



## 20 Calor e 1ª Lei da Termodinâmica

### 20.1 Questões

#### Q-4.

O calor pode ser absorvido por uma substância sem que esta mude sua temperatura. Esta afirmação contradiz o conceito do calor como uma energia no processo de transferência, devido a uma diferença de temperatura?

► Não. Um sistema pode absorver calor e utilizar essa energia na realização de um trabalho; a temperatura do sistema *não* muda e *não* é violado o princípio da conservação da energia.

#### Q-7.

Um ventilador não esfria o ar que circula, mas o esquenta levemente. Como pode, então, lhe refrescar?

► O movimento do ar estabelece uma corrente de convecção, com o ar mais quente subindo, e o ar mais frio ocupando-lhe o lugar, refrescando o ambiente.

#### Q-14.

Você põe a mão dentro de um forno quente para tirar uma forma e queima seus dedos nela. Entretanto, o ar em torno dela está à mesma temperatura, mas não queima seus dedos. Por quê?

► Porque a forma, feita de metal como o alumínio, por exemplo, conduz muito melhor o calor do que o ar.

#### Q-20.

Os mecanismos fisiológicos, que mantêm a temperatura interna de um ser humano, operam dentro de uma faixa limitada de temperatura externa. Explique como essa faixa pode ser aumentada, para os dois extremos, com o uso de roupas.

► No verão, usam-se roupas claras, que refletem a radiação, e soltas, que favorecem a convecção do ar, ventilando o corpo. Com as roupas mais grossas de inverno, a camada de ar junto da pele, aquecida por irradiação do corpo, funciona como isolante térmico.

#### Q-27.

Discuta o processo pelo qual a água congela, do ponto de vista da primeira lei da termodinâmica. Lembre-se que o gelo ocupa um volume maior do que a mesma massa de água.

► Pela primeira lei, tem-se para o processo  $\Delta U = Q - W$ . O calor  $Q$  é removido da água, e, portanto, igual a  $-L_F$ , o calor de fusão do gelo. O trabalho é dado por  $W = p(V_f - V_i)$ , sendo  $p$  a pressão atmosférica.  $V_f$  é maior que  $V_i$ , sendo o trabalho positivo. Então, a variação da energia interna é  $\Delta U = -L_F - W$ , sendo, portanto, negativa.

#### Q-31.

Por que as panelas de aço freqüentemente possuem uma placa de cobre ou alumínio no fundo?

► Porque o cobre e o alumínio conduzem mais eficientemente o calor do que o aço.

## 20.2 Exercícios e Problemas

### 20.2.1 A absorção de calor por sólidos e líquidos

#### E-6.

Quanta água permanece líquida após 50,2 kJ de calor serem extraídos de 260 g de água, inicialmente no ponto de congelamento?

► É necessário extrair

$$Q = m L_F = (0,260)(333k) = 8,66 \times 10^4 \text{ J}$$

para solidificar toda a massa de água. Com os  $5,02 \times 10^4$  J extraídos, só é possível solidificar parte da água:

$$m_l = \frac{Q_l}{L_F} = \frac{5,02 \times 10^4}{3,33 \times 10^5} = 0,150 \text{ kg}$$

Portanto,

$$\Delta m = m - m_l = 260 - 150 = 110 \text{ g}$$

permanecem no estado líquido.

#### E-13.

Um objeto de massa de 6,00 kg cai de uma altura de 50,0 m e, por meio de uma engrenagem mecânica, gira

uma roda que desloca 0,600 kg de água. A água está inicialmente a 15 °C. Qual o aumento máximo da temperatura da água?

