



Coleção **olimpo**

IME ITA



TERMOLOGIA

TERMOMETRIA

1.1 Equilíbrio Térmico

Se as propriedades termométricas de dois ou mais sistemas não variam no decorrer do tempo, quando em presença uns dos outros, dizemos que eles estão em equilíbrio térmico entre si.

Podemos generalizar o conceito de equilíbrio térmico para mais de dois sistemas, por meio da chamada *Lei zero da Termodinâmica*.

Considere três sistemas A, B e C. Suponha que, numa primeira experiência, tenha sido constatado o equilíbrio térmico entre A e C. Suponha ainda que, mantidas constantes as condições de C tenha sido constatado, numa segundo experiência, o equilíbrio térmico entre B e C. Podemos concluir então que o sistema A está em equilíbrio térmico com B. A lei zero da Termodinâmica pode ser enunciada simplesmente da seguinte maneira:

Dois sistemas em equilíbrio térmico com um terceiro estão em equilíbrio térmico entre si.

1.2 Temperatura

Podemos considerar a temperatura de um corpo como sendo a medida do grau de agitação de suas moléculas. A energia associada a esse agitação é chamada energia térmica. Para dizer se dois ou mais sistemas estão ou não em equilíbrio térmico usaremos uma comparação entre suas temperaturas.

Dois ou mais sistemas em equilíbrio térmico apresentam a mesma temperatura; sistemas que não estão em equilíbrio térmico apresentam temperaturas diferentes. Nesse caso a energia térmica pode transferir-se de um corpo para outro. Essa energia térmica em trânsito é denominada *calor*.

1.3 Escalas de Temperatura

A fixação de uma escala de temperaturas começa com a escolha do termômetro, isto é, de um sistema dotado de uma propriedade que varie regularmente com a temperatura. Por exemplo, a medida que aumenta a temperatura de um termômetro clínico, aumenta a altura da coluna de mercúrio em seu interior. Essa propriedade é chamada propriedade termométrica. A cada valor da propriedade termométrica (altura) corresponderá um único valor da temperatura, isto é, a **temperatura é uma função unívoca da propriedade termométrica**.

Para as escalas termométricas usadas tradicionalmente, os sistemas universalmente escolhidos são:

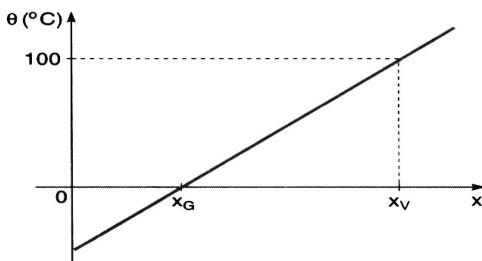
- a) sistema **gelo – água** sob pressão normal (**1 atm**), cuja temperatura é aqui denominada **ponto de gelo**.

- b) sistema **água – vapor d’água** sob pressão normal (**1 atm**), cuja temperatura é aqui denominada **ponto de vapor**.

Essas temperaturas são também chamadas “pontos fixos fundamentais” e o intervalo entre elas recebe o nome de “intervalo fundamental” da escala³.

Chamamos de escala termométrica a sequência ordenada das temperaturas que definem, em graus, todos os estados térmicos, ordenados dos mais frios aos mais quentes. As escalas estabelecidas atribuindo valores arbitrários aos pontos fixos são denominadas **escalas termométricas relativas**.

1.4 Escala Celsius



Os valores atribuídos, nessa escala, para o ponto de fusão e para o ponto de vapor são respectivamente, 0 e 100. O intervalo é dividido em 100 partes⁴, cada uma das quais constitui o grau Celsius (°C).

$$\text{Ponto do Gelo: } \theta_G = 0^\circ C \Rightarrow X_G$$

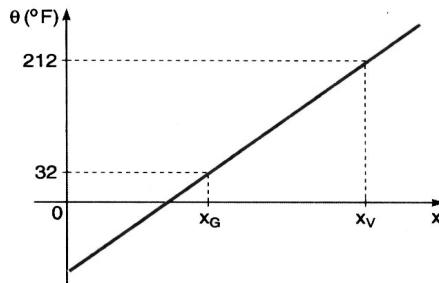
$$\text{Ponto do Vapor: } \theta_V = 100^\circ C \Rightarrow X_V$$

Define-se o grau Celsius como sendo a variação de temperatura que acarreta na propriedade termométrica (X) uma variação igual a 1/100 da variação que sofre esta propriedade quando o termômetro é levado do ponto de gelo ao ponto de vapor (**Intervalo Fundamental**).

³ O ponto tríplice da água foi assumido pelo SI como ponto fixo fundamental, atribuindo-lhe a temperatura de 273,16K (0°C) por definição.

⁴ Quando o intervalo entre o ponto de gelo e vapor de uma escala é dividido em cem partes ela é chamada centígrada ou centesimal. A escala Celsius é assim, mas não é a única.

1.5 Escala Fahrenheit



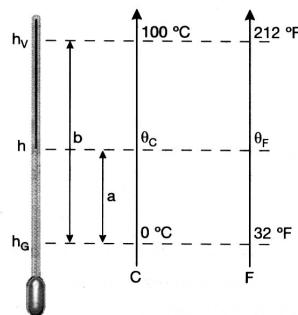
Os valores atribuídos, nessa escala, para o ponto de fusão e para o ponto do vapor são respectivamente, 32 e 212. O intervalo é dividido em 180 partes, cada uma das quais constitui o grau Fahrenheit (°F).

Ponto do Gelo: $\theta_G = 32^\circ F \Rightarrow X_G$

Ponto do Vapor: $\theta_V = 212^\circ F \Rightarrow X_V$

1.6 Relação entre escalas relativas

Observe o esquema:

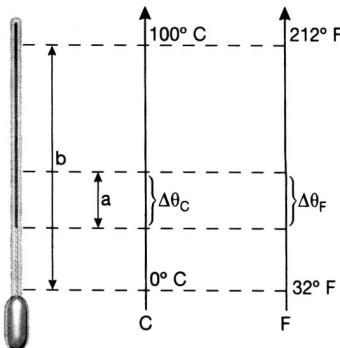


Para certo estado térmico, observe a coluna de altura h do termômetro para a qual correspondemos às temperaturas θ_C (Celsius) e θ_F (Fahrenheit).

Assim conseguimos:

$$\frac{a}{b} = \frac{\theta_C - 0}{100 - 0} = \frac{\theta_F - 32}{212 - 32}, \text{ e simplificando } \frac{\theta_C}{5} = \frac{\theta_F - 32}{9}$$

1.7 Variações nas escalas usuais



A relação entre as variações de temperatura $\Delta\theta_C$ e $\Delta\theta_F$ pode ser obtida pela relação entre os segmentos definidos na haste de um termômetro de mercúrio graduado nas duas escalas:

Assim conseguimos:

$$\frac{a}{b} = \frac{\Delta\theta_C}{100 - 0} = \frac{\Delta\theta_F}{212 - 32}$$

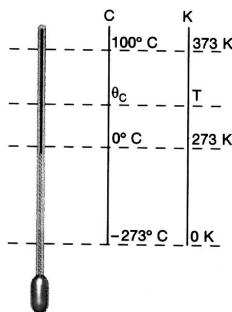
Simplificando:

$$\frac{\Delta\theta_C}{5} = \frac{\Delta\theta_F}{9}$$

1.8 Escala absoluta kelvin

É possível demonstrar que existe um limite inferior, ainda que inalcançável de temperatura⁵, ou seja, há um estado térmico mais frio que qualquer outro. Como veremos mais tarde, essa situação corresponde à cessação do chamado movimento de agitação térmica de todos átomos e moléculas do sistema. A esse estado térmico dá-se o nome de **zero absoluto**. Embora seja inatingível na prática, foi possível, através de condições teóricas, chegar-se à conclusão de que o zero absoluto corresponde, nas escalas relativas usuais, a $-273,16^\circ\text{C}$ e $-459,67^\circ\text{F}$.

⁵ A temperatura mais baixa até hoje conseguida foi $2 \cdot 10^{-9}\text{ K}$, ou seja, dois bilionésimos de Kelvin acima do zero absoluto. Isso foi conseguido em 1989 na Universidade Tecnológica de Helsinki.



A escala absoluta Kelvin tem origem no zero absoluto (-273 ° C aproximadamente) e unidade **kelvin** (símbolo : K), igual ao grau Celsius.

Para efeito de comparação entre as escalas, consideremos o termômetro hipotético da figura:

Sendo T a leitura na escala Kelvin e θ_C a leitura Celsius, para a mesma temperatura, temos:

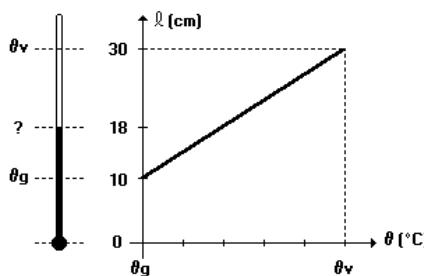
$$T = C + 273 \text{ e } \Delta T = \Delta C$$

Exercícios Propostos

01. (Unerp-SP) Com respeito a temperatura, assinale a afirmativa mais correta:

- a) A escala Celsius é utilizada em todos os países do mundo e é uma escala absoluta. A escala Kelvin só é usada em alguns países por isso é relativa.
- b) A Kelvin é uma escala absoluta, pois trata do estado de agitação das moléculas, e é usada em quase todos os países do mundo.
- c) A escala Celsius é uma escala relativa e representa, realmente, a agitação das moléculas.
- d) As escalas Celsius e Kelvin referem-se ao mesmo tipo de medida e só diferem de um valor constante e igual a 273.
- e) A escala Celsius é relativa ao ponto de fusão do gelo e de vapor da água e o intervalo é dividido em noventa e nove partes iguais.

02. (Cesgrario-RJ) Com o objetivo de recalibrar um velho termômetro com a escala totalmente apagada, um estudante o coloca em equilíbrio térmico, primeiro, com gelo fundente e, depois, com água em ebulição sob pressão atmosférica normal. Em cada caso, ele anota a altura atingida pela coluna de mercúrio: 10,0cm e 30,0cm , respectivamente, medida sempre a partir do centro do bulbo. A seguir, ele espera que o termômetro entre em equilíbrio térmico com o laboratório e verifica que, nesta situação, a altura da coluna de mercúrio é de 18,0cm . Qual a temperatura do laboratório na escala Celsius deste termômetro?



- a) 20°C b) 30°C
 c) 40°C d) 50°C
 e) 60°C

Gabarito

- 01.b;
 02.c;

2 Dilatometria



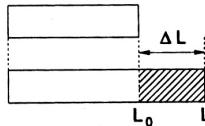
Dilatação dos sólidos isótropos

A experiência mostra que as dimensões dos corpos variam com a temperatura. Esta variação é a **dilatação térmica** ou simplesmente **dilatação**. Estudaremos inicialmente a dilatação dos sólidos, sendo que consideraremos somente os sólidos isótropos, isto é, aqueles cujas propriedades físicas, em torno de qualquer um de seus pontos, independentemente da direção em que são observadas. Em outras palavras, quando aquecemos um corpo isótropo, ele se dilata por igual em todas as direções. (Um corpo que não é isótropo recebe o nome de anisótropo; de modo geral, os cristais são corpos anisótropos.)

Dilatação linear

Considere uma haste de comprimento L_0 a 0°C e de secção desprezível. A experiência mostra que, se a haste for aquecida até a temperatura genérica $t^\circ\text{C}$, seu comprimento passará ao valor genérico L . A diferença $\Delta L = L - L_0$ é denominada alongamento correspondente ao intervalo térmico $\Delta t = t - 0 = t^\circ\text{C}$. A experiência revela os seguintes fatos:

-
- a) ΔL é diretamente proporcional ao comprimento inicial L_0 .
 b) ΔL é diretamente proporcional ao intervalo térmico Δt .



As informações empíricas citadas acima podem ser resumidas na expressão $\Delta L \propto L_0 \Delta t$, sendo que o sinal \propto indica proporcionalidade.

Para transformar a indicação simbólica acima numa equação, é preciso introduzir um coeficiente de proporcionalidade, que indicaremos por α_m e que é chamado **coeficiente de dilatação linear médio** correspondente ao intervalo térmico considerado. Portanto:

$$\Delta L = \alpha_m L_0 t^6 \quad \therefore \quad \alpha_m = \frac{\Delta L}{L_0 t}$$

A rigor, o valor de α_m depende da temperatura inicial do intervalo térmico considerado. Em primeira análise admitiremos que o coeficiente de dilatação linear seja constante, desde que o intervalo térmico considerado não seja demasiadamente amplo. Assim faremos $\alpha_m = \alpha$ e teremos:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 t} \quad \therefore \quad \Delta L = L_0 \alpha t$$

$$\therefore L - L_0 = L_0 \alpha t \quad \Rightarrow \quad L = L_0 + L_0 \alpha t$$

$$L = L_0(1 + \alpha t)$$

O fator $(1 + \alpha t)$ é chamado binômio de dilatação linear.

Convém que você saiba o seguinte a respeito do coeficiente α :

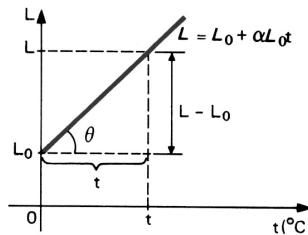
- 1) A unidade em que se exprime α é o inverso do grau correspondente à escala considerada. Por exemplo, se estivermos trabalhando na escala Celsius, α é expresso na unidade $^{\circ}\text{C}^{-1}$.
- 2) O coeficiente de dilatação α é um número da ordem de 10^{-6} , ou seja, da ordem de milionésimos. Por isso, nas considerações teóricas, abandonamos as potências de α superiores à primeira; com isto estaremos cometendo um erro não mensurável experimentalmente.

⁶ Essa equação só deve ser usada para o aquecimento da barra, ou seja, $\Delta t > 0$.

Gráficos

Vamos imaginar uma experiência na qual uma barra de comprimento inicial L_0 é elevada a partir de 0°C , para 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 diagrama (L , t) obteremos uma curva que, para um intervalo pequeno de temperatura, pode ser confundida com uma reta valendo a expressão

$$L = L_0(1 + \alpha\Delta t).$$



Como $\Delta t = (t - t_0)$ temos

$$L = L_0[1 + \alpha(t - t_0)], \text{ Se } t_0 = 0^\circ\text{C}, \text{ vem}$$

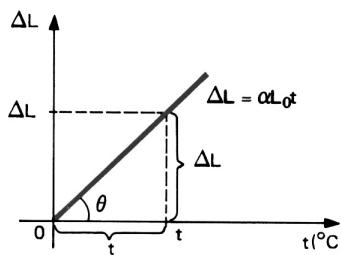
$$L = L_0 + \alpha L_0 t$$

Que é uma função do primeiro grau.

No gráfico:

$\operatorname{tg} \theta = \frac{L - L_0}{t} = \alpha L_0$ constitui o coeficiente angular da reta. De $\Delta L = \alpha L_0 (t - t_0)$, se

$t_0 = 0^\circ\text{C}$, vem:



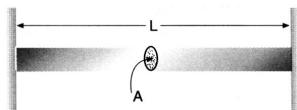
$$\Delta L = \alpha L_0 t$$

Que é uma função linear.

No seu gráfico $\operatorname{tg} \theta = \frac{\Delta L}{t} = \alpha \cdot L_0$ que constitui o coeficiente angular da reta.

Tensão térmica

Fixando as extremidades de uma haste de modo a impedir a dilatação ou compressão da mesma, quando variarmos a temperatura, daremos origem às chamadas **tensões térmicas** na haste. Essas tensões podem ser tão intensas a ponto de atingir o limite de elasticidade, ou até o limite de ruptura da haste. As forças que surgem por efeito da dilatação térmica são consideráveis, tendo intensidade determinável, dentro de certos limites, pela **Lei de Hooke**, que se refere às deformações elásticas dos sólidos.



Consideremos uma barra de comprimento L fixada entre duas paredes indeformáveis e indeslocáveis, como mostra a figura. Aquecendo-se a barra, ela não consegue dilatar-se, ficando sujeita a forças de tensão interna que podem acarretar o encurvamento da barra. Vamos admitir que a barra não se encure e exprimir a intensidade da força de tensão que age na barra em função da variação de temperatura. Se a barra pudesse se dilatar, ela sofreria uma variação de comprimento (ΔL) dada por:

$$(\Delta L) = \alpha L \Delta \theta.$$

A **Lei de Hooke**, referente às deformações elásticas dos sólidos, nos dá a intensidade da força de compressão atuante, em função da deformação (ΔL):

$$F = k \cdot \Delta L = \frac{E \cdot A}{L} \cdot \Delta L$$

Nessa equação, E é o denominado **Módulo de Young** ou de elasticidade do material de barra e A é a área da secção transversal da barra. Substituindo, na última equação, a equação de dilatação, temos:

$$F = E \cdot A \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

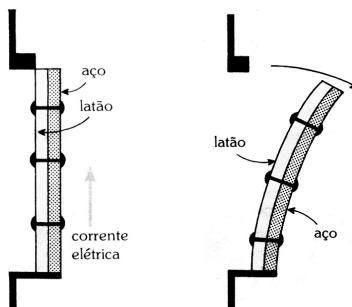
Em vista dessa equação, podemos tirar o seguinte princípio geral:

O fenômeno mecânico que se produz em consequência de alguma ação térmica é tal que, pelo seu efeito, opõe-se ao fenômeno térmico.

A lâmina bimetálica

Chama-se lâmina bimetálica o conjunto constituído de duas tiras metálicas, de materiais com diferentes coeficientes de dilatação, soldadas ou rebitadas entre si. O comportamento do conjunto quando aquecido torna-o de grande aplicação prática.

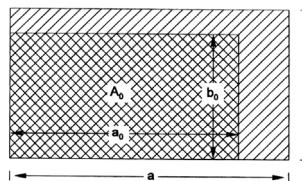
Consideremos duas chapas de metais distintos (por exemplo aço e latão), com diferentes coeficientes de dilatação. Sendo assim, para uma mesma variação de temperatura a dilatação de uma delas é **maior** (latão) que a dilatação da outra (aço). Como as tiras de metal estão rigidamente unidas, aparecem nas chapas tensões térmicas que obrigam o par a curvar-se para o lado da chapa de menor coeficiente de dilatação. Se resfriássemos o par, ele se curvaria para o lado da chapa de maior coeficiente de dilatação. Na figura, o aquecimento é obtido através da passagem de corrente elétrica pela lâmina:



Dilatação superficial

Passemos a considerar agora a dilatação superficial, isto é, a dilatação em duas dimensões. Para isto, pensaremos em uma placa feita de um material isótropo de espessura desprezível, ou seja, um corpo em que uma das dimensões (a espessura) é desprezível em relação às duas outras dimensões. Procedemos assim para podermos desprezar a dilatação na espessura. Mais adiante apresentaremos a dilatação volumétrica, na qual levamos em conta a dilatação em todas as dimensões.

Voltando ao caso da placa de espessura desprezível, seja S_0 a área da sua superfície a 0°C . Se a temperatura passar ao valor genérico $t^\circ\text{C}$, a área da superfície passará ao valor S .



A diferença $\Delta S = S - S_0$ é chamada variação da área da superfície correspondente ao intervalo térmico $\Delta t = t - 0 = t^\circ C$.

A experiência revela fatos análogos aos que foram citados na dilatação linear, portanto, $\Delta S \propto S_0 t$ e para transformar a informação experimental numa igualdade, bastará introduzir o coeficiente de proporcionalidade β_m , denominado coeficiente de dilatação superficial médio correspondente ao intervalo térmico.

$$\Delta t = t^\circ C.$$

Assim, $\Delta S = \beta_m S_0 t$

Analogamente ao que foi feito para o coeficiente de dilatação linear, consideraremos β_m constante, desde que o intervalo térmico não seja excessivamente grande. Portanto, substituindo β_m por β , obtemos:

$$\Delta S = \beta S_0 t \therefore S - S_0 = \beta S_0 t \therefore S = S_0 + \beta S_0 t$$

$$S = S_0 (1 + \beta t)$$

Sendo o fator $(1 + \beta t)$ denominado "**binômio de dilatação superficial**". Tudo o que foi dito para o coeficiente α vale para o coeficiente β . Antes de prosseguir, a título de exercício, procure a expressão

$$S_2 = S_1 [1 + \beta(t_2 - t_1)]$$

baseado nas observações feitas para o coeficiente α , que valem também para o coeficiente β .

