

Dilatação térmica de sólidos e líquidos

Na construção civil o fenômeno da dilatação térmica tem grande importância e deve ser levado em consideração, por exemplo, no planejamento de pontes, viadutos e vias férreas. As juntas de dilatação são responsáveis por minimizar os efeitos da dilatação em situações como a mostrada na imagem.

A mudança nas dimensões dos corpos, quando sofrem variações de temperatura, é um fenômeno que pode ser facilmente observado em situações do cotidiano. Quando observamos a coluna de mercúrio de um termômetro clínico se expandir ao entrar em contato com uma pessoa com febre, estamos observando a ocorrência da dilatação térmica dos materiais.

3.1 Introdução

A variação da temperatura geralmente acarreta, nos sólidos e nos líquidos, mudanças nas suas dimensões.

3.2 Dilatação dos sólidos

A variação das dimensões de um sólido depende da variação da temperatura, de suas dimensões iniciais e do material que o constitui.

3.3 Dilatação térmica dos líquidos

Para analisarmos a dilatação de um líquido precisamos conhecer a dilatação do recipiente que o contém.



Objetivos

- ▶ Analisar o aspecto microscópico da variação das dimensões de um corpo quando varia sua temperatura.
- ▶ Caracterizar as dilatações linear, superficial e volumétrica para os sólidos.

Termos e conceitos

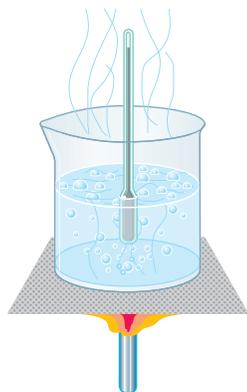
- dilatação térmica
- contração térmica
- dilatação linear
- dilatação superficial
- dilatação volumétrica

Após o estudo da temperatura e de sua medida, feito no capítulo anterior, passaremos agora a considerar um dos efeitos da temperatura: a **dilatação**.

Geralmente, quando a temperatura de um corpo aumenta, suas dimensões também aumentam. A esse fenômeno dá-se o nome de **dilatação térmica**. Quando diminuem as dimensões do corpo, em virtude da diminuição da temperatura, temos a **contração térmica**.

A dilatação de um corpo pelo aumento de temperatura é consequência do aumento da agitação das partículas constituintes do corpo – sejam elas átomos, moléculas ou íons, de acordo com o material. As colisões entre essas partículas tornam-se mais violentas após o aquecimento, o que causa uma separação maior entre elas.

Imaginemos uma experiência simples para evidenciar esse fato. Um termômetro de mercúrio é colocado no interior de um líquido. Se submertermos o líquido à chama de um bico de gás (fig. 1), o termômetro indicará um aumento da temperatura.



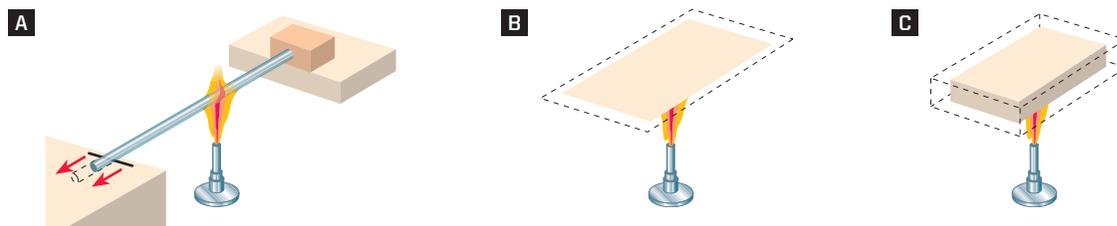
◀ **Figura 1.** Em diversos instrumentos de medição, o fenômeno da dilatação térmica é utilizado como meio para obtenção de medidas de temperatura, como ocorre no termômetro de mercúrio.

A indicação do termômetro se faz da seguinte maneira: o líquido recebe calor da chama, aumentando a energia cinética de suas moléculas; essas moléculas golpeiam o vidro do bulbo do termômetro com maior frequência e mais violentamente; as partículas do vidro passam a vibrar mais intensamente e transmitem essa energia de vibração às partículas do mercúrio, também por meio de colisões; a energia cinética das partículas do mercúrio aumenta e, com isso, a distância média entre elas aumenta; desse modo, a coluna de mercúrio se dilata.



◀ A dilatação da substância termométrica (neste caso, o álcool) constitui o princípio de funcionamento dos termômetros de coluna líquida.

A dilatação térmica é sempre **volumétrica** (fig. 2C), pois as moléculas afastam-se umas das outras em qualquer direção que se considere. Se analisarmos a dilatação em uma só direção (variação do comprimento de uma barra, variação do diâmetro de uma esfera, variação de uma aresta de um cubo), estaremos estudando a **dilatação linear** (fig. 2A). Ao analisar a dilatação de duas das dimensões (variação da área de uma placa, variação da área da face de um cubo), estaremos estudando a **dilatação superficial** (fig. 2B).



▶ **Figura 2.** (A) Dilatação linear. (B) Dilatação superficial. (C) Dilatação volumétrica.

Então, por conveniência, faremos o estudo da dilatação dos sólidos da seguinte maneira:

- dilatação linear – aumento de uma das dimensões do corpo, como no caso do comprimento de uma barra (fig. 2A);
- dilatação superficial – aumento da área de uma superfície, como a de uma placa (fig. 2B);
- dilatação volumétrica – aumento do volume do corpo (fig. 2C).

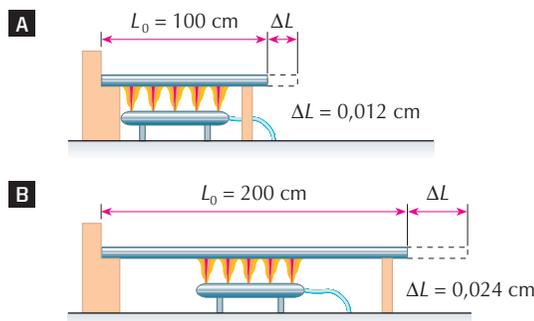
No caso dos líquidos, por não terem forma própria e estarem contidos em recipientes sólidos, costumamos estudar apenas sua dilatação volumétrica.

Seção 3.2

Dilatação dos sólidos

1 Dilatação linear

Quando aumentamos de $10\text{ }^\circ\text{C}$ a temperatura de uma barra de ferro com 100 cm de comprimento, essa dimensão aumenta de $0,012\text{ cm}$ (fig. 3A). Submetida ao mesmo aquecimento, uma barra de ferro com o dobro do comprimento (200 cm) tem sua dimensão aumentada de $0,024\text{ cm}$, ou seja, sofre uma dilatação igual ao dobro da anterior (fig. 3B).



▶ **Figura 3.** Influência do comprimento inicial na dilatação.

Para uma barra com outro comprimento inicial, a mesma elevação de temperatura acarretará uma outra dilatação, proporcional ao comprimento inicial dessa barra.

A variação de comprimento ΔL de uma barra que sofre aquecimento é diretamente proporcional ao seu comprimento inicial L_0 .

Objetivos

▶ Avaliar a dilatação térmica de corpos sólidos utilizando as leis da dilatação linear, superficial e volumétrica.

▶ Definir dilatação relativa.

▶ Construir e analisar gráficos obtidos a partir da lei de dilatação linear.

Termos e conceitos

- coeficiente de dilatação linear
- grau Celsius recíproco
- coeficiente de dilatação superficial
- coeficiente de dilatação volumétrica

Voltando ao exemplo da barra de ferro, de comprimento inicial $L_0 = 100$ cm, a elevação de 10°C na temperatura produz uma dilatação de $0,012$ cm (fig. 4A). Uma elevação de temperatura duas vezes maior (20°C) faz o comprimento da barra aumentar de $0,024$ cm, isto é, acarreta uma dilatação igual ao dobro da anterior (fig. 4B).

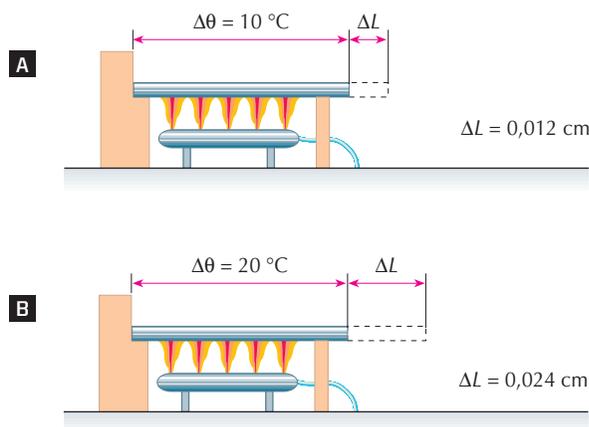


Figura 4. Influência da variação de temperatura na dilatação.

A variação de comprimento ΔL de uma barra que sofre aquecimento é diretamente proporcional à variação de temperatura $\Delta\theta$.

Repetindo as experiências com barras de materiais diferentes, observamos o mesmo comportamento, mas a dilatação é específica para cada caso.

A variação de comprimento ΔL de uma barra que sofre aquecimento depende do material que a constitui.

Tendo em vista que a dilatação ΔL de uma barra é diretamente proporcional ao comprimento inicial L_0 e à variação de temperatura $\Delta\theta$, temos:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta\theta$$

Nessa fórmula, α é uma constante de proporcionalidade denominada **coeficiente de dilatação linear**, característico de cada material. Essa fórmula expressa, algebricamente, a **lei da dilatação linear**.

Tomemos novamente o primeiro exemplo apresentado. O comprimento inicial é $L_0 = 100$ cm, a variação de temperatura é $\Delta\theta = 10^\circ\text{C}$ e a dilatação (variação de comprimento) é $\Delta L = 0,012$ cm. O coeficiente de dilatação linear será dado por:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \cdot \Delta\theta} \Rightarrow \alpha = \frac{0,012 \text{ cm}}{100 \text{ cm} \cdot 10^\circ\text{C}} \Rightarrow \alpha = 0,000012 \frac{\text{cm}}{\text{cm} \cdot ^\circ\text{C}}$$

O valor encontrado é o coeficiente de dilatação linear do ferro e tem o seguinte significado:

Ocorre uma dilatação de $0,000012$ cm para cada cm de comprimento da barra e para cada $^\circ\text{C}$ de variação de temperatura.

Assim, para o ferro, podemos escrever: $\alpha = 0,000012 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ou $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

A unidade do coeficiente de dilatação é o inverso do grau Celsius, chamado **grau Celsius recíproco**, de símbolo $^\circ\text{C}^{-1}$.

Na fórmula $\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta\theta$, observe que, para o mesmo L_0 e o mesmo $\Delta\theta$, sofre maior dilatação ΔL o material de maior coeficiente de dilatação α . Os metais estão entre as substâncias que mais se dilatam, isto é, que apresentam maior coeficiente de dilatação. Outros materiais, como o vidro pirex, apresentam pequeno coeficiente de dilatação e, portanto, dilatação reduzida.

