

# Mudanças de fase

A mudança na temperatura de uma substância pode ser acompanhada por uma série de modificações perceptíveis ou não a olho nu.

Dentre tais modificações, podemos destacar as mudanças de estado físico, que acontecem em pressões e temperaturas características para cada uma das substâncias.

## ► 5.1 Considerações gerais

*Em determinadas condições de pressão e temperatura, uma substância pode passar de uma fase para outra.*

## ► 5.2 Quantidade de calor latente

*A quantidade de calor latente necessária para que ocorra uma mudança de fase depende da massa e da natureza da substância.*

Denomina-se fase de uma substância o seu estado de agregação, que pode ser sólido, líquido ou gasoso. As mudanças de fase em substâncias puras têm lugar a pressões e temperaturas definidas. A quantidade de calor necessária para produzir uma mudança de fase chama-se calor latente. Em uma erupção vulcânica podemos observar que rochas no estado líquido, a lava, após o seu resfriamento, tornam-se sólidas e passam a formar o solo do local atingido pela erupção.



## Considerações gerais

### Objetivos

- ▶ Caracterizar os estados de agregação de uma substância.
- ▶ Analisar as mudanças de fase de uma substância considerando suas características microscópicas.

### Termos e conceitos

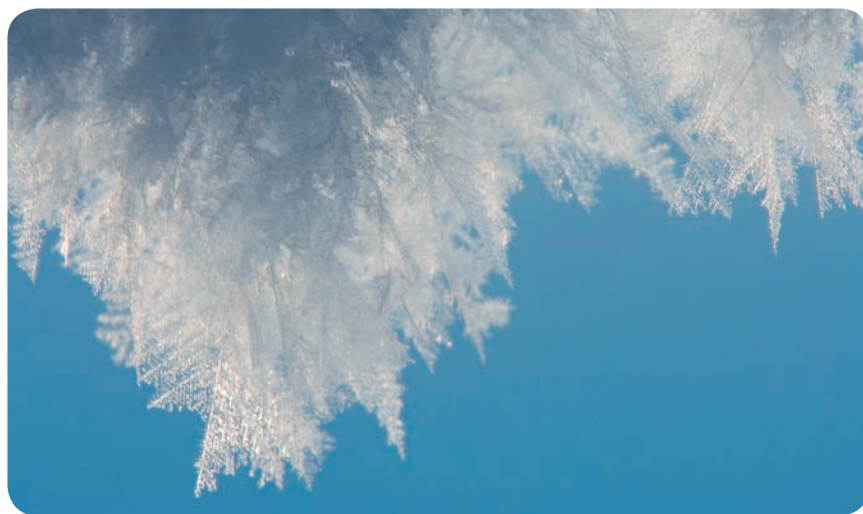
- distância intermolecular
- força de coesão
- retículo cristalino

Como vimos no Capítulo 1, uma substância pura pode se apresentar em três fases ou estados de agregação: sólido, líquido e gasoso. A água, por exemplo, pode estar, conforme as condições, na fase sólida (gelo), na fase líquida (água líquida) ou na fase gasosa (vapor-d'água).

Na fase gasosa, a substância não apresenta nem forma nem volume definidos. As forças de coesão entre as moléculas são pouco intensas, permitindo-lhes grande liberdade de movimentação.

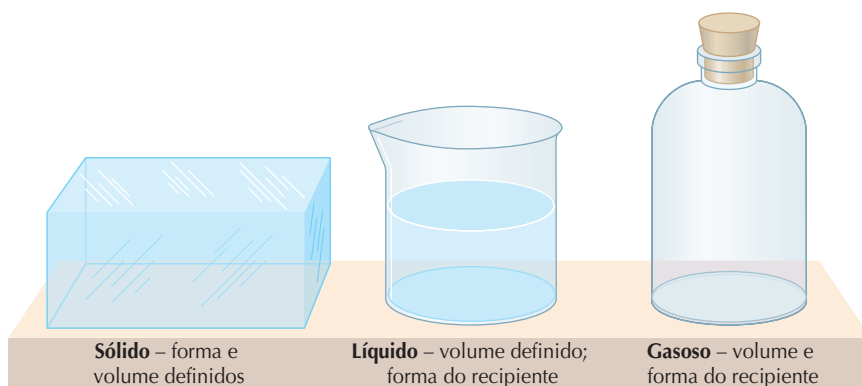
Na fase líquida, as distâncias médias entre as moléculas são bem menores que nos gases à mesma pressão. No entanto, o fato de a forma do líquido ser facilmente variável indica que suas moléculas ainda possuem certa liberdade de movimentação. A menor distância intermolecular, porém, faz com que as forças de coesão entre as moléculas sejam mais intensas no líquido. Do mesmo modo que nos gases, podemos estabelecer que as moléculas do líquido possuem energia cinética média dependente da temperatura.

Na fase sólida, as moléculas estão dispostas com regularidade, num arranjo especial denominado **retículo cristalino**. As forças de coesão são intensas, permitindo às moléculas apenas ligeiras vibrações em torno de suas posições na estrutura do material. Os sólidos possuem forma e volume bem definidos.



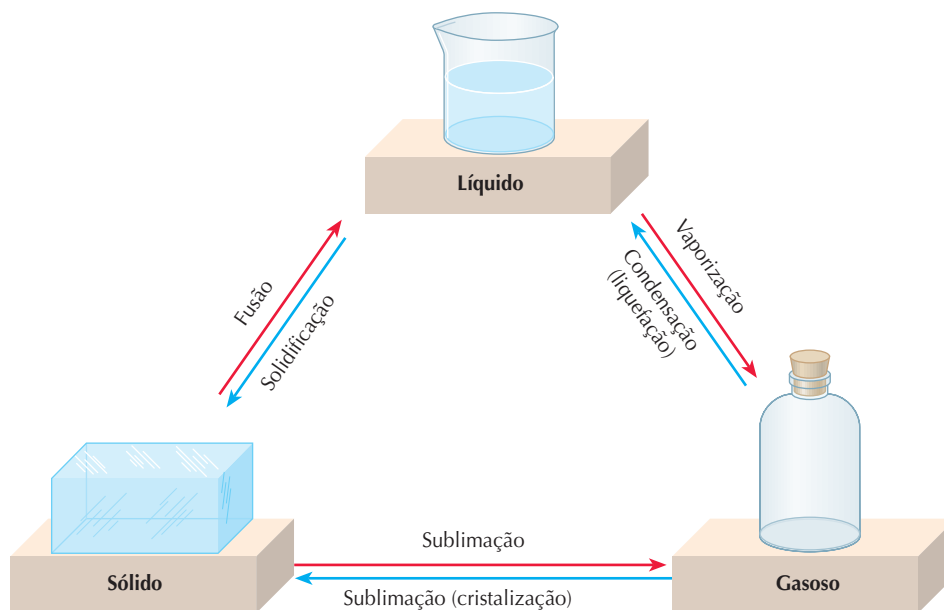
▶ A distribuição das moléculas em um cristal de neve determina sua bela forma.

Na **figura 1**, representamos as três fases de uma substância e suas características macroscópicas.



▶ **Figura 1.** As fases ou estados de agregação de uma substância.

Em determinadas condições de pressão e temperatura, uma substância pode passar de uma fase para outra, ocorrendo então uma **mudança de fase** ou **mudança de estado de agregação**. As mudanças de fase possíveis a uma substância e seus respectivos nomes estão representados na **figura 2**.