Relação entre α e β

Sendo a placa feita de material isótropo, o coeficiente de dilatação linear α será o mesmo, qualquer que seja a direção considerada. Para a superfície S , você pode escrever:

$S = ab$. Mas,

$$a = a_0(1 + \alpha t) \quad \text{e} \quad b = b_0(1 + \alpha t) \quad \text{então,}$$

$$S = a_0(1 + \alpha t) b_0(1 + \alpha t)$$

$$S = a_0 b_0 (1 + \alpha t)^2 = S_0 (1 + \alpha t)^2$$

$$S = S_0 (1 + 2\alpha t + \alpha^2 t^2)$$

Lembrando que $S = S_0(1 + \beta t)$ e que a parcela $\alpha^2 t^2$ é desprezível, você conclui facilmente que:

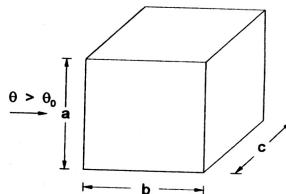
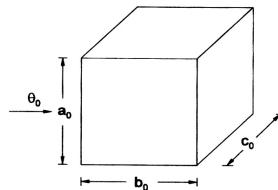
$$\begin{aligned} S_0(1 + \beta t) &= S_0(1 + 2\alpha t) \\ 1 + \beta t &= 1 + 2\alpha t; \quad \beta t = 2\alpha t \end{aligned}$$

$$\boxed{\beta = 2\alpha}$$

Dilatação volumétrica ou cúbica

Nos parágrafos anteriores, estudamos a dilatação em uma dimensão (dilatação linear), e a dilatação em duas dimensões (dilatação superficial).

Vejamos a dilatação em três dimensões, ou seja, a dilatação volumétrica. Para isto, consideremos um bloco feito de material isótropo e que tenha, a 0°C , o volume V_0 . Se a temperatura aumentar para o valor genérico $t^\circ\text{C}$, o bloco passará a ter o volume V .



A diferença $\Delta V = V - V_0$ é chamada variação do volume correspondente ao intervalo térmico $\Delta t^\circ\text{C} = t^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C} = t^\circ\text{C}$ considerado. A experiência revela ainda, fatos análogos ao que vimos para a dilatação superficial, ou seja, que ΔV é proporcional a V_0 e a Δt . Portanto $\Delta V \sim V_0 t$. E introduzindo o coeficiente de proporcionalidade, temos: $\Delta V = \gamma_m V_0 t$. O coeficiente γ_m é denominado coeficiente de dilatação volumétrica médio, correspondente ao intervalo térmico considerado. Considerando, como nos casos anteriores γ_m constante para os intervalos não demasiadamente amplos, teremos, substituindo γ_m por γ :

$$\Delta V = \gamma V_0 t$$

$$V - V_0 = V_0 \gamma t$$

$$V = V_0 + V_0 \gamma t$$

$$V = V_0(1 + \gamma t)$$

sendo $(1 + \gamma t)$ o “binômio de dilatação volumétrica”.

Tudo o que foi dito para os coeficientes α e β vale para o coeficiente γ . Procure repetir o exercício já proposto estabelecendo a relação

$$V_2 = V_1 [1 + \gamma(t_2 - t_1)]$$

entre os volumes de um determinado corpo, a t_1 °C e a t_2 °C.

Relação entre γ e α

O volume do bloco na página anterior é $V = abc$. Por ser o bloco isótropo, o coeficiente de dilatação linear α é o mesmo em todas as direções. Portanto

$$V = a_0(1 + \alpha t) b_0(1 + \alpha t) c_0(1 + \alpha t)$$

$$V = a_0 b_0 c_0 (1 + \alpha t)^3.$$

Mas,

$$a_0 b_0 c_0 = V_0 \dots \text{Então, } V = V_0(1 + \alpha t)^3.$$

Por outro lado $V = V_0(1 + \gamma t)$ e, por comparação você escreve

$$1 + \gamma t = (1 + \alpha t)^3$$

$$1 + \gamma t = 1 + 3\alpha t + 3\alpha^2 t^2 + \alpha^3 t^3.$$

As parcelas $3\alpha^2 t^2$ e $\alpha^3 t^3$ são desprezíveis, e assim resulta:

$$1 + \gamma t = 1 + 3\alpha t$$

$$\gamma = 3\alpha$$

$$\gamma t = 3\alpha t$$

\therefore

Relação entre γ e β .

Você provou que $\gamma = 3\alpha$ e havia mostrado que $\beta = 2\alpha$. Dividindo membro a membro, você conclui agora que

$$\frac{\gamma}{\beta} = \frac{3\alpha}{2\alpha}$$

\therefore

$$\gamma = \frac{3}{2}\beta$$

Dilatação dos sólidos anisótopos

Considere agora um sólido constituído de um material anisotropo. Nestes materiais os coeficientes de dilatação linear dependem geralmente da direção de observação. Em todos os cristais é possível determinar três direções perpendiculares duas a duas, tais que, um cubo de cristal com arestas paralelas a essas direções, aquecido, conserva os ângulos retos, embora os comprimentos dos lados variem desigualmente. Tais direções constituem os eixos *principais de dilatação* e os coeficientes de dilatação linear relativos a essas direções são chamados **coeficientes de dilatação linear principais**.

Sejam α_x , α_y , e α_z os coeficientes de dilatação linear principais de um cristal e consideremos um cubo cujas arestas são paralelas aos eixos principais, com aresta igual a L_0 a 0°C . O volume do cubo a 0°C será : $V_0 = L_0^3$. Se a temperatura passa ao valor $t^\circ\text{C}$ o volume passará a ser:

$$V = L_x L_y L_z.$$

Na direção x : $L_x = L_0(1 + \alpha_x t)$

Na direção y : $L_y = L_0(1 + \alpha_y t)$

Na direção z : $L_z = L_0(1 + \alpha_z t)$

Portanto:

$$V = L_0^3 (1 + \alpha_x t) (1 + \alpha_y t) (1 + \alpha_z t).$$

$$V = V_0 (1 + \alpha_x t) (1 + \alpha_y t) (1 + \alpha_z t).$$

Mas,

$$\begin{aligned} (1 + \alpha_x t) (1 + \alpha_y t) (1 + \alpha_z t) &= \\ 1 + \alpha_x t + \alpha_y t + \alpha_z t + \alpha_x \alpha_y t^2 + \\ + \alpha_x \alpha_z t^2 + \alpha_y \alpha_z t^2 + \alpha_x \alpha_y \alpha_z t^3. \end{aligned}$$

Desprezando os produtos cujos fatores sejam coeficientes de dilatação, você obtém:

$$(1 + \alpha_x t) (1 + \alpha_y t) (1 + \alpha_z t) = 1 + \alpha_x t + \alpha_y t + \alpha_z t.$$

Substituindo na expressão do volume teremos:

$$V = V_0 [1 + (\alpha_x + \alpha_y + \alpha_z) t]$$

Comparando esta expressão com

$$V = V_0 (1 + \gamma t)$$

você conclui que

$\gamma = \alpha_x + \alpha_y + \alpha_z$

Pode acontecer que só existam dois coeficientes principais distintos, como acontece no cristal chamado Espato de Islândia. Nesse caso $\alpha_y = \alpha_z$ e, consequentemente,

$$\gamma = \alpha_x + 2\alpha_{xy}.$$

Nos cristais do chamado sistema cúbico os coeficientes de dilatação independem da direção, isto é,

$$\alpha_x = \alpha_y = \alpha_z = \alpha \text{ e } \gamma = 3\alpha.$$

Variação da massa específica com a temperatura

Você já aprendeu que a massa específica de uma substância é a razão entre a massa e o volume, isto é, $\rho = m / V$.

Evidentemente, a massa do corpo independe da temperatura. Por outro lado, como acabamos de ver, o volume do corpo varia com a temperatura. Assim sendo, concluímos que a massa específica do corpo depende da temperatura a que se encontra o corpo.

Vamos determinar a equação que exprime essa dependência. Consideraremos um corpo que se acha inicialmente a 0°C e cuja temperatura passa a $t^\circ\text{C}$. Teremos então:

$$\begin{cases} \text{a } 0^\circ\text{C} & \rho_0 = \frac{m}{V_0} \\ \text{a } t^\circ\text{C} & \rho = \frac{m}{V} \end{cases}$$

Dividindo membro a membro:

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \frac{m}{V_0} : \frac{m}{V}$$

Portanto:

$$\boxed{\frac{\rho_0}{\rho} = \frac{V}{V_0}}$$

Mas $V = V_0(1 + \gamma t)$

Portanto:

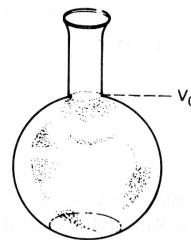
$$\frac{\rho_0}{\rho} = \frac{V_0(1 + \gamma t)}{V_0}, \text{ ou seja,}$$

$$\boxed{\rho = \frac{\rho_0}{1 + \gamma t}}$$

Dilatação dos líquidos

Como os líquidos não têm forma própria, não faz sentido discutirmos sua dilatação linear ou superficial. O estudo de sua dilatação, volumétrica apresenta dificuldades, uma vez que, ao aquecermos um líquido, estamos também aquecendo o recipiente.

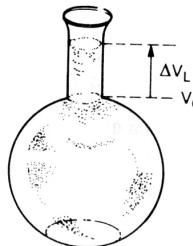
Assim, em uma experiência na qual medirmos a dilatação sofrida por um líquido, esta dilatação é a **aparente**, fruto do efeito conjunto causado pela dilatação **real** do líquido e pela dilatação do **recipiente**. Consideremos um recipiente de gargalo fino de capacidade de V_0 , feito de um material de coeficiente de dilatação volumétrica γ_R , que esteja completamente cheio de um líquido de coeficiente de dilatação γ_L .



Aquecendo o líquido e o recipiente em $\Delta\theta$, provocamos, ao mesmo tempo, a dilatação do líquido (que tende a elevar seu nível no gargalo) e a do recipiente (que tende a aumentar de capacidade, fazendo com que o nível do gargalo baixe.).

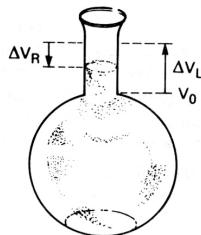
Vamos supor que as duas dilatações ocorram em fases sucessivas. Se, inicialmente, só o líquido se dilatasse, o nível no gargalo subiria o correspondente a um ΔV_L , tal que:

$$\Delta V_L = V_0 \cdot \gamma_L \cdot \Delta\theta$$

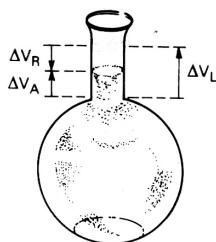


Se, depois disso, recipiente se dilatasse aumentando sua capacidade em um ΔV_R tal que:

$$\Delta V_R = V_0 \cdot \gamma_R \cdot \Delta\theta,$$



o nível do gargalo desceria em uma quantidade correspondente. Como o gargalo é muito fino, podemos desprezar a dilatação por ele sofrida e, assim, consideramos a dilatação aparente ΔV_A do líquido como sendo $\Delta V_A = \Delta V_L - \Delta V_R$.



Supondo $\Delta V_A = V_0 \cdot \gamma_A \cdot \Delta\theta$ onde γ_A é coeficiente de dilatação aparente do líquido, podemos escrever.

$$V_0 \cdot \gamma_A \cdot \Delta\theta = V_0 \cdot \gamma_L \cdot \Delta\theta - V_0 \cdot \gamma_R \cdot \Delta\theta, \text{ logo:}$$

$$\boxed{\gamma_A = \gamma_L - \gamma_R}$$

Esta última expressão permite determinar o coeficiente real de dilatação de um líquido em função do coeficiente o recipiente (suposto conhecido) e do coeficiente aparente, fruto da medida direta.

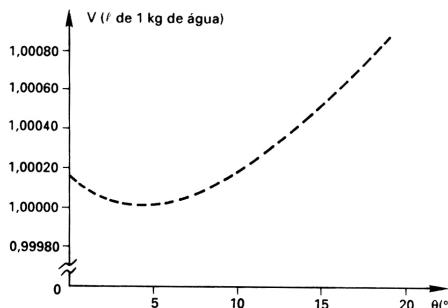
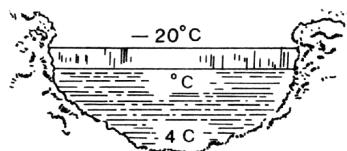
Comportamento anômalo da água

De um modo geral os líquidos se dilatam ao aumentar a temperatura, porém entre outros, a água constitui uma exceção. A água sofre contração de volume quando sua temperatura aumenta no intervalo de 0°C a 4°C e se dilata quando a temperatura aumenta a partir de 4°C . Portanto, a 4°C a água apresenta massa específica máxima, cujo valor é $p = 1\text{g/cm}^3$.

Você nota no gráfico que a massa específica diminui a medida que a temperatura diminui, a partir de 4°C , e conclui que por isso o gelo é menos denso que a água e, consequentemente, flutua nesta.

Devido a essa propriedade, nas regiões de clima temperado e de clima frio, no inverno congela apenas a superfície dos lagos, rios e mares, formando-se uma capa protetora e isolante que conserva praticamente invariável a temperatura a grandes profundidades.

Isto permite a existência da flora e da fauna aquática durante todo o ano. Por exemplo, no lago Superior (entre os Estados Unidos e o Canadá) a temperatura, a 80 m de profundidade, é permanentemente igual a 4°C.



Dilatação dos Gases

Em gases ideais, como veremos no capítulo referente à Termodinâmica, suas partículas só trocam forças por ocasião das colisões. Desta forma, desprezamos qualquer interação de campo entre elas.

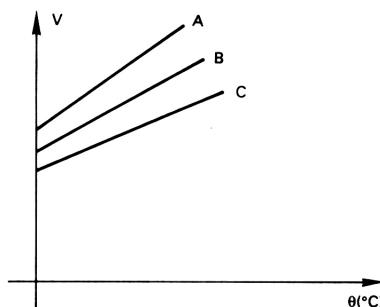
Podemos verificar que a distância média entre as partículas é função exclusivamente da temperatura, não dependendo da natureza da substância que compõe o gás.

Esses dois fatos nos levam à seguinte conclusão: se tomarmos vários gases, cujos comportamentos se aproximem do modelo de gás ideal, com mesmos volumes iniciais e submetendo-os às mesmas variações de temperatura, verificaremos que estes atingirão o mesmo volume final.

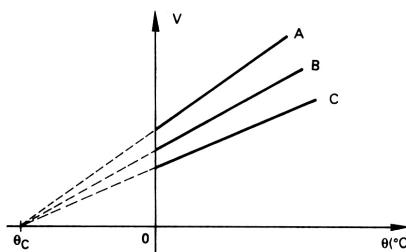
Essa conclusão é verificada experimentalmente, pois todos os gases de comportamento próximo ao de um gás ideal têm coeficientes de dilatação volumétrica em torno de um mesmo valor:

$$\gamma = 3,66 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \approx \frac{1}{273 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Quando estudamos diversos gases, supostos ideais, com diferentes volumes iniciais, seus volumes em função da temperatura se comportam como o gráfico a seguir.



Extrapolando os gráficos dos gases ideais A, B e C para a região das temperaturas negativa (em °C), podemos perceber que todos eles convergem para um único ponto.



No ponto de convergência, verificamos que o volume do gás seria nulo. A eliminação dos espaços vazios entre as partículas do gás determinaria a cessação total de qualquer agitação térmica. De fato, se calcularmos a temperatura de convergência θ_c :

$$V = V_0 [1 + \gamma(\theta_c - 0)]$$

Temos:

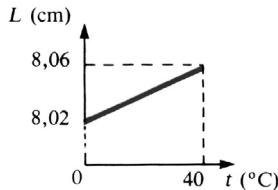
$$0 = V_0[1 + \gamma(\theta_c - 0)]$$

$$\gamma \cdot \theta_c = -1 \therefore \theta_c = \frac{1}{3,66 \cdot 10^{-3}} = -273^{\circ}C$$

Esta temperatura corresponde ao zero absoluto (zero Kelvin), na qual toda agitação térmica, segundo o modelo clássico que utilizamos, deve desaparecer.

Exercícios Resolvidos

1. O gráfico mostra como varia o comprimento de uma barra metálica em função da temperatura.
- Determine o coeficiente de dilatação linear médio do metal, no intervalo de temperatura considerado.
 - Considerando que o gráfico continue com as mesmas características para $t > 40^\circ\text{C}$, determine o comprimento da barra a 70°C .



Solução:

- A) Do gráfico, obtemos os valores:

$$L_o = 8,02 \text{ cm}; \Delta L = L - L_o = 8,06 \text{ m} - 8,02 \text{ m} = 0,04 \text{ m};$$

$$\Delta t = 40^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C} = 40^\circ\text{C}$$

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

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_o \Delta t}$$

Substituindo os valores:

$$\alpha = \frac{0,04}{8,02 \cdot 40};$$

$$\alpha \cong 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ } C^{-1}$$

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

$$\Delta t = t - t_o = 70^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C} = 70^\circ\text{C}$$

O comprimento final da barra será dado por:

$$L = L_o(1 + \alpha \Delta t)$$

$$L = 8,02(1 + 1,25 \cdot 10^{-4} \cdot 70)$$

$$L = 8,09 \text{ cm}$$

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

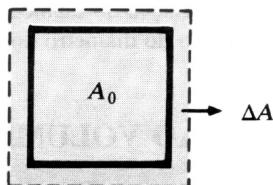
Solução

Pela Lei da Dilatação Superficial $\Delta A_o = \beta A_o \Delta t$, onde são dados:

$$A_o = 1\text{m}^2 = 10^4 \text{cm}^2; \Delta A = 0,8 \text{ cm}^2;$$

$\Delta t = 50^\circ\text{C} - 0^\circ = 50^\circ\text{C}$, resulta:

$$\Delta A_o = \beta A_o \Delta t \quad \beta = \frac{\Delta A}{A_o \Delta t}$$



$$\beta = \frac{0,8}{10^4 \cdot 50}$$

$$\beta = 16 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\text{Como } \beta = 2\alpha, \alpha = \frac{\beta}{2};$$

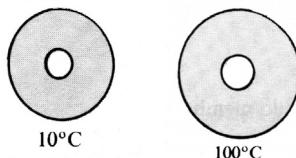
$$\alpha = 8 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

3. Um disco de ebonite tem orifício central de diâmetro 1 cm. Determine o aumento da área do orifício quando a temperatura do disco varia de 10°C para 100°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:



$$A_o = \pi R_o^2 \text{ sendo } d_o = 1 \text{ cm, vem:}$$

$$A_o = \pi \cdot 0,25 \text{ cm}^2$$

A variação de temperatura é:

$$\Delta t = 100^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C} = 90^\circ\text{C}$$

e o coeficiente de dilatação superficial

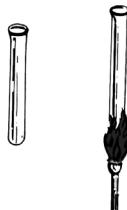
$$\beta = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ C}^{-1}.$$

Pela Lei da Dilatação Superficial:

$$\Delta A = \beta A_o \Delta t; \quad \Delta A = 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 90$$

$$\boxed{\Delta A = 36\pi \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2}$$

4. Um tubo de ensaio apresenta a 0°C um volume interno (limitado pelas paredes) de 20 cm^3 . Determine o volume interno desse tubo a 50°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.

No caso, sendo dados o volume inicial

$$V_o = 20 \text{ cm}^3$$

a variação de temperatura

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

e o coeficiente de dilatação cúbica

$$\gamma = 25 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1},$$

aplicando a Lei da Dilatação Volumétrica, obtemos:

$$\Delta V = \gamma V_o \Delta t$$

$$\Delta V = 25 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 50$$

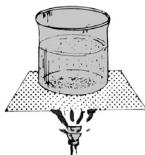
$$\boxed{\Delta V = 0,025 \text{ cm}^3}$$

5. Um recipiente de vidro tem a 0°C volume interno de 30 cm^3 . Calcule o volume de mercúrio a ser colocado no recipiente, a fim de que o volume da parte vazia não se altere ao variar a temperatura.

