

16

Temperatura e a Teoria Cinética dos Gases

SUMÁRIO

- 16.1 Temperatura e a Lei Zero da Termodinâmica
- 16.2 Termômetros e Escalas de Temperatura
- 16.3 Expansão Térmica de Sólidos e Líquidos
- 16.4 Descrição Macroscópica de um Gás Ideal
- 16.5 A Teoria Cinética dos Gases
- 16.6 Distribuição de Velocidades Moleculares
- 16.7 Conexão com o Contexto: O Gradiente Adiabático Atmosférico

* Um asterisco indica um item original desta edição.

RESPOSTAS PARA AS PERGUNTAS OBJETIVAS

- *PO16.1** Resposta (d). Se o vidro se expandisse mais do que o líquido, o nível do líquido cairia em relação à parede do tubo à medida que o termômetro é aquecido. Se o líquido e o material do tubo se expandissem por quantidades iguais, o termômetro não poderia ser utilizado, pois o nível do líquido não mudaria com a temperatura.
- *PO16.2** Resposta (c) > (a) > (b) > (d). A velocidade vetorial média em uma amostra macroscopicamente em repouso é zero. Como as equações adjacentes no texto observam, a distribuição assimétrica de velocidades moleculares torna a velocidade média maior do que a velocidade mais provável e a velocidade rms ainda maior. A velocidade mais provável é $(2RT/M)^{1/2}$, a velocidade média é $(8RT/\pi M)^{1/2} \cong (2.55RT/M)^{1/2}$ e a velocidade rms é $(3RT/M)^{1/2}$.

***PO16.3** Resposta (d). A 200 K, $\frac{1}{2}m_0v_{\text{rms}0}^2 = \frac{3}{2}k_B T_0$. À temperatura mais alta,

$$\frac{1}{2}m_0(2v_{\text{rms}0})^2 = \frac{3}{2}k_B T. \text{ Então } T = 4T_0 = 4(200 \text{ K}) = 800 \text{ K}.$$

***PO16.4** Resposta (d). Lembre-se de que é preciso utilizar temperaturas e pressões absolutas na lei dos gases ideais. Assim, a temperatura original é $T_K = T_C + 273,15 = 25 + 273,15 = 298 \text{ K}$ e, com a massa do gás constante, a lei dos gases ideais dá

$$T_2 = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)\left(\frac{V_2}{V_1}\right)T_1 = \left(\frac{1,07 \times 10^6 \text{ Pa}}{5,00 \times 10^6 \text{ Pa}}\right)(3,00)(298 \text{ K}) = 191 \text{ K}$$

***PO16.5** Resposta (c). Para uma rápida aproximação, multiplique 93 m por 17 por $1/(1\,000\,000\,^\circ\text{C})$ por, digamos, um aumento de temperatura de $5\,^\circ\text{C}$. Para simplificar, multiplique 100 por 100 por $1/1\,000\,000$ para obter uma resposta em metros: ela é da ordem de 1 cm.

***PO16.6** Resposta (d). A velocidade rms das moléculas no gás é $v_{\text{rms}} = \sqrt{3RT/M}$. Assim, a razão entre a velocidade final e a velocidade original seria

$$\frac{(v_{\text{rms}})_f}{(v_{\text{rms}})_0} = \frac{\sqrt{3RT_f/M}}{\sqrt{3RT_0/M}} = \sqrt{\frac{T_f}{T_0}} = \sqrt{\frac{600 \text{ K}}{200 \text{ K}}} = \sqrt{3}$$

***PO16.7** Resposta (d). Da lei dos gases ideais, com a massa do gás constante, $P_2 V_2 / T_2 = P_1 V_2 / T_1$. Logo,

$$P_2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\left(\frac{T_2}{T_1}\right)P_1 = \left(\frac{1}{2}\right)(4)P_1 = 2P_1$$

***PO16.8** Resposta (c). A teoria cinética dos gases assume que as moléculas não interagem umas com as outras.

***PO16.9** Resposta (b). Quando um sólido que contém uma cavidade é aquecido, a cavidade expande da mesma maneira que expandiria se fosse preenchida com o material que constitui o restante do corpo.

***PO16.10** Resposta (c). Da lei dos gases ideais, com a massa do gás constante, $P_2 V_2 / T_2 = P_1 V_2 / T_1$. Logo,

$$V_2 = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)\left(\frac{T_2}{T_1}\right)V_1 = (4)(1)(0,50 \text{ m}^3) = 2,0 \text{ m}^3$$

***PO16.11** Resposta (c). $T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32) = \frac{5}{9}(162 - 32) = 72,2\,^\circ\text{C}$, então,

$$T_K = T_C + 273,15 = 72,2 + 273,15 = 345 \text{ K}$$

- *PO16.12** (i) Resposta (a). Chame o processo de resfriamento isobárico ou contração isobárica. A parede de borracha é facilmente distensível. O ar do lado de dentro está, originalmente, quase à pressão atmosférica, e permanece à pressão atmosférica à medida que a parede se move para dentro, apenas mantendo a igualdade entre a pressão externa e a interna. O ar é, inicialmente, quase um gás ideal, e permanece razoavelmente ideal — razoavelmente distante da liquefação — mesmo a 100 K. O vapor de água se liquefaz e logo congela, e o dióxido de carbono se transforma em gelo seco, mas esses são componentes mínimos do ar. Assim, quando a temperatura absoluta cai para 1/3 do seu valor original, o volume cai para 1/3 do que era.
- (ii) Resposta (c). Como observamos acima, a pressão permanece praticamente constante a 1 atm.
- *PO16.13** Resposta (c). A massa molecular do nitrogênio (N_2 , 28 u) é menor do que a massa molecular do oxigênio (O_2 , 32 u), e a velocidade rms de um gás é $(3RT/M)^{1/2}$. Como as velocidades rms são iguais, a temperatura do nitrogênio é menor do que a temperatura do oxigênio. A energia cinética média é proporcional à massa molecular e ao quadrado da velocidade rms ($K = \frac{1}{2}mv_{rms}^2$), então a energia cinética média do nitrogênio é menor.
- *PO16.14** (i) As afirmações (a) e (e) são afirmações corretas que descrevem o aumento da temperatura de um gás.
- (ii) A afirmação (f) é uma afirmação correta, mas não se aplica à situação. A afirmação (b) é verdadeira se as moléculas tiverem algum tamanho de fato, mas colisões moleculares com outras moléculas não têm nada a ver com o aumento da temperatura.
- (iii) As afirmações (c) e (d) são incorretas. As colisões moleculares são perfeitamente elásticas. A temperatura é determinada pelo quão rápido as moléculas se movem pelo espaço e não por nada que aconteça dentro de uma molécula.
- *PO16.15** Resposta (d). O cilindro A deve estar a pressão mais baixa. Se o gás for rarefeito, $PV = nRT$ se aplica a ambos com o mesmo valor de nRT em ambos. Então, A estará a um terço da pressão absoluta de B.
- *PO16.16** A classificação é (a) = (b) = (d) > (e) > (c). Pensamos em nRT/V em cada caso. Como R é constante, só precisamos pensar em nT/V e as unidades de $\text{mmol} \cdot \text{K}/\text{cm}^3$ são tão convenientes quanto quaisquer outras: (a) $2 \cdot 3/1 = 6$, (b) 6, (c) 4, (d) 6, (e) 5.
- *PO16.17** Resposta (b). Os gases são iguais, então eles têm a mesma massa

molecular, M . Se as duas amostras têm a mesma densidade, suas razões entre número de mols e volume, n/V , são iguais, pois suas densidades, $(nM)/V$, são iguais. As pressões são iguais; logo, suas temperaturas são iguais:

$$PV = nRT \rightarrow p = \frac{n}{V} RT = \text{constante} \rightarrow T = \text{constante}$$

Portanto, as velocidades rms de suas moléculas, $(3RT/M)^{1/2}$, são iguais.

- *PO16.18**
- (i) Resposta (b). A energia cinética molecular, $3kT/2$, aumenta por um fator 3.
 - (ii) Resposta (c). A velocidade rms, $(3RT/M)^{1/2}$, aumenta por um fator $\sqrt{3}$.
 - (iii) Resposta (c). A variação média de momento aumenta por $\sqrt{3}$:
 $\Delta p_{\text{med}} = -2m_0 v_{\text{med}}$.
 - (iv) Resposta (c). A taxa de colisões aumenta por um fator $\sqrt{3}$:
 $\Delta t_{\text{med}} = 2d/v_{\text{med}}$.
 - (v) Resposta (b). A pressão aumenta por um fator 3. Ver a Equação 16.13:

$$P = \frac{2}{3} \left(\frac{N_i}{V} \right) \left(\frac{1}{2} m_0 \overline{v^2} \right) = \frac{2}{3} \left(\frac{N_i}{V} \right) (\overline{K})$$

- *PO16.19** Resposta (b). As marcações estão agora mais distantes umas das outras do que se pretendia, logo, as medidas feitas com a fita de aço aquecida serão mais curtas — mas apenas por um fator de 5×10^{-5} do comprimento medido.

RESPOSTAS PARA AS PERGUNTAS CONCEITUAIS

- *PC16.1**
- (a) $PV = nRT$ prevê que V tende a zero à medida que T tende a zero.
 - (b) O modelo de gás ideal não se aplica quando o material se aproxima da liquefação e se transforma em um líquido ou em um sólido. As moléculas começam a interagir o tempo todo, não apenas em breves colisões. As moléculas começam a tomar uma parte significativa do volume do recipiente.
- *PC16.2**
- (a) Um mol de H_2 tem massa de 2,0160 g.
 - (b) Um mol de He tem massa de 4,0026 g.
 - (c) Um mol de CO tem massa de 28,010 g.
- *PC16.3**
- (a) Não. O termômetro medirá apenas a temperatura do que quer que esteja em contato com o termômetro. O termômetro precisaria

ser trazido à superfície para medir sua temperatura, já que não há atmosfera na Lua para manter uma temperatura ambiente relativamente homogênea acima da superfície. (b) Ele leria a temperatura da luva, já que ele está em contato com a luva.

- *PC16.4** (a) A temperatura do cobre cai e a temperatura da água se eleva até que ambas as temperaturas sejam iguais. (b) A água e o cobre estão em equilíbrio térmico quando suas temperaturas são iguais.
- *PC16.5** Um gás diatômico tem mais graus de liberdade — os de vibração e de rotação molecular — do que um gás monoatômico. O conteúdo de energia por mol é proporcional ao número de graus de liberdade.
- *PC16.6** A medida que o balão ascende no ar, o ar não pode ter pressão uniforme, porque as camadas inferiores sustentam o peso de todo o ar acima delas. A borracha em um balão típico é facilmente distensível e se distende ou se contrai até que as pressões interna e externa sejam praticamente iguais. Então, o balão se expande à medida que ascende. Esta expansão é adiabática (ver Seção 17.8), com P diminuindo conforme V aumenta ($PV^\gamma = \text{constante}$). Eventualmente, se a parede de borracha for muito forte, ela conterá o hélio a uma pressão mais alta do que o ar do lado de fora, porém com a mesma densidade, de modo que o balão parará de ascender. É mais provável que a borracha se distenda e arrebente, liberando o hélio para continuar ascendendo e “ferver” para fora da atmosfera terrestre.
- *PC16.7** Dois corpos em equilíbrio térmico não precisam necessariamente estar em contato. Considere os dois corpos que estão em equilíbrio térmico na Figura 16.1(c). O ato de separá-los por uma pequena distância não afeta o movimento das moléculas dentro de cada corpo, então eles ainda estarão em equilíbrio térmico.
- *PC16.8** O hélio deve ter a velocidade rms mais alta. Segundo a Equação 16.19 da velocidade rms, $(3RT/M)^{1/2}$, à mesma temperatura, o gás com a menor massa por átomo deve ter a maior velocidade média ao quadrado e, logo, a velocidade rms mais alta.
- *PC16.9** A pressão do ar diminui com a altitude, ao passo que a pressão dentro dos sacos permanece a mesma; logo, essa pressão do lado de dentro é maior do que a pressão do lado de fora.
- *PC16.10** O coeficiente de expansão do metal é maior do que o do vidro. Quando a água quente é despejada sobre o jarro, tanto o vidro quanto a tampa se expandem, mas a taxas diferentes. Como *todas* as dimensões se expandem, o diâmetro interno da tampa se expande mais do que o topo do jarro, tornando a tampa mais fácil de remover.
- *PC16.11** O coeficiente de expansão linear do mercúrio deve ser maior do que o do vidro; do contrário, o interior de um termômetro de vidro se

expandiria mais e o nível de mercúrio cairia. Ver PO16.1.

