

# Capítulo 1

1. TERMOLOGIA: ASPECTOS MACROSCÓPICOS E MICROSCÓPICOS
2. ENERGIA TÉRMICA. CALOR
3. NOÇÃO DE TEMPERATURA
4. OS ESTADOS DE AGREGAÇÃO DA MATÉRIA

## INTRODUÇÃO À TERMOLOGIA

*Nesta introdução à Termologia, apresentamos os conceitos de energia interna e de energia térmica, acentuando o caráter energético do calor. A noção de temperatura é discutida sob o ponto de vista macroscópico e microscópico. Os estados de agregação da matéria também são analisados macroscópica e microscopicamente.*

### 1. TERMOLOGIA: ASPECTOS MACROSCÓPICOS E MICROSCÓPICOS

Iniciamos este segundo volume com a Termologia, parte da Física que estuda o calor. Em Termologia, como em outras partes da Física, podemos interpretar os fenômenos de dois pontos de vista diferentes, que muitas vezes se completam: o ponto de vista macroscópico e o microscópico.

O estudo macroscópico só se preocupa com os aspectos globais do sistema: o volume que ocupa, sua temperatura e outras propriedades que podemos perceber pelos nossos sentidos. No primeiro volume estudamos a Mecânica, em geral do ponto de vista macroscópico, analisando as propriedades globais do corpo: energia, posição, velocidade etc. Porém, muitas vezes, para uma compreensão mais profunda do fenômeno, adotamos o ponto de vista microscópico, onde são consideradas grandezas indiretamente medidas, não-sugeridas pelos nossos sentidos.

Nos fenômenos térmicos, microscopicamente consideramos a energia das moléculas, suas velocidades, interações etc. Entretanto, os resultados obtidos microscopicamente devem ser compatíveis com o estudo feito por meio de grandezas macroscópicas.

Os dois pontos de vista se completam na Termologia, fornecendo de um mesmo fenômeno uma compreensão mais profunda. Por exemplo, a noção de temperatura a partir da sensação de quente e frio sugerida pelos nossos sentidos (ponto de vista macroscópico) se aprofunda quando consideramos o movimento molecular e entendemos a temperatura a partir desse movimento (ponto de vista microscópico).

Esse entrelaçamento de métodos é característico do estudo atual da Física.

### 2. ENERGIA TÉRMICA. CALOR

As moléculas constituintes da matéria estão em contínuo movimento, denominado agitação térmica. A **energia cinética** associada a esse movimento é chamada **energia térmica**.

A energia térmica de um corpo pode variar. Assim, se colocarmos água em presença da chama de um bico de gás, o movimento de suas moléculas tornar-se-á mais intenso: a energia térmica aumentará (Fig. 1a). Se colocarmos a água em presença de gelo, ocorrerá uma diminuição do movimento molecular: a energia térmica diminuirá (Fig. 1b).

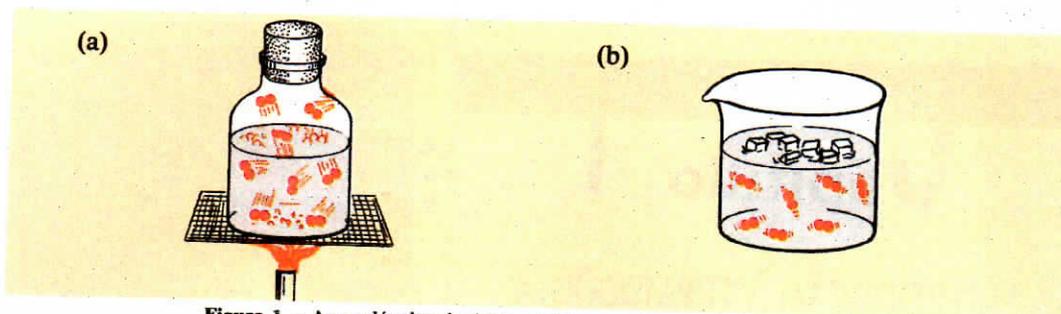


Figura 1 - As moléculas da água quente se agitam mais intensamente.

Nos exemplos anteriores, há corpos quentes (o bico de gás) e corpos frios (o gelo). Observe que, ao utilizar os termos quente e frio, estamos introduzindo uma noção subjetiva de temperatura, baseada em sensações apreendidas pelo tato. Assim, dizemos que um corpo quente está a uma temperatura mais elevada que um corpo frio.

A energia térmica pode transferir-se de um corpo para outro quando entre eles houver uma **diferença de temperatura**. A **energia térmica em trânsito** é denominada **calor**.

A idéia de que o calor é uma forma de energia só foi estabelecida em Física a partir do século passado; até então entendia-se erroneamente o calor como uma substância que se incorporava aos corpos ou sistemas. Joule, no século passado, estabeleceu definitivamente que calor é energia.

A medida da **quantidade de calor** trocada entre dois corpos é, portanto, uma medida de energia. Vimos no Volume 1 que a unidade de energia no Sistema Internacional é o **joule (J)**. No entanto, utiliza-se, também, como medida das quantidades de calor, a **caloria** (símbolo **cal**), unidade estabelecida antes de se entender o calor como forma de energia. Sabe-se atualmente que:

$$1 \text{ caloria} = 4,186 \text{ joules}$$

### 3. NOÇÃO DE TEMPERATURA

Podemos considerar a **temperatura** de um corpo como sendo a **medida do grau de agitação de suas moléculas**. Dessa forma, supondo não haver mudança de fase, quando o corpo recebe energia térmica, suas moléculas passam a se agitar mais intensamente: a temperatura aumenta. Ao perder energia, as moléculas do corpo se agitam com menor intensidade: a temperatura diminui. Na Figura 2 as moléculas do gás aumentam seu grau de agitação ao receberem energia térmica através da chama do bico de gás.

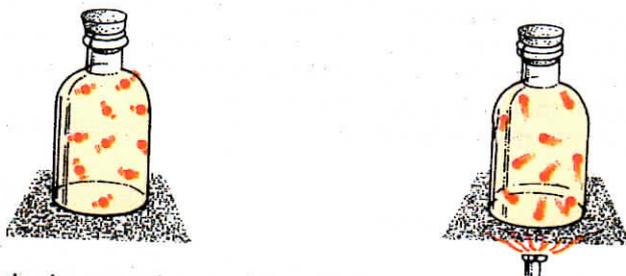


Figura 2 - As moléculas do gás em contato com a chama possuem mais energia cinética: o gás está em temperatura mais elevada.

A transferência de calor entre dois corpos pode ser explicada através da diferença entre as suas temperaturas. Assim, se dois corpos a temperaturas diferentes forem colocados em presença, as moléculas lentas do corpo frio aumentam sua velocidade e as moléculas

rápidas do corpo que  
outras palavras, hou  
o corpo mais frio.