Dados:

$$\text{coeficiente de dilatação cúbica do vidro} = 24 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1};$$

$$\text{coeficiente de dilatação do mercúrio} = 180 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1};$$



Solução:

O volume da parte vazia é dado pela diferença entre os volumes do frasco (V_F) e do líquido (V). Para que permaneça constante com a variação de temperatura, é necessário que o líquido e o frasco sofram dilatações iguais:

$$\Delta V = \Delta V_F$$

$$\text{Pelas leis da dilatação} \begin{cases} \Delta V = \gamma V \Delta t \\ \Delta V_F = \gamma_F V_F \Delta t \end{cases}$$

Portanto:

$$\gamma V \Delta t = \gamma_F V_F \Delta t$$

$$\gamma V \Delta t = \gamma_F V_F \Delta t$$

$$\gamma V = \gamma_F V_F$$

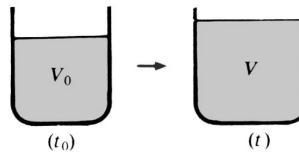
$$V = \gamma_F V_F$$

$$V = \frac{\gamma_F V_F}{\gamma}$$

$$V = \frac{24 \cdot 10^{-6} \cdot 30}{180 \cdot 10^{-6}}$$

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

6. Um líquido cujo coeficiente de dilatação térmica é γ tem densidade d_o na temperatura t_o . Ao ser aquecido até uma temperatura t , sua densidade se altera para d . Relacione a densidade final d com a variação de temperatura ocorrida Δt , com a densidade inicial d_o e com o coeficiente de dilatação térmica γ .

**Solução:**

Seja m a massa de certa porção de líquido que ocupa o volume V_o na temperatura t . Sendo γ o coeficiente de dilatação térmica do líquido, temos:

$$V = V_o(1 + \gamma\Delta t)$$

As densidades do líquido nas temperaturas referidas são dadas por:

$$D_o = \frac{m}{V_o} \text{ (l)} \text{ e } d = \frac{m}{V} \text{ (l)}$$

Substituindo V em (II): $d = \frac{m}{V_o(1 + \gamma\Delta t)}$

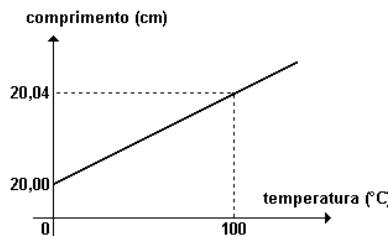
Comparando com (I):

Resposta:

$$d = \frac{d_o}{1 + \gamma\Delta t}$$

Exercícios propostos

01. (Mackenzie 1999) Se uma haste de prata varia seu comprimento de acordo com o gráfico dado, o coeficiente de dilatação linear desse material vale:



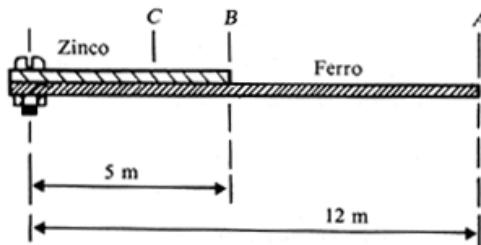
- a) $4,0 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
- b) $3,0 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
- c) $2,0 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
- d) $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
- e) $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

- 02. (Vunesp 1989)** O coeficiente de dilatação linear médio de um certo material é $\alpha = 5,0 \cdot 10^{-5} (\text{ }^{\circ}\text{C})^{-1}$ e a sua massa específica a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ é ρ_0 .

Calcule de quantos por cento varia (cresce ou decresce) a massa específica desse material quando um bloco é levado de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- 03. (UECE 1999)** Uma linha férrea tem trilhos cujo coeficiente de dilatação linear é α . Os trilhos são assentados com o comprimento L_0 à temperatura t_0 . Na região, a temperatura ambiente pode atingir o máximo valor t . Ao assentarem os trilhos, a mínima distância entre as extremidades de dois trilhos consecutivos deverá ser:
- $L_0\alpha t$
 - $2L_0\alpha(t - t_0)$
 - $[L_0\alpha(t - t_0)]/2$
 - $L_0\alpha(t - t_0)$

- 04. (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:

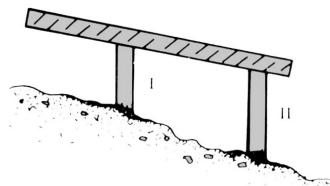


- A) a variação da distância entre as extremidades A e B quando as barras são aquecidas até 400 K ;
 - B) a distância até o ponto A, de um ponto C da barra de zinco cuja distância ao ponto A não varia com a temperatura.
- 05. (Mackenzie-SP)** O coeficiente de dilatação linear médio do ferro é igual a $0,0000117\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. De quanto deve aumentar a temperatura de um bloco de ferro para que seu volume aumente a 1%?

06. (ITA) O vidro pirex apresenta maior resistência ao choque térmico do que o vidro comum, porque:

- a) possui alto coeficiente de rigidez.
- b) tem baixo coeficiente de dilatação térmica.
- c) tem alto coeficiente de dilatação térmica.
- d) tem alto calor específico.
- e) é mais maleável que o vidro comum.

07. (Cesgranrio 1992) Uma rampa para saltos de asa-delta é construída de acordo com o esquema ao lado. A pilastra de sustentação (II) tem, a 0°C , comprimento três vezes maior do que a (I). Os coeficientes de dilatação de (I) e (II) são, respectivamente, α_1 e α_2 . Para que a rampa mantenha a mesma inclinação a qualquer temperatura, é necessário que a relação entre α_1 e α_2 seja:



- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| a) $\alpha_1 = \alpha_2$ | b) $\alpha_1 = 2\alpha_2$ |
| c) $\alpha_1 = 3\alpha_2$ | d) $\alpha_2 = 3\alpha_1$ |
| e) $\alpha_2 = 2\alpha_1$ | |

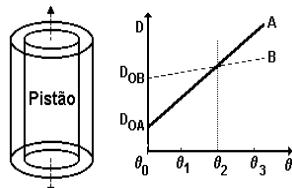
08. (ITA) Um eixo de alumínio ficou “engripado” dentro de uma bucha (anel) de aço muito justo. Sabendo-se os coeficientes de dilatação linear do aço, $\alpha_{\text{aço}} \cong 11 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e do alumínio $\alpha_{Al} \cong 23 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, e lembrando que estes dois metais têm condutividade térmica relativamente grande, o procedimento mais indicado para solta a bucha será o de:

- a) procurar aquecer só a bucha
- b) aquecer simultaneamente o conjunto eixo-bucha
- c) procurar aquecer só o eixo
- d) resfriar simultaneamente o conjunto
- e) procurar resfriar só o eixo

09. (UFF) A relação entre o coeficiente de dilatação real de um líquido (γ), o seu coeficiente de dilatação aparente (a) e o coeficiente de dilatação volumétrica K é dada por:

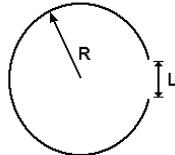
- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| a) $a = \frac{\gamma K}{\gamma + K}$ | b) $a = \gamma + K$ |
| c) $K = a + \gamma$ | d) $\gamma = \frac{a + K}{aK}$ |
| e) $\gamma = a + K$ | |

- 10. (Fatec 1998)** Deseja-se construir dois cilindros metálicos concêntricos, que devem trabalhar como um guia e um pistão, conforme mostra a figura. O conjunto deve trabalhar a uma temperatura pré-determinada. Dispõe-se dos materiais A e B, cujos comportamentos térmicos são mostrados no gráfico a seguir, onde, no eixo vertical, estão os diâmetros dos cilindros D e no eixo horizontal está a temperatura θ . Os diâmetros dos cilindros, à temperatura inicial θ_0 são conhecidos.



Analizando o gráfico do comportamento térmico, devemos dizer que

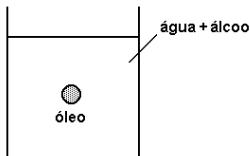
- a) é possível construir o pistão do material A e o cilindro-guia do material B, independentemente da temperatura de trabalho.
 - b) à temperatura θ_1 o cilindro-guia deverá ser feito do material A, e o pistão, do material B.
 - c) à temperatura θ_2 o conjunto funciona perfeitamente, com o pistão deslizando suavemente pelo cilindro-guia.
 - d) para temperaturas iguais a θ_3 , o pistão deverá ser feito do material B.
 - e) não existe temperatura na qual o conjunto funcione perfeitamente.
- 11. (UFV 1999)** A figura a seguir ilustra um arame rígido de aço, cujas extremidades estão distanciadas de "L".



Alterando-se sua temperatura, de 293K para 100°C, pode-se afirmar que a distância "L":

- a) diminui, pois o arame aumenta de comprimento, fazendo com que suas extremidades fiquem mais próximas.
- b) diminui, pois o arame contrai com a diminuição da temperatura.
- c) aumenta, pois o arame diminui de comprimento, fazendo com que suas extremidades fiquem mais afastadas.
- d) não varia, pois a dilatação linear do arame é compensada pelo aumento do raio " R ".
- e) aumenta, pois a área do círculo de raio " R " aumenta com a temperatura.

- 12. (Cesgranrio 1998)** Misturando-se convenientemente água e álcool, é possível fazer com que uma gota de óleo fique imersa, em repouso, no interior dessa mistura, como exemplifica o desenho a seguir. Os coeficientes de dilatação térmica da mistura e do óleo valem, respectivamente, $2,0 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ e $5,0 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$



Esfriando-se o conjunto e supondo-se que o álcool não evapore, o volume da gota:

- a) diminuirá e ela tenderá a descer.
- b) diminuirá e ela tenderá a subir.
- c) diminuirá e ela permanecerá em repouso.
- d) aumentará e ela tenderá a subir.
- e) aumentará e ela tenderá a descer.

- 13. (Mackenzie 1996)** Ao ser submetida a um aquecimento uniforme, uma haste metálica que se encontrava inicialmente a 0°C sofre uma dilatação linear de 0,1% em relação ao seu comprimento inicial. Se considerássemos o aquecimento de um bloco constituído do mesmo material da haste, ao sofrer a mesma variação de temperatura a partir de 0°C , a dilatação volumétrica do bloco em relação ao seu volume inicial seria de:

- | | |
|----------|-----------|
| a) 0,33% | b) 0,3% |
| c) 0,1% | d) 0,033% |
| e) 0,01% | |

- 14. (Mackenzie 1996)** Ao ser submetida a um aquecimento uniforme, uma haste metálica que se encontrava inicialmente a 0°C sofre uma dilatação linear de 0,1% em relação ao seu comprimento inicial. Se considerássemos o aquecimento de um bloco constituído do mesmo material da haste, ao sofrer a mesma variação de temperatura a partir de 0°C , a dilatação volumétrica do bloco em relação ao seu volume inicial seria de:

- | | |
|----------|-----------|
| a) 0,33% | b) 0,3% |
| c) 0,1% | d) 0,033% |
| e) 0,01% | |

- 15. (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 $15 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}^{-1}$ e $20 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}^{-1}$, determine os comprimentos das barras a 0°C .

16. (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°C . Determine a área da coroa circular vazia quando o conjunto estiver a 100°C . Os coeficientes de dilatação linear do ferro e do cobre valem respectivamente $10 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e $16 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.
17. (U. Mackenzie-SP) O coeficiente de dilatação linear 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%?
18. Dois blocos metálicos A e B têm a 0°C volumes iguais a $250,75 \text{ cm}^3$ e 250 cm^3 , respectivamente. Determine a temperatura em que os blocos têm volumes iguais. Os coeficientes de dilatação linear médios valem, respectivamente, $2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e $3 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.
19. (FEI-SP) Um recipiente de vidro tem capacidade $C_0 = 91,000 \text{ cm}^3$ a 0°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 = $182 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.)
20. O coeficiente de dilatação linear médio de um fio metálico é definido por $\alpha = \frac{L - L_0}{L_0 \Delta t}$, onde Δt é a variação de temperatura necessária para que o fio passe do comprimento L_0 ao comprimento L . Examine as proposições:
- O coeficiente de dilatação é o mesmo se o comprimento for medido em centímetros ou em polegadas.
 - O coeficiente de dilatação é o mesmo se a temperatura for medida em graus Celsius ou Fahrenheit.
 - O coeficiente acima pode variar em função do intervalo Δt preestabelecido.

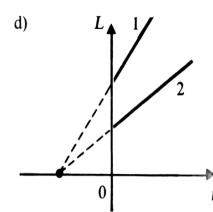
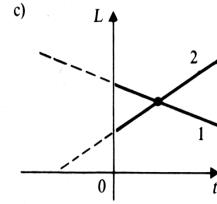
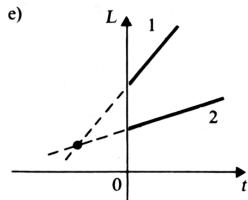
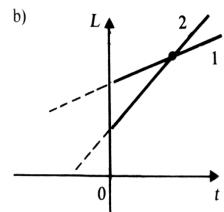
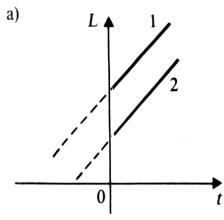
Responda de acordo com o código abaixo:

- todas as proposições são corretas.
- todas as proposições são incorretas.
- (1) e (3) são corretas, mas (2) não.
- só a (1) é correta.
- só a (3) é correta.

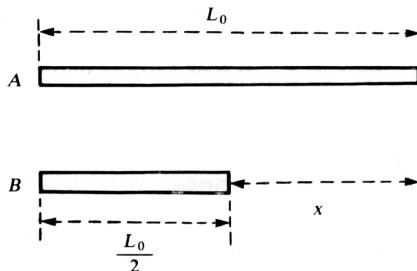
21. (Fatec-SP) Ensaia-se uma barra metálica reta e livre, medindo-se seu comprimento L à temperatura t . Obtiveram-se os resultados tabelados, supostos corretos.

t	0	40	80	°C
L	400,0	400,4	401,2	mm

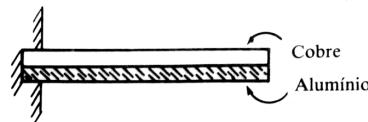
- a) A dilatação térmica da barra é regular.
 b) a $t = 120^\circ\text{C}$, certamente $L = 402,4 \text{ mm}$.
 c) O coeficiente de dilatação térmica linear da barra é $\alpha = 37,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ em qualquer intervalo de temperaturas.
 d) Entre 0°C e 40°C o coeficiente de dilatação térmica médio da barra é $\alpha = 25 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.
 e) Nenhuma das anteriores.
22. (FEI-SP) Duas barras metálicas de mesmo coeficiente de dilatação têm comprimentos diferentes a 0°C . Dentre os gráficos abaixo, qual o que melhor representa a variação dos comprimentos das barras em função da temperatura t ?



- 23. (Unip-SP)** Considere duas barras homogêneas A e B cujos comprimentos a uma mesma temperatura t_0 são respectivamente iguais a L_0 e $\frac{L_0}{2}$. O coeficiente de dilatação linear da barra B é duas vezes maior que o da barra A ($\alpha_B = 2\alpha_A$). As barras são aquecidas a uma mesma temperatura t . A diferença x entre os comprimentos das barras A e B:



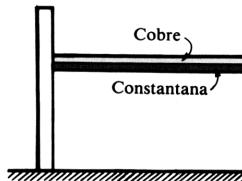
- a) permanece constante e igual a $\frac{L_0}{2}$.
 - b) aumenta quando a temperatura aumenta.
 - c) diminui quando a temperatura aumenta.
 - d) torna-se igual a L_0 quando $t = 2t_0$.
 - e) pode aumentar ou diminuir quando a temperatura aumenta.
- 24. (Vunesp)** A lâmina bimetálica da figura abaixo é feita de cobre ($\alpha = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) e de alumínio ($\alpha = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). Uma das partes não pode deslizar sobre a outra e o sistema está engastado numa parede.



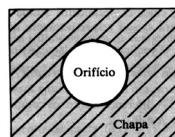
Se na temperatura ambiente (27°C) ela é horizontal, a afirmativa correta sobre o comportamento da lâmina (α é o coeficiente de dilatação linear) é:

- a) Sempre se curva para baixo quando muda a temperatura.
- b) Sempre se curva para cima quando muda a temperatura.
- c) Se curva para baixo se $t < 27^{\circ}\text{C}$ e para cima se $t > 27^{\circ}\text{C}$.
- d) Se curva para cima se $t < 27^{\circ}\text{C}$ e para baixo se $t > 27^{\circ}\text{C}$.
- e) Somente se curva se $t < 27^{\circ}\text{C}$.

- 25. (F. M Pouso Alegre-MG)** Uma lâmina bimetálica é feita soldando-se uma lâmina de cobre de coeficiente de dilatação linear $\alpha_1 = 17 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e uma lâmina de constantana cujo coeficiente de dilatação linear é $\alpha_2 = 25 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Na temperatura ambiente (25°C), a lâmina está reta e é colocada na horizontal, como mostra a figura. Podemos afirmar:



- a) a 60°C a lâmina se curvará para cima.
 - b) a 60°C a lâmina se curvará para baixo.
 - c) 60°C a lâmina se permanecerá reta.
 - d) Ela se curvará para cima a qualquer temperatura.
 - e) Ela se curvará para baixo a qualquer temperatura.
- 26. (Unip-SP)** Considere uma chapa metálica, de material homogêneo, com a forma de um quadrado e tendo um orifício circular. Se a chapa for aquecida de modo uniforme e o seu lado aumentar de 1%, então a área do orifício:



- a) aumentará de 1%
 - b) diminuirá de 1%
 - c) aumentará de 2%
 - d) diminuirá de 2%
 - e) permanecerá a mesma.
- 27. (UFMG)** O coeficiente de dilatação linear do latão é aproximadamente 1,6 vezes o coeficiente de dilatação linear do aço. Para encaixar-se um pino de latão em um orifício numa chapa de aço, cujo diâmetro é ligeiramente menor do que o diâmetro do pino, deve-se:
- a) aquecer o pino de latão e resfriar a chapa de aço.
 - b) aquecer a chapa de aço e resfriar o pino de latão.
 - c) aquecer igualmente a chapa e o pino.
 - d) manter a temperatura da chapa e aquecer o pino.
 - e) resfriar a chapa e manter a temperatura do pino.