- *PC16.12** (a) A esfera se expande ao ser aquecida, de modo que ela não passa mais pelo anel. Com a esfera ainda quente, você pode separar a esfera do anel aquecendo o anel. Este resultado mais surpreendente ocorre porque a expansão térmica do anel não é como a inflação de uma braçadeira de pressão arterial. Do contrário, ela é como uma ampliação fotográfica; todas as dimensões lineares, incluindo o diâmetro do buraco, aumentam pelo mesmo fator. O motivo disso é que os átomos em toda parte, incluindo aqueles em torno da circunferência interna, se afastam uns dos outros. A única maneira de os átomos se adaptarem às distâncias maiores é se a circunferência — e o diâmetro correspondente — crescer. Essa propriedade costumava ser utilizada para encaixar aros de metal em rodas de vagão de madeira. Se o anel for aquecido e a esfera for mantida à temperatura ambiente, a esfera passará pelo anel com mais espaço de sobra.

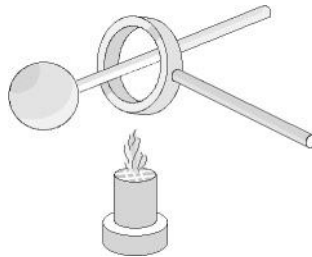


FIG. RESP. PC16.12

- (b) Aquecer o anel aumenta o seu diâmetro; a esfera passa facilmente através dele. O buraco do anel se expande como se estivesse preenchido com o material do anel.
- *PC16.13** (a) À medida que a temperatura da água se eleva, ela se expande, ou sua pressão também se eleva, ou ambos. O volume excedente transbordaria para fora do sistema de resfriamento, do contrário a pressão se tornaria de fato muito alta.
- (b) Sistemas de resfriamento modernos têm um reservatório de transbordamento para receber o volume excedente quando o refrigerante se aquece e expande.

SOLUÇÕES DOS PROBLEMAS DE FIM DE CAPÍTULO

Seção 16.2 Termômetros e Escalas de Temperatura

P16.1 (a) Para converter de Fahrenheit a Celsius, utilizamos

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32,0)$$

A temperatura no Rancho de Furnace Creek no Vale da Morte é

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32,0) = \frac{5}{9}(134^\circ\text{F} - 32,0) = \boxed{56,7^\circ\text{C}}$$

e a temperatura na Base de Prospect Creek no Alaska é

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32,0) = \frac{5}{9}(-79,8^\circ\text{F} - 32,0) = \boxed{-62,1^\circ\text{C}}$$

(b) Encontramos a temperatura Kelvin usando $T = T_C + 273,15$. A temperatura recorde na escala Kelvin no Rancho de Furnace Creek no Vale da Morte é

$$T = T_C + 273,15 = 56,7^\circ\text{C} + 273,15 = \boxed{330\text{ K}}$$

e a temperatura na Base de Prospect Creek no Alaska é

$$T = T_C + 273,15 = -62,1^\circ\text{C} + 273,15 = \boxed{211\text{ K}}$$

P16.2 (a) $\Delta T = 450^\circ\text{C} = 450^\circ\text{C} \left(\frac{212^\circ\text{F} - 32,0^\circ\text{F}}{100^\circ\text{C} - 0,00^\circ\text{C}} \right) = \boxed{810^\circ\text{F}}$

(b) $\Delta T = 450^\circ\text{C} = \boxed{450\text{ K}}$

***P16.3** (a) $T_F = \frac{9}{5}T_C + 32 = \frac{9}{5}(41,5^\circ\text{C}) + 32 = (74,7 + 32)^\circ\text{F} = \boxed{107^\circ\text{F}}$

(b) Sim. A temperatura normal do corpo é $98,6^\circ\text{F}$, então o paciente está com febre alta e necessita de atenção imediata.

***P16.4** Como temos um gráfico linear, sabemos que a pressão se relaciona com a temperatura segundo $P = A + BT_C$, onde A e B são constantes. Para encontrar A e B , empregamos os dados fornecidos:

$$0,900\text{ atm} = A + B(-78,5^\circ\text{C}) \quad [1]$$

e

$$1,635\text{ atm} = A + B(78,0^\circ\text{C}) \quad [2]$$

Resolvendo as Equações [1] e [2] simultaneamente, encontramos:

$$A = 1,27 \text{ atm}$$

e

$$B = 4,70 \times 10^{-3} \text{ atm/}^\circ\text{C}$$

Portanto,

$$P = 1,27 \text{ atm} + (4,70 \times 10^{-3} \text{ atm/}^\circ\text{C}) T_C$$

(a) No zero absoluto, o gás exerce pressão zero ($P = 0$), então

$$T_C = \frac{-1,27 \text{ atm}}{4,70 \times 10^{-3} \text{ atm/}^\circ\text{C}} = \boxed{-270^\circ\text{C}}$$

(b) No ponto de congelamento da água, $T_C = 0$ e

$$P = 1,27 \text{ atm} + 0 = \boxed{1,27 \text{ atm}}$$

No ponto de ebulição da água, $T_C = 100^\circ\text{C}$, então

$$P = 1,27 \text{ atm} + (4,65 \times 10^{-3} \text{ atm/}^\circ\text{C})(100^\circ\text{C}) = \boxed{1,74 \text{ atm}}$$

P16.5 (a) $T_F = \frac{9}{5} T_C + 32,0^\circ\text{F} = \frac{9}{5} (-195,81^\circ\text{C}) + 32,0 = \boxed{-320^\circ\text{F}}$

(b) $T = T_C + 273,15 = -195,81^\circ\text{C} + 273,15 = \boxed{77,3 \text{ K}}$

P16.6 (a) Para converter de Fahrenheit a Celsius, utilizamos

$$T_C = \frac{5}{9} (T_F - 32,0) = \frac{5}{9} (98,6^\circ\text{F} - 32,0) = \boxed{37,0^\circ\text{C}}$$

e a temperatura Kelvin é encontrada fazendo

$$T = T_C + 273,15 = \boxed{310 \text{ K}}$$

(b) De forma idêntica à utilizada em (a), encontramos

$$T_C = \boxed{-20,6^\circ\text{C}} \quad \text{e} \quad T = \boxed{253 \text{ K}}$$

Seção 16.3 Expansão Térmica de Sólidos e Líquidos

P16.7 $\Delta L = \alpha L_i \Delta T = (11 \times 10^{-6} (^\circ\text{C})^{-1})(1300 \text{ km})[35^\circ\text{C} - (-73^\circ\text{C})] = \boxed{1,54 \text{ km}}$

A expansão pode ser compensada montando-se o oleoduto sobre rolamentos e posicionando *loops* em forma de Ω entre seções retas. Eles se dobram conforme o aço muda de comprimento.

P16.8 Para que as dimensões aumentem, $\Delta L = \alpha L_i \Delta T$:

$$1,00 \times 10^{-2} \text{ cm} = (1,30 \times 10^{-4} (\text{°C})^{-1})(2,20 \text{ cm})(T - 20,0 \text{°C})$$

$$T = \boxed{55,0 \text{°C}}$$

***P16.9** O fio tem 35,0 m de comprimento quando $T_C = -20,0 \text{°C}$.

$$\Delta L = L_i \bar{\alpha} (T - T_i)$$

$$\bar{\alpha} = \alpha(20,0 \text{°C}) = 1,70 \times 10^{-5} (\text{°C})^{-1} \text{ para o cobre.}$$

$$\Delta L = (35,0 \text{ m})(1,70 \times 10^{-5} (\text{°C})^{-1})(35,0 \text{°C} - (-20,0 \text{°C})) = \boxed{+3,27 \text{ cm}}$$

P16.10 (a) $L = L_i(1 + \alpha \Delta T)$:

$$5,050 \text{ cm} = 5,000 \text{ cm} \left[1 + (24,0 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1})(T - 20,0 \text{°C}) \right]$$

$$T = \boxed{437 \text{°C}}$$

(b) Devemos obter $L_{\text{Al}} = L_{\text{latão}}$ para um certo ΔT , ou

$$L_{i, \text{Al}}(1 + \alpha_{\text{Al}} \Delta T) = L_{i, \text{latão}}(1 + \alpha_{\text{latão}} \Delta T)$$

$$\begin{aligned} 5,000 \text{ cm} \left[1 + (24,0 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}) \Delta T \right] \\ = 5,050 \text{ cm} \left[1 + (19,0 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}) \Delta T \right] \end{aligned}$$

Resolvendo para ΔT , temos $\Delta T = 2\,080 \text{°C}$

$$\text{então } T = 2,1 \times 10^3 \text{°C}$$

(c)

Não. O alumínio derrete a 660°C (Tabela 17.2). Além disso, embora não esteja na Tabela 17.2, a pesquisa na internet mostra que o latão (uma liga de cobre e zinco) derrete a cerca de 900°C .

$$\textbf{P16.11} \quad \Delta L = \alpha L_i \Delta T = (22 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1})(2,40 \text{ cm})(30,0 \text{°C}) = \boxed{1,58 \times 10^{-3} \text{ cm}}$$

***P16.12** Resolva para a temperatura T à qual o anel de latão se encaixaria no cilindro de alumínio.

$$L_{\text{Al}}(1 + \alpha_{\text{Al}} \Delta T) = L_{\text{latão}}(1 + \alpha_{\text{latão}} \Delta T)$$

$$\Delta T = T - T_i = \frac{L_{\text{Al}} - L_{\text{latão}}}{L_{\text{latão}} \alpha_{\text{latão}} - L_{\text{Al}} \alpha_{\text{Al}}}$$

$$\Delta T = \frac{10,02 \text{ cm} - 10,00 \text{ cm}}{(10,00 \text{ cm})(19,0 \times 10^{-6} \text{ } (^{\circ}\text{C})^{-1}) - (10,02 \text{ cm})(24,0 \times 10^{-6} \text{ } (^{\circ}\text{C})^{-1})}$$

$$\Delta T = -396 = T - 20,0 \quad \rightarrow \quad T = -376^{\circ}\text{C}$$

A situação é impossível porque

A temperatura $T = -376^{\circ}\text{C}$ requerida é abaixo do zero absoluto.

- *P16.13** (a) A densidade de uma amostra de chumbo de massa $m = 20,0 \text{ kg}$ e volume V_0 à temperatura T_0 é

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0} = 11,3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

Com uma variação na temperatura $\Delta T = T - T_0$, a mesma massa m ocupa um volume maior $V = V_0(1 + \beta \Delta T)$; portanto, a densidade é

$$\rho = \frac{m}{V_0(1 + \beta \Delta T)} = \frac{\rho_0}{(1 + \beta \Delta T)}$$

onde $\beta = 3\alpha$, e $\alpha = 29 \times 10^{-6} \text{ } (^{\circ}\text{C})^{-1}$.