A situação f  
corpos constitui o  
suaem obrigatoriamente

A observação p  
terceiro, eles estão em  
**da Termodinâmica**. A  
um corpo *B* também  
equilíbrio térmico ent

### 4. OS ESTADOS I

Estamos habitu  
vapor, podendo passa  
derreter-se passando a

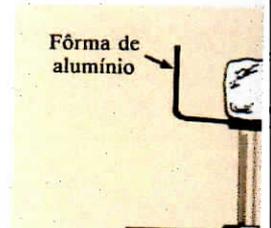


Figura 3 - O cubo de gelo se

As fases sólida,  
uma diferença física t  
um modo geral, os e  
agregação: sólido, líq

Um sólido tem v  
que o contém, mas s  
recipiente fechado, qu

Esses estados de  
de moléculas e que est  
liberdade, dependendo

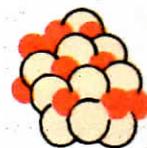
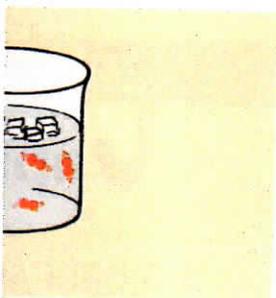


Figura 4 - No sólido *S* as  
Nos estados líquido e gasoso



mente.

corpos frios (o gelo).  
uma noção subjetiva  
dizemos que um corpo

quando entre eles houver  
dominada calor.

em Física a partir  
uma substância que se  
deleceu definitivamente

portanto, uma medida  
ema Internacional é o  
des de calor, a **caloria**  
mo forma de energia.

a medida do grau de  
ca de fase, quando o  
mais intensamente: a  
e agitam com menor  
s aumentam seu grau  
de gás.

o gás está em temperatura

através da diferença  
rentes forem coloca-  
cidade e as moléculas

rápidas do corpo quente têm sua velocidade diminuída até ser alcançado um equilíbrio. Em outras palavras, houve uma passagem de energia térmica (calor) do corpo mais quente para o corpo mais frio.

A situação final de equilíbrio que traduz uma **igualdade de temperatura** dos corpos constitui o **equilíbrio térmico**. Assim, dois corpos em equilíbrio térmico possuem obrigatoriamente temperaturas iguais.

A observação permite concluir: "se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro, eles estão em equilíbrio térmico entre si". Esse fato é conhecido como **Lei Zero da Termodinâmica**. Assim, se um corpo *A* está em equilíbrio térmico com um corpo *C*, e um corpo *B* também está em equilíbrio térmico com o corpo *C*, os corpos *A* e *B* estão em equilíbrio térmico entre si.

#### 4. OS ESTADOS DE AGREGAÇÃO DA MATÉRIA

Estamos habituados com o fato de a água apresentar-se como líquido, sólido ou vapor, podendo passar de uma para outra situação. Assim, um cubo de gelo (sólido) pode derreter-se passando a líquido, que, posteriormente, por aquecimento, passa a vapor (Fig. 3).

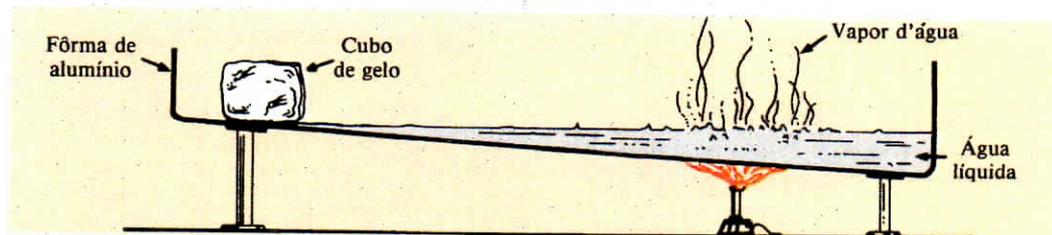


Figura 3 - O cubo de gelo se derrete transformando-se em água líquida; esta, por aquecimento, se transforma em vapor.

As fases sólida, líquida e gasosa constituem os estados de agregação da matéria (há uma diferença física entre gás e vapor que discutiremos em outro capítulo). Portanto, de um modo geral, os materiais que nos rodeiam podem se encontrar em três estados de agregação: sólido, líquido e gasoso.

Um sólido tem volume e forma definidos. Um líquido assume a forma do recipiente que o contém, mas seu volume é definido. Um gás (ou vapor) preenche totalmente um recipiente fechado, qualquer que seja a sua forma.

Esses estados de agregação são explicados admitindo que qualquer matéria é formada de moléculas e que estas estão em movimento, mais ou menos intenso, com maior ou menor liberdade, dependendo do estado de agregação (Fig. 4).

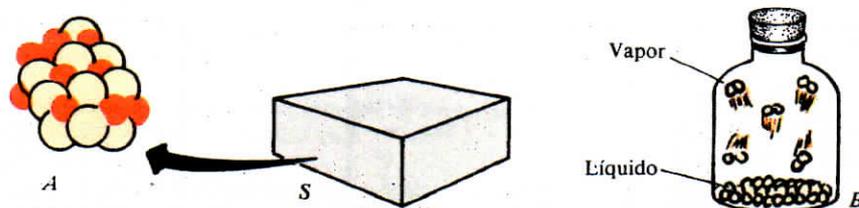


Figura 4 - No sólido *S* as moléculas têm movimento débil, estando fortemente coesas, como é destacado em *A*. Nos estados líquido e gasoso as moléculas têm maior liberdade de movimento, como é mostrado esquematicamente em *B*.

# Capítulo 2

## A MEDIDA DA TEMPERATURA - TERMOMETRIA

1. SENSAÇÃO TÉRMICA
2. MEDIDA DA TEMPERATURA. TERMÔMETRO
3. GRADUAÇÃO DE UM TERMÔMETRO. ESCALAS TERMOMÉTRICAS
4. CONVERSÃO ENTRE AS ESCALAS CELSIUS E FAHRENHEIT
5. VARIAÇÃO DE TEMPERATURA
6. FUNÇÃO TERMOMÉTRICA
7. A TEMPERATURA COMO MEDIDA DA AGITAÇÃO TÉRMICA. ESCALA ABSOLUTA DE KELVIN

Estabelecemos, no presente capítulo, as normas para medida da temperatura. Apresentamos as escalas termométricas usuais Celsius, Fahrenheit e Kelvin.

### 1. SENSAÇÃO TÉRMICA

É freqüente usarmos os termos frio, quente, morno etc., para traduzir a sensação que temos ao entrar em contato com um sistema. Assim, do mesmo modo que a luz impressiona nossa visão (sensação luminosa) e que o som impressiona nossa audição (sensação sonora), é o sentido do tato que nos proporciona a sensação térmica, que constitui a primeira noção de temperatura de um sistema.

No entanto, esse critério "sensitivo" para avaliação das temperaturas é impreciso, pois depende da pessoa que sente e das condições nas quais se encontrava anteriormente.

### 2. MEDIDA DA TEMPERATURA. TERMÔMETRO

Para precisar a noção de temperatura, recorreremos às variações experimentadas por certas propriedades dos corpos quando muda a sensação térmica. Por exemplo, o comprimento de uma barra aumenta (dilatação), quando ela se torna mais quente. Deste modo, a temperatura  $t$  da barra pode ser avaliada indiretamente pelo valor assumido por seu comprimento  $L$  (Fig. 1).

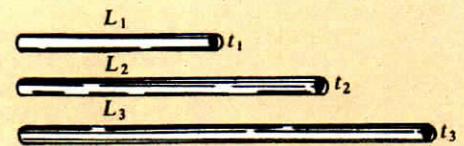


Figura 1 - A cada valor  $L$  do comprimento da barra corresponde um valor  $t$  de temperatura.



ERATURA

A DE SÓLIDOS

De um modo geral, sendo  $x$  uma grandeza conveniente que define uma das propriedades do corpo (no caso anterior  $x = L$ ), a cada valor de  $x$  faz-se corresponder um determinado valor  $t$  de temperatura.