📌 **Figura 2.** As mudanças de fase de uma substância.

Quando um sólido cristalino recebe calor, suas moléculas passam a se agitar mais intensamente. À temperatura de fusão, a agitação térmica é suficientemente forte para destruir a estrutura cristalina. As moléculas adquirem energia suficiente para se livrarem das adjacentes, passando a ter a liberdade de movimento característica dos líquidos.

Durante a fusão, a temperatura não varia, pois o calor trocado ao longo do processo corresponde à energia necessária para desfazer o retículo cristalino do sólido.

Terminada a fusão, aquecendo-se o líquido formado, a temperatura volta a aumentar, isto é, aumenta a agitação de suas moléculas. Uma vez alcançada a temperatura de ebulição, o calor recebido pelo líquido corresponde à energia necessária para vencer as forças de coesão entre as moléculas: o líquido ferve, e a temperatura não varia durante esse processo.



📌 (A) Ferro líquido: a fusão do ferro ocorre a  $1.535\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sob pressão normal. (B) Nitrogênio líquido: a condensação do nitrogênio ocorre a  $-195,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sob pressão normal. (C) O vapor de água que sai do bico da chaleira é invisível. Ao se afastar, o vapor se resfria e se condensa, formando a “fumaça”, constituída de gotículas de água líquida.

## Quantidade de calor latente

### Objetivos

- ▶ Analisar o que ocorre com a temperatura durante as mudanças de fase.
- ▶ Conceituar calor latente.
- ▶ Construir e analisar curvas de aquecimento e de resfriamento de diferentes materiais.

### Termos e conceitos

- curva de aquecimento
- curva de resfriamento
- calor latente

Imaginemos um recipiente contendo gelo inicialmente a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (fig. 3A). Se colocarmos esse sistema em presença de uma fonte de calor (fig. 3B), notaremos que, com o passar do tempo, o gelo se transforma em água líquida (fusão do gelo), mas a temperatura durante a fusão permanece constante ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Assim, o sistema está recebendo calor da fonte, mas a temperatura não varia.

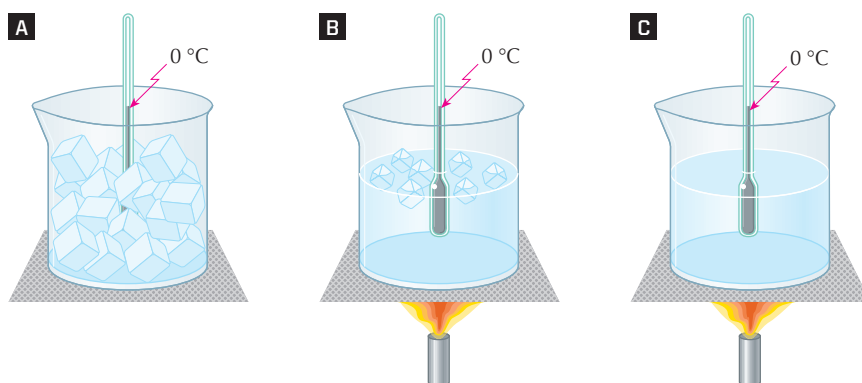


Figura 3. Enquanto o gelo derrete, a temperatura se mantém em  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sob pressão normal.

Quando o gelo derrete, verifica-se que ele deve receber, por grama, 80 calorias, mantendo-se a temperatura constante em  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Essa quantidade (80 cal/g) é denominada calor latente de fusão do gelo:  $L_F = 80\text{ cal/g}$ . Assim:

**Calor latente\***  $L$  de uma mudança de fase é a quantidade de calor que a substância recebe (ou cede), por unidade de massa, durante a transformação, mantendo-se constante a temperatura.

Já vimos que, para um corpo que recebe calor, a quantidade de calor trocado é positiva ( $Q > 0$ ); e, para aquele que cede calor, a quantidade trocada é negativa ( $Q < 0$ ). Do mesmo modo, o calor latente poderá ser positivo ou negativo, conforme a mudança de fase ocorra com ganho ou perda de calor. Por exemplo:

Fusão do gelo (a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	$L_F = 80\text{ cal/g}$
Solidificação da água (a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	$L_S = -80\text{ cal/g}$
Vaporização da água (a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	$L_V = 540\text{ cal/g}$
Condensação do vapor (a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	$L_C = -540\text{ cal/g}$

De modo geral, para a massa  $m$  de um material sofrendo mudança de fase, de calor latente  $L$ , a quantidade total de calor  $Q$  trocada no processo pode ser calculada pela fórmula:

$$Q = m \cdot L$$

\* Na verdade, o que se define é um **calor latente específico**, uma vez que se refere à massa de 1 g. Entretanto, já está consagrado pelo uso falar-se apenas em **calor latente**, omitindo-se o termo “específico”.

## Curvas de aquecimento e de resfriamento

Vamos supor que tenhamos, num recipiente, certa massa de gelo inicialmente a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sob pressão normal. Se levarmos esse sistema ao fogo (fig. 4), acompanhando como varia a temperatura no decorrer do tempo, veremos que o processo todo pode ser dividido em cinco etapas distintas:

- aquecimento do gelo de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- fusão do gelo a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- aquecimento da água líquida de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- vaporização (fervura) da água líquida a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- aquecimento do vapor acima de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  (possível somente se o confinarmos em um recipiente adequado).

Essas várias etapas podem ser “visualizadas” num gráfico cartesiano, em que se colocam os valores da temperatura no eixo das ordenadas e a quantidade de calor trocado no eixo das abscissas (fig. 5). O conjunto das retas obtidas nesse gráfico recebe o nome de **curva de aquecimento** da água.

Se considerarmos o processo inverso, com perda de calor de um sistema constituído por vapor-d’água inicialmente a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sob pressão normal, obteremos a **curva de resfriamento** da água (fig. 6), com as seguintes etapas:

- resfriamento do vapor de  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- condensação (liquefação) do vapor a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- resfriamento da água líquida de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- solidificação da água a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- resfriamento do gelo abaixo de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

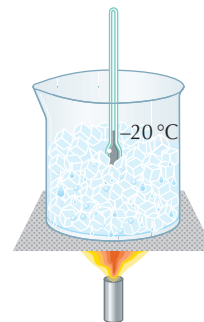


Figura 4. Aquecimento de gelo a partir de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

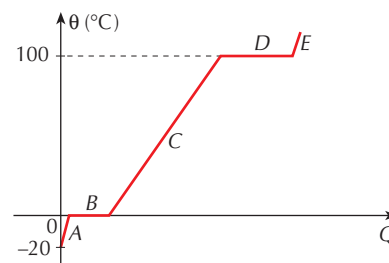


Figura 5. Curva de aquecimento da água sob pressão normal.