Com uma variação na temperatura de $0,00^{\circ}\text{C}$ a $90,0^{\circ}\text{C}$,

$$\rho = \frac{\rho_0}{(1 + \beta \Delta T)} = \frac{11,3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3}{1 + 3(29 \times 10^{-6} \text{ } (^{\circ}\text{C})^{-1})(90,0^{\circ}\text{C})}$$

$$= \boxed{11,2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3}$$

- (b) A massa permanece a mesma, $\boxed{20,0 \text{ kg}}$, pois uma variação de temperatura não alteraria a massa.

- *P16.14** (a) A densidade de uma substância sólida de massa m e volume V_0 à temperatura T_0 é

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0}$$

Com uma variação na temperatura $\Delta T = T - T_0$, a mesma massa m ocupa um volume maior $V = V_0(1 + \beta \Delta T)$; portanto, a densidade é

$$\rho = \frac{m}{V_0(1 + \beta\Delta T)} = \frac{\rho_0}{(1 + \beta\Delta T)}$$

- (b) A massa permanece a mesma, m , pois uma variação de temperatura não alteraria a massa.

P16.15 (a) $\Delta L = \alpha L_i \Delta T = 9,00 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1} (30,0 \text{ cm})(65,0 \text{°C}) = 0,176 \text{ mm}$

- (b) L representa qualquer dimensão linear.

$$\begin{aligned}\Delta L &= \alpha L_i \Delta T = (9,00 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1})(1,50 \text{ cm})(65,0 \text{°C}) \\ &= 8,78 \times 10^{-4} \text{ cm} \\ &= 8,78 \text{ } \mu\text{m}\end{aligned}$$

(c) $\Delta V = 3\alpha V_i \Delta T = 3(9,00 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}) \left(\frac{30,0(\pi)(1,50)^2}{4} \text{ cm}^3 \right) (65,0 \text{°C})$
 $= 0,0930 \text{ cm}^3$

P16.16 A seção horizontal se expande conforme $\Delta L = \alpha L_i \Delta T$.

$$\Delta x = (17 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1})(28,0 \text{ cm})(46,5 \text{°C} - 18,0 \text{°C}) = 1,36 \times 10^{-2} \text{ cm}$$

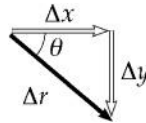


FIG. RESP. P16.16

A seção vertical se expande de modo similar por

$$\Delta y = (17 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1})(134 \text{ cm})(28,5 \text{°C}) = 6,49 \times 10^{-2} \text{ cm}$$

O deslocamento vetorial do cotovelo do cano tem módulo

$$\Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} = \sqrt{(0,136 \text{ mm})^2 + (0,649 \text{ mm})^2} = 0,663 \text{ mm}$$

e se dirige para a direita, abaixo da horizontal, a um ângulo

$$\theta = \arctg\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) = \arctg\left(\frac{0,649 \text{ mm}}{0,136 \text{ mm}}\right) = 78,2^\circ$$

$$\Delta r = 0,663 \text{ mm para a direita, a } 78,2^\circ \text{ abaixo da horizontal}$$

- P16.17** (a) A quantidade de terebintina que transborda é igual à diferença entre a variação de volume do cilindro e a da terebintina:

$$\begin{aligned}\Delta V &= V_t \beta_t \Delta T - V_{Al} \beta_{Al} \Delta T = (\beta_t - 3\alpha_{Al}) V_i \Delta T \\ &= \left[9,00 \times 10^{-4} (\text{°C})^{-1} - 3 \left(24,0 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1} \right) \right] \\ &\quad \times (2000 \text{ cm}^3) (60,0 \text{ °C})\end{aligned}$$

$$\Delta V = \boxed{99,4 \text{ cm}^3} \text{ transborda.}$$

- (b) Encontre o volume da terebintina que resta no cilindro a 80,0 °C, que é igual ao volume do cilindro de alumínio a 80,0 °C:

$$\begin{aligned}V_t &= V_{Al} = V_{Ali} + \beta_{Al} V_{Ali} \Delta T = V_{Ali} + 3\alpha_{Al} V_{Ali} \Delta T \\ &= V_{Ali} (1 + 3\alpha_{Al} \Delta T) \\ &= (2000 \text{ cm}^3) \left[1 + 3 \left(24 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1} \right) (60,0 \text{ °C}) \right] \\ &= 2008,64 \text{ cm}^3 = \boxed{2,01 \text{ L}}\end{aligned}$$

- (c) Encontre o volume da terebintina contida no cilindro depois que ele se resfria de volta a 20,0 °C:

$$\begin{aligned}V &= V_{ti} + \beta_t V_{ti} \Delta T = V_{ti} (1 + \beta_t \Delta T) \\ V &= 2008,64 \text{ cm}^3 \left[1 + \left(9 \times 10^{-4} (\text{°C})^{-1} \right) (-60,0 \text{ °C}) \right] \\ &= 1900,17 \text{ cm}^3\end{aligned}$$

Encontre a porcentagem do cilindro que está vazia a 20,0 °C:

$$\frac{2000 \text{ cm}^3 - 1900,17 \text{ cm}^3}{2000 \text{ cm}^3} = 4,99\%$$

Encontre a altura vazia do cilindro acima da terebintina:

$$(4,99\%) (20,0 \text{ cm}) = \boxed{0,998 \text{ cm}}$$

$$\Delta V = (\beta - 3\alpha) V_i \Delta T$$

P16.18

$$\begin{aligned}&= \left[5,81 \times 10^{-4} (\text{°C})^{-1} - 3 \left(11,0 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1} \right) \right] (50,0 \text{ gal}) (20,0 \text{ °C}) \\ &= \boxed{0,548 \text{ gal}}\end{aligned}$$

P16.19

(a) $\Delta A = 2\alpha A_i \Delta T$: $\Delta A = 2 \left(17,0 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1} \right) (0,0800 \text{ m})^2 (50,0 \text{ °C})$

$$\Delta A = 1,09 \times 10^{-5} \text{ m}^2 = \boxed{0,109 \text{ cm}^2}$$

- (b) O comprimento de cada lado do furo aumentou. Assim, isso representa um aumento na área do furo.



Seção 16.4 Descrição Macroscópica de um Gás Ideal

***P16.20** A pressão dentro da panela se deve à pressão do vapor de água e do ar nela contidos. A pressão do vapor de água é

$$P_v = \frac{nRT}{V} = \left(\frac{9,00 \text{ g}}{18,0 \text{ g/mol}} \right) \left(\frac{8,314 \text{ J}}{\text{mol K}} \right) \left(\frac{773 \text{ K}}{2,00 \times 10^{-3} \text{ m}^3} \right) = 1,61 \text{ MPa}$$

Encontre a pressão do ar a volume constante, assumindo que a temperatura inicial seja 10 °C:

$$\frac{P_{a2}}{P_{a1}} = \frac{T_2}{T_1} \rightarrow P_{a2} = P_{a1} \frac{T_2}{T_1} = (101 \text{ kPa}) \frac{773 \text{ K}}{283 \text{ K}} \\ = 276 \text{ kPa} = 0,276 \text{ MPa}$$

$$\text{Pressão total } P = P_v + P_{a2} = 1,61 \text{ MPa} + 0,276 \text{ MPa} = \boxed{1,89 \text{ MPa}}$$

P16.21 Massa de ouro desgastada:

$$|\Delta m| = 3,80 \text{ g} - 3,35 \text{ g} = 0,450 \text{ g} = (0,450 \text{ g}) \left(\frac{1 \text{ kg}}{10^3 \text{ g}} \right) \\ = 4,50 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

Cada átomo tem massa

$$m_0 = 197 \text{ u} = 197 \text{ u} \left(\frac{1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}}{1 \text{ u}} \right) = 3,27 \times 10^{-25} \text{ kg}$$

Agora, $|\Delta m| = |\Delta N| m_0$, e o número de átomos que faltam é

$$|\Delta N| = \frac{|\Delta m|}{m_0} = \frac{4,50 \times 10^{-4} \text{ kg}}{3,27 \times 10^{-25} \text{ kg}} = 1,38 \times 10^{21} \text{ atoms}$$

A taxa de perda é

$$\frac{|\Delta N|}{\Delta t} = \left(\frac{1,38 \times 10^{21} \text{ atoms}}{50 \text{ yr}} \right) \left(\frac{1 \text{ yr}}{365,25 \text{ d}} \right) \left(\frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} \right) \left(\frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) \\ \frac{|\Delta N|}{\Delta t} = \boxed{8,72 \times 10^{11} \text{ atoms/s}}$$

P16.22 $PV = NP'V' = \frac{4}{3} \pi r^3 NP'$:

$$N = \frac{3PV}{4\pi r^3 P'} = \frac{3(150 \text{ atm})(0,100 \text{ m}^3)}{4\pi (0,150 \text{ m})^3 (1,20 \text{ atm})} = 884 \text{ balões}$$

Se não tivermos nenhum meio especial para retirar os últimos 100 L de hélio do tanque, o tanque estará cheio de hélio a 1,20 atm quando

o último balão for inflado. O número de balões é reduzido, então, para

$$884 - \frac{3(0,100 \text{ m}^3)}{4\pi(0,150 \text{ m})^3} = \boxed{877}$$

***P16.23** (a) $n = \frac{PV}{RT} = \frac{(9,00 \text{ atm})(1,013 \times 10^5 \text{ Pa/atm})(8,00 \times 10^{-3} \text{ m}^3)}{(8,314 \text{ N} \cdot \text{mol K})(293 \text{ K})}$
 $= \boxed{2,99 \text{ mol}}$

(b) $N = nN_A = (2,99 \text{ mol})(6,02 \times 10^{23} \text{ moléculas/mol})$
 $= \boxed{1,80 \times 10^{24} \text{ moléculas}}$

P16.24 Um mol de hélio contém o número de Avogadro de moléculas e tem uma massa de 4,00 g. Chamando de m_0 a massa de um átomo, temos

$$N_A m_0 = 4,00 \text{ g/mol}$$

ou

$$m_0 = \frac{4,00 \text{ g/mol}}{6,02 \times 10^{23} \text{ moléculas/mol}} = 6,64 \times 10^{-24} \text{ g/molécula}$$

$$= \boxed{6,64 \times 10^{-27} \text{ kg}}$$

P16.25 (a) Inicialmente, $P_i V_i = n_i R T_i$: $(1,00 \text{ atm}) V_i = n_i R [(10,0^\circ\text{C} + 273,15) \text{ K}]$ [1]

Finalmente, $P_f V_f = n_f R T_f$: $P_f (0,280 V_i) = n_i R [(40,0^\circ\text{C} + 273,15) \text{ K}]$ [2]

Dividindo [2] por [1]: $\frac{0,280 P_f}{1,00 \text{ atm}} = \frac{313,15 \text{ K}}{283,15 \text{ K}}$

o que dá $P_f = \boxed{3,95 \text{ atm} = 4,00 \times 10^5 \text{ Pa}}$

(b) Depois que o carro é dirigido,
 $P_d (1,02)(0,280 V_i) = n_i R (85,0^\circ\text{C} + 273,15) \text{ K}$ [3]

Dividindo [3] por [1]: $\frac{(1,02)(0,280) P_d}{1,00 \text{ atm}} = \frac{358,15 \text{ K}}{283,15 \text{ K}}$

$P_d = 4,43 \text{ atm} = \boxed{4,49 \times 10^5 \text{ Pa}}$

P16.26 Quando o tanque foi preparado e está pronto para uso, ele contém 1,00 L de ar e 4,00 L de água. Considere o ar dentro do tanque durante um processo de descarga. Supomos que o processo seja lento o bastante para que a temperatura permaneça constante. Então,

quando a pressão cai de 2,40 atm para 1,20 atm, o volume do ar dobra ($PV \approx \text{constante}$), o que resulta em 1,00 L de água expulsa e 3,00 L restantes. Na segunda descarga, o volume do ar dobra de 2,00 L para 4,00 L, e 2,00 L de água são espirrados para fora. Na terceira descarga, apenas o último 1,00 L de água sai.