- 28. (PUC-RS)** Quando um frasco completamente cheio de líquido é aquecido, ele transborda um pouco. O volume do líquido transbordado mede:
- a dilatação absoluta do líquido.
 - a dilatação absoluta do frasco.
 - a dilatação aparente do frasco.
 - a dilatação aparente do líquido.
 - a dilatação do frasco mais a do líquido.
- 29. (F.Carlos Chagas-SP)** Um frasco, cuja capacidade a zero grau Celsius é 2.000 cm^3 , está cheio até a boca com determinado líquido. O conjunto foi aquecido de 0°C a 100°C , transbordando 14 cm^3 . O coeficiente de dilatação aparente desse líquido, em relação ao material do frasco, é igual a:
- $7,0 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
 - $7,0 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
 - $7,0 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
 - $7,0 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
 - $7,0 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- 30. (UFPA)** Um recipiente, de coeficiente de dilatação real c , encontra-se cheio de um líquido cujos coeficientes de dilatação real e aparente são respectivamente b e a . Para pequenas variações de temperatura ΔT , pode-se deduzir que:
- $b = a + c$
 - $b = a - c$
 - $b = a + c + \frac{a}{c} \Delta T$
 - $b = a - c + ac \Delta T$
 - $b = a + c + \frac{c}{a} \Delta T$
- 31. (UFRN)** Suponha um recipiente com capacidade de 1,0 litro cheio com um líquido que tem o coeficiente de dilatação volumétrica **duas vezes maior** que o coeficiente do material do recipiente. Qual a quantidade de líquido que transbordará quando o conjunto sofrer uma variação de temperatura de 30°C ?
- $0,01 \text{ cm}^3$
 - $0,09 \text{ cm}^3$
 - $0,30 \text{ cm}^3$
 - $0,60 \text{ cm}^3$
 - $1,00 \text{ cm}^3$
- Dado: coeficiente de dilatação volumétrica do líquido = $2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- 32. (ITA 1995)** Você é convidado a projetar uma ponte metálica, cujo comprimento será de 2,0 Km. Considerando os efeitos de contração e expansão térmica para temperaturas no intervalo de $-40 \text{ }^\circ\text{F}$ a $110 \text{ }^\circ\text{F}$ e o coeficiente de dilatação linear do metal que é de $12 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, qual a máxima variação esperada no comprimento da ponte? (O coeficiente de dilatação linear é constante no intervalo de temperatura considerado)
- 9,3 m
 - 2,0 m
 - 3,0 m
 - 0,93 m
 - 6,5 m

- 33. (ITA 1990)** 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 m de comprimento, um engenheiro construiu uma ferrovia deixando um espaço de 0,50 cm entre os trilhos, quando a temperatura era de 28°C . Num dia de sol forte os trilhos soltaram-se dos dormentes. Qual dos valores a seguir corresponde à mínima temperatura que deve ter sido atingida pelos trilhos?
- a) 100°C b) 60°C
 c) 80°C d) 50°C
 e) 90°C
- 34. (ITA 1983)** Um estudante realizou duas séries de medidas independentes, a 20°C , do comprimento de uma mesa, com uma trena milimetrada. O resultado da primeira série de medidas foi 1,982 m e o da segunda foi de 1,984 m. Analisando os resultados, constatou que na primeira série de medidas cometera o mesmo erro na técnica de leitura da escala da trena, isto é, cada medida fora registrada com 2 mm a menos. Além disto, verificou que a trena, cujo coeficiente de dilatação linear era $0,005/\text{ }^{\circ}\text{C}$, havia sido calibrada a 25°C . Nestas condições, o valor que melhor representaria o comprimento da mesa seria, em metros:
- a) 1,981 b) 1,98
 c) 1,979 d) 1,977
 e) 1,975
- 35. (ITA 1980)** Uma placa metálica tem um orifício circular de 50,0 mm de diâmetro a 15°C . A que temperatura deve ser aquecida a placa para que se possa ajustar no orifício um cilindro de 50,3 mm de diâmetro? O coeficiente de dilatação linear do metal é $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5}$ por Kelvin.
- a) $\theta = 520 \text{ K}$ b) $\theta = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 c) $\theta = 300 \text{ K}$ d) $\theta = 520 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 e) $\theta = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- 36. (ITA 1994)** Um bulbo de vidro cujo coeficiente de dilatação linear é $3 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ está ligado a um capilar do mesmo material. À temperatura de $-10,0^{\circ}\text{C}$ a área da secção do capilar é $3,0 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$ e todo o mercúrio cujo coeficiente de dilatação volumétrico é $180 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ocupa o volume total do bulbo, que a esta temperatura é $0,500 \text{ cm}^3$. O comprimento da coluna de mercúrio a $90,0^{\circ}\text{C}$ será:
- a) 270 mm b) 540 mm
 c) 285 mm d) 300 mm
 e) 257 mm

37. (ITA 1995) Se duas barras, uma de alumínio com comprimento L_1 e coeficiente de dilatação térmica $\alpha_1 = 2,30 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ e outra de aço com comprimento $L_2 > L_1$ e coeficiente de dilatação térmica $\alpha_2 = 1,10 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ apresentam uma diferença em seus comprimentos a 0°C , de 1000 mm e esta diferença se mantém constante com a variação da temperatura, podemos concluir que os comprimentos L_1 e L_2 são a 0°C :

- | | |
|----------------------------|---------------------------|
| a) $L_1 = 91,7 \text{ mm}$ | $L_2 = 1091,7 \text{ mm}$ |
| b) $L_1 = 67,6 \text{ mm}$ | $L_2 = 1067,6 \text{ mm}$ |
| c) $L_1 = 917 \text{ mm}$ | $L_2 = 1917 \text{ mm}$ |
| d) $L_1 = 676 \text{ mm}$ | $L_2 = 1676 \text{ mm}$ |
| e) $L_1 = 323 \text{ mm}$ | $L_2 = 1323 \text{ mm}$ |

38. (IME 2002) Duas barras B_1 e B_2 de mesmo comprimento L e de coeficientes de dilatação térmica linear α_1 e α_2 , respectivamente, são dispostos conforme ilustra a figura 1. Submete-se o conjunto a uma diferença de temperatura ΔT e então, nas barras aquecidas, aplica-se uma força constante que faz com que a soma de seus comprimentos volte a ser $2L$. Considerando que o trabalho aplicado sobre o sistema pode ser dado por $W = F\Delta L$, onde ΔL é a variação total de comprimento do conjunto, conforme ilustra a figura 2, e que $\alpha_1 = 1,5\alpha_2$, determine o percentual desse trabalho absorvido pela barra de maior coeficiente de dilatação térmica.

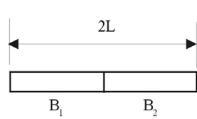


Figura 1

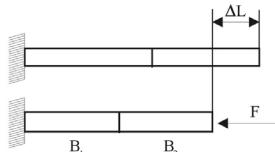


Figura 2

39. (FEI-SP) Um fio de aço de secção transversal $A = 1,0 \text{ mm}^2$, com coeficiente de dilatação linear $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ e módulo de elasticidade $E = 2,2 \cdot 10^7 \text{ N/cm}^2$, sustenta na vertical um corpo de peso P . O fio experimenta uma variação de temperatura $\Delta\theta = -20 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Qual o acréscimo que se deve dar ao peso P de forma que o comprimento do fio não se altere?

40. (ITA 2002) Um pequeno tanque, completamente preenchido em $20,0 \text{ L}$ de gasolina a 0°F , é logo a seguir transferido para uma garagem mantida à temperatura de 70°F . Sendo $\gamma = 0,0012 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ o coeficiente de expansão volumétrica da gasolina, a alternativa que melhor expressa o volume de gasolina que vazará em consequência do seu aquecimento até a temperatura da garagem é

- | | | |
|----------------------|----------------------|---------------------|
| a) $0,507 \text{ L}$ | b) $0,940 \text{ L}$ | c) $1,68 \text{ L}$ |
| d) $5,07 \text{ L}$ | e) $0,17 \text{ L}$ | |

- 41. (Saraeva)** À temperatura t_1 , a altura da coluna de mercúrio, medida em uma escala de latão, é igual a H_1 . Qual é a altura H_o , que terá a coluna de mercúrio para $t = 0^\circ\text{C}$? O coeficiente de dilatação linear do latão é α e o coeficiente de expansão volumétrica do mercúrio é β .
- 42. (Saraeva)** Determinar o comprimento de uma régua de ferro e de uma régua de cobre ℓ'_o e ℓ''_o , a $t = 0^\circ\text{C}$, se a diferença das mesmas para $t_1 = 50^\circ\text{C}$ e $t_2 = 450^\circ\text{C}$ são iguais em módulo e iguais a $\ell = 2\text{cm}$. O coeficiente de dilatação linear do ferro é $\alpha_1 = 12 \cdot 10^{-6} \text{ graus}^{-1}$, do cobre é $\alpha_2 = 17 \cdot 10^{-6} \text{ graus}^{-1}$.
- 43. (Saraeva)** O período das oscilações de um pêndulo depende de comprimento, o qual varia com a temperatura. De que modo poderia ser suspenso o pêndulo, a fim de que seu comprimento não variasse com a temperatura?
- 44. (Saraeva)** À temperatura $t_o = 0^\circ\text{C}$, colocam em um balão de vidro $m_o = 100\text{ g}$ de mercúrio. Para $t_1 = 20^\circ\text{C}$ colocam no balão $m_1 = 99,7\text{ g}$ de mercúrio. (Em ambos os casos considerar a temperatura do mercúrio igual à temperatura do balão.) Encontrar, por meio desses dados, o coeficiente de dilatação linear do vidro α , sabendo que o coeficiente de expansão volumétrica do mercúrio é $\beta_1 = 18 \cdot 10^{-5} \text{ graus}^{-1}$.
- 45. (Saraeva)** Um relógio, com pêndulo metálico, adianta $\tau_1 = 5\text{ s}$ por dia a uma temperatura $t_1 = +15^\circ\text{C}$ e atrasa $\tau_2 = 10\text{ s}$ por dia a uma temperatura $t_2 = 30^\circ\text{C}$. Encontrar o coeficiente α de dilatação térmica do metal do pêndulo, considerando, que o período de oscilação do pêndulo é $T = 2\pi\sqrt{\ell/g}$
- 46. (Saraeva)** Em uma roda de madeira de diâmetro 100cm , é necessário adaptar um anel de ferro, cujo diâmetro é de 5 mm menor que o diâmetro da roda. Em quantos graus é necessário elevar a temperatura do anel? O coeficiente de dilatação linear do ferro é $\alpha_1 = 12 \cdot 10^{-6} \text{ graus}^{-1}$.
- 47. (Zubov)** A bar measured with a vernier capiler is found to be 180 mm long. The temperature during the measurement is 10°C . What will the measurement error be if the scale of the vernier capiler has been graduated at a temperature of 20°C .
- 48.(Zubov)** The brass scale of a mercury barometer has been checked at 0°C . At 18°C the barometer shows a pressure of 760 mm . Reduce the reading of the barometer to 0°C . The coefficient of linear expansion of brass is $\alpha = 1,9 \cdot 10^{-5}$ and the coefficient of volume expansion of mercury $\beta = 1,8 \cdot 10^{-4}$.

Gabarito

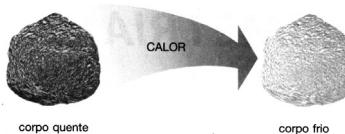
1. c;
2. d;
3. 4,5 %;
4. A) $3 \cdot 10^{-3}$ m; B) 8 m;
5. 285°C;
6. b; 7. c;
8. d; 9. e;
10. d; 11. e;
12. a; 13. b;
14. b; 15. 12 cm; 9 cm
16. $0,12 \text{ cm}^2$ 17. 285°C;
18. 100,6°C 19. 130,8°C
20. c 21. d
22. e 23. a
24. d 25. a
26. c
27. b
28. d
29. b
30. a
31. c
32. b;
33. c;
34. c;
35. d;
36. c;
37. c;
38. $P_1 = 60\%$
39. 52,8 N
40. b;
41. $H_0 = H_1(1 + \alpha \Delta t_1) / (1 + \beta \Delta t_1) \approx H_1(1 + \alpha t_1 - \beta t_1)$
42. $l'_{01} = 6,8 \text{ cm}$, $l''_{01} = 4,8 \text{ cm}$
 $l'_{02} = 2008,5 \text{ cm}$, $l''_{02} = 2006 \text{ cm}$
43. A solução deve possibilitar $\alpha_1(l_1 + l_2) = \alpha_2 l_3$
44. $\beta = 3 \cdot 10^{-5} \text{ graus}^{-1}$
45. $\alpha \approx 30 / (t_2 - t_1) n \approx 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ graus}^{-1}$
46. $\Delta t \approx 420^\circ C$
47. $\approx 0,02 \text{ mm}$
48. $l_0 = l_t \frac{1 + \alpha t}{1 + \beta t} = 757,3 \text{ mmHg}$

3 Calorimetria



Noção calorimétrica de calor

Calor é a energia que é transferida de um corpo para outro, exclusivamente devido à diferença de temperatura existente entre os corpos.



O calor é transferido do corpo quente para o corpo frio

Dizemos que:

- O corpo quente
 - cede calor
 - perde calor
 - libera calor

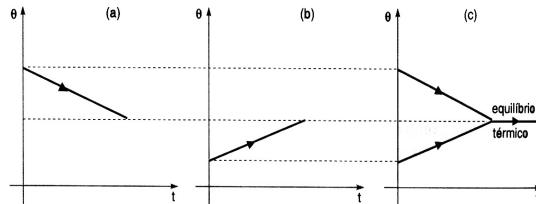
- O corpo frio
 - recebe calor
 - ganha calor
 - absorve calor

Estando os corpos isolados da influência de outros corpos, o calor cedido pelo corpo quente é inteiramente absorvido pelo corpo frio. É o princípio da conservação de energia.

É importante que entendamos que a troca de calor não é “infinita”, pois, decorrido algum tempo, os corpos atingem o equilíbrio térmico, isto é, suas temperaturas se igualam.

De modo geral, quando não houver mudança do estado de agregação das moléculas de nenhum dos corpos envolvidos, ocorrerá o seguinte:

- À medida que o corpo quente for cedendo calor, sua temperatura irá caindo.
- À medida que o corpo frio for recebendo calor, sua temperatura irá aumentando.
- Evidentemente, haverá um instante em que essas temperaturas se igualarão e cessará a troca de calor.



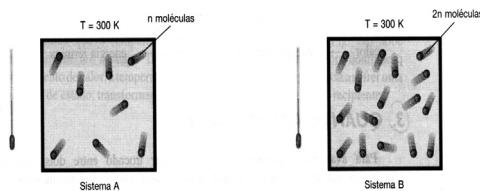
Evolução da temperatura de cada um dos corpos , quente e frio, quando colocados em contato térmico. Por simplicidade, admitimos os gráficos retilíneos.

Temperatura, energia térmica e calor

Ainda que para a Calorimetria essa definição de calor seja suficiente, vamos nos antecipar à Termodinâmica e estudar um pouco a sua natureza.

O calor é uma “energia em trânsito”, isto é, uma energia que está passando de um corpo para outro, ou de um sistema para outro. O motivo é sempre o mesmo: a diferença de temperatura existente entre os dois corpos ou sistemas. É um erro pensarmos que o corpo que cedeu calor possuía mais energia que o outro. Apenas sua temperatura era maior. Para entendermos esse processo vamos definir energia térmica.

A **energia térmica** corresponde à energia cinética de vibração e de translação das moléculas de um sistema. Ela está relacionada diretamente com a temperatura absoluta do sistema e com o número de moléculas que ele possui. Vamos elaborar um exemplo simples: o sistema A possui n moléculas de um gás a uma temperatura absoluta de 300K ; o sistema B possui $2n$ moléculas do mesmo gás à mesma temperatura absoluta de 300K .



Dois sistemas , A e B, com a mesma temperatura absoluta ($T=300K$). O sistema A possui n moléculas e o sistema B possui $2n$ moléculas. Todas as moléculas têm a mesma energia cinética.

Em ambos os sistemas, A e B, as moléculas estão à mesma temperatura absoluta (300K) e, por conseguinte, cada uma delas tem a mesma cinética. No entanto, o sistema B possui mais energia térmica que o sistema A, pois tem o dobro de molécula. Se colocarmos os sistemas A e B em contato térmico, não haverá troca de calor entre ambos, pois as temperaturas são iguais. Logo, a troca de calor não é função da quantidade de energia armazenada, mas da diferença de temperatura entre os corpos.

Por tudo que vimos até aqui, concluímos que:

A troca de calor entre dois sistemas não depende da energia térmica armazenada em cada um deles, mas sim da diferença de temperatura existente entre ambos.

O calor não é a energia térmica contida no corpo, mas sim uma energia em trânsito, devida exclusivamente à diferença de temperatura entre um corpo e outro.

Finalizando, vamos apresentar um exemplo mostrando bem os conceitos de calor e de energia térmica.

Se dois sistemas A e B, cujas temperaturas são respectivamente t_A e t_B , sendo $t_A > t_B$, forem postos em presença no interior de um recipiente termicamente isolado do exterior, a experiência mostra que, decorrido um certo intervalo de tempo, os sistemas apresentarão a mesma temperatura t , sendo $t_A > t > t_B$. Para justificar esse fato experimental admite-se, do ponto de vista calorimétrico, que os sistemas trocam entre si "algo" (que daremos a denominação de calor) pelo simples fato de existir entre eles uma diferença de temperatura. Mais precisamente, o sistema à temperatura mais elevada cede calor ao sistema à temperatura mais baixa, até que eles venham a apresentar a mesma temperatura, quando cessa a passagem de calor de A (sistema inicialmente à temperatura mais elevada) para B (sistema inicialmente à temperatura mais baixa).

O objetivo da Calorimetria

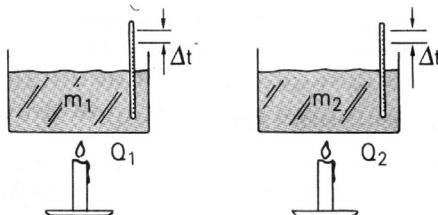
A calorimetria tem por finalidade a análise, do ponto de vista quantitativo, do problema das trocas de calor entre sistemas postos em presença, a diferentes temperaturas, no interior de recipientes termicamente isolados do exterior. Não interessa especificamente para a calorimetria saber se o calor é ou não uma forma de energia.

O conceito de quantidade de calor

Muito antes de ter sido evidenciada a natureza energética do calor, foi desenvolvido no campo experimental o conceito de quantidade de calor, tendo sido desenvolvidos os critérios de igualdade e de multiplicidade para essa grandeza.

Critério de igualdade: Duas quantidades de calor são iguais quando, ao serem trocadas com o exterior por massas iguais de água, à mesma temperatura inicial, acarretam variações iguais de temperatura.

Critério de multiplicidade: Uma quantidade de calor é igual a n vezes outra, quando ambas provocam a mesma variação de temperatura, a partir da mesma temperatura inicial, ao serem trocadas com o exterior por massas de água das quais uma é n vezes maior que a outra.



A unidade do calor

No sistema Internacional de Unidades, a energia é medida em joules (J) e, evidentemente, vale para o calor, que também é uma energia. O joule será definido na Mecânica.

Por razões históricas, no entanto, usamos, até hoje, outra unidade de quantidade de calor, a caloria (cal), que assim se define:

Uma caloria é a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de um grama de água de 14,5°C a 15,5°C, sob pressão normal.

É comum também, o uso de outra unidade de calor, a quilocaloria (kcal⁷), múltiplo da caloria e tal que:

$$1 \text{ kcal} = 1\,000 \text{ cal}$$

Uma quilocaloria é a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de 1 quilograma de água de 14,5°C a 15,5°C, sob pressão normal.

Em termodinâmica vamos tomar conhecimento de uma experiência realizada pelo físico inglês James Prescott Joule, que resultará na relação entre a caloria e a unidade joule (J) do SI. Apenas nos anteciparemos a esse resultado. Escrevendo que:

$$1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$$

$$1 \text{ J} = 0,2388 \text{ cal}$$

Existe ainda outra unidade de calor, não muito usual em exercícios, mas com alguma utilidade prática, chamada *Btu (British thermal unit)*:

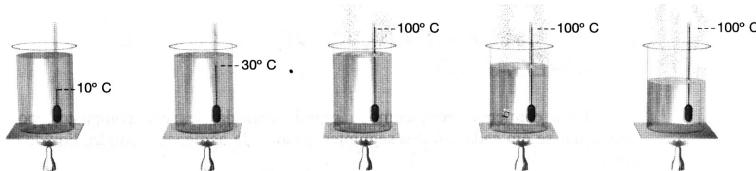
$$1\text{but} = 3,968 \times 10^{-3} \text{ cal} = 9,481 \times 10^{-4} \text{ J}$$

Calor latente

Ao apresentar o conceito de calor, imaginamos que os dois corpos sofram variação de temperatura ao trocar calor. No entanto, há situações em que a temperatura de um dos corpos se mantém constante. É o que acontece quando um deles está mudando seu estado de agregação.

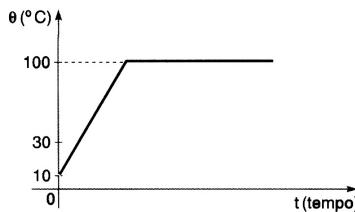
Se aquecermos água sob pressão normal, estando ela inicialmente a 10°C, verificaremos que a temperatura registrada pelo termômetro sobe gradativamente até alcançar 100°C. A partir desse instante, embora continue o fornecimento de calor, a temperatura permanece constante e a água passa a sofrer uma mudança de estado, transformando-se em vapor o líquido contido no recipiente.

⁷ 1 Cal (caloria alimentar) = 1,0 kcal = 1000 cal



Aquecimento da água, sob pressão normal.

Representando graficamente o processo, colocando em ordenadas os valores da temperatura e em abscissas o tempo decorrido, obtemos a curva de aquecimento representada na figura abaixo. A reta paralela ao eixo dos tempos representa a mudança de estado ocorrida (vaporização), sendo usualmente chamada de patamar.



Curva de aquecimento da água sob pressão normal.

Na experiência descrita, verificou-se que, ao receber calor da chama, a temperatura da água subiu. Esse calor que, ao ser trocado por um sistema, produz variação de temperatura costuma ser denominado calor sensível, em vista do fato de sua ação poder ser percebida através da leitura no termômetro. Durante a mudança de estado, embora continuasse a ocorrer troca de calor, a temperatura permaneceu constante, sendo necessário então introduzir o conceito de calor latente.