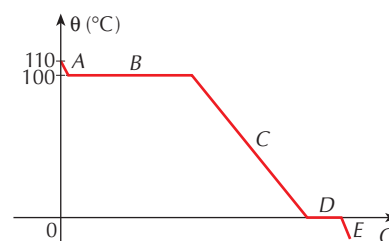


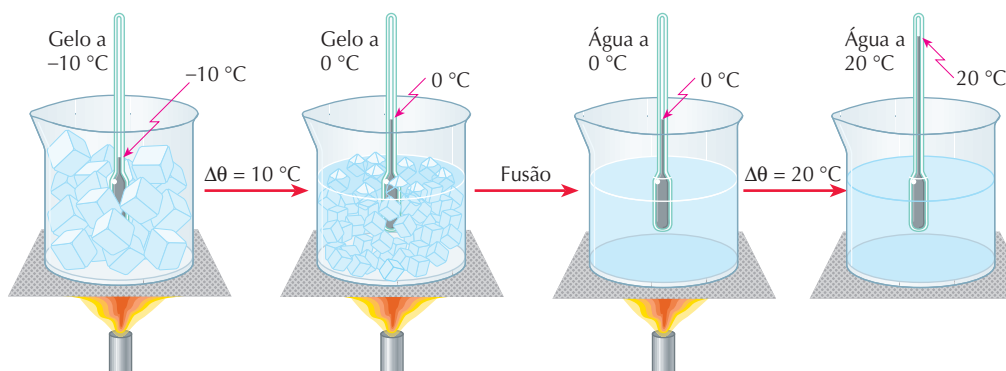
Figura 6. Curva de resfriamento da água sob pressão normal.

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**R. 29** Temos inicialmente 200 gramas de gelo a  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Determine a quantidade de calor que essa massa de gelo deve receber para se transformar em 200 g de água líquida a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Trace a curva de aquecimento do processo (dados: calor específico do gelo =  $0,5\text{ cal/g}\cdot^{\circ}\text{C}$ ; calor específico da água =  $1\text{ cal/g}\cdot^{\circ}\text{C}$ ; calor latente de fusão do gelo =  $80\text{ cal/g}$ ).

### Solução:

Ao se transformar o gelo, a  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , em água a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ocorre a **fusão** do gelo na temperatura de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Portanto, o processo deve ser subdividido em três etapas. Esquemáticamente:



1ª etapa: aquecimento do gelo ( $m = 200 \text{ g}$ ;  $\Delta\theta_1 = 0^\circ\text{C} - (-10^\circ\text{C}) = 10^\circ\text{C}$ ;  $c_1 = 0,5 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$ )

$$Q_1 = m \cdot c_1 \cdot \Delta\theta_1 = 200 \cdot 0,5 \cdot 10 \Rightarrow Q_1 = 1.000 \text{ cal}$$

2ª etapa: fusão do gelo ( $m = 200 \text{ g}$ ;  $L_F = 80 \text{ cal/g}$ )

$$Q_2 = m \cdot L_F = 200 \cdot 80 \Rightarrow Q_2 = 16.000 \text{ cal}$$

3ª etapa: aquecimento da água líquida ( $m = 200 \text{ g}$ ;  $\Delta\theta_3 = 20^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C} = 20^\circ\text{C}$ ;  $c_3 = 1 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$ )

$$Q_3 = m \cdot c_3 \cdot \Delta\theta_3 = 200 \cdot 1 \cdot 20 \Rightarrow Q_3 = 4.000 \text{ cal}$$

A quantidade total de calor  $Q$  será dada pela soma:  $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$

$$Q = 1.000 + 16.000 + 4.000 \Rightarrow \boxed{Q = 21.000 \text{ cal}}$$

Com os dados deste exercício, podemos traçar a curva de aquecimento do sistema.

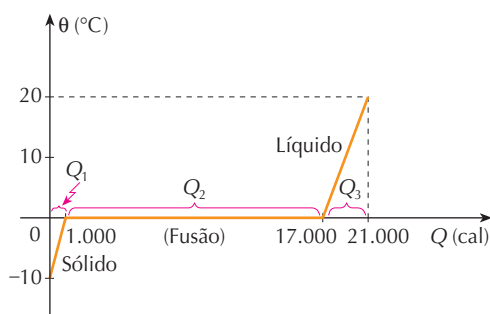
No eixo das ordenadas, lançamos as temperaturas indicadas pelo termômetro, e no eixo das abscissas, a quantidade de calor fornecida pela fonte. A primeira reta inclinada corresponde ao aquecimento do gelo, a reta coincidente com o eixo das abscissas indica a fusão do gelo e a segunda reta inclinada corresponde ao aquecimento da água resultante da fusão.

Tem-se:

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

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

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

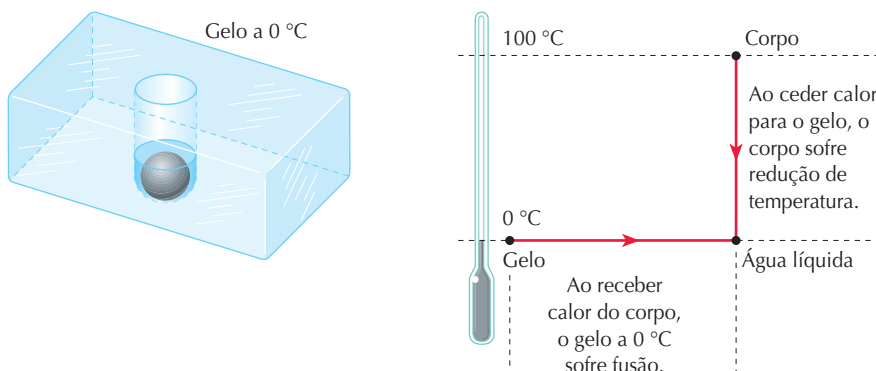


**Resposta:** O sistema deve receber 21.000 cal ou 21 kcal.

**R. 30** Fez-se uma cavidade num grande bloco de gelo a  $0^\circ\text{C}$  e no seu interior colocou-se um corpo sólido de massa  $16 \text{ g}$  a  $100^\circ\text{C}$ . Estando o sistema isolado termicamente do meio exterior, verificou-se, após o equilíbrio térmico, que se formaram  $2,5 \text{ g}$  de água líquida. Determine o calor específico do material que constitui o corpo. É dado o calor latente de fusão de gelo:  $80 \text{ cal/g}$ .

**Solução:**

A temperatura final de equilíbrio térmico é  $0^\circ\text{C}$ . Enquanto o corpo perde calor e sua temperatura cai de  $100^\circ\text{C}$  para  $0^\circ\text{C}$ , o gelo recebe calor e a massa de  $2,5 \text{ g}$  se derrete, sofrendo fusão sem variação de temperatura. Esquemáticamente:



Dispondo os dados em uma tabela, temos:

	$m$	$c$	$\theta_i$	$\theta_f$	$\Delta\theta$
(1) Corpo	16 g	$x = ?$	$100^\circ\text{C}$	$0^\circ\text{C}$	$-100^\circ\text{C}$
(2) Fusão do gelo	2,5 g	$L_F = 80 \text{ cal/g}$			

Cálculo das quantidades de calor:

$$Q_1 = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 16 \cdot x \cdot (-100) \Rightarrow Q_1 = -1.600x$$

$$Q_2 = m \cdot L_F = 2,5 \cdot 80 \Rightarrow Q_2 = 200 \text{ cal}$$

Como  $Q_1 + Q_2 = 0$ , temos:

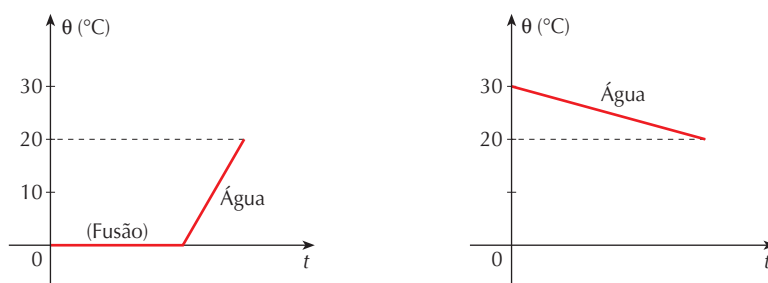
$$-1.600x + 200 = 0 \Rightarrow 200 = 1.600x \Rightarrow x = 0,125 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$$