Em cada ciclo de bombear-e-d Descarregar, o volume de ar no tanque dobra. Assim, 1,00 L de água é expulso pelo ar injetado na primeira bombeada, 2,00 L na segunda, e apenas o 1,00 L restante na terceira. Cada pessoa poderia usar mais eficientemente seu dispositivo começando com o tanque cheio de água até a metade, em vez de 80% cheio.

P16.27 Empregue a Equação 16.11, $PV = Nk_B T$:

$$N = \frac{PV}{k_B T} = \frac{(1,00 \times 10^{-9} \text{ Pa})(1,00 \text{ m}^3)}{(1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(300 \text{ K})} = \boxed{2,42 \times 10^{11} \text{ moléculas}}$$

P16.28 Meu quarto tem 4 m de comprimento, 4 m de largura e 2,4 m de altura e contém ar a 100 kPa e $20^\circ \text{C} = 293 \text{ K}$. Pense no ar como 80,0% N_2 e 20,0% O_2 .

O número de Avogadro de moléculas tem massa

$$(0,800)(28,0 \text{ g/mol}) + (0,200)(32,0 \text{ g/mol}) = 0,0288 \text{ kg/mol}$$

Então, $PV = nRT = \left(\frac{m}{M}\right)RT$

$$\begin{aligned} \text{dá } m &= \frac{PVM}{RT} = \frac{(1,00 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(38,4 \text{ m}^3)(0,0288 \text{ kg/mol})}{(8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(293 \text{ K})} \\ &= 45,4 \text{ kg} \quad \boxed{\sim 10^2 \text{ kg}} \end{aligned}$$

P16.29 A densidade do ar dentro do balão, ρ_{dentro} , deve ser reduzida até que a força de empuxo do ar do lado de fora seja ao menos igual ao peso do balão mais o peso do ar contido dentro dele:

$$\sum F_y = 0: B - W_{\text{ar dentro}} - W_{\text{balão}} = 0$$

$$\rho_{\text{fora}} gV - \rho_{\text{dentro}} gV - m_b g = 0 \quad \rightarrow \quad (\rho_{\text{fora}} - \rho_{\text{dentro}})V = m_b$$

onde $\rho_{\text{fora}} = 1,244 \text{ kg/m}^3$, $V = 400 \text{ m}^3$, e $m_b = 200 \text{ kg}$.

De $PV = nRT$, $\frac{n}{V} = \frac{P}{RT}$. Essa equação significa que, a pressão constante, a densidade é inversamente proporcional à temperatura. Logo, a densidade do ar quente contido dentro do balão é

$$\rho_{\text{dentro}} = \rho_{\text{fora}} \left(\frac{283 \text{ K}}{T_{\text{dentro}}} \right)$$

Substituindo este resultado na condição $(\rho_{\text{fora}} - \rho_{\text{dentro}})V = m_b$, obtemos

$$\rho_{\text{fora}} \left(1 - \frac{283 \text{ K}}{T_{\text{dentro}}} \right) = \frac{m_b}{V} \rightarrow \frac{283 \text{ K}}{T_{\text{dentro}}} = 1 - \frac{m_b}{\rho_{\text{fora}} V}$$

$$\rightarrow T_{\text{dentro}} = \frac{283 \text{ K}}{\left(1 - \frac{m_b}{\rho_{\text{fora}} V} \right)}$$

$$T_{\text{dentro}} = \frac{283 \text{ K}}{\left(1 - \frac{200 \text{ kg}}{(1,244 \text{ kg/m}^3)(400 \text{ m}^3)} \right)} = \boxed{473 \text{ K}}$$

P16.30 O ar dentro do tubo está longe da liquefação, então ele se comporta como um gás ideal. Na superfície do oceano ele é descrito por $P_t V_t = nRT$, onde $P_t = 1 \text{ atm}$, $V_t = A(6,50 \text{ cm})$ e A é a área da secção transversal do interior do tubo. Na base do mergulho,

$$P_b V_b = nRT = P_b A(6,50 \text{ cm} - 2,70 \text{ cm})$$

Dividindo,

$$\frac{P_b(3,80 \text{ cm})}{(1 \text{ atm})(6,50 \text{ cm})} = 1$$

$$P_b = (1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2) \left(\frac{6,50 \text{ cm}}{3,80 \text{ cm}} \right) = 1,73 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

A água salgada entra no tubo até que a pressão do ar seja igual à pressão da água em profundidade, que é descrita por

$$P_b = P_t + \rho gh$$

$$1,73 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2 + (1030 \text{ kg/m}^3)(9,80 \text{ m/s}^2)h$$

$$h = \frac{7,20 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^2}{1,01 \times 10^4 \text{ s}^2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}} = \boxed{7,13 \text{ m}}$$

P16.31 Em profundidade, $P = P_0 + \rho gh$ e $PV_i = nRT_i$

Na superfície, $P_0 V_f = nRT_f$:

$$\frac{P_0 V_f}{(P_0 + \rho gh)V_i} = \frac{T_f}{T_i}$$

Portanto, $V_f = V_i \left(\frac{T_f}{T_i} \right) \left(\frac{P_0 + \rho gh}{P_0} \right)$

$$V_f = 1,00 \text{ cm}^3 \left(\frac{293 \text{ K}}{278 \text{ K}} \right) \times \left(\frac{(1,013 \times 10^5 \text{ Pa}) + (1030 \text{ kg/m}^3)(9,80 \text{ m/s}^2)(25,0 \text{ m})}{1,013 \times 10^5 \text{ Pa}} \right)$$

$$V_f = \boxed{3,68 \text{ cm}^3}$$

P16.32 $P_0 V = n_1 R T_1 = \left(\frac{m_1}{M} \right) R T_1$

$$P_0 V = n_2 R T_2 = \left(\frac{m_2}{M} \right) R T_2$$

$$\boxed{m_1 - m_2 = \frac{P_0 V M}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}$$

***P16.33** O CO_2 está longe da liquefação, então, após sair de solução, ele se comporta como um gás ideal. Sua massa molar é $M = 12,0 \text{ g/mol} + 2(16,0 \text{ g/mol}) = 44,0 \text{ g/mol}$. A quantidade de gás dentro do cilindro é $n = \frac{m_{\text{amostra}}}{M} = \frac{6,50 \text{ g}}{44,0 \text{ g/mol}} = 0,148 \text{ mol}$. Então $PV = nRT$ dá

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{0,148 \text{ mol}(8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(273,15 \text{ K} + 20^\circ\text{C})}{1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2} \times \left(\frac{1 \text{ N} \cdot \text{m}}{1 \text{ J}} \right) \left(\frac{10^3 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \right)$$

$$= \boxed{3,55 \text{ L}}$$

P16.34 (a) De $PV = nRT$, obtemos $n = \frac{PV}{RT}$. Então,

$$m = nM = \frac{PVM}{RT} = \frac{(1,013 \times 10^5 \text{ Pa})(0,100 \text{ m})^3 (28,9 \times 10^{-3} \text{ kg/mol})}{(8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(300 \text{ K})}$$

$$m = \boxed{1,17 \times 10^{-3} \text{ kg}}$$

(b) $F_g = mg = (1,17 \times 10^{-3} \text{ kg})(9,80 \text{ m/s}^2) = \boxed{11,5 \text{ mN}}$

(c) $F = PA = (1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(0,100 \text{ m})^2 = \boxed{1,01 \text{ kN}}$

(d) As moléculas devem estar se movendo muito rápido, batendo com força nas paredes.

P16.35 A equação de estado de um gás ideal é $PV = nRT$, então precisamos resolver para o número de mols para encontrar N .

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{(1,01 \times 10^5 \text{ N/m}^2) [(10,0 \text{ m})(20,0 \text{ m})(30,0 \text{ m})]}{(8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(293 \text{ K})}$$

$$= 2,49 \times 10^5 \text{ mol}$$

$$N = nN_A = (2,49 \times 10^5 \text{ mol}) (6,022 \times 10^{23} \text{ moléculas/mol})$$

$$= \boxed{1,50 \times 10^{29} \text{ moléculas}}$$

P16.36 $PV = nRT$: $\frac{m_f}{m_i} = \frac{n_f}{n_i} = \frac{P_f V_f}{RT_f} \frac{RT_i}{P_i V_i} = \frac{P_f}{P_i}$

então $m_f = m_i \left(\frac{P_f}{P_i} \right)$

$$|\Delta m| = m_i - m_f = m_i \left(\frac{P_i - P_f}{P_i} \right) = 12,0 \text{ kg} \left(\frac{41,0 \text{ atm} - 26,0 \text{ atm}}{41,0 \text{ atm}} \right)$$

$$= \boxed{4,39 \text{ kg}}$$

Seção 16.5 A Teoria Cinética dos Gases

***P16.37** $P = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \overline{K}$, do cálculo de pressão da teoria cinética.

$$N = \frac{3}{2} \frac{PV}{\overline{K}} = \frac{3}{2} \frac{(1,20 \times 10^5 \text{ Pa})(4,00 \times 10^{-3} \text{ m}^3)}{(3,60 \times 10^{-22} \text{ J})}$$

$$= 2,00 \times 10^{24} \text{ moléculas}$$

$$n = \frac{N}{N_A} = \frac{2,00 \times 10^{24} \text{ moléculas}}{6,02 \times 10^{23} \text{ moléculas/mol}} = \boxed{3,32 \text{ mol}}$$

***P16.38** $P = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \overline{K}$, do cálculo de pressão da teoria cinética.

$$N = \frac{3}{2} \frac{PV}{\overline{K}}$$

$$n = \frac{N}{N_A} = \boxed{\frac{3}{2} \frac{PV}{\overline{K} N_A}}$$

$$\bar{F} = Nm \frac{\Delta v}{\Delta t} = 500(5,00 \times 10^{-3} \text{ kg})$$

$$\text{P16.39 (a)} \quad \times \frac{[8,00 \sin 45,0^\circ - (-8,00 \sin 45,0^\circ)] \text{ m/s}}{30,0 \text{ s}}$$

$$= \boxed{0,943 \text{ N}}$$

$$(b) \quad P = \frac{\bar{F}}{A} = \frac{0,943 \text{ N}}{0,600 \text{ m}^2} = 1,57 \text{ N/m}^2 = \boxed{1,57 \text{ Pa}}$$

P16.40 (a) Ambos os tipos de molécula têm a mesma energia cinética média. Ela é:

$$\bar{K} = \frac{3}{2} k_B T = \frac{3}{2} (1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(423 \text{ K}) = \boxed{8,76 \times 10^{-21} \text{ J}}$$

(b) O valor quadrático médio (rms) da velocidade pode ser calculado a partir da energia cinética:

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{v^2} = \sqrt{\frac{2\bar{K}}{m_0}}$$

$$\text{então } v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1,75 \times 10^{-20} \text{ J}}{m_0}} \quad [1]$$

