

---

---

## Exercícios Resolvidos de Termodinâmica

**Jason Alfredo Carlson Gallas**, professor titular de física teórica,  
Doutor em Física pela Universidade Ludwig Maximilian de Munique, Alemanha  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Instituto de Física

Matéria para a QUARTA prova. Numeração conforme a **quarta** edição do livro  
“Fundamentos de Física”, Halliday, Resnick e Walker.

Esta e outras listas encontram-se em: <http://www.if.ufrgs.br/~jgallas>

---

---

### Conteúdo

<b>19 Temperatura</b>	<b>2</b>	19.2 Exercícios e Problemas . . . . .	2
19.1 Questões . . . . .	2	19.2.1 Medindo temperatura . . . . .	2
		19.2.2 As escalas Celsius e Fahrenheit	3
		19.2.3 Expansão térmica . . . . .	3

Comentários/Sugestões e Erros: favor enviar para [jgallas @ if.ufrgs.br](mailto:jgallas@if.ufrgs.br)  
(lista4.tex)

## 19 Temperatura

### 19.1 Questões

#### Q 19-3.

Um pedaço de gelo e um termômetro mais quente são colocados num recipiente hermeticamente fechado, no vácuo. O gelo e o termômetro estão suspensos de tal maneira, que não ficam em contato. Por que a leitura do termômetro diminui, após algum tempo?

► O termômetro transfere calor por irradiação. As formas de transferência de calor serão estudadas no capítulo 20.

#### Q 19-7.

Embora pareça impossível atingir o zero absoluto de temperatura, temperaturas tão baixas quanto 0.000000002 K foram alcançadas em laboratórios. Isto não seria suficiente para todos os fins práticos? Por que os físicos deveriam (como realmente fazem) tentar obter temperaturas ainda mais baixas?

► Porque a muito baixas temperaturas os materiais exibem propriedades não observadas a temperaturas usuais. A supercondutividade é um exemplo dessas propriedades. A motivação para esse tipo de pesquisa está na possibilidade de encontrar novos fenômenos e propriedades físicas dos materiais. A tentativa de reduzir os limites físicos induz o desenvolvimento de instrumentos de medida mais e mais sofisticados, que são posteriormente usados em outros campos.

#### Q 19-14.

Explique por que, quando colocamos um termômetro de mercúrio numa chama, a coluna de mercúrio desce um pouco, antes de começar a subir.

► Porque o vidro que contém o mercúrio inicia seu processo de dilatação primeiro. Depois, a dilatação do mercúrio é mais notável, porque este tem um coeficiente de dilatação maior do que o do vidro.

#### Q 19-18.

Duas lâminas, uma de ferro e outra de zinco, são rebatidas uma na outra, formando uma barra que se encurva quando é aquecida. Por que a parte de ferro fica sempre

no interior da curva?

► Porque o zinco tem coeficiente linear de expansão térmica maior que o ferro. Procure tais valores em alguma Tabela.

#### Q 19-22.

Explique por que a dilatação aparente de um líquido num tubo de vidro, quando aquecido, não corresponde à verdadeira expansão do líquido.

► Porque o vidro que contém o líquido também se expande.

### 19.2 Exercícios e Problemas

#### 19.2.1 Medindo temperatura

#### P 19-6.

Dois termômetros de gás a volume constante são usados em conjunto. Um deles usa nitrogênio e o outro, hidrogênio. A pressão do gás em ambos os bulbos é  $p_3 = 80$  mm de Hg. Qual é a diferença de pressão nos dois termômetros, se colocarmos ambos em água fervendo? Em qual dos termômetros a pressão será mais alta?

► Tomamos  $p_3$  como sendo 80 mm de mercúrio para ambos termômetros. De acordo com a Fig. 19-6, o termômetro de  $N_2$  fornece 373.35 K para o ponto de ebulição da água. Usamos a Eq. 19-5 para determinar a pressão:

$$p_N = \frac{T}{273.16} p_3 = \left( \frac{373.35}{273.16} \right) (80) \\ = 109.343 \text{ mm de mercúrio.}$$

Analogamente, o termômetro de hidrogênio fornece 373.16 para o ponto de ebulição da água e

$$p_H = \left( \frac{373.16}{273.16} \right) (80) \\ = 109.287 \text{ mm de mercúrio.}$$

A pressão no termômetro de nitrogênio é maior que a pressão no termômetro de hidrogênio por 0.056 mm de mercúrio.