**Resposta:** 0,125 cal/g · °C

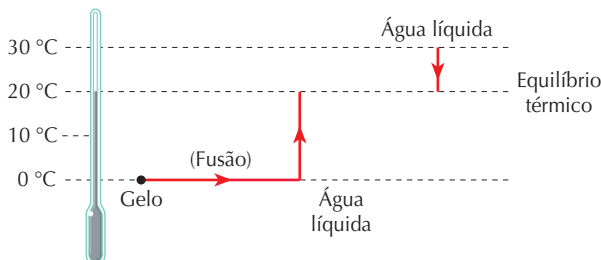
**R. 31** Uma pedra de gelo a 0 °C é colocada em 200 g de água a 30 °C, num recipiente de capacidade térmica desprezível e isolado termicamente. O equilíbrio térmico se estabelece em 20 °C (dados: calor específico da água  $c = 1,0 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$ ; calor latente de fusão do gelo  $L = 80 \text{ cal/g}$ ). Qual é a massa da pedra de gelo?

**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 °C para 20 °C. Graficamente, essas ocorrências podem ser assim representadas:



Esquematicamente:



Dispondo os dados em uma tabela, para facilitar os cálculos, temos:

	$m$	$c \text{ (cal/g} \cdot ^\circ\text{C)}$	$\theta_i$	$\theta_f$	$\Delta\theta$
<b>Fusão do gelo</b>	$x = ?$	$L_F = 80 \text{ cal/g}$			
<b>Água da fusão</b>	$x = ?$	1,0	0 °C	20 °C	20 °C
<b>Água do recipiente</b>	200 g	1,0	30 °C	20 °C	-10 °C

Cálculo das quantidades de calor trocadas

Fusão do gelo:  $Q_1 = m \cdot L_F = x \cdot 80 \Rightarrow Q_1 = 80x$

Aquecimento da água resultante da fusão:  $Q_2 = m \cdot c \cdot \Delta\theta = x \cdot 1,0 \cdot 20 \Rightarrow Q_2 = 20x$

Resfriamento da água do recipiente:  $Q_3 = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 200 \cdot 1,0 \cdot (-10) \Rightarrow Q_3 = -2.000 \text{ cal}$

Mas  $Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0$ . Então:

$$80x + 20x - 2.000 = 0 \Rightarrow 100x = 2.000 \Rightarrow x = 20 \text{ g}$$

**Resposta:** 20 g

**Entre na rede** No endereço eletrônico <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/estadistica/otros/fusion/fusion.htm> (acesso em julho/2009), você poderá simular um problema de trocas de calor com mudança de estado, numa mistura de água e gelo em fusão.



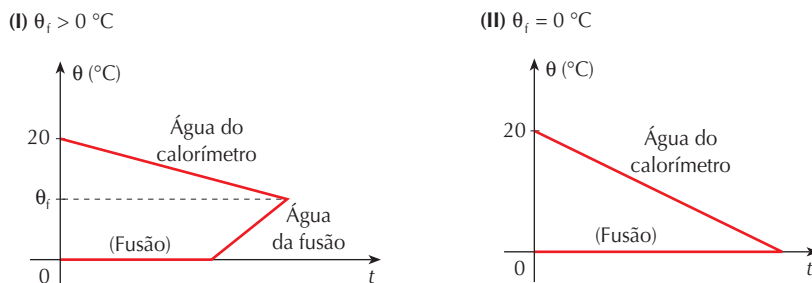
**R. 32** Colocam-se 40 g de gelo a 0 °C em 100 g de água a 20 °C contidos num calorímetro de capacidade térmica desprezível (dados: calor específico da água  $c = 1,0 \text{ cal/g} \cdot \text{°C}$ ; calor latente de fusão do gelo  $L = 80 \text{ cal/g}$ ).

Ao ser atingido o equilíbrio térmico:

- a) qual é a temperatura?                      b) qual é a massa de água existente no calorímetro?

**Solução:**

a) Quanto à temperatura final de equilíbrio térmico, há duas possibilidades, que podem ser graficamente representadas do seguinte modo:



Para decidir entre as duas possibilidades, devemos avaliar previamente as quantidades de calor trocadas. Na hipótese (I), considera-se que o calor liberado pela água do calorímetro é suficiente para derreter todo o gelo e ainda aquecer até  $\theta_f$  a água resultante. Na hipótese (II), o calor que a água do calorímetro libera não é suficiente para derreter todo o gelo e a temperatura final é 0 °C.

A quantidade de calor necessária para derreter totalmente ( $m = 40 \text{ g}$ ) é:

$$Q_1 = m \cdot L_F = 40 \cdot 80 \Rightarrow Q_1 = 3.200 \text{ cal}$$

A máxima quantidade de calor que a água do calorímetro ( $m = 100 \text{ g}$ ) pode fornecer corresponde a uma variação de temperatura desde 20 °C até 0 °C, isto é:  $\Delta\theta = 0 \text{ °C} - 20 \text{ °C} = -20 \text{ °C}$ . Então:

$$Q_2 = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 100 \cdot 1,0 \cdot (-20) \Rightarrow Q_2 = -2.000 \text{ cal}$$

Comparando  $Q_1$  e  $Q_2$ , verificamos que a quantidade de calor máxima que a água do calorímetro pode perder (2.000 cal) é insuficiente para derreter todo o gelo, pois para isso seriam necessárias 3.200 cal. Assim, apenas parte do gelo derrete; portanto:

$$\theta_f = 0 \text{ °C}$$

Se eventualmente tivéssemos  $|Q_2| > Q_1$ , ocorreria o previsto na hipótese (I), e a resolução do problema seguiria o modelo do exercício resolvido anterior.

b) Sabendo que  $\theta_f = 0 \text{ °C}$ , devemos calcular agora a massa de gelo que derrete. Tabelaando os dados:

	$m$	$c \text{ [cal/g} \cdot \text{°C]}$	$\theta_i$	$\theta_f$	$\Delta\theta$
Fusão do gelo	$x = ?$		$L_F = 80 \text{ cal/g}$		
Água do calorímetro	100 g	1,0	20 °C	0 °C	-20 °C

Cálculo das quantidades de calor:

$$Q_1 = m \cdot L_F = x \cdot 80 \Rightarrow Q_1 = 80x$$

$$Q_2 = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 100 \cdot 1,0 \cdot (-20) \Rightarrow Q_2 = -2.000 \text{ cal}$$

Aplicando o princípio geral das trocas de calor:

$$Q_1 + Q_2 = 0$$

$$80x - 2.000 = 0 \Rightarrow 80x = 2.000 \Rightarrow x = \frac{2.000}{80} \Rightarrow x = 25 \text{ g}$$

Portanto, apenas 25 g de gelo se convertem em água, fazendo com que, no equilíbrio térmico, exista no calorímetro a seguinte massa total de água:

$$m_T = 100 + 25 \Rightarrow m_T = 125 \text{ g}$$

**Respostas:** a) 0 °C; b) 125 g

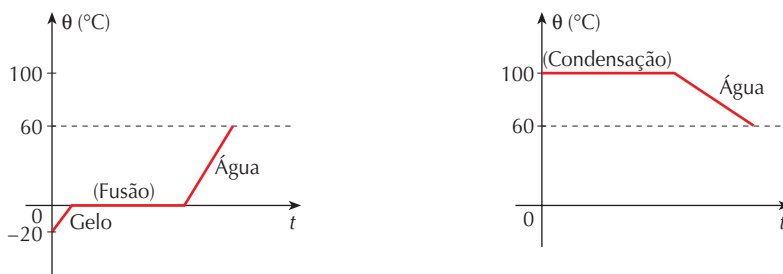
**Entre na rede** No endereço eletrônico <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/estadistica/otros/latente/latente.htm> (acesso em julho/2009), você poderá fazer a simulação com água em ebulição, traçando a curva de aquecimento, desde a água líquida até sua total vaporização.