Para comparação, apresentamos alguns coeficientes de dilatação linear:

↑ Maior dilatação	Chumbo:	$27 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
	Zinco:	$26 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
	Alumínio:	$22 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
	Prata:	$19 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
	Ouro:	$15 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
↓ Menor dilatação	Concreto:	$12 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
	Vidro comum:	$9 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
	Granito:	$8 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
	Vidro pirex:	$3,2 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
	Porcelana:	$3 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$



🏠 O vidro pirex é mais resistente a choques térmicos do que o vidro comum porque tem pequeno coeficiente de dilatação térmica.

O coeficiente de dilatação linear, como foi definido, corresponde a um valor médio entre a temperatura inicial e a temperatura final. É possível definir um coeficiente $\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \cdot \Delta\theta}$ para dada temperatura pelo limite da expressão $\frac{\Delta L}{L_0 \cdot \Delta\theta}$ quando o intervalo de temperatura $\Delta\theta$ tende a zero. Contudo, não sendo muito grande a variação de temperatura, o valor médio do coeficiente de dilatação praticamente coincide com o coeficiente em dada temperatura.

Outra fórmula para a dilatação linear é obtida substituindo-se ΔL por $(L - L_0)$, sendo L o comprimento final.

$$L - L_0 = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta\theta \Rightarrow L = L_0 + \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta\theta$$

$$L = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta)$$

Dilatação relativa

Chama-se **dilatação relativa** de um corpo a relação entre o valor da dilatação que esse corpo sofre e o valor inicial de suas dimensões. Essa relação pode ser dada porcentualmente, o que é bastante comum.

Assim, quando dizemos que o comprimento de uma barra aumentou de 0,5%, isso significa que a relação entre sua dilatação ΔL e seu volume inicial L_0 vale:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = 0,5\% = \frac{0,5}{100} = 0,005$$

Com base na fórmula que expressa a lei da dilatação, poderíamos escrever, nesse caso:

$$\alpha \cdot \Delta\theta = \frac{0,5}{100} = 0,005$$

Observe que, conhecida a dilatação relativa e a variação de temperatura, podemos obter o coeficiente de dilatação do material que constitui a barra.

Gráficos da dilatação linear

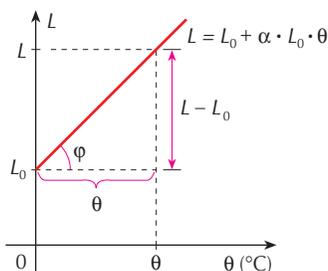
Vamos imaginar uma experiência na qual uma barra de comprimento inicial L_0 é submetida, a partir de 0°C , a temperaturas sucessivamente maiores, como, por exemplo, 5°C , 10°C , 15°C , 20°C , ... 50°C . Se anotarmos o comprimento L da barra para cada temperatura e lançarmos no gráfico $L \times \theta$, obteremos uma curva que, para um intervalo pequeno de temperatura, pode ser considerada uma reta (**fig. 5**), valendo a fórmula $L = L_0 [1 + \alpha \cdot \Delta\theta]$.

Como $\Delta\theta = (\theta - \theta_0)$, temos:

$$L = L_0 + [1 + \alpha \cdot (\theta - \theta_0)]$$

Se $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$, vem:

$$L = L_0 + \alpha \cdot L_0 \cdot \theta \quad \text{[função do primeiro grau]}$$



◀ **Figura 5.** Gráfico da função $L = L_0 + \alpha \cdot L_0 \cdot \theta$.

No gráfico:

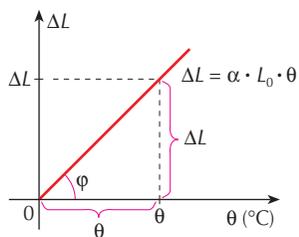
$$\text{tg } \varphi = \frac{L - L_0}{\theta} = \alpha \cdot L_0 \quad \text{[coeficiente angular da reta]}$$

De $\Delta L = \alpha \cdot L_0 (\theta - \theta_0)$, se $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$, vem:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \theta \quad \text{[função linear]}$$

Seu gráfico é o da **figura 6**, no qual:

$$\text{tg } \varphi = \frac{\Delta L}{\theta} = \alpha \cdot L_0 \quad \text{[coeficiente angular da reta]}$$



◀ **Figura 6.** Gráfico da função $\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \theta$.

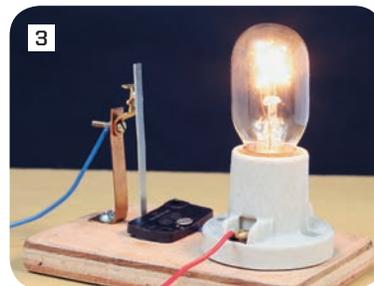
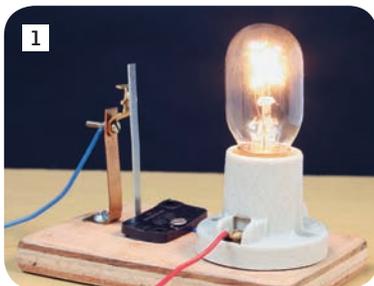
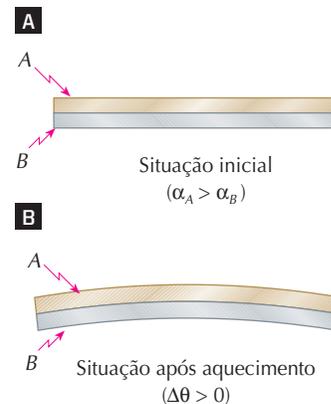


◀ O dilatômetro da figura destina-se à medição da dilatação linear de barras metálicas de diferentes materiais.

A lâmina bimetálica

A lâmina bimetálica é um dispositivo constituído por duas tiras justapostas e bem aderidas, feitas de metais com diferentes coeficientes de dilatação (**fig. A**). Ao serem aquecidas, as tiras se dilatam provocando o encurvamento da lâmina para o lado da tira de menor coeficiente de dilatação (**fig. B**).

Uma aplicação prática comum da lâmina bimetálica é o seu uso no chamado pisca-pisca. As fotos seguintes ilustram uma montagem simples em que uma lâmina bimetálica funciona como interruptor de um circuito, ligando-o e desligando-o continuamente. Partindo da situação em que a lâmpada está acesa (**foto 1**), a corrente elétrica, ao passar pela lâmina, determina o aquecimento desta. Com isso, a lâmina se encurva, abrindo o circuito (**foto 2**). Interrompida a corrente, a lâmina esfria, volta à posição inicial, fecha o circuito e novamente a lâmpada se acende (**foto 3**). A lâmina volta a se aquecer pela passagem da corrente, encurva-se e abre o circuito, repetindo-se o ciclo.



EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

- R. 9** Uma barra apresenta a 10°C comprimento de 90 m, sendo feita de um material cujo coeficiente de dilatação linear médio vale $19 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. A barra é aquecida até 20°C . Determine:
- a dilatação ocorrida;
 - a dilatação relativa, expressa em porcentagem;
 - o comprimento final da barra.

Solução:

- a) Pela lei da dilatação linear ($\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta\theta$), sendo dados $\alpha = 19 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $L_0 = 90 \text{ m} = 9.000 \text{ cm}$ e $\Delta\theta = 20^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C} = 10^\circ\text{C}$, resulta:

$$\Delta L = 19 \cdot 10^{-6} \cdot 9.000 \cdot 10 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta L = 171 \cdot 10^{-2} \Rightarrow \boxed{\Delta L = 1,71 \text{ cm}}$$

- b) A dilatação relativa é dada por:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{1,71}{9.000} = 0,00019 \Rightarrow \frac{\Delta L}{L_0} = 0,00019 \cdot 100\% \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{\Delta L}{L_0} = 0,019\%}$$

- c) O comprimento final L vale:

$$L = L_0 + \Delta L \Rightarrow L = 9.000 + 1,71 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{L = 9.001,71 \text{ cm}}$$

Respostas: a) 1,71 cm; b) 1,9%; c) 9.001,71 cm

- R. 10** Duas barras A e B de materiais diferentes apresentam, a 0°C , comprimentos respectivamente iguais a 75,0 cm e 75,3 cm. A que temperatura devem ser aquecidas para que seus comprimentos se tornem iguais? Os coeficientes de dilatação linear dos materiais de A e B valem, respectivamente, $5,4 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e $2,4 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Solução:

Pede-se a temperatura em que $L_A = L_B$. Mas:

$$L_A = L_{0A} \cdot (1 + \alpha_A \cdot \Delta\theta) \text{ e } L_B = L_{0B} \cdot (1 + \alpha_B \cdot \Delta\theta)$$

Logo:

$$L_{0A} \cdot (1 + \alpha_A \cdot \Delta\theta) = L_{0B} \cdot (1 + \alpha_B \cdot \Delta\theta)$$

São dados:

$$L_{0A} = 75,0 \text{ cm}; L_{0B} = 75,3 \text{ cm}; \Delta\theta = \theta - 0 = \theta;$$

$$\alpha_A = 5,4 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}; \alpha_B = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

Substituindo esses valores:

$$75,0 \cdot (1 + 5,4 \cdot 10^{-5} \theta) = 75,3 \cdot (1 + 2,4 \cdot 10^{-5} \theta) \Rightarrow$$

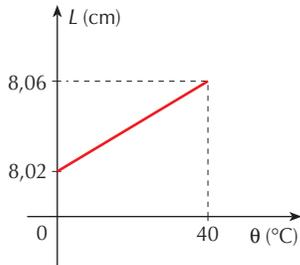
$$\Rightarrow 75,0 + 405 \cdot 10^{-5} \theta = 75,3 + 180,72 \cdot 10^{-5} \theta \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 224,28 \cdot 10^{-5} \theta = 0,3 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \theta = \frac{0,3}{224,28 \cdot 10^{-5}} \Rightarrow \boxed{\theta \approx 133,76^\circ\text{C}}$$

Resposta: $\approx 133,76^\circ\text{C}$

- R. 11** O gráfico mostra como varia o comprimento de uma barra metálica em função da temperatura.



- a) Determine o coeficiente de dilatação linear médio do metal, no intervalo de temperatura considerado.
 b) Considerando que o gráfico continue com as mesmas características para $\theta > 40^\circ\text{C}$, determine o comprimento da barra a 70°C .

Solução:

- a) Do gráfico, obtemos os valores:

$$L_0 = 8,02 \text{ cm}; \Delta L = L - L_0 = 8,06 \text{ m} - 8,02 \text{ m} = 0,04 \text{ m}; \Delta\theta = 40^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C} = 40^\circ\text{C}$$

O coeficiente de dilatação linear médio no intervalo de temperatura considerado é dado por:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \cdot \Delta\theta}$$

Substituindo os valores:

$$\alpha = \frac{0,04}{8,02 \cdot 40} \Rightarrow \boxed{\alpha \approx 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}}$$

- b) Para a temperatura $\theta = 70^\circ\text{C}$:

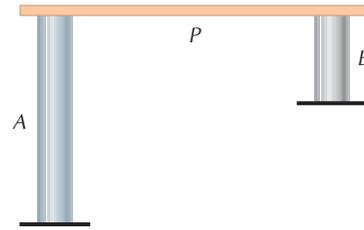
$$\Delta\theta = \theta - \theta_0 = 70^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C} = 70^\circ\text{C}$$

O comprimento final da barra será dado por:

$$\begin{aligned} L &= L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta) \Rightarrow \\ \Rightarrow L &= 8,02 \cdot (1 + 1,25 \cdot 10^{-4} \cdot 70) \Rightarrow \\ \Rightarrow L &= \boxed{8,09 \text{ cm}} \end{aligned}$$

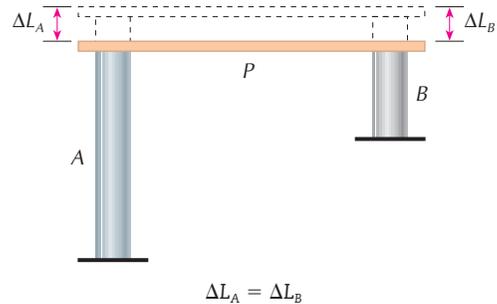
Respostas: a) $\approx 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; b) 8,09 cm

- R. 12** Na figura, a plataforma P é horizontal por estar apoiada nas barras A e B de coeficientes de dilatação iguais, respectivamente, α_A e α_B . Determine a relação entre os comprimentos iniciais L_A e L_B das barras, a fim de que a plataforma P permaneça horizontal em qualquer temperatura.