Define-se **calor latente** de uma mudança de estado a grandeza L que mede numericamente a quantidade de calor que a substância troca por grama durante a mudança de estado. Por exemplo, para a vaporização da água descrita na experiência, o calor latente vale:

$$L_v = 540 \text{ cal/g}$$

Se ocorresse a mudança inversa, isto é, a passagem de água no estado de vapor para água líquida (condensação ou liquefação), a quantidade de calor envolvida no processo teria o mesmo módulo, mas, por convenção, seria negativa, uma vez que teria sido perdida pela substância. Assim, o calor latente de condensação da água vale:

$$L_c = -540 \text{ cal/g}$$

Para uma mesma substância, o valor do calor latente depende da transição que está ocorrendo. Quando o gelo (água no estado sólido) se derrete, convertendo-se em água no estado líquido (fusão), o calor latente é $L_F = 80 \text{ cal/g}$. Para a transformação inversa (solidificação da água ou congelamento), o calor latente é:

$$L_s = -80 \text{ cal/g.}$$

Como o calor latente L é expresso para a unidade de massa, se tivermos que calcular a quantidade de calor Q envolvida na mudança de estado de certa massa m da substância, deveremos usar a fórmula:

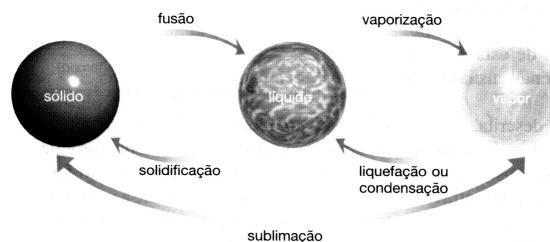
$$Q = mL$$

Leis das mudanças de estado de agregação

Todo elemento, bem como a grande maioria de seus compostos, pode apresentar-se em cada um dos seguintes estados de agregação: sólido, líquido ou gasoso.

Como veremos mais detalhadamente no próximo capítulo, o estado de agregação de cada substância depende da temperatura e da pressão. Neste capítulo, estudaremos a mudança de estado de uma substância mantendo fixa a pressão e alterando sua temperatura com fornecimento ou retirada de calor da substância.

A transição entre um estado de agregação e outro tem a seguinte nomenclatura usual:



Embora não estudemos neste capítulo o mecanismo das mudanças de estado, vamos enunciar mais duas de suas leis fundamentais:

1º lei

Para uma dada pressão, cada substância possui uma temperatura fixa de fusão e outra temperatura fixa de vaporização.

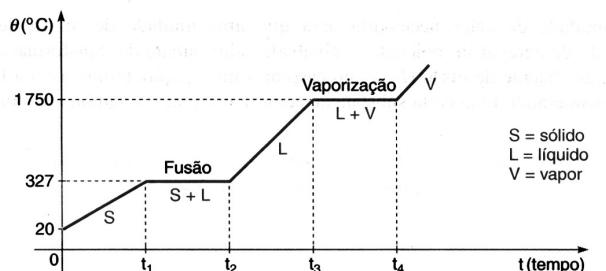
2^a lei

Para uma mesma substância e a uma dada pressão, a temperatura de solidificação coincide com a de fusão, bem com a temperatura de liquefação coincide com a de vaporização.

A tabela abaixo nos fornece, a título de exemplo, a temperatura de fusão (ou de solidificação) e a temperatura de vaporização (ou de liquefação) de algumas substâncias, sob pressão normal (1,0 atm).

Substância	Temperatura de fusão ou de solidificação	Temperatura de vaporização ou de liquefação
água	0°C	100°C
Alumínio	660°C	2330°C
Chumbo	327°C	1750°C
Cobre	1083°C	2582°C
Éter	-116°C	35°C
Zinco	420°C	907°C

Tomemos como exemplo o caso do chumbo: um pedaço dele, sob pressão normal e à temperatura ambiente, está no estado sólido. Se ele for aquecido até a temperatura de 327°C, continuando a receber calor, começará a fundir-se. Enquanto durar a fusão, isto é, enquanto houver um fragmento sólido de chumbo, a temperatura se manterá em 327°C (mantida constante a pressão). Terminada a fusão, estando chumbo líquido a 327°C, continuando a receber calor, sua temperatura subirá até 1750°C, quando se iniciará outra mudança de estado de agregação: a vaporização. Durante ela, sua temperatura se manterá em 1750°C, mantida constante a pressão. Somente quanto termina a vaporização, a temperatura volta a subir.



Curva de aquecimento do chumbo.

Calor sensível - Potência de uma fonte térmica

Seja Q a quantidade de calor que uma fonte térmica fornece a um sistema no intervalo de tempo Δt . Definimos potência média da fonte pela razão:

$$P_m = \frac{Q}{\Delta t}$$

Se em intervalos de tempo iguais a fonte fornecer sempre a mesma quantidade de calor, então a potência será constante.

$$P = P_m \Rightarrow P = \frac{Q}{\Delta t}, \text{ ou ainda}$$

$$Q = P \cdot \Delta t$$

Calor sensível

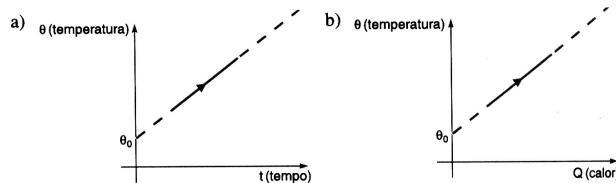
Na figura abaixo, o líquido contido no recipiente está sendo aquecido por uma fonte térmica de potência constante. A quantidade de calor fornecida é proporcional ao intervalo de tempo de aquecimento.



fonte de potência constante aquecendo um líquido

Verificamos que a temperatura cresce com o passar do tempo, isto é, a variação de temperatura é proporcional ao tempo de aquecimento. Consequentemente, a temperatura é também função da quantidade de calor fornecida, isto é, a variação de temperatura é proporcional à quantidade de calor fornecida, como pode ser observado nos gráficos abaixo.

Essa variação da temperatura com o fornecimento do calor ao sistema é o que caracteriza o calor sensível.



A variação do temperatura ($\Delta\theta$) é função do tempo de aquecimento (a) e da quantidade de calor fornecida (b) ao sistema.

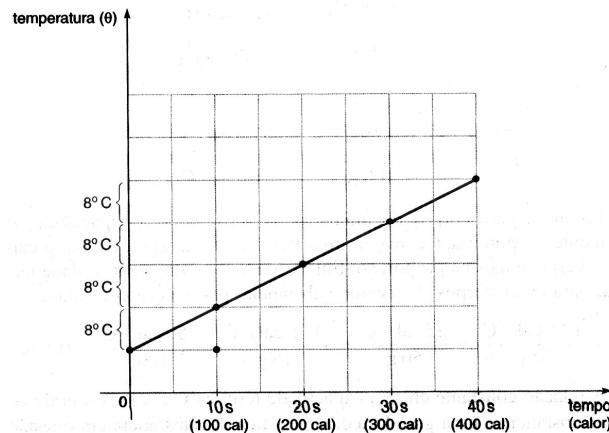
De modo geral, a variação de temperatura $\Delta\theta$ em função da quantidade de calor Q recebida pelo corpo apresenta-se de forma linear, desde que se considere um pequeno intervalo de temperatura.

Capacidade térmica

Vamos idealizar uma experiência usando uma fonte de potência constante e igual a 10 cal/s. Anotemos o tempo de aquecimento, a quantidade de calor fornecida e a variação de temperatura $\Delta\theta$.

Tempo de aquecimento	Quantidade de calor (Q)	Variação de temperatura ($\Delta\theta$)
10 s	100 cal	8°C
20 s	200 cal	16°C
30 s	300 cal	24°C
40 s	400 cal	32°C

A figura a seguir é a representação gráfica dos dados da tabela anterior.



Analisando o comportamento térmico dessa substância, verificamos que há uma relação constante entre a quantidade de calor (Q) recebida e a variação de temperatura ($\Delta\theta$) apresentada. Para cada 100 cal recebidas, a temperatura varia 8°C.

Portanto, essa relação constante entre a quantidade de calor Q e a respectiva variação de temperatura $\Delta\theta$ é uma grandeza característica do corpo em questão, sendo denominada **capacidade térmica**.

$$C = \frac{Q}{\Delta\theta}$$

Unidade de capacidade térmica

Considere novamente a definição da capacidade térmica:

$$C_m = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Para obter a unidade de capacidade térmica, você fará:

$$\Delta Q = 1 \text{ caloria}; \Delta t = 1^\circ\text{C}.$$

Vem então:

$$U(C_m) = \frac{1 \text{ cal}}{1^\circ\text{C}}, \quad U(C_m) = 1 \frac{\text{cal}}{^\circ\text{C}} = 1 \text{ cal} \cdot {}^\circ\text{C}^{-1}$$

Daqui por diante, procederemos desta maneira, toda vez que quisermos definir a unidade correspondente a uma dada grandeza física.

A capacidade térmica depende do intervalo térmico considerado

A quantidade de calor que um sistema troca com o exterior para provocar a mesma variação de temperatura depende da temperatura inicial do intervalo térmico Δt ; por exemplo, a quantidade de calor que um sistema deve trocar com o exterior para que sua temperatura passe de 10°C para 15°C é diferente da quantidade de calor que esse mesmo sistema deve trocar com o exterior para que sua temperatura varie de 30°C para 35°C, embora em ambos os casos o intervalo térmico Δt tenha a mesma amplitude de 5°C. Esse fato experimental evidencia a necessidade de levar em conta a temperatura inicial do intervalo térmico considerado, quando definimos a capacidade térmica. Portanto, a rigor, deveríamos escrever:

$$C = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Você sabe o que está por trás desta expressão? Ela pode ser interpretada da seguinte maneira: nós temos um intervalo térmico Δt , que vai de uma certa temperatura t_0 até uma certa temperatura t_1 ; a capacidade térmica varia quando percorremos este intervalo térmico; então vamos definir a capacidade térmica correspondente à temperatura t_0 como sendo o limite para o qual tende a razão $\Delta Q / \Delta t$, quando a amplitude do intervalo tende a zero.

Na prática, embora a capacidade térmica seja variável com a temperatura, desprezaremos tal variação. Consideraremos constante a capacidade térmica, em primeira aproximação, desde que o intervalo térmico não seja demasiadamente amplo.

Indicando ΔQ apenas por Q vem:

$$C = \frac{Q}{\Delta t}, \text{ daí resultando:}$$

$$Q = C \cdot \Delta t$$

expressão esta aplicável ao cálculo do calor sensível. Geralmente escreve-se

$$Q = C(t_f - t_i)$$

sendo t_f e t_i , respectivamente, a temperatura final e a temperatura inicial do sistema.

Calor específico

Se a experiência descrita no item anterior for repetida com corpos da mesma substância mas com diferentes massas, obter-se-ão os resultados expressos na seguinte tabela:

Massa (m)	Capacidade térmica (C)
25 g	12,5 cal/ $^{\circ}\text{C}$
50 g	25 cal/ $^{\circ}\text{C}$
75 g	37,5 cal/ $^{\circ}\text{C}$
100 g	50 cal/ $^{\circ}\text{C}$

Portanto, para corpos de uma mesma substância, a capacidade térmica é diretamente proporcional à massa, uma vez que, variando a massa, a capacidade térmica varia na mesma proporção. Então, a relação entre a capacidade térmica e a massa, para esses corpos da mesma substância, permanece constante:

$$\frac{C}{m} = \frac{12,5\text{cal}/^{\circ}\text{C}}{25\text{g}} = \frac{25\text{cal}/^{\circ}\text{C}}{50\text{g}} = \frac{37,5\text{cal}/^{\circ}\text{C}}{75\text{g}} = \frac{50\text{cal}/^{\circ}\text{C}}{100\text{g}} = 0,50\text{cal/g }^{\circ}\text{C}$$

A relação constante entre a capacidade térmica C e a massa m de corpos da mesma substância é uma grandeza característica da substância em questão, sendo denominada calor específico:

$$c = \frac{C}{m}$$

No exemplo apresentado, o calor específico da substância vale $c = 0,50 \text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$. Resulta, da definição de calor específico, a sua unidade usual:

$$\frac{\text{cal}}{^{\circ}\text{C}} = \frac{\text{cal}}{\text{g. }^{\circ}\text{C}}, \text{ que se lê "caloria por grama e grau Celsius".}$$

Evidentemente, há outras unidades:

$$\frac{\text{cal}}{\text{g.}^{\circ}\text{F}}, \frac{\text{cal}}{\text{g.K}}, \frac{\text{kcal}}{\text{kg.}^{\circ}\text{C}}, \frac{\text{J}}{\text{kg.K}} \quad (\text{SI})$$

Note que: $1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg.}^{\circ}\text{C}} = 1 \frac{\text{cal}}{\text{g.}^{\circ}\text{C}}$.

Quanto ao significado físico de calor específico, podemos entendê-lo como a medida da quantidade de calor que acarreta, ao ser recebida por um grama da substância, uma variação de 1°C (ou 1 K) em sua temperatura. No exemplo apresentado, cada grama da substância deve receber 0,50 caloria para que sua temperatura se eleve a 1°C .

Observação: Tendo em vista a definição de caloria, o calor específico da água vale: $c = 1,0 \text{ cal/g.}^{\circ}\text{C}$. Rigorosamente, esse valor corresponde ao intervalo entre $14,5^{\circ}\text{C}$ e $15,5^{\circ}\text{C}$, pois o calor específico de qualquer substância depende da temperatura em torno da qual é considerado. No entanto, essa influência da temperatura é pouco acentuada, não sendo usualmente levada em conta.

Cálculo da quantidade de calor sensível

A capacidade térmica do corpo pode ser escrita, conforme vimos nos itens anteriores, de dois modos:

$$1^{\circ}) \text{ da sua definição: } C = \frac{Q}{\Delta\theta} \Rightarrow Q = C \cdot \Delta\theta \quad (1)$$

$$2^{\circ}) \text{ da definição de calor específico: } c = \frac{C}{m} \Rightarrow C = m \cdot c \quad (2)$$

Substituindo (1) em (2):

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta$$

Essa equação nos dá a quantidade de calor trocada por um corpo quando não houver mudança do estado de agregação.

Observações:

1º) Sendo θ_0 e θ_f as temperaturas inicial e final de um corpo, então a variação de sua temperatura será sempre:

$$\Delta\theta = \theta_f - \theta_0$$

2º) Havendo aquecimento do corpo, resultará:
 $\theta_f > \theta_0 \Rightarrow \Delta\theta > 0$

Havendo resfriamento:

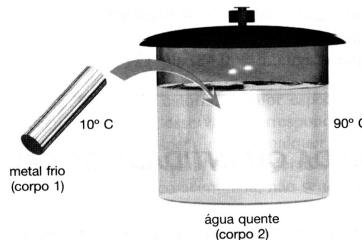
$$\theta_f < \theta_0 \Rightarrow \Delta\theta < 0$$

3º) Como a massa e o calor específico são grandezas positivas, o sinal da quantidade de calor (Q) depende do sinal da variação de temperatura ($\Delta\theta$).

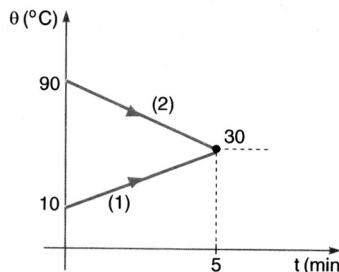
• aquecimento $\Delta\theta > 0$	\Rightarrow	calor recebido pelo corpo $Q > 0$
• resfriamento $\Delta\theta < 0$	\Rightarrow	calor cedido pelo corpo $Q < 0$

Exemplo:

Consideremos um pedaço de metal frio (10°C) e uma porção de água quente (90°C) no interior de um recipiente ideal (capacidade térmica nula, isto é, que não troca calor com os demais elementos do sistema). Vamos colocar o metal na água e aguardar o equilíbrio térmico. Suponhamos que ele ocorra após 5 minutos e que a temperatura final seja 30°C .



Graficamente temos:



As variações de temperatura são:

$$\text{Corpo 1: } \Delta\theta_1 = 30 - 10 = +20^\circ\text{C}$$

$$\text{Corpo 2: } \Delta\theta_2 = 30 - 90 = -60^\circ\text{C}$$

O corpo (1) se aqueceu e $\Delta\theta_1 > 0$.

O corpo (2) se resfriou e $\Delta\theta_2 < 0$.

-As equações são:

$$\text{metal} \rightarrow Q_1 = m_1 \cdot c_1 \cdot \Delta\theta_1 > 0$$

$$\text{água} \rightarrow Q_2 = m_2 \cdot c_2 \cdot \Delta\theta_2 < 0$$

Regra de Dulong e Petit

Essa lei tem caráter empírico e o seu enunciado é o seguinte:

Para os elementos sólidos, o produto da massa atômica do elemento pelo seu calor específico é sensivelmente constante, valendo $6,4 \text{ cal}/(\text{mol}\cdot^\circ\text{C})$.

O produto da massa atômica pelo seu calor específico recebe o nome de calor atômico do elemento. Simbolicamente, escrevemos:

$$C_{\text{atômico}} = 6,4 \text{ cal}/(\text{mol}\cdot^\circ\text{C}) = A.c$$

sendo que A indica a massa atômica do elemento e c o seu calor específico. A **grafite** constitui uma exceção à regra de Dulong e Petit, pois seu calor atômico vale $2,6 \text{ cal}/(\text{mol}\cdot^\circ\text{C})$.

Equivalente em água

Considere um corpo de capacidade calorífica C que, ao trocar com o exterior a quantidade de calor Q, apresenta uma variação de temperatura Δt . A partir da definição de capacidade térmica você escreve

$$C = \frac{Q}{\Delta t} \quad (1)$$

Suponha agora que a massa M de água troque com o exterior a mesma quantidade de calor Q, sofrendo a mesma variação de temperatura Δt . O calor sensível é dado pela expressão $Q = Mc\Delta t$.

Mas o calor específico da água vale $1 \frac{\text{cal}}{\text{g}\cdot^\circ\text{C}}$; portanto

$$Q = M\Delta t ; M = \frac{Q}{\Delta t} \quad (2)$$

Comparando as expressões (1) e (2), você conclui que a massa M da água é numericamente igual à capacidade térmica do corpo.

Simbolicamente: $M = \overset{N}{C}$

A massa M recebe o nome de equivalente em água do corpo. O equivalente em água é indicado pela letra E e é expresso em unidades de massa, geralmente em gramas.

Você percebe facilmente que o equivalente em água de um corpo é numericamente igual ao produto da massa do corpo pelo seu calor específico.

$$E = \overset{N}{C} = m.c$$

Calor específico molar ou molecular

Especialmente para os gases define-se calor específico molar ou molecular. Chama-se calor específico molar de um gás o produto do seu calor específico comum pela sua massa molecular. Simbolicamente:

$$C = Mc$$

Por outro lado, retome a expressão utilizada no cálculo da quantidade de calor sensível trocada pelo sistema gasoso:

$$Q = mc \cdot \Delta t \quad (1)$$

Você lembra que o número de moles do gás é: $n = \frac{m}{M}$

$$\text{e, portanto, } m = nM \quad (2)$$

Substituindo (2) em (1) você obtém:

$$Q = n M c \Delta t$$

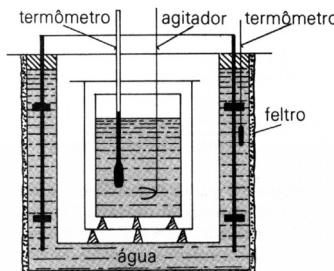
Mas $Mc = C$ e $\Delta t = \Delta T$; portanto:

$$Q = n C \Delta T$$

Calorímetros

Os calorímetros são recipientes onde são colocados os corpos que trocam calor; eles são utilizados para a medição do calor específico dos corpos. Os calorímetros são tanto quanto possível isolados do meio exterior, para evitar trocas de calor entre o meio externo e o calorímetro mais seu conteúdo, por serem essas quantidades de calor difíceis de medir. No entanto, nada impede que seja introduzida ou retirada do interior do calorímetro qualquer quantidade de calor facilmente mensurável.

Existem diversos tipos de calorímetros. O esquema abaixo mostra o calorímetro das misturas, também chamado calorímetro de **Berthelot**.