### 19.2.2 As escalas Celsius e Fahrenheit

#### E 19-14.

A que temperatura os seguintes pares de escalas dão a mesma leitura: **(a)** Fahrenheit e Celsius (veja Tabela 19-2), **(b)** Fahrenheit e Kelvin e **(c)** Celsius e Kelvin?

► **(a)** As temperaturas Fahrenheit e Celsius estão relacionadas pela fórmula  $T_F = 9T_C/5 + 32$ . Dizer que a leitura de ambas escalas é a mesma significa dizer que  $T_F = T_C$ . Substituindo esta condição na expressão acima temos  $T_C = 9T_C/5 + 32$  de onde tiramos

$$T_C = -\frac{5}{4}(32) = -40^\circ \text{C}.$$

**(b)** Analogamente, a condição para as escalas Fahrenheit e Kelvin é  $T_F = T$ , fornecendo

$$T = \frac{9}{5}(T - 273.15) + 32,$$

ou seja,

$$T = \frac{5}{4} \left[ \frac{(9)(273.15)}{5} - 32 \right] = 575 \text{ K}.$$

**(c)** Como as escala Celsius e Kelvin estão relacionadas por  $T_C = T - 273.15$ , vemos que não existe nenhuma temperatura para a qual essas duas escalas possam fornecer a mesma leitura.

#### P 19-17.

Observamos, no dia-a-dia, que objetos, quentes ou frios, esfriam ou aquecem até adquirir a temperatura ambiente. Se a diferença de temperatura  $\Delta T$  entre o objeto e o ambiente não for muito grande, a taxa de esfriamento ou aquecimento será proporcional à diferença de temperatura, isto é,

$$\frac{d\Delta T}{dt} = -A(\Delta T),$$

onde  $A$  é uma constante. O sinal menos aparece porque  $\Delta T$  diminui com o tempo, se for positivo, e aumenta, se negativo. Esta é a *lei de Newton do resfriamento*. **(a)** De que fatores depende  $A$ ? Qual a sua dimensão? **(b)** Se no instante  $t = 0$  a diferença de temperatura for  $\Delta T_0$ , mostre que

$$\Delta T = \Delta T_0 e^{-At}$$

num instante posterior  $t$ .

► **(a)** Mudanças na temperaturam ocorrem através de radiação, condução e convecção. O valor de  $A$  pode ser reduzido isolando os objetos através de uma camada de vácuo, por exemplo. Isto reduz condução e convecção. Absorção de radiação pode ser reduzida polindo-se a superfície até ter a aparência de um espelho. Claramente  $A$  depende da condição da superfície do objeto e da capacidade do ambiente de conduzir ou convectar energia do e para o objeto. Como podemos reconhecer da equação diferencial acima,  $A$  tem dimensão de  $(\text{tempo})^{-1}$ .

**(b)** Rearranjando a equação diferencial dada obtemos

$$\frac{1}{\Delta T} \frac{d\Delta T}{dt} = -A.$$

Integrando-a em relação a  $t$  e observando que

$$\int \frac{1}{\Delta T} \frac{d\Delta T}{dt} dt = \int \frac{1}{\Delta T} d(\Delta T),$$

temos

$$\int_{\Delta T_0}^{\Delta T} \frac{1}{\Delta T} d(\Delta T) = - \int_0^t A dt$$

$$\ln \Delta T \Big|_{\Delta T_0}^{\Delta T} = -At$$

$$\ln \frac{\Delta T}{\Delta T_0} = -At,$$

que reescrita de modo equivalente fornece o resultado desejado:

$$\Delta T = \Delta T_0 e^{-At}.$$

### 19.2.3 Expansão térmica

#### E 19-24.

Uma barra feita com uma liga de alumínio mede 10 cm a  $20^\circ \text{C}$  e 10.015 cm no ponto de ebulição da água. **(a)** Qual o seu comprimento no ponto de congelamento da água? **(b)** Qual a sua temperatura, se o seu comprimento é 10.009 cm?

► **(a)** A relação para a variação do comprimento,  $\Delta L = L \alpha \Delta T$ , permite calcular o coeficiente de expansão linear da barra:  $\alpha = 1.875 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Portanto, partindo-se dos 10 cm a  $20^\circ \text{C}$ , vemos que ao baixarmos a temperatura até o ponto de congelamento da água a barra sofre uma variação de comprimento dada por

$$\begin{aligned} \Delta L &= L \alpha (t_f - t_i) \\ &= (10)(1.875 \times 10^{-5})(0 - 20) \\ &= -0.0037 \text{ cm}. \end{aligned}$$

Portanto o comprimento procurado é

$$L' = L + \Delta L = 10 - 0.0037 = 9.9963 \text{ cm.}$$

(b) Partindo-se novamente dos 10 cm a 20° C, percebemos logo que para chegar a 10.009 cm a temperatura terá que *aumentar*. A matemática nos fornece sempre o sinal correto. Como  $L_i \equiv L$ , da relação

$$\Delta L = L_f - L = L \alpha \Delta t = L \alpha (t_f - t_i)$$

obtemos facilmente a temperatura procurada:

$$\begin{aligned} t_f = t_i + \frac{L_f - L}{L \alpha} &= 20 + \frac{10.009 - 10}{(10)(1.875 \times 10^{-5})} \\ &= 20 + 48 = 68^\circ \text{ C.} \end{aligned}$$

### E 19-30.

Um cubo de latão tem aresta de 30 cm. Qual o aumento de sua área, se a temperatura subir de 20 para 75 °C?

► Aqui consideramos a equação da expansão superficial, com coeficiente de dilatação

$$2 \times \alpha_{\text{latão}} = 38 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1},$$

onde tiramos o  $\alpha_{\text{latão}}$  da Tabela 19-3, pag. 176. Portanto,

$$\begin{aligned} \Delta A &= A (2\alpha) \Delta T, \\ &= (900)(38 \times 10^{-6})(55) \\ &= 1.881 \text{ cm}^2. \end{aligned}$$

### P 19-36.

Uma barra de aço a 25 °C tem 3 cm de diâmetro. Um anel de latão tem diâmetro interior de 2.992 cm a 25 °C. A que temperatura comum o anel se ajustará exatamente à barra?

► Após a mudança de temperatura o diâmetro da barra de aço é  $D_a = D_{a0} + \alpha_a D_{a0} \Delta T$  e o diâmetro do anel de latão é  $D_\ell = D_{\ell 0} + \alpha_\ell D_{\ell 0} \Delta T$ , onde  $D_{a0}$  e  $D_{\ell 0}$  são os diâmetros originais,  $\alpha_a$  e  $\alpha_\ell$  são os coeficientes lineares de expansão, e  $\Delta T$  é a mudança da temperatura. A barra se ajustará exatamente à barra quando tivermos  $D_a = D_\ell$ , os seja quando

$$D_{a0} + \alpha_a D_{a0} \Delta T = D_{\ell 0} + \alpha_\ell D_{\ell 0} \Delta T,$$

de onde obtemos  $\Delta T$ :

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{D_{a0} - D_{\ell 0}}{\alpha_\ell D_{\ell 0} - \alpha_a D_{a0}} \\ &= \frac{3 - 2.992}{(19 \times 10^{-6})(2.992) - (11 \times 10^{-6})(3)} \\ &= 335^\circ \text{ C.} \end{aligned}$$

Portanto a temperatura procurada é

$$T = 25 + 335 = 360^\circ \text{ C.}$$

### P 19-39.

Densidade é massa dividida por volume. Como o volume depende da temperatura, a densidade também depende. Mostre que, se a temperatura variar de  $\Delta T$ , a variação da densidade será

$$\Delta \rho = -\beta \rho \Delta T,$$

onde  $\beta$  é o coeficiente de dilatação volumétrica. Explique o sinal negativo.

► Sabemos que  $\Delta V = V \beta \Delta T$ , ou seja, que

$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = V \beta.$$

Da definição de densidade  $\rho = m/V$  obtemos

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \rho}{\Delta T} &= -\frac{m}{V^2} \frac{\Delta V}{\Delta T} = -\frac{m}{V^2} V \beta \\ &= -\frac{m}{V} \beta = -\rho \beta. \end{aligned}$$

Comparando as duas extremidades obtemos que

$$\Delta \rho = -\beta \rho \Delta T.$$

Quando  $\Delta T$  é positivo, o volume aumenta e a densidade diminui, ou seja,  $\Delta \rho$  é negativo. Se  $\Delta T$  é negativo, o volume diminui e a densidade aumenta, isto é,  $\Delta \rho$  é positivo.

### P 19-42.

A temperatura de uma moeda de cobre aumenta de 100 °C e seu diâmetro cresce 0.18 %. Dê o aumento percentual, com dois algarismos significativos, (a) na área, (b) na espessura, (c) no volume e (d) na massa da moeda. (e) Qual o coeficiente de dilatação linear da moeda?

► (a) Como sabemos que o coeficiente de expansão superficial é o **dobro** do coeficiente de expansão linear,

podemos afirmar imediatamente que o aumento percentual na área será o dobro do aumento percentual linear, ou seja 0.36%.

Mais formalmente, podemos ver isto comparando as fórmulas

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha \Delta T = 0.0018$$

$$\frac{\Delta A}{A} = 2\alpha \Delta T = (2)(0.0018) = 0.36\%$$

(b) A espessura  $h$  da moeda varia *linearmente* e, portanto, sua variação percentual coincide com a do item anterior:

$$\frac{\Delta h}{h} = \alpha \Delta T = 0.0018 = 0.18\%$$

(c) A variação no volume é:

$$\frac{\Delta V}{V} = 3\alpha \Delta T = (3)(0.0018) = 0.54\%$$

(d) Não há variação na massa da moeda.

(e) Qualquer das relações acima pode ser usada para determinar  $\alpha$ . Por exemplo, usando a do item (a) temos:

$$\frac{\Delta d}{d} = \alpha \Delta T = \alpha (100) = 0.0018,$$

donde tiramos que

$$\alpha = 18 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}.$$

Perceba que para responder aos itens (a)-(d) *não* é necessário conhecer-se  $\alpha$ . Esta é a razão do livro pedir para determinar  $\alpha$  apenas ao final do exercício.

#### **P-46.**

(a) Mostre que, se os comprimentos de duas barras de materiais diferentes são inversamente proporcionais aos seus respectivos coeficientes de dilatação linear, à mesma temperatura inicial, a diferença em comprimento entre elas será a mesma, a todas as temperaturas. (b) Quais devem ser os comprimentos de uma barra de aço e outra de latão a  $0^\circ\text{C}$ , tais que, a qualquer temperatura, a diferença de comprimento seja 0.30 m?

► (a) À temperatura inicial, considere-se os comprimentos das duas barras dados por:

$$L_{1o} = \frac{N}{\alpha_1} \quad \text{e} \quad L_{2o} = \frac{N}{\alpha_2},$$

onde  $N$  é a constante de proporcionalidade.

Quando a temperatura varia de um  $\Delta T$ , tem-se:

$$L_1 = \frac{N}{\alpha_1} + N \Delta T \quad \text{e} \quad L_2 = \frac{N}{\alpha_2} + N \Delta T$$

A diferença entre os comprimentos iniciais das barras é:

$$\begin{aligned} \Delta L_o &= L_{1o} - L_{2o} = \frac{N}{\alpha_1} - \frac{N}{\alpha_2}, \\ &= N \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha_1 \alpha_2}. \end{aligned}$$

A diferença entre os comprimentos das barras quando a temperatura variou de  $\Delta T$  é:

$$\Delta L = L_1 - L_2 = \frac{N}{\alpha_1} + N \Delta T - \frac{N}{\alpha_2} - N \Delta T$$

$$\Delta L = N \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha_1 \alpha_2}$$

$$\Delta L = \Delta L_o$$

(b) Sendo  $\Delta L = 0,30$  m e os valores dos coeficientes de expansão do aço e do latão dados por

$$\alpha_{\text{aço}} = 11 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

e

$$\alpha_{\text{latão}} = 19 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1},$$

$$0,30 = N \frac{(19 - 11) \times 10^{-6}}{2,09 \times 10^{-10}}$$

$$N = 7,84 \times 10^{-6}$$

$$L_{1o} = \frac{7,84 \times 10^{-6}}{19 \times 10^{-6}} = 0,4125 \text{ m}$$

$$L_{2o} = \frac{7,84 \times 10^{-6}}{11 \times 10^{-6}} = 0,7125 \text{ m}$$

$$\Delta L_o = 0,30 \text{ m.}$$

#### **P 19-50.**

Uma barra composta, de comprimento  $L = L_1 + L_2$ , é feita de uma barra de material 1 e comprimento  $L_1$ , ligada à outra de material 2 e comprimento  $L_2$  (Fig. 19-18). (a) Mostre que o coeficiente de dilatação efetivo para esta barra é

$$\alpha = \frac{(\alpha_1 L_1 + \alpha_2 L_2)}{L}.$$

(b) Usando aço e latão, dimensione uma barra composta de 52.4 cm e o coeficiente de dilatação linear efetivo  $13 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

► (a) A variação no comprimento da barra composta é dada por

$$\begin{aligned}\Delta L &= \Delta L_1 + \Delta L_2 \\ &= L_1 \alpha_1 \Delta T + L_2 \alpha_2 \Delta T \\ &= (L_1 \alpha_1 + L_2 \alpha_2) \Delta T\end{aligned}$$

Por outro lado, também temos que

$$\Delta L = L \alpha \Delta T = (L_1 + L_2) \alpha \Delta T.$$

Igualando-se as duas expressões para  $\Delta L$  obtemos que  $L_1 \alpha_1 + L_2 \alpha_2 = (L_1 + L_2) \alpha$ , ou seja, que

$$\alpha = \frac{L_1 \alpha_1 + L_2 \alpha_2}{L}.$$

(b) Reescrevendo a expressão acima e usando o fato que  $L_2 = L - L_1$ , obtemos

$$L\alpha = L_1\alpha_1 + (L - L_1)\alpha_2,$$

que nos dá, com  $\alpha_1 = 11 \times 10^{-6}$  e  $\alpha_2 = 19 \times 10^{-6}$ ,

$$\begin{aligned}L_1 = \frac{\alpha - \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} L &= \frac{13 - 19}{11 - 19} (0.524) \\ &= \frac{(3)(0.524)}{4} = 39.3 \text{ cm},\end{aligned}$$

onde já simplificamos o fator comum  $10^{-6}$  que aparece no numerador e denominador da fração. Finalmente,

$$L_2 = L - L_1 = 52.4 - 39.3 = 13.1 \text{ cm}.$$

É claro que este valor também poderia ter sido obtido independentemente, substituindo-se  $L_1 = L - L_2$  na expressão acima para  $\alpha$ :

$$\begin{aligned}L_2 = \frac{\alpha_1 - \alpha}{\alpha_1 - \alpha_2} L &= \frac{11 - 13}{11 - 19} (0.524) \\ &= \frac{0.524}{4} = 13.1 \text{ cm}.\end{aligned}$$

#### P 19-54\*

Um cubo de alumínio de aresta 20 cm flutua em mercúrio. Quanto afundará o cubo, se a temperatura subir de 270 para 320 K? O coeficiente de dilatação do mercúrio é  $1.8 \times 10^{-4} / ^\circ C$ .

► A força da gravidade no cubo é  $\rho_A g V$ , onde  $V$  é o volume do cubo e  $\rho_A$  é a densidade de massa do alumínio. O empuxo do mercúrio no cubo é  $\rho_M g A y$ , onde  $\rho_M$  é a densidade de massa do mercúrio,  $A$  é a área de uma das

faces do cubo, e  $y$  é a profundidade de submersão, de modo que  $Ay$  fornece o volume do mercúrio deslocado. O cubo está em equilíbrio, de modo que a magnitude das duas forças é o mesmo:  $\rho_A g V = \rho_M g A y$ . Substituindo-se  $V = L^3$  e  $A = L^2$  nesta expressão obtemos

$$y = \frac{\rho_A}{\rho_M} L.$$

Quando a temperatura muda, todas as três quantidades que aparecem em  $y$  também mudam, sendo tal mudança dada por

$$\begin{aligned}\Delta y &= \frac{\partial y}{\partial \rho_A} \Delta \rho_A + \frac{\partial y}{\partial \rho_M} \Delta \rho_M + \frac{\partial y}{\partial L} \Delta L \\ &= \frac{L}{\rho_M} \Delta \rho_A - \frac{\rho_A L}{\rho_M^2} \Delta \rho_M + \frac{\rho_A}{\rho_M} \Delta L.\end{aligned}$$

Primeiro, consideremos a mudança da densidade do alumínio. Suponhamos que uma massa  $M$  de alumínio ocupe um volume  $V_A$ . A densidade será, portanto,  $\rho_A = M/V_A$ , sendo a variação da densidade dada por

$$\Delta \rho_A = \frac{d\rho_A}{dV_A} \Delta V_A = -\frac{M}{V_A^2} \Delta V_A = -\frac{\rho_A}{V_A} \Delta V_A.$$

Como sabemos que  $\Delta V_A = 3\alpha V_A \Delta T$ , encontramos

$$\Delta \rho_A = -3\alpha \rho_A \Delta T,$$

onde  $\alpha$  representa o coeficiente de expansão linear do alumínio.

Segundo, de modo análogo, para o mercúrio temos

$$\Delta \rho_M = -\frac{\rho_M}{V_M} \Delta V_M.$$

Agora porém, como tratamos com um líquido e não de um sólido como acima,  $\Delta V_M = \beta V_M \Delta T$ , onde  $\beta$  representa o coeficiente de expansão volumétrica do mercúrio. Portanto

$$\Delta \rho_M = -\beta \rho_M \Delta T.$$

Terceiro, temos que  $\Delta L = \alpha L \Delta T$ .

Substituindo estes três resultados na expressão para  $\Delta y$  acima obtemos:

$$\begin{aligned}\Delta y &= \frac{L}{\rho_M} (-3\alpha \rho_A \Delta T) - \frac{\rho_A L}{\rho_M^2} (-\beta \rho_M \Delta T) \\ &\quad + \frac{\rho_A}{\rho_M} (\alpha L \Delta T) \\ &= \frac{\rho_A}{\rho_M} L (\beta - 2\alpha) \Delta T \\ &= \frac{2.7}{13.6} (20) [1.8 \times 10^{-4} - (2)(23 \times 10^{-6})] (50) \\ &= 2.66 \times 10^{-2} \text{ cm} = 0.266 \text{ mm},\end{aligned}$$

onde usamos o fato que  $\Delta T = 320 - 270 = 50$  K.

► *Solução alternativa:* Para o bloco flutuando no mercúrio a 270 K, pelo Princípio de Arquimedes, tem-se:

$$\begin{aligned} m_{Al} g &= E = \rho_{Hg} L^2 y g \\ \rho_{Al} L^3 g &= \rho_{Hg} L^2 y g, \end{aligned}$$

ou seja,

$$y = \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Hg}} L. \quad (1)$$

Para  $\rho_{Al} = 2.7 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup> e  $\rho_{Hg} = 1.3 \times 10^4$  kg/m<sup>3</sup>, a equação (1) fornece  $y = 0.04$  m, ou seja, o cubo está com 20% da sua aresta submersa. Mas *todas* as quantidades envolvidas na equação (1) variam com a temperatura:

$$\Delta \rho_{Hg} y + \Delta y \rho_{Hg} = \Delta \rho_{Al} L + \Delta L \rho_{Al}. \quad (2)$$

É claro que a massa do cubo não varia com a temperatura:

$$\begin{aligned} m_{Al} &= \rho_{Al} L^3, \\ \Delta m_{Al} &= \Delta \rho_{Al} L^3 + 3 L^2 \Delta L \rho_{Al} = 0 \\ 3 L^2 \Delta L \rho_{Al} &= -\Delta \rho_{Al} L^3 \\ L \Delta \rho_{Al} &= -3 \rho_{Al} \Delta L \end{aligned} \quad (3)$$

Substituindo a Eq. (3) na Eq. (2) temos:

$$\begin{aligned} \Delta \rho_{Hg} y + \Delta y \rho_{Hg} &= -3 \Delta L \rho_{Al} + \Delta L \rho_{Al} \\ \Delta \rho_{Hg} y + \Delta y \rho_{Hg} &= -2 \Delta L \rho_{Al} \\ \Delta \rho_{Hg} &= -\beta \rho_{Hg} \Delta T \\ -\beta \rho_{Hg} \Delta T y + \Delta y \rho_{Hg} &= -2 \Delta L \rho_{Al} \end{aligned}$$

Trazendo o resultado da Eq. (1) para  $y$ :

$$\left(-\beta \rho_{Hg} \Delta T\right) \left(\frac{\rho_{Al}}{\rho_{Hg}} L\right) + \Delta y \rho_{Hg} = -2 \Delta L \rho_{Al}$$

$$\Delta y = \frac{\beta L \rho_{Al} \Delta T - 2 L \alpha_{Al} \Delta T \rho_{Al}}{\rho_{Hg}}$$

$$\Delta y = \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Hg}} L (\beta - 2\alpha_{Al}) \Delta T$$

Introduzindo os valores das quantidades na equação acima, obtém-se, finalmente,

$$\Delta y = 2.66 \times 10^{-4} \text{ m} = 0.266 \text{ mm.}$$