Solução:

Para a plataforma P permanecer horizontal, qualquer que seja a variação de temperatura $\Delta\theta$, as duas barras devem sofrer a mesma dilatação ΔL , conforme mostra a figura:



Mas:

$$\Delta L_A = \alpha_A \cdot L_A \cdot \Delta\theta \quad \text{e} \quad \Delta L_B = \alpha_B \cdot L_B \cdot \Delta\theta$$

Portanto:

$$\alpha_A \cdot L_A \cdot \Delta\theta = \alpha_B \cdot L_B \cdot \Delta\theta \Rightarrow \boxed{\frac{L_A}{L_B} = \frac{\alpha_B}{\alpha_A}}$$

Resposta: $\frac{L_A}{L_B} = \frac{\alpha_B}{\alpha_A}$, isto é, os comprimentos iniciais das barras devem estar na razão inversa dos coeficientes de dilatação linear.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

- P. 22** Uma barra de ouro tem a 0°C o comprimento de 100 cm. Determine o comprimento da barra quando sua temperatura passa a ser 50°C . O coeficiente de dilatação linear médio do ouro para o intervalo de temperatura considerado vale $15 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

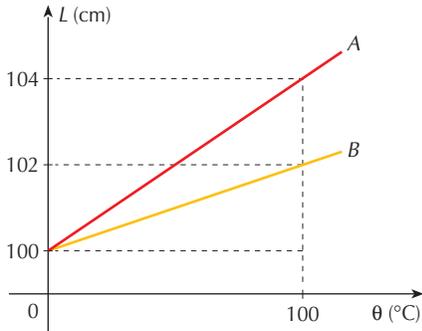
- P. 23** Com o auxílio de uma barra de ferro quer-se determinar a temperatura de um forno. Para tal, a barra, inicialmente a 20°C , é introduzida no forno. Verifica-se que, após o equilíbrio térmico, o alongamento da barra é um centésimo do comprimento inicial. Sendo $12 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ o coeficiente de dilatação linear médio do ferro, determine a temperatura do forno.

- P. 24** Duas barras, uma de cobre e outra de latão, têm o mesmo comprimento a 10°C e, a 110°C , os seus comprimentos diferem em 1 mm. Os coeficientes de dilatação linear são: para o cobre = $16 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; para o latão = $20 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Determine o comprimento, a 10°C , de cada barra.

- P. 25** (UFBA) Duas lâminas, uma de aço e outra de bronze, têm comprimentos de 20 cm a uma temperatura de 15°C . Sabendo que os coeficientes de dilatação linear valem, respectivamente, $12 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e $18 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, calcule a diferença de comprimento quando as lâminas atingem uma temperatura de -5°C .

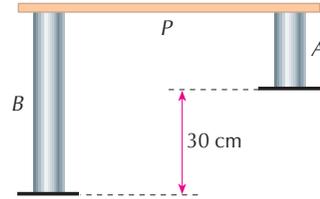


P. 26 Na figura está representado o gráfico do comprimento L de duas barras, A e B, em função da temperatura. Sejam respectivamente α_A e α_B os coeficientes de dilatação linear do material das barras A e B. Determine:



- os valores dos coeficientes α_A e α_B ;
- a temperatura em que a diferença entre os comprimentos das duas barras é igual a 4 cm.

P. 27 Na figura dada, a plataforma P é horizontal por estar apoiada nas colunas A (de alumínio) e B (de ferro). O desnível entre os apoios é de 30 cm. Calcule quais devem ser os comprimentos das barras a 0°C para que a plataforma P permaneça horizontal em qualquer temperatura. São dados os coeficientes de dilatação linear do alumínio ($2,4 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) e do ferro ($1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$).



P. 28 (UFRJ) Duas barras metálicas são tais que a diferença entre seus comprimentos, em qualquer temperatura, é igual a 3 cm. Sendo os coeficientes de dilatação linear médios $15 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e $20 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, determine os comprimentos das barras a 0°C .

A dilatação térmica no dia a dia

Quando ocorre um impedimento à livre dilatação ou contração de um corpo, surgem forças internas de tensão que podem levá-lo a se romper ou a se deformar. Por isso, há muitas situações do cotidiano em que a dilatação (ou a contração) térmica é “facilitada” para evitar problemas desse tipo.

Nas ferrovias, as barras dos trilhos devem ser assentadas com um espaço entre elas, para permitir a livre dilatação quando a temperatura varia. Se isso não fosse feito, os trilhos poderiam se entortar, devido à tensão a que ficariam submetidos.

Em pontes, viadutos e grandes construções, empregam-se as chamadas **juntas de dilatação** (foto 1). Elas evitam que variações das dimensões devidas a mudanças de temperatura venham a danificar a estrutura do concreto. Às vezes, a junta de dilatação consiste em roletes sobre os quais a estrutura pode deslizar, compensando os efeitos da dilatação.

Nos calçamentos, separam-se as placas de cimento por ripas de madeira ou varas de plástico (foto 2), que “absorvem” eventuais dilatações das placas, impedindo que elas rachem.

Os fios instalados entre os postes nas ruas ou entre as torres das linhas de alta tensão não são esticados. Esse procedimento visa a evitar que, no inverno, com a queda de temperatura, a contração possa esticar esses fios a ponto de eles se romperem. É possível observar ainda que, nos dias quentes de verão, os fios entre os postes costumam se apresentar mais curvos, em virtude da dilatação.

Em canalizações longas (foto 3), colocam-se, de trechos em trechos, tubos formando curvas (“cotovelos”), para possibilitar que ocorra dilatação ou contração térmica sem que haja danos.



Dilatação superficial

Considere a placa retangular da **figura 7**, que apresenta na temperatura inicial θ_0 área $A_0 = x_0 \cdot y_0$, sendo x_0 e y_0 suas dimensões lineares. Na temperatura final θ , a área é $A = x \cdot y$, em que x e y são suas dimensões lineares nessa temperatura.



Figura 7. O aumento da temperatura acarreta aumento das dimensões lineares da placa e, portanto, de sua área.

Aplicando a lei da dilatação linear a cada uma das dimensões, vem:

$$x = x_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta)$$

$$y = y_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta)$$

Multiplicando membro a membro essas fórmulas, obtemos:

$$xy = x_0y_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta)^2$$

$$A = A_0 \cdot (1 + 2\alpha \cdot \Delta\theta + \alpha^2 \cdot \Delta\theta^2)$$

Desprezando o termo $\alpha^2 \cdot \Delta\theta^2$ por ser muito pequeno e fazendo $2\alpha = \beta$, vem:

$$A = A_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta\theta)$$

Nessa fórmula, $\beta = 2\alpha$ constitui o **coeficiente de dilatação superficial** do material de que é feita a placa, tendo também como unidade o grau Celsius recíproco ($^{\circ}\text{C}^{-1}$). Por exemplo:

Porcelana: $\beta = 6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$

Ouro: $\beta = 30 \cdot 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$

Ferro: $\beta = 24 \cdot 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$

Alumínio: $\beta = 44 \cdot 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$

A partir da fórmula anterior:

$$A = A_0 + \beta \cdot A_0 \cdot \Delta\theta \Rightarrow A - A_0 = \beta \cdot A_0 \cdot \Delta\theta$$

Mas: $A - A_0 = \Delta A$ é a variação de área sofrida pela placa. Assim:

$$\Delta A = \beta \cdot A_0 \cdot \Delta\theta$$

Portanto:

A dilatação superficial ΔA é diretamente proporcional à área inicial A_0 e à variação de temperatura $\Delta\theta$.

As lajotas cerâmicas que constituem alguns pisos são espaçadas entre si para evitar problemas decorrentes da dilatação superficial. ▶



EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

- R. 13** Uma placa apresenta inicialmente área de 1 m^2 a $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Ao ser aquecida até $50 \text{ }^\circ\text{C}$, sua área aumenta de $0,8 \text{ cm}^2$. Determine o coeficiente de dilatação superficial e o coeficiente de dilatação linear médio do material que constitui a placa.

Solução:

São dados:

$$A_0 = 1 \text{ m}^2 = 10^4 \text{ cm}^2;$$

$$\Delta A = 0,8 \text{ cm}^2;$$

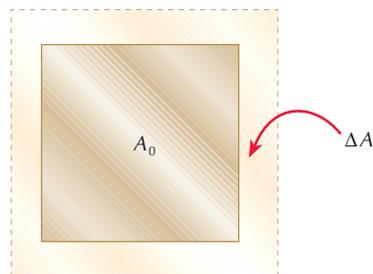
$$\Delta\theta = 50 \text{ }^\circ\text{C} - 0 \text{ }^\circ\text{C} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

Aplicando a fórmula da dilatação superficial ($\Delta A = \beta \cdot A_0 \cdot \Delta\theta$), resulta:

$$\Delta A = \beta \cdot A_0 \cdot \Delta\theta \Rightarrow \beta = \frac{\Delta A}{A_0 \cdot \Delta\theta} \Rightarrow \beta = \frac{0,8}{10^4 \cdot 50} \Rightarrow \beta = 16 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\text{Mas: } \beta = 2\alpha \Rightarrow \alpha = \frac{\beta}{2} \Rightarrow \alpha = 8 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

Respostas: $\beta = 16 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e $\alpha = 8 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$



- R. 14** Um disco de ebonite tem orifício central de diâmetro igual a 1 cm . Determine o aumento da área do orifício quando a temperatura do disco varia de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ para $100 \text{ }^\circ\text{C}$. O coeficiente de dilatação superficial médio da ebonite é, no intervalo considerado, igual a $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Solução:

Quando o disco é aquecido, o orifício central aumenta de diâmetro, como se fosse constituído pelo material do disco. A área inicial do orifício vale:

$$A_0 = \pi R_0^2 = \frac{\pi d_0^2}{4}$$

Sendo $d_0 = 1 \text{ cm}$, vem: $A_0 = \pi \cdot 0,25 \text{ cm}^2$

A variação de temperatura é $\Delta\theta = 100 \text{ }^\circ\text{C} - 10 \text{ }^\circ\text{C} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ e o coeficiente de dilatação superficial é $\beta = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Aplicando a fórmula da dilatação superficial ($\Delta A = \beta \cdot A_0 \cdot \Delta\theta$), vem:

$$\Delta A = 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 90 \Rightarrow \Delta A = 36\pi \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$$

Resposta: $36\pi \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$

Observação:

Podemos explicar o aumento do orifício tendo em vista que, na dilatação, há aumento da distância entre as moléculas. De fato, aumentando a distância entre as moléculas da borda do orifício, o perímetro deste aumenta, aumentando assim o seu diâmetro.