A grandeza  $x$  é denominada grandeza termométrica. A correspondência entre os valores da grandeza  $x$  e da temperatura  $t$  constitui a função termométrica. Ao corpo em observação dá-se o nome de termômetro. A barra da Figura 1, na qual a cada valor do comprimento  $L$  (grandeza termométrica) corresponde um valor da temperatura  $t$ , pode ser usada como termômetro.

O termômetro mais comum é o **termômetro de mercúrio** (Fig. 2), baseado na dilatação do mercúrio contido num recipiente de vidro (bulbo) ao qual se adapta uma haste de diâmetro pequeno e constante.

A utilização do termômetro para avaliação da temperatura de um sistema fundamenta-se no fato de que, após algum tempo em contato, o sistema e o termômetro adquirem a mesma temperatura, isto é, alcançam o **equilíbrio térmico**.

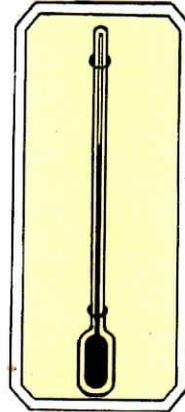
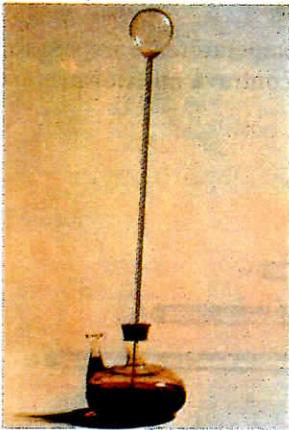


Figura 2 – O termômetro mais utilizado é o de mercúrio.



Réplica do termoscópio a ar, termômetro rudimentar criado por Galileu. Ele é constituído de um bulbo ligado a um tubo de vidro que tem a extremidade inferior imersa em um líquido. Quando a temperatura do ar contido no bulbo aumenta, a pressão do ar também aumenta e o nível do líquido desce. Quando a temperatura do ar diminui, a pressão do ar diminui e o nível da água sobe.

### 3. GRADUAÇÃO DE UM TERMÔMETRO. ESCALAS TERMOMÉTRICAS

O conjunto dos valores numéricos que pode assumir a temperatura  $t$  constitui uma escala termométrica, que é estabelecida ao se graduar um termômetro.

Para a graduação de um termômetro comum de mercúrio, procede-se da seguinte maneira:

1º) Escolhem-se dois sistemas cujas temperaturas sejam invariáveis no decorrer do tempo e que possam ser reproduzidos facilmente quando necessário. Estes sistemas são denominados pontos fixos, sendo usualmente escolhidos:

- primeiro ponto fixo (ponto do gelo) – fusão do gelo sob pressão normal (1 atmosfera):  $t_G$
- segundo ponto fixo (ponto do vapor) – ebulição da água sob pressão normal (1 atmosfera):  $t_V$

2º) O ter (Fig. 3) atribui menor

Figura 3 – Graduação da água, sob pressão

3º) O inter  $t_V$  e  $t_G$  intervalo

Atualmente o ponto do gelo fixos é dividido e Celsius, cujo sím



Figura 4

Em países do o ponto do gelo e cada uma das qua

Note que a e valores de  $t_G$  e  $t_V$

CELSIUS, A adotado 100 (cem) par FAHRENHEIT (zero) para uma mistu

\* Toda escala e centesimal ou centígrat

escala já havia se apagado.  
de 7 cm e, pondo-o em gelo  
água e a coluna de mercúrio

e) 45°C

absoluta a uma variação de:  
e) 80 K

muito baixa". Dos valores

e) 0 K

do Sol, a temperatura vai  
a termométrica utilizada,

escalas citadas.

la Kelvin, foi de 300 K.  
ômetro indicou 68°F. A

e) 368°C

# Capítulo 3

## DILATAÇÃO TÉRMICA DE SÓLIDOS E LÍQUIDOS

1. INTRODUÇÃO
2. DILATAÇÃO LINEAR DOS SÓLIDOS
3. GRÁFICOS DA DILATAÇÃO LINEAR
4. DILATAÇÃO SUPERFICIAL DOS SÓLIDOS
5. DILATAÇÃO VOLUMÉTRICA DOS SÓLIDOS
6. DILATAÇÃO TÉRMICA DOS LÍQUIDOS
7. RELAÇÃO ENTRE OS COEFICIENTES

*O aumento de temperatura geralmente acarreta, nos sólidos e nos líquidos, aumento em suas dimensões. Experimentalmente, são estabelecidas leis para relacionar as variações das dimensões com as variações de temperatura correspondentes. Essas leis são estudadas no presente capítulo.*

### 1. INTRODUÇÃO

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

Geralmente, quando aumenta a temperatura de um corpo, suas dimensões aumentam: é a **dilatação térmica**. Ocorre a **contração térmica** ao diminuírem as dimensões do corpo, em virtude da diminuição da temperatura.

A dilatação de um corpo pelo aumento de temperatura é consequência do aumento da agitação das partículas do corpo: as mútuas colisões, mais violentas após o aquecimento, causam maior separação entre as moléculas.

Imaginemos uma experiência simples para evidenciar esse fato. Um termômetro de mercúrio é colocado no interior de um líquido. Se colocarmos o líquido em presença da chama de um bico de gás (Fig. 1), o termômetro indicará um aumento na temperatura porque: as moléculas do líquido recebem calor da chama, aumentando sua energia cinética; essas moléculas golpeiam o vidro do bulbo do termômetro com maior frequência e mais violentamente; as partículas do vidro transmitem energia de vibração às moléculas do mercúrio através de colisões; a coluna de mercúrio se dilata, pois há aumento da distância entre suas partículas, devido à agitação mais intensa delas.

Por conveniência didática, o estudo da dilatação dos sólidos é feito da seguinte maneira:

- Dilatação linear – aumento de uma dimensão, como, por exemplo, o comprimento de uma barra (Fig. 2a).
- Dilatação superficial – aumento da área de uma superfície, como a de uma placa (Fig. 2b).
- Dilatação volumétrica – aumento do volume de um corpo (Fig. 2c).

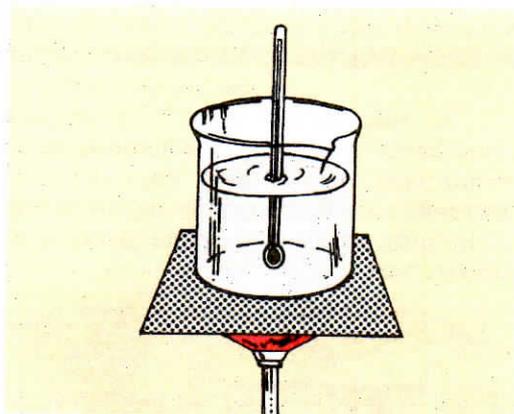


Figura 1 – No termômetro de mercúrio a dilatação térmica do líquido é usada na medida da temperatura.

