÇÃO EM ENGENHARIA** Um tanque cilíndrico de aço, com água quente, tem um diâmetro interno de $0,550\text{ m}$ e uma altura interna de $1,20\text{ m}$. O tanque está envolvido por uma camada isolante de lã de vidro de $5,00\text{ cm}$ de espessura, cuja condutividade térmica é $0,0350\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. O isolamento é coberto por uma fina camada metálica. O tanque de aço e a camada metálica têm condutividades térmicas muito maiores do que a da lã de vidro. Quanta potência elétrica deve ser fornecida a este tanque para manter a temperatura da água em $75,0^\circ\text{C}$, quando a temperatura externa é $1,0^\circ\text{C}$?

56 • O diâmetro d de um bastão cônico de comprimento L é dado por $d = d_0(1 + ax)$, onde a é uma constante e x é a distância até uma das extremidades. Se a condutividade térmica do material é k , qual é a resistência térmica do bastão?

57 • Um disco maciço, de raio r e massa m , está girando sem atrito em torno de um eixo que passa perpendicularmente pelo seu centro de massa, com velocidade angular ω_1 a uma temperatura T_1 . A temperatura do disco diminui para T_2 . Expresse a velocidade angular ω_2 , a energia cinética rotacional K_2 e a quantidade de movimento angular L_2 em termos de seus valores à temperatura T_1 e do coeficiente de expansão linear α do disco.

58 • **PLANILHA ELETRÔNICA** Escreva um programa de planilha eletrônica para traçar um gráfico da temperatura média da superfície da Terra como função da emissividade, usando os resultados do Problema 22. De quanto a emissividade deve variar para que a temperatura média aumente de 1 K ? Este resultado pode ser pensado como um modelo para o efeito das crescentes concentrações de gases de efeito estufa, como o metano e o CO_2 , na atmosfera da Terra.