EXERCÍCIOS PROPOSTOS

- P. 29** Uma chapa de chumbo tem área de 900 cm^2 a $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Determine a área de sua superfície a $60 \text{ }^\circ\text{C}$. O coeficiente de dilatação linear médio do chumbo entre $10 \text{ }^\circ\text{C}$ e $60 \text{ }^\circ\text{C}$ vale $27 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.
- P. 30** Um anel de ouro apresenta área interna de 5 cm^2 a $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Determine a dilatação superficial dessa área interna quando o anel é aquecido a $120 \text{ }^\circ\text{C}$. Entre $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e $120 \text{ }^\circ\text{C}$, o coeficiente de dilatação superficial médio do ouro é $30 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.
- P. 31** (Faap-SP) Um pino cilíndrico de alumínio ($\beta =$ coeficiente de dilatação superficial $= 4,0 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) tem raio $20,000 \text{ mm}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$. A que temperatura ele deve ser resfriado para se ajustar exatamente num orifício de raio $19,988 \text{ mm}$?
- P. 32** (Fuvest-SP) Considere uma chapa de ferro circular, com um orifício circular concêntrico. À temperatura inicial de $30 \text{ }^\circ\text{C}$, o orifício tem um diâmetro de $1,0 \text{ cm}$. A chapa é então aquecida a $330 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Qual é a variação do diâmetro do furo, se o coeficiente de dilatação linear do ferro é $12 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$?
 - A variação do diâmetro do furo depende do diâmetro da chapa?

Dilatação volumétrica

Na **figura 8** está representado um sólido homogêneo com forma de paralelepípedo em duas temperaturas, θ_0 e $\theta > \theta_0$. As dimensões lineares desse sólido são x_0 , y_0 e z_0 na temperatura inicial θ_0 , passando para x , y e z quando na temperatura final θ . Os volumes inicial e final valem, respectivamente, $V_0 = x_0 y_0 z_0$ e $V = xyz$.



► **Figura 8.** Quando a temperatura aumenta, aumentam as dimensões lineares do sólido e, portanto, seu volume.

Aplicando a lei da dilatação linear a cada uma das dimensões, vem:

$$x = x_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta)$$

$$y = y_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta)$$

$$z = z_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta)$$

Multiplicando membro a membro as fórmulas anteriores, obtemos:

$$xyz = x_0 y_0 z_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta)^3$$

$$V = V_0 \cdot (1 + 3\alpha \cdot \Delta\theta + 3\alpha^2 \cdot \Delta\theta^2 + \alpha^3 \cdot \Delta\theta^3)$$

Os termos que apresentam α^2 e α^3 são muito pequenos e podem ser desprezados. Assim, fazendo $3\alpha = \gamma$, vem:

$$V = V_0 \cdot (1 + \gamma \cdot \Delta\theta)$$

Nessa fórmula, $\gamma = 3\alpha$ constitui o **coeficiente de dilatação volumétrica** do material de que é feito o sólido, sendo medido, como os coeficientes anteriores, em grau Celsius recíproco ($^{\circ}\text{C}^{-1}$). Alguns exemplos:

Porcelana: $\gamma = 9 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

Ouro: $\gamma = 45 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

Ferro: $\gamma = 36 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

Alumínio: $\gamma = 66 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

A partir da fórmula anterior:

$$V = V_0 + \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta\theta \Rightarrow V - V_0 = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta\theta$$

Como $V - V_0 = \Delta V$ é a variação de volume sofrida pelo sólido, temos:

$$\Delta V = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta\theta$$

Portanto:

A dilatação volumétrica ΔV é diretamente proporcional ao volume inicial V_0 e à variação de temperatura $\Delta\theta$.



EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 15 O coeficiente de dilatação linear médio de um sólido homogêneo é $12,2 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Um cubo desse material tem volume de 20 cm^3 a $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Determine:

- o aumento de volume sofrido pelo cubo quando sua temperatura se eleva para $40 \text{ }^\circ\text{C}$;
- a dilatação relativa correspondente, expressa em porcentagem.

Solução:

a) O coeficiente de dilatação volumétrica é o triplo do coeficiente de dilatação linear: $\gamma = 3\alpha$.

Como $\alpha = 12,2 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, vem:

$$\gamma = 3 \cdot 12,2 \cdot 10^{-6} \Rightarrow \gamma = 36,6 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

O volume inicial é $V_0 = 20 \text{ cm}^3$; a variação de temperatura vale:

$$\Delta\theta = \theta - \theta_0 = 40 - 10 \Rightarrow \Delta\theta = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

Aplicando a fórmula da dilatação volumétrica, obtemos:

$$\Delta V = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta\theta \Rightarrow \Delta V = 36,6 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 30 \Rightarrow \Delta V \approx 0,022 \text{ cm}^3$$

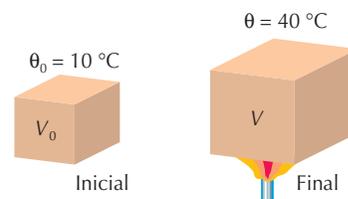
b) A dilatação relativa vale:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{0,022}{20} = 0,0011 \Rightarrow \frac{\Delta V}{V_0} = 0,11\%$$

Respostas: a) O volume do cubo aumenta aproximadamente $0,022 \text{ cm}^3$; b) $0,11\%$

Observação:

Note que o volume inicial do cubo era de 20 cm^3 e o aumento de volume foi de apenas $0,022 \text{ cm}^3$, aproximadamente. Portanto, a dilatação relativa é de apenas $0,11\%$, uma alteração volumétrica que somente poderá ser percebida com o auxílio de aparelhos extremamente sensíveis.



R. 16 Um tubo de ensaio apresenta, a $0 \text{ }^\circ\text{C}$, um volume interno (limitado pelas paredes) de 20 cm^3 . Determine o volume interno desse tubo a $50 \text{ }^\circ\text{C}$. O coeficiente de dilatação volumétrica médio do vidro é $25 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ para o intervalo de temperatura considerado.

Solução:

O volume interno de um recipiente varia com a temperatura como se ele fosse maciço, constituído pelo material de suas paredes.

São dados o volume inicial ($V_0 = 20 \text{ cm}^3$) e o coeficiente de dilatação volumétrica ($\gamma = 25 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$).

Variação de temperatura:

$$\Delta\theta = \theta - \theta_0 = 50 \text{ }^\circ\text{C} - 0 \text{ }^\circ\text{C} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

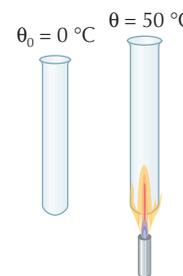
Aplicando a fórmula da dilatação volumétrica, obtemos:

$$\Delta V = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta\theta \Rightarrow \Delta V = 25 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 50 \Rightarrow \Delta V = 0,025 \text{ cm}^3$$

O volume final do tubo é dado pela soma do volume inicial com o aumento de volume:

$$V = V_0 + \Delta V \Rightarrow V = 20 + 0,025 \Rightarrow V = 20,025 \text{ cm}^3$$

Resposta: $20,025 \text{ cm}^3$



EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 33 Um paralelepípedo de chumbo tem a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ o volume de 100 litros. A que temperatura ele deve ser aquecido para que seu volume aumente de 0,405 litro? O coeficiente de dilatação linear médio do chumbo é $27 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ para o intervalo de temperatura considerado.

P. 34 Um balão de vidro apresenta a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ volume interno de 500 ml. Determine a variação do volume interno desse balão quando ele é aquecido até $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

O vidro que constitui o balão tem coeficiente de dilatação volumétrica médio igual a $3 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ entre $0 \text{ }^\circ\text{C}$ e $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

P. 35 (PUC-RS) Um paralelepípedo a $10 \text{ }^\circ\text{C}$ possui dimensões iguais a $10 \times 20 \times 30 \text{ cm}$, sendo constituído de um material cujo coeficiente de dilatação térmica linear é $8,0 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Qual é o acréscimo de volume que ele sofre quando sua temperatura é elevada para $110 \text{ }^\circ\text{C}$?

Dilatação térmica dos líquidos

Objetivos

- ▶ Diferenciar dilatação real de dilatação aparente.
- ▶ Relacionar o coeficiente de dilatação aparente de um líquido com os coeficientes de dilatação real do líquido e de dilatação volumétrica do frasco.

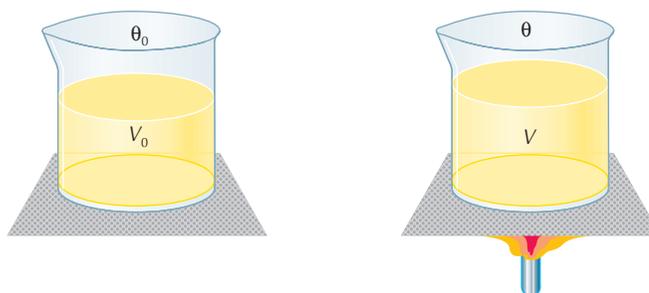
Termos e conceitos

- dilatação real
- dilatação aparente

A dilatação volumétrica de um líquido (**fig. 9**) segue uma lei idêntica à da dilatação dos sólidos, válida quando o intervalo de temperatura considerado não é muito grande. Assim, a variação ΔV do volume líquido é diretamente proporcional ao volume inicial V_0 e à variação de temperatura $\Delta\theta$ ocorrida:

$$\Delta V = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta\theta$$

Nessa fórmula, γ é uma constante de proporcionalidade denominada **coeficiente de dilatação real** do líquido, cuja unidade é o grau Celsius recíproco: $^{\circ}\text{C}^{-1}$.



▶ **Figura 9.** A dilatação térmica de um líquido é estudada estando ele num recipiente sólido.

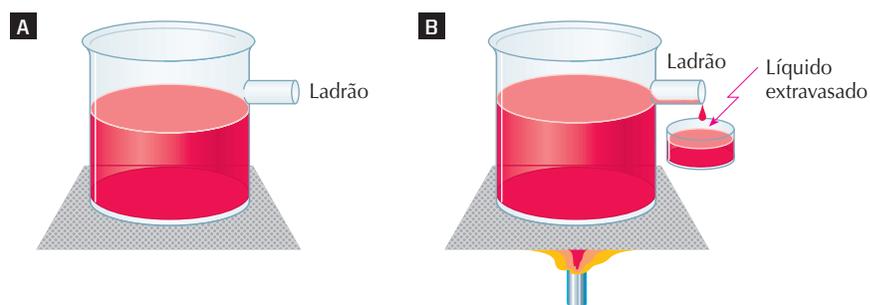
Alguns exemplos de coeficientes de dilatação real:

Maior dilatação ↓	Mercúrio: $\gamma = 180 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
	Glicerina: $\gamma = 490 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
	Benzeno: $\gamma = 1.060 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

Como o líquido sempre está contido num recipiente sólido, que também se dilata, a medida da dilatação do líquido é feita indiretamente. Vamos discutir um dos processos de medida indireta da dilatação do líquido.