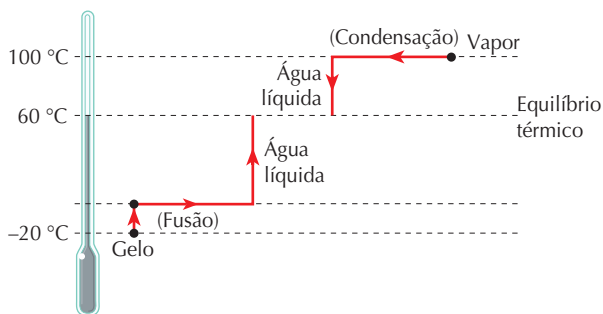
**R. 33** Um calorímetro de capacidade térmica desprezível tem no seu interior uma pedra de gelo a  $-20\text{ °C}$  com 200 g de massa. A esse calorímetro faz-se chegar vapor de água a  $100\text{ °C}$ , até que a temperatura do sistema seja  $60\text{ °C}$ . Sendo os calores latentes  $L_F = 80\text{ cal/g}$  (fusão) e  $L_C = -540\text{ cal/g}$  (condensação), calcule a massa de água existente nesse momento no calorímetro. São dados os calores específicos do gelo ( $0,5\text{ cal/g} \cdot \text{°C}$ ) e da água líquida ( $1\text{ cal/g} \cdot \text{°C}$ ).

**Solução:**

À medida que o gelo recebe calor, sua temperatura se eleva de  $-20\text{ °C}$  até  $0\text{ °C}$ ; chegando a  $0\text{ °C}$ , ele se derrete, e após a fusão a água resultante se aquece de  $0\text{ °C}$  até  $60\text{ °C}$ . Enquanto isso, o vapor perde calor e se condensa; após o término da condensação, a água resultante se resfria de  $100\text{ °C}$  a  $60\text{ °C}$ . Os gráficos da temperatura em função do tempo são os seguintes:



Esquematicamente:



Tabelando os dados:

	$m$	$c$ (cal/g · °C)	$\theta_i$	$\theta_f$	$\Delta\theta$
Gelo	200 g	0,5	$-20\text{ °C}$	$0\text{ °C}$	$20\text{ °C}$
Fusão do gelo	200 g	$L_F = 80\text{ cal/g}$			
Água da fusão	200 g	1	$0\text{ °C}$	$60\text{ °C}$	$60\text{ °C}$
Condensação do vapor	$x = ?$	$L_C = -540\text{ cal/g}$			
Água da condensação	$x = ?$	1	$100\text{ °C}$	$60\text{ °C}$	$-40\text{ °C}$

Cálculo das quantidades de calor trocadas

Aquecimento do gelo:  $Q_1 = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 200 \cdot 0,5 \cdot 20 \Rightarrow Q_1 = 2.000\text{ cal}$

Fusão do gelo:  $Q_2 = m \cdot L_F = 200 \cdot 80 \Rightarrow Q_2 = 16.000\text{ cal}$

Aquecimento da água resultante da fusão:  $Q_3 = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 200 \cdot 1 \cdot 60 \Rightarrow Q_3 = 12.000\text{ cal}$

Condensação do vapor:  $Q_4 = m \cdot L_C = x \cdot (-540) \Rightarrow Q_4 = -540x$

Resfriamento da água resultante da condensação:  $Q_5 = m \cdot c \cdot \Delta\theta = x \cdot 1 \cdot (-40) \Rightarrow Q_5 = -40x$

Como  $Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 = 0$ , temos:

$$2.000 + 16.000 + 12.000 - 540x - 40x = 0 \Rightarrow 30.000 = 580x \Rightarrow x = \frac{30.000}{580} \Rightarrow x \approx 51,7\text{ g}$$

Como é pedida a massa total de água, devemos somar as massas de água provenientes da fusão do gelo e da condensação do vapor:

$$m_T \approx 200 + 51,7 \Rightarrow m_T \approx 251,7\text{ g}$$

**Resposta:** No equilíbrio térmico há 251,7 g de água, aproximadamente.



## EXERCÍCIOS PROPOSTOS

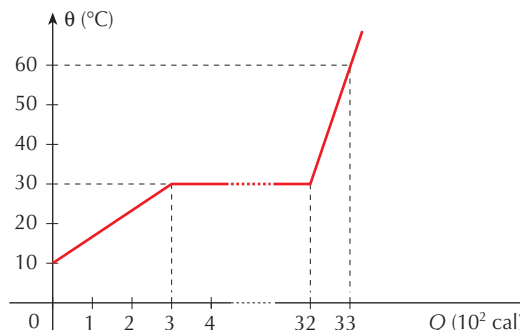
**P. 83** Quantas calorias são necessárias para transformar 100 g de gelo, a  $-20\text{ }^\circ\text{C}$ , em água a  $60\text{ }^\circ\text{C}$ ? O gelo funde a  $0\text{ }^\circ\text{C}$ , tem calor específico  $0,5\text{ cal/g}\cdot^\circ\text{C}$  e seu calor latente de fusão é  $80\text{ cal/g}$ . O calor específico da água é  $1\text{ cal/g}\cdot^\circ\text{C}$ . Construa a curva de aquecimento do sistema.

**P. 84** Temos 50 g de vapor de água a  $120\text{ }^\circ\text{C}$ . Que quantidade de calor deve ser perdida até o sistema ser formado por 50 g de água líquida a  $70\text{ }^\circ\text{C}$ ? Sabe-se que o vapor se condensa a  $100\text{ }^\circ\text{C}$  com calor latente  $L_c = -540\text{ cal/g}$ . Os calores específicos valem  $0,48\text{ cal/g}\cdot^\circ\text{C}$  para o vapor e  $1,0\text{ cal/g}\cdot^\circ\text{C}$  para o líquido. Construa ainda a curva de resfriamento correspondente ao processo.

**P. 85** Um corpo, inicialmente líquido, de 50 g, sofre o processo calorimétrico representado graficamente abaixo.

Determine:

- o calor latente da mudança de fase (vaporização) ocorrida;
- a capacidade térmica do corpo antes e depois da mudança de fase;
- o calor específico da substância no estado líquido e no estado de vapor.



**P. 86** Num bloco de gelo em fusão faz-se uma cavidade onde são colocados 80 g de um metal de calor específico  $0,03\text{ cal/g}\cdot^\circ\text{C}$  a  $200\text{ }^\circ\text{C}$ . Calcule a massa de água que se forma até o equilíbrio térmico. O calor latente de fusão do gelo é  $80\text{ cal/g}$ .