► A energia potencial gravitacional perdida pelo objeto na queda é:

$$W = mgh = (6,00)(9,80)(50) = 2940J,$$

que correspondem a  $W = 702,34 \text{ cal}$ . O aumento de temperatura produzido na água será de:

$$\begin{aligned} Q &= mc\Delta T \\ 702,34 \text{ cal} &= (600 \text{ g})\left(\frac{1,0 \text{ cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}\right)(T_f - 15^\circ) \\ 1,17 &= T_f - 15^\circ \\ T_f &= 16,17^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

**P-18.**

Calcule o calor específico de um metal a partir dos seguintes dados. Um recipiente feito do metal tem massa de 3,6 kg e contém 14 kg de água. Uma peça de 1,8 kg deste metal, inicialmente a 180 °C, é colocada dentro da água. O recipiente e a água tinham inicialmente a temperatura de 16 °C e a final do sistema foi de 18 °C.

► A água absorve parte do calor cedido pela peça:

$$\begin{aligned} Q_{\text{água}} &= m_{\text{água}} c_{\text{água}} \Delta T \\ &= (14000 \text{ g})\left(1,0 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}\right)(2,0^\circ\text{C}) \\ &= 28000 \text{ cal} \end{aligned}$$

O recipiente feito do metal absorve outra parte do calor cedido pela peça:

$$\begin{aligned} Q_{\text{metal}} &= m_{\text{metal}} c_{\text{metal}} \Delta T \\ &= (3600 \text{ g})(2,0^\circ\text{C})c_{\text{metal}} \\ &= 7200 c_{\text{metal}} \end{aligned}$$

O calor cedido pela peça é igual a:

$$\begin{aligned} Q_{\text{peça}} = m_{\text{peça}} c_{\text{metal}} \Delta T &= (1800 \text{ g})(162^\circ\text{C}) c_{\text{metal}} \\ &= 291600 c_{\text{metal}} \end{aligned}$$

Reunindo as quantidades calculadas, vem:

$$\begin{aligned} Q_{\text{água}} + Q_{\text{metal}} &= Q_{\text{peça}} \\ 28000 + 7200 c_{\text{metal}} &= 291600 c_{\text{metal}} \\ 28000 &= 284400 c_{\text{metal}} \\ c_{\text{metal}} &= 0,098 \text{ cal/g}^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

**P-24.**

Um bloco de gelo, em seu ponto de fusão e com massa inicial de 50,0 kg, desliza sobre uma superfície horizontal, começando à velocidade de 5,38 m/s e finalmente parando, depois de percorrer 28,3 m. Calcule a massa de gelo derretido como resultado do atrito entre o bloco e a superfície. (Suponha que todo o calor produzido pelo atrito seja absorvido pelo bloco de gelo.)

► A desaceleração do bloco é dada por:

$$\begin{aligned} v^2 &= v_0^2 - 2ax \\ a &= \frac{(5,38)^2}{(2)(28,30)} = 0,511 \text{ m/s}^2. \end{aligned}$$

O calor produzido pelo atrito é dado por:

$$\begin{aligned} W = Q &= max \\ &= (50,0 \text{ kg})(0,511 \text{ m/s}^2)(28,30 \text{ m}) \\ &= 723,61 \text{ J} \end{aligned}$$

A massa de gelo derretido é:

$$\begin{aligned} Q &= m L_F \\ m &= \frac{723,61 \text{ J}}{3,33 \times 10^5 \text{ J/kg}} \\ m &= 0,002 \text{ kg}. \end{aligned}$$

**P-30.**

(a) Dois cubos de gelo de 50 g são colocados num vidro contendo 200 g de água. Se a água estava inicialmente à temperatura de 25 °C e se o gelo veio diretamente do freezer a -15 °C, qual será a temperatura final do sistema quando a água e o gelo atingirem a mesma temperatura? (b) Supondo que somente um cubo de gelo foi usado em (a), qual a temperatura final do sistema? Ignore a capacidade térmica do vidro.