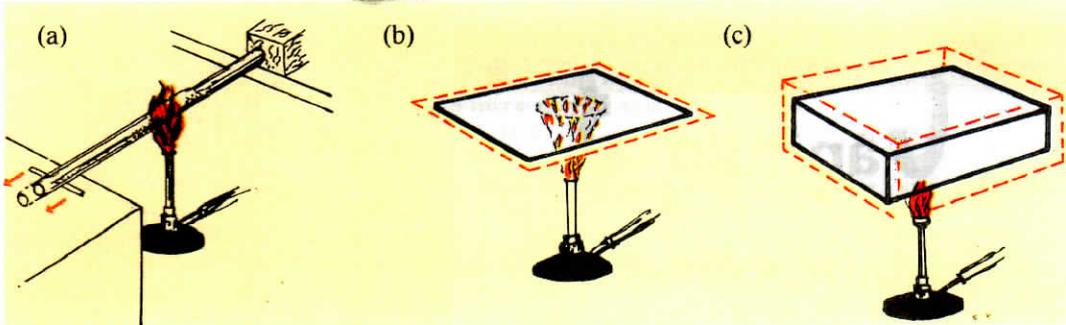


Figura 2 – O aumento da temperatura de um corpo sólido produz dilatação linear (a), dilatação superficial (b) e dilatação volumétrica ou cúbica (c).

Na verdade, a dilatação de um sólido é sempre volumétrica, pois suas três dimensões estão variando com a temperatura. No entanto, costumamos analisar apenas uma dimensão (dilatação linear) quando esta predomina sobre as outras duas, como é o caso do comprimento da barra da Figura 2a. Igualmente, analisarmos a variação da área da placa da Figura 2b não significa que a espessura não variou. Apenas não estudamos sua variação porque a dimensão da espessura é pequena em relação às outras duas.

Quanto aos líquidos, o fato de não terem forma própria e estarem contidos em recipientes sólidos obriga-nos a estudar apenas a dilatação volumétrica.

## 2. DILATAÇÃO LINEAR DOS SÓLIDOS

Se aumentarmos de  $10^{\circ}\text{C}$  a temperatura de uma barra de ferro com 100 cm de comprimento, essa dimensão aumenta de 0,012 cm (Fig. 3a). Submetida ao mesmo aquecimento, uma barra de ferro com o dobro do comprimento (200 cm) tem seu comprimento aumentado de 0,024 cm, isto é, o dobro da dilatação anterior (Fig. 3b). Para outro comprimento inicial, a mesma elevação de temperatura acarretará uma outra dilatação proporcional.

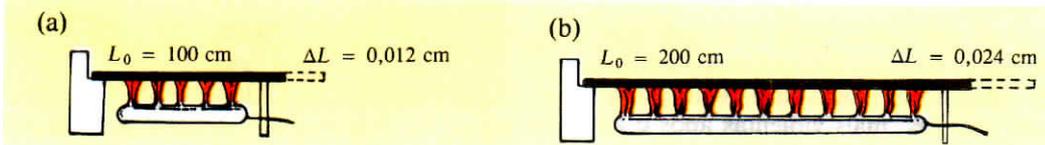


Figura 3 – Influência do comprimento inicial na dilatação.

Essa experiência indica que a variação de comprimento  $\Delta L$  de uma barra ao ser aquecida é diretamente proporcional ao seu comprimento inicial  $L_0$ .

Conservando um comprimento inicial, por exemplo  $L_0 = 100$  cm, para uma barra de ferro, a elevação de  $10^{\circ}\text{C}$  na temperatura produz a dilatação de 0,012 cm (Fig. 4a). Uma elevação de temperatura duas vezes maior ( $20^{\circ}\text{C}$ ) aumenta de 0,024 cm o comprimento, isto é, o dobro da dilatação anterior (Fig. 4b).

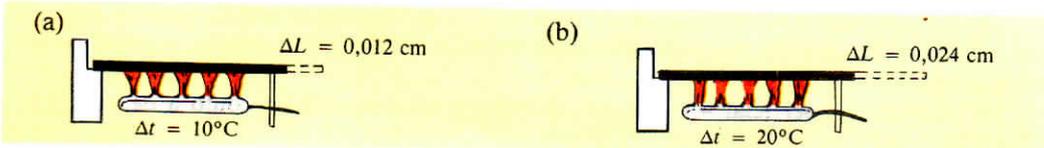


Figura 4 – Influência da variação de temperatura na dilatação.

Portanto, proporcio

Repetindo mesmo compo:

Portanto, material

Tendo e comprimento i

onde  $\alpha$  é uma característico

Tomem a variação d  $\Delta L = 0,012$

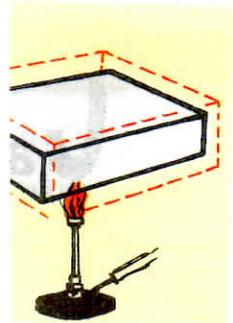
O valor significado: o e para cada 1

Assim, grau Celsius

De  $\Delta L$  o material de mais se dilata: como o vidro dilatação. Pa

Maior dilatação

O coefi entre a temp dada temper tura  $\Delta t$  tend valor médio temperatura.

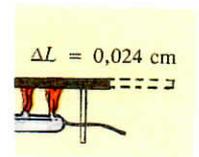


Dilatação superficial (L)

as três dimensões  
as uma dimensão  
caso do compri-  
meira da placa da  
nos sua variação

em contidos em

com 100 cm de  
o mesmo aqueci-  
o comprimento  
b). Para outro  
outra dilatação



a barra ao ser

a uma barra de  
(Fig. 4a). Uma  
comprimento, isto

= 0,024 cm

Portanto, a variação de comprimento  $\Delta L$  de uma barra ao ser aquecida é diretamente proporcional à variação de temperatura  $\Delta t$ .

Repetindo as mesmas experiências para barras de materiais diferentes, observamos o mesmo comportamento, mas as dilatações são particulares para cada caso.

Portanto, a variação de comprimento  $\Delta L$  de uma barra ao ser aquecida depende do material que a constitui.

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

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

onde  $\alpha$  é uma constante de proporcionalidade denominada **coeficiente de dilatação linear**, característico de cada material. A fórmula acima constitui a **Lei da Dilatação Linear**.

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

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

O valor encontrado é o coeficiente de dilatação linear do ferro e tem o seguinte significado: **ocorre uma dilatação de 0,000012 cm para cada 1 cm de comprimento da barra e para cada 1°C de variação de temperatura**. Usualmente se escreve:

$$\alpha = 0,000012^\circ\text{C}^{-1} \quad \text{ou} \quad \alpha = 12 \cdot 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$$

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

### UNIDADE DE COEFICIENTE DE DILATAÇÃO LINEAR: $^\circ\text{C}^{-1}$

De  $\Delta L = \alpha L_0 \Delta t$ , observe que para mesmo  $L_0$  e mesmo  $\Delta t$  sofre maior dilatação  $\Delta L$  o material de maior coeficiente de dilatação  $\alpha$ . Os metais estão entre as substâncias que mais se dilatam, isto é, que apresentam maior coeficiente de dilatação. Outros materiais, como o vidro pirex, apresentam pequeno coeficiente de dilatação e, portanto, reduzida dilatação. Para comparação, apresentamos a seguir alguns coeficientes de dilatação linear:

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

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

Observação:

Podemos explicar o aumento do orifício tendo em vista que na dilatação há aumento da distância entre as moléculas. Realmente, aumentando o orifício, as moléculas da borda passam a ocupar um maior perímetro, afastando-se umas das outras.