**P. 87** Num recipiente há uma grande quantidade de água a  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , sob pressão normal. Ao se colocar nela um bloco metálico de 500 g a  $270\text{ }^\circ\text{C}$ , qual será a massa de vapor que se forma em virtude da troca de calor entre o bloco e a água? Suponha não haver perdas de calor para o ambiente e adote  $L_v = 540\text{ cal/g}$  (calor latente de vaporização da água) e  $c = 0,40\text{ cal/g}\cdot^\circ\text{C}$  (calor específico do metal).

**P. 88** Num recipiente de capacidade térmica  $30\text{ cal/}^\circ\text{C}$  há 20 g de um líquido de calor específico  $0,5\text{ cal/g}\cdot^\circ\text{C}$ , a  $60\text{ }^\circ\text{C}$ . Colocando-se nesse líquido 10 g de gelo em fusão, qual será a temperatura final de equilíbrio, admitindo-se que o sistema está termicamente isolado do ambiente? O calor latente de fusão do gelo é  $80\text{ cal/g}$  e o calor específico da água é  $1\text{ cal/g}\cdot^\circ\text{C}$ .

**P. 89** Em um calorímetro de capacidade térmica desprezível, são colocados 10 g de gelo a  $0\text{ }^\circ\text{C}$ , sob pressão normal, e 10 g de água à temperatura  $\theta$ . Sendo  $80\text{ cal/g}$  o calor latente de fusão do gelo e  $1,0\text{ cal/g}\cdot^\circ\text{C}$  o calor específico da água, determine o valor da temperatura  $\theta$  para que, no equilíbrio térmico, reste apenas água a  $0\text{ }^\circ\text{C}$ .

**P. 90** Misturam-se, num calorímetro de capacidade térmica desprezível, 200 g de gelo a  $0\text{ }^\circ\text{C}$  com 200 g de água a  $40\text{ }^\circ\text{C}$ . Sendo  $80\text{ cal/g}$  o calor latente de fusão do gelo e  $1,0\text{ cal/g}\cdot^\circ\text{C}$  o calor específico da água, determine:

- a temperatura de equilíbrio térmico;
- a massa de gelo que se funde.

**P. 91** Um bloco de gelo de massa 500 g a  $-10\text{ }^\circ\text{C}$  é colocado num calorímetro de capacidade térmica  $9,8\text{ cal/}^\circ\text{C}$ . Faz-se chegar, então, a esse calorímetro, vapor de água a  $100\text{ }^\circ\text{C}$  em quantidade suficiente para o equilíbrio térmico se dar a  $50\text{ }^\circ\text{C}$ . Sendo  $L_f = 80\text{ cal/g}$  o calor latente de fusão do gelo e  $L_c = -540\text{ cal/g}$  o calor latente de condensação do vapor a  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , calcule a massa de vapor introduzida no calorímetro (dados:  $c_{\text{água}} = 1,0\text{ cal/g}\cdot^\circ\text{C}$ ;  $c_{\text{gelo}} = 0,50\text{ cal/g}\cdot^\circ\text{C}$ ).

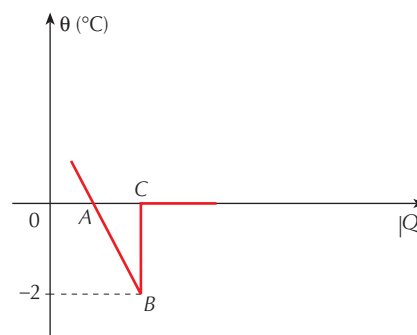


## 2 O fenômeno da superfusão

Ao se resfriar um líquido, é possível ocasionalmente ocorrer um atraso na solidificação e o líquido atingir, sem mudar de fase, temperaturas inferiores à de solidificação (fig. 7). Esse fenômeno excepcional é denominado **superfusão** ou **sobrefusão**. O líquido em estado de superfusão é instável, de modo que a simples agitação do sistema ou a colocação de um fragmento sólido interrompe o fenômeno, com a solidificação parcial ou total do líquido acompanhada de elevação da temperatura.

Uma situação comum em que acontece a superfusão é quando guardamos garrafas de cerveja ou de refrigerante no congelador. Ao pegarmos uma delas, sem o devido cuidado, costuma haver o congelamento de parte do líquido que estava em superfusão.

Em condições especiais, utilizando tubos capilares, já se conseguiu levar a água, sob pressão normal, à temperatura de  $-20\text{ }^\circ\text{C}$ , em superfusão.



▲ **Figura 7.** Superfusão da água: **AB** – água em superfusão, alcançando temperatura inferior a  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ; **BC** – interrupção do fenômeno, ocorrendo solidificação parcial da água e elevação da temperatura até  $0\text{ }^\circ\text{C}$ .

### EXERCÍCIO RESOLVIDO

**R. 34** A água de um recipiente, sob pressão normal, encontra-se em superfusão a  $-4\text{ }^\circ\text{C}$ . Se o sistema for agitado, parte dessa água congela-se bruscamente. Sendo  $-80\text{ cal/g}$  o calor latente de solidificação da água e  $1\text{ cal/g}\cdot^\circ\text{C}$  seu calor específico, calcule a proporção de água que se congela.

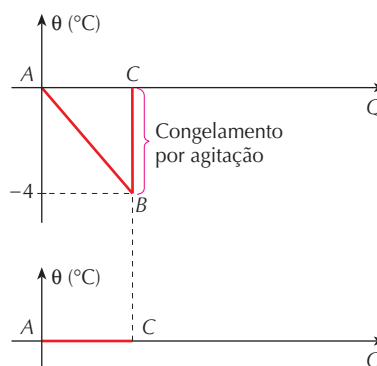
#### Solução:

Vamos indicar por  $M$  a massa total de água no recipiente e por  $m$  a massa que se congela ao se agitar o sistema. À medida que sua temperatura cai de  $0\text{ }^\circ\text{C}$  a  $-4\text{ }^\circ\text{C}$  (superfusão), a massa  $M$  de água perde uma quantidade de calor  $Q$  (trecho **AB** do gráfico), dada por:

$$Q = M \cdot c \cdot \Delta\theta, \text{ sendo } c = 1\text{ cal/g}\cdot^\circ\text{C} \text{ e } \Delta\theta = -4\text{ }^\circ\text{C}$$

$$Q = M \cdot 1 \cdot (-4)$$

$$Q = -4M \quad \textcircled{1}$$



Se não tivesse ocorrido a superfusão, quando o sistema perdesse a mesma quantidade de calor  $Q$ , certa massa  $m$  de água teria sofrido congelamento (patamar **AC** do gráfico). Assim:

$$Q = m \cdot L_s, \text{ sendo } L_s = -80\text{ cal/g}$$

$$Q = m \cdot (-80)$$

$$Q = -80m \quad \textcircled{2}$$

A massa  $m$  de gelo que se forma ao ser agitado o sistema em superfusão é a mesma massa que teria se formado numa solidificação normal. Desse modo, igualando as expressões  $\textcircled{1}$  e  $\textcircled{2}$ , obtemos:

$$-4M = -80m \Rightarrow m = \frac{4M}{80} \Rightarrow m = \frac{M}{20}$$

**Resposta:** Congela-se  $\frac{1}{20}$  da massa total, isto é, 5%.

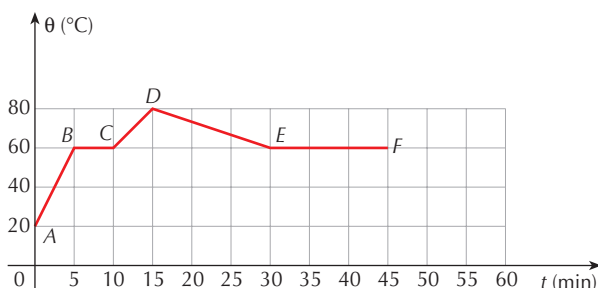
## EXERCÍCIOS PROPOSTOS

**P. 92** Determine a temperatura de 100 g de água em superfusão, sabendo que a interrupção do fenômeno por agitação produz o congelamento brusco de 2 g do líquido. O calor latente de solidificação da água é  $-80 \text{ cal/g}$  e o calor específico da água é  $1 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$ .