► (a) Se a água resfriar até 0 °C, o calor fornecido por ela será de

$$\begin{aligned} Q_{\text{água}} = m_{\text{água}} c_{\text{água}} \Delta T &= (200 \text{ g})\left(1,0 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}\right)(25^\circ\text{C}) \\ &= 5000 \text{ cal} \end{aligned}$$

Para o gelo chegar a 0 °C, necessita-se:

$$\begin{aligned} Q_{\text{gelo}} &= m_{\text{gelo}} c_{\text{gelo}} \Delta T \\ &= (100 \text{ g})\left(0,53 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}\right)(15^\circ\text{C}) \\ &= 795 \text{ cal} \end{aligned}$$

Para fundir o gelo seriam necessárias:

$$Q_f = m_{\text{gelo}} L_F = (100 \text{ g})(79,5 \text{ cal/g}) = 7950 \text{ cal}$$

Então o calor fornecido derreterá só parte do gelo. O calor disponível será:

$$5000 - 795 = 4205 \text{ cal}$$

Com essa quantidade de calor, pode-se fundir

$$m_{\text{gelo}} = \frac{Q}{L_F} = \frac{4205}{79,5} = 53 \text{ g}$$

Portanto, ter-se-á uma mistura de água e gelo a  $0^\circ\text{C}$ , restando  $100 - 53 = 47 \text{ g}$  de gelo. **(b)** Se apenas *um* cubo de gelo for adicionado á água:

$$Q_{\text{gelo}} = m_{\text{gelo}} c_{\text{gelo}} \Delta T = (50)(0,53)(0 - (-15)) = 397,5 \text{ cal}$$

$$Q_{\text{Fusão}} = m_{\text{gelo}} L = (50 \text{ g})(79,5 \text{ cal/g}) = 3975 \text{ cal}$$

$$Q_{\text{gelo}} + Q_{\text{Fusão}} = 4372,50 \text{ cal.}$$

Agora o calor fornecido pela água será suficiente para derreter todo o gelo. A temperatura final do sistema estará algo acima da temperatura de fusão:

$$\begin{aligned} Q_{\text{gelo}} &= m_{\text{gelo}} c_{\text{água}} \Delta T \\ &= (50 \text{ g})(1,0 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}})(T_f - 0^\circ) \\ &= 50 T_f \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{ABSORVIDO}} &= Q_{\text{gelo}} + Q_{\text{Fusão}} + Q_{\text{gelo}} \\ &= 4372,50 + 50 T_f \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{CEDIDO}} &= m_{\text{água}} c_{\text{água}} \Delta T \\ &= (200 \text{ g})(1,0 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}})(T_f - 25^\circ) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{ABSORVIDO}} + Q_{\text{CEDIDO}} &= 0 \\ 4372,50 + 50 T_f + 200 T_f - 5000 &= 0 \end{aligned}$$

$$250 T_f = 672,50$$

$$T_f = 2,51^\circ\text{C.}$$

#### P-34.\*

Dois blocos de metal são isolados de seu ambiente. O primeiro bloco, que tem massa  $m_1 = 3,16 \text{ kg}$  e temperatura inicial  $T_i = 17,0^\circ\text{C}$ , tem um calor específico

quatro vezes maior do que o segundo bloco. Este está à temperatura  $T_2 = 47^\circ\text{C}$  e seu coeficiente de dilatação linear é  $15,0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ . Quando os dois blocos são colocados juntos e alcançam seu equilíbrio térmico, a área de uma face do segundo bloco diminui em  $0,0300\%$ . Encontre a massa deste bloco.

► O calor absorvido pelo primeiro bloco é:

$$Q_{\text{ABSORVIDO}} = m_1 c_1 (T_f - T_i) = 3,16 c_1 (T_f - 17^\circ)$$

O calor cedido pelo segundo bloco é:

$$Q_{\text{CEDIDO}} = m_2 \frac{c_1}{4} (T_f - T_i) = m_2 \frac{c_1}{4} (T_f - 47^\circ)$$