Na parte de exercícios resolvidos mostraremos como se determina a capacidade térmica de um calorímetro e como se utiliza o calorímetro para determinar o calor específico de um sólido.

Princípios de calorimetria

No decorrer do seu curso, você terá muitas vezes que resolver problemas que envolvem trocas de calor, nos quais você deverá achar o valor de algum dos elementos do processo: temperatura inicial, temperatura final, massa ou calor específico, calores cedidos (Q_c) e calores recebidos (Q_r). Para resolver tais problemas, você deverá aplicar os dois princípios da calorimetria, que apresentamos a seguir:

1) Princípio da igualdade das trocas de calor

No interior de um recinto termicamente isolado do exterior, sistemas a diferentes temperaturas, a soma algébrica das quantidades de calor trocadas pelos sistemas é igual a zero.

Simbolicamente:

$$\sum Q_r - \sum Q_c = 0$$

2) Princípio das transformações inversas

Se um sistema recebe (cede) uma determinada quantidade de calor ao sofrer uma transformação, então cederá (receberá) a mesma quantidade de calor ao sofrer a transformação inversa.

Exercícios Resolvidos

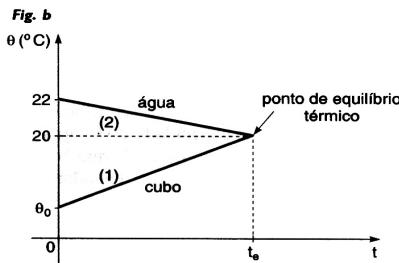
01. Um cubo de alumínio de 25g é colocado num recipiente de capacidade térmica desprezível, contendo 55g de água a 22°C.

A temperatura do sistema passa a ser então 20°C. Sabendo que o calor específico do alumínio é 0,22 cal/g°C e o da água é 1,0 cal/g°C :

- A) esboce num diagrama $\theta \times t$ a evolução da temperatura de ambos até o equilíbrio térmico.
B) determine a temperatura inicial do cubo de alumínio.

Resolução:

As duas figuras ilustram o problema. A primeira figura indica a situação inicial, ao passo que a segunda figura indica a situação final.



- A) Enquanto a temperatura da água abaixou, de 22°C para 20°C , ela cedeu calor ao cubo, que teve sua temperatura elevada de θ_0 para 20°C .
- B) Para obter a temperatura de equilíbrio térmico (θ_0) basta fazermos:

$$Q_{\text{rec.}} + Q_{\text{ced.}} = 0$$

$$Q_1 + Q_2 = 0$$

$$M_1 \cdot c_1 \cdot \Delta\theta_1 + m_2 \cdot c_2 \cdot \Delta\theta_2 = 0$$

$$25 \cdot 0,22 \cdot (20 - \theta_0) + 55 \cdot 1,0 \cdot (20 - 22) = 0$$

$$110 - 5,5 \cdot \theta_0 + 55 \cdot (-2) = 0$$

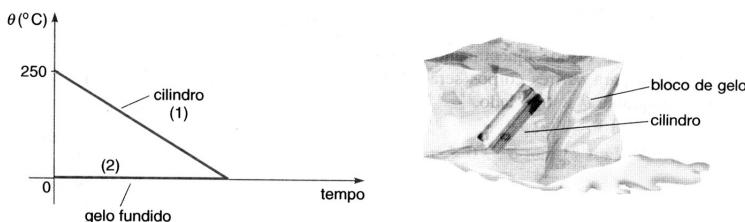
$$110 - 5,5 \cdot \theta_0 - 110 = 0$$

$$-5,5 \cdot \theta_0 = 0$$

$$\boxed{\theta_0 = 0^{\circ}\text{C}}$$

02. Em um grande bloco de gelo a 0°C fez-se uma cavidade e no seu interior alojou-se um cilindro de latão, à temperatura de 250°C . Estando o sistema termicamente isolado do meio ambiente, verificou-se, após algum tempo, que se formaram $2,5\text{ kg}$ de água líquida e que a temperatura do cilindro caíra para 0°C . Sendo o calor específico do latão igual a $0,40\text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$, determine a massa do cilindro.

Dado: calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g .

Resolução:

$$Q_1 + Q_2 = 0$$

$$m \cdot c \Delta \theta + m_f \cdot L_f = 0$$

$$m \cdot 0,40 \cdot (0 - 250) + 2,5 \cdot 80 = 0 \text{ (com } m \text{ em kg)}$$

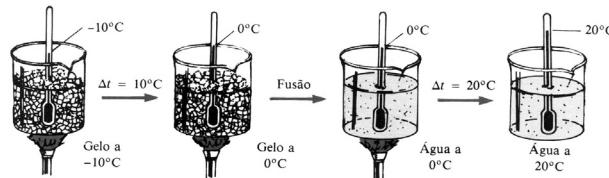
$$-100 \cdot m + 200 = 0$$

$$m = 2,0 \text{ Kg}$$

03. Temos inicialmente 200 gramas de gelo a -110°C . Determine a quantidade de calor que essa massa de gelo deve receber para se transformar em 200g de água líquida a 20°C . Trace a curva de aquecimento do processo. (Dados: calor específico de gelo = $0,5 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$; calor específico da água = $1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$; calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g .)

Solução:

Ao se transformar gelo, a -10°C , em água, a 20°C , ocorre a FUSÃO do gelo na temperatura de 0°C . Portanto, o processo deve ser subdividido em três etapas. Esquematicamente:



1ª etapa: aquecimento do gelo.

$$m = 200 \text{ g} \quad \Delta t_1 = 0^\circ\text{C} - (-10^\circ\text{C}) = 10^\circ\text{C} \quad c_{11} = 0,5 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$$

$$Q_1 = mc_1 \Delta t_1 = 200 \cdot 0,5 \cdot 10 \quad Q_1 = 1.000 \text{ cal}$$

2^a etapa: fusão do gelo.

$$m = 200\text{g} \quad L_F = 80 \text{ cal/g}$$

$$Q_2 = mL_F = 200 \cdot 80 \quad Q_2 = 16.000 \text{ cal}$$

3^a etapa: aquecimento da água líquida.

$$m = 200\text{g} \quad \Delta t_3 = 20^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C} = 20^\circ\text{C} \quad c_3 = 1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$$

$$Q_3 = mc_3 \Delta t_3 = 200 \cdot 1 \cdot 20 \quad Q_3 = 4.000 \text{ cal}$$

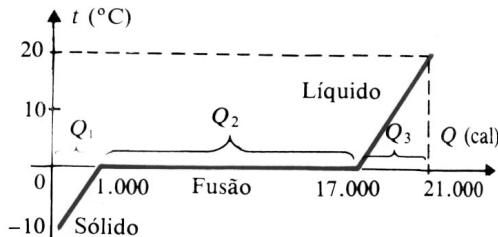
A quantidade total de calor Q será dada pelo soma:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q = 1.000 + 16.000 + 4.000$$

$$Q = 21.000 \text{ cal}$$

Com os dados desde exercício, podemos traçar a curva de aquecimento do sistema. No eixo das ordenadas, lançamos as temperaturas indicadas pelo termômetro. No eixo das abscissas, lançamos a quantidade de calor fornecida pela fonte. A primeira reta inclinada corresponde ao aquecimento de gelo; a reta coincidente com o eixo das abscissas indica a fusão do gelo e a segunda reta inclinada corresponde ao aquecimento da água resultante da fusão. Tem-se:



$$Q_1 = 1.000 \text{ cal}$$

$$Q_2 = 17.000 \text{ cal} - 1.000 \text{ cal} = 16.000 \text{ cal}$$

$$Q_3 = 21.000 \text{ cal} - 17.000 \text{ cal} = 4.000 \text{ cal}$$

04. No interior de um calorímetro ideal encontram-se 400g de água e 100g de gelo, em equilíbrio térmico. Um cilindro de metal de massa 2,0 kg, calor específico 0,10 cal/g°C e temperatura de 250°C é colocado no interior do calorímetro. Determine a temperatura de equilíbrio térmico.
Dado: $L = 80 \text{ cal/g}$ (gelo).

Resolução:

Temos:

1) água:

$$\theta_0 = 0^\circ\text{C}; m_a = 400\text{g}$$

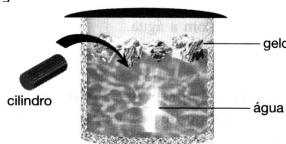
2) gelo:

$$\theta_0 = 0^\circ\text{C}; m_g = 100\text{g}$$

3) cilindro:

$$\theta_c = 250^\circ\text{C}; m_c = 2\text{kg} = 2000\text{ g}; c_c = 0,10 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$$

Não sabemos, em primeiro, se o calor cedido pelo cilindro é capaz de fundir toda a massa de gelo. Façamos um cálculo estimativo.



1º) Para fundir todo o gelo:

$$Q_f = m_f \cdot L_f = 100 \cdot 80$$

$$Q_f = 8000 \text{ cal}$$

2º) Máxima quantidade de calor que o cilindro cederia, baixando sua temperatura de 250°C a 0°C :

$$Q_{ced} = m_c \cdot c_c \Delta\theta$$

$$Q_{ced} = 2000 \cdot 0,10 \cdot (0 - 250)$$

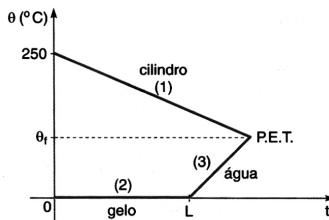
$$Q_{ced} = -50000 \text{ cal}$$

Observe que o cilindro "quente" é capaz de fundir todo o gelo, pois este requer apenas 8000 cal para sua total fusão.

Desta maneira concluímos que a temperatura final (θ_f) de equilíbrio é positiva:

$$0^\circ\text{C} < \theta_f < 250^\circ\text{C}$$

As curvas de fusão, aquecimento ou resfriamento para os três corpos serão dadas pelo diagrama $\theta \times t$ abaixo.



Para obter a temperatura final, basta fazer:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0$$

$$M_c \cdot c_c \cdot (\theta_f - \theta_c) + m_f \cdot L_f + m_a \cdot c_a \cdot (\theta_f - 0) = 0 \quad (I)$$

Observe que:

- 1º) O gelo fundirá totalmente. Logo, $m_f = m_g = 100\text{g}$.
- 2º) Quando o gelo derreter, convertendo-se em água (líquida) a 0°C , teremos formada uma massa total de água:

$$m_t = 100 + 400$$

$$m_t = 500 \text{ g}$$

Substituindo-se os valores numéricos na equação anterior (I), vem:

$$2000 \cdot 0,10 \cdot (\theta_f - 250) + 100 \cdot 80 + 500 \cdot 1,0 \cdot (\theta_f - 0) = 0$$

$$2000\theta_f - 50000 + 8000 + 500\theta_f = 0$$

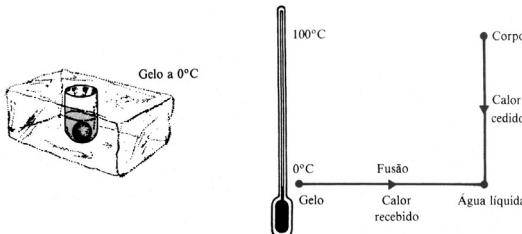
$$700\theta_f = 42000$$

$$\theta_f = 60^\circ\text{C}$$

05. Fez-se uma cavidade numa grande bloco de gelo a 0°C e no seu interior colocou-se um corpo sólido de massa 16 g a 100°C . Estando o sistema isolado termicamente do meio exterior, verificou-se, após o equilíbrio térmico, que se formaram 2,5 g de água líquida. Determine o calor específico do material que constitui o corpo. É dado o calor latente de fusão de gelo: 80 cal/g.

Solução:

A temperatura final de equilíbrio térmico é 0°C . Enquanto o corpo perde calor e sua temperatura cai de 100°C para 0°C , o gelo recebe calor e a massa de 22,5 g se derrete, sofrendo fusão sem variação de temperatura. Esquematicamente:



Dados:

	m	c	t_1	t_f	Δ_t
(1)	Corpo	16 g	$X = ?$	100°C	0°C
(2)	Fusão	$2,5 \text{ g}$		$L_F = 80 \text{ cal/g}$	

Cálculo das quantidades de calor:

$$Q_1 = mc\Delta t = 16 \cdot x(-100) \quad Q_1 = -1600x$$

$$Q_2 = mL_f = 2,5 \cdot 80 \quad Q_2 = 200 \text{ cal}$$

Como $Q_1 + Q_2 = 0$, temos $-1600x + 200 = 0$

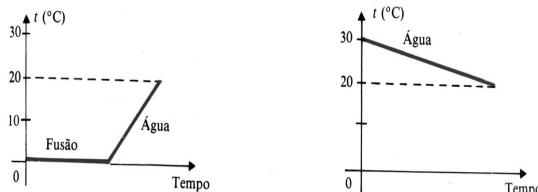
$$200 = 1600x$$

$$X = 0,125 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$$

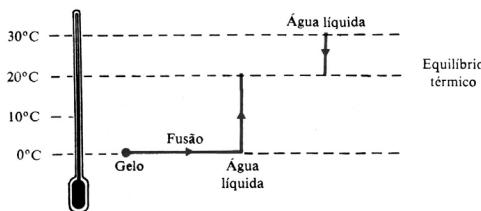
- 06.** Uma pedra de gelo a 0°C é colocada em 200g de água a 30°C , num recipiente de capacidade térmica desprezível e isolado termicamente. O equilíbrio térmico se estabelece em 20°C . Qual a massa da pedra de gelo? (Dados: calor específico da água $c = 1,0 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$; calor latente de fusão do gelo $L = 80 \text{ cal/g}$.)

Solução:

Ao receber calor da água, o gelo se derrete. Terminada a fusão, a água resultante continua recebendo calor, tendo sua temperatura se elevado de 0°C para 20°C . Enquanto isso, a água do recipiente perde calor e sua temperatura cai de 30° para 20°C . Graficamente, essas ocorrências podem ser assim representadas.



Esquematicamente:



Tabelando os dados, para facilitar os cálculos:

	m	$c(\text{cal/g}^{\circ}\text{C})$	t_i	t_f	Δt
Fusão do gelo	$X = ?$			$L_f = 80 \text{ cal/g}$	
Água da fusão	$X = ?$	1,0	0°C	20°C	20°C
Água do recipiente	200 g	1,0	30°C	20°C	-10°C

Calculando as quantidades de calor trocadas:

Fusão do gelo:

$$Q_1 = mL_F = x \cdot 80 \quad Q_1 = 80x$$

Aquecimento da água resultante da fusão:

$$Q_2 = mc\Delta t = x \cdot 1,0 \cdot 20 \quad Q_2 = 20x$$

Resfriamento da água do recipiente:

$$Q_3 = mc\Delta t = 200 \cdot 1,0 \cdot (-10) \quad Q_3 = -2.000 \text{ cal}$$

Mas $Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0$. Então:

$$80x + 20x - 2.000 = 0$$

$$100x = 2.000$$

$X = 20\text{g}$

Observação importante:

Calor de combustão

Suponha que m gramas de um corpo sofram combustão e que, em consequência, haja desprendimento de uma quantidade de calor Q .

Por definição, chama-se calor de combustão a razão

$$k = \frac{Q}{m} \therefore Q = mk$$

Unidades de calor de combustão

O calor de combustão é a razão entre uma quantidade de calor (expressa em calorias) e uma massa (expressa em gramas).

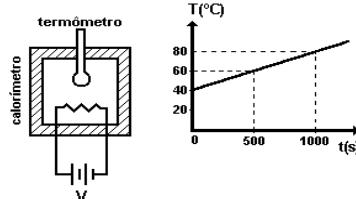
Simbolicamente:

$$\left. \begin{array}{l} U(Q) = \text{cal} \\ U(m) = \text{g} \end{array} \right\} \quad U(k) = \frac{U(Q)}{U(m)} = \frac{\text{cal}}{\text{g}}$$

Portanto, o calor de combustão se exprime em *calorias por grama*. Na prática usa-se muitas vezes um múltiplo dessa unidade, que é a *quilocaloria por grama* (kcal/g).

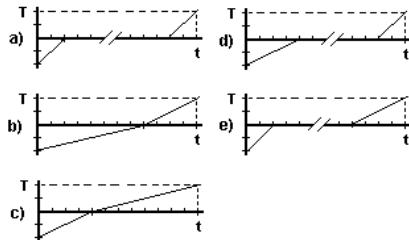
Exercícios Propostos

- 01. (Fuvest 1989)** Dois corpos A e B, inicialmente às temperaturas $t_A = 90^\circ\text{C}$ e $t_B = 20^\circ\text{C}$, são postos em contacto e isolados termicamente do meio ambiente. Eles atingem o equilíbrio térmico à temperatura de 45°C . Nestas condições, podemos afirmar que o corpo A
- cedeu uma quantidade de calor maior do que a absorvida por B.
 - tem uma capacidade térmica menor do que a de B.
 - tem calor específico menor do que o de B.
 - tem massa menor que a de B.
 - cedeu metade da quantidade de calor que possuía para B.
- 02. (Fuvest 1997)** Dois recipientes de material termicamente isolante contêm cada um 10g de água a 0°C . Deseja-se aquecer até uma mesma temperatura os conteúdos dos dois recipientes, mas sem misturá-los. Para isso é usado um bloco de 100g de uma liga metálica inicialmente à temperatura de 90°C . O bloco é imerso durante um certo tempo num dos recipientes e depois transferido para o outro, nele permanecendo até ser atingido o equilíbrio térmico. O calor específico da água é dez vezes maior que o da liga. A temperatura do bloco, por ocasião da transferência, deve então ser igual a
- 10°C
 - 20°C
 - 40°C
 - 60°C
 - 80°C
- 03. (UFPE 1995)** Quando um corpo recebe calor:
- sua temperatura necessariamente se eleva.
 - sua capacidade térmica diminui.
 - o calor específico da substância que o constitui aumenta.
 - pode eventualmente mudar seu estado de agregação.
 - seu volume obrigatoriamente aumenta.
- 04. (Fuvest 1994)** Um calorímetro, constituído por um recipiente isolante térmico ao qual estão acoplados um termômetro e um resistor elétrico, está completamente preenchido por 0,400kg de uma substância cujo calor específico deseja-se determinar. Num experimento em que a potência dissipada pelo resistor era de 80W, a leitura do termômetro permitiu a construção do gráfico da temperatura T em função do tempo t, mostrado na figura adiante. O tempo t é medido à partir do instante em que a fonte que alimenta o resistor é ligada.



- A) Qual o calor específico da substância em $\text{joules}/(\text{kg}^\circ\text{C})$?
 B) Refaça o gráfico da temperatura em função do tempo no caso da tensão V da fonte que alimenta o resistor ser reduzida à metade.

- 05. (Fuvest 1995)** Um bloco de gelo que inicialmente está a uma temperatura inferior a 0°C recebe energia a uma razão constante, distribuída uniformemente por toda sua massa. Sabe-se que o valor do calor específico do gelo vale aproximadamente metade do calor específico da água. Dentre as alternativas a seguir o gráfico que melhor representa a variação de temperatura T(em °C) do sistema em função do tempo T(em s) é:



- 06. (Unicamp 1995)** Um forno de microondas opera na voltagem de 120 V e corrente de 5,0 A. Colocaram-se neste forno 200 ml de água à temperatura de 25°C. Admita que toda energia do forno é utilizada para aquecer a água. Para simplificar, adote $1,0\text{cal} = 4,0\text{J}$.

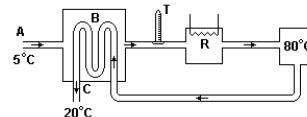
- Qual a energia necessária para elevar a temperatura da água a 100°C?
- Em quanto tempo esta temperatura será atingida?

- 07. (Fuvest 2001)** O processo de pasteurização do leite consiste em aquecê-lo a altas temperaturas, por alguns segundos, e resfriá-lo em seguida. Para isso, o leite percorre um sistema, em fluxo constante, passando por três etapas:

- O leite entra no sistema (através de A), a 5°C, sendo aquecido (no trocador de calor B) pelo leite que já foi pasteurizado e está saindo do sistema.
- Em seguida, completa-se o aquecimento do leite, através da resistência R, até que ele atinja 80°C.

Com essa temperatura, o leite retorna a B.