## EXERCÍCIOS PROPOSTOS

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

## 5. DILATAÇÃO VOLUMÉTRICA DOS SÓLIDOS

Na Figura 8 está representado um sólido homogêneo com forma de paralelepípedo em duas temperaturas,  $t_0$  e  $t > t_0$ . As dimensões lineares desse sólido são  $x_0$ ,  $y_0$  e  $z_0$  na temperatura inicial  $t_0$ , passando para  $x$ ,  $y$  e  $z$  quando na temperatura final  $t$ . Os volumes inicial e final valem, respectivamente:  $V_0 = x_0 y_0 z_0$ ;  $V = xyz$ .

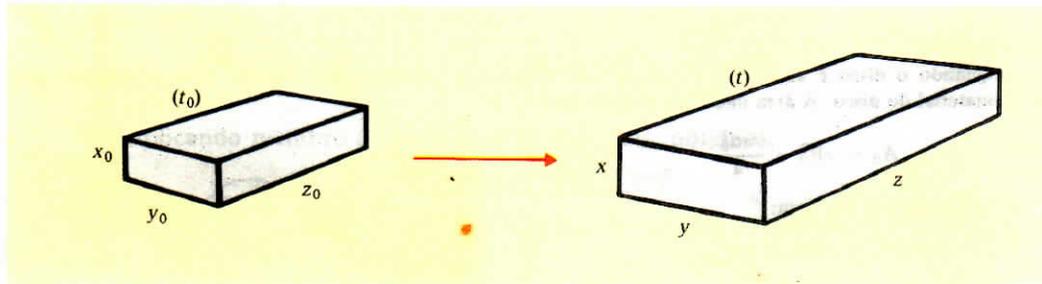


Figura 8 – Quando a temperatura aumenta, aumentam as dimensões lineares do sólido e, portanto, seu volume.

Aplicando a Lei da Dilatação Linear a cada uma das dimensões, vem:

$$\begin{aligned}x &= x_0 (1 + \alpha \Delta t) \\y &= y_0 (1 + \alpha \Delta t) \\z &= z_0 (1 + \alpha \Delta t)\end{aligned}$$

Multiplicando membro a membro as fórmulas anteriores, obtemos:

$$\begin{aligned}xyz &= x_0 y_0 z_0 (1 + \alpha \Delta t)^3 \\V &= V_0 (1 + 3\alpha \Delta t + 3\alpha^2 \Delta t^2 + \alpha^3 \Delta t^3)\end{aligned}$$

Os term  
Assim, fazem

Nessa fô  
de que é feito  
recíproco ( $^\circ\text{C}$

Pc  
Fe  
O  
Al

A parti

Como

Portant  
e à variação

# Capítulo 4

## A MEDIDA DO CALOR – CALORIMETRIA

1. ENERGIA TÉRMICA EM TRÂNSITO: CALOR
2. CALOR SENSÍVEL E CALOR LATENTE
3. QUANTIDADE DE CALOR SENSÍVEL: EQUAÇÃO FUNDAMENTAL DA CALORIMETRIA. CALOR ESPECÍFICO
4. TROCAS DE CALOR. CALORÍMETRO

EXERCÍCIOS ESPECIAIS DE CALORIMETRIA

LEITURA: A HISTÓRIA DA FÍSICA I

No presente capítulo estudamos as trocas de calor entre corpos que estão a diferentes temperaturas. Apresentamos também o conceito de calor específico de uma substância e o de capacidade térmica de um corpo.

### 1. ENERGIA TÉRMICA EM TRÂNSITO: CALOR

Considere dois corpos A e B em diferentes temperaturas  $t_A$  e  $t_B$ , tais que  $t_A > t_B$  (Fig. 1a). Colocando-os em presença, verifica-se que a energia térmica é transferida de A para B. Essa **energia térmica em trânsito** é denominada **calor**. A passagem do calor cessa ao ser atingido o equilíbrio térmico, isto é, quando as temperaturas se igualam (Fig. 1b).

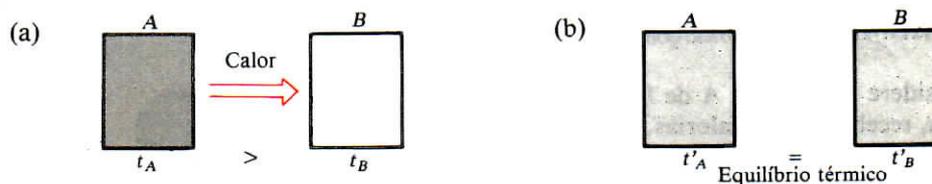


Figura 1 – O corpo A cede calor ao corpo B, até as temperaturas se igualarem.

**CALOR é energia térmica em trânsito entre corpos a diferentes temperaturas.**

A unidade em que é medida a quantidade de calor  $Q$  trocada pelos corpos é a unidade de energia, já que se trata de energia térmica em trânsito.

Assim, no Sistema Internacional, a unidade de quantidade de calor é o **joule (J)**. Entretanto, por razões históricas, existe outra unidade, a **caloria (cal)**, cuja relação com o joule é:

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

Múltiplo:

$$1 \text{ kcal} = 1.000 \text{ cal}$$

### 2. CALOR SENSÍVEL E CALOR LATENTE

Ao colocar no fogo uma barra de ferro (Fig. 2), logo verificaremos que ela se aquece, isto é, sofre uma elevação na sua temperatura. Se, entretanto, fizermos o mesmo com um bloco de gelo a  $0^\circ\text{C}$  (Fig. 3), verificaremos que ele se derrete, isto é, se transforma em líquido, mas sua temperatura não se modifica.



Figura 2 - A barra de ferro se aquece ao ser levada ao fogo.

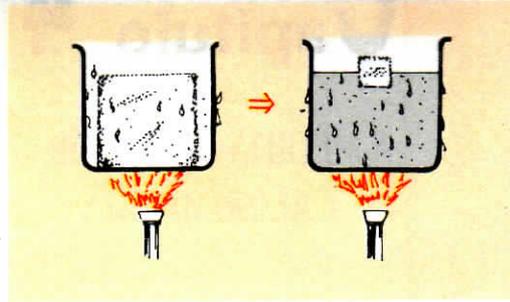


Figura 3 - Em presença do fogo, o gelo a  $0^{\circ}\text{C}$  se derrete, não sofrendo variação de temperatura.

Portanto, quando um corpo recebe calor, este pode produzir **variação de temperatura** ou **mudança de estado**. Quando o efeito produzido é a variação de temperatura, dizemos que o corpo recebeu **calor sensível**. Se o efeito se traduz pela mudança de estado, o calor recebido pelo corpo é dito **calor latente**. Nos exemplos citados, o ferro recebeu calor sensível e o gelo recebeu calor latente.

De modo análogo, ao perder calor, se houver diminuição de temperatura diz-se que o corpo perdeu calor sensível. Se houver mudança de estado, o corpo terá perdido calor latente.

Neste capítulo analisaremos apenas as situações em que os corpos trocam calor sensível, isto é, não mudam de estado. As trocas de calor latente serão analisadas no capítulo seguinte, quando do estudo das mudanças de fase.