A variação na área de uma das faces do segundo bloco é expressa por:

$$\Delta A_2 = A_2 2 \alpha (T_f - 47^\circ)$$

$$\frac{\Delta A_2}{A_2} = 2 \alpha (T_f - 47^\circ) = -0,0003$$

$$(2)(15,0 \times 10^{-6})(T_f - 47^\circ) = -0,0003$$

$$30 \times 10^{-6} T_f - 1,41 \times 10^{-3} = -0,0003$$

$$T_f = \frac{1,11 \times 10^{-3}}{30 \times 10^{-6}} = 37^\circ\text{C}$$

Equacionando os calores, cedido e absorvido, vem:

$$Q_{\text{CEDIDO}} + Q_{\text{ABSORVIDO}} = 0$$

$$-m_2 \frac{c_1}{4} (10) + 3,16 c_1 (20) = 0$$

$$2,5 m_2 = 63,2$$

$$m_2 = 25,28 \text{ kg.}$$

#### 20.2.2 Alguns casos especiais da primeira lei da termodinâmica

##### P-42.

Quando um sistema passa de um estado  $i$  para  $f$  pelo caminho  $iaf$  na Fig. 20–23,  $Q = 50 \text{ cal}$ . Pelo caminho  $ibf$ ,  $Q = 36 \text{ cal}$ . **(a)** Qual o trabalho  $W$  para o caminho  $ibf$ ? **(b)** Se  $W = -13 \text{ cal}$  para o caminho curvo de retorno  $fi$ , qual é  $Q$  para esse caminho? **(c)** Seja  $\Delta E_{\text{int},i} = 10 \text{ cal}$ . Qual é  $\Delta E_{\text{int},f}$ ? **(d)** Se  $\Delta E_{\text{int},b} = 22 \text{ cal}$ , quais os valores de  $Q$  para os processos  $ib$  e  $bf$ ?

► **(a)** Da primeira lei tem-se  $\Delta E_{\text{int}} = Q - W$ :

$$\Delta E_{\text{int}} = 50 - 20 = 30 \text{ cal}$$

$$30 = 36 - W_{ib} \quad e \quad W_{ib} = 6,0 \text{ cal}$$

(b) Dado  $W_{fi} = -13 \text{ cal}$  e sabendo-se do ítem (a) que  $\Delta E_{int,fi} = -30 \text{ cal}$ , vem

$$-30 = Q_{fi} - (-13)$$

$$Q_{fi} = -43 \text{ cal}$$

(c) Dado o valor  $\Delta E_{int,i} = 10 \text{ cal}$ , com o valor  $\Delta E_{int} = 30 \text{ cal}$  do ítem (a), vem

$$\Delta E_{int,f} - \Delta E_{int,i} = 30 \text{ cal}$$

$$\Delta E_{int,f} = 40 \text{ cal}$$

(d) Dado o valor  $\Delta E_{int,b} = 22 \text{ cal}$ , para o processo *ib* tem-se:

$$\Delta E_{int,ib} = 22 - 10 = 12 \text{ cal}$$

$$\Delta E_{int} = Q_{ib} - W_{ib}$$

$$12 = Q_{ib} - 6,0$$

$$Q_{ib} = 18 \text{ cal}$$

E para o processo *bf* tem-se:

$$\Delta E_{int,bf} = \Delta E_{int} - \Delta E_{int,ib} = 30 - 12 = 18 \text{ cal}$$

$$W_{bf} = 0, \quad e \quad Q_{bf} = \Delta E_{int,bf} = 18 \text{ cal}.$$

#### P-43.\*

Um cilindro possui um pistão de metal bem ajustado de 2,0 kg, cuja área da seção reta é de 2,0 cm<sup>2</sup> (Fig. 20-24). O cilindro contém água e vapor à temperatura constante. Observa-se que o pistão desce lentamente, à taxa de 0,30 cm/s, pois o calor escapa do cilindro pelas suas paredes. Enquanto o processo ocorre, algum vapor se condensa na câmara. A densidade do vapor dentro dela é de  $6,0 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$  e a pressão atmosférica, de 1,0 atm. (a) Calcule a taxa de condensação do vapor. (b) A que razão o calor deixa a câmara? (c) Qual a taxa de variação da energia interna do vapor e da água dentro da câmara?