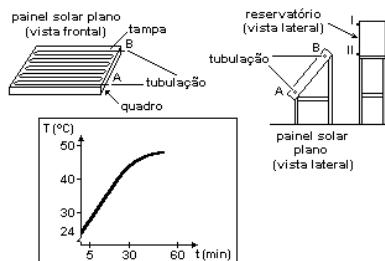
- Novamente, em B, o leite quente é resfriado pelo leite frio que entra por A, saindo do sistema (através de C), a 20°C.



Em condições de funcionamento estáveis, e supondo que o sistema seja bem isolado termicamente, pode-se afirmar que a temperatura indicada pelo termômetro T, que monitora a temperatura do leite na saída de B, é aproximadamente de

- 20°C
- 25°C
- 60°C
- 65°C
- 75°C

08. (UnB 2000)

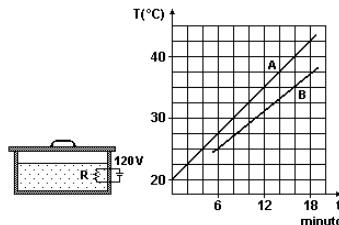


Um estabelecimento comercial necessita de água à temperatura de 90°C e utiliza, para isso, um painel solar como mostrado na figura adiante, conectado a um reservatório com 500L de água em cujo interior existe um aquecedor elétrico de 5kW de potência.

Considerando que o calor específico da água é igual a $4,2 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{°C})$, que a massa de 1L de água corresponde a 1kg, que não haja perda de energia do sistema para o ambiente e que o painel solar, sozinho, é capaz de aquecer a água do reservatório a 50°C, calcule, em horas, o tempo mínimo que o aquecedor elétrico deve permanecer ligado para que a água atinja a temperatura desejada. Despreze a parte fracionária de seu resultado, caso exista.

09. (Fuvest 2000) Uma experiência é realizada para estimar o calor específico de um bloco de material desconhecido, de massa $m = 5,4\text{kg}$. Em recipiente de isopor, uma quantidade de água é aquecida por uma resistência elétrica $R = 40\Omega$, ligada a uma fonte de 120V, conforme a figura. Nessas condições, e com os devidos cuidados experimentais é medida a variação da temperatura T da água, em função do tempo t, obtendo-se a reta A do gráfico. A seguir, repete-se a experiência desde o início, desta vez colocando o bloco imerso dentro d'água, obtendo-se a reta B do gráfico.

Dado: $c = 4 \text{ J/g°C}$, para a água



- A) Estime a massa M, em kg, da água colocada no recipiente.
 B) Estime o calor específico c_B do bloco, explicitando claramente as unidades utilizadas.

10.(UFU 1999) A figura (a) esquematiza uma repetição das famosas experiências de Joule (1818-1889). Um corpo de 2kg de massa, conectado a um calorímetro contendo 400g de água à uma temperatura inicial de 298K , cai de uma altura de 5m . Este procedimento foi repetido n vezes, até que a temperatura do conjunto água mais calorímetro atingisse 298,4K , conforme mostra a figura (b). Considere que apenas 60% da energia mecânica total liberada nas n quedas do corpo é utilizada para aquecer o conjunto (calorímetro mais água) e adote $g = 10\text{m/s}^2$.

A-1) Calcule a capacidade térmica do calorímetro, em $\text{J/}^\circ\text{C}$.

A-2) Determine n.

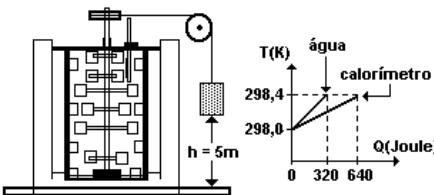


figura (a)

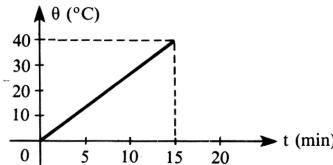
figura (b)

- B) Um frasco tem volume de 2000cm^3 a 0°C e está completamente cheio de mercúrio a esta temperatura. Aquecendo o conjunto até 100°C , entornam $30,4\text{cm}^3$ de mercúrio. O coeficiente de dilatação volumétrica do mercúrio é $\gamma = 18,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Calcule o coeficiente de dilatação linear do frasco.

11. Um bloco de alumínio de 600 g de massa deve ser aquecido de 10°C até 150°C . Sendo de $0,22 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ o calor específico do alumínio, calcule:
- a quantidade de calor que o bloco deve receber;
 - a sua capacidade térmica.

12. Quantas calorias perderá a massa de dois quilogramas de água, quando sua temperatura baixar de 50°C para 20°C ?

13. (PUC-PR) Um corpo de massa 300 g é aquecido através de uma fonte cuja potência é constante e igual a 400 calorias por minuto. O gráfico ilustra a variação da temperatura num determinado intervalo de tempo. Pede-se o calor específico da substância que constitui o corpo.



14. Tem-se 1 kg de um líquido a 20°C , cujo calor específico vale $0,4 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$.

- Que temperatura terá ao perder 2 kcal de calor?
- Qual é o equivalente em água do líquido?

15.(FUVEST-SP) Um recipiente contendo 3600 g de água à temperatura inicial de 80°C é posto num local onde a temperatura ambiente permanece sempre igual a 20°C . Após 5 h o recipiente e a água entram em equilíbrio térmico com o meio ambiente. Durante esse período, ao final de cada hora, as seguintes temperaturas foram registradas para a água: 55°C , 40°C , 30°C , 24°C e 20°C . Pede-se: (calor específico da água = $1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$);

- um esboço, indicando valores nos eixos, do gráfico da temperatura da água em função do tempo;
- em média, quantas calorias por segundo a água transferiu para o ambiente.

16. Um fogão a gás possui um queimador que fornece fluxo de calor constante de 1440 kcal/h. Em quanto tempo o queimador aqueceria meio litro de água, de 20°C a 100°C , sabendo-se que, durante o processo, há uma perda de calor de 20% para o ambiente?

Dados: calor específico da água = $1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, densidade da água = 1 kg/l .

17. Determine as quantidades de calor necessárias para:

- vaporizar 50 g de água a 100°C ;
- solidificar 100 g de água a 0°C .

Dados:

calor latente de vaporização da água: $L_v = 540 \text{ cal/g}$

calor latente de solidificação da água: $L_s = -80 \text{ cal/g}$

18. Certo sólido está no seu ponto de fusão. Ao receber 2880 cal de energia, derretem-se 60 g do mesmo. Determine o seu valor latente de fusão.

19. Tem-se a massa de 100 gramas de gelo inicialmente a -20°C . Calcule a quantidade total de calor que se deve fornecer ao gelo para transformá-lo em 100 gramas de vapor de água a 120°C . Esboce a curva de aquecimento do processo.

Dados da substância água:

Ponto de fusão: P.F. = 0°C

Ponto de ebulição: P.E. = 100°C

Calor específico do gelo: $c_g = 0,5 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$

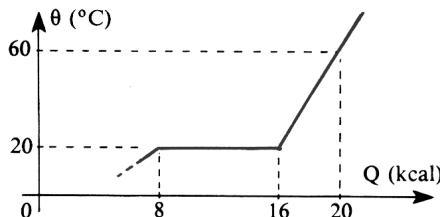
Calor específico da água: $c_a = 1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$

Calor específico do vapor: $c_v = 0,48 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$

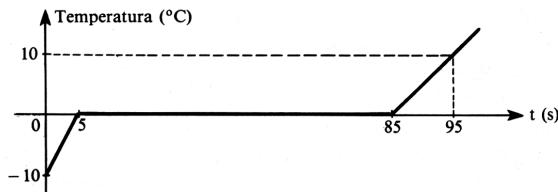
Calor latente de fusão do gelo: $L_F = 80 \text{ cal/g}$

Calor latente de vaporização da água: $L_v = 540 \text{ cal/g}$

20. O diagrama representa trecho da curva de aquecimento de uma substância de 200 gramas, onde patamar representa sua fusão. Determine:
- o calor latente de fusão da substância;
 - o calor específico da substância no estado líquido.

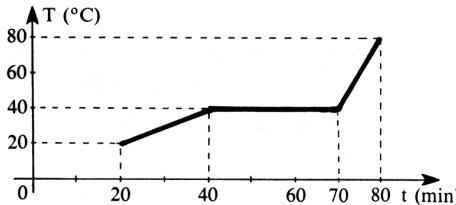


21. (FUVEST-SP) O gráfico representa a variação, com o tempo, da temperatura de um sistema constituído por um pedaço de gelo de 500 g a -10°C .

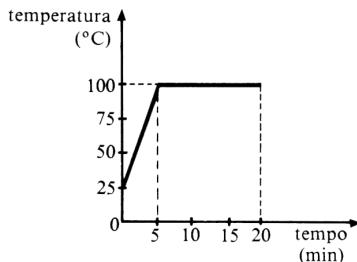


- Descreva o estado físico do sistema entre os instantes 5s e 85s.
- Se o calor específico do gelo é de $0,50 \text{ cal/g}^{\circ}$, calcule a quantidade de calor absorvida pelo gelo entre os instantes 0 e 5 s.

22. (FUVEST-SP) Aquecendo-se 30g de uma substância à razão constante de 30 cal/min , dentro de um recipiente bem isolado, sua temperatura com o tempo de acordo com a figura. A 40°C ocorre uma transição entre duas fases distintas.
- Qual o calor latente de transição?
 - Qual o calor específico entre 70°C e 80°C ?



- 23. (FATEC-SP)** O gráfico ao lado representa a variação da temperatura sofrida por determinada massa de água contida num recipiente, em função do tempo, durante uma experiência. Sabendo-se que a água absorve calor a uma razão constante de 1080 cal/min, determine a massa de água contida no recipiente:



- a) no início da experiência ($t = 0$);
- b) no final da experiência ($t = 20$ min).

Dados: calor específico da água = 1 cal/g°C; calor latente de vaporização da água = 540 cal/g.

- 24. (UMIMEP-SP)** Em um recipiente, colocamos 250 g de água a 100°C e, em seguida, mais 1000 g de água a 0°C. Admitindo que não haja perda de calor para o recipiente e para o ambiente, calcule a temperatura final das 1250 g de água.
- 25.** Um bloco metálico com 200 g de massa, a 100°C, é introduzido num calorímetro, de capacidade térmica desprezível, que contém 500 g de água a 12°C. Determine o calor específico do metal que constitui o bloco, sabendo-se que o equilíbrio térmico se estabelece a 20°C.
- 26. (UF UBERLÂNDIA-MG)** As temperaturas iniciais de uma massa m de um líquido A, 2 m de um líquido B e 3m de um líquido C são respectivamente iguais a 60°C, 40°C e 20°C. Misturando-se os líquidos A e C, a temperatura de equilíbrio é 30°C; misturando-se os líquidos B e C, a temperatura de equilíbrio é 25°C.
- a) Qual é a temperatura de equilíbrio, quando se misturam os líquidos A e B?
 - b) Se o calor específico do líquido C é 0,5 cal/g°C, qual é o calor específico do líquido B?
- 27. (PUC-SP)** Em um calorímetro de capacidade térmica 200 cal/°C, com 300 g de água a 20°C, é introduzido um corpo sólido de massa 100 g a uma temperatura de 650°C. Obtém-se o equilíbrio térmico final a 50°C. Supondo desprezíveis as perdas de calor, determine o calor específico do corpo sólido.

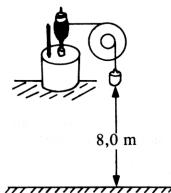
- 28. (EU-CE)** Num bloco de gelo em fusão, faz-se uma cavidade onde são colocados 80 g de um metal, de calor específico $0,03 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, a 200°C . Sendo o calor latente de fusão do gelo igual a 80 cal/g , determine a massa de água que se forma até o equilíbrio térmico.
- 29.** Colocam-se m gramas de gelo em fusão num calorímetro, de capacidade térmica $200 \text{ cal}^\circ\text{C}$, que contém 500 g de água a 60°C . Determine m, sabendo que o equilíbrio térmico ocorre a 20°C . Dado: calor latente de fusão do gelo igual a 80 cal/g .
- 30. (UNICAMP-SP)** Um rapaz deseja tomar banho de banheira com água à temperatura de 30°C , misturando água quente e fria. Inicialmente, ele coloca na banheira 100ℓ de água fria a 20°C . Desprezando a capacidade térmica da banheira e a perda de calor da água, pergunta-se:
- Quantos litros de água quente, a 50°C , ele deve colocar na banheira?
 - Se a vazão da torneira de água quente é de $0,20\ell/s$, durante quanto tempo a torneira deverá ficar aberta?
- 31. (VUNESP-SP)** As temperaturas de três porções, A, B e C, de um líquido contido em três frascos são mantidas a 15°C , 20°C e 25°C , respectivamente. Quando A e B são misturados, a temperatura de equilíbrio é 18°C , e quando B e C são misturados, a temperatura final de equilíbrio é 24°C . Que temperatura final é esperada quando se mistura a porção A com a porção C? Suponha desprezíveis as trocas de calor com o meio exterior.
- 32.(ITA-SP)** Um bloco de gelo de massa $3,0 \text{ kg}$, que está a uma temperatura de $-10,0^\circ\text{C}$, é colocado em um calorímetro (recipiente isolado de capacidade térmica desprezível) contendo $5,0 \text{ kg}$ de água à temperatura de $40,0^\circ\text{C}$. Qual a quantidade de gelo que sobra sem se derreter?

Dados:

calor específico do gelo: $c_g = 0,5 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$

calor latente de fusão do gelo: $L = 80 \text{ kcal/kg}$

- 33. (FUVEST-SP)** A figura esquematiza o arranjo utilizado em uma repetição da experiência de Joule. O calorímetro utilizado, com capacidade térmica de $1600 \text{ J}^\circ\text{C}$, continha 200 g de água a uma temperatura inicial de $22,00^\circ\text{C}$. O corpo, de massa $M = 1,5 \text{ kg}$ é abandonado de uma altura de 8 m .



O procedimento foi repetido 6 vezes até que a temperatura do conjunto água + calorímetro atingisse $22,20^\circ\text{C}$.

- Calcule a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura do conjunto água + calorímetro.
- Do total de energia mecânica liberada nas 6 quedas do corpo, qual a fração utilizada para aquecer o conjunto?

Dados: $C_{\text{água}} = 4 \text{ J/g}^\circ\text{C}$; $g = 10 \text{ m/s}^2$

- 34. (MACK-SP)** Um recipiente de capacidade térmica $200 \text{ cal}^\circ\text{C}$, que tem volume de $1,00 \text{ litro}$, contém 500 cm^3 de água ($d = 1,00 \text{ g/cm}^3$ e $c = 1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$) a 0°C . Introduzindo nesse recipiente um corpo maciço de certo material ($d = 3,00 \text{ g/cm}^3$ e $c = 0,20 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$) a 100°C ele fica completamente cheio. Sendo o sistema termicamente isolado, qual é a temperatura de equilíbrio do mesmo?

- 35. (UNICAMP-SP)** Mil pessoas estão reunidas num teatro, numa noite em que a temperatura extrema é de 10°C . Para ventilar eficientemente o salão, introduzem-se 2 litros de ar por segundo por pessoa presente e, para maior conforto, o ar deve ser aquecido até 20°C .

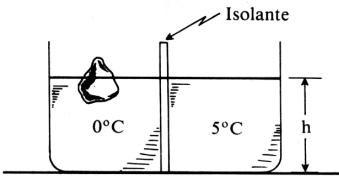
Calcule:

- quantos litros de ar são introduzidos no teatro em duas horas;
- a quantidade de calor transferida em duas horas, admitindo-se que um litro de ar tem massa de $1,3 \text{ g}$ e que o calor específico do ar é de $0,24 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$.

- 36. (FUVEST-SP)** Colocam-se 50 g de gelo a 0°C em 100 g de água. Após certo tempo, verifica-se que existem 30 g de gelo boiando na água e em equilíbrio térmico. Admitindo-se que não ocorreu troca de calor com o ambiente, e que o calor latente de fusão do gelo é 80 cal/g :

- qual a temperatura final da mistura?
- qual a temperatura da água?

37.(FUVEST-SP) A figura mostra dois recipientes idênticos, um deles contendo 100 g de água a 5°C e outro, água em equilíbrio térmico com gelo, separados com um isolante térmico. Retirando-se o isolante, o gelo funde-se totalmente e o sistema entra em equilíbrio térmico a 0°C . Não há trocas de calor com o meio exterior. O calor latente do gelo é 80 cal/g, a densidade da água 1 g/cm^3 e a densidade do gelo $0,90\text{ g/cm}^3$.



Pede-se:

- a massa total do sistema;
- a quantidade de gelo inicial.

38. (OLIMPÍADA DE FÍSICA/ACESP-SP) 400 g de gelo a -10°C são colocados em um calorímetro, de capacidade térmica $40,0\text{ cal}/^{\circ}\text{C}$, que contém 800 g de água a 30°C sob pressão normal. Os calores específicos da água e do gelo valem respectivamente $1,0\text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$ e $0,50\text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$. O calor latente da fusão do gelo é $80,0\text{ cal/g}$.

- Qual é a temperatura final do sistema quando o equilíbrio térmico for atingido?
- Qual é o estado do sistema final?

39. (PUC-SP) Um operário, por engano, coloca 20 kg de gelo, a -10°C são colocados em um calorímetro, de capacidade térmica $40,0\text{ cal}/^{\circ}\text{C}$, que contém 800 g de água a 30°C sob pressão normal. Os calores específicos da água e do gelo valem respectivamente $1,0\text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$ e $0,50\text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$. O calor latente da fusão do gelo é $80,0\text{ cal/g}$.

- Qual é a temperatura final dos sistema quando o equilíbrio térmico for atingido?
- Qual é o estado do sistema final?

40. (UF-GO) Um projétil de chumbo de massa igual a 10 g e velocidade 500 m/s choque contra um obstáculo rígido. Admita que toda energia cinética do projétil tenha-se transformado em calor e que 80 deste tenha sido absorvido pelo projétil. Qual a temperatura final do projétil, sabendo-se que ele fundiu?

Dados:

$1\text{ J} = 0,24\text{ cal}$; calor específico do chumbo sólido = $0,030\text{ cal/g}^\circ\text{C}$; calor específico o chumbo líquido = $0,040\text{ cal/g}^\circ\text{C}$; temperatura inicial = 27°C ; temperatura de fusão do chumbo = 327°C ; calor latente de fusão do chumbo = $6,0\text{ cal/g}$.

41. (Fuvest 1987) Um pedaço de gelo de 150g à temperatura de -20°C é colocado dentro de uma garrafa térmica contendo 400g de água à temperatura de 22°C .

São dados:

$$\text{Calor específico do gelo} = 0,50\text{cal/g}^\circ\text{C}$$

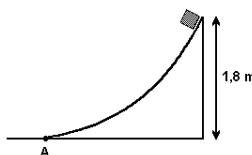
$$\text{Calor específico da água} = 1,0\text{cal/g}^\circ\text{C}$$

$$\text{Calor de fusão do gelo} = 80\text{cal/g}$$

Considerando a garrafa térmica como um sistema perfeitamente isolado e com capacidade térmica desprezível, pode-se dizer que ao atingir o equilíbrio térmico o sistema no interior da garrafa apresenta-se como:

- a) um líquido a $10,5^\circ\text{C}$.
- b) um líquido a $15,4^\circ\text{C}$.
- c) uma mistura de sólido e líquido a 0°C .
- d) um líquido a 0°C .
- e) um sólido a 0°C .

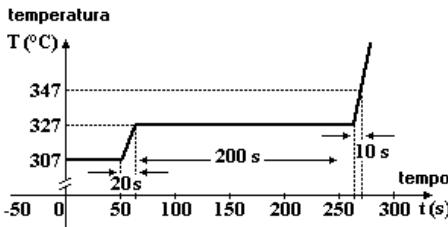
42. (Unicamp 1995) Numa câmara frigorífica, um bloco de gelo de massa $m = 8,0\text{kg}$ desliza sobre rampa de madeira da figura a seguir, partindo do repouso, de uma altura $h = 1,8\text{m}$.



- A) Se o atrito entre o gelo e a madeira fosse desprezível, qual seria o valor da velocidade do bloco ao atingir o solo (ponto A da figura)?
- B) Entretanto, apesar de pequeno, o atrito entre o gelo e a madeira não é desprezível, de modo que o bloco de gelo chega à base da rampa com velocidade de $4,0\text{m/s}$. Qual foi a energia dissipada pelo atrito?
- C) Qual a massa de gelo ($a\ 0^\circ\text{C}$) que seria fundida com esta energia? Considere o calor latente de fusão do gelo $L = 80\text{cal/g}$ e, para simplificar, adote $1\text{cal} = 4,0\text{J}$.