### 3. QUANTIDADE DE CALOR SENSÍVEL. EQUAÇÃO FUNDAMENTAL DA CALORIMETRIA. CALOR ESPECÍFICO

Considere uma esfera *A* de ferro, que é aquecida, recebendo 220 calorias. Sua temperatura se eleva de  $20^{\circ}\text{C}$  (Fig. 4a). Outra esfera *B*, idêntica à primeira, à mesma temperatura inicial  $t_i$ , é aquecida por uma fonte mais intensa, recebendo uma quantidade de calor três vezes superior, isto é, 660 calorias. Sua temperatura se eleva de  $60^{\circ}\text{C}$  (Fig. 4b), o que nos permite concluir:

As quantidades de calor  $Q$  recebidas (ou cedidas) por corpos de mesmo material e mesma massa são diretamente proporcionais às variações de temperatura  $\Delta t$ .

Considere, agora, duas esferas *C* e *D* de mesmo material (ferro), mas com massas diferentes,  $m_C = 100$  gramas e  $m_D = 300$  gramas ( $m_D = 3m_C$ ). Para que sofram a mesma variação de temperatura  $\Delta t$ , por exemplo,  $20^{\circ}\text{C}$ , devem receber quantidades de calor diferentes (Fig. 5): *C* recebe  $Q_C = 220$  calorias e *D* recebe  $Q_D = 660$  calorias, isto é,  $Q_D = 3 Q_C$ .

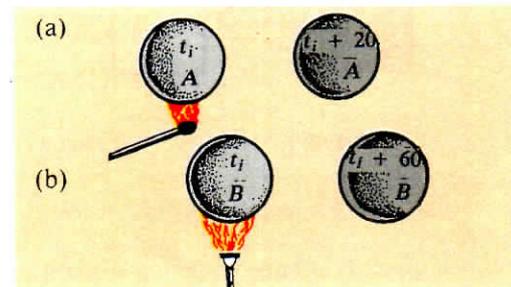


Figura 4 - O corpo *B* recebe maior quantidade de calor e, por isso, sofre maior variação de temperatura.

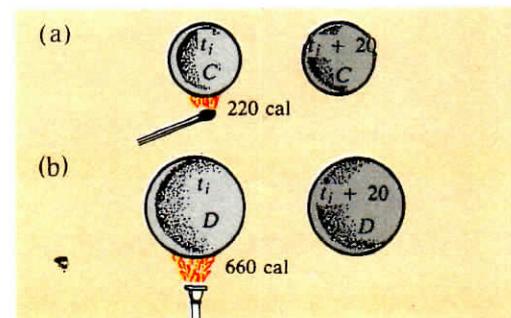


Figura 5 - O corpo *D* recebeu maior quantidade de calor para sofrer a mesma variação de temperatura que o corpo *C*.

Assim:

As quantidades de calor e as massas diferem diretamente com a variação de temperatura.

Resumindo:

As quantidades de calor e as massas são diretamente proporcionais às variações de temperatura.

Assim:

Nessa fórmula,  $Q$  é o calor recebido ou perdido,  $m$  é a massa do corpo e  $c$  é o calor específico da substância.

Observe que o calor específico de uma substância é constante para qualquer quantidade de substância. Por exemplo, o calor específico de uma substância é o mesmo para 1 kg e para 1 g da mesma substância. Portanto, o calor específico é uma propriedade característica das substâncias e não depende da massa.

Para cada substância, há um valor constante para o calor específico.

Quando a temperatura de um corpo diminui, ele libera calor para o meio ambiente.

\* O calor específico de uma substância é a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de 1 kg da substância em  $1^{\circ}\text{C}$ .

Assim:

As quantidades de calor  $Q$  recebidas (ou cedidas) por corpos de mesmo material e massas diferentes são diretamente proporcionais às massas  $m$ , para igual variação de temperatura.

Resumindo as conclusões anteriores, podemos enunciar:

As quantidades de calor  $Q$  recebidas (ou cedidas) por um corpo são diretamente proporcionais à sua massa  $m$  e à variação de temperatura  $\Delta t$ .

Assim:  $Q = cm\Delta t$  ou  $Q = mc\Delta t$

Nessa fórmula, conhecida como **equação fundamental da Calorimetria**, o coeficiente de proporcionalidade  $c$  é uma **característica do material** que constitui o corpo, denominada **calor específico**. Sua unidade usual é cal/g°C, como se infere da equação acima.

$$Q = mc\Delta t \quad c = \frac{Q}{m\Delta t} \quad \text{Unidade: } \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}$$

Observe que se  $m = 1 \text{ g}$  e  $\Delta t = 1^\circ\text{C}$ ,  $c = Q$  (numericamente), isto é, o calor específico de uma substância mede numericamente a **quantidade de calor que faz variar em 1°C a temperatura da massa de 1 g da substância**.

Por exemplo, o calor específico do ferro vale 0,11 cal/g°C. Portanto, para elevar em 1°C a temperatura da massa de 1 g de ferro, devemos fornecer a essa massa 0,11 cal.

Substâncias diferentes apresentam diferentes calores específicos. A água é uma das substâncias de maior calor específico na natureza. De um modo geral, os metais apresentam baixo calor específico, como se depreende dos valores seguintes:

Latão: 0,092 cal/g°C  
Prata: 0,056 cal/g°C  
Ouro: 0,032 cal/g°C

Para cada substância, o calor específico depende do estado de agregação. Por exemplo, para a água, nos três estados, temos:

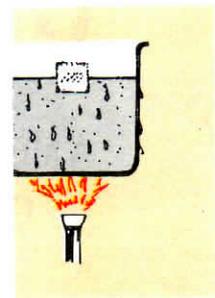
Sólido (gelo): 0,50 cal/g°C  
Água líquida: 1,00 cal/g°C  
Vapor d'água: 0,48 cal/g°C

Quando a temperatura de um corpo se eleva, ele recebeu calor. Se a temperatura de um corpo diminui, é porque ele cedeu calor. Esta diferença é analisada de acordo com o seguinte critério:

**ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA - CALOR RECEBIDO**  
 $\Delta t = t_f - t_i$  Se  $t_f > t_i$   $\Delta t > 0$   $Q > 0$

**ABAIXAMENTO DE TEMPERATURA - CALOR CEDIDO**  
 $\Delta t = t_f - t_i$  Se  $t_f < t_i$   $\Delta t < 0$   $Q < 0$

\* O calor específico definido por essa fórmula é um valor médio para o intervalo de temperatura  $\Delta t$ . O calor específico a uma dada temperatura é dado pelo limite dessa expressão, quando  $\Delta t$  tende a zero. A rigor, o calor específico de uma substância depende da temperatura. Em nosso curso, não levaremos em conta essa variação.

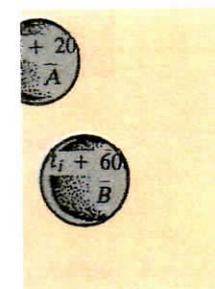


o gelo a 0°C  
: temperatura.