Para o hélio,

$$m_0 = \frac{4,00 \text{ g/mol}}{6,02 \times 10^{23} \text{ moléculas/mol}} = 6,64 \times 10^{-24} \text{ g/molécula}$$

$$m_0 = 6,64 \times 10^{-27} \text{ kg/molécula}$$

Da mesma maneira, para o argônio,

$$m_0 = \frac{39,9 \text{ g/mol}}{6,02 \times 10^{23} \text{ moléculas/mol}}$$

$$= 6,63 \times 10^{-23} \text{ g/molécula}$$

$$m_0 = 6,63 \times 10^{-26} \text{ kg/molécula}$$

Substituindo em [1] acima, encontramos, para o hélio,

$$\boxed{v_{\text{rms}} = 1,62 \text{ km/s}}$$

$$\text{e para o argônio, } \boxed{v_{\text{rms}} = 514 \text{ m/s}}$$

***P16.41** Empregue a equação que descreve a pressão na teoria cinética:

$$P = \frac{2N}{3V} \left(\frac{m_0 \overline{v^2}}{2} \right). \text{ Então,}$$

$$\overline{K} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{3PV}{2N}, \text{ onde } N = nN_A$$

$$\overline{K} = \frac{3PV}{2nN_A} = \frac{3(8,00 \text{ atm})(1,013 \times 10^5 \text{ Pa/atm})(5,00 \times 10^{-3} \text{ m}^3)}{2(2 \text{ mol})(6,02 \times 10^{23} \text{ moléculas/mol})}$$

$$\overline{K} = \boxed{5,05 \times 10^{-21} \text{ J}}$$

P16.42 (a) $PV = nRT = \frac{Nm_0 v^2}{3}$

A energia cinética translacional total é $\frac{Nm_0 v^2}{2} = E_{\text{trans}}$:

$$E_{\text{trans}} = \frac{3}{2} PV = \frac{3}{2} (3,00 \times 1,013 \times 10^5 \text{ Pa})(5,00 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \\ = \boxed{2,28 \text{ kJ}}$$

(b) $\frac{m_0 v^2}{2} = \frac{3k_B T}{2} = \frac{3RT}{2N_A} = \frac{3(8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(300 \text{ K})}{2(6,02 \times 10^{23})} = \boxed{6,21 \times 10^{-21} \text{ J}}$

P16.43 $\bar{F} = Nm_0 \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(5,00 \times 10^{23})[(4,65 \times 10^{-26} \text{ kg})2(300 \text{ m/s})]}{1,00 \text{ s}} = 14,0 \text{ N}$

e $P = \frac{\bar{F}}{A} = \frac{14,0 \text{ N}}{8,00 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = \boxed{17,4 \text{ kPa}}$

P16.44 (a) $PV = Nk_B T: N = \frac{PV}{k_B T} = \frac{(1,013 \times 10^5 \text{ Pa})\left[\frac{4}{3}\pi(0,150 \text{ m})^3\right]}{(1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(293 \text{ K})} \\ = \boxed{3,54 \times 10^{23} \text{ átomos}}$

(b) $\bar{K} = \frac{3}{2} k_B T = \frac{3}{2} (1,38 \times 10^{-23})(293) \text{ J} = \boxed{6,07 \times 10^{-21} \text{ J}}$

(c) A massa molar do hélio é 4,00 g.

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3(8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(293 \text{ K})}{4,00 \times 10^{-3} \text{ kg}}} = \boxed{1,35 \text{ km/s}}$$

Seção 16.6 Distribuição de Velocidades Moleculares

P16.45 (a) A média é

$$\begin{aligned}\bar{v} &= \frac{\sum n_i v_i}{\sum n_i} \\ &= \frac{1(2,00) + 2(3,00) + 3(5,00) + 4(7,00) + 3(9,00) + 2(12,0)}{1 + 2 + 3 + 4 + 3 + 2} \text{ m/s} \\ \bar{v} &= \boxed{6,80 \text{ m/s}}\end{aligned}$$

(b) Para encontrar a velocidade ao quadrado média, resolvemos

$$\begin{aligned}\overline{v^2} &= \frac{\sum n_i v_i^2}{\sum n_i} \\ \overline{v^2} &= \left(\frac{1}{15}\right) \left[1(2,00^2) + 2(3,00^2) + 3(5,00^2) + 4(7,00^2) \right. \\ &\quad \left. + 3(9,00^2) + 2(12,0^2) \text{ m}^2/\text{s}^2 \right] \\ \overline{v^2} &= 54,9 \text{ m}^2/\text{s}^2\end{aligned}$$

Então, a velocidade rms é

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{54,9 \text{ m}^2/\text{s}^2} = \boxed{7,41 \text{ m/s}}$$

(c) Há mais partículas a $\boxed{v_{\text{mp}} = 7,00 \text{ m/s}}$ do que a qualquer outra velocidade.

P16.46 Na função de distribuição de velocidades de Maxwell-Boltzmann, tome $\frac{dN_v}{dv} = 0$ para encontrar

$$4\pi N \left(\frac{m_0}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{m_0 v^2}{2k_B T} \right) \left(2v - \frac{2m_0 v^3}{2k_B T} \right) = 0$$

e resolva para v para encontrar a velocidade mais provável. Rejeite $v = 0$ e $v = \infty$ como soluções. Elas descrevem velocidades minimamente prováveis.

$$\text{Retenha apenas } 2 - \frac{m_0 v^2}{k_B T} = 0.$$

$$\text{Então, } v_{\text{mp}} = \sqrt{\frac{2k_B T}{m_0}}.$$

P16.47 (a) De $v_{\text{med}} = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m_0}}$ encontramos a temperatura:

$$T = \frac{\pi(6,64 \times 10^{-27} \text{ kg})(1,12 \times 10^4 \text{ m/s})^2}{8(1,38 \times 10^{-23} \text{ J/mol} \cdot \text{K})} = \boxed{2,37 \times 10^4 \text{ K}}$$

$$(b) \quad T = \frac{\pi(6,64 \times 10^{-27} \text{ kg})(2,37 \times 10^3 \text{ m/s})^2}{8(1,38 \times 10^{-23} \text{ J/mol} \cdot \text{K})} = \boxed{1,06 \times 10^3 \text{ K}}$$

P16.48 A velocidade mais provável é

$$v_{\text{mp}} = \sqrt{\frac{2k_B T}{m_0}} = \sqrt{\frac{2(1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(4,20 \text{ K})}{6,64 \times 10^{-27} \text{ kg}}} = \boxed{132 \text{ m/s}}$$

Seção 16.7 Conexão com o Contexto: O Gradiente Adiabático Atmosférico

P16.49 Em um gradiente adiabático uniforme, a identidade $\frac{\Delta T}{\Delta y} = \frac{T_f - T_i}{\Delta y}$ implica que

$$T_f = T_i + \frac{\Delta T}{\Delta y} \Delta y = 30^\circ\text{C} - (6,5^\circ\text{C/km})(3,66 \text{ km}) = \boxed{6,2^\circ\text{C}}$$

$$\frac{dT}{dy} = -\frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{gM}{R}$$

P16.50 (a)
$$= -\frac{0,400}{1,40} \frac{(9,80 \text{ m/s}^2)(28,9 \text{ g/mol})}{(8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})} \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) \left(\frac{1 \text{ J}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2} \right)$$

$$= -9,73 \times 10^{-3} \text{ K/m} = \boxed{-9,73^\circ\text{C/km}}$$

- (b) O ar contém vapor d'água. O ar não se comporta como um gás ideal. Quando uma parcela de ar ascende na atmosfera e sua temperatura cai, sua capacidade de conter vapor d'água diminui, então a água provavelmente se condensará em gotas líquidas ou em cristais de gelo (a condensação pode ou não ser visível na forma de nuvens). O condensado libera seu calor de vaporização, elevando a temperatura do ar acima do valor que seria esperado de acordo com a parte (a).

- (c) O peso de um corpo de massa m em Marte é igual à força da gravidade do planeta:

$$mg = \frac{GM_{\text{Marte}} m}{r_{\text{Marte}}^2} \quad \text{ou} \quad g = \frac{GM_{\text{Marte}}}{r_{\text{Marte}}^2}$$

$$g = \frac{(6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2)(6,42 \times 10^{23} \text{ kg})}{(3,37 \times 10^6 \text{ m})^2} = 3,77 \text{ m/s}^2$$

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dy} &= -\frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{gM}{R} = -\frac{0,300}{1,30} \frac{(3,77 \text{ m/s}^2)(0,0440 \text{ kg/mol})}{(8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})} \\ &= -4,60 \times 10^{-3} \text{ K/m} = \boxed{-4,60^\circ \text{C/km}} \end{aligned}$$

$$(d) \quad \frac{\Delta T}{\Delta y} = \frac{dT}{dy}: \quad \Delta y = \frac{\Delta T}{\frac{dT}{dy}} = \frac{-60,0^\circ \text{C} - (-40,0^\circ \text{C})}{-4,60^\circ \text{C/km}} = \boxed{4,34 \text{ km}}$$

- (e) A poeira na atmosfera absorve e espalha energia da radiação eletromagnética que chega do Sol através da atmosfera. A poeira contribui energia para as moléculas de gás altas na atmosfera, o que resulta em um aumento da energia interna da atmosfera acima e em uma menor diminuição da temperatura com a altura do que no caso em que não há absorção da luz solar. Quanto maior a quantidade de poeira, mais o gradiente adiabático se desviará do valor teórico na parte (c). Assim, havia mais poeira durante os voos da *Mariner* em 1969.

Problemas Adicionais

P16.51 (a) Empregando a expressão do período T_p de um pêndulo, temos

$$\begin{aligned} T_p &= 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad \rightarrow \quad dT_p = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g}} \left(\frac{1}{2} \right) \frac{dL}{\sqrt{L}} \\ &= 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \left(\frac{1}{2} \right) \frac{dL}{L} = T_p \left(\frac{1}{2} \right) \frac{dL}{L} \\ \frac{dT_p}{T_p} &= \left(\frac{1}{2} \right) \frac{dL}{L} \end{aligned}$$

e $\Delta L = \alpha L_i \Delta T$, então, para uma variação de temperatura dT ,

$$\begin{aligned} dT_p &= T_p \frac{1}{2} \frac{dL}{L} = T_p \frac{\alpha dT}{2} \\ &= 1,000 \text{ s} \frac{(19,0 \times 10^{-6} (^\circ \text{C})^{-1})(10,0^\circ \text{C})}{2} = \boxed{9,50 \times 10^{-5} \text{ s}} \end{aligned}$$

(b) Em uma semana, o tempo perdido = 1 semana \times ($9,50 \times 10^{-5}$ s perdidos por segundo)

tempo perdido

$$= (7,00 \text{ dias/semana}) \left(\frac{86\,400 \text{ s}}{1,00 \text{ dia}} \right) \left(9,50 \times 10^{-5} \frac{\text{s perdidos}}{\text{s}} \right)$$

$$\text{tempo perdido} = \boxed{57,5 \text{ s perdidos}}$$

P16.52 A 0°C , uma massa m de gasolina ocupa um volume $V_{0^\circ\text{C}}$; a densidade da gasolina é

$$\rho_{0^\circ\text{C}} = \frac{m}{V_{0^\circ\text{C}}} = 730 \text{ kg/m}^3$$

À temperatura ΔT acima de 0°C , a mesma massa de gasolina ocupa um volume maior $V = V_{0^\circ\text{C}}(1 + \beta\Delta T)$: a densidade da gasolina é

$$\rho = \frac{m}{V_{0^\circ\text{C}}(1 + \beta\Delta T)} = \frac{\rho_{0^\circ\text{C}}}{(1 + \beta\Delta T)}, \text{ o que é ligeiramente menor do que } \rho_{0^\circ\text{C}}.$$

Para o mesmo volume de gasolina, a diferença de massa entre a gasolina a 0°C e a gasolina a $20,0^\circ\text{C}$ é

$$\begin{aligned} \Delta m &= \rho_{0^\circ\text{C}}V - \rho V = \rho_{0^\circ\text{C}}V - \frac{\rho_{0^\circ\text{C}}}{(1 + \beta\Delta T)}V \\ \Delta m &= \rho_{0^\circ\text{C}}V \left(1 - \frac{1}{(1 + \beta\Delta T)} \right) \\ \Delta m &= \left[(730 \text{ kg/m}^3)(10,0 \text{ gal}) \left(\frac{0,00380 \text{ m}^3}{1,00 \text{ gal}} \right) \right] \\ &\quad \times \left(1 - \frac{1}{1 + (9,60 \times 10^{-4} (\text{°C})^{-1})(20,0^\circ\text{C})} \right) \\ \Delta m &= \boxed{0,523 \text{ kg}} \end{aligned}$$

***P16.53** Assumimos que as dimensões do tubo capilar não mudam.

Para o mercúrio, $\beta = 1,82 \times 10^{-4} (\text{°C})^{-1}$

E para o vidro Pyrex, $\alpha = 3,20 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$

O volume do líquido aumenta conforme $\Delta V_\ell = V\beta\Delta T$.