**P. 93** (UFPA) Para o fósforo, a temperatura de fusão é  $44 \text{ }^\circ\text{C}$ , o calor específico no estado líquido é  $0,2 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$  e o calor latente de fusão,  $5 \text{ cal/g}$ . Uma certa massa de fósforo é mantida em sobrefusão a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Num certo instante verifica-se uma solidificação brusca. Que fração do total de massa do fósforo se solidifica?

## EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

**P. 94** (Fuvest-SP) Determinada massa de uma substância, inicialmente no estado sólido, encontra-se num recipiente. Um elemento aquecedor, que lhe fornece uma potência constante, é ligado no instante  $t = 0$  e desligado num certo instante. O gráfico indica a temperatura  $\theta$  da substância em função do tempo.

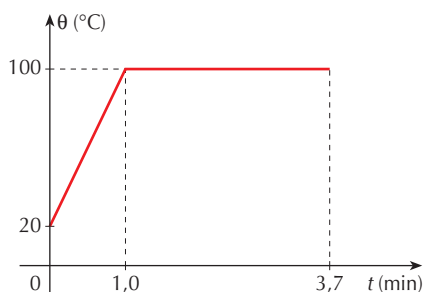


- Em que instante o aquecedor foi desligado e em que intervalo de tempo a substância está totalmente sólida?
- Descreva que fenômeno físico ocorre no trecho BC e que fenômeno físico ocorre no trecho EF.

**P. 95** (Fuvest-SP) O gráfico representa a temperatura  $\theta$  ( $^\circ\text{C}$ ) em função do tempo de aquecimento (em minutos) da água contida numa panela que está sendo aquecida por um fogão. A panela contém inicialmente 0,2 kg de água e a potência calorífica fornecida pelo fogão é constante. O calor latente de vaporização da água é  $540 \text{ cal/g}$  e o calor específico da água líquida é  $1,0 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$ .

Determine:

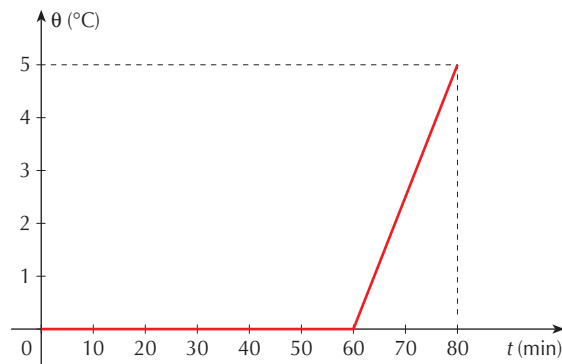
- a quantidade de calor absorvida pela água no primeiro minuto;
- a massa de água que ainda permanece na panela após 3,7 min de aquecimento.



**P. 96** (PUC-SP) Suponha que tomemos 500 g de água e 500 g de álcool etílico, à pressão atmosférica normal, ambos à temperatura de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , e aqueçamos as duas substâncias em recipientes idênticos, fornecendo-lhes a mesma quantidade de calor ( $4.000 \text{ cal/min}$ ), durante 2,0 min. O calor específico médio da água é  $1,00 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$  e o do álcool é  $0,58 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$ . Dados: temperatura de ebulição do álcool =  $78 \text{ }^\circ\text{C}$  (à pressão de 760 mmHg); calor latente de ebulição do álcool =  $204 \text{ cal/g}$ .

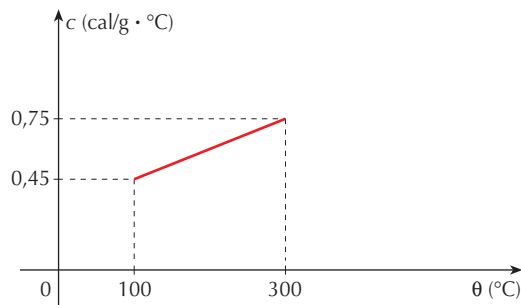
- Qual substância se aquecerá mais? Determine a temperatura final de cada uma.
- Calcule a quantidade de calor que seria recebida pelos 500 g de álcool, inicialmente a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , se ele fosse aquecido até a sua completa vaporização. Construa a curva da temperatura em função da quantidade de calor recebida pelo álcool.

- P. 97** (Olimpíada Brasileira de Física) Dentro de um recipiente existem 2.400 g de água e um pedaço de gelo. O recipiente é colocado no fogão em uma chama branda que fornece calor a uma razão constante. A temperatura foi monitorada durante 80 minutos e o resultado é representado no gráfico ao lado. O calor latente de fusão do gelo é 80 cal/g e o calor específico da água líquida é 1 cal/g · °C. Calcule:
- a) a massa inicial do gelo;
  - b) a taxa de calor transferida ao sistema por minuto.



- P. 98** (Unesp) O gálio é um metal cujo ponto de fusão é 30 °C, à pressão normal; por isso, ele pode liquefazer-se inteiramente quando colocado na palma da mão de uma pessoa. Sabe-se que o calor específico e o calor latente de fusão do gálio são, respectivamente, 410 J/kg · °C e 80.000 J/kg.
- a) Qual a quantidade de calor que um fragmento de gálio de massa 25 g, inicialmente a 10 °C, absorve para fundir-se integralmente quando colocado na mão de uma pessoa?
  - b) Construa o gráfico  $T$  (°C) ×  $Q$  (J) que representa esse processo, supondo que ele comece a 10 °C e termine quando o fragmento de gálio se funde integralmente.

- P. 99** (Uerj) Algumas máquinas de um navio operam utilizando vapor-d'água à temperatura de 300 °C. Esse vapor é produzido por uma caldeira alimentada com óleo combustível, que recebe água à temperatura de 25 °C. O gráfico mostra o comportamento do calor específico  $c$  do vapor-d'água em função da temperatura  $\theta$ .



- a) Considerando as condições descritas, calcule a quantidade de calor necessária para transformar  $1,0 \cdot 10^5$  g de água a 25 °C em vapor a 300 °C.
- b) Admita que:
  - a queima de 1 grama do óleo utilizado libera 10.000 cal;
  - a caldeira, em 1 hora, queima 4.320 g de óleo e seu rendimento é de 70%.

Determine a potência útil dessa caldeira (dados: calor latente de vaporização da água = 540 cal/g; calor específico da água = 1,0 cal/g · °C).

- P. 100** (UFG-GO) Um lago tem uma camada superficial de gelo com espessura de 4,0 cm a uma temperatura de -16 °C. Determine em quanto tempo o lago irá descongelar sabendo que a potência média por unidade de área da radiação solar incidente sobre a superfície da Terra é 320 W/m<sup>2</sup> (dados: calor específico do gelo = 0,50 cal/g · °C; calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g; densidade do gelo = 1,0 g/cm<sup>3</sup>; 1,0 cal = 4,0 J).