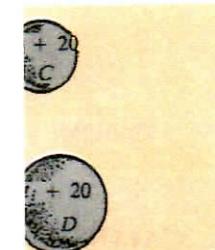
o de temperatura  
eratura, dizemos  
le estado, o calor  
ro recebeu calor

ratura diz-se que  
dido calor latente.  
os trocam calor  
ão analisadas no

## FUNDAMENTAL DA



or quantidade de calor  
de temperatura.



maior quantidade de  
io de temperatura que

# Capítulo 5

## MUDANÇAS DE FASE

1. CONSIDERAÇÕES GERAIS
2. QUANTIDADE DE CALOR LATENTE
3. CURVAS DE AQUECIMENTO E DE RESFRIAMENTO
4. DIAGRAMA DE FASES
5. EQUILÍBRIO SÓLIDO = LÍQUIDO. FUSÃO E SOLIDIFICAÇÃO
6. EQUILÍBRIO LÍQUIDO = VAPOR. EBULIÇÃO E CONDENSAÇÃO
7. PRESSÃO MÁXIMA DE VAPOR. ISOTERMAS DE ANDREWS
8. UMIDADE DO AR. EVAPORAÇÃO
9. EQUILÍBRIO SÓLIDO = VAPOR. SUBLIMAÇÃO

*Este capítulo é dedicado às transformações que ocorrem entre as três fases de uma substância pura. Analisamos as trocas de calor que ocorrem durante as mudanças de fase. Enfatizamos o aspecto microscópico dessas mudanças e a influência da pressão sobre a temperatura em que elas se realizam.*

### 1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

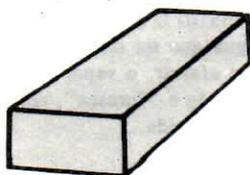
Uma substância pura pode se apresentar em três fases: sólida, líquida e gasosa. Por exemplo, a água pode estar, conforme as condições, na fase sólida (gelo), na fase líquida (água líquida) ou na fase gasosa (vapor d'água).

Na fase gasosa, a substância não apresenta nem forma nem volume definidos. As forças de coesão entre as moléculas são extremamente fracas e permitem grande liberdade de movimentação às moléculas.

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 posições médias. Os sólidos possuem forma e volume bem-definidos.

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



Sólido – forma e volume definidos



Líquido – volume definido; forma do recipiente



Vapor (gás) – volume e forma do recipiente

Figura 1 – As fases 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 estão representadas na Figura 2.

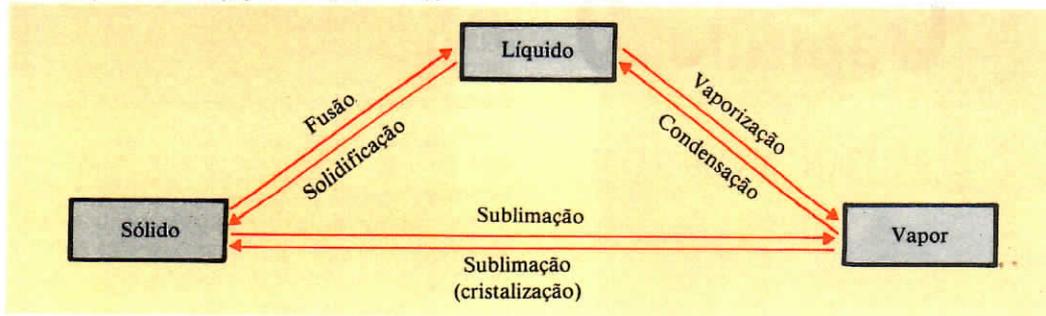


Figura 2 - As mudanças de fase de uma substância.

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 durante o processo corresponde à energia necessária para desfazer o retículo cristalino do sólido.

Terminada a fusão, aquecendo-se o líquido formado, a temperatura cresce, aumentando a agitação de suas moléculas. 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 o processo.



D. SEAWELL / WL-STOCK PHOTOS

Ferro líquido: a fusão do ferro ocorre a  $1.535^{\circ}\text{C}$ , sob pressão normal.



D. TAYLOR / SPL-3/STOCK PHOTOS

Nitrogênio líquido: a condensação do nitrogênio ocorre a  $-195,8^{\circ}\text{C}$ , sob pressão normal.



FÁBIO COLOMBINI

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.

## 2. QUANTIDADE

Imaginemos esse sistema em pr tempo, o gelo se ti fusão permanece a temperatura não v



Figura 3 - En

Quando o ge mantendo-se a ten calor latente de fu

Calor latente a substância mantendo-se

Assim, como e negativa ( $Q < 0$ ) conforme a mudan

De um modo calor latente  $L$ , a regra de três simpl

\* Na verdade, e Entretanto, já está com

## 2. QUANTIDADE DE CALOR LATENTE

Imaginemos um recipiente contendo gelo inicialmente a  $0^{\circ}\text{C}$  (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 ( $0^{\circ}\text{C}$ ). Assim, o sistema está recebendo calor da fonte, mas a temperatura não varia.

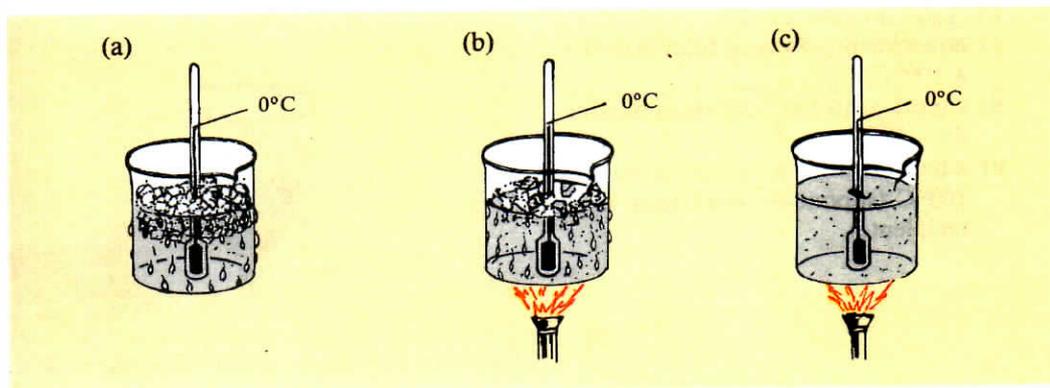


Figura 3 – Enquanto o gelo se derrete, a temperatura se mantém em  $0^{\circ}\text{C}$ , sob pressão normal.

Quando o gelo se derrete, verifica-se que ele deve receber, por grama, 80 calorias, mantendo-se a temperatura constante em  $0^{\circ}\text{C}$ . 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 numericamente a quantidade de calor que a substância recebe (ou cede), por unidade de massa, durante a transformação, mantendo-se constante a temperatura.

Assim, como a quantidade de calor é positiva ( $Q > 0$ ), quando o corpo recebe calor, e negativa ( $Q < 0$ ), quando o cede, 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 $0^{\circ}\text{C}$ )	$L_F = 80 \text{ cal/g}$
Solidificação da água (a $0^{\circ}\text{C}$ )	$L_S = -80 \text{ cal/g}$
Vaporização da água (a $100^{\circ}\text{C}$ )	$L_V = 540 \text{ cal/g}$
Condensação do vapor (a $100^{\circ}\text{C}$ )	$L_C = -540 \text{ cal/g}$

De um 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 por regra de três simples e direta:

$$\frac{1 \text{ g}}{m} = \frac{L}{Q}$$

$$Q = mL$$

OS DA FÍSICA

passar de estado de Figura 2.

itar mais rte para livrarem os. processo

, aumen-recebido entre as

chaleira é esfria e se tituída de

Com os dados deste 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 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:

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

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

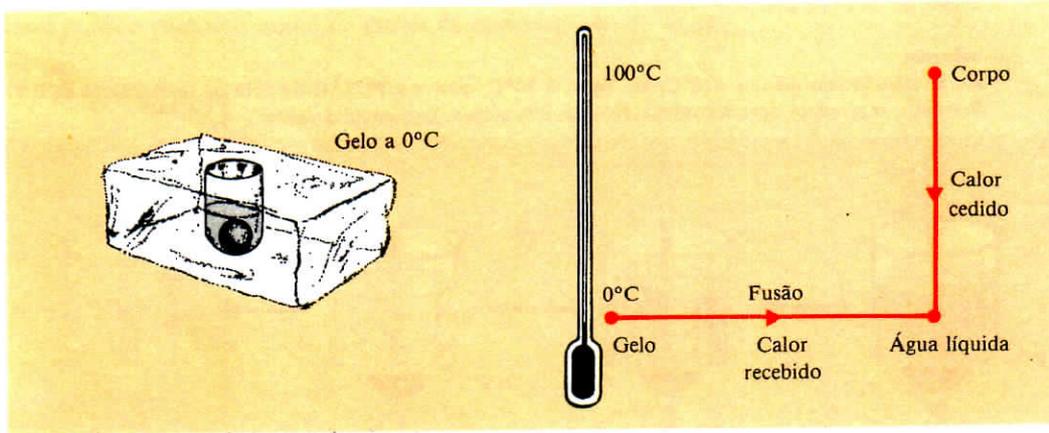
$$Q_3 = 21.000 \text{ cal} - 17.000 \text{ cal} = 4.000 \text{ cal}$$

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

**R.30** Fez-se uma cavidade num grande bloco de gelo a 0°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 2,5 g se derrete, sofrendo fusão sem variação de temperatura. Esquemáticamente:



Dados:

	$m$	$c$	$t_i$	$t_f$	$\Delta t$
(1) Corpo	16 g	$x = ?$	100°C	0°C	-100°C
(2) Fusão	2,5 g	$L_F = 80 \text{ cal/g}$			

Cálculo das quantidades de calor:

$$Q_1 = mc\Delta t = 16 \cdot x(-100) \quad Q_1 = -1.600x$$

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

Como  $Q_1 + Q_2 = 0$ , temos  $-1.600x + 200 = 0$

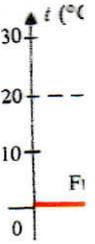
$$200 = 1.600x$$

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

**Resposta:** 0,125 cal/g°C

**R.31** Uma pedrinha desprezível de gelo? (Da

**Solução:**  
Ao receber calor, tem e sua tem



Esquema

Tabela

Fusão
Água
Água

Calcular  
Fusão d

Aquecin

Resfriar

Mas  $Q_1$

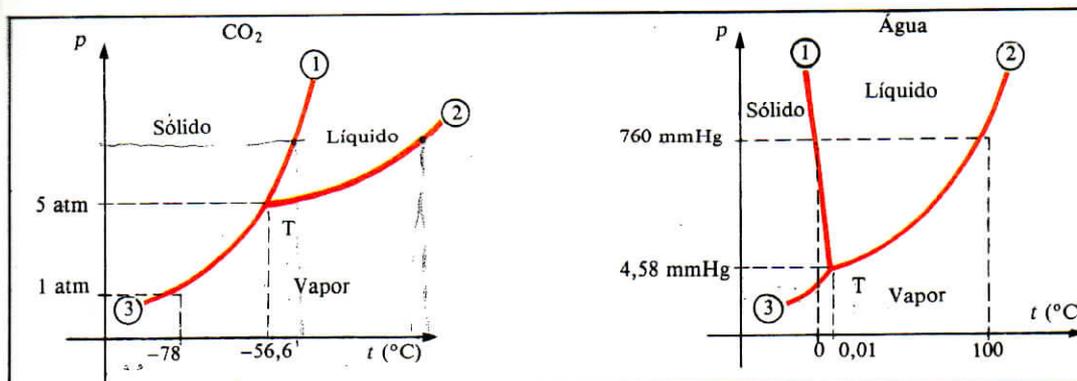
Respost

- P.88** Num recipiente de capacidade térmica  $30 \text{ cal/}^\circ\text{C}$  há  $20 \text{ g}$  de um líquido de calor específico  $0,5 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ , a  $60^\circ\text{C}$ . Colocando-se nesse líquido  $10 \text{ g}$  de gelo em fusão, qual a temperatura final de equilíbrio, admitindo que o sistema está termicamente isolado do ambiente? O calor latente de fusão do gelo é  $80 \text{ cal/g}$ .
- P.89** Em um calorímetro de capacidade térmica desprezível, são colocados  $10 \text{ g}$  de gelo a  $0^\circ\text{C}$ , sob pressão normal, e  $10 \text{ g}$  de água à temperatura  $t$ . Sendo  $80 \text{ cal/g}$  o calor latente de fusão do gelo e  $1,0 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$  o calor específico da água, determine o valor da temperatura  $t$ , para que, no equilíbrio térmico, se tenha apenas água a  $0^\circ\text{C}$ .
- P.90** Misturam-se, num calorímetro de capacidade térmica desprezível,  $200 \text{ g}$  de gelo a  $0^\circ\text{C}$  com  $200 \text{ g}$  de água a  $40^\circ\text{C}$ . Sendo  $80 \text{ cal/g}$  o calor latente de fusão do gelo e  $1,0 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$  o calor específico da água, determine:  
A) a temperatura de equilíbrio térmico;  
B) a massa de gelo que se funde.
- P.91** Um bloco de gelo de massa  $500 \text{ g}$  a  $0^\circ\text{C}$  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  $100^\circ\text{C}$  em quantidade suficiente para o equilíbrio térmico se dar a  $50^\circ\text{C}$ . 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  $100^\circ\text{C}$ , calcule a massa de vapor introduzida no calorímetro.  
Dado:  $c_{\text{água}} = 1,0 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ .

#### 4. DIAGRAMA DE FASES

A fase em que uma substância se encontra depende de suas condições de pressão e temperatura, podendo estar também num estado que corresponda ao equilíbrio entre duas fases ou mesmo entre as três fases. Representando-se os diferentes estados da substância no gráfico  $pt$ , obtemos o denominado diagrama de fases da substância.

Na Figura 7 apresentamos o diagrama de fases para o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e para a água.



**Figura 7** - Diagramas de fases do  $\text{CO}_2$  e da água:  
 T - ponto triplo ou tríplice  
 1 - curva de fusão  
 2 - curva de vaporização  
 3 - curva de sublimação

No diagrama de fases, a curva que delimita as regiões correspondentes às fases sólida e líquida constitui a curva de fusão, figurativa dos estados de equilíbrio entre o sólido e o líquido. A curva que separa as regiões que correspondem às fases líquida e de vapor é a curva de vaporização, cujos pontos representam os estados de equilíbrio entre o líquido e o vapor. A curva de sublimação, entre as regiões das fases sólida e de vapor, figura os estados de equilíbrio entre essas duas fases.

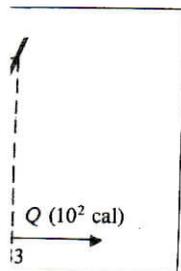
da fusão do gelo e

devem perder  $600 \text{ g}$   
 $^\circ\text{C}$ .

a  $60^\circ\text{C}$ ? O gelo se  
 O calor específico

istema ser formado  
 latente  $L_C = -540$   
 io. Construa ainda

e fusão, um sólido



le calor específico  
 calor latente de

colocar nela um  
 ca de calor entre  
 $540 \text{ cal/g}$  (calor