O volume da carcaça aumenta conforme $\Delta V_g = 3\alpha V\Delta T$.

Portanto, o transbordamento no capilar é $\Delta V_c = V\Delta T(\beta - 3\alpha)$, e, no

capilar, $\Delta V_c = A\Delta h$.

$$\Delta V_c = A\Delta h = V\Delta T(\beta - 3\alpha) \rightarrow \Delta h = \frac{(\beta - 3\alpha)V\Delta T}{A}$$

$$\Delta h = \left[\frac{1}{\pi \left(\frac{0,00400 \times 10^{-2} \text{ m}}{2} \right)^2} \right] \left[1,82 \times 10^{-4} (\text{°C})^{-1} - 3 \left(3,20 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1} \right) \right] \times \left[\frac{4}{3} \pi \left(\frac{0,250 \times 10^{-2} \text{ m}}{2} \right)^3 \right] (30,0 \text{ °C})$$

$$\Delta h = 3,37 \times 10^{-2} \text{ m} = \boxed{3,37 \text{ cm}}$$

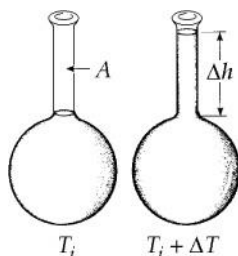


FIG. RESP. P16.53

P16.54 Assumimos que as dimensões do capilar não mudam. O volume do líquido aumenta por $\Delta V_\ell = V\beta\Delta T$. O volume da carcaça aumenta por $\Delta V_g = 3\alpha V\Delta T$. Portanto, o transbordamento no capilar é $\Delta V_c = V\Delta T(\beta - 3\alpha)$; e no capilar, $\Delta V_c = A\Delta h$.

Portanto,
$$\boxed{\Delta h = (\beta - 3\alpha) \frac{V\Delta T}{A}}$$

P16.55 A expansão excedente do latão é

$$\Delta L_{\text{barra}} - \Delta L_{\text{fita}} = (\alpha_{\text{barra}} - \alpha_{\text{aço}}) L_t \Delta T$$

$$\Delta(\Delta L) = (19,0 - 11,0) \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1} (0,950 \text{ m})(35,0 \text{ °C})$$

$$\Delta(\Delta L) = 2,66 \times 10^{-4} \text{ m}$$

(a) A haste se contrai mais do que a fita, até a leitura de comprimento

$$0,9500 \text{ m} - 0,000266 \text{ m} = \boxed{94,97 \text{ cm}}$$

(b) $0,9500 \text{ m} + 0,000266 \text{ m} = \boxed{95,03 \text{ cm}}$

P16.56 (a) Modelo de partícula em equilíbrio

(b) No pistão,

$$\sum F = F_{\text{gas}} - F_g - F_{\text{ar}} = 0: \quad \sum F = PA - mg - P_0A = 0$$

(c) Em equilíbrio, $P_{\text{gas}} = \frac{mg}{A} + P_0$.

Portanto, $\frac{nRT}{hA} = \frac{mg}{A} + P_0$,

ou $h = \frac{nRT}{mg + P_0A}$,

onde empregamos $V = hA$ como o volume do gás.

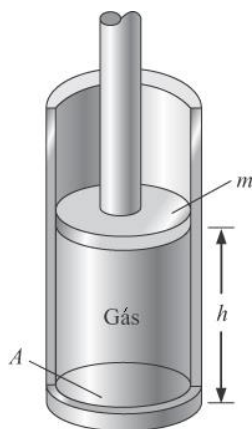


FIG. RESP. P16.56

P16.57 A pressão do gás nos pulmões do mergulhador deve ser igual à pressão absoluta da água a essa profundidade de 50,0 metros. Isso é:

$$P = P_0 + \rho gh = 1,00 \text{ atm} + (1,03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(9,80 \text{ m/s}^2)(50,0 \text{ m})$$

ou $P = 1,00 \text{ atm} + 5,05 \times 10^5 \text{ Pa} \left(\frac{1,00 \text{ atm}}{1,013 \times 10^5 \text{ Pa}} \right) = 5,98 \text{ atm}$

Para que a pressão parcial devida ao oxigênio na mistura de gases seja 1,00 atmosfera (ou a fração $\frac{1}{5,98}$ da pressão total), as moléculas

de oxigênio devem compor apenas $\frac{1}{5,98}$ do número total de moléculas. Isto será verdadeiro se 1,00 mol de oxigênio for utilizado para cada 4,98 mols de hélio. A razão em peso é, então,

$$\frac{(4,98 \text{ mol He})(4,003 \text{ g/mol He})g}{(1,00 \text{ mol O}_2)(2 \times 15,999 \text{ g/mol O}_2)g} = \boxed{0,623}$$

P16.58 O ângulo de deformação θ , entre as tangentes das duas extremidades da lâmina, é igual ao ângulo subtendido pela lâmina no centro da sua curvatura. (Os ângulos são iguais porque os seus lados são perpendiculares, lado direito ao lado direito e lado esquerdo ao lado esquerdo.)

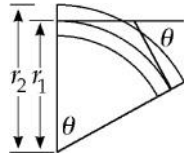


FIG. RESP. P16.58

(a) A definição de medida em radianos dá $L_i + \Delta L_1 = \theta r_1$

e $L_i + \Delta L_2 = \theta r_2$. Por subtração,

$$\Delta L_2 - \Delta L_1 = \theta(r_2 - r_1)$$

$$\alpha_2 L_i \Delta T - \alpha_1 L_i \Delta T = \theta \Delta r$$

$$\theta = \frac{(\alpha_2 - \alpha_1) L_i \Delta T}{\Delta r}$$

(b) Na expressão da parte (a), θ é diretamente proporcional a ΔT e também a $(\alpha_2 - \alpha_1)$. Portanto, θ é zero quando qualquer dessas quantidades se torna zero.

(c) O material que se expande mais ao ser aquecido se contrai mais ao ser resfriado, então a lâmina bimetálica se curva para o outro lado. É divertido demonstrar isso com nitrogênio líquido.

P16.59 Os astronautas expiram essa quantidade de CO_2 :

$$\begin{aligned} n &= \frac{m_{\text{amostra}}}{M} \\ &= \left(\frac{1,09 \text{ kg}}{\text{astronauta} \cdot \text{dia}} \right) \left(\frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right) (3 \text{ astronautas}) (7 \text{ dias}) \left(\frac{1 \text{ mol}}{44,0 \text{ g}} \right) \\ &= 520 \text{ mol} \end{aligned}$$

Então, 520 mols de metano são gerados. Ele está longe da liquefação e se comporta como um gás ideal.

$$P = \frac{nRT}{V} = \frac{(520 \text{ mol})(8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(273,15 \text{ K} - 45 \text{ K})}{150 \times 10^{-3} \text{ m}^3}$$

$$= \boxed{6,57 \times 10^6 \text{ Pa}}$$

P16.60 (a) Do diagrama, vemos que a variação na área é

$$\Delta A = \ell \Delta w + w \Delta \ell + \Delta w \Delta \ell$$

Como tanto $\Delta \ell$ quanto Δw são quantidades pequenas, o produto $\Delta w \Delta \ell$ será muito pequeno. Portanto, assumimos que $\Delta w \Delta \ell \approx 0$.

$$\text{Como } \Delta w = w \alpha \Delta T \text{ e } \Delta \ell = \ell \alpha \Delta T,$$

$$\text{temos então } \Delta A = \ell w \alpha \Delta T + \ell w \alpha \Delta T,$$

$$\text{e, como } A = \ell w, \quad \boxed{\Delta A = 2 \alpha A \Delta T}$$

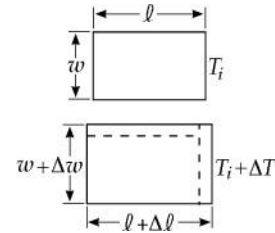


FIG. RESP. P16.60

(b) A aproximação assume que $\Delta w \Delta \ell \approx 0$, ou $\alpha \Delta T \approx 0$. Outra forma de expressar isso é $\boxed{\alpha \Delta T \ll 1}$.

P16.61 Ver FIG. RESP. P16.61. Seja 2θ o ângulo que o trilho curvado subtende. Temos

$$L_i + \Delta L = 2\theta R = L_i (1 + \alpha \Delta T)$$

$$\text{e } \sin \theta = \frac{L_i/2}{R} = \frac{L_i}{2R}.$$

$$\text{Logo, } \theta = \frac{L_i}{2R} (1 + \alpha \Delta T) = (1 + \alpha \Delta T) \sin \theta.$$

Da Tabela 16.1, $\alpha = 11 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$, e $\Delta T = 25,0 \text{ °C} - 20,0 \text{ °C} = 5,00 \text{ °C}$. Devemos resolver a equação transcendental

$$\theta = (1 + \alpha \Delta T) \sin \theta = (1,0000055) \sin \theta$$

Se a sua calculadora tiver sido projetada para resolver tal equação, ela pode encontrar a solução zero. Centrar na solução diferente de zero dá, com cinco dígitos, $\theta = 0,018165 \text{ rad} = 1,0408^\circ$.

$$\text{Agora, } h = R - R \cos \theta = \frac{L_i (1 - \cos \theta)}{2 \sin \theta}.$$

Isso dá $\boxed{h = 4,54 \text{ m}}$, um valor notavelmente grande em comparação com $\Delta L = 5,50 \text{ cm}$.

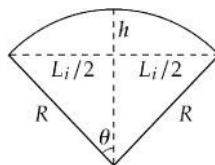


FIG. RESP. P16.61

P16.62 (a) $\rho = \frac{m}{V}$ e $d\rho = -\frac{m}{V^2} dV$

Para variações muito pequenas em V e ρ , isto pode ser expresso como

$$\Delta\rho = -\frac{m}{V} \frac{\Delta V}{V} = -\rho\beta\Delta T \quad \rightarrow \quad \frac{\Delta\rho}{\rho} = -\beta\Delta T$$

(b) À medida que a temperatura aumenta, a densidade diminui.

(c) Para a água, temos

$$\beta = -\frac{\Delta\rho}{\rho\Delta T} = -\frac{0,9997 \text{ g/cm}^3 - 1,0000 \text{ g/cm}^3}{(1,0000 \text{ g/cm}^3)(10,0^\circ\text{C} - 4,0^\circ\text{C})}$$

$$= \boxed{5 \times 10^{-5} (\text{°C})^{-1}}$$

(d)

$$\beta = -\frac{\Delta\rho}{\rho\Delta T} = -\frac{1,0000 \text{ g/cm}^3 - 0,9999 \text{ g/cm}^3}{(1,0000 \text{ g/cm}^3)(4,00^\circ\text{C} - 0,00^\circ\text{C})}$$

$$= \boxed{-2,5 \times 10^{-5} (\text{°C})^{-1}}$$

P16.63 Após a expansão, o comprimento de uma das vigas é

$$L_f = L_i(1 + \alpha\Delta T) = (125 \text{ m}) \left[1 + 12 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1} (20,0^\circ\text{C}) \right] = 125,03 \text{ m.}$$

L_f , y e o comprimento original de 125 m desta viga formam um triângulo retângulo com y como altura. O emprego do teorema de Pitágoras dá

$$(125,03 \text{ m})^2 = y^2 + (125 \text{ m})^2$$

produzindo $y = \boxed{2,74 \text{ m}}$.