► (a) Expressando a massa de vapor em termos da densidade e do volume ocupado,

$$m_{VAPOR} = \rho_{VAPOR} \Delta V = \rho_{VAPOR} A \Delta y,$$

a taxa de condensação de vapor será:

$$\begin{aligned} \frac{dm_{VAPOR}}{dt} &= \rho_{VAPOR} A \frac{dy}{dt} \\ \frac{dm_{VAPOR}}{dt} &= (0,6 \text{ kg/m}^3)(2,0 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \times \\ &\quad (3,0 \times 10^{-3} \text{ m/s}) \end{aligned}$$

$$\frac{dm_{VAPOR}}{dt} = 3,6 \times 10^{-7} \text{ kg/s} = 0,36 \text{ mg/s}$$

(b) O calor deixa a câmara à razão de:

$$\begin{aligned} \frac{dQ_{VAPOR}}{dt} &= L_{VAPOR} \frac{dm_{VAPOR}}{dt} \\ \frac{dQ_{VAPOR}}{dt} &= (2260 \text{ kJ/kg})(3,6 \times 10^{-7} \text{ kg/s}) \\ &= 0,81 \text{ J/s} \end{aligned}$$

(c) A taxa de realização de trabalho é:

$$\begin{aligned} \frac{dW}{dt} &= m_{pistão} g \frac{dy}{dt} \\ \frac{dW}{dt} &= (2,0 \text{ kg})(9,8 \text{ m/s}^2)(3,0 \times 10^{-3} \text{ m/s}) \\ \frac{dW}{dt} &= 0,06 \text{ J/s} \end{aligned}$$

No ítem (b), a taxa calculada é a do calor que *deixa* a câmara, sendo então negativa, de acordo com a convenção de sinais adotada. Também no ítem (c), o trabalho por unidade de tempo é realizado *sobre* o sistema, sendo, portanto, negativo. Reunindo esses resultados na primeira lei, chega-se à taxa de variação da energia interna na câmara:

$$\begin{aligned} \frac{dE_{int}}{dt} &= \frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} \\ \frac{dE_{int}}{dt} &= -0,81 - (-0,06) = -0,75 \text{ J/s}. \end{aligned}$$

### 20.2.3 A transferência de calor

#### E-48.

Um bastão cilíndrico de cobre, de comprimento 1,2 m e área de seção reta de 4,8 cm<sup>2</sup> é isolado, para evitar perda de calor pela sua superfície. Os extremos são mantidos à diferença de temperatura de 100 °C, um colocado em uma mistura água-gelo e o outro em água fervendo e vapor. (a) Ache a taxa em que o calor é conduzido através do bastão. (b) Ache a taxa em que o gelo derrete no extremo frio.

► (a) Com os dados fornecidos, mais o valor da condutividade térmica do cobre,  $k = 401 \text{ W/m.K}$ , tem-se:

$$\begin{aligned} H &= \frac{(401 \text{ W/m.K})(4,8 \times 10^{-4} \text{ m}^2)(100 \text{ K})}{1,2 \text{ m}} \\ &= 16,0 \text{ J/s} \end{aligned}$$

(b) Da equação para a condução do calor vem:

$$\frac{dQ}{dt} = H = L_F \frac{dm_{gelo}}{dt}$$

$$\frac{dm_{gelo}}{dt} = \frac{H}{L_F} = \frac{16,0 \text{ J/s}}{333 \text{ kJ/kg}} = 0,048 \text{ g/s.}$$

**P-55**

Um grande tanque cilíndrico de água com fundo de 1,7 m de diâmetro é feito de ferro galvanizado de 5,2 mm de espessura. Quando a água esquenta, o aquecedor a gás embaixo mantém a diferença de temperatura entre as superfícies superior e inferior, da chapa do fundo, em 2,3 °C. Quanto calor é conduzido através dessa placa em 5,0 minutos? O ferro tem condutividade térmica igual a 67 W/m K.