De modo geral, os líquidos se dilatam mais que os sólidos. Por isso, um recipiente completamente cheio com líquido transborda quando aquecido. Por exemplo: completando-se o tanque de combustível de um carro numa manhã fria, provavelmente ocorrerá vazamento em virtude do aumento de temperatura, ao longo do dia, caso não haja consumo de combustível.

Considere o mesmo frasco da **figura 9**, agora provido de um “ladrão” (**fig. 10**). Nesse frasco é colocado um líquido até o nível do ladrão (**fig. 10A**). Quando se aquece o conjunto, parte do líquido sai pelo ladrão (**fig. 10B**).



▶ **Figura 10.** O volume de líquido que extravasa corresponde à medida da dilatação aparente.

O volume de líquido extravasado equivale à **dilatação aparente do líquido** ($\Delta V_{ap.}$) e não à dilatação real (ΔV), pois o frasco também se dilata. Por exemplo, considerando que transbordam 5 cm^3 , temos:

$$\Delta V_{ap.} = 5 \text{ cm}^3$$

Sendo conhecida a dilatação do frasco (aumento de seu volume interno), podemos determinar a dilatação real sofrida pelo líquido. Por exemplo, se o volume do recipiente até a altura do ladrão aumenta de 2 cm^3 ($\Delta V_F = 2 \text{ cm}^3$), a dilatação real do líquido será:

$$\Delta V = \Delta V_{ap.} + \Delta V_F$$

Sendo $\Delta V_{ap.} = 5 \text{ cm}^3$ e $\Delta V_F = 2 \text{ cm}^3$, temos:

$$\Delta V = 5 + 2 \Rightarrow \Delta V = 7 \text{ cm}^3$$

A dilatação aparente $\Delta V_{ap.}$ e a dilatação do frasco ΔV_F são proporcionais ao volume inicial V_0 e à variação de temperatura $\Delta\theta$:

$$\Delta V_{ap.} = \gamma_{ap.} \cdot V_0 \cdot \Delta\theta$$

$$\Delta V_F = \gamma_F \cdot V_0 \cdot \Delta\theta$$

Nessas fórmulas, $\gamma_{ap.}$ é o **coeficiente de dilatação aparente** do líquido e γ_F é o **coeficiente de dilatação volumétrica** do frasco.



◀ O volume de líquido que extravasa equivale à dilatação aparente do líquido.

Relação entre os coeficientes

Comparando as fórmulas anteriores com a lei da dilatação do líquido ($\Delta V = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta\theta$), obtemos:

$$\begin{aligned} \Delta V &= \Delta V_{ap.} + \Delta V_F \Rightarrow \\ \Rightarrow \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta\theta &= \gamma_{ap.} \cdot V_0 \cdot \Delta\theta + \gamma_F \cdot V_0 \cdot \Delta\theta \end{aligned}$$

Portanto:

$$\gamma = \gamma_{ap.} + \gamma_F \quad \text{ou} \quad \gamma_{ap.} = \gamma - \gamma_F$$

O coeficiente de dilatação aparente de um líquido é dado pela diferença entre o coeficiente de dilatação real e o coeficiente de dilatação volumétrica do frasco.

Sendo assim, o coeficiente de dilatação aparente depende da natureza do líquido e do material que constitui o recipiente que o contém.



EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 17 Um recipiente de vidro de coeficiente de dilatação linear médio $9 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ tem volume de 100 cm^3 a $0 \text{ }^\circ\text{C}$, estando completamente cheio com um líquido. Ao ser aquecido até $200 \text{ }^\circ\text{C}$, extravasam 5 cm^3 de líquido. Determine:

- o coeficiente de dilatação aparente do líquido;
- o coeficiente de dilatação real do líquido.

Solução:

a) O extravasamento mede a dilatação aparente do líquido: $\Delta V_{\text{ap.}} = 5 \text{ cm}^3$

Temos ainda: $V_0 = 100 \text{ cm}^3$;

$\Delta\theta = 200 \text{ }^\circ\text{C} - 0 \text{ }^\circ\text{C} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$

Da fórmula $\Delta V_{\text{ap.}} = \gamma_{\text{ap.}} \cdot V_0 \cdot \Delta\theta$, obtemos:

$$\gamma_{\text{ap.}} = \frac{\Delta V_{\text{ap.}}}{V_0 \cdot \Delta\theta} = \frac{5}{100 \cdot 200} = \frac{2,5}{10.000} = 2,5 \cdot 10^{-4} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{\gamma_{\text{ap.}} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}}$$

b) O coeficiente de dilatação real γ é dado pela soma: $\gamma = \gamma_{\text{ap.}} + \gamma_{\text{F}}$

O coeficiente de dilatação volumétrica do frasco é o triplo do coeficiente de dilatação linear:

$$\gamma_{\text{F}} = 3\alpha_{\text{F}} = 3 \cdot 9 \cdot 10^{-6} = 27 \cdot 10^{-6} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \gamma_{\text{F}} = 0,27 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

Somando:

$$\gamma = (2,5 \cdot 10^{-4}) + (0,27 \cdot 10^{-4}) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{\gamma = 2,77 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}}$$

Respostas: a) $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; b) $2,77 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

R. 18 Um recipiente de vidro tem a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ volume interno de 30 cm^3 . Calcule o volume de mercúrio a ser colocado no recipiente de modo que o volume da parte vazia não se altere ao variar a temperatura. Dados: coeficiente de dilatação volumétrica do vidro = $24 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; coeficiente de dilatação do mercúrio = $180 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Solução:

O volume da parte vazia é dado pela diferença entre os volumes do frasco (V_{F}) e do líquido (V). Para que ele permaneça constante com a variação de temperatura, é necessário que o líquido e o frasco sofram dilatações iguais ($\Delta V = \Delta V_{\text{F}}$).

Pelas leis da dilatação:

$$\begin{cases} \Delta V = \gamma \cdot V \cdot \Delta\theta \\ \Delta V_{\text{F}} = \gamma_{\text{F}} \cdot V_{\text{F}} \cdot \Delta\theta \end{cases}$$



Portanto:

$$\Delta V = \Delta V_{\text{F}} \Rightarrow \gamma \cdot V \cdot \Delta\theta = \gamma_{\text{F}} \cdot V_{\text{F}} \cdot \Delta\theta \Rightarrow \boxed{\frac{V}{V_{\text{F}}} = \frac{\gamma_{\text{F}}}{\gamma}}$$

Observe que os volumes iniciais do líquido e do frasco devem estar na razão inversa dos respectivos coeficientes de dilatação, conclusão análoga à que foi estabelecida no exercício R.12.

Substituindo os valores numéricos:

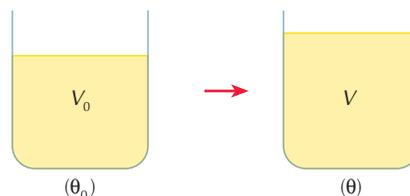
$$\left. \begin{aligned} V_{\text{F}} &= 30 \text{ cm}^3 \\ \gamma_{\text{F}} &= 24 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \\ \gamma &= 180 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \end{aligned} \right\}$$

$$V = V_{\text{F}} \cdot \frac{\gamma_{\text{F}}}{\gamma} = 30 \cdot \frac{24 \cdot 10^{-6}}{180 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{V = 4 \text{ cm}^3}$$

Resposta: 4 cm^3

R. 19 Um líquido cujo coeficiente de dilatação térmica é γ tem densidade d_0 na temperatura inicial θ_0 . Ao ser aquecido até uma temperatura θ , sua densidade se altera para d . Relacione a densidade final d com a variação de temperatura ocorrida $\Delta\theta$, com a densidade inicial d_0 e com o coeficiente de dilatação térmica γ .



Solução:

Seja m a massa de certa porção de líquido que ocupa o volume V_0 na temperatura θ_0 e o volume V na temperatura θ . Sendo γ o coeficiente de dilatação térmica do líquido, temos:

$$V = V_0 \cdot (1 + \gamma \cdot \Delta\theta)$$

As densidades do líquido nas temperaturas referidas são dadas por:

$$d_0 = \frac{m}{V_0} \quad \textcircled{1} \qquad d = \frac{m}{V} \quad \textcircled{2}$$

$$\text{Substituindo } V \text{ em } \textcircled{2}: d = \frac{m}{V_0 \cdot (1 + \gamma \cdot \Delta\theta)} \quad \textcircled{3}$$

$$\text{Substituindo } \textcircled{1} \text{ em } \textcircled{3}: \boxed{d = \frac{d_0}{1 + \gamma \cdot \Delta\theta}}$$

$$\text{Resposta: } d = \frac{d_0}{1 + \gamma \cdot \Delta\theta}$$

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 36 Um certo frasco de vidro está completamente cheio, com 50 cm^3 de mercúrio. O conjunto se encontra inicialmente a $28 \text{ }^\circ\text{C}$. No caso, o coeficiente de dilatação médio do mercúrio tem um valor igual a $180 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e o coeficiente de dilatação linear médio do vidro vale $9 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Determine o volume de mercúrio extravasado quando a temperatura do conjunto se eleva para $48 \text{ }^\circ\text{C}$.

P. 37 Um recipiente tem, a $0 \text{ }^\circ\text{C}$, capacidade (volume interno) de 1.000 cm^3 . Seu coeficiente de dilatação volumétrica é $25 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e ele está completamente cheio de glicerina. Aquecendo-se o recipiente a $100 \text{ }^\circ\text{C}$, há um extravasamento de $50,5 \text{ cm}^3$ de glicerina. Determine:
a) o coeficiente de dilatação aparente da glicerina;
b) o coeficiente de dilatação real da glicerina.

P. 38 A $0 \text{ }^\circ\text{C}$, um recipiente de vidro tem capacidade de 700 cm^3 . Qual volume de mercúrio deve ser colocado a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ no recipiente para que, aumentando-se a temperatura, não se altere o volume da parte vazia? O coeficiente de dilatação volumétrica médio do vidro é $\frac{1}{38.850} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, e o do mercúrio, $\frac{1}{5.550} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

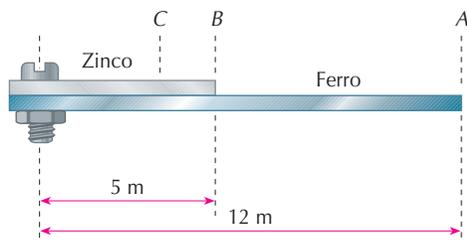
P. 39 (FEI-SP) Um recipiente cujo volume é de 1.000 cm^3 a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ contém 980 cm^3 de um líquido à mesma temperatura. O conjunto é aquecido e, a partir de uma certa temperatura, o líquido começa a transbordar. Sabendo-se que o coeficiente de dilatação volumétrica do recipiente vale $2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e o do líquido vale $1 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, qual é a temperatura em que ocorre o início de transbordamento do líquido?

EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

P. 40 (PUC-SP) A tampa de zinco de um frasco de vidro agarrou no gargalo de rosca externa e não foi possível soltá-la. Sendo os coeficientes de dilatação linear do zinco e do vidro respectivamente iguais a $30 \cdot 10^{-6}$ e $8,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, como proceder? Justifique sua resposta. Temos à disposição um caldeirão com água quente e outro com água gelada.