P16.64 Seja $\ell = L/2$ o comprimento original de uma das vigas de concreto. Após a expansão, o comprimento de cada uma das vigas é $\ell_f = \ell(1 + \alpha\Delta T)$. Agora, ℓ_f , y e o comprimento original ℓ desta viga formam um triângulo retângulo com altura y . O emprego do teorema de Pitágoras dá

$$\ell_f^2 = \ell^2 + y^2$$

ou

$$y = \sqrt{\ell_f^2 - \ell^2} = \ell \sqrt{(1 + \alpha \Delta T)^2 - 1} = (L/2) \sqrt{2\alpha \Delta T + (\alpha \Delta T)^2}$$

Como $\alpha \Delta T \ll 1$, temos $y \approx L \sqrt{\alpha \Delta T / 2}$

P16.65 Certa quantidade de gás passará através do tampão poroso da câmara de reação 1 ao reservatório 2 conforme a câmara de reação é aquecida, mas a quantidade líquida de gás permanece constante, de acordo com $n_{i1} + n_{i2} = n_{f1} + n_{f2}$. Assumindo que o gás seja ideal, aplicamos $n = \frac{PV}{RT}$ a cada termo:

$$\frac{P_i V_0}{(300 \text{ K})R} + \frac{P_i (4V_0)}{(300 \text{ K})R} = \frac{P_f V_0}{(673 \text{ K})R} + \frac{P_f (4V_0)}{(300 \text{ K})R}$$

$$1 \text{ atm} \left(\frac{5}{300 \text{ K}} \right) = P_f \left(\frac{1}{673 \text{ K}} + \frac{4}{300 \text{ K}} \right)$$

$$P_f = 1,12 \text{ atm}$$

P16.66 (a) Seja m a massa da amostra. O número de mols é $n = \frac{m}{M}$ e a

densidade é $\rho = \frac{m}{V}$. Então, $PV = nRT$ se torna $PV = \frac{m}{M} RT$ ou

$$PM = \frac{m}{V} RT.$$

$$\text{Então, } \rho = \frac{m}{V} = \frac{PM}{RT}$$

$$(b) \quad \rho = \frac{PM}{RT} = \frac{(1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(0,0320 \text{ kg/mol})}{(8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(293 \text{ K})} = 1,33 \text{ kg/m}^3$$

P16.67 $N_v(v) = 4\pi N \left(\frac{m_0}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} v^2 \exp \left(\frac{-m_0 v^2}{2k_B T} \right)$, onde $\exp(x)$ representa e^x

Observe que $v_{\text{mp}} = \left(\frac{2k_B T}{m_0} \right)^{1/2}$.

$$\text{Logo, } N_v(v) = 4\pi N \left(\frac{m_0}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} v^2 e^{(-v^2/v_{\text{mp}}^2)}$$

$$\text{e } \frac{N_v(v)}{N_v(v_{\text{mp}})} = \left(\frac{v}{v_{\text{mp}}} \right)^2 e^{(1-v^2/v_{\text{mp}}^2)}.$$

Para $v = \frac{v_{\text{mp}}}{50}$,

$$\frac{N_v(v)}{N_v(v_{\text{mp}})} = \left(\frac{1}{50} \right)^2 e^{[1-(1/50)^2]} = 1,09 \times 10^{-3}$$

Os outros valores são computados de modo similar, com os seguintes resultados:

	$\frac{v}{v_{\text{mp}}}$	$\frac{N_v(v)}{N_v(v_{\text{mp}})}$
(a)	$\frac{1}{50}$	$1,09 \times 10^{-3}$
(b)	$\frac{1}{10}$	$2,69 \times 10^{-2}$
(c)	$\frac{1}{2}$	0,529
(d)	1	1,00
(e)	2	0,199
(f)	10	$1,01 \times 10^{-41}$
(g)	50	$1,25 \times 10^{-1082}$

Para encontrar o último valor, observamos:

$$\begin{aligned} (50)^2 e^{1-2500} &= 2500 e^{-2499} \\ 10^{\log 2500} e^{(\ln 10)(-2499/\ln 10)} &= 10^{\log 2500} 10^{-2499/\ln 10} = 10^{\log 2500 - 2499/\ln 10} \\ &= 10^{-1081,904} = 10^{0,096} \times 10^{-1082} \end{aligned}$$

P16.68 (a) De $PV = nRT$, o volume é $V = \left(\frac{nR}{P} \right) T$.

Portanto, quando pressão é mantida constante, $\frac{dV}{dT} = \frac{nR}{P} = \frac{V}{T}$.

$$\text{Logo, } \beta \equiv \left(\frac{1}{V} \right) \frac{dV}{dT} = \left(\frac{1}{V} \right) \frac{V}{T} \quad \text{ou} \quad \beta = \boxed{\frac{1}{T}}$$

(b) A $T = 0^\circ\text{C} = 273,15\text{ K}$, ela prevê $\beta = \frac{1}{273\text{ K}} = \boxed{3,66 \times 10^{-3}\text{ K}^{-1}}$.

Os valores experimentais são:

(c)

$\beta_{\text{He}} = 3,665 \times 10^{-3}\text{ K}^{-1}$, isso concorda com o valor tabelado dentro de uma margem de erro de 0,06%.

(d)

$\beta_{\text{ar}} = 3,67 \times 10^{-3}\text{ K}^{-1}$, isso concorda com o valor tabelado dentro de uma margem de erro de 0,2%.

P16.69

(a)

Nenhum torque age no disco, então seu momento angular é constante. Sim: ela aumenta. À medida que o disco esfria, seu raio, e, portanto, seu momento de inércia, diminuem. A conservação do momento angular requer então que sua velocidade angular aumente.

(b)

$$I_i \omega_i = I_f \omega_f = \frac{1}{2} M R_i^2 \omega_i = \frac{1}{2} M R_f^2 \omega_f = \frac{1}{2} M [R_i + R_i \alpha \Delta T]^2 \omega_f =$$

$$\frac{1}{2} M R_i^2 [1 - \alpha |\Delta T|]^2 \omega_f$$

$$\omega_f = \omega_i [1 - \alpha |\Delta T|]^{-2} = \frac{25,0\text{ rad/s}}{[1 - (17 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1})(830^\circ\text{C})]^2} = \frac{25,0\text{ rad/s}}{0,972}$$

$$= \boxed{25,7\text{ rad/s}}$$

***P16.70** Sigamos o ciclo, assumindo que as condições dos gases ideais sejam satisfeitas (isso é, que o gás nunca se aproxime das condições em que ocorreria uma transição de fase).

Podemos empregar a lei dos gases ideais:

$$PV = nRT,$$

em que a pressão e a temperatura devem ser a pressão total (em pascais ou atm, dependendo das unidades escolhidas para R) e a temperatura absoluta (em K).

No **estágio (1)** do ciclo, o processo é:

$$PV = nRT \rightarrow V\Delta P = nR\Delta T$$

E, como apenas T e P variam:

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{V}{nR} = \text{const.}$$

Logo:

$$\frac{T_f}{P_f} = \frac{T_i}{P_i} = \frac{V}{nR} = \text{const.}$$

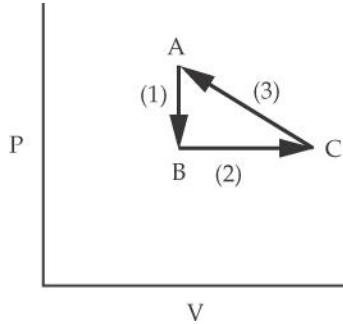


FIG. RESP. P16.70

Entretanto, quando substituímos na relação temperatura–pressão do **estágio (1)**, obtemos:

$$\begin{aligned} \frac{T_f}{P_f} = \frac{T_i}{P_i} \rightarrow T_B = T_f = \frac{P_f}{P_i} T_i &= \frac{0,870 \text{ atm}}{1,000 \text{ atm}} (150^\circ\text{C} + 273,15) = 368,14 \text{ K} \\ &= \boxed{95,0^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

T cai abaixo de 100°C , então o vapor se condensa e o aparato caro cai (assumindo que o ponto de ebulição não mude significativamente com a variação de pressão).

P16.71 $I = \int r^2 dm$

e, como $r(T) = r(T_i)(1 + \alpha\Delta T)$,

$$\frac{I(T)}{I(T_i)} = (1 + \alpha\Delta T)^2$$

Logo $\frac{\Delta I}{I} = \frac{I(T) - I(T_i)}{I(T_i)} = (1 + \alpha\Delta T)^2 - 1.$

(a) Com $\alpha = 17,0 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$ e $\Delta T = 100^\circ\text{C}$, encontramos, para o Cu:

$$\frac{\Delta I}{I} = \left[1 + (17,0 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1})(100^\circ\text{C}) \right]^2 - 1 = \boxed{0,340\%}$$

(b) Com $\alpha = 24,0 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$ e $\Delta T = 100 \text{°C}$, encontramos para o Al:

$$\frac{\Delta I}{I} = \left[1 + \left(24,0 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1} \right) (100 \text{°C}) \right]^2 - 1 = \boxed{0,481\%}$$

P16.72 (a) A função de distribuição de velocidades de Maxwell é

$$N_v = 4\pi N \left(\frac{m_0}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} v^2 e^{-m_0 v^2 / 2k_B T}$$

$$\text{Com } N = 1,00 \times 10^4, \quad m_0 = \frac{M}{N_A} = \frac{0,032 \text{ kg}}{6,02 \times 10^{23}} = 5,32 \times 10^{-26} \text{ kg},$$

$T = 500 \text{ K}$ e $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/molécula} \cdot \text{K}$, isto se torna

$$N_v = (1,71 \times 10^{-4}) v^2 e^{-(3,85 \times 10^{-6}) v^2}$$

A FIG. RESP. P16.72(a) abaixo é um gráfico desta função na faixa $0 \leq v \leq 1500 \text{ m/s}$.

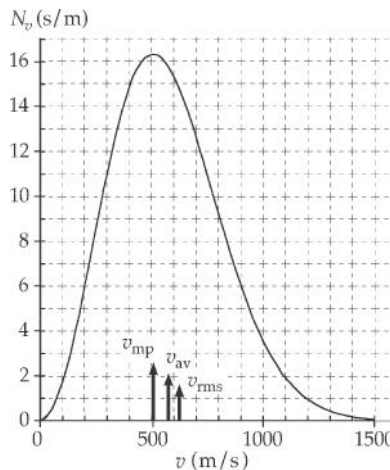


FIG. RESP. P16.72(a)

(b) A velocidade mais provável ocorre quando N_v é máximo.

Do gráfico, $v_{mp} \approx 510 \text{ m/s}$.

$$v_{med} = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m_0}}$$

$$(c) \quad = \sqrt{\frac{8(1,38 \times 10^{-23} \text{ J/molécula} \cdot \text{K})(500 \text{ K})}{\pi(5,32 \times 10^{-26} \text{ kg})}} = \boxed{575 \text{ m/s}}$$

Além disso,

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m_0}} = \sqrt{\frac{3(1,38 \times 10^{-23} \text{ J/molécula} \cdot \text{K})(500 \text{ K})}{5,32 \times 10^{-26} \text{ kg}}} = \boxed{624 \text{ m/s}}$$

(d) A fração de partículas nesta faixa de $300 \text{ m/s} \leq v \leq 600 \text{ m/s}$

$$\text{é } \frac{\int_{300}^{600} N_v dv}{N},$$

onde $N = 10^4$ e a integral de N_v é obtida do gráfico como a área sob a curva. Isso corresponde aproximadamente à área de um grande retângulo de 11 s/m de altura e 300 m/s de largura [vértices em (300, 0), (300, 11), (600, 11), e (600, 0)], mais um retângulo menor de 5,5 s/m de altura e 100 m/s de largura [vértices em (500, 11), (500, 16,6), (600, 16,5), e (600, 11)], mais um triângulo de 5,5 s/m de altura com uma base de 200 m/s [vértices em (300, 11), (500, 16,5), e (500, 11)]:

$$(11)(300) + (5,5)(100) + (1/2)(5,5)(200) = 4\,400$$

e a fração é 0,44, ou $\boxed{44\%}$.