- P. 101** (Fuvest-SP) Utilizando pedaços de alumínio a 0 °C, pretende-se resfriar 1.100 g de água, inicialmente a 42 °C. Sendo os calores específicos 1,00 cal/g · °C para a água e 0,22 cal/g · °C para o alumínio, e 80 cal/g o calor latente de fusão do gelo, pergunta-se:

- a) Qual é a massa de alumínio necessária para baixar de 2 °C a temperatura da água?
- b) De posse de uma grande quantidade de alumínio a 0 °C, seria possível transformar toda a água em gelo?
- c) Se o alumínio estiver a -20 °C, que massa mínima do metal será necessária para efetuar a transformação referida no item anterior?

- P. 102** (EEM-SP) Num calorímetro foram colocados um bloco de gelo de massa  $m_G = 0,48$  kg, à temperatura de -20 °C, e um corpo metálico de massa  $m = 50$  g à temperatura de 600 °C. Atendido o equilíbrio térmico, observou-se o aparecimento de uma massa  $m_A = 15$  g de água proveniente da fusão do gelo. São dados  $c_G = 0,50$  cal/g · °C (calor específico do gelo) e  $L_F = 80$  cal/g (calor latente de fusão do gelo).

- a) Determine o calor específico do metal do corpo.
- b) Determine a quantidade de calor utilizada na fusão do gelo.

- P. 103** (UFRJ) Em um calorímetro de capacidade térmica desprezível, há 200 g de gelo a -20 °C. Introduz-se, no calorímetro, água a 20 °C. O calor latente de solidificação da água é -80 cal/g e os calores específicos do gelo e da água (líquida) valem, respectivamente, 0,50 cal/g · °C e 1,0 cal/g · °C. Calcule o valor máximo da massa da água introduzida a fim de que, ao ser atingido o equilíbrio térmico, haja apenas gelo no calorímetro.

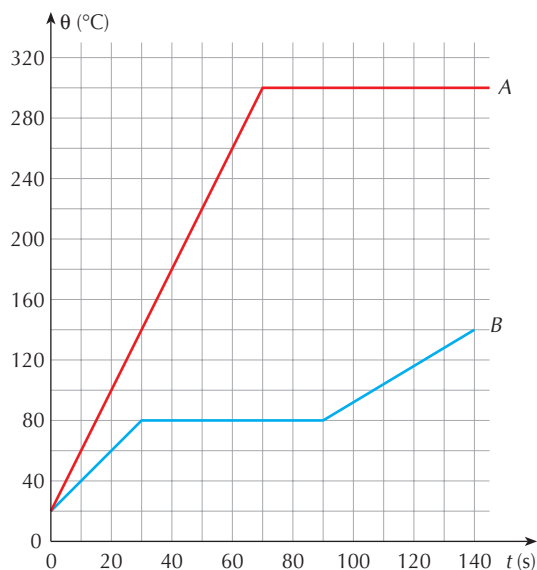
**P. 104** (Vunesp) Um recipiente de capacidade térmica desprezível e isolado termicamente contém 25 kg de água à temperatura de 30 °C.

- Determine a massa de água a 65 °C que se deve despejar no recipiente para se obter uma mistura em equilíbrio térmico à temperatura de 40 °C.
- Se, em vez de 40 °C, quiséssemos uma temperatura final de 20 °C, qual seria a massa de gelo a 0 °C que deveríamos juntar aos 25 kg de água a 30 °C?

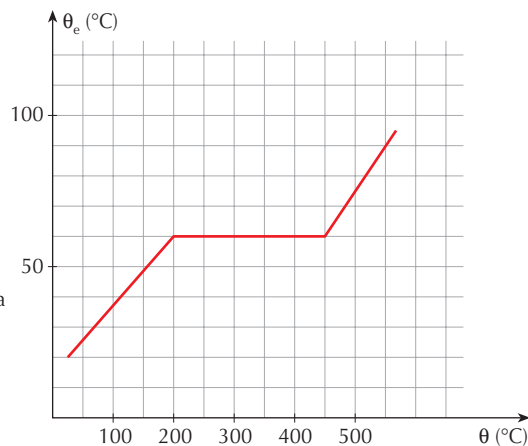
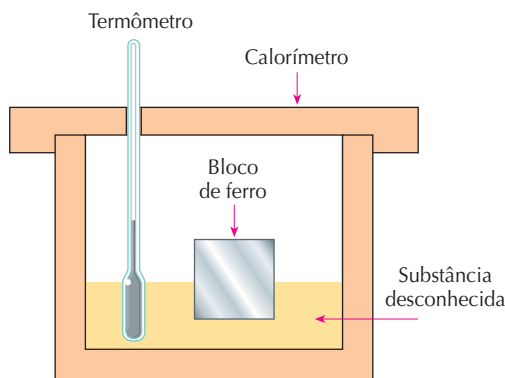
Considere o calor específico da água igual a 4,0 J/g · °C e o calor latente de fusão do gelo igual a 320 J/g.

**P. 105** (Fuvest-SP) As curvas A e B na figura representam a variação da temperatura ( $\theta$ ) em função do tempo ( $t$ ) de duas substâncias A e B, quando 50 g de cada uma são aquecidos separadamente, a partir da temperatura de 20 °C, na fase sólida, recebendo calor numa taxa constante de 20 cal/s. Considere agora um experimento em que 50 g de cada uma das substâncias são colocados em contato térmico num recipiente termicamente isolado, com a substância A na temperatura inicial  $\theta_A = 280$  °C e a substância B na temperatura inicial  $\theta_B = 20$  °C.

- Determine o valor do calor latente de fusão  $L_b$  da substância B.
- Determine a temperatura de equilíbrio do conjunto no final do experimento.
- Se a temperatura final corresponder à mudança de fase de uma das substâncias, determine a quantidade dela em cada uma das fases.



**P. 106** (Fuvest-SP) 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. Em sucessivas experiências, ele coloca no calorímetro a substância desconhecida, sempre no estado sólido, à temperatura  $\theta_0 = 20$  °C, e o bloco de ferro, a várias temperaturas iniciais  $\theta$ , medindo em cada caso a temperatura final de equilíbrio térmico  $\theta_e$ . O gráfico representa o resultado das experiências.



A razão das massas do bloco de ferro e da substância desconhecida é  $\frac{m_f}{m_s} = 0,8$ . Considere o valor do calor específico do ferro igual a 0,1 cal/g · °C. A partir dessas informações, determine para a substância desconhecida:

- a temperatura de fusão ( $\theta_{\text{fusão}}$ );
- o calor específico ( $c_s$ ) na fase sólida;
- o calor latente de fusão ( $L$ ).

**P. 107** (Olimpíada Paulista de Física) Duas estudantes debatiam entusiasticamente sobre o processo de formação de gelo em nuvens. A primeira, chamada Lia, dizia: "Sabemos que a água se congela à temperatura de 0 °C, assim o gelo nas nuvens tem que se formar a uma temperatura próxima desse valor". A outra aluna, Marceli, tinha uma ideia bastante diferente; ela dizia: "Se dividirmos uma quantidade de água em pequenas gotículas, então a água pode super-resfriar-se até -40 °C. Assim, o gelo formado nas nuvens pode estar a uma temperatura muito mais baixa que 0 °C". Com qual das duas alunas você concorda? Justifique.