P. 41 (ITA-SP) O coeficiente médio de dilatação térmica linear do aço é $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Usando trilhos de aço de $8,0 \text{ m}$ de comprimento, um engenheiro construiu uma ferrovia deixando um espaço de $0,50 \text{ cm}$ entre os trilhos, quando a temperatura era de $28 \text{ }^\circ\text{C}$. Num dia de sol forte os trilhos soltaram-se dos dormentes. Que temperatura, no mínimo, deve ter sido atingida pelos trilhos?

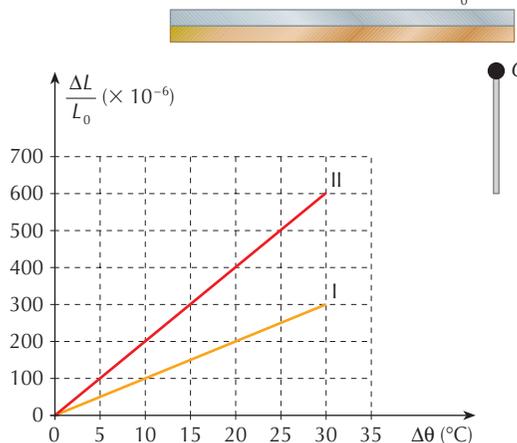
P. 42 (Fuvest-SP) Duas barras metálicas finas, uma de zinco e outra de ferro, cujos comprimentos, a uma temperatura de 300 K , valem $5,0 \text{ m}$ e $12,0 \text{ m}$, respectivamente, são sobrepostas e aparafusadas uma à outra em uma de suas extremidades, conforme ilustra a figura. As outras extremidades B e A das barras de zinco e ferro, respectivamente, permanecem livres. Os coeficientes de dilatação linear do zinco e do ferro valem $3,0 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ e $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, respectivamente.



Desprezando as espessuras das barras, determine:
a) a variação da distância entre as extremidades A e B quando as barras são aquecidas até 400 K ;
b) a distância até o ponto A de um ponto C da barra de zinco cuja distância ao ponto A não varia com a temperatura.

P. 43 (Vunesp) A figura mostra uma lâmina bimetalica, de comprimento L_0 na temperatura θ_0 , que deve tocar o contato C quando aquecida. A lâmina é feita dos metais I e II, cujas variações relativas do comprimento $\frac{\Delta L}{L_0}$ em função da variação de temperatura $\Delta\theta = \theta - \theta_0$ encontram-se no gráfico.

Lâmina bimetalica em $\theta = \theta_0$



Determine:

- o coeficiente de dilatação linear dos metais I e II;
- qual dos metais deve ser utilizado na parte superior da lâmina para que o dispositivo funcione como desejado (justifique sua resposta).



- P. 44** (Faap-SP) Um disco circular de ferro, cuja área vale 100 cm^2 , ajusta-se exatamente numa cavidade praticada num bloco de cobre, estando ambos a $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Determine a área da coroa circular vazia quando o conjunto estiver a $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Os coeficientes de dilatação linear do ferro e do cobre valem respectivamente $10 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e $16 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.
- P. 45** (Mackenzie-SP) O coeficiente de dilatação linear médio do ferro é igual a $0,0000117 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. De quanto deve aumentar a temperatura de um bloco de ferro para que seu volume aumente de 1%?
- P. 46** (Fuvest-SP) A $10 \text{ }^\circ\text{C}$, 100 gotas idênticas de um líquido ocupam um volume de $1,0 \text{ cm}^3$. A $60 \text{ }^\circ\text{C}$, o volume ocupado pelo líquido é de $1,01 \text{ cm}^3$. Calcule:
a) a massa de 1 gota de líquido a $10 \text{ }^\circ\text{C}$, sabendo-se que sua densidade, a essa temperatura, é de $0,90 \text{ g/cm}^3$;
b) o coeficiente de dilatação volumétrica do líquido.
- P. 47** (UFPR) Uma taça de alumínio de 120 cm^3 contém 119 cm^3 de glicerina a $21 \text{ }^\circ\text{C}$. Considere o coeficiente de dilatação linear do alumínio como

sendo de $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ e o coeficiente de dilatação volumétrica da glicerina de $5,1 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Se a temperatura do sistema taça-glicerina for aumentada para $39 \text{ }^\circ\text{C}$, a glicerina transbordará ou não? Em caso afirmativo, determine o volume transbordado; em caso negativo, determine o volume de glicerina que ainda caberia no interior da taça.

- P. 48** (UFPE) Uma caixa cúbica metálica de 10 l está completamente cheia de óleo, quando a temperatura do conjunto é de $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Elevando-se a temperatura até $30 \text{ }^\circ\text{C}$, um volume igual a 80 cm^3 de óleo transborda. Sabendo-se que o coeficiente de dilatação volumétrica do óleo é igual a $0,9 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, determine:
a) a dilatação do recipiente, em cm^3 ;
b) o coeficiente de dilatação linear do metal.
- P. 49** (FEI-SP) Um recipiente de vidro tem capacidade $C_0 = 91,000 \text{ cm}^3$ a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ e contém, a essa temperatura, $90,000 \text{ cm}^3$ de mercúrio. A que temperatura o recipiente estará completamente cheio de mercúrio?
(Dados: coeficiente de dilatação linear do vidro = $32 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; coeficiente de dilatação cúbica do mercúrio = $182 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)

Atividade experimental

Realize a experiência com supervisão do seu professor

A sensação térmica

Encha três bacias com água em temperaturas diferentes: a primeira com água gelada, a segunda com água à temperatura ambiente e a terceira com água quente (cuidado, pois você deverá colocar a mão dentro dela).

Inicialmente, ponha ambas as mãos dentro da bacia do meio.

- Houve diferença na sensação térmica que você teve em cada uma das mãos, em contato com essa água?

Em seguida, coloque a mão direita na água gelada e a mão esquerda na água quente, mantendo-as mergulhadas por cerca de meio minuto. Findo esse intervalo de tempo, retire-as e volte a colocá-las ao mesmo tempo dentro da bacia do meio.

- A sensação que você teve foi a mesma nas duas mãos?
- Descreva a sensação em cada uma de suas mãos ao mergulhá-las na água à temperatura ambiente.
- Explique por que a sensação térmica não é um bom critério para avaliar a temperatura de um sistema.



SÉRGIO DOTTA, JF/CID

A FÍSICA EM NOSSO MUNDO

Criogenia – a Física das baixas temperaturas



JIM VARNEY/SP/LATINSTOCK

Num laboratório, uma amostra de tecido é retirada de um tanque com nitrogênio líquido, onde foi armazenada para biópsia.

A palavra **criogenia** se origina do grego e, literalmente, significa “criação do frio”. Temperaturas muito reduzidas têm atualmente várias aplicações — desde as mais simples, como na conservação e no transporte de produtos perecíveis, até sua utilização em Medicina e Veterinária.

Na área médica, em certas cirurgias utiliza-se o chamado **bisturi criogênico**, no qual circula nitrogênio líquido, com temperaturas da ordem de 77 K. Com esse instrumento, só a parte a ser removida fica submetida a baixas temperaturas, sendo preservados os tecidos saudáveis. A cicatrização das incisões feitas com esse bisturi ocorre em menos tempo e com menor risco de infecção, comparando-se com os bisturis convencionais.

Outra aplicação é a conservação do sangue e de seus componentes em baixas temperaturas para posterior utilização. Um procedimento moderno, adotado por muitos países, consiste em coletar o sangue do cordão umbilical do recém-nascido e conservá-lo em baixas temperaturas. A intenção seria a futura utilização das células-tronco presentes nesse sangue que possibilitem a cura de doenças que a criança possa vir a ter em sua vida.

A inseminação artificial, tanto em seres humanos como em animais, depende muito da criogenia. Nos bancos de esperma, o sêmen deve ser mantido extremamente resfriado, para que o material a ser usado não perca suas características.

Outro uso da tecnologia de baixas temperaturas são os **combustíveis criogênicos**, principalmente compostos de oxigênio e hidrogênio, usados na propulsão de foguetes.

A criogenia é amplamente utilizada em tecnologias que dependem da **supercondutividade**. Esse fenômeno se manifesta em certos materiais que, em temperaturas baixas, praticamente não oferecem resistência à passagem da corrente elétrica, sendo por isso chamados **supercondutores**.

As aplicações técnicas dos supercondutores são as mais variadas. Os aparelhos de ressonância magnética nuclear, largamente usados na Medicina Diagnóstica, dependem de técnicas criogênicas para manter a temperatura dos supercondutores que garantem seu funcionamento. A supercondutividade também é utilizada nos trens-bala japoneses (trens de “levitação magnética”), possibilitando que eles desenvolvam velocidades da ordem de 500 km/h.

Outras aplicações:

- pneus velhos e plásticos, após serem congelados com nitrogênio líquido, são pulverizados e misturados com asfalto para pavimentação (essa mistura aumenta a aderência da pista);
- o aço tratado com nitrogênio líquido é mais duro e resistente ao desgaste;
- retirando-se moléculas de ar de um ambiente por meio da absorção a baixas temperaturas, conseguem-se pressões muito baixas, simulando ambiente extraterrestre.



JUJI PRESS/STRINGER/AFF-GETTY IMAGES

Maglev, o trem-bala que “levita” sobre os trilhos, durante uma viagem experimental em que atingiu a velocidade de 580 km/h. Tsuru, Japão, 2003.

Entrando no campo da ficção científica, cabe por fim citar a **criônica**, um ramo da criogenia. Trata-se do conjunto de técnicas para preservar, utilizando temperaturas muito baixas, pessoas legalmente mortas ou animais para uma possível reanimação futura, na crença de que a ciência e a tecnologia poderão, algum dia, remediar qualquer enfermidade e reverter os danos causados pelo processo de criopreservação.

Teste sua leitura

L.1 (Vunesp) Sêmen bovino para inseminação artificial é conservado em nitrogênio líquido que, à pressão normal, tem temperatura de 78 K. Calcule essa temperatura em:

- a) graus Celsius (°C);
- b) graus Fahrenheit (°F).

L.2 (Unifesp) O texto a seguir foi extraído de uma matéria sobre congelamento de cadáveres para sua preservação por muitos anos, publicada no jornal *O Estado de S. Paulo* de 21/7/2002.

“Após a morte clínica, o corpo é resfriado com gelo. Uma injeção de anticoagulantes é aplicada e um fluido especial é bombeado para o coração, espalhando-se pelo corpo e empurrando para fora os fluidos naturais. O corpo é colocado numa câmara com gás nitrogênio, onde os fluidos endurecem em vez de congelar. Assim que atinge a temperatura de -321° , o corpo é levado para um tanque de nitrogênio líquido, onde fica de cabeça para baixo.”

Na matéria, não consta a unidade de temperatura usada.