***P16.73** (a) $\frac{P_0 V}{T} = \frac{P' V'}{T'}$, pois a quantidade de gás permanece constante.

O volume aumenta por Ah quando o pistão sobe:

$$V' = V + Ah$$

Quando o pistão comprime a mola por h , a força da mola aumenta por $F = kx = kh$, aumentando a pressão externa sobre o pistão por kh/A :

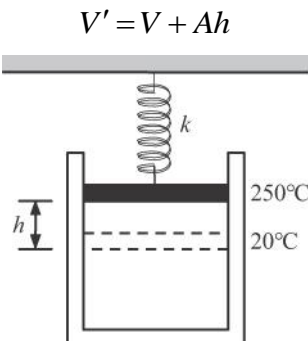


FIG. RESP. P16.73

Empregando o modelo de partícula em equilíbrio aplicado ao pistão,

$$\left(P_0 + \frac{kh}{A}\right)(V + Ah) = P_0 V \left(\frac{T'}{T}\right)$$

$$(1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2 + 2,00 \times 10^5 \text{ N/m}^3 h) \times (5,00 \times 10^{-3} \text{ m}^3 + (0,0100 \text{ m}^2)h) = (1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(5,00 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \left(\frac{523 \text{ K}}{293 \text{ K}}\right)$$

$$2000h^2 + 2013h - 397 = 0$$

$$\text{Tomando a raiz positiva, } h = \frac{-2013 + 2689}{4000} = \boxed{0,169 \text{ m}}$$

$$(b) \quad P' = P + \frac{kh}{A} = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa} + \frac{(2,00 \times 10^3 \text{ N/m})(0,169 \text{ m})}{0,0100 \text{ m}^2}$$

$$P' = \boxed{1,35 \times 10^5 \text{ Pa}}$$

P16.74 Com o pistão sozinho, $T = \text{constante}$, então $PV = P_0 V_0$ ou $P(Ah_i) = P_0(Ah_0)$.

$$\text{Com } A = \text{constante, } P = P_0 \left(\frac{h_0}{h_i}\right).$$

$$\text{Porém, } P = P_0 + \frac{m_p g}{A},$$

onde m_p é a massa do pistão.

$$\text{Assim, } P_0 + \frac{m_p g}{A} = P_0 \left(\frac{h_0}{h_i}\right), \text{ que se reduz a } h_i = \frac{h_0}{1 + m_p g / P_0 A}.$$

Com o cachorro de massa M sobre o pistão, um cálculo muito parecido (substituindo m_p por $m_p + M$) dá:

$$h' = \frac{h_0}{1 + (m_p + M)g / P_0 A}$$

Assim, quando o cachorro sobe no pistão, este se move para baixo por

$$\Delta h = h_i - h'$$

$$= \frac{50,0 \text{ cm}}{1 + (20,0 \text{ kg})(9,80 \text{ m/s}^2) / \left[(1,013 \times 10^5 \text{ Pa}) \pi (0,400 \text{ m})^2 \right]} - \frac{50,0 \text{ cm}}{1 + (45,0 \text{ kg})(9,80 \text{ m/s}^2) / \left[(1,013 \times 10^5 \text{ Pa}) \pi (0,400 \text{ m})^2 \right]}$$

$$\Delta h = \boxed{2,38 \text{ mm}}$$

(b) $P = \text{constante}$, então $\frac{V}{T} = \frac{V'}{T'}$ ou $\frac{Ah_i}{T} = \frac{Ah'}{T'}$,

o que dá

$$T = T_i \left(\frac{h_i}{h'} \right) = T_i \frac{1 + (m_p + M)g / P_0 A}{1 + m_p g / P_0 A}$$

$$= 293 \text{ K} \frac{1 + (45,0 \text{ kg})(9,80 \text{ m/s}^2) / \left[(1,013 \times 10^5 \text{ Pa}) \pi (0,400 \text{ m})^2 \right]}{1 + (20,0 \text{ kg})(9,80 \text{ m/s}^2) / \left[(1,013 \times 10^5 \text{ Pa}) \pi (0,400 \text{ m})^2 \right]}$$

$$T = \boxed{294,4 \text{ K} = 21,4 \text{ }^\circ\text{C}}$$

P16.75 (a) Substituindo $P' = P_0 + \rho g d$ e $P'V' = P_0 V_i$ em $B = \rho g V'$, obtemos

$$B = \frac{\rho g P_0 V_i}{P'} = \boxed{\frac{\rho g P_0 V_i}{P_0 + \rho g d}}$$

(b) Como d está no denominador, B deve diminuir conforme a profundidade aumenta. (O volume do balão se torna menor com o aumento da pressão.)

$$(c) \frac{1}{2} = \frac{B(d)}{B(0)} = \frac{\rho g P_0 V_i / (P_0 + \rho g d)}{\rho g P_0 V_i / P_0} = \frac{P_0}{P_0 + \rho g d}$$

$$P_0 + \rho g d = 2P_0$$

$$d = \frac{P_0}{\rho g} = \frac{1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2}{(1,00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(9,80 \text{ m/s}^2)} = \boxed{10,3 \text{ m}}$$

RESPOSTAS PARA OS PROBLEMAS PARES

P16.2 (a) 810 °F; (b) 450 K

P16.4 (a) -270 °C; (b) 1,27 atm, 1,74 atm

- P16.6** (a) 37,0 °C, 310 K; (b) -20,6 °C, 253 K
- P16.8** 55,0 °C
- P16.10** (a) 437 °C; (b) $2,1 \times 10^{-3}$ °C; (c) Não. O alumínio derrete a 660 °C. Além disso, o latão derrete a cerca de 900 °C.
- P16.12** A temperatura $T = -376^\circ \text{C}$ requerida é abaixo do zero absoluto.
- P16.14** (a) $\frac{\rho_0}{(1 + \beta \Delta T)}$; (b) m
- P16.16** $\Delta r = 0,663 \text{ mm}$ para a direita, a $78,2^\circ$ abaixo da horizontal
- P16.18** 0,548 gal
- P16.20** 1,89 MPa
- P16.22** 877
- P16.24** $6,64 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- P16.26** Em cada ciclo de bombear-e-descarregar, o volume de ar no tanque dobra. Assim, 1,00 L de água é expulso pelo ar injetado na primeira bombeada, 2,00 L na segunda, e apenas o 1,00 L restante na terceira. Cada pessoa poderia usar mais eficientemente seu dispositivo começando com o tanque cheio de água até a metade, em vez de 80% cheio.
- P16.28** $\sim 10^2 \text{ kg}$
- P16.30** 7,13 m
- P16.32** $m_1 - m_2 = \frac{P_0 V M}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$
- P16.34** (a) $1,17 \times 10^{-3} \text{ kg}$; (b) 11,5 mN; (c) 1,01 kN; (d) as moléculas devem se mover muito rápido
- P16.36** 4,39 kg
- P16.38** $\frac{3}{2} \frac{PV}{\bar{K} N_A}$
- P16.40** (a) $8,76 \times 10^{-21} \text{ J}$; (b) Para o hélio, $v_{\text{rms}} = 1,62 \text{ km/s}$ e para o argônio, $v_{\text{rms}} = 514 \text{ m/s}$
- P16.42** (a) 2,28 kJ; $6,21 \times 10^{-21} \text{ J}$
- P16.44** (a) $3,54 \times 10^{23}$ átomos; (b) $6,07 \times 10^{-21} \text{ J}$; (c) 1,35 km/s
- P16.46** Ver explicação completa em P16.46.
- P16.48** 132 m/s

P16.50 (a) $-9,73\text{ }^{\circ}\text{C/km}$; (b) O ar contém vapor d'água. O ar não se comporta como um gás ideal. Quando uma parcela de ar ascende na atmosfera e sua temperatura cai, sua capacidade de conter vapor d'água diminui, então a água provavelmente se condensará em gotas líquidas ou em cristais de gelo (A condensação pode ou não ser visível na forma de nuvens). O condensado libera seu calor de vaporização, elevando a temperatura do ar acima do valor que seria esperado de acordo com a parte (a); (c) $-4,60\text{ }^{\circ}\text{C/km}$; (d) $4,34\text{ km}$; (e) A poeira na atmosfera absorve e espalha energia da radiação eletromagnética que chega do Sol através da atmosfera. A poeira contribui energia para as moléculas de gás altas na atmosfera, o que resulta em um aumento da energia interna da atmosfera acima e em uma menor diminuição da temperatura com a altura do que no caso em que não há absorção de luz solar. Quanto maior for a quantidade de poeira, mais o gradiente adiabático se desviará do valor teórico na parte (c). Assim, havia mais poeira durante os voos da *Mariner* em 1969.

P16.52 $0,523\text{ kg}$

P16.54
$$\Delta h = (\beta - 3\alpha) \frac{V\Delta T}{A}$$

P16.56 (a) Modelo de partícula em equilíbrio; (b) No pistão,

$$\sum F = F_{\text{gas}} - F_g - F_{\text{ar}} = 0; \sum F = PA - mg - P_0A = 0; \text{ (c) } h = \frac{nRT}{mg + P_0A}$$

P16.58 $\theta = \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)L_1\Delta T}{\Delta r}$; (b) Na expressão da parte (a), θ é diretamente proporcional a ΔT e também a $(\alpha_2 - \alpha_1)$. Portanto, θ é zero quando qualquer dessas quantidades se torna zero; (c) a lâmina bimetálica se curva para o outro lado

P16.60 (a) $\Delta A = 2\alpha A\Delta T$; (b) $\alpha\Delta T \ll 1$

P16.62 (a) Ver a explicação completa em P16.62(a); (b) à medida que a temperatura aumenta, a densidade diminui; (c) $5 \times 10^{-5}\text{ }(^{\circ}\text{C})^{-1}$; (d) $-2,5 \times 10^{-5}\text{ }(^{\circ}\text{C})^{-1}$

P16.64 $y \approx L\sqrt{\alpha\Delta T/2}$

P16.66 (a) $\frac{PM}{RT}$; (b) $1,33\text{ kg/m}^3$

P16.68 (a) $\beta = \frac{1}{T}$; (b) $3,66 \times 10^{-3}\text{ K}^{-1}$; (c) $\beta_{\text{He}} = 3,665 \times 10^{-3}\text{ K}^{-1}$, isso concorda com o valor tabelado dentro de uma margem de erro de 0,06%;

(d) $\beta_{\text{He}} = 3,67 \times 10^{-3}\text{ K}^{-1}$, isso concorda com o valor tabelado dentro de uma margem de erro de 0,2%

- P16.70** 95,0°; T cai abaixo de 100 °C, então o vapor se condensa e o aparato caro cai (assumindo que o ponto de ebulição não mude significativamente com a variação de pressão).
- P16.72** (a) Ver FIG. RESP. P16.72(a); (b) $v_{\text{mp}} \approx 510 \text{ m/s}$; (c) 575 m/s, 624 m/s; (d) 44%
- P16.74** (a) 2,38 mm; (b) 294,4 K = 21,4 °C