► A área da chapa é  $A = \pi d^2/4 = 2,27 \text{ m}^2$ . A taxa de condução do calor é

$$H = \frac{k A \Delta T}{L} = \frac{(67)(2,27)(2,3)}{0,0052} = 67271 \text{ W}$$

O calor conduzido no intervalo de 5,0 minutos será:

$$Q = H \Delta t = (67271 \text{ W})(300 \text{ s})$$

$$= 2,02 \times 10^7 \text{ J} = 20,2 \text{ MJ}$$

**P-58.**

Formou-se gelo em um chafariz e foi alcançado o estado estacionário, com ar acima do gelo a  $-5,0 \text{ }^\circ\text{C}$  e o fundo do chafariz a  $4,0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Se a profundidade total do gelo + água for 1,4 m, qual a espessura do gelo? Suponha que as condutividades térmicas do gelo e da água sejam 0,40 e 0,12 cal/m °C s, respectivamente.

► No regime estacionário, as taxas de condução do calor através do gelo e da água igualam-se:

$$k_{\text{água}} A \frac{(T_H - T_x)}{L_{\text{água}}} = k_{\text{gelo}} A \frac{(T_x - T_C)}{L_{\text{gelo}}}$$

Mas  $T_x$ , a temperatura na interface, é  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$\frac{(0,12)(4,0)}{1,4 - L_{\text{gelo}}} = \frac{(0,40)(5,0)}{L_{\text{gelo}}}$$

$$L_{\text{gelo}} = 1,13 \text{ m.}$$

**20.2.4 Problemas Adicionais****P-62.**

Quantos cubos de gelo de 20,0 g, cuja temperatura inicial é  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ , precisam ser colocados em 1,0 L de chá quente, com temperatura inicial de  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ , para que a mistura final tenha a temperatura de  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ? Suponha que todo o gelo estará derretido na mistura final e que o calor específico do chá seja o mesmo da água.

► Considerando os valores para os calores específicos da água e do gelo,  $c_{\text{água}} = 4190 \text{ J/kg K}$  e  $c_{\text{gelo}} = 2220 \text{ J/kg K}$ , o calor extraído do gelo para trazê-lo à temperatura de fusão é:

$$Q_1 = m_g c_g \Delta T = m_g (2220)(10) = 22200 m_g \text{ (J)}$$

Para fundir o gelo:

$$Q_2 = m_g L_F = 333000 m_g \text{ (J);}$$

Para aquecer o gelo derretido de  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$Q_3 = m_g c_{\text{água}} \Delta T$$

$$= m_g (4190 \text{ J/kg K})(10 \text{ K})$$

$$= 41900 m_{\text{gelo}} \text{ (J).}$$

O calor removido do chá é:

$$Q_4 = m_{\text{água}} c_{\text{água}} \Delta T$$

$$= (1,0 \text{ kg})(4190 \text{ J/kg K})(-80 \text{ K})$$

$$= -335200 \text{ J.}$$

Reunindo todos os valores calculados acima, vem:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_4 = 0$$

$$(22200 + 333000 + 41900) m_g = 335200$$

$$397000 m_g = 335200$$

$$m_g = 0,844 \text{ kg.}$$

Como cada cubo tem  $m_g = 0,020 \text{ kg}$ , deve-se acrescentar ao chá  $n = \frac{0,844}{0,020} \simeq 42$  cubos de gelo.

**P-63.**

Uma amostra de gás se expande a partir de uma pressão e um volume iniciais de 10 Pa e  $1,0 \text{ m}^3$  para um volume final de  $2,0 \text{ m}^3$ . Durante a expansão, a pressão e o volume são obtidos pela equação  $p = a V^2$ , onde  $a = 10 \text{ N/m}^8$ . Determine o trabalho realizado pelo gás durante

a expansão.

► O trabalho realizado pela gás na expansão é dado por

$$dW = p dV = a V^2 dV$$

Integrando do volume inicial  $V_i$  até o volume final  $V_f$ :

$$W = a \int_{V_i}^{V_f} V^2 dV$$

$$W = a \left[ \frac{V^3}{3} \right]_{V_i}^{V_f} = a \left[ \frac{V_f^3}{3} - \frac{V_i^3}{3} \right]$$

$$W = (10 \text{ N/m}^8) \left[ \frac{8}{3} - \frac{1}{3} \right] (\text{m}^9)$$

$$W = 23,33 \text{ J.}$$