Considerando que o valor indicado de -321° esteja correto e que pertença a uma das escalas, Kelvin, Celsius ou Fahrenheit, pode-se concluir que foi usada a escala:

- a) Kelvin, pois trata-se de um trabalho científico e esta é a unidade adotada pelo Sistema Internacional.
- b) Fahrenheit, por ser um valor inferior ao zero absoluto e, portanto, só pode ser medido nessa escala.
- c) Fahrenheit, pois as escalas Celsius e Kelvin não admitem esse valor numérico de temperatura.
- d) Celsius, pois só ela tem valores numéricos negativos para a indicação de temperaturas.
- e) Celsius, por tratar-se de uma matéria publicada em língua portuguesa e essa ser a unidade adotada oficialmente no Brasil.

L.3 (UFRN) O departamento de Física da UFRN possui um laboratório de pesquisa em criogenia, ciência que estuda a produção e manutenção de temperaturas muito baixas, contribuindo

para o entendimento das propriedades físicas e químicas de sistemas nessas temperaturas pouco comuns. Nesse laboratório, uma máquina retira o gás nitrogênio do ar e o liquefaz a uma temperatura de 77,0 kelvins (K), que corresponde a -196 graus Celsius (°C). Nessa temperatura o nitrogênio é usado cotidianamente pelos departamentos de Física, Química e Biologia da UFRN, como também por pecuaristas no congelamento de sêmen para reprodução animal.

O nitrogênio líquido, em virtude de suas características, necessita ser manuseado adequadamente, pois pessoas não habilitadas poderão sofrer acidentes e ser vítimas de explosões. Imagine uma pessoa desavisada transportando, num dia quente de verão, uma porção de nitrogênio líquido numa garrafa plástica fechada. Como o nitrogênio líquido tende a entrar em equilíbrio térmico com o ambiente, mudará de estado físico, transformando-se em um gás. A tendência desse gás é se expandir, podendo provocar uma explosão.

Admita que:

- I. o nitrogênio rapidamente se transforma em gás, cuja pressão (p) num ambiente de volume invariável é diretamente proporcional à temperatura absoluta (T);
- II. a pressão interna e a temperatura iniciais desse gás são, respectivamente, 2,00 atmosferas e 78,0 K;
- III. a garrafa utilizada pode suportar uma pressão máxima de 4,00 atmosferas e o volume dessa garrafa não varia até que a explosão ocorra.

Diante dessas considerações, é correto dizer que a temperatura limite (do gás nitrogênio) que a garrafa suporta sem explodir é:

- a) 273 K c) 234 K
- b) 156 K d) 128 K

L.4 (UFPB) Uma determinada cerâmica não apresenta nenhuma propriedade notável à temperatura ambiente (20°C). Entretanto, quando sua temperatura sofre uma redução de 200 K, ela exibe o extraordinário fenômeno da supercondutividade. Em graus Celsius, essa redução é de:

- a) 23 d) 53
- b) 73 e) 453
- c) 200

HISTÓRIA DA FÍSICA

A história do termômetro e das escalas termométricas



Cláudio Galeno

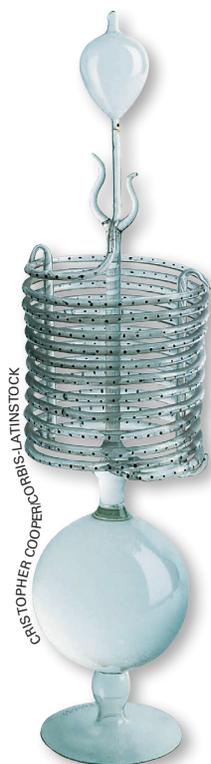
Parece ter sido o famoso médico grego GALENO, em 170 d.C., o primeiro a ter a ideia de utilizar uma escala de temperaturas, tomando como base a ebulição da água e a fusão do gelo. Em suas notas médicas, ele sugeria, em torno dessas temperaturas, quatro “graus de calor” acima e quatro “graus de frio” abaixo. Entretanto, suas observações não são suficientemente claras e precisas para dizermos que ele tenha criado uma escala de temperaturas.

Os primeiros equipamentos para avaliar temperaturas eram aparelhos simples chamados termoscópios. Admite-se que GALILEU (1564-1642), em 1610, tenha concebido um dos primeiros termoscópios, utilizando vinho na sua construção. Na verdade, esses aparelhos usam o ar como substância termométrica, pois é sua expansão ou contração que faz movimentar a coluna líquida, como vimos ao analisar o termosκόpio de Galileu. Os termoscópios são aparelhos sem grande precisão, servindo mais para verificar se a temperatura subiu ou desceu, ou para comparar corpos mais frios ou mais quentes.

A constatação de que a água e o álcool dilatam-se em faixas de temperatura comuns na vida cotidiana possibilitou a construção de aparelhos mais aperfeiçoados. Em 1641, o grão-duque da Toscana, FERDINANDO II, construiu o primeiro termômetro selado, que usava líquido em vez de ar como substância termométrica. Nesse termômetro usou-se álcool dentro de um recipiente de vidro e foram marcados, em um tubo, 50 graus. Entretanto, como não foi especificado um ponto fixo como o “zero” da escala, as indicações careciam de precisão.

A primeira escala termométrica confiável é atribuída ao cientista inglês ROBERT HOOKE (1635-1703), que, em 1664, idealizou-a usando em seu termômetro água com tinta vermelha em vez de álcool. Nessa escala, o “zero” era o ponto de congelamento da água e cada grau correspondia a um aumento de 2 milésimos no volume do líquido do termômetro. A escala de Hooke foi usada pela Real Sociedade inglesa até 1709, e com ela se fez o primeiro registro meteorológico de que se tem notícia.

O astrônomo dinamarquês OLAF ROEMER (1644-1710) criou, em 1702, a primeira escala com dois pontos fixos: adotou o “zero” para uma mistura de gelo e água (ou de gelo e cloreto de amônia, segundo alguns) e o valor 60 para água fervente. Com essa escala, Roemer registrou a temperatura diária de Copenhague durante os anos de 1708 e 1709.



Réplica de um termômetro a álcool rudimentar.



Olaf Roemer



Anders Celsius (gravura de 1735, colorizada digitalmente).

Após uma visita a Roemer, em 1708, o físico alemão DANIEL GABRIEL FAHRENHEIT (1686-1736) começou a construir seus próprios termômetros e, em 1714, passou a usar o mercúrio como substância termométrica. A escala que leva seu nome foi criada em 1724, adotando como “zero” uma mistura de sal de amônia, gelo e água e o valor 96 para a temperatura do corpo humano. Após algum tempo, fez ajustes em sua escala, atribuindo os valores 32 e 212, respectivamente, para os pontos de congelamento e ebulição da água.

Contemporâneo de Fahrenheit, o físico e biólogo francês RENÉ-ANTOINE DE RÉAUMUR (1683-1757) criou uma escala para os termômetros de álcool que construía. Com o valor zero para o ponto do gelo e 80 para o ponto de ebulição da água, essa escala hoje só tem valor histórico.

Em 1742, o astrônomo e físico sueco ANDERS CELSIUS (1701-1744) apresentou à Real Sociedade sueca sua escala, que adotava “zero” para o ponto de ebulição da água e 100 para seu ponto de congelamento. Foi o biólogo sueco CARLOS LINEU (1707-1778) quem, em 1745, propôs a inversão dos valores, estabelecendo a escala definitiva usada até hoje — zero para o ponto de gelo e 100 para o ponto de ebulição da água. A substituição do nome da unidade (de grau centígrado para grau Celsius) e a adoção do nome da escala (escala Celsius) ocorreram apenas em 1948.

A escala científica adotada hoje é a escala absoluta, criada em 1848 pelo físico inglês conhecido como LORD KELVIN (1824-1907). A unidade de medida dessa escala, o kelvin (K), é a unidade de temperatura termodinâmica no SI.

Enquanto isso...

Consulte a **Linha do tempo**, nas páginas finais do livro, onde são assinalados os principais acontecimentos históricos que ocorreram na época em que viveram Celsius, Fahrenheit e Roemer (de 1664 a 1744), além de personagens importantes, em vários ramos de atividade, que viveram nesse mesmo período. Dentre eles, salientamos:

- **George Washington** (1732-1799)
Primeiro presidente dos Estados Unidos, é considerado o Pai da Pátria pelos norte-americanos. Participou ativamente da Guerra da Independência dos EUA, que culminou com o reconhecimento do novo país em 1783.
- **Johannes Vermeer** (1632-1675)
Pintor holandês, é considerado o segundo nome da Idade de Ouro da pintura holandesa, atrás apenas de Rembrandt. Sua obra mais conhecida, *Moça com brinco de pérola*, considerada a Monalisa holandesa, deu origem ao filme inglês homônimo de 2003, dirigido por Peter Webber e estrelado por Scarlett Johansson.
- **Giambattista Tiepolo** (1696-1770)
Pintor veneziano, é considerado um dos grandes mestres da pintura italiana. Com estilo grandioso, criou cenários que evocam uma dimensão terrena voltada para o infinito e a ficção. Convidado pelo rei da Espanha Carlos III, elaborou várias pinturas para o Palácio Real de Aranjuez, vindo a falecer em Madri, onde foi enterrado.
- **George Friedrich Haendel** (1685-1759)
Compositor barroco alemão. Suas obras incluem 32 oratórios, 40 óperas, 110 cantatas, 20 concertos, 39 sonatas, fugas, suítes, obras sacras e obras orquestrais. Entre as mais conhecidas, estão *O Messias* e *Judas Macabeu*.
- **Immanuel Kant** (1724-1804)
Filósofo prussiano, é considerado o último grande filósofo da era moderna, um dos mais influentes pensadores do Iluminismo. Teve grande impacto no Romantismo alemão.
- **Thomas Hobbes** (1588-1679)
Teórico político e filósofo inglês. Em sua obra mais importante, *Leviatã*, expõe seus pontos de vista sobre a natureza humana e sobre a necessidade de governos e sociedades. Segundo ele, cada homem tem direito a tudo e por isso há um constante conflito de todos contra todos. Para evitar que essa “guerra” se concretize, as sociedades estabelecem um contrato social.

Atividade experimental

Realize a experiência com supervisão do seu professor

O anel de Gravezande

Um dispositivo simples para comprovar experimentalmente o fenômeno da dilatação térmica é o chamado **anel de Gravezande**, constituído de uma esfera metálica e de um anel feitos do mesmo material. À temperatura ambiente, a esfera passa facilmente pelo anel (foto 1). No entanto, se a esfera for aquecida (foto 2), ela sofre dilatação e não mais atravessa o anel (foto 3).



LEVY MENDES JR. & LUIZ FERRAZ NETTO



LEVY MENDES JR. & LUIZ FERRAZ NETTO



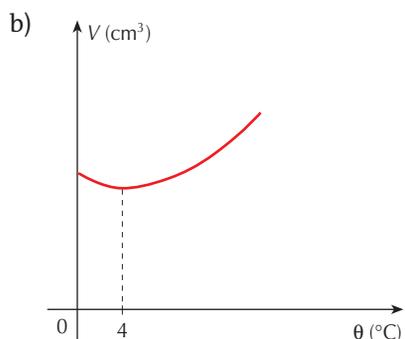
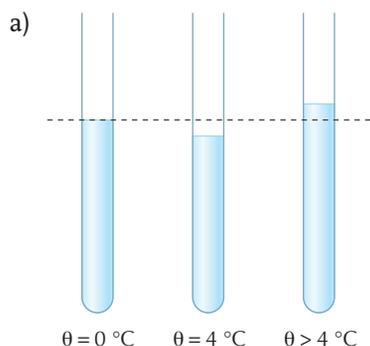
LEVY MENDES JR. & LUIZ FERRAZ NETTO

- O que aconteceria se o anel fosse aquecido até atingir a mesma temperatura da esfera?
- Qual seria o resultado da experiência se, em vez de aquecer a esfera, deixássemos o anel algum tempo no congelador?