43. (Fuvest 1996) Um recipiente de paredes finas contém 100g de uma liga metálica. O gráfico representa a temperatura T da liga em função do tempo t.

Até o instante $t = 50\text{s}$, a liga recebe de um aquecedor a potência $P_0 = 30\text{W}$ e, a partir desse instante, passa a receber a potência $P_1 = 43\text{W}$. A temperatura de fusão da liga é 327°C e a de ebulição é superior a 1500°C . Na situação considerada a liga perde calor para o ambiente a uma taxa constante. Avalie:



- A) a quantidade de calor perdida pela liga, a cada segundo, em J.
- B) a energia (em J) necessária para fundir 1g da liga.
- C) a energia (em J) necessária para elevar, de 1°C , a temperatura de 1g da liga no estado líquido.
- D) a energia (em J) necessária para elevar, de 1°C , a temperatura de 1g da liga no estado sólido.

- 44.(UFF 1997) Uma tigela de alumínio com 180g de massa contém 90g de água a 0°C em equilíbrio térmico. Fornecendo-se calor igual a 18 kcal ao sistema eleva-se a temperatura deste a 100°C , iniciando-se a ebulição.

Dados:

$$\text{calor específico da água} = 1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$$

$$\text{calor latente de vaporização da água} = 540 \text{ cal/g}$$

$$\text{calor específico do alumínio} = 0,2 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$$

Nestas circunstâncias, a massa de água que se vaporiza é:

- a) 20 g
- b) 5 g
- c) 15 g
- d) 10 g
- e) 25 g

45. (Vunesp 1989) O calor específico de uma certa liga metálica foi determinado da seguinte forma:

- 1 - aqueceu-se um bloco de 200 g do material até 400°C ;
- 2 - o bloco foi mergulhado em um calorímetro contendo água a 25°C . A água no calorímetro mais o equivalente em água do mesmo, perfazia um total de $1,00 \cdot 10^3$ g de água. Considere o calor específico da água como $1,0 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$;
- 3 - durante a imersão do corpo, 5,0 g de água foram vaporizados. O calor latente de vaporização da água é $5,4 \cdot 10^2 \text{ cal/g}$. Os vapores saíram do calorímetro;
- 4 - a temperatura final do calorímetro com o corpo foi de 40°C ;
- 5 - toda a experiência foi executada à pressão normal do nível do mar.

Desprezada qualquer perda de calor, exceto o transportado pelos vapores que saíram do calorímetro, calcule o calor específico do material.

46. (Fuvest 1997) Um pesquisador estuda a troca de calor entre um bloco de ferro e certa quantidade de uma substância desconhecida, dentro de um calorímetro de capacidade térmica desprezível (ver Figura 1). Em sucessivas experiências, ele coloca no calorímetro a substância desconhecida, sempre no estado sólido à temperatura $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$, e o bloco de ferro, a várias temperaturas iniciais T , medindo em cada caso a temperatura final de equilíbrio térmico T_e . O gráfico da Figura 2 representa o resultado das experiências. A razão das massas do bloco de ferro e da substância desconhecida é $m_f / m_s = 0,8$.

Considere o valor do calor específico do ferro igual a $0,1 \text{ cal/(g}^{\circ}\text{C)}$. A partir destas informações, determine para a substância desconhecida:

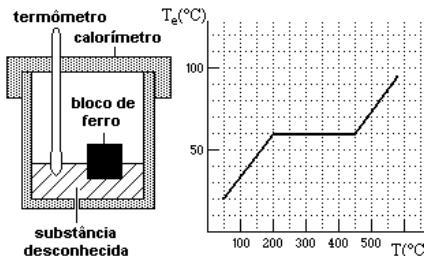


FIGURA 1

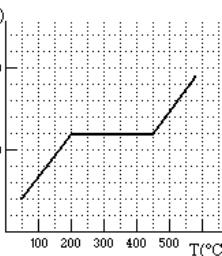


FIGURA 2

- A) a temperatura de fusão, $T_{\text{fusão}}$.
- B) o calor específico, c_s , na fase sólida.
- C) o calor latente de fusão L .

47. (Vunesp 2001) Uma estudante põe 1,0L de água num recipiente graduado, a temperatura ambiente de 20°C, e o coloca para ferver num fogão de potência constante. Quando retira o recipiente do fogão, a água pára de ferver e a estudante nota que restaram 0,80L de água no recipiente. Despreze o calor absorvido pelo recipiente, a sua dilatação e a dilatação da água.

- A) Faça o esboço do gráfico $t(^{\circ}\text{C}) \times Q(J)$ que representa esse aquecimento, onde $t(^{\circ}\text{C})$ é a temperatura da água contida no recipiente e $Q(J)$ é a quantidade de calor absorvida pela água. Coloque, pelo menos, os pontos correspondentes à temperatura inicial, à temperatura e quantidade de calor absorvida no início da ebulição e à temperatura e quantidade de calor quando a água é retirada do fogo.
- B) Suponha que toda a água que falta tenha sido vaporizada. Qual a energia desperdiçada nesse processo? Justifique. São dados:

$$\text{Calor específico da água} = 4200 \text{ J/(kg}\cdot^{\circ}\text{C)}.$$

$$\text{Calor latente de vaporização da água: } L_v = 2300000 \text{ J/kg}.$$

$$\text{Densidade (massa específica) da água} = 1000 \text{ kg/m}^3.$$

$$1\text{m}^3 = 1000 \text{ L}.$$

$$\text{Temperatura de ebulição da água na região} = 100^{\circ}\text{C}.$$

48. (UFSC 2001) Recomendam alguns livros de culinária que, ao se cozinar macarrão, deve-se fazê-lo em bastante água - não menos do que um litro de água para cada 100g - e somente pôr o macarrão na água quando esta estiver fervendo, para que cozinhe rapidamente e fique firme. Assim, de acordo com as receitas, para 500g de macarrão são necessários, pelo menos, 5 litros de água. A respeito do assunto assinale a(s) proposição(ões) CORRETA(S):

01. O macarrão cozinha tão rapidamente em 1 litro como em 5 litros de água, pois a temperatura máxima de cozimento será 100°C, em uma panela destampada em Florianópolis.
02. A capacidade térmica do macarrão varia com a quantidade de água usada no cozimento.
03. Ao ser colocado na água fervente, o macarrão recebe calor e sua temperatura aumenta até ficar em equilíbrio térmico com a água.
04. Quanto maior a quantidade de água fervente na panela, maior será a quantidade de calor que poderá ser cedida ao macarrão e, consequentemente, mais rápido cozinhará.
05. A quantidade de calor que deverá ser cedida pela água fervente para o macarrão atingir a temperatura de equilíbrio depende da massa, da temperatura inicial e do calor específico do macarrão.
06. Para o cozimento do macarrão, o que importa é a temperatura e não a massa da água, pois a capacidade térmica da água não depende da massa.
07. A água ganha calor da chama do fogão, através da panela, para manter sua temperatura de ebulição e ceder energia para o macarrão e para o meio ambiente.

49. (ITA 1980) Um aquecedor de imersão, ligado a uma fonte de tensão contínua de $1,00 \cdot 10^2 \text{ V}$, aquece $1,0 \text{ kg}$ de água, de 15°C a 85°C , em 936 s . Calcular a resistência elétrica do aquecedor supondo que 70% da potência elétrica dissipada no resistor seja aproveitada para o aquecimento da água.

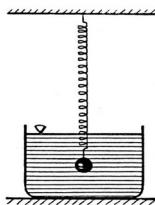
Calor específico da água: $C = 4,18 \cdot 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$.

- a) $R = 10\Omega$
- b) $R = 22\Omega$
- c) $R = 30\Omega$
- d) $R = 35\Omega$
- e) $R = 40\Omega$

50. (ITA 1981) Dentro de um calorímetro de capacidade térmica $50 \text{ J} \cdot {}^\circ \text{C}^{-1}$, deixa-se cair um sistema de duas massas de 100 g cada uma, ligadas por uma mola de massa desprezível. A altura da qual o sistema é abandonado é de $1,0 \text{ m}$ acima do fundo do calorímetro e a energia total de oscilação do sistema é, inicialmente, de $1,5 \text{ J}$. Dada a aceleração da gravidade $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ e sabendo que após um certo tempo as duas massas se encontram em repouso no fundo do calorímetro, pode-se afirmar que a variação da temperatura, no interior do calorímetro, desprezando-se a capacidade térmica do sistema oscilante, é de:

- a) $0,07^\circ \text{C}$
- b) $0,04^\circ \text{C}$
- c) $0,10^\circ \text{C}$
- d) $0,03^\circ \text{C}$
- e) $1,10^\circ \text{C}$

51. (ITA 1982) Uma bolinha de massa m está oscilando livremente com movimento harmônico simples vertical, sob a ação de uma mola de constante elástica K . Sua amplitude de oscilação é A . num dado instante, traz-se um recipiente contendo um líquido viscoso e obriga-se a partícula a oscilar dentro desse líquido. Depois de um certo tempo, retira-se novamente o recipiente com o líquido e constata-se que a partícula tem velocidade dada pela expressão:



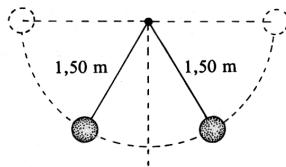
$V = V_0 \cos(wt + \gamma)$, onde V_0 , w e γ são constantes. Desprezando as perdas de calor para o meio circundante e sabendo que o líquido tem capacidade calorífica C , podemos afirmar que a variação de sua temperatura foi de:

- a) zero
- b) é impossível calculá-la sem conhecer a amplitude do movimento final
- c) $(KA^2 - mv_0^2)/2C$
- d) KA^2/C
- e) $(KA^2 - mv_0^2)/C$

52. (ITA 1984) Um fogareiro é capaz de fornecer 250 calorias por segundo. Colocando-se sobre o fogareiro uma chaleira de alumínio de massa 500 g , tendo no seu interior 1,2 kg de água à temperatura ambiente de 25°C , a água começará a ferver após 10 minutos de aquecimento. Admitindo-se que a água ferve a 100°C e que o calor específico da chaleira de alumínio é 0,23 cal/g°C e o da água 1,0 cal/g°C , pode-se afirmar que:

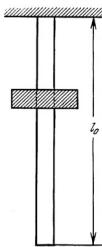
- Toda a energia fornecida pelo fogareiro é consumida no aquecimento da chaleira com água, levando a água à ebulação.
- Somente uma fração inferior a 30% da energia fornecida pela chama é gasta no aquecimento da chaleira com água, levando a água à ebulação.
- Uma fração entre 30 a 40% de energia fornecida pelo fogareiro é perdida.
- 50% da energia fornecida pelo fogareiro é perdida.
- A relação entre a energia consumida do aquecimento da chaleira com água e a energia fornecida pelo fogão em 10 minutos situa-se entre 0,70 e 0,90 .

53. (ITA 1985) Dois corpos feitos de chumbo estão suspensos a um mesmo ponto por fios de comprimento iguais a 1,50 m . Esticam-se os dois fios ao longo de uma mesma horizontal e, em seguida, abandonam-se os corpos, de forma que eles se chocam e ficam em repouso. Desprezando as perdas mecânicas, admitindo que toda a energia se transforma em calor e sabendo que o calor específico do chumbo é 0,130 J/g°C e a aceleração da gravidade $9,80 \text{ m/s}^2$, podemos afirmar que a elevação de temperatura dos corpos é :



- impossível de calcular, porque não se conhecem as massas dos corpos.
- $0,113^\circ\text{C}$
- $0,226^\circ\text{C}$
- 113°C
- $0,057^\circ\text{C}$

- 54. (ITA 1990)** Uma resistência elétrica é colocada em um frasco contendo 600 g de água e, em 10 min, eleva a temperatura do líquido de 15°C . Se a água for substituída por 300 g de outro líquido, a mesma elevação de temperatura ocorre em 2,0 min. Supondo que a taxa de aquecimento seja a mesma em ambos os casos, pergunta-se qual é o calor específico do líquido. O calor específico médio da água no intervalo de temperaturas dado é $4,18 \text{ kJ}/(\text{Kg}^{\circ}\text{C})$ e considera-se desprezível o calor absorvido pelo frasco em cada caso:
- $1,67 \text{ kJ}/(\text{Kg}^{\circ}\text{C})$
 - $3,3 \text{ kJ}/(\text{Kg}^{\circ}\text{C})$
 - $0,17 \text{ kJ}/(\text{Kg}^{\circ}\text{C})$
 - $12 \text{ kJ}/(\text{Kg}^{\circ}\text{C})$
 - outro valor.
- 55. (ITA 2002)** Mediante chave seletora, um chuveiro elétrico tem a sua resistência graduada para dissipar 4,0kW no inverno, 3,0kW no outono, 2,0kW na primavera e 1,0kW no verão. Numa manhã de inverno, com temperatura ambiente de 10°C , foram usados 10,0 L de água desse chuveiro para preencher os 16% do volume faltante do aquário de peixes ornamentais, de modo a elevar sua temperatura de 23°C para 28°C . Sabe-se que 20% da energia é perdida no aquecimento do ar, a densidade da água é $\rho = 1,0 \text{ g/cm}^3$ e calor específico da água é $4,18 \text{ J/gK}$. Considerando que a água do chuveiro foi colhida em 10 minutos, em que posição se encontrava a chave seletora? Justifique.
- 56. (Saraeva)** Ao longe de um cordão de peso desprezível e de comprimento l_0 desliza uma arruela. A força de atrito, que atua entre o cordão e a arruela, é constante e igual a f . O coeficiente de elasticidade do cordão é conhecido e igual a k . Encontrar a quantidade de calor desprendida Q .



- 57. (Saraeva)** Uma geladeira, que gasta w watts, em τ minutos, transformou em gelo q litros de água a uma temperatura de t graus. Qual é a quantidade de calor emitida pela geladeira ao quarto, nesse intervalo de tempo, considerando que a capacidade térmica da geladeira pode ser desprezada?

- 58. (Saraeva)** Sabe-se, que para aquecermos, ou esfriarmos a água, se levarmos em conta algumas medidas, então, obteremos água na forma líquida para temperaturas menores que 0°C e maiores do que $+100^{\circ}\text{C}$.

Em um calorímetro de capacidade térmica igual a $q = 1700 \text{ J / graus}$, encontra-se $m_1 = 1\text{kg}$ de água resfriada até $t_1 = -10^{\circ}\text{C}$. Junto colocam $m_2 = 100 \text{ g}$ de água, aquecida até $t_2 = +120^{\circ}\text{C}$. Qual é a temperatura estabelecida no calorímetro?

- 59. (Saraeva)** Uma lâmpada de aquecimento que gasta $N = 54$ watts, foi submersa em um calorímetro transparente que contém $V = 650 \text{ cm}^3$ de água. Em $\tau = 3 \text{ min}$ a água se aquece em $t = 3,4^{\circ}\text{C}$. Que parte da energia Q , gasta pela lâmpada, é emitida ao exterior em forma de energia radiante pelo calorímetro?

- 60. (Zubov)** 300 g of ice at a temperature of -20°C are immersed in a calorimeter containing 200 g of water at a temperature of 8°C .

What will be the temperature of the calorimeter and its contents after thermal equilibrium is reached?

- 61.(Zubov)** A piece of iron of mass $m = 325 \text{ g}$ is placed in a calorimeter filled with thawing ice.

Determine the amount of ice that will melt by the time thermal equilibrium is reached if the volume of the piece of iron being lowered into the calorimeter is $V = 48 \text{ cm}^3$.

The density of iron at 0°C is $d_0 = 6.8 \text{ g/cm}^3$, its thermal capacity $C = 0.12 \text{ cal/g.deg}$ and the coefficient of volume expansion of iron is $\beta = 0,33 \times 10^{-4}$.

- 62.(Zubov)** It takes 15 minutes to raise a certain amount of water from 0°C to boiling point using an electric heater.

After this one hour and twenty minutes are required in the same conditions to convert all the water into vapour.

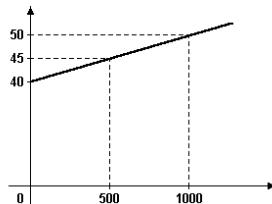
Use these data to determine the latent heat of vapourization of water.

- 63.(Zubov)** A vessel form which the air is rapidly being pumped out contains a small amount of water at 0° C . The intensive evaporation causes a gradual freezing of the water.

What part of the original amount of water can be converted into ice by this method?

Gabarito

01. b;
 02. d;
 03. 30 J/K ;
 04. a) $5,0 \cdot 10^3 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$;
 b)



05. e;
 06. a) $6,0 \cdot 10^4 \text{ J}$
 b) $1,0 \cdot 10^2 \text{ s}$
 07. d;
 08. 04 h;
 09. a) $M = 4,32 \text{ kg}$
 b) $c_B = 0,8 \text{ J/g.}^\circ\text{C}$
 10. a-1) $1600 \text{ J/}^\circ\text{C}$
 a-2) $n = 16$
 b) $10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

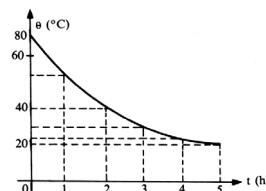
11. a) $18\ 480 \text{ cal}$
 b) $132 \text{ cal/}^\circ\text{C}$

12. 60 Kcal

13. $0,5 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$

14. a) 15°C
 b) 400 g

15. a)



- b) 12 cal/s

16. 125 s
17. a) 27000 cal
b) -800 cal
18. 48 cal/g
19. 73,96 kcal
20. a) 40 cal/g
b) 0,5 cal/g°C
21. a) sólido + líquido ocorrendo fusão
b) 2500 cal
22. a) 30 cal/g
b) 2500 cal
23. a) 72 g
b) 42 g
24. 20°C
25. 0,25 cal/g°C
26. a) 50°C
b) 0,25 cal/g°C
27. 0,25 cal/g°C
28. 6 g
29. m = 280 g
30. a) 50 ℓ
b) 250 s
31. 23,57°C
32. 0,69 kg
33. a) 720 J
b) $\frac{2}{3}$
34. 30°C
35. a) $1,44 \cdot 10^7 \text{ ℓ}$ b) $4,49 \cdot 10^7 \text{ cal}$
36. a) 0°C b) 16°C
37. a) 200 g b) 6,25 g
38. a) 0°C
b) Sistema Final: sólido (gelo): 110 g e líquido (água): 1090 g
39. 4,5 kg

40. 552°C

41. c;

42. a) $6,0 \text{ m/s};$

b) $80 \text{ J};$

c) $0,25 \text{ g}$

43. a) 30 J

b) 26 J

c) $6,5 \cdot 10^{-2} \text{ J}$

d) $1,3 \cdot 10^{-1} \text{ J}$

44. d;

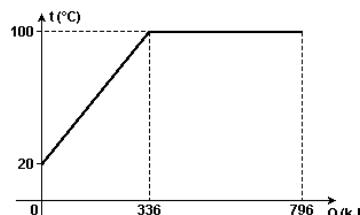
45. $0,25 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$

46. a) $60^{\circ}\text{C}.$

b) $0,28 \text{ cal}/^{\circ}\text{C}$

c) $20 \text{ cal/g};$

47. a) Observe o gráfico a seguir:



b) Admitindo-se que a "energia desperdiçada" citada no enunciado seja o calor fornecido ao sistema para vaporizar $0,20\text{L}$ de água, o cálculo da quantidade de calor é:

$$m \cdot L_v = 0,20 \cdot 2300000 = 460000$$

$$Q = 460 \text{ kJ}$$

48. F F V V V F V

49. b;

50. a;

51. c;

52. c;

53. b;

54. a;

55. $P = 3,8 \text{ kW}$ (inverno)

56. $Q = fl_0 + f^2/2k;$

57. $Q_1 = \varpi\tau + qct + q\lambda$

58. $\theta \approx 4^{\circ}\text{C};$

59. $Q \approx 5\%;$

60. $0^{\circ}\text{C};$

61. $\approx 64 \text{ g};$

62. $q = 533 \text{ cal};$

63. $\approx 87\%;$

Coleção **olímpo**
IME ITA