A FÍSICA EM NOSSO MUNDO

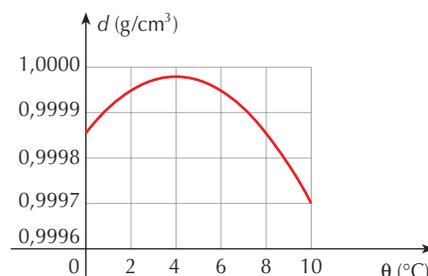
O comportamento anômalo da água

Aquecendo certa massa m de água, inicialmente a $0\text{ }^\circ\text{C}$ (figura a), verificamos que de $0\text{ }^\circ\text{C}$ a $4\text{ }^\circ\text{C}$ o volume diminui, pois o nível da água no recipiente baixa, ocorrendo **contração**. A partir de $4\text{ }^\circ\text{C}$, continuando o aquecimento, o nível da água sobe, o que significa aumento de volume, ocorrendo **dilatação**. Portanto, a água apresenta comportamento excepcional, **contraíndo-se quando aquecida de $0\text{ }^\circ\text{C}$ a $4\text{ }^\circ\text{C}$** . O gráfico abaixo (figura b) mostra aproximadamente como varia o volume da água com o aumento de temperatura.

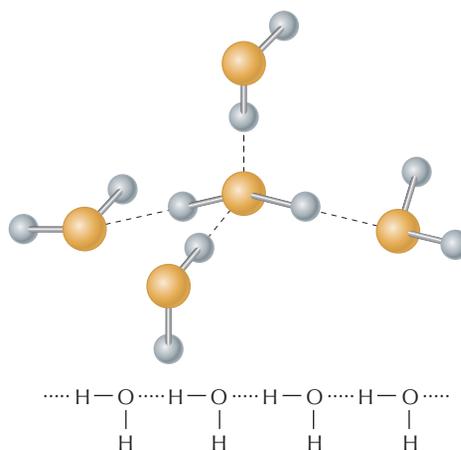


Observe que a $4\text{ }^\circ\text{C}$ a massa m de água apresenta volume mínimo.

A densidade ($d = \frac{m}{V}$) varia inversamente com o volume V . Logo, de $0\text{ }^\circ\text{C}$ a $4\text{ }^\circ\text{C}$, a **densidade da água aumenta**, pois o volume diminui nesse intervalo. **Acima de $4\text{ }^\circ\text{C}$** , o volume da água aumenta e, portanto, a **densidade diminui**. Sendo o volume da água mínimo a $4\text{ }^\circ\text{C}$, nessa temperatura ela apresenta sua densidade máxima. O gráfico a seguir mostra como a densidade da água varia com a temperatura: verifica-se que sua densidade máxima ($0,99997\text{ g/cm}^3 \approx 1\text{ g/cm}^3$) ocorre rigorosamente à temperatura de $3,98\text{ }^\circ\text{C} (\approx 4\text{ }^\circ\text{C})$.



Esse comportamento anômalo da água pode ser explicado pelo modo peculiar com que suas moléculas se interligam quando no estado líquido. Como se estuda em Química, as moléculas de água apresentam um caráter polar, isto é, em cada molécula há uma parte com polaridade positiva e outra com polaridade negativa. Essas diferenças de polaridade fazem com que ocorram ligações de natureza elétrica entre as moléculas: são as **pontes de hidrogênio**, representadas esquematicamente na figura abaixo.

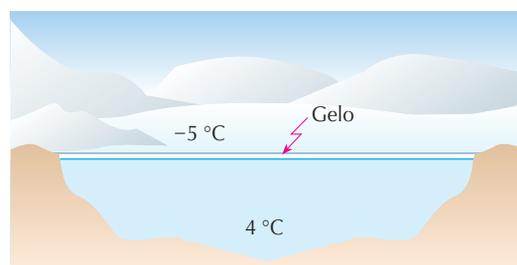
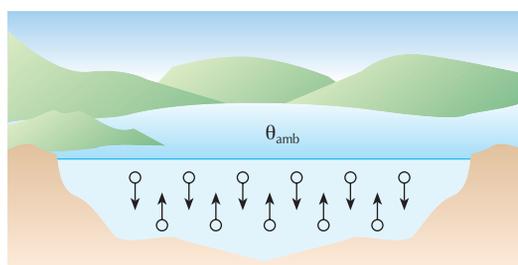


As pontes de hidrogênio.

A elevação da temperatura da água provoca um aumento na agitação molecular que tende a romper as pontes de hidrogênio, aproximando as moléculas. Normalmente a maior agitação aumenta a distância intermolecular. Portanto, com o aquecimento, verificam-se na água dois efeitos opostos: o rompimento das pontes de hidrogênio, tendendo a aproximar as moléculas (diminuindo o volume), e a maior agitação molecular, que tende a afastar as moléculas (aumentando o volume). Da predominância de um ou de outro efeito decorre o comportamento da água: de 0 a $4\text{ }^\circ\text{C}$, o primeiro efeito é predominante e o volume da água diminui (contração); de $4\text{ }^\circ\text{C}$ em diante, o segundo efeito passa a predominar e o volume da água aumenta (dilatação).

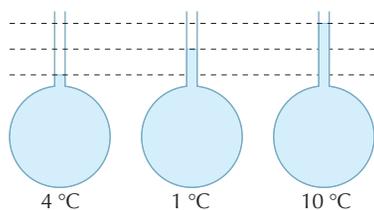
O comportamento particular da água explica por que certos lagos se congelam na superfície, permanecendo líquida a água no fundo. Na figura abaixo, está representado o corte de um lago. Quando cai a temperatura ambiente, a água da superfície se resfria e com isso desce, pois adquire densidade maior que a água do fundo; e esta, sendo mais quente (menos densa), sobe.

Quando a temperatura se torna inferior a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, porém, a movimentação por diferença de densidade deixa de ocorrer, pois a essa temperatura a água tem densidade máxima. E, com a continuidade do resfriamento do ambiente, a densidade da água superficial diminui, não podendo mais descer. Assim, chega a se formar gelo na superfície e a água no fundo permanece líquida. Contribui para esse fenômeno o fato de a água e o gelo serem isolantes térmicos. No diagrama à direita, representa-se uma situação em que o ambiente está a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a água no fundo está a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Teste sua leitura

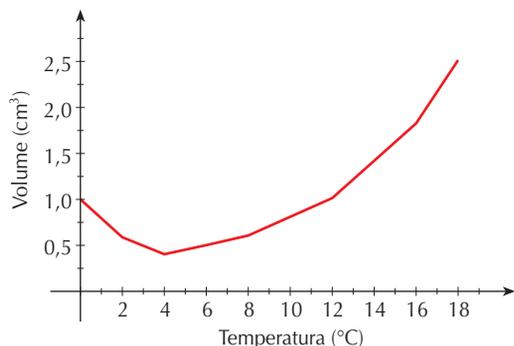
L.5 (Ufla-MG) Um bulbo de vidro conectado a um tubo fino, com coeficiente de dilatação desprezível, contendo certa massa de água na fase líquida é mostrado a seguir em três situações de temperatura. Na primeira, o sistema está a $4\text{ }^\circ\text{C}$; na segunda, a $1\text{ }^\circ\text{C}$; e na terceira, a $10\text{ }^\circ\text{C}$. Conforme a temperatura, a água ocupa uma certa porção do tubo.



Tal fenômeno é explicado:

- pelos aumento de volume da água de $0\text{ }^\circ\text{C}$ a $4\text{ }^\circ\text{C}$, seguido da diminuição do volume a partir de $4\text{ }^\circ\text{C}$.
- pela diminuição da densidade da água de $0\text{ }^\circ\text{C}$ a $4\text{ }^\circ\text{C}$, seguido do aumento da densidade a partir de $4\text{ }^\circ\text{C}$.
- pelos aumento do volume da água a partir de $0\text{ }^\circ\text{C}$.
- pelos aumento da densidade da água de $0\text{ }^\circ\text{C}$ a $4\text{ }^\circ\text{C}$, seguido da diminuição da densidade a partir de $4\text{ }^\circ\text{C}$.
- pela diminuição do volume da água a partir de $0\text{ }^\circ\text{C}$.

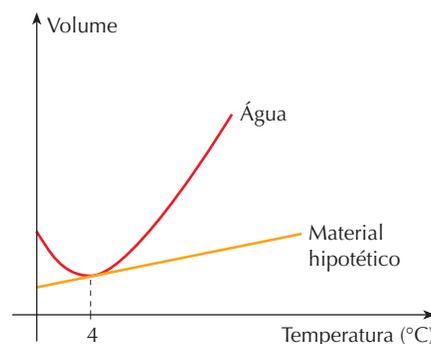
L.6 (PUC-MG) Quando aumentamos a temperatura dos sólidos e dos líquidos, normalmente seus volumes aumentam. Entretanto, algumas substâncias apresentam um comportamento anômalo, como é o caso da água, mostrado no gráfico abaixo.



Assinale a afirmativa correta.

- O volume da água aumenta e sua densidade diminui, quando ela é resfriada abaixo de $4\text{ }^\circ\text{C}$.
- Entre $4\text{ }^\circ\text{C}$ e $0\text{ }^\circ\text{C}$, a diminuição de temperatura faz com que a água se torne mais densa.
- Quando a água é aquecida, a partir de $4\text{ }^\circ\text{C}$ sua densidade e seu volume aumentam.
- Quando a água está a $4\text{ }^\circ\text{C}$, ela apresenta a sua menor densidade.

L.7 (UFPEL-RS) A água, substância fundamental para a vida no planeta, apresenta uma grande quantidade de comportamentos anômalos. Suponha que um recipiente, feito com um determinado material hipotético, se encontre completamente cheio de água a $4\text{ }^\circ\text{C}$ (observe o gráfico a seguir).



De acordo com o gráfico e seus conhecimentos, é correto afirmar que:

- apenas a diminuição de temperatura fará com que a água transborde.
- tanto o aumento da temperatura quanto sua diminuição não provocarão o transbordamento da água.
- qualquer variação de temperatura fará com que a água transborde.
- a água transbordará apenas para temperaturas negativas.
- a água não transbordará com um aumento de temperatura, somente se o calor específico da substância for menor que o da água.

I.8 (Mackenzie-SP) Diz um ditado popular: “A natureza é sábia!”. De fato! Ao observarmos os diversos fenômenos da natureza, ficamos encantados com muitos pormenores, sem os quais não poderia haver vida na face da Terra, conforme a conhecemos. Um desses pormenores, de extrema importância, é o comportamento anômalo da água, no estado líquido, durante seu aquecimento ou resfriamento sob pressão normal. Se não existisse tal comportamento, a vida subaquática nos lagos e rios, principalmente nas regiões mais frias de nosso planeta, não seria possível. Dos gráficos abaixo, o que melhor representa esse comportamento anômalo é:

