

Física 6

Termologia

Pré-Vestibular

Teoria e Exercícios Propostos



Editora COC – Empreendimentos Culturais Ltda.
Rua General Celso de Mello Rezende, 301
Tel.: (16) 3603.9700 – CEP 14095-270
Lagoinha – Ribeirão Preto – SP



Capítulo 01. Termometria

1. Temperatura	9
1.1. Noção Sensitiva de Temperatura	9
1.2. Conceito de Temperatura	9
1.3. Medida de Temperatura	9
1.4. Termômetro	9
1.5. Escala Arbitrária de Temperatura	10
2. Escala Celsius	11
3. Escala Fahrenheit	11
4. Escala Kelvin	12
5. Conversão entre as Escalas	12
6. Variação de Temperatura	13

Capítulo 02. Dilatação Térmica

1. Definição	15
2. Dilatação Térmica dos Sólidos	15
3. Dilatação Linear	15
4. Dilatação Superficial	17
5. Dilatação Volumétrica	18
6. Dilatação Térmica dos Líquidos	19
7. Dilatação Irregular da Água	21
8. Variação da Densidade com a Temperatura	22

Capítulo 03. Calorimetria

1. Calor	23
2. Calor Sensível	23
3. Calor Latente	23
4. Unidade de Calor	23
5. Capacidade Térmica (C)	24
6. Calor Específico Sensível (c)	24

Índice.física 6

7. Cálculo do Calor Sensível	25
8. Cálculo do Calor Latente	25
9. Fases da Matéria	26
10. Mudanças de Fase	27
11. Trocas de Calor	30
12. Transformações	33
13. Diagrama de Fase	33
14. Fusão	34
15. Vaporização	35
16. Sublimação	36
17. Propagação de Calor	38
18. Condução	38
18.1. Fenômenos Explicados pela Condução	39
18.2. Cálculo de Fluxo de Calor por Condução	40
19. Convecção	40
19.1. Aquecimento	41
19.2. Resfriamento	41
19.3. Brisas Litorâneas	41
19.4. Inversão Térmica	42
20. Irradiação	42

Capítulo 04. Gases Perfeitos

1. Introdução	44
2. Modelo Macroscópico do Gás Ideal	44
3. Características do Gás Ideal	44
4. As Variáveis de Estado de um Gás	44
4.1. Temperatura (T)	44
4.2. Volume (V)	44
4.3. Pressão (p)	45
5. Transformações Gasosas	45
6. Equação de Clapeyron	45
7. Lei Geral dos Gases Perfeitos	46
8. Condições Normais de Pressão e Temperatura	47



9. Transformações Particulares	47
9.1. Transformação Isométrica	47
9.2. Transformação Isobárica	48
9.3. Transformação Isotérmica	49
10. Teoria Cinética dos Gases	51
10.1. Pressão de um Gás	51
10.2. Energia Cinética do Gás	51
10.3. Energia Cinética Média por Molécula	52

Capítulo 05. Termodinâmica

1. Trabalho em um Sistema Termodinâmico	54
2. Energia de um Sistema	55
2.1. Energia Externa	55
2.2. Energia Interna	55
3. Primeiro Princípio da Termodinâmica	56
4. Transformações Gasosas	57
4.1. Transformação Isobárica	57
4.2. Transformação Isométrica	57
4.3. Transformação Isotérmica	58
4.4. Transformação Adiabática	58
4.5. Transformação Cíclica	58
5. Segundo Princípio da Termodinâmica	61
6. Rendimento da Máquina Térmica	62
7. Ciclo de Carnot	62

Exercícios Propostos	65
-----------------------------------	-----------



Capítulo 01. Termometria

1. Temperatura

1.1. Noção Sensitiva de Temperatura

A primeira noção que se tem de temperatura é a sensação de frio ou de quente, verificada ao se tocar um corpo. Ao tocarmos diversos objetos, na maioria das vezes, conseguimos colocá-los em ordem crescente de temperatura, dizendo qual está à temperatura maior e à temperatura menor. O sentido do tato nos proporciona a mais simples noção de temperatura de um corpo. Porém, nossos sentidos se enganam com muita frequência, não podendo ser utilizados como medida precisa para a temperatura, pois eles são diferentes de uma pessoa para outra e dependem do estado em que ela se encontrava anteriormente. Por exemplo, se mergulharmos a mão direita em água quente e a esquerda em água fria, e em seguida mergulharmos as duas em água a uma temperatura intermediária, esta água nos parece mais fria na mão direita e mais quente na mão esquerda.

Embora o tato nos dê uma primeira noção do estado térmico, ou da temperatura de um corpo, a experiência anterior deixa claro que ele não é muito útil para propósitos científicos.

A conceituação de temperatura é fundamental para o estudo da Física Térmica.

1.2. Conceito de Temperatura

Em geral, os corpos são formados de moléculas e estas formadas de átomos. Dizemos que os corpos são constituídos de partículas.

As partículas que formam um corpo estão em constante vibração; portanto, elas são dotadas de uma forma de energia denominada energia térmica.

No aquecimento de um corpo a energia térmica de suas partículas aumenta e no resfriamento essa energia diminui.

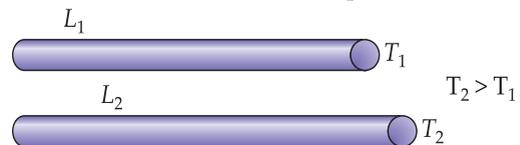
A temperatura de um corpo avalia o “grau” médio de vibração das partículas que o compõe.

1.3. Medida de Temperatura

Para que a medida de temperatura não dependa da nossa percepção fisiológica, recorremos

a algumas grandezas físicas mensuráveis que variam quando a temperatura de um corpo varia. Entre elas estão o volume de um líquido, o comprimento de uma barra, a resistência elétrica de um fio, a pressão de um gás a volume constante, etc. Qualquer uma dessas grandezas pode ser usada para avaliar indiretamente a temperatura de um corpo.

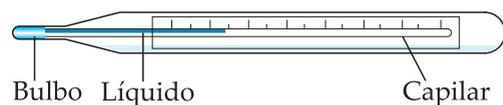
Por exemplo, o comprimento de uma barra metálica aumenta (dilata) quando ela é aquecida, ou seja, quando a sua temperatura aumenta. Então, podemos medir sua temperatura indiretamente, analisando o seu comprimento.



No entanto, para pequenas variações de temperatura, é praticamente imperceptível a alteração no comprimento da barra e teríamos dificuldades para avaliar seu estado térmico. Para que possamos medir com mais precisão a temperatura de um corpo, devemos escolher uma substância em que pequenas variações no seu estado térmico provoquem variações significativas e mensuráveis na propriedade física que foi escolhida. Geralmente a substância escolhida é o mercúrio, devido à dilatação regular que apresenta ao ser aquecido.

1.4. Termômetro

O termômetro é um instrumento ao qual associamos uma escala numérica e que, após permanecer em contato por um certo tempo com um corpo, entra em equilíbrio térmico com ele, permitindo, através da escala numérica, que avaliemos sua temperatura.

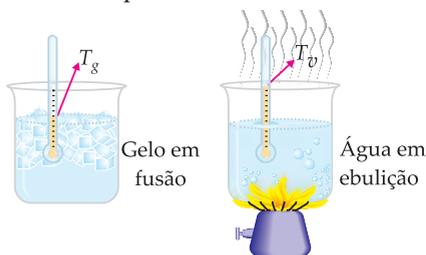


Um termômetro é construído escolhendo-se uma substância termométrica e uma propriedade termométrica dessa substância. Por exemplo, a substância termométrica pode ser um líquido colocado em um reservatório (bulbo), ligado a um tubo de vidro capilar, e a grandeza termométrica, o comprimento da altura da coluna; ou a substância termométrica pode ser um gás à pressão constante, e a grandeza termométrica, o volume do gás.

1.5. Escala Arbitrária de Temperatura

Para a construção de uma escala termométrica arbitrária de temperatura, devemos proceder da seguinte maneira:

- Escolhe-se a substância termométrica, por exemplo: um líquido, e a grandeza termométrica correspondente: a altura da coluna do líquido.
- Coloca-se o líquido em um reservatório (bulbo), ligado a um tubo capilar, cada estado térmico corresponde a uma altura dessa coluna.
- Adotam-se dois estados térmicos, que se mantenham invariáveis por um determinado tempo e que sejam de fácil reprodução. Geralmente os estados térmicos escolhidos são: ponto de fusão do gelo à pressão normal (1 atmosfera) e ponto de ebulição da água à pressão normal (1 atmosfera). Estes estados térmicos são, normalmente, chamados de **pontos fixos**.
- Em um recipiente contendo água no estado líquido e gelo se derretendo, introduzimos o termômetro, aguardamos o equilíbrio térmico e anotamos a altura da coluna correspondente à temperatura de fusão do gelo.
- Em um recipiente contendo água em ebulição, em presença de vapor d'água, colocamos o termômetro, aguardamos o equilíbrio térmico e anotamos a altura da coluna correspondente ao estado de vapor.



- Dividimos em partes iguais o intervalo delimitado entre as anotações e associamos valores numéricos arbitrários. Cada parte em que fica dividido o intervalo é denominada **grau de escala**, e é sua unidade.

Exercício Resolvido

Construa uma escala arbitrária "X", em um termômetro de álcool, utilizando os pontos fixos fundamentais, isto é, o **ponto de fusão do gelo** e o **ponto de ebulição da água**, ambos sob pressão normal (1 atmosfera). Em seguida, simule a medida da temperatura de um corpo com esta escala.

Resolução

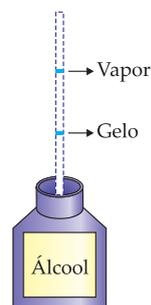
Tomemos um pequeno vidro de medicamento, provido de tampa. Em volta da tampa, devemos passar cola plástica para que não haja vazamento. Fazemos então um pequeno furo redondo no centro da tampa. Nesse furo, colamos um canudo plástico de frescos e introduzimos álcool colorido com tinta de escrever.

Em um recipiente contendo água líquida e gelo derretendo, introduzimos o vidro (termômetro), aguardamos a coluna do álcool se estabilizar (atingir o equilíbrio térmico), marcamos a altura da coluna com um pincel atômico. Essa altura corresponde ao ponto de fusão do gelo.

Dentro de um recipiente contendo água líquida e vapor d'água (água em ebulição), colocamos o vidrinho, aguardamos o equilíbrio térmico, anotamos a altura da coluna correspondente ao ponto de vapor.

Atribuindo-se, arbitrariamente, o valor 10 para a altura correspondente ao ponto de gelo e o valor 90 para a altura correspondente ao ponto de vapor, e dividindo o intervalo obtido em 80 partes iguais, temos o termômetro graduado na escala X, onde cada parte recebe o nome de um grau X.

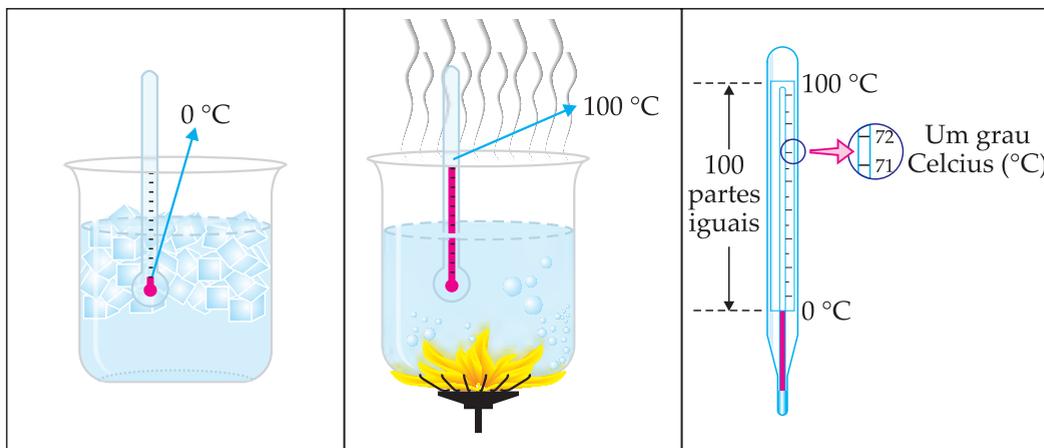
Para medir a temperatura de um corpo, basta colocar o termômetro graduado na escala X em contato com ele, esperar o equilíbrio térmico e fazer a leitura numérica correspondente ao seu estado térmico na escala X.





2. Escala Celsius

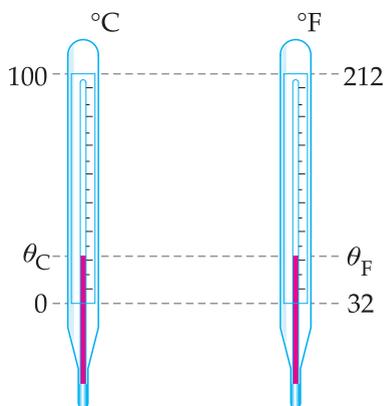
Escala construída, em 1742, pelo físico e astrônomo sueco Anders Celsius, que adotou para o ponto de fusão de gelo o valor 0 (zero) e para o ponto de ebulição da água o valor 100 (cem). Dividiu-se o intervalo obtido entre os pontos fixos em cem partes iguais, em que cada parte corresponde à uma unidade da escala e foi denominada **grau Celsius**, cujo símbolo é o $^{\circ}\text{C}$.



3. Escala Fahrenheit

Construída, em 1727, pelo físico alemão Daniel Gabriel Fahrenheit, que adotou o valor 0 (zero) para a mistura: água, gelo picado e sal; e o valor 100 para a temperatura do corpo humano. Dividiu-se o intervalo entre esses pontos fixos em 100 partes iguais e cada parte recebeu o nome de **grau Fahrenheit**, cujo símbolo é $^{\circ}\text{F}$.

Ao compararmos os pontos fixos escolhidos por Fahrenheit e Celsius, temos para o ponto de fusão do gelo, sob pressão de 1 atmosfera, o valor 32°F e para o ponto de vapor da água, também sob pressão de 1 atmosfera, o valor 212°F ; o intervalo dividido em 100 partes iguais pelo sueco (Celsius) é dividido em 180 partes iguais na escala do alemão (Fahrenheit).



4. Escala Kelvin

Como a temperatura de um corpo está relacionada com o grau de agitação de suas moléculas, podemos dizer que as escalas Celsius e Fahrenheit são relativas, uma vez que elas não atribuem o valor zero ao estado de agitação molecular mais baixo.

A temperatura está relacionada à energia de movimento das moléculas de um corpo; assim, ao diminuirmos sua temperatura, suas moléculas ficam mais lentas. Podemos imaginar um estado em que todas as moléculas estão paradas, ou seja, agitação térmica nula correspondendo à temperatura zero, a qual denominamos **zero absoluto**.

O físico irlandês, Willian Thomson, que recebeu o título de nobreza lorde Kelvin, estabeleceu, em 1848, uma escala absoluta.

Kelvin verificou experimentalmente que a pressão de um gás diminuía $1/273$ do valor inicial, quando resfriado a volume constante de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Como a pressão do gás está relacionada com o choque de suas partículas com as paredes do recipiente, quando a pressão fosse nula, as moléculas estariam em repouso, a agitação térmica seria nula e a sua temperatura também. Conclui, então, que isso aconteceria se transformássemos o gás até $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Assim, Kelvin atribuiu o valor zero para este estado térmico e o valor de **1 kelvin** a uma extensão igual à do grau Celsius, de modo que o ponto de fusão do gelo corresponde a 273 K e o ponto de ebulição da água corresponde a 373 K (o nome e o símbolo grau kelvin foram abolidos em convenção científica internacional e substituídos simplesmente por kelvin; portanto, ao invés de $10\text{ }^{\circ}\text{K}$, escreve-se 10 K e lê-se: dez kelvin).

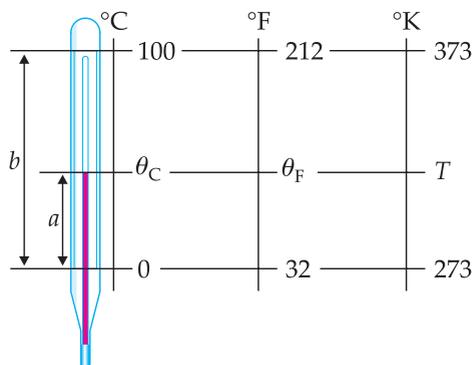
Posteriormente, descobriu-se ser impossível atingir o estado de agitação molecular nulo; as moléculas têm uma energia mínima denominada **energia do ponto zero** e o zero absoluto é inatingível na prática. O zero absoluto é obtido por extrapolação e não deve ser inter-

pretado como o estado em que as partículas estariam em completo repouso, pois elas possuem uma energia mínima finita e apresentam movimento.

5. Conversão entre as Escalas

Como existem várias escalas termométricas, freqüentemente necessitamos transformar a indicação numérica de uma escala em outra. Para obtermos a relação entre uma escala e outra, devemos estabelecer a proporção entre os segmentos obtidos com a leitura da temperatura de um corpo com dois termômetros. Por exemplo, ao medirmos a temperatura de um corpo com três termômetros, um graduado na escala Celsius, outro na escala Fahrenheit e um terceiro na escala Kelvin, obtemos os segmentos *a* e *b* (figura a seguir) da coluna de mercúrio que corresponde ao mesmo estado térmico e não dependem da unidade em que foram medidos.

Portanto:



$$\frac{a}{b} = \frac{\theta_C - 0}{100 - 0} = \frac{\theta_F - 32}{212 - 32} = \frac{T - 273}{373 - 273}$$

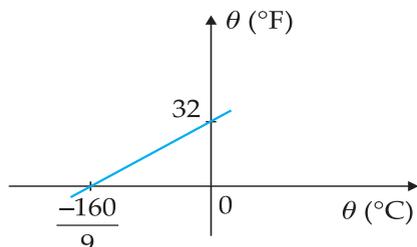
Entre as escalas Celsius e Fahrenheit, podemos simplificar para:

$$\frac{\theta_C}{5} = \frac{\theta_F - 32}{9} \quad \text{e} \quad \boxed{9\theta_C = 5\theta_F - 160}$$

Esta relação recebe o nome de **equação termométrica**, e, dessa forma, podemos estabelecer equações de conversão entre quaisquer escalas termométricas, sejam elas relativas, arbitrárias ou mesmo absolutas.



Observe, através da equação termométrica de conversão entre as escalas Celsius e Fahrenheit, que as equações termométricas são funções do primeiro grau, e, se as representarmos em um diagrama, obteremos uma reta, conforme figura abaixo.



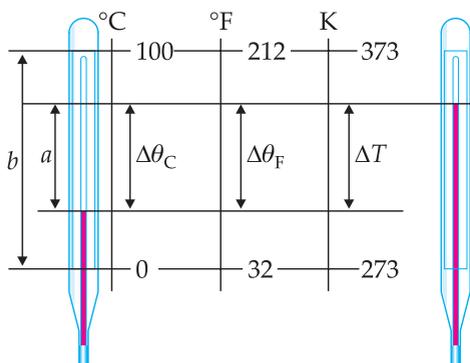
6. Variação de Temperatura

Considere que a temperatura de um corpo varie de um valor inicial θ_1 para um valor final θ_2 , num dado intervalo de tempo. A variação de temperatura $\Delta\theta$ é dada pela diferença entre o valor final θ_2 e o valor inicial θ_1 :

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$$

Por exemplo, relacionando as variações de temperatura nas três escalas Celsius, Fahrenheit e Kelvin temos:

- o segmento **a**, que corresponde à variação de temperatura ocorrida nas três escalas, e o segmento **b**, que corresponde ao intervalo de temperatura entre os pontos de vapor e de gelo, também nas suas escalas. Como eles não dependem da unidade em que foram medidos, podemos estabelecer a proporção:



$$\frac{a}{b} = \frac{\Delta\theta_C}{100-0} = \frac{\Delta\theta_F}{212-32} = \frac{\Delta T}{373-273}$$

Simplificando:

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

Exercícios Resolvidos

01. Um estudante de Física verificou que a temperatura do seu experimento variou de 10°C . Qual seria a variação de temperatura se ele utilizasse um termômetro graduado na escala Fahrenheit?

Resolução

Como a variação de temperatura na escala Celsius foi de 10°C , substituindo esse valor na expressão

$$\frac{\Delta\theta_C}{5} = \frac{\Delta\theta_F}{9}, \text{ temos:}$$

$$\Delta\theta_F = 18^\circ\text{F}$$

02. Uma enfermeira verificou a temperatura de um paciente, com um termômetro graduado na escala Fahrenheit e obteve 104°F . Determine o valor desta temperatura na escala Celsius e verifique se o paciente se encontra febril.

Resolução

A equação termométrica entre as escalas Celsius e Fahrenheit é:

$$\frac{\theta_C}{5} = \frac{\theta_F - 32}{9}$$

Substituindo na expressão $\theta_F = 104^\circ\text{F}$, temos:

$$\theta_C = 40^\circ\text{C}$$

Portanto, como a temperatura normal do corpo humano é de $36,5^\circ\text{C}$, o paciente se encontra febril.

Termologia

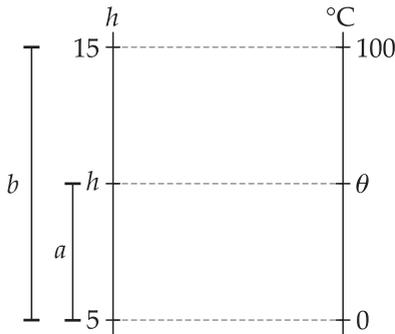
03. Num termômetro de mercúrio, a coluna líquida apresenta 5 cm quando em presença de gelo em fusão ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$) e 15 cm quando em presença de vapor de água ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Determine:

a) a função termométrica desse termômetro na escala Celsius;

b) a temperatura de um corpo que, em equilíbrio térmico com esse termômetro, faz com que a altura de sua coluna seja 10 cm.

Resolução

a) Relacionando a altura da coluna de mercúrio com a temperatura, temos:



$$\frac{a}{b} = \frac{h-5}{15-5} = \frac{\theta-0}{100-0}$$

$$\frac{h-5}{10} = \frac{\theta}{100}$$

$$\theta = 10(h-5)$$

b) Substituindo, na expressão acima, $h = 10\text{ cm}$, obtemos:

$$\theta = 10(10 - 5)$$

$$\theta = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Capítulo 02. Dilatação Térmica

1. Definição

A matéria é constituída de partículas extremamente pequenas chamadas átomos e moléculas. Quando a matéria é aquecida, a energia de agitação dessas partículas torna-se maior, provocando um maior distanciamento entre elas. Em razão desse distanciamento entre as partículas é que ocorre a dilatação de um corpo aquecido, chamada **dilatação térmica**. Quando um corpo é resfriado, ou seja, sofre uma diminuição em sua temperatura, as partículas aproximam-se e ocorre o que denominamos **contração térmica**. Tais fenômenos ocorrem em corpos sólidos, líquidos e, também, nos gases. Para melhor compreensão do fenômeno de dilatação térmica, esta será estudada, separadamente, para cada estado da matéria, iniciando-se pelos sólidos.

2. Dilatação Térmica dos Sólidos

No sólido, a matéria tem forma própria e volume definido, porque as moléculas que a compõem estão fortemente ligadas entre si e apresentam um movimento muito pequeno de vibração, em torno da sua posição de equilíbrio, conforme vemos na figura 1.

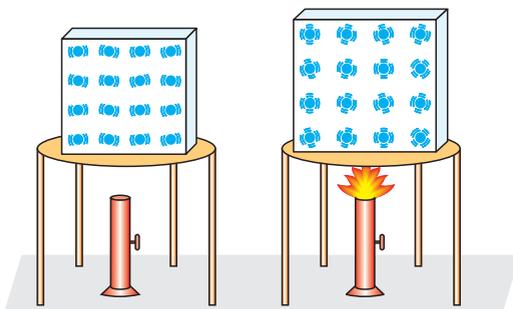
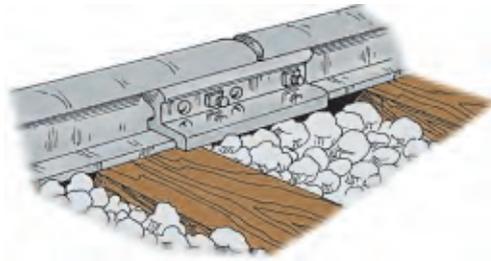


Figura 1

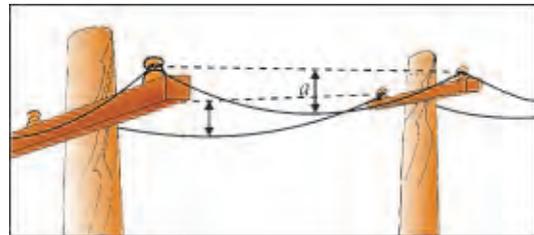
Figura 2

Vejam alguns exemplos da dilatação.

a) Entre os trilhos de uma ferrovia existe sempre um pequeno intervalo, e isso possibilita a dilatação do trilho nos dias de calor, sem produzir danos para a ferrovia.



b) Os fios de uma rede elétrica aérea devem apresentar a flecha (a), para que, num dia frio, não haja quebra do fio em virtude da contração.



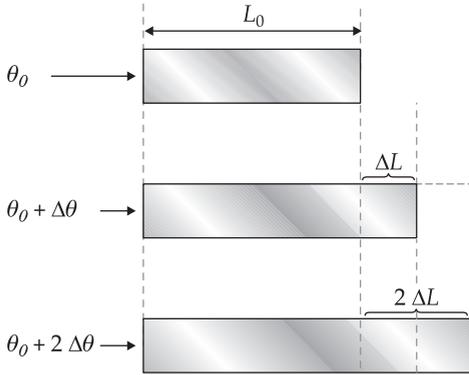
3. Dilatação Linear

Para maior praticidade, vamos adotar, no estudo da dilatação linear, uma barra metálica e veremos o que ocorre com seu comprimento, quando aquecida.

É de verificação experimental que:

a) a variação do comprimento (ΔL) de uma barra, quando aquecida, é diretamente proporcional à variação da temperatura ($\Delta \theta$), pois, com o aquecimento, a energia de agitação faz com que as partículas se afastem umas das outras e, portanto, quanto maior a temperatura, maior a variação do comprimento da barra.

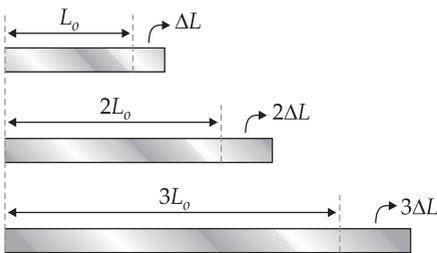
As figuras a seguir mostram-nos uma barra de comprimento inicial (L_0), sofrendo as variações de temperatura, a partir da temperatura inicial (θ_0).



Observamos que, dobrando a variação de temperatura $\Delta\theta$, duplicamos a variação do comprimento ΔL . Portanto, $\Delta L \sim \Delta\theta$.

b) a variação do comprimento de uma barra (ΔL) também é proporcional ao comprimento inicial (L_0) para uma mesma variação de temperatura ($\Delta\theta$); ou seja, quanto maior o comprimento inicial da barra (L_0), maior será a variação do comprimento (ΔL), pois, quanto mais partículas, maior será a distância acumulada entre elas.

Ilustração: para ($\Delta\theta$) = constante e comprimentos diferentes.



Observamos que, ao duplicarmos o comprimento da barra, dobramos a variação de comprimento e, ao triplicarmos o comprimento da barra, triplicamos a variação de comprimento. Portanto, $\Delta L \sim L_0$.

Verificamos, nos itens a e b, que a dilatação linear ΔL é proporcional à variação de

temperatura $\Delta\theta = \theta - \theta_0$ e ao comprimento inicial L_0 ; portanto, concluímos que $\Delta L \sim L_0 \cdot \Delta\theta$ e podemos escrever que:

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

em que α é um coeficiente de proporcionalidade característico de cada material, denominado de **coeficiente de dilatação linear**.

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

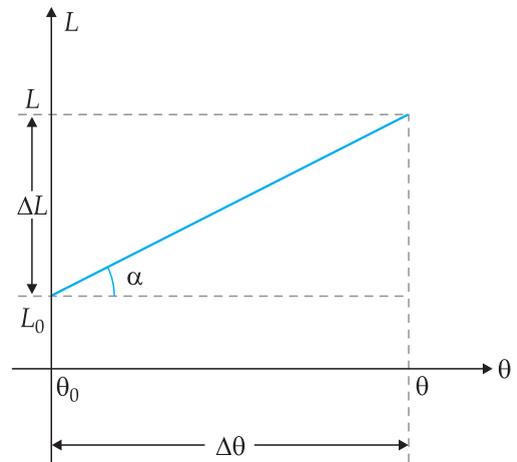
Unidade usual de α é: $[\alpha] = \frac{1}{^\circ\text{C}} = ^\circ\text{C}^{-1}$

Da expressão matemática $\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta\theta$, como $\Delta L = L - L_0$, temos:

$L - L_0 = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta\theta$, portanto,

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

Sendo a expressão: $L = L_0 (1 + \alpha \cdot \Delta\theta)$ uma função do primeiro grau, observamos que o gráfico $L \times \theta$ é uma reta oblíqua que não passa pela origem, pois o comprimento inicial jamais será igual a zero.



$$\text{tg } \alpha = \frac{\Delta L}{\Delta\theta}, \text{ como } \Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta\theta$$

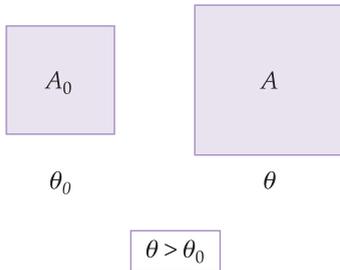
$$\text{tg } \alpha = \frac{L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta\theta}{\Delta\theta}$$

$$\text{tg } \alpha = L_0 \cdot \alpha$$



4. Dilatação Superficial

A dilatação superficial corresponde à variação da área de um corpo, numa variação de temperatura, portanto, uma variação em duas dimensões. Pela facilidade didática, analisaremos a variação da área de uma chapa metálica quadrada.



Seja A_0 a área na temperatura θ_0 . Após o aquecimento, a área passa para A e a temperatura θ .

$\Delta A = A - A_0$, em que ΔA é a variação de área.

Sendo ΔA diretamente proporcional à área inicial A_0 ($\Delta A \sim A_0$) e diretamente proporcional à variação de temperatura $\Delta\theta$ ($\Delta A \sim \Delta\theta$), temos: $\Delta A \sim A_0 \cdot \Delta\theta$

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

em que β é uma constante de proporcionalidade denominada de coeficiente de dilatação superficial.

A unidade usual é: $[\beta] = \frac{1}{^\circ\text{C}} = ^\circ\text{C}^{-1}$

Da expressão matemática $\Delta A = A_0 \cdot \beta \cdot \Delta\theta$, como $\Delta A = A - A_0$, temos:

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

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

Para variações de temperatura não muito elevadas, o coeficiente de dilatação superficial é praticamente igual ao dobro do coeficiente de dilatação linear.

$$\beta = 2\alpha$$

Exercícios Resolvidos

01. O comprimento de um fio de alumínio que liga dois postes sucessivos é de 100 m a 20°C. Qual o comprimento desse fio a 120°C, sabendo-se que o coeficiente de dilatação linear do alumínio é $24 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$?

Resolução

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

$$\Delta L = 100 \cdot 24 \cdot 10^{-6} \cdot 100$$

$$\Delta L = 0,24 \text{ m}$$

$$L = 100,24 \text{ m}$$

02. Um trilho de ferro com 20 m de comprimento a 10°C é aquecido até atingir 110°C, sofrendo um acréscimo de 2,2 cm em seu comprimento. Qual é o valor do coeficiente de dilatação linear do ferro?

Resolução

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

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \cdot \Delta\theta} = \frac{2,2 \cdot 10^{-2}}{20 \cdot 100}$$

$$\alpha = 11 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

03. Uma barra metálica tem, a 30°C, comprimento igual a 1m. Eleva-se então sua temperatura para 1030°C. Sendo o coeficiente de dilatação linear do metal da barra igual a $12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, determine a variação de comprimento sofrida pela barra.

Resolução

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

$$\Delta L = 1 \cdot 12 \cdot 10^{-6} \cdot 1000$$

$$\Delta L = 12 \cdot 10^{-3} \text{ m.}$$

$$\Delta L = 12 \text{ mm.}$$

04. Uma placa apresenta inicialmente uma área de 1,0 m² a 0°C. Ao ser aquecida até 50°C, sua área aumenta 1,0 cm². Determine o coeficiente de dilatação superficial do material que constitui a placa.

Resolução

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

$$\beta = \frac{\Delta A}{A_0 \Delta\theta} = \frac{1,0 \cdot 10^{-4}}{1,0 \cdot 50}$$

$$\beta = 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

05. Em uma placa de cobre existe um furo circular que, a 20°C, apresenta área igual a 200 mm². Qual o acréscimo de área que o furo sofre quando se eleva a temperatura da chapa para 220°C?

Dado: coeficiente de dilatação superficial, $\beta = 34 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Resolução

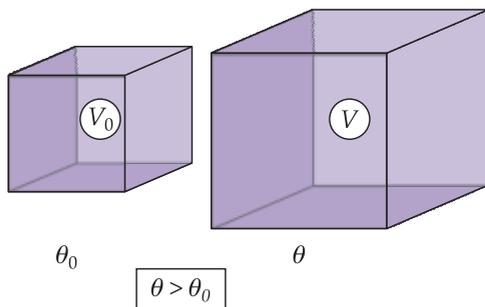
$$\Delta A = A_0 \beta \Delta \theta$$

$$\Delta A = 200 \cdot 34 \cdot 10^{-6} \cdot 200$$

$$\Delta A = 1,36 \text{ mm}^2$$

5. Dilatação Volumétrica

Para nosso estudo, consideraremos aqui um sólido metálico cúbico de volume inicial V_0 na temperatura inicial θ_0 .



Seja V_0 o volume na temperatura θ_0 e, V , o volume na temperatura θ .

$\Delta V = V - V_0$, em que ΔV é a variação de volume.

Sendo ΔV diretamente proporcional ao volume V_0 ($\Delta V \sim V_0$) e diretamente proporcional à variação de temperatura $\Delta \theta$ ($\Delta V \sim \Delta \theta$), temos: $\Delta V \sim V_0 \cdot \Delta \theta$.

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

Em que γ é uma constante de proporcionalidade denominada **coeficiente de dilatação volumétrica**.

A unidade usual de γ é: $[\gamma] = \frac{1}{^\circ\text{C}} = ^\circ\text{C}^{-1}$

Da expressão matemática $\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta \theta$, como $\Delta V = V - V_0$, temos: $V - V_0 = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta \theta$.

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

Para variações de temperatura não muito elevadas, o coeficiente de dilatação volumétrica é praticamente igual ao triplo do coeficiente de dilatação linear.

$$\gamma = 3 \cdot \alpha$$

Exercícios Resolvidos

01. Uma estatueta de ouro foi aquecida de 25°C a 75°C, observando-se um aumento de 2,1 cm³ em seu volume. Sendo $14 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ o coeficiente de dilatação linear do ouro, qual era o volume inicial dessa estatueta?

Resolução

$$\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta \theta \text{ e } \gamma = 3 \cdot \alpha$$

$$2,1 = V_0 \cdot 3 \cdot 14 \cdot 10^{-6} \cdot 50$$

$$V_0 = \frac{2,1}{42 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ cm}^3 = 1,0 \text{ L}$$

02. Um recipiente de cobre tem 1 000 cm³ de capacidade a 0°C. Sua capacidade, a 100°C, vale:

- a) 1 017 cm³
- b) 1 005 cm³
- c) 1 003 cm³
- d) 1 002 cm³
- e) 1 001 cm³

Dado: coeficiente de dilatação linear do cobre = $16 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Resolução

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

$$\Delta V = 1\,000 \cdot 3 \cdot 16 \cdot 10^{-6} \cdot 100$$

$$\Delta V = 48 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^3 = 4,8 \text{ cm}^3$$

$$V = 1\,004,8 \text{ cm}^3$$

$$V \cong 1\,005 \text{ cm}^3$$

Resposta: B



03. Qual o coeficiente de dilatação volumétrica de uma barra metálica que experimenta um aumento de 0,1% em seu comprimento para uma variação de temperatura de 100 °C?

Resolução

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

$$\Delta L = \frac{0,1}{100} L_0$$

$$\frac{0,1}{100} L_0 = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta\theta$$

$$\frac{0,1}{100} = \alpha \cdot 100$$

$$\alpha = \frac{0,1}{100 \cdot 100} = \frac{0,1}{10^4}$$

$$\alpha = 0,1 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\gamma = 3 \cdot \alpha \Rightarrow \gamma = 3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-4}$$

$$\gamma = 3 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

6. Dilatação Térmica dos Líquidos

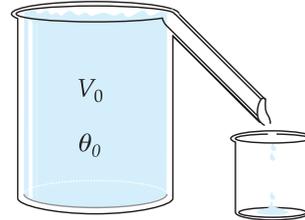
Os líquidos, como sabemos, não possuem forma própria, isto é, assumem a forma do recipiente que os contém; portanto, só é justificável o estudo de sua dilatação volumétrica, cuja equação é a mesma da dilatação dos sólidos:

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

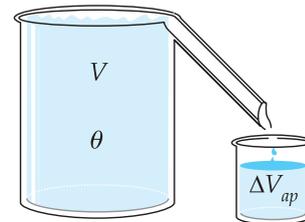
Para o estudo da dilatação dos líquidos, devemos levar em consideração o recipiente, pois tanto o líquido quanto o recipiente sofrem dilatação. De maneira geral, os líquidos dilatam-se mais que os sólidos quando igualmente aquecidos (menos afinidade molecular ou atômica).

$$(\gamma_{\text{líquidos}} > \gamma_{\text{sólidos}})$$

Consideremos um recipiente totalmente cheio de líquido, com um volume inicial V_0 a uma temperatura inicial θ_0 e um recipiente menor inicialmente vazio.



Ao aquecermos o conjunto a uma temperatura θ , o volume do recipiente passa a ser V . Como o líquido dilata-se mais do que o recipiente, uma parte vai transbordar e cair no recipiente ao lado.



Ao volume de líquido transbordado chamamos de dilatação aparente. É que aparentemente parece ter sido esta a dilatação do líquido.

Na realidade, o líquido dilatou o aparente (ap) mais o frasco (F).

Então:

$$\Delta V_{\text{real}} = \Delta V_{\text{ap}} + \Delta V_{\text{F}}$$

$$\Delta V_{\text{r}} \rightarrow \text{dilatação do líquido } (\Delta V_{\text{real}} = V_0 \cdot \gamma_{\text{r}} \cdot \Delta\theta)$$

$$\Delta V_{\text{F}} \rightarrow \text{dilatação do frasco } (\Delta V_{\text{F}} = V_0 \cdot \gamma_{\text{F}} \cdot \Delta\theta)$$

$$\Delta V_{\text{ap}} \rightarrow \text{dilatação aparente } (\Delta V_{\text{ap}} = V_0 \cdot \gamma_{\text{ap}} \cdot \Delta\theta)$$

$$\Delta V_{\text{real}} = \Delta V_{\text{ap}} + \Delta V_{\text{F}}$$

$V_0 \cdot \gamma_{\text{real}} \cdot \Delta\theta = V_0 \cdot \gamma_{\text{ap}} \cdot \Delta\theta + V_0 \cdot \gamma_{\text{F}} \cdot \Delta\theta$,
dividindo ambos os membros da igualdade por $(V_0 \cdot \Delta\theta)$, temos:

$$\gamma_{\text{real}} = \gamma_{\text{ap}} + \gamma_{\text{frasco}}$$

Exercícios Resolvidos

01. Sabe-se que o coeficiente de dilatação real do mercúrio vale $18 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Qual é o coeficiente de dilatação aparente do mercúrio, quando medido num recipiente de alumínio?

Dado: coeficiente de dilatação linear do alumínio = $24 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

Resolução

$$\gamma_{AL} = 3 \cdot \alpha_{AL} = 3 \cdot 24 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\gamma_{AL} = 72 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\gamma_{real} = \gamma_{ap} + \gamma_{frasco}$$

$$\gamma_{ap} = \gamma_{real} - \gamma_{frasco}$$

$$\gamma_{ap} = 18 \cdot 10^{-5} - 72 \cdot 10^{-6}$$

$$\gamma_{ap} = 180 \cdot 10^{-6} - 72 \cdot 10^{-6}$$

$$\gamma_{ap} = 108 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

02. O coeficiente de dilatação superficial de certo material homogêneo e isotrópico é $3,68 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Determine os seus coeficientes de dilatação linear e volumétrico.

Resolução

Temos em:

$$\beta = 3,68 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\frac{\alpha}{1} = \frac{\beta}{2} = \frac{\gamma}{3}$$

Substituindo vem:

$$\frac{\alpha}{1} = \frac{\beta}{2} = \frac{3,68 \cdot 10^{-5}}{2} \rightarrow \alpha = 1,84 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\frac{\beta}{2} = \frac{\gamma}{3} \Rightarrow \gamma = \frac{3\beta}{2} = \frac{3 \cdot 3,68 \cdot 10^{-5}}{2}$$

$$\gamma = 5,52 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

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

Resolução

O volume de líquido extravasado correspondente ao volume do líquido transbordado (aparente).

$$V_0 = 50 \text{ cm}^3$$

$$\theta_0 = 28 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\gamma_{real} = 180 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\gamma_{frasco} = 9 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \quad \gamma = 3 \cdot \alpha$$

$$\gamma_{frasco} = 3 \cdot 9 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\gamma_{frasco} = 27 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\theta = 48 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta = \theta - \theta_0 = 48 - 28 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\gamma_{real} = \gamma_{ap} + \gamma_{frasco}$$

$$\gamma_{ap} = 180 \cdot 10^{-6} - 27 \cdot 10^{-6} = 153 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\Delta V_{ap} = V_0 \gamma_{ap} \cdot \Delta\theta = 50 \cdot 153 \cdot 10^{-6} \cdot 20$$

$$\Delta V_{ap} = 0,153 \text{ cm}^3$$

04. Um recipiente de cobre, de coeficiente de dilatação volumétrico médio $\gamma_{frasco} = 51 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, contém mercúrio, a $0 \text{ }^\circ\text{C}$, até o volume de 45 cm^3 . O volume do recipiente a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ é de 46 cm^3 . Considere o coeficiente de dilatação do mercúrio $\gamma_{Hg} = 180 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. A que temperatura o mercúrio encherá completamente o recipiente?

Resolução

$$\gamma_{frasco} = 51 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

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

$$V_{0Hg} = 45 \text{ cm}^3$$

$$V_{0frasco} = 46 \text{ cm}^3$$

$$\gamma_{Hg} = 180 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

Como o $\gamma_{Hg} > \gamma_{frasco}$, o mercúrio dilata-se mais do que o recipiente. No final, o mercúrio deve preencher todo o recipiente.

$$V_{Hg} = V_{0Hg} (1 + \gamma_{Hg} \cdot \Delta\theta)$$

$$V_{frasco} = V_{0frasco} (1 + \gamma_{frasco} \cdot \Delta\theta)$$

$$V_{Hg} = V_{frasco}$$

$$V_{0Hg} (1 + \gamma_{Hg} \cdot \Delta\theta) = V_{0frasco} (1 + \gamma_{frasco} \cdot \Delta\theta)$$

$$45 (1 + 180 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta\theta) = 46 (1 + 51 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta\theta)$$

$$45 + 8,1 \cdot 10^{-3} \Delta\theta = 46 + 2,35 \cdot 10^{-3} \Delta\theta$$

$$5,75 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta\theta = 1$$



$$\Delta\theta = 174\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \Delta\theta = \theta - \theta_0$$

$$\theta - \theta_0 = 174\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\theta - 0 = 174 \Rightarrow \theta = 174\text{ }^{\circ}\text{C}$$

05. Dois blocos metálicos A e B têm a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 $3 \cdot 10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Resolução

$$V_{0A} = 250,75\text{ cm}^3$$

$$V_{0B} = 250\text{ cm}^3$$

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

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

$$\Delta\theta = \theta$$

$$\gamma_A = 3\alpha_A = 6 \cdot 10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$\gamma_B = 3\alpha_B = 9 \cdot 10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

Volumes iguais no final

$$V_A = V_B$$

$$V_{0A} (1 + \gamma_A \Delta\theta) = V_{0B} (1 + \gamma_B \Delta\theta)$$

$$250,75 (1 + 6 \cdot 10^{-5} \cdot \theta) = 250 \cdot (1 + 9 \cdot 10^{-5} \cdot \theta)$$

$$\theta = 100,6\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Observação: A dilatação volumétrica pode ser aplicada para qualquer forma de corpo (esférico, cúbico etc) e para corpos maciços ou ocos.

7. Dilatação Irregular da Água

A maioria das substâncias, durante a fusão, aumenta de volume e, na solidificação, diminui de volume. A água é uma das exceções: ela diminui de volume na fusão e aumenta de volume na solidificação.

Podemos facilmente verificar esse fenômeno. Se colocarmos um cubo de gelo num copo com água, estando a água e o gelo a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, o gelo flutua, isso significa que ele é menos denso que a água: na solidificação o seu volume aumentou ($d = \frac{m}{V}$, aumenta $V \rightarrow$ diminui d). É

por esse motivo que, se esquecermos no freezer uma garrafa de vidro cheia d'água, cerveja ou refrigerante, durante a solidificação a garrafa pode arrebentar.

A explicação para esse fenômeno anômalo da água está na polarização elétrica das moléculas. A água é composta por dois átomos de hidrogênio e um átomo de oxigênio (H_2O).

Dizemos que a molécula fica polarizada em virtude da maior atração que o átomo de oxigênio exerce nos elétrons em relação aos átomos de hidrogênio. Isso causa uma ligação entre as moléculas, formando pontes de hidrogênio, que ocorrem na fase sólida.

Fase Sólida

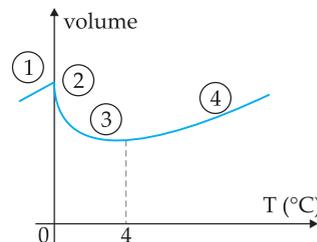
As moléculas estão arranjadas segundo as pontes de hidrogênio, onde existem bastantes espaços vazios.

Fase Líquida

Quando o gelo funde, rompem-se as pontes de hidrogênio, e as moléculas passam a ocupar os espaços vazios, provocando uma diminuição do volume.

Tomando uma porção d'água a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e pressão de 1 atm, quando a aquecermos, vamos verificar que de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ocorre contração por causa da ruptura das pontes. Essa contração é maior do que a dilatação em virtude da agitação térmica das moléculas, portanto o volume diminui. A partir de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, passa a valer a dilatação em consequência da agitação térmica.

Lançando esse fenômeno no gráfico do volume em função da temperatura, sob pressão de 1 atm, temos:



Situação 1: volume do gelo aumenta com o aumento de temperatura abaixo de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, valendo a dilatação térmica.

Situação 2: volume diminui na fusão à temperatura constante de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Situação 3: volume da água diminui com o aumento de temperatura de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Situação 4: o volume da água aumenta com o aumento de temperatura acima de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, valendo a dilatação térmica.

8. Variação da Densidade com a Temperatura

A densidade de uma substância é dada pela relação entre a sua massa e o seu volume.

$$d = \frac{m}{V}$$

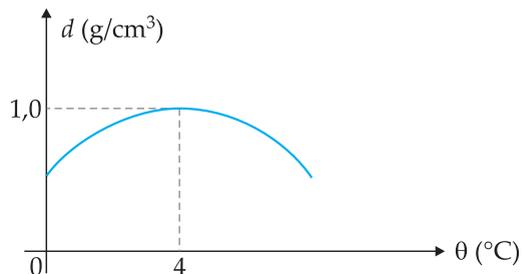
Podemos isolar o volume ($V = \frac{m}{d}$) e substituir na equação da dilatação, então:

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

$$\frac{m}{d} = \frac{m}{d_0} (1 + \gamma \cdot \Delta\theta)$$

$$\frac{1}{d} = \frac{1}{d_0} (1 + \gamma \cdot \Delta\theta)$$

A água, no estado líquido, atinge a densidade máxima à temperatura de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, que é de $1,0\text{ g/cm}^3$.



Exercício Resolvido

A densidade da água a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ é de $1,0\text{ g/cm}^3$. Calcule a densidade da água na temperatura de $94\text{ }^{\circ}\text{C}$, sabendo que o coeficiente de dilatação volumétrica da água é de $130 \cdot 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Resolução

$$\Delta\theta = \theta - \theta_0 = 94 - 4 = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\frac{1}{d} = \frac{1}{d_0} (1 + \gamma \Delta\theta)$$

$$\frac{1}{d} = \frac{1}{1} \cdot (1 + 130 \cdot 10^{-6} \cdot 90)$$

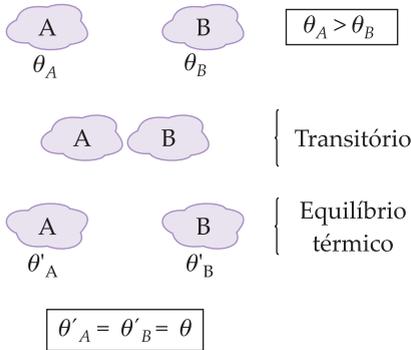
$$\frac{1}{d} = 1 + 0,012 \Rightarrow \frac{1}{d} = 1,012$$

$$1 = 1,012 d \rightarrow d = 0,988\text{ g/cm}^3$$

Capítulo 03. Calorimetria

1. Calor

Quando dois corpos a temperaturas diferentes são colocados em contato térmico, verifica-se que, após certo tempo, ambos adquirem a mesma temperatura, denominada temperatura de equilíbrio térmico.



Durante o processo transitório, a agitação das partículas de *A* diminui, isto é, a temperatura de *A* diminui. A agitação das partículas de *B* aumenta, isto é, a temperatura de *B* aumenta. Nessas condições, podemos dizer que a energia de agitação (energia térmica) de *A* transfere-se para *B*.

A energia térmica de *A*, ao fluir espontaneamente para *B*, recebe o nome de calor. Portanto:

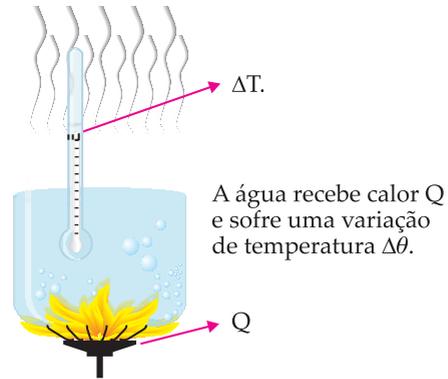
Calor é a energia térmica transferida de um corpo para outro, motivada espontaneamente por uma diferença de temperatura.

É evidente que, do exemplo, podemos afirmar que o calor flui espontaneamente dos corpos quentes para os corpos frios até que as temperaturas se igualem.

2. Calor Sensível

Quando levamos ao fogo um recipiente contendo água, observamos que a temperatura da água aumenta, pois ela recebe calor; mas, quando colocamos o recipiente contendo água na geladeira, a sua temperatura diminui, pois

ela perde calor. Quando o corpo cede ou recebe calor, variando apenas a sua temperatura, sem mudar a sua fase, dizemos que ele recebeu ou cedeu **calor sensível**.



Calor sensível é a quantidade de calor cedida ou recebida por um corpo, acarretando a ele uma variação de temperatura, sem mudar a sua fase.

3. Calor Latente

Quando levamos ao fogo um recipiente contendo gelo, observamos que o gelo se transforma em água líquida à medida que recebe calor da chama, e quando colocamos um recipiente contendo água no congelador, observamos que ela se transforma em gelo (água sólida) à medida que cede calor. Quando o corpo cede ou recebe calor, mudando sua fase, mantendo a temperatura constante, dizemos que ele cedeu ou recebeu **calor latente**.

Calor latente é a quantidade de calor cedida ou recebida por um corpo, que sofre mudança na sua fase (mudança na forma de ligação de suas moléculas) a temperatura constante.

4. Unidade de Calor

A quantidade de calor (*Q*), no Sistema Internacional de Unidades, é medida em **joule (J)**. Entretanto, por razões históricas, pode ser medida em **caloria (cal)**.

Uma caloria é definida como sendo a quantidade de calor necessária para aquecer um grama de água, fazendo sua temperatura variar de 14,5 °C para 15,5 °C.

Especificamos as temperaturas de referência, pois a quantidade de calor necessária para elevar em 1 °C a temperatura de um corpo depende ligeiramente do intervalo escolhido. Para fins práticos, não consideraremos estas pequenas variações.

A relação entre o joule e a caloria é:

$$1 \text{ cal} = 4,19 \text{ joule}$$

5. Capacidade Térmica (C)

Consideremos um sólido qualquer que recebe uma quantidade de calor Q , que provoca uma variação na sua temperatura $\Delta\theta$. Fornecendo a ele uma quantidade de calor $2Q$, sua temperatura varia $2 \Delta\theta$. Assim, observamos experimentalmente que a quantidade de calor trocada por ele é diretamente proporcional à sua variação de temperatura. Então, definimos:

Capacidade térmica é a razão entre a quantidade de calor sensível cedida ou recebida por um corpo e sua respectiva variação de temperatura.

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

A capacidade térmica não deve ser interpretada como a quantidade de calor que um corpo pode absorver, pois ela significa, simplesmente, o calor necessário para variar em uma unidade a temperatura do corpo.

A unidade de medida usual para capacidade térmica de um corpo é a caloria por grau Celsius (cal/°C) e, no Sistema Internacional, o joule por kelvin (J/K).

6. Calor Específico Sensível (c)

Consideremos duas amostras de prata, uma de massa $m_1 = 100 \text{ g}$ e outra de massa $m_2 = 1000 \text{ g}$. A amostra m_1 necessita receber 5,6 calorias de calor para variar em 1 °C sua tempe-

ratura, portanto a capacidade térmica desta amostra é 5,6 cal/°C. A amostra m_2 necessita receber 56 cal para variar em 1 °C sua temperatura, portanto sua capacidade térmica é 56 cal/°C.

A amostra m_2 (1 000 g) é dez vezes maior que a amostra m_1 (100 g), e sua capacidade térmica (56 cal/°C) é dez vezes maior que a de m_1 (5,6 cal/°C), portanto a capacidade térmica de um corpo é diretamente proporcional à sua massa, ou seja, quanto maior a massa, maior a capacidade térmica.

Considerando que não haja mudança de fase quando um corpo recebe ou perde calor, a razão entre a capacidade térmica e a massa do corpo recebe o nome de **calor específico**. Assim:

Calor específico é a razão entre a capacidade térmica e a massa do corpo.

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

A unidade de medida usual para calor específico sensível de uma substância é a caloria por grama e grau Celsius (cal/g°C) e no Sistema Internacional de Unidade (SI) é o joule por quilograma e Kelvin (J/kgK).

Calor específico de algumas substâncias

Substância	c (cal/g °C)
Água	1,00
Alumínio	0,22
Areia	0,20
Carbono	0,12
Cobre	0,093
Chumbo	0,031
Estanho	0,055
Ferro	0,11
Gelo	0,55
Latão	0,094
Mercúrio	0,033
Prata	0,056
Vapor (água)	0,48
Vidro	0,20



Exercícios Resolvidos

01. Uma fonte térmica, de potência constante, fornece a cada minuto 180 calorias de calor a um determinado corpo. Determine o fluxo de calor.

Resolução

Como o fluxo de calor é determinado por:

$$\varnothing = \frac{Q}{\Delta t}, \text{ temos: } \varnothing = \frac{180}{60}$$

$$\varnothing = 3 \text{ cal/s}$$

02. Um bloco de chumbo recebeu 6 120 calorias e sua temperatura variou de 200 °C. Determine sua capacidade térmica.

Resolução

A capacidade térmica é calculada por:

$$C = \frac{Q}{\Delta \theta} = \frac{6\,120}{200} = 30,6$$

Portanto: $C = 30,6 \text{ cal/}^\circ\text{C}$

03. Um bloco de alumínio de 200 g recebeu 4 280 calorias e sua temperatura variou 100 °C. Determine o calor específico do alumínio.

Resolução

A capacidade térmica do corpo é determinada por:

$$C = \frac{Q}{\Delta \theta} = \frac{4\,280}{100}$$

$$C = 42,8 \text{ cal/}^\circ\text{C}$$

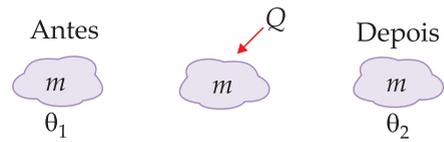
Como o calor específico é dado por $c = \frac{C}{m}$, temos:

$$c = \frac{42,8}{200}$$

$$c = 0,214 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$$

7. Cálculo do Calor Sensível

Considerem um corpo de massa m , calor específico sensível c , inicialmente a uma temperatura θ_1 . Esse corpo, ao receber uma quantidade de calor Q , tem sua temperatura elevada até θ_2 .



Da definição de capacidade térmica, temos:

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

Da definição de calor específico, temos:

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

Igualando as duas, temos:

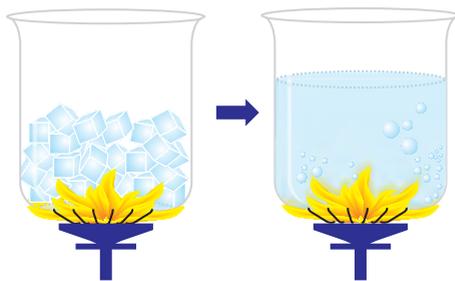
$$\frac{Q}{\Delta \theta} = m \cdot c$$

Isolando a quantidade de calor, temos:

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

Essa expressão é chamada de **equação fundamental da calorimetria**. Ela mede a quantidade de calor sensível Q trocada por um corpo de massa m e calor específico c , quando sua temperatura varia $\Delta \theta$.

8. Cálculo do Calor Latente



Durante as mudanças de fase, determinadas substâncias recebem ou cedem calor, porém suas temperaturas permanecem constantes. Por exemplo, um bloco de gelo de 100 g a 0 °C, em contato com uma fonte de calor, transforma-se em 100 g de água líquida, a 0 °C, ao receber dela 8 000 calorias. Isso quer dizer que cada grama de gelo, para se transformar em água líquida, necessita de 80 calorias.

O **calor específico latente** de mudança de fase, L , é a quantidade de calor Q que um corpo, de massa m , recebe ou cede por unidade de massa, sem variar sua temperatura:

$$L = \frac{Q}{m}$$

A unidade usual de calor específico latente é caloria por grama (cal/g) e no Sistema Internacional é joule por quilograma (J/kg).

Portanto, a quantidade de **calor latente** é calculada pela expressão:

$$Q = m \cdot L$$

Exercícios Resolvidos

01. Um corpo de massa 250 g recebe 5 000 calorias de uma fonte e sua temperatura aumenta de 10 °C para 92,5 °C. Determine:

- o calor específico da substância;
- a capacidade térmica do corpo.

Resolução

a) O calor específico pode ser calculado pela equação fundamental da calorimetria:

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

$$5\,000 = 250 \cdot c \cdot 82,5$$

$$c = 0,24 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$$

b) A capacidade térmica pode ser calculada por $C = m \cdot c$, então:

$$C = 250 \cdot 0,24$$

$$C = 60 \text{ cal/}^\circ\text{C}$$

02. Qual a quantidade de calor que devemos retirar de 500 gramas de água, cujo calor específico é 1 cal/g · °C, para que sua temperatura passe de 80 °C para 15 °C?

Resolução

A quantidade de calor é calculada por $Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta$, portanto:

$$Q = 500 \cdot 1 \cdot (15 - 80)$$

$$Q = -32\,500 \text{ cal}$$

Observação: o sinal negativo significa que o corpo cedeu energia na forma de calor.

03. Uma quantidade de 200 gramas de água líquida a 100 °C, à pressão de uma atmosfera, transformou-se em vapor d'água a 100 °C. Calcule a quantidade de calor recebida pela água, sendo o calor latente de vaporização da água 540 cal/g.

Resolução

A quantidade de calor trocada, durante uma mudança de estado, deve ser calculada por $Q = m \cdot L$, portanto:

$$Q = 200 \cdot 540 \Rightarrow Q = 108\,000 \text{ cal}$$

04. Qual a quantidade de calor que devemos retirar de 150 g de água líquida a 0 °C para que ela se transforme, à pressão normal, em 150 g de gelo a 0 °C? Dado calor latente de solidificação $L_s = -80$ cal/g.

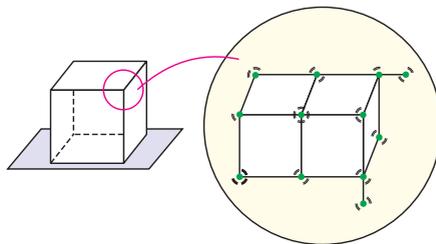
Resolução

A quantidade de calor trocada, durante a mudança de estado, é calculada por $Q = m \cdot L$, portanto, temos que: $Q = 150 \cdot (-80) \Rightarrow Q = -12\,000 \text{ cal}$

Observação: o sinal negativo significa que, durante a mudança de estado, o corpo cedeu energia na forma de calor.

9. Fases da Matéria

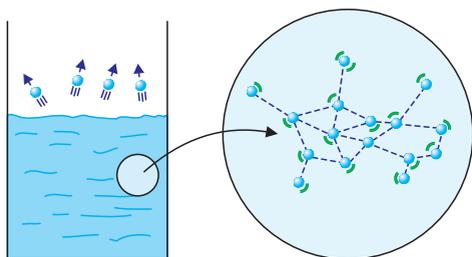
Podemos encontrar uma substância em três fases distintas: sólida, líquida e gasosa. Por exemplo, encontramos a substância água na forma sólida (gelo), na forma líquida (água) e na forma gasosa (vapor d'água).



Na fase sólida, as moléculas encontram-se muito próximas, com uma forte interação entre elas, que lhes permite ligeiras movimentações em torno de posições de equilíbrio. Assim, devido a essas interações, elas ocu-

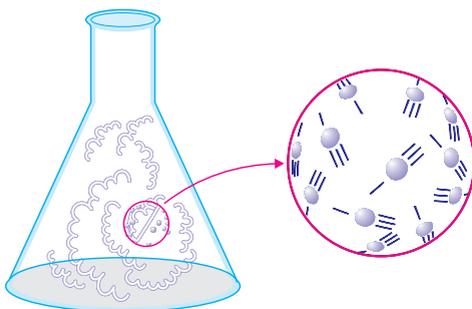


com posições determinadas, formando uma estrutura regular denominada rede cristalina. O sólido possui volume e forma definida.



Na fase líquida, as moléculas encontram-se mais afastadas umas das outras, porém existem entre elas forças apreciáveis. No entanto, essas interações são mais fracas que nos sólidos, o que confere aos líquidos um comportamento totalmente diferente do comportamento dos sólidos.

Devido à proximidade das moléculas do líquido, qualquer tentativa de compressão exige forças externas de grande intensidade, por isso dizemos que os líquidos tem compressibilidade muito pequena. A fraca interação entre as moléculas permite a elas uma movimentação maior que nos sólidos e explica o fato de o líquido possuir a forma do recipiente que o contém ou esparramar-se sobre um plano.



Na fase gasosa, a distância entre as moléculas é muito grande quando comparada com suas dimensões. Por estarem muito afastadas umas das outras, a interação entre elas é praticamente desprezível, permitindo-lhes uma grande liberdade de movimentação.

Devido à grande distância entre as moléculas e interações praticamente desprezíveis,

os gases possuem o volume e a forma do recipiente que os contém e sofrem compressões significativas sob ação de forças externas.

10. Mudanças de Fase

Quando um sólido é aquecido, sob pressão constante, suas moléculas recebem energia na forma de calor, vibram com mais intensidade e sua temperatura aumenta até um valor determinado. Continuando a receber calor, a sua temperatura permanece constante e toda a energia que ele recebe é utilizada na quebra das ligações moleculares, provocando uma mudança de fase.

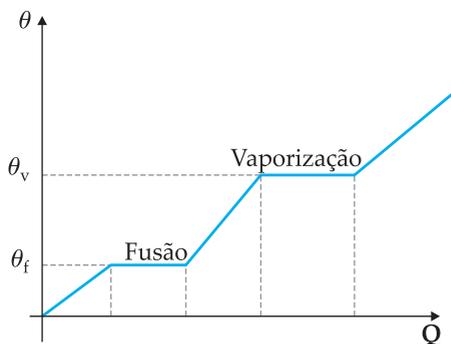
*A mudança da fase sólida para a fase líquida recebe o nome de **fusão**.*

Depois que todo o sólido transformou-se em líquido, a energia recebida aumenta a agitação molecular novamente, produzindo variação de temperatura, que aumenta novamente até um determinado valor, e volta a permanecer constante. Continuando a receber calor, a energia recebida a partir desse momento é utilizada em uma nova mudança de forma física.

*A mudança da fase líquida para a fase de vapor recebe o nome de **vaporização**.*

Após toda a substância transformar-se da fase líquida para a fase de vapor, a energia recebida altera a agitação molecular e a temperatura volta a aumentar.

Podemos representar esse comportamento através de um gráfico denominado **curva de aquecimento**.



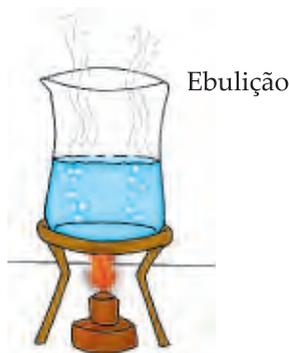
A vaporização pode acontecer de três formas:

I. **Evaporação** é a mudança da fase líquida para a fase de vapor à temperatura ambiente. Esse processo é lento e ocorre a qualquer temperatura ambiente, ou seja, mesmo nos dias mais frios de inverno.



Exemplo: roupa secando no varal

II. **Ebulição** é a mudança da fase líquida para a fase de vapor, mudança rápida que ocorre à temperatura constante, cujo valor é determinado pela pressão.



Fonte de calor

Exemplo: água fervendo

III. **Calefação** é a mudança da fase líquida para a fase gasosa, de forma extremamente rápida, que ocorre quando a temperatura é muito maior que a temperatura de ebulição.



Exemplo: um pingo d'água em uma chapa quente

Da mesma forma, podemos repetir o processo no sentido inverso, ou seja, retirando calor de uma amostra gasosa. Inicialmente, a temperatura do vapor diminui à medida que retiramos energia, pois a agitação de suas moléculas também diminui. Isso ocorre até um determinado valor; a partir daí, a temperatura passa a ser constante e ocorre a mudança de forma física.

*A mudança da fase gasosa para a fase líquida recebe o nome de **condensação** ou **liquefação**.*

Após a completa transformação do gás em líquido, a agitação molecular volta a diminuir e a temperatura do líquido se reduz até um determinado valor, em que permanece novamente constante para ocorrer a mudança de forma física.

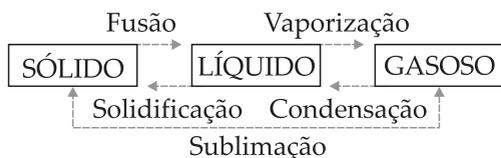
*A mudança da fase líquida para a fase sólida recebe o nome de **solidificação**.*

Depois que todo o líquido se transformou em sólido, a temperatura volta a diminuir, diminuindo assim a agitação das moléculas do sólido.

Podemos representar esse comportamento em um gráfico chamado **curva de resfriamento**.



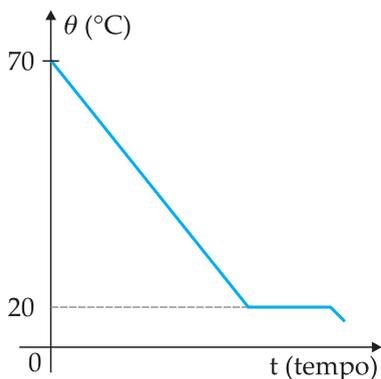
A mudança da fase sólida diretamente para a fase gasosa ou da fase gasosa diretamente para a fase sólida recebe o nome de **sublimação**.



Exercícios Resolvidos

01. O diagrama representa o resfriamento de um líquido de massa 200 g, cuja temperatura inicial é de 70 °C. São dados:

$$L_{\text{solidificação}} = -30 \text{ cal/g}$$



Determine:

- temperatura de solidificação do líquido;
- a quantidade de calor cedida pelo corpo durante o processo de solidificação.

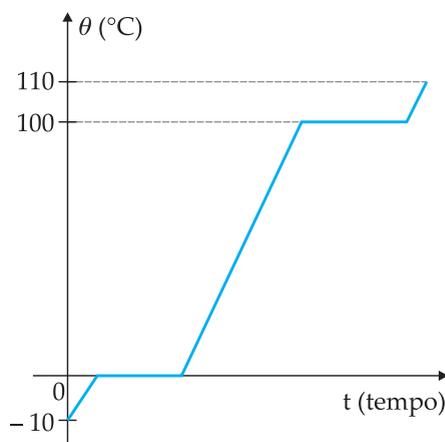
Resolução

a) A solidificação ocorre no momento em que a temperatura do líquido passa a ser constante no tempo. No gráfico, observamos que isso ocorre à temperatura de 20 °C. Portanto, a temperatura de solidificação do líquido é $\theta_s = 20 \text{ °C}$.

b) Durante a solidificação, a quantidade de calor cedida deve ser calculada por $Q_{L_s} = m \cdot L_s$, portanto: $Q_{L_s} = 200 \cdot 30$

$$Q_{L_s} = 6\,000 \text{ cal}$$

02. O gráfico a seguir representa a curva de aquecimento de 50 gramas de água no estado sólido (gelo) à temperatura inicial de -10 °C . Sabendo que $c_{\text{água}} = 1,0 \text{ cal/g} \cdot \text{°C}$, $c_{\text{gelo}} = 0,5 \text{ cal/g} \cdot \text{°C}$, $L_{\text{fusão}} = 80 \text{ cal/g}$, $L_{\text{vapor}} = 540 \text{ cal/g}$ e $c_{\text{vapor}} = 0,5 \text{ cal/g} \cdot \text{°C}$, determine a quantidade de calor recebida durante todo o processo.



Resolução

1º) De -10 °C a 0 °C a água recebe calor sensível, pois varia a sua temperatura sem mudar o estado físico.

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

$$Q_{S_1} = 50 \cdot 0,5 \cdot (0 - (-10))$$

$$Q_{S_1} = 250 \text{ cal}$$

2º) A 0 °C a água sofre a primeira mudança de fase (fusão) e recebe calor latente, pois, com o passar do tempo, a temperatura permanece constante.

$$Q = m \cdot L$$

$$Q_L = 50 \cdot 80$$

$$Q_{L_f} = 4\,000 \text{ cal}$$

3º) De 0 °C a 100 °C a água recebe calor sensível, pois varia a sua temperatura.

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

$$Q_{S_2} = 50 \cdot 1 \cdot (100 - 0)$$

$$Q_{S_2} = 5\,000 \text{ cal}$$

4º) A 100 °C a água sofre a segunda mudança de fase (vaporização), pois a temperatura permanece constante com o passar do tempo.

$$Q = m \cdot L$$

$$Q_{L_v} = 50 \cdot 540$$

$$Q_{L_v} = 27\,000 \text{ cal}$$

5º) De 100 °C a 110 °C o vapor d'água recebe calor sensível, pois a sua temperatura varia com o tempo.

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

$$Q_{s_3} = 50 \cdot 0,5 \cdot (110 - 100)$$

$$Q_{s_3} = 250 \text{ cal}$$

6º) A quantidade de calor total recebida pela água é dada por:

$$Q_T = Q_{s_1} + Q_{L_f} + Q_{s_2} + Q_{L_v} + Q_{s_3}$$

$$Q_T = 250 + 4\,000 + 5\,000 + 27\,000 + 250$$

$$Q_T = 36\,500 \text{ cal}$$

11. Trocas de Calor

Dizemos que um recipiente é termicamente isolado, quando suas paredes não absorvem e não transmitem energia na forma de calor. Eles são constituídos por materiais isolantes térmicos como, por exemplo, o isopor, a cortiça ou mesmo a lã de vidro e são denominados de **calorímetros**.

Consideremos dois corpos, **A** e **B**, cujas temperaturas são θ_A e θ_B , em que $\theta_A > \theta_B$. Colocando-os em contato dentro de um recipiente termicamente isolado (calorímetro), observamos que, após algum tempo, **A** e **B** atingem o equilíbrio térmico, ou seja, possuem a mesma temperatura. Como o corpo **A** encontra-se numa temperatura maior que **B** e o calor é a energia térmica que se transfere do corpo de maior temperatura para o de me-

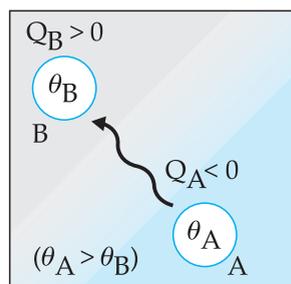
nor temperatura, o corpo **A** cede calor e o corpo **B** recebe calor. Após algum tempo, essa transferência de calor cessa e as temperaturas dos corpos atingem o mesmo valor T_e (temperatura de equilíbrio).

Como essa transferência de energia ocorreu no interior de um calorímetro, ou seja, sem interferência do meio externo, todo calor cedido pelo corpo **A** foi recebido pelo corpo **B**, convencionando-se o **calor cedido** como sendo negativo e o **calor recebido**, positivo. Após o equilíbrio térmico, temos:

Calor cedido por **A** = Calor recebido por **B**

$$-Q_A = Q_B$$

$$Q_A + Q_B = 0$$



A partir desses fatos, podemos generalizar: se colocarmos dentro de um recipiente termicamente isolado (calorímetro) **n** corpos a temperaturas diferentes, os corpos trocarão calor entre si, até atingirem o equilíbrio térmico. Os corpos de maior temperatura cedem calor para os de menor temperatura. Sendo o calor cedido **negativo** e o calor recebido **positivo**, podemos dizer que:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n = 0$$

Ou seja: $\sum Q = 0$

Assim, enunciamos o princípio das trocas de calor.

Quando dois ou mais corpos termicamente isolados e a temperaturas diferentes entram em contato entre si, após o equilíbrio térmico, a soma algébrica das quantidades de calor trocadas por eles é igual a zero.



Quando a troca de calor provoca apenas variação na temperatura dos corpos envolvidos, sem mudança de fase, eles estão trocando calor sensível (exemplo 1) e, portanto, devemos substituir, no princípio das trocas de calor, Q pela equação fundamental da calorimetria:

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

Se durante a troca de calor ocorrer alguma mudança de estado, o corpo que sofreu essa mudança terá recebido ou perdido calor latente e devemos substituir, no princípio das trocas de calor, Q pela equação do calor latente:

$$Q = m \cdot L$$

Quando a troca de calor envolve, além de variação na temperatura (calor sensível), **mudança de fase**, é conveniente, antes da aplicação do princípio das trocas de calor, analisarmos se o calor sensível cedido ou absorvido é suficiente para realizar completamente a mudança de estado (exemplo 2).

Exercícios Resolvidos

01. Dentro de um recipiente termicamente isolado, são misturados 200 g de alumínio cujo calor específico é $0,2 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$, à temperatura inicial de $100 \text{ }^\circ\text{C}$, com 100 g de água, cujo calor específico é $1,0 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$, à temperatura inicial de $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Determine a temperatura final de equilíbrio térmico.

Resolução

Como o sistema é isolado termicamente, as trocas de calor envolvem apenas a água e o alumínio, portanto, vale a equação:

$$Q_{\text{água}} + Q_{\text{Al}} = 0$$

$$m_{\text{ág}} \cdot c_{\text{ág}} \cdot (\theta_f - \theta_{i_{\text{ág}}}) + m_{\text{Al}} \cdot c_{\text{Al}} \cdot (\theta_f - \theta_{i_{\text{Al}}}) = 0$$

$$100 \cdot 1,0 \cdot (\theta_f - 30) + 200 \cdot 0,2 \cdot (\theta_f - 100) = 0$$

Resolvendo a equação, temos: $\theta_f = 50 \text{ }^\circ\text{C}$

02. Colocam-se 80 g de gelo a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ em 100 g de água a $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Admitindo-se que não ocorreu troca de calor com o meio externo e sabendo-se que o calor latente de fusão do gelo é 80 cal/g e o calor específico da água é $1 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$:



- qual a temperatura final da mistura?
- qual a massa de água líquida, após atingido o equilíbrio térmico?

Resolução

a) A água líquida a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ para resfriar-se até $0 \text{ }^\circ\text{C}$ deve perder uma quantidade de calor sensível calculada por: $Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta$

Portanto: $Q = 100 \cdot 1 \cdot (-20)$

$$Q = -2\,000 \text{ cal}$$

O gelo, para se transformar completamente em água líquida, necessita receber uma quantidade de calor calculada por: $Q = m \cdot L_f$

Portanto: $Q = 80 \cdot 80$

$$Q = 6\,400 \text{ cal}$$

Como a energia liberada pela água não é suficiente para derreter completamente o gelo, teremos no final, em equilíbrio térmico, uma mistura de gelo e água a $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

b) Calculando as quantidades de calor trocadas:

- fusão do gelo: $Q_f = m \cdot 80$

- resfriamento da água: $Q_s = -2\,000 \text{ cal}$

Como $Q_f + Q_s = 0$, temos:

$$m \cdot 80 + (-2\,000) = 0$$

$$80 \cdot m = 2\,000$$

$$m = 25 \text{ g}$$

Como é pedida a massa total de água líquida, devemos somar as massas de água provenientes da fusão e a já existente na mistura.

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

03. Em um recipiente termicamente isolado, colocam-se 100 g de gelo a 0 °C. Faz-se chegar a esse recipiente vapor de água a 100 °C, até que a temperatura do sistema seja 40 °C. Supondo que o recipiente não trocou calor com os corpos, calcule a massa de água no equilíbrio térmico. São dados:

- calor específico da água = 1 cal/g °C
- calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g
- calor latente de condensação do vapor

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

Resolução

À medida que o gelo recebe calor, ele se derrete e, após a fusão, a água resultante se aquece de 0 °C até 40 °C. Enquanto isso, o vapor perde calor e se condensa, e a água resultante da condensação se resfria de 100 °C até 40 °C.

Calculando as quantidades de calor trocadas:

Fusão do gelo:

$$Q_f = m \cdot L_f \Rightarrow Q_f = 100 \cdot 80 \Rightarrow Q_f = 8\,000 \text{ cal}$$

Aquecimento da água proveniente da fusão:

$$Q_{s1} = m \cdot c \cdot \Delta\theta \Rightarrow Q_{s1} = 100 \cdot 1 \cdot 40 \Rightarrow$$

$$Q_{s1} = 4\,000 \text{ cal}$$

Condensação do vapor:

$$Q_c = m \cdot L_c \Rightarrow Q_c = m \cdot (-540) \Rightarrow Q_c = -540m$$

Resfriamento da água proveniente da condensação:

$$Q_{s2} = m \cdot c \cdot \Delta\theta \Rightarrow Q_{s2} = m \cdot 1 \cdot (-60) \Rightarrow$$

$$Q_{s2} = -60m$$

Como $Q_f + Q_{s1} + Q_c + Q_{s2} = 0$, temos:

$$8\,000 + 4\,000 - 540m - 60m = 0$$

$$12\,000 - 600m = 0$$

$$m = 20 \text{ g}$$

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

$$m_T = 100 + 20 \Rightarrow m_T = 120 \text{ g}$$

Portanto, no equilíbrio térmico, há 120 g de água.

04. São misturados, em um recipiente termicamente isolado, 150 g de uma substância à temperatura de 200 °C, com um bloco de gelo de massa 30 g, à temperatura de 0 °C. Sabendo-se que o equilíbrio térmico se estabelece a 0 °C, que todo o gelo derrete e que o calor latente de fusão do gelo é $L_f = 80 \text{ cal/g}$, determine o calor específico da substância.

Resolução

Como o equilíbrio térmico se estabelece a 0 °C, o corpo cede calor sensível ao bloco de gelo que muda de fase, então, temos: $Q_{L_{\text{gelo}}} + Q_{S_{\text{corp}}} = 0$

Ou seja:

$$m \cdot L_f + m_c \cdot c_c \cdot (\theta_f - \theta_{ic}) = 0$$

$$30 \cdot 80 + 150 \cdot c_c \cdot (0 - 200) = 0$$

Resolvendo a equação, temos: $c_c = 0,08 \text{ cal/g} \cdot \text{°C}$

Observação— Os recipientes termicamente isolados, utilizados nas trocas de calor e denominados de **calorímetros**, geralmente participam das trocas de calor, embora na maioria das vezes essa participação seja pouco acentuada.

05. Um calorímetro contém 100 g de água à temperatura de 15 °C. Coloca-se no seu interior um bloco de cobre, de massa 400 g, cujo calor específico é 0,094 cal/g . °C e à temperatura inicial de 95 °C. Após atingido o equilíbrio térmico, a temperatura final da mistura é 35 °C. Determine a capacidade térmica do calorímetro.

Resolução

Quando o bloco de cobre é colocado no interior do calorímetro, ele, a água e o bloco trocam calor até atingir o equilíbrio térmico; portanto, podemos escrever que:

$$Q_{\text{calorímetro}} + Q_{\text{água}} + Q_{\text{cobre}} = 0$$

$$m_{\text{cal}} \cdot c_{\text{cal}} (\theta_f - \theta_i)_{\text{cal}} + m_{\text{ag}} \cdot c_{\text{ag}} \cdot (\theta_f - \theta_i)_{\text{ag}} +$$

$$+ m_{\text{Cu}} \cdot c_{\text{Cu}} \cdot (\theta_f - \theta_i)_{\text{Cu}} = 0$$

Sendo: $m_{\text{cal}} \cdot c_{\text{cal}} = C_{\text{cal}}$, temos:



$$C_{cal} \cdot (35 - 15) + 100 \cdot 1 \cdot (35 - 15) + 0,094 \cdot (35 - -95) = 0$$

$$20C_{cal} + 100 \cdot 20 - 37,6 \cdot 60 = 0$$

$$20C_{cal} + 2000 - 2256 = 0$$

$$20C_{cal} = 256 \Rightarrow C_{cal} = 12,8 \text{ cal/}^\circ\text{C}$$

12. Transformações

Observamos que a matéria, em geral, pode se apresentar em três fases distintas: sólida, líquida ou gasosa. São freqüentes as transformações entre elas, por exemplo: o gelo derretendo a 0°C e formando água líquida ou mesmo a água fervendo a 100°C e transformando-se em vapor de água.

No entanto, nem sempre a água ferve a 100°C e o gelo se funde a 0°C . Essas temperaturas de mudanças de fase dependem da pressão a que a substância está submetida. Por exemplo, na cidade de Santos, ao nível do mar, onde a pressão atmosférica é 1 atm, a água pura entra em ebulição a 100°C ; já no alto de uma montanha, a água entra em ebulição a uma temperatura menor que 100°C , pois a pressão, no alto da montanha, é menor que a pressão ao nível do mar (Santos).

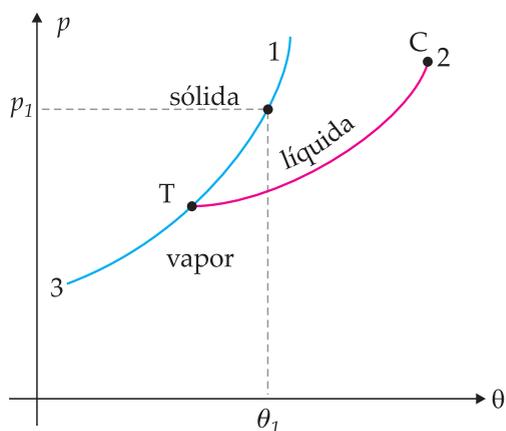
A temperatura de mudança de fase de uma substância se altera quando variamos a pressão a que ela está submetida. Neste capítulo, vamos analisar a influência da pressão na mudança de fase de uma substância pura.

13. Diagrama de Fase

A influência da pressão na temperatura de mudança de fase de uma substância pura é normalmente representada em um diagrama ($p \times T$), chamado de **diagrama de fase**.

O diagrama de fase é constituído por três curvas que se unem num único ponto e dividem o plano em três regiões distintas: região

em que encontramos a substância na fase sólida, região em que encontramos a substância na fase líquida e região em que encontramos a substância na fase de vapor, conforme figura a seguir.



- 1. Curva de fusão (sólido-líquido)
- 2. Curva de vaporização (líquido-vapor)
- 3. Curva de sublimação (sólido-vapor)

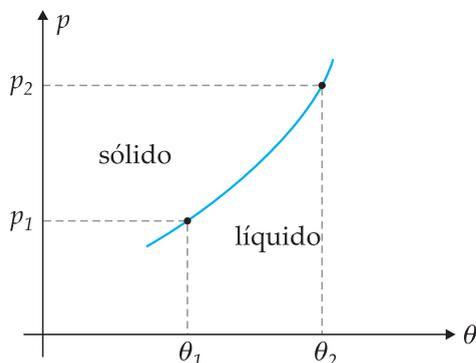
Pelo gráfico, observamos que cada curva representa a situação de equilíbrio entre duas fases de uma mesma substância pura, e seus pontos indicam a temperatura e pressão em que existem, em equilíbrio, as duas fases.

Por exemplo, a curva 1 representa o equilíbrio sólido-líquido e o ponto (θ_1, p_1) indica a temperatura e a pressão em que podemos encontrar a substância, na fase sólida e na fase líquida, coexistindo em equilíbrio no mesmo recipiente.

O ponto de encontro das três curvas representa a coexistência das três fases da substância em equilíbrio. Por essa razão, ele é chamado de **ponto triplo** e indica a temperatura e pressão em que existem em equilíbrio, no mesmo ambiente, vapor, líquido e sólido da mesma substância pura.

14. Fusão

O diagrama de fase a seguir representa o comportamento da temperatura de fusão da maioria das substâncias puras com as respectivas variações de pressão.



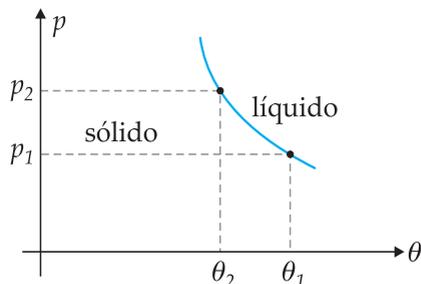
Analisando-o, observamos que, para a pressão p_1 , a temperatura de fusão é θ_1 e, para a pressão $p_2 > p_1$, a temperatura de fusão é $\theta_2 > \theta_1$. Concluimos que, se a pressão varia, a temperatura de mudança de fase também varia. Portanto:

O aumento de pressão aumenta a temperatura de fusão de uma substância pura.

Isso ocorre porque, normalmente, na fase sólida, as moléculas que constituem a substância se distribuem de forma regular, deixando pouco espaço entre elas e vibram em torno de uma posição de equilíbrio. Durante a fusão, as moléculas deslizam umas sobre as outras, empurrando-se mutuamente, e o efeito geral desses empurrões é que elas se afastam umas das outras, provocando um aumento de volume. O aumento da pressão externa dificulta o afastamento das moléculas e temos que fornecer mais energia para ocorrer a mudança de fase, e essa energia aumenta a temperatura de fusão da substância.

No entanto, observamos que algumas substâncias puras não obedecem a esse comportamento e constituem exceções a esta regra. São exceções a esta regra a água, o bismuto, o antimônio, o ferro e a prata.

O diagrama a seguir representa as exceções, ou seja, as substâncias em que o aumento de pressão diminui a temperatura de fusão.



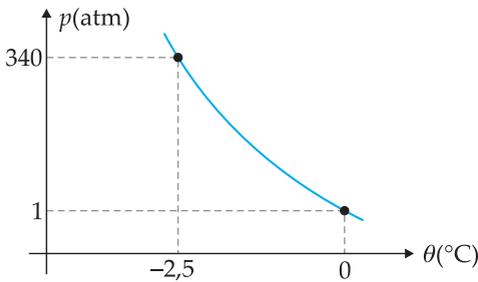
Note que, à pressão p_1 , a substância se funde à temperatura θ_1 e, na pressão $p_2 > p_1$, a substância se funde a uma temperatura θ_2 , menor que θ_1 . Portanto, para as exceções:

O aumento de pressão diminui a temperatura de fusão da substância pura.

Nessas substâncias, as moléculas que formam a rede cristalina que constitui o estado sólido deixam espaços vazios entre elas, formando assim "buracos". Durante a fusão, elas recebem energia e empurram umas as outras e afastar-se-iam mutuamente se não fossem os espaços vazios que elas acabam ocupando durante a mudança de fase, diminuindo assim o seu volume. Nesse caso, o aumento da pressão externa empurrando as moléculas umas contra as outras, facilita a ocupação dos espaços entre elas, fazendo com que elas necessitem de menos energia para se fundir e, portanto, mudem de fase a uma temperatura menor.



A figura abaixo representa o diagrama de fase do gelo (água na fase sólida).



Nele observamos que, à pressão de 1 atm, a temperatura de fusão do gelo é 0 °C e, à pressão de 340 atm, a temperatura de fusão do gelo é - 2,5 °C.

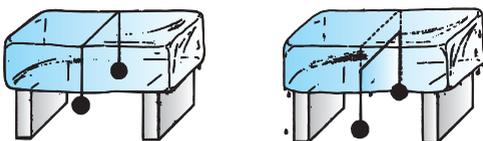
A tabela abaixo fornece alguns valores que correspondem à temperatura de fusão do gelo e suas respectivas pressões.

p (atm)	θ (°C)
1,0	0,000
2,0	-0,075
8,1	-0,060
135,0	-1,000
340,0	-2,500

Observe que, para pressão de 1,0 atm, a temperatura de fusão do gelo é 0 °C e que, para a pressão de 340,0 atm, a temperatura de fusão de gelo é - 2,500 °C; portanto, para que se diminua a temperatura de fusão de forma significativa, é necessário um grande aumento na pressão.

Um exemplo que ilustra o comportamento das exceções foi a experiência feita pelo físico irlandês, John Tyndall, conhecida por **regelo**.

O regelo consiste em atravessar inteiramente um bloco de gelo à temperatura abaixo de 0 °C, com um arame e dois pesos em suas extremidades, sem partir o bloco de gelo ao meio, conforme figura abaixo.



Os pesos, nas extremidades do arame, aumentam a pressão sobre o bloco de gelo onde ele está apoiado, formando água líquida imediatamente abaixo do arame, fazendo-o deslizar para baixo. Acima do arame, a pressão volta ao normal e a água se solidifica, regelando, deixando, assim, o bloco intacto.

Observação

Ao resfriarmos um líquido, ocasionalmente pode ocorrer um atraso na solidificação e o líquido eventualmente pode atingir temperaturas inferiores à sua temperatura de solidificação, sem mudar de fase. Por exemplo: a água pode atingir, dentro de um congelador, temperatura inferior a 0 °C e continuar no estado líquido. Esse fenômeno excepcional é denominado de **sobrefusão** ou **superfusão**. Assim dizemos que:

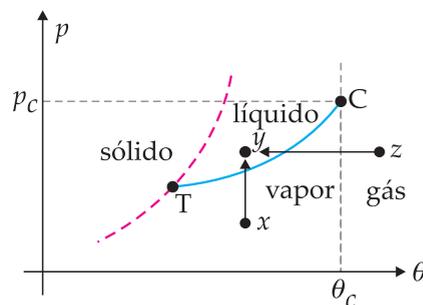
Um líquido está em **sobrefusão** quando sua temperatura é menor que a temperatura de fusão da substância.

Em condições especiais, já se conseguiu levar a água, sob pressão normal, à temperatura de - 20 °C, em sobrefusão.

No entanto, o líquido em sobrefusão é instável, podendo se solidificar completamente ou de forma parcial, com uma simples agitação ou na presença de um pequeno fragmento sólido.

15. Vaporização

Observamos que todas as substâncias puras obedecem à regra geral no equilíbrio líquido-vapor, ou seja:



O aumento de pressão aumenta a temperatura de vaporização da substância.

No diagrama de fase, a curva de vaporização prolonga-se até um ponto C chamado **ponto crítico**.

Na fase gasosa, a substância pura recebe duas classificações, podendo ser um **gás** ou um **vapor**. Ela é vapor, se sua temperatura for menor ou igual à temperatura do ponto crítico, e gás, se sua temperatura for maior que a temperatura do ponto crítico.

A diferença entre o gás e o vapor é que o vapor se transforma, à temperatura constante, na fase líquida apenas com uma variação de pressão adequada, e o gás, à temperatura constante, não passa para a fase líquida através de variação de pressão.

Assim, existe uma pequena diferença, nem sempre considerada, na mudança da fase gasosa para a fase líquida. Quando o vapor se transforma em líquido, dizemos que houve a **condensação** e, quando o gás se transforma em líquido, dizemos que houve a **liquefação**.

Na transformação xy , representada no diagrama anterior, a substância passa da fase gasosa para a fase líquida, porém, abaixo da temperatura crítica, e através de um aumento de pressão, temos então o vapor passando para a fase líquida, ou seja, a condensação.

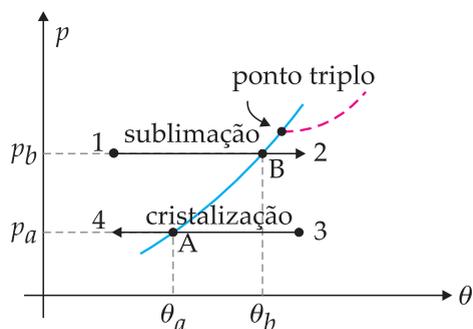
Na transformação zy , a substância passa da fase gasosa para a fase líquida, acima da temperatura crítica e à pressão constante, portanto, temos o gás passando para a fase líquida, ou seja, a liquefação.

16. Sublimação

Aquecendo um sólido cristalino, sob pressão constante, inferior à pressão do ponto triplo (ou tríplice), ele sofre sublimação. O sólido cristalino passa da fase sólida diretamente para a fase de vapor, sem passar pela fase líquida, a uma temperatura constante θ_s . Se o

vapor da substância, obtido na sublimação, for resfriado à mesma pressão, ele se transforma em sólido (sublimação ou cristalização), à mesma temperatura em que ocorreu a transformação anterior.

No diagrama de fase, a seguir, estão representadas as transformações 1–2 (sublimação) e 3–4 (cristalização) de uma substância pura.



No ponto A, temos a pressão p_a exercida sobre a substância, e a temperatura θ_a , que é a temperatura em que ela realiza a mudança de fase, chamada **sublimação**. Já o ponto B mostra uma pressão p_b exercida sobre a substância, maior que p_a e a temperatura θ_b de sublimação, maior que θ_a . Observamos que o aumento da pressão aumenta a temperatura de sublimação da substância; portanto, a mudança de fase sublimação ou cristalização obedece à regra geral, ou seja:

O aumento de pressão aumenta a temperatura de sublimação ou cristalização da substância.

Nas condições ambientes, poucas substâncias sublimam. No entanto, qualquer substância pode sublimar (exceto o hélio), dependendo apenas das condições físicas a que ela está submetida.

Nas condições ambientes podemos observar, por exemplo, a sublimação da naftalina, do gelo-seco (CO_2 sólido) e a do iodo.



Exercícios Resolvidos

01. Em um recipiente temos, sob pressão normal, uma certa massa de água em sobrefusão, à temperatura de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Agitando o recipiente, parte dessa água se congela bruscamente. Determine a proporção de água que se congela.

São dados:

- calor específico da água = $1\text{ cal/g}\cdot^{\circ}\text{C}$
- calor latente de solidificação = -80 cal/g

Resolução

Seja M a massa total de água no recipiente e m a massa de água que se congela.

Para estar à temperatura de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, a água perdeu uma quantidade de calor calculada por:

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

$$Q_s = M \cdot 1 \cdot (-10)$$

$$Q_s = -10M$$

Se não houvesse ocorrido a sobrefusão, ao perder essa mesma quantidade de calor, m gramas de água teriam se congelado. A porção de água que teria se congelado pode ser calculada por:

$$Q_L = m \cdot L_{\text{solidificação}}$$

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

$$Q_L = -80m$$

A massa m de gelo que se forma, ao ser agitado o recipiente em sobrefusão, é a mesma que teria se congelado num processo de solidificação normal. Assim, temos que:

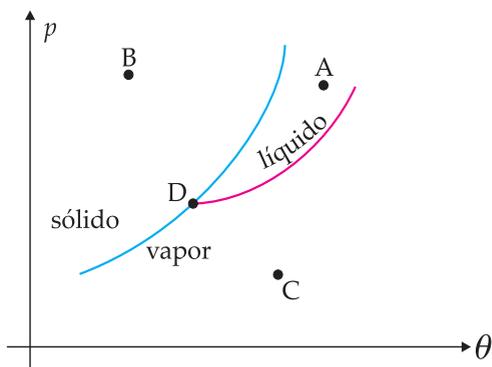
$$Q_s = Q_L$$

$$-10M = -80m$$

$$m = \frac{1}{8}M$$

Portanto, congela-se $1/8$ da massa total no recipiente.

02. O diagrama abaixo representa a mudança de fase de uma substância pura. Pergunta-se:



- Qual a mudança de fase, quando a substância vai de A para B?
- Qual a fase da substância no ponto C?
- Qual dos pontos representa o ponto triplo ou tríplice e por que ele recebe esse nome?
- Qual a mudança de fase, quando a substância vai de C para A?

Resolução

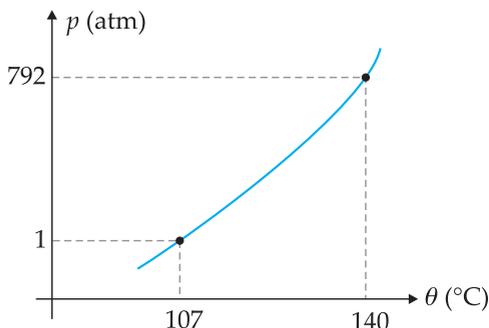
a) O ponto A representa a substância na fase líquida, já o ponto B representa a substância na fase sólida. De A para B, a substância passa da fase líquida para a fase sólida, portanto, ela sofre uma solidificação.

b) O ponto C corresponde à fase de vapor.

c) O ponto triplo ou tríplice é o ponto D e recebe esse nome porque nele coexistem em equilíbrio as três fases da substância (sólida, líquida e gasosa).

d) O ponto C representa a substância na fase de vapor, e B representa a substância na fase líquida. A transformação de C para B representa a mudança da fase de vapor para a fase líquida, portanto, a condensação.

03. O gráfico abaixo representa o diagrama de fase para a fusão do enxofre. Pergunta-se:



- Qual a temperatura de fusão do enxofre, quando a pressão exercida sobre ele for 1 atm?
- O que acontece com a temperatura de fusão quando aumentamos a pressão sobre o enxofre de 1 atm para 792 atm?

Resolução

a) No diagrama de fase, observamos que, para a pressão de 1 atm, a temperatura de fusão correspondente é 107 °C. Portanto, para pressão de 1 atm, temos:

$$T_{\text{fusão}} = 107 \text{ °C}$$

b) No diagrama de fase, observamos que, à pressão de 1 atm, o enxofre se funde a 107 °C e, à pressão de 792 atm, o enxofre se funde a 140 °C; portanto, quando aumentamos a pressão sobre o enxofre de 1 atm para 792 atm, sua temperatura de fusão varia de 107 °C para 140 °C.

04. Em Brasília, a água ferve a 96 °C. Determine a quantidade de calor necessária para vaporizar completamente 200 g de água a 26 °C em Brasília.

Dados: calor específico da água é igual a 1 cal/g . °C e calor latente de vaporização da água, 540 cal/g.

Resolução

Para aquecermos a água de 26 °C até 96 °C, devemos fornecer calor sensível, calculado por:

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

$$Q_s = 200 \cdot 1 \cdot 70$$

$$Q_s = 14\,000 \text{ cal}$$

Para a vaporização da água, devemos fornecer calor latente, calculado por:

$$Q_L = m \cdot L_{\text{vaporização}}$$

$$Q_L = 200 \cdot 540$$

$$Q_L = 108\,000 \text{ cal}$$

Portanto, a quantidade total de calor fornecida é:

$$Q_T = Q_s + Q_L$$

$$Q_T = 14\,000 + 108\,000$$

$$Q_T = 122\,000 \text{ cal}$$

05. Os foguetes, lançados no espaço, utilizam oxigênio líquido. Sabendo-se que a temperatura crítica do oxigênio (O₂) é de -118 °C, qual deve ser a temperatura dos tanques que contêm oxigênio líquido nos foguetes?

Resolução

Como devemos manter o oxigênio na fase líquida, a temperatura dos tanques deve ser igual ou inferior à sua temperatura crítica, para evitar a vaporização.

17. Propagação de Calor

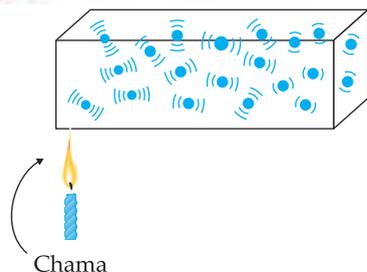
O calor pode se propagar de um corpo para outro, ou da região quente para a região fria de um mesmo corpo, por três processos distintos.

Transmissão de calor $\left\{ \begin{array}{l} \text{condução} \\ \text{convecção} \\ \text{radiação} \end{array} \right.$

18. Condução

É o processo de propagação de calor através do qual a energia passa de partícula para partícula, vibrando as partículas, porém sem deslocá-las.

Por exemplo, uma barra de ferro, ao receber calor numa extremidade, por condução, leva calor à outra extremidade, conforme a figura.

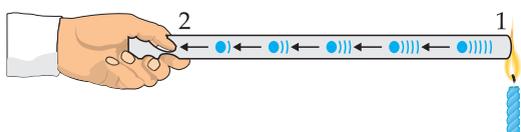


Na região aquecida pela chama, as moléculas têm maior agitação térmica e, por choque, as moléculas passam essa agitação (energia) para as moléculas vizinhas, sem que as moléculas sofram deslocamento.

Os materiais podem ser divididos em condutores e isolantes de calor.

Condutores: são os materiais que permitem com facilidade a propagação do calor por condução.

Exemplo: os metais.

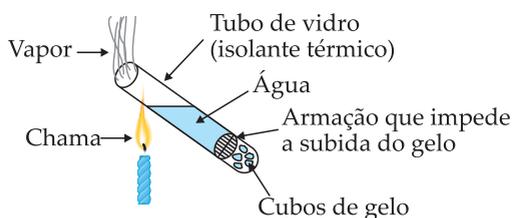


O calor que a extremidade 1 recebe da fonte, propaga-se por condução na barra, atingindo então a extremidade 2, onde está a mão de uma pessoa.

Isolantes: são os materiais que dificultam a propagação do calor por condução. São chamados de maus condutores.

Exemplo: plástico, isopor, madeira, cortiça, vidro.

A água é um mau condutor de calor; a condução é muito lenta, portanto consideramos a água como isolante térmico. Vejamos uma experiência na figura.



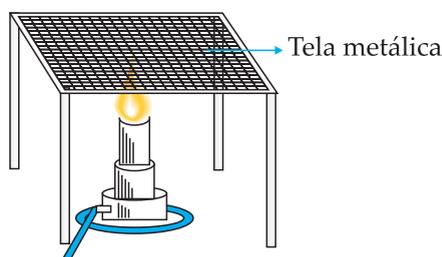
Se aquecermos o tubo conforme a figura, a água em cima chega a vaporizar, sem que o gelo, mantido embaixo pela armação, funda.

Isso acontece devido à baixa condução de calor da água.

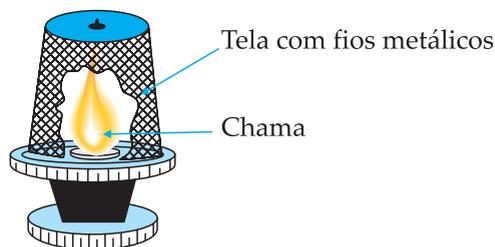
As chaleiras e panelas usadas na cozinha devem ser metálicas, para o calor se propagar rapidamente. Os seus cabos devem ser de madeira ou plástico, por serem maus condutores, dificultando assim a chegada de calor à mão da cozinheira.

18.1. Fenômenos Explicados pela Condução

I. O gás inflamável é colocado para queimar abaixo da tela metálica, como está representado na figura. Notamos que a chama não passa para o lado de cima, porque a tela metálica conduz o calor para fora tão rapidamente que o gás exterior não pega fogo.



A lâmpada usada nas minas de carvão contém ao seu redor uma tela com fios metálicos, conforme a figura abaixo, evitando que a chama passe para o lado externo. Isso poderia provocar uma explosão na mina, uma vez que o ar no interior da mina é inflamável.



II. Ao tocarmos com a mão uma barra metálica, temos a sensação de que é mais fria do que um pedaço de madeira, ambos à temperatura ambiente. Isso acontece porque o metal, devido à sua condução, tira calor rapidamente da nossa mão, dando a sensação de frio; já a madeira demora para retirar calor, devido ao fato de ser isolante.

III. Nas regiões muito frias, as casas são construídas com paredes duplas e entre elas existe ar. O ar é um ótimo isolante térmico, dificultando a troca de calor entre as partes interna e externa.

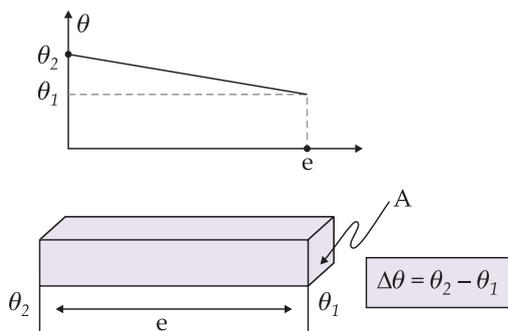
As roupas de lã e peles de animais aprisionam ar em suas fibras, dificultando a condução do calor.

O isopor também possui espaços com ar, dando assim uma boa isolamento térmica.

A serragem é melhor isolante do que a madeira, por possuir ar em seu meio.

18.2. Cálculo de Fluxo de Calor por Condução

Considere um condutor de calor, cujas extremidades apresentem uma diferença de temperatura. Admitamos que o condutor se encontre em regime estacionário, isto é, a temperatura varia uniformemente ao longo do seu comprimento.



O fluxo é definido como a quantidade de calor que atravessa o condutor na unidade de tempo.

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

Verifica-se que:

- o fluxo de calor é diretamente proporcional à área de seção e à diferença de temperatura e inversamente proporcional à espessura da barra;

$$\phi = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{k \cdot A \cdot \Delta \theta}{e}$$

- k é uma constante, chamada de coeficiente de condutividade térmica. Cada material possui sua condutividade térmica.

$$k = \frac{Q \cdot e}{A \cdot \Delta t \cdot \Delta \theta}$$

$$[k] = \text{J/s} \cdot \text{m} \cdot \text{K}$$

$$[k] = \text{cal/s} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$$

A tabela a seguir apresenta exemplos de coeficientes de condutibilidade térmica.

Condutividade térmica (k) em cal/s. cm °C		
Metais	Sólidos não-metálicos	Fluidos a 20 °C
Prata 0,99	Vidro 0,002	Água 0,0014
Cobre 0,92	Concreto 0,002	Clicerina 0,0006
Alumínio 0,49	Cortiça 0,0001	Hidrogênio 0,00033
Ferro 0,12	Feltro 0,0001	Ar 0,00006
Chumbo 0,083	Tijolo de barro 0,0015	

19. Convecção

É a forma de propagação de calor, em que a matéria e a energia se movimentam por causa da diferença de densidade entre as partes quentes e as partes frias de uma substância.

A convecção ocorre nos fluidos, ou seja, nos líquidos e gases.

Quando aquecemos um fluido, devido à sua dilatação (aumento de volume), ele torna-se menos denso. O fluido menos denso sobe e o mais denso (frio) desce, ocupando o lugar do menos denso.

Dessa forma, o calor passa das regiões de maior temperatura para as de menor temperatura.

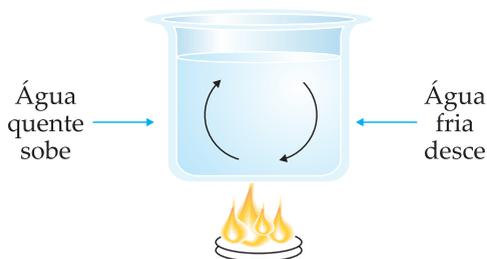


Vamos analisar alguns casos de convecção

19.1. Aquecimento

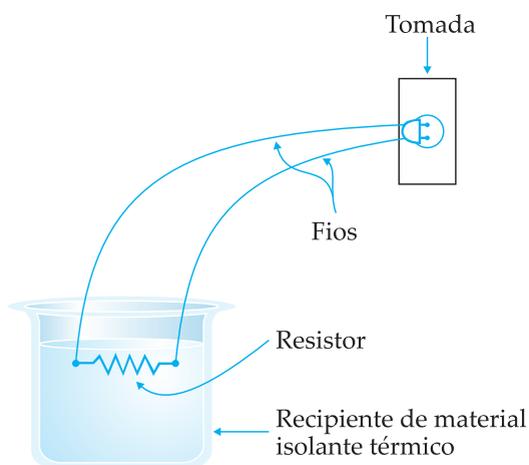
O aquecimento de um fluido deve ser feito por baixo do fluido, para que se formem as correntes de convecção.

Considere o recipiente da figura abaixo, sendo aquecido pela chama



A água quente, embaixo, torna-se menos densa e sobe; já a água fria, em cima, que é mais densa, desce.

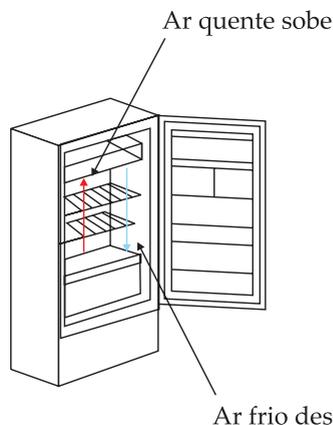
Se aquecermos um líquido por cima, não teremos correntes de convecção.



Ligando o resistor e mantendo-o próximo da superfície do líquido, notamos que a água em cima chega a ferver e a água no fundo continua fria. O fluido menos denso não desce, nem o mais denso sobe, portanto não temos a formação de correntes de convecção.

19.2. Resfriamento

O resfriamento de um fluido deve ser feito por cima do fluido, para que se formem as correntes de convecção. É o que acontece, por exemplo, nas geladeiras. O congelador, que faz a troca de calor, situa-se em cima. O ar quente que sai dos alimentos sobe e o ar frio que já trocou calor com o congelador desce.



As prateleiras da geladeira devem ser gradeadas, para permitir a passagem do ar e facilitar a convecção.

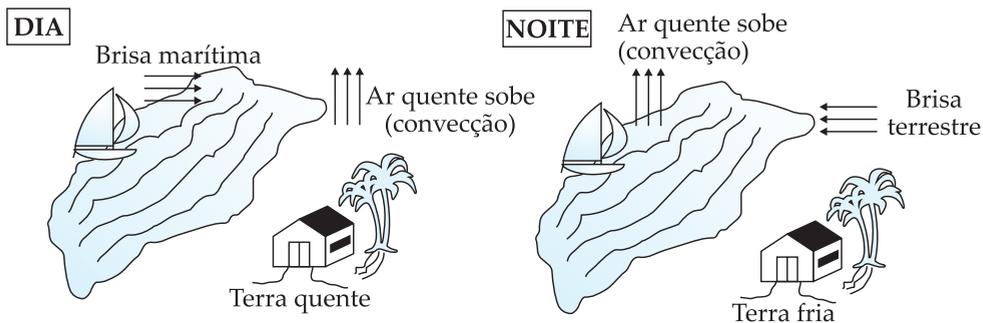
O aparelho de ar condicionado deve ser instalado no alto do ambiente, para formar as correntes de convecção e a temperatura do ambiente ficar mais uniforme.

19.3. Brisas Litorâneas

Devido ao seu alto calor específico ($1 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$), a água do mar sofre pequena variação de temperatura. O continente sofre maior variação de temperatura que o mar.

Durante o dia, a superfície da Terra está mais quente que o mar, então, o ar quente do continente sobe e o ar do mar desloca-se para o continente. Temos a brisa marítima.

Durante a noite, a terra resfria-se rapidamente e o mar torna-se mais quente que a terra, então, o ar quente sobre o mar sobe e o ar da terra desloca-se para o mar. Temos a brisa terrestre.



19.4. Inversão Térmica

Nas grandes cidades, o ar está poluído devido, principalmente, ao monóxido de carbono, dióxido de carbono e dióxido de enxofre, eliminados pelos escapamentos de automóveis, pela fumaça das fábricas, refinarias e destilarias, que acarretam irritações visuais e respiratórias.

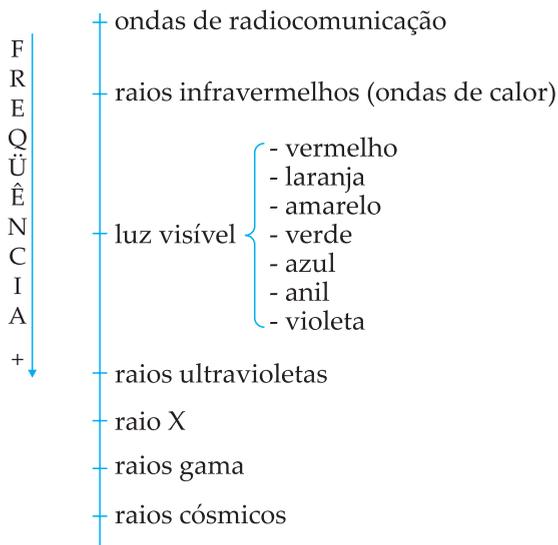
Nos dias quentes, o ar poluído é mais quente do que o ar puro das camadas superiores, portanto ocorre convecção.

A poluição sobe e o ar puro desce.

No inverno é comum, o ar poluído nas proximidades da superfície estar mais frio do que as camadas superiores, portanto não ocorrem as correntes de convecção, dificultando dispersão dos poluentes. Esse fenômeno é chamado de inversão térmica.

20. Irradiação

A propagação de calor por irradiação é devida principalmente as ondas eletromagnéticas na faixa do infravermelho, denominadas ondas de calor.



O infravermelho é uma onda eletromagnética que fica próxima da luz visível, conforme o esquema, porém não é visível.



A irradiação pode ocorrer tanto no vácuo, quanto em certos meios materiais. Já a condução e a convecção só se propagam em meios materiais.

A energia radiante do Sol chega até a Terra exclusivamente por irradiação, por atravessar uma grande região de vácuo.

As ondas de calor, ao atingirem um corpo, sofrem reflexão, absorção e transmissão.

- a) **Reflexão:** ocorre com maior intensidade nas superfícies claras.
- b) **Absorção:** ocorre com maior intensidade nas superfícies rugosas e escuras. É o calor absorvido que provoca o aumento de temperatura dos corpos.
- c) **Transmissão:** ocorre com maior intensidade nos condutores de calor, que permitem a propagação do calor para o corpo todo.

É aconselhável, no verão, usar roupas de cor clara, para que a reflexão difusa seja maior do que a absorção, não aquecendo as pessoas. Já, no inverno, é aconselhável usar roupas de cor escura para absorver o máximo possível de calor.

Capítulo 04. Gases Perfeitos

1. Introdução

Uma substância, quando aquecida, atinge uma determinada fase chamada **fase de vapor**. Continuando o aquecimento do vapor, a partir de determinada temperatura, sob influência de qualquer pressão, esse vapor não mais se liquefaz ou solidifica. A partir dessa temperatura, chamada **temperatura crítica**, a substância passa a ser denominada gás.

2. Modelo Macroscópico do Gás Ideal

Os diferentes gases reais (oxigênio, hélio, hidrogênio, néon etc.), em razão das suas características moleculares, apresentam, no geral, comportamentos desiguais. Entretanto, quando submetidos a baixas pressões e a altas temperaturas, comportam-se macroscopicamente de maneira semelhante.

Para nosso estudo, vamos adotar um “modelo teórico” de comportamento aproximado ao dos gases reais. Esta aproximação é melhorada quanto menor a pressão e maior a temperatura a que são submetidas as substâncias.

Esse modelo recebe o nome de **gás perfeito** ou **gás ideal**.

3. Características do Gás Ideal

As regras do comportamento dos gases ideais foram estabelecidas por Robert Boyle, Jacques Charles, Joseph Louis Gay-Lussac e Paul Emile Clapeyron, entre os séculos XVII e XIX.

Basicamente, consideram-se no gás perfeito as seguintes características:

- 1) as moléculas são pontos materiais;
- 2) grande número de moléculas em movimentos desordenados;
- 3) choques perfeitamente elásticos e de pequena duração;
- 4) só são consideradas as forças que agem durante o choque entre moléculas.

4. As Variáveis de Estado de um Gás

A quantidade de partículas de um gás é muito grande, da ordem de 10^{20} partículas por centímetro cúbico, e para maior facilidade, avaliamos a quantidade de gás por meio do seu número de mols (n).

Devemos lembrar que **um mol** de gás constitui-se de um número de moléculas desse gás, dado número de Avogadro.

$$(N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ moléculas/mol})$$

Vale a relação:

$$n = \frac{\text{massa do gás}}{\text{massa de um mol}} = \frac{m}{M}$$

Para uma determinada massa de gás perfeito, as variáveis de estado são as grandezas físicas que o caracterizam: temperatura (T), volume (V) e pressão (p).

4.1. Temperatura (T)

A temperatura é a grandeza física relacionada à energia cinética de translação das partículas, portanto, sempre será usada na escala absoluta, pois o zero absoluto corresponde à energia zero.

Lembre-se de que:

$$T_K = \theta_C + 273$$

4.2. Volume (V)

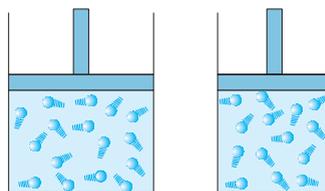
Os gases são altamente expansíveis; suas moléculas ocupam todo o espaço disponível do recipiente que contém esses gases. Assim, o volume do gás corresponde sempre ao volume do recipiente.

Lembre-se de que:

$$1 \text{ l} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$$

ou

$$1 \text{ m}^3 = 10^3 \text{ l}$$





4.3. Pressão (p)

A pressão de um gás contido num recipiente se deve às colisões que as moléculas efetuam contra as paredes do recipiente.

Unidades Usuais de Pressão (Simbologia)

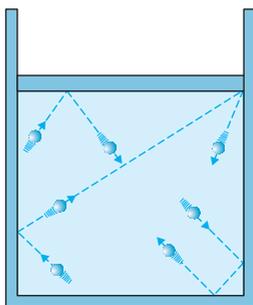
N/m^2 = newton por metro quadrado

Pa = pascal

atm = atmosfera técnica métrica

mmHg = milímetros de mercúrio

1 atm = 760 mmHg $\cong 10^5$ Pa = 10^5 N/m²



5. Transformações Gasosas

Apresentadas as variáveis de estado (V , T , p), podemos dizer que, para uma determinada massa de gás, a variação de pelo menos duas dessas variáveis caracteriza uma transformação sofrida pelo gás.

Assim, podemos ter transformações em temperatura constante (isotérmica), em volume constante (isométrica ou isocórica) ou em pressão constante (isobárica).

$V = \text{constante} \rightarrow$ Isométrica

$p = \text{constante} \rightarrow$ Isobárica

$T = \text{constante} \rightarrow$ Isotérmica

6. Equação de Clapeyron

Quando o gás estiver nas condições descritas no item 1, isto é, baixa pressão e temperatura elevada, é válida a relação:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

A constante R é chamada de constante universal dos gases perfeitos e pode assumir os valores:

$$R = 0,082 \frac{\text{atm} \cdot \ell}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$R = 8,31 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$R \cong \frac{2 \text{ cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

Exercícios Resolvidos

01. Num recipiente de 41 litros são colocados 5,0 mols de um gás perfeito à temperatura de 300 K. Qual a pressão exercida pelo gás nessas condições?

($R = 0,082 \text{ atm} \cdot \ell/\text{K} \cdot \text{mol}$)

Resolução

$$n = 5,0$$

$$V = 41 \text{ L}$$

$$T = 300 \text{ K}$$

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$p = \frac{n \cdot R \cdot T}{V} = \frac{5 \cdot 0,082 \cdot 300}{41}$$

$$p = 3,0 \text{ atm}$$

02. Num recipiente de 8,2 litros coloca-se 1,5 mol de um gás perfeito. A qual temperatura deve ser aquecido o conjunto para que a pressão exercida pelo gás atinja 6,0 atm?

($R = 0,082 \text{ atm} \cdot \ell/\text{K} \cdot \text{mol}$)

Resolução

$$n = 1,5$$

$$V = 8,2 \text{ L}$$

$$p = 6,0 \text{ atm}$$

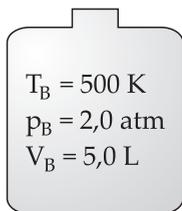
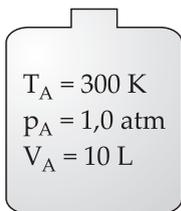
$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$T = \frac{p \cdot V}{n \cdot R} = \frac{6 \cdot 8,2}{1,5 \cdot 0,082}$$

$$T = 400 \text{ K}$$

$$\theta_C = 127 \text{ }^\circ\text{C}$$

03. Os recipientes A e B contêm oxigênio nas condições indicadas:



Sendo 0,5 kg a massa de gás contida no recipiente A, pede-se calcular a massa de oxigênio no recipiente B.

Resolução

$$1) p_A \cdot V_A = \frac{m_A}{M} R \cdot T_A \Rightarrow 1 \cdot 10 = \frac{0,5}{M} R \cdot 300$$

$$2) p_B \cdot V_B = \frac{m_B}{M} R \cdot T_B \Rightarrow 2 \cdot 5 = \frac{m_B}{M} R \cdot 500$$

3) Igualando (1) e (2) vem:

$$\frac{0,5 \cdot R \cdot 300}{M} = \frac{m_B \cdot R \cdot 500}{M}$$

$$m_B = 0,3 \text{ kg}$$

04. Um recipiente, de volume constante, é dotado de uma válvula, e contém 1,5 mol de oxigênio a uma temperatura de 127 °C. Abrindo-se a válvula, parte do gás escapa e a temperatura estabiliza em 27 °C. Qual a porcentagem de massa do gás que resta no recipiente?

Resolução

$$p \cdot V = n_1 \cdot R (127 + 273) \rightarrow p \cdot V = 1,5 R 400 \quad (1)$$

$$p \cdot V = n_2 \cdot R (27 + 273) \rightarrow p \cdot V = n_2 \cdot R 300 \quad (2)$$

Igualando (1) e (2) vem:

$$600 \cdot R = n_2 \cdot R 300 \Rightarrow n_2 = 0,5$$

Cálculo da porcentagem:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{0,5}{1,5} = 0,33 \Rightarrow 33\%$$

05. Um gás perfeito encontra-se no interior de um cilindro metálico munido de um êmbolo e de uma torneira. O volume inicial do gás é V_0 e a sua pressão inicial é $p_0 = 4 \text{ atm}$. Abre-se a torneira e desloca-se o êmbolo de forma que a metade da massa de gás escapa lentamente, ficando o gás residual reduzido a um volume igual a $2/3$ do inicial. Qual a nova pressão do gás?

Resolução

$$(1) \begin{cases} V_1 = V_0 \\ p_0 = 4 \text{ atm} \\ n_1 = n \end{cases} \quad \begin{cases} V_2 = \frac{2}{3} V_0 \\ p = ? \\ n_2 = 0,5 n \end{cases}$$

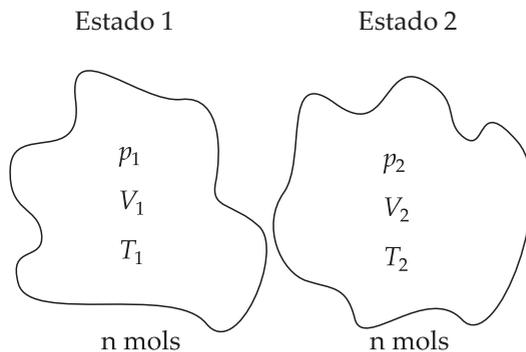
$$(2) \begin{cases} p_0 \cdot V_0 = n_1 \cdot R \cdot T \\ p \cdot V = n_2 \cdot R \cdot T \end{cases}$$

$$\frac{4 \cdot V_0}{p \cdot \frac{2}{3} \cdot V_0} = \frac{n \cdot R \cdot T}{0,5 \cdot n \cdot R \cdot T}$$

$$(3) \left\{ \frac{4 \cdot 3}{2p} = \frac{1}{0,5} \Rightarrow p = 3,0 \text{ atm} \right.$$

7. Lei Geral dos Gases Perfeitos

Consideremos dois estados distintos de uma mesma massa gasosa:





Aplicando a equação de Clapeyron aos dois estados, temos:

$$\begin{aligned} p_1 V_1 &= nRT_1 \\ p_2 V_2 &= nRT_2 \end{aligned}$$

Dividindo membro a membro essas funções, obtemos:

$$\frac{p_1 V_1}{p_2 V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

ou seja:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

A expressão acima representa a **Lei Geral dos Gases Perfeitos**, que relaciona dois estados quaisquer de **uma dada massa** gasosa.

É importante ressaltar que se uma mesma massa gasosa sofrer várias transformações, é válida a relação:

$$\frac{pV}{T} = \text{constante}$$

8. Condições Normais de Pressão e Temperatura

Um gás está em condições normais de pressão e temperatura quando:

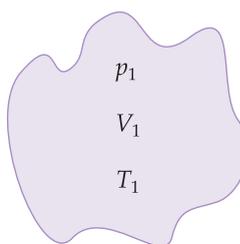
CNPT	
Pressão	Temperatura
$1 \text{ atm} \cong 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$	$0 \text{ }^\circ\text{C} = 273 \text{ K}$

9. Transformações Particulares

9.1. Transformação Isométrica

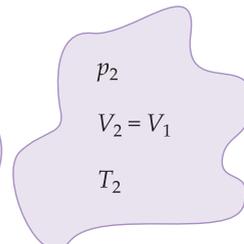
É aquela na qual, entre dois estados, variam a temperatura e a pressão, com o volume permanecendo constante.

n-mols



Estado 1

n-mols



Estado 2

Aplicando-se a Lei Geral dos Gases Perfeitos:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

Como $V_1 = V_2$

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

ou seja

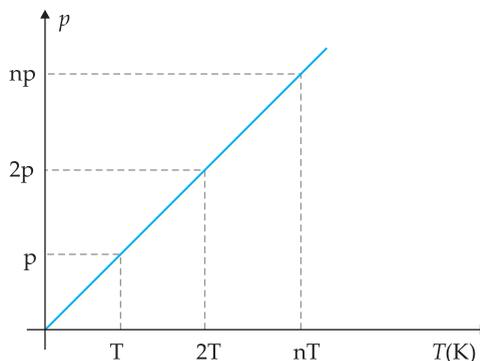
$$\frac{p}{T} = \text{constante}$$

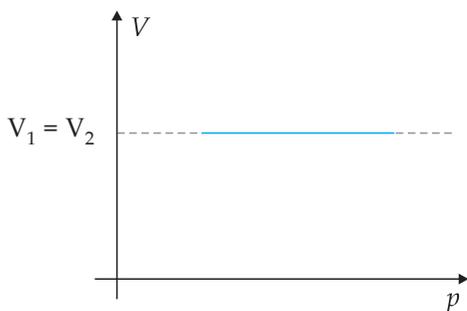
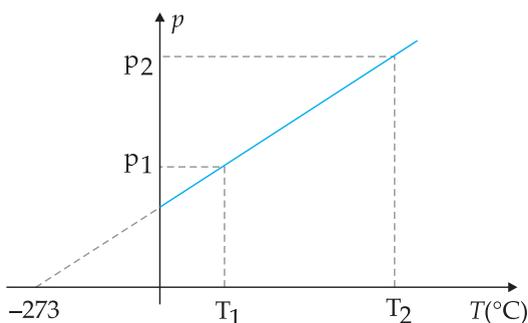
Portanto:

Para uma dada massa gasosa, mantida em volume constante, a pressão e a temperatura absoluta são diretamente proporcionais.

Essa conclusão é conhecida como lei de Charles.

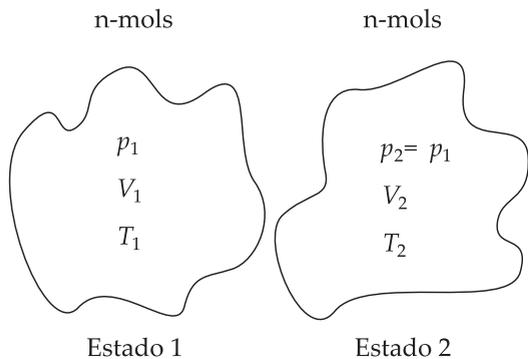
Para ilustrar o comportamento da transformação isométrica, apresentamos os diagramas da pressão em função da temperatura e do volume em função da pressão.





9.2. Transformação Isobárica

É aquela na qual, entre dois estados, variam a temperatura e o volume, com a pressão permanecendo constante.



Aplicando-se a Lei Geral dos Gases Perfeitos:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

Como $p_1 = p_2$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

ou seja:

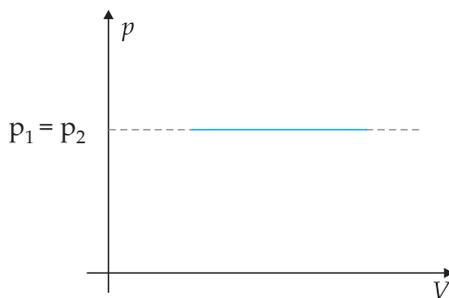
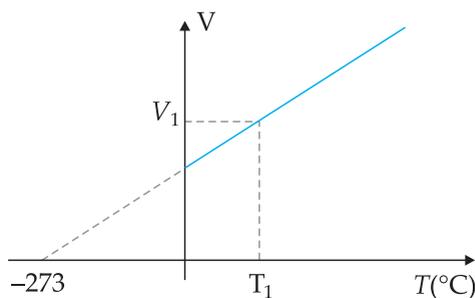
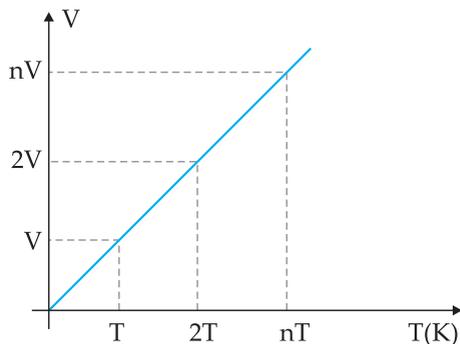
$$\frac{V}{T} = \text{constante}$$

Portanto:

Para uma dada massa gasosa, mantida em pressão constante, o volume e a temperatura absoluta são diretamente proporcionais.

Essa conclusão é conhecida com o nome de Gay-Lussac.

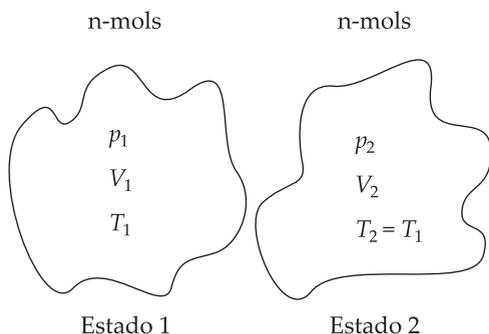
Para ilustrar o comportamento da transformação isobárica, apresentamos os diagramas do volume em função da temperatura e da pressão em função do volume.





9.3. Transformação Isotérmica

É aquela na qual, entre dois estados, variam a pressão e o volume, com a temperatura permanecendo constante.



Aplicando-se a Lei Geral dos Gases Perfeitos:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

Como $T_2 = T_1$

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

ou seja

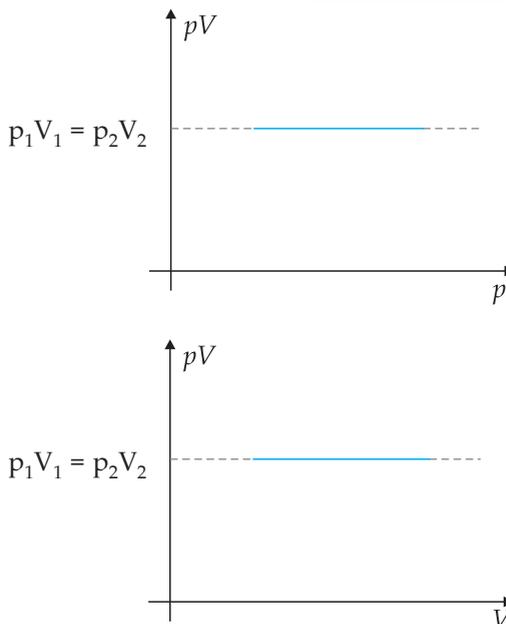
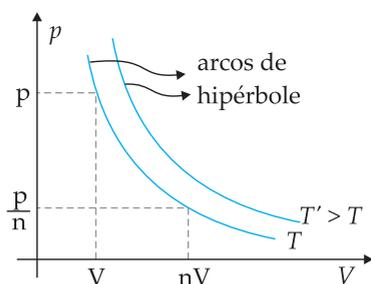
$$pV = \text{constante}$$

Portanto:

Para uma dada massa gasosa, mantida em temperatura constante, a pressão e o volume são inversamente proporcionais, isto é, o produto pV é constante.

Essa conclusão é conhecida como lei de Boyle.

Para ilustrar o comportamento da transformação isotérmica, apresentamos os diagramas da pressão em função do volume e o produto pV em função da pressão e do volume.



Exercícios Resolvidos

01. (Efoa-MG) Um gás perfeito, a uma pressão de 10 atm, ocupa um volume de 4 litros. Ele sofre uma transformação isotérmica e seu volume atinge 10 litros. A nova pressão exercida pelo gás é de:

- a) 4 atm
- b) 25 atm
- c) 100 atm
- d) 10 atm
- e) 250 atm

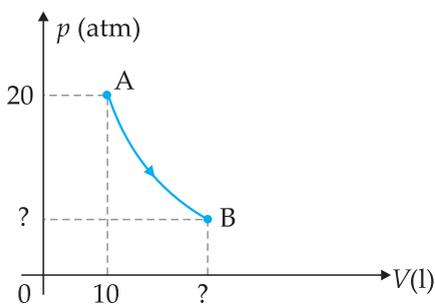
Resolução

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

$$10 \cdot 4 = p_2 \cdot 10$$

$$p_2 = 4 \text{ atm}$$

02. Um gás perfeito a 27 °C sofre uma expansão isotérmica de A para B, caindo sua pressão a $\frac{1}{5}$ do valor inicial. Determinar, para o estado B, o volume, a pressão e a temperatura do gás.



Resolução

$$p_A \cdot V_A = p_B \cdot V_B$$

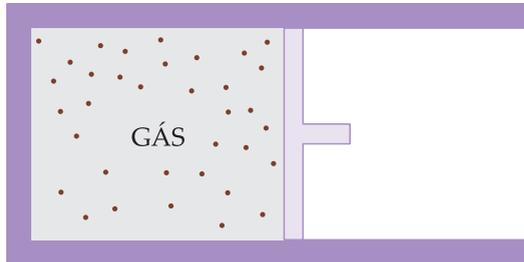
$$p_B = \frac{1}{5} p_A = \frac{20}{5} = 4 \text{ atm}$$

$$20 \cdot 10 = 4 \cdot V_B$$

$$V_B = 50 \text{ l}$$

$$T_A = T_B = 300 \text{ K}$$

03. Um cilindro de paredes rígidas e êmbolo móvel sem atrito contém um certo gás em seu interior, conforme indica a figura.



Quando a temperatura é 27 °C, o volume ocupado pelo gás é 5 litros. Qual deve ser a temperatura para que o volume do gás seja 8 litros, mantendo a pressão constante?

Resolução

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

$$T_1 = 300 \text{ K}$$

$$\frac{5}{300} = \frac{8}{T_2} \Rightarrow T_2 = 480 \text{ K}$$

$$\theta_2 = 207 \text{ °C}$$

04. Dentro de um botijão existe determinada massa de gás ocupando o volume de 5 litros a 300 K e à pressão de 6 atmosferas. O botijão é esfriado até 200 K. Determine a pressão final, supondo invariável o volume do botijão.

Resolução

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

$$\frac{6}{300} = \frac{p_2}{200}$$

$$p_2 = 4 \text{ atm}$$

05. (F. M. Itajubá-MG) Um motorista calibrou os pneus do seu carro à temperatura de 27 °C. Depois de rodar bastante, ao medir novamente a pressão, encontrou um resultado 20% superior ao valor da calibração inicial. Supondo-se invariável o volume das câmaras, a temperatura do ar comprimido deve ter atingido:

- a) 32 °C
- b) 320 K
- c) 360 K
- d) 300 K
- e) não temos dados para calculá-la

Resolução

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

$$\frac{p}{300} = \frac{1,2p}{T}$$

$$T = 360 \text{ K ou } \theta = 87 \text{ °C}$$

Resposta: C

06. Uma dada massa de gás perfeito está num recipiente de volume 8,0 litros, à temperatura de 7,0 °C, exercendo a pressão de 4,0 atm. Reduzindo-se o volume a 6,0 L e aquecendo-se o gás, a sua pressão passou a ser 10 atm.

Determine a que temperatura o gás foi aquecido.



Resolução

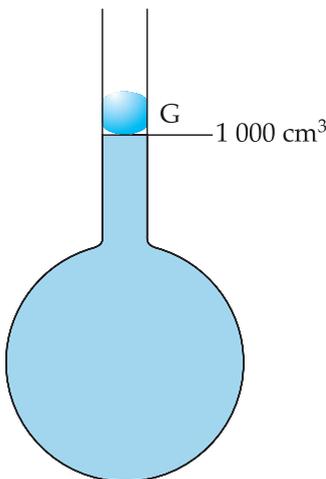
$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

$$\frac{4 \cdot 8}{280} = \frac{10 \cdot 6}{T_2}$$

$$T_2 = \frac{280 \cdot 10 \cdot 6}{4 \cdot 8}$$

$$T_2 = 525 \text{ K} \quad \text{ou} \quad \theta_2 = 252 \text{ }^\circ\text{C}$$

07. A figura abaixo representa um balão contendo um gás. No gargalo, cuja secção reta é $0,5 \text{ cm}^2$, existe uma gota de mercúrio G. Quando a temperatura é $27 \text{ }^\circ\text{C}$, o volume de gás é $1\,000 \text{ cm}^3$.



Determine quanto subirá a gota de mercúrio quando o balão for aquecido a $42 \text{ }^\circ\text{C}$.

Resolução

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

$$p_1 = p_2 \text{ e } V_2 = 0,5 \cdot x + 1\,000$$

$$\frac{1\,000}{27 + 273} = \frac{0,5 \cdot x + 1\,000}{42 + 273}$$

$$\frac{1\,000}{300} = \frac{0,5x + 1\,000}{315}$$

$$x = 100 \text{ cm}$$

10. Teoria Cinética dos Gases

A teoria cinética dos gases foi desenvolvida a partir da aplicação das leis da Mecânica de Newton aos sistemas microscópicos dos gases, ou seja, às suas partículas. Para tal aplicação, vamos supor as seguintes hipóteses:

1ª) Todas as moléculas se encontram em movimento desordenado.

2ª) As moléculas não exercem forças umas sobre as outras, exceto quando colidem.

3ª) Os choques entre as moléculas e com as paredes do recipiente são perfeitamente elásticos.

4ª) As moléculas têm dimensões desprezíveis em comparação com os espaços vazios que as separam.

5ª) Entre os choques, as moléculas se movem em MRU (movimento retilíneo uniforme).

10.1. Pressão de um Gás

As moléculas de um gás estão em constante e desordenado movimento, chocando-se com as paredes do recipiente, causando o aparecimento de uma força, que age contra as paredes e, conseqüentemente, exercendo uma pressão.

A pressão devida às colisões das moléculas, em função da velocidade média das moléculas de um gás, é:

$$p = \frac{1}{3} \cdot \frac{m}{V} \cdot v^2$$

Em que:

- $v \Rightarrow$ velocidade média das moléculas do gás
- $V \Rightarrow$ volume da massa do gás
- $m \Rightarrow$ massa do gás

10.2. Energia Cinética do Gás

A energia cinética de um gás é a soma das energias cinéticas de todas as moléculas que compõem o gás.

Da Mecânica, sabemos que:

$$E_c = \frac{mv^2}{2}$$

Da fórmula de pressão, temos:

$$p = \frac{1}{3} \frac{m}{V} \cdot v^2 = \frac{2}{3} \frac{m \cdot v^2}{V \cdot 2} = p = \frac{2E_c}{3V} \Rightarrow \\ \Rightarrow E_c = \frac{3}{2} p \cdot V$$

Como $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$ (Equação de Chapeyron) temos:

$$E_c = \frac{3}{2} n \cdot R \cdot T$$

em que n é o número de mols e R é a constante universal dos gases.

A energia cinética de um gás é diretamente proporcional à sua temperatura absoluta (Kelvin).

Para determinar a velocidade média das moléculas de um gás, aplicamos:

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{3}{2} \cdot n \cdot R \cdot T \Rightarrow \\ m \cdot v^2 = 3 \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \\ v^2 = \frac{3R \cdot T}{M} \Rightarrow \bar{v} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

Observe que a velocidade média das moléculas de um gás depende da natureza específica do gás (massa molar M).

10.3. Energia Cinética Média por Molécula

Sendo N o número de moléculas que compõem o gás e E_c a energia cinética do gás, resulta que a energia cinética média por molécula (\bar{E}_c) é dada por:

$$\bar{E}_c = \frac{E_c}{N} = \frac{3n \cdot R \cdot T}{2N}$$

Como o número de mols n é dado pela relação entre o número de moléculas que compõem o gás (N) e o número de Avogadro,

$$(N_A = 6,023 \cdot 10^{23})$$

$$n = \frac{N}{N_A} \Rightarrow \frac{n}{N} = \frac{1}{N_A}, \text{ então,}$$

$$\bar{E}_c = \frac{3n \cdot R \cdot T}{2N} = \frac{3R \cdot T}{2 \cdot N_A}$$

O quociente (R/N_A) é denominado de constante de Boltzmann (k) e vale no S.I.

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$\text{Assim: } \bar{E}_c = \frac{3}{2} kT$$

Exercícios Resolvidos

01. Num frasco, há uma mistura dos gases Hélio, de massa molar 4 g/mol, e nitrogênio, de massa molar 28 g/mol, considerados como gases ideais, à temperatura de 627 °C. Sabendo-se que a constante universal dos gases perfeitos é 8,31 J/mol · k e o número de avogadro é 6,02 · 10²³ moléculas/mol, determine:

- a energia cinética média por molécula desses gases;
- a velocidade média das moléculas desses gases.

Resolução

a) A energia cinética média por molécula, para os gases perfeitos, só depende da temperatura por gás. Assim:

$$E_c = \frac{3}{2} k \cdot T = \frac{3}{2} \cdot \frac{R}{N_A} \cdot T = \frac{3}{2} \cdot \frac{8,31}{6,02 \cdot 10^{23}} \cdot (627 + 273) \Rightarrow \\ \Rightarrow E_c \approx 1,9 \cdot 10^{-20} \text{ J}$$

b) A velocidade média das moléculas é dada por:

$$v = \sqrt{\frac{3 \cdot R \cdot T}{M}} \text{ onde:}$$



Para o Hélio: $M = 4 \text{ g/mol} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$

$$\therefore v = \sqrt{\frac{3 \cdot 8,31 \cdot 900}{4 \cdot 10^{-3}}} \Rightarrow v \approx 2,4 \cdot 10^3 \text{ m/s}$$

Para o Nitrogênio: $M = 28 \text{ g/mol} = 28 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$

$$\therefore v = \sqrt{\frac{3 \cdot 8,31 \cdot 900}{28 \cdot 10^{-3}}} \Rightarrow v \approx 8,95 \cdot 10^2 \text{ m/s}$$

Embora a energia cinética média por molécula seja a mesma para os dois gases, a velocidade média das moléculas de Hélio é maior que a velocidade média das moléculas de nitrogênio.

02. Um cilindro fechado de capacidade 2 l contém 15 g de gás O_2 a 0°C . Sabe-se que a velocidade média das partículas do O_2 a 0°C é aproximadamente 460 m/s . Determine, em atm, a pressão exercida pelo gás nas paredes internas do cilindro.

Resolução

$$\begin{cases} V = 2 \text{ l} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \\ m = 15 \text{ g} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \\ v = 460 \text{ m/s} \end{cases}$$

$$p = \frac{1}{3} \frac{m}{V} \cdot v^2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{15 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} \cdot (460)^2$$

$$p = 529\,000 \text{ N/m}^2 = 5,29 \text{ atm}$$

03. Determine a energia cinética média de uma molécula gasosa a 57°C , sendo a constante de Boltzmann $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$.

Resolução

$$T = 57^\circ\text{C} = (57 + 273)\text{K} = 330 \text{ K}$$

$$\bar{E}_c = \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 330$$

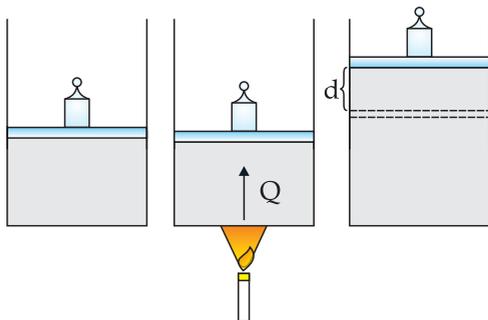
$$\bar{E}_c = 6,83 \cdot 10^{-21} \text{ J}$$

Capítulo 05. Termodinâmica

1. Trabalho em um Sistema Termodinâmico

Vamos considerar um gás contido num cilindro, contendo um êmbolo móvel e sobre o êmbolo um corpo de massa m . O gás pode sofrer transformações, porém a sua pressão mantém-se constante, pois não variamos o peso colocado sobre ele. Seja p a pressão do gás, V_i o volume inicial e T_i a temperatura inicial.

Se fornecermos calor ao sistema, o gás sofrerá uma expansão e o seu volume passará a ser V_f (volume final) e a sua temperatura, T_f (temperatura final).



Dizemos que o gás aplicou uma força \vec{F} sobre o êmbolo, deslocando-o de uma distância d e realizando um trabalho (\mathfrak{E}).

Seja A a área de secção do êmbolo, ΔV a variação de volume e F a intensidade da força aplicada no êmbolo. A variação de volume é dada por

$$\Delta V = A \cdot d$$

de onde tiramos $A = \frac{\Delta V}{d}$ (I)

Por outro lado, sendo

$$p = \frac{F}{A} \Rightarrow F = p \cdot A \quad \text{(II)}$$

e, lembrando que, da Mecânica:

$$\mathfrak{E} = F \cdot d \cdot \cos 0^\circ$$

$$\mathfrak{E} = F \cdot d \quad \text{(III)}$$

Substituindo (II) em (III), temos:

$$\mathfrak{E} = A \cdot p \cdot d \quad \text{(IV)}$$

Substituindo (I) em (IV), temos:

$$\mathfrak{E} = \frac{\Delta V}{d} \cdot p \cdot d \Rightarrow \mathfrak{E} = p \cdot \Delta V$$

Como a pressão é sempre positiva, o trabalho assume o mesmo sinal da variação de volume ($\Delta V = V_f - V_i$).

Numa expansão, a variação de volume é positiva e, portanto, o trabalho realizado é positivo.

Neste caso, o gás fornece energia para o meio na forma de trabalho.

Numa compressão ($V_f < V_i$), a variação de volume é negativa e, portanto, o trabalho realizado é negativo. Neste caso, o gás recebe energia do meio na forma de trabalho. Portanto, resumindo, temos:

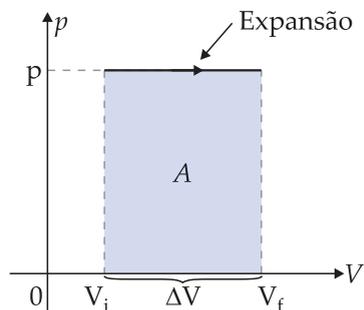
$$V_f > V_i \Rightarrow \Delta V > 0 \Rightarrow \mathfrak{E} > 0$$

$$V_f < V_i \Rightarrow \Delta V < 0 \Rightarrow \mathfrak{E} < 0$$

É comum encontrarmos a expressão: "o gás realizou trabalho", como simplificação da expressão: "a força que o gás aplicou realizou trabalho".

A relação: $\mathfrak{E} = p \cdot \Delta V$ só pode ser aplicada quando a pressão for constante (transformação isobárica).

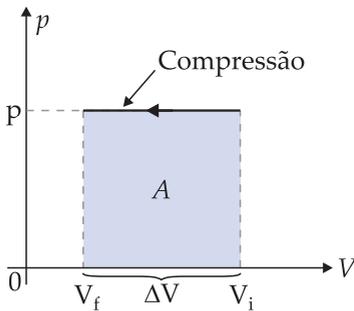
Dado um gráfico $p \cdot V$, numa transformação isobárica, temos:





A área da figura é dada por $A = p \cdot \Delta V$, sendo $\mathcal{E} = p \cdot \Delta V$, então, $\mathcal{E} \stackrel{N}{=} \text{Área}$

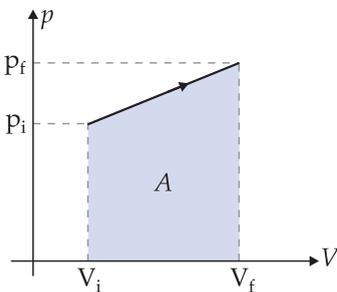
$$\mathcal{E} \stackrel{N}{=} +A$$



$$\mathcal{E} \stackrel{N}{=} -A$$

Observação

Se o gás sofrer uma transformação de pressão variável, calculamos o trabalho apenas pelo método das áreas (gráfico).



2. Energia de um Sistema

A energia de um sistema é composta de duas partes.

2.1. Energia Externa

É a energia do sistema devido às relações que ele tem com o meio externo (energia cinética e energia potencial).

2.2. Energia Interna

É a energia do sistema devido às condições intrínsecas. Num gás, corresponde:

I. Energia térmica: é a energia que se associa ao movimento de agitação térmica das moléculas.

II. Energia potencial de configuração: é a energia associada às forças internas conservativas.

III. Energia cinética atômico-molecular: é a energia associada à rotação das moléculas, às vibrações intramoleculares e aos movimentos intra-atômicos das partículas elementares.

Não é possível medir diretamente a energia interna U de um sistema, porém podemos conhecer a variação de energia interna ΔU . A variação da energia interna (ΔU) é igual à variação da energia cinética de translação das moléculas que constituem o sistema, isso para gases ideais e monoatômicos. Se o gás sofre variação de temperatura, a energia cinética das moléculas sofre variação e, conseqüentemente, varia a energia interna do gás.

No início: $E_{ci} = \frac{3}{2} \cdot n \cdot R \cdot T_i$

No final: $E_{cf} = \frac{3}{2} \cdot n \cdot R \cdot T_f$

Variação da energia cinética

$$\Delta E_c = E_{cf} - E_{ci} = \frac{3}{2} n \cdot R \cdot (T_f - T_i)$$

$$\Delta E_c = \frac{3}{2} n \cdot R \cdot \Delta T$$

Essa variação ΔE_c corresponde à variação de energia interna ΔU do gás, então:

$$\Delta U = \Delta E_c \Rightarrow \Delta U = \frac{3}{2} \cdot n \cdot R \cdot \Delta T$$

Se $\Delta T > 0$, ou seja, $T_f > T_i$, a energia interna do gás aumenta ($\Delta U > 0$).

Se $\Delta T < 0$, ou seja, $T_f < T_i$, a energia interna do gás diminui ($\Delta U < 0$).

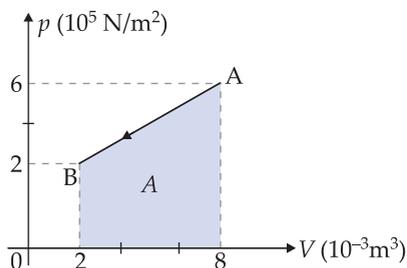
Se $\Delta T = 0$, ou seja, $T_f = T_i$, a energia interna do gás não varia ($\Delta U = 0$).

A lei de Joule para gases ideais diz que a energia interna de uma dada massa de gás ideal é função somente de sua temperatura.

Exercícios Resolvidos

01. A pressão de um gás ideal varia com o volume de acordo com o gráfico seguinte.

Calcule o trabalho da força aplicada ao gás, durante a compressão do estado A ao estado B.



Resolução

1º Como a pressão é variável, só podemos calcular o trabalho pelo método gráfico.

2º $\mathcal{E} = -A$ (compressão)

3º Em que:

$$\left[A = \text{área do trapézio} = \left(\frac{B + b}{2} \right) \cdot h \right]$$

$$\mathcal{E}_{AB} = - \left(\frac{6 \cdot 10^5 + 2 \cdot 10^5}{2} \right) \cdot (6 \cdot 10^{-3})$$

4º $\mathcal{E}_{AB} = -2,4 \cdot 10^3 \text{ J}$

Observação

No Sistema Internacional, a unidade de trabalho é joule (J), pressão (N/m²) e volume (m³).

02. Dois mols de um gás monoatômico têm sua temperatura elevada de 27 °C para 227 °C. Se $R = 8,3 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$, calcule a variação de energia interna sofrida pelo gás.

Resolução

$T_i = 300 \text{ K}$

$T_f = 500 \text{ K}$

$\Delta T = T_f - T_i = 500 - 300 = 200 \text{ K}$

$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot n \cdot R \cdot \Delta T = \frac{3}{2} \cdot 2 \cdot 8,3 \cdot 200$

$\Delta U = 4980 \text{ J}$

Houve um aumento da energia interna do gás.

3. Primeiro Princípio da Termodinâmica

Tratamos até agora da energia que um gás troca com o meio exterior na forma de trabalho. Como a Termodinâmica relaciona trabalho com calor, vamos estudar a correspondência entre essas duas grandezas.

Como o sistema não cria e não destrói energia (Princípio da Conservação de Energia), então se um gás receber calor, essa energia pode ser armazenada e/ou transferida ao meio na forma de trabalho.

A correspondência que existe entre as grandezas trabalho, calor e energia interna, é:

$\Delta U = Q - \mathcal{E}$

$\Delta U > 0 \Rightarrow$ aumenta a energia interna do gás, aumenta a temperatura e o gás se aquece.

$\Delta U < 0 \Rightarrow$ diminui a energia interna do gás, diminui a temperatura e o gás se esfria.

$Q > 0 \Rightarrow$ o gás recebe energia do meio exterior na forma de calor.

$Q < 0 \Rightarrow$ o gás cede energia para o meio exterior na forma de calor.

$\mathcal{E} > 0 \Rightarrow$ o gás cede energia para o meio exterior na forma de trabalho (sofre expansão).

$\mathcal{E} < 0 \Rightarrow$ o gás recebe energia do meio exterior na forma de trabalho (sofre compressão).

A equivalência entre energia mecânica e calor foi estabelecida por Joule através de vários experimentos. Joule acreditava que calor era uma forma de energia.

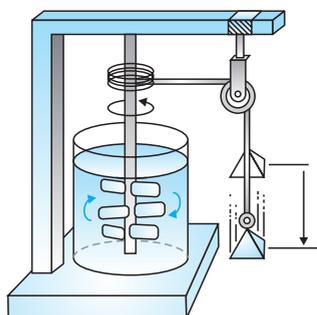
Através da figura, temos a idéia de seu experimento.

O corpo suspenso da figura desce devido à ação da gravidade e sua energia potencial gravitacional é transformada em energia cinética que movimentava as pás. As pás, ao girarem, geram atrito viscoso com a água, e esta por sua vez se aquece.



Através da energia potencial gravitacional do corpo e da elevação de temperatura da água, Joule chegou à relação entre calorias e Joule, chamado de equivalente mecânico de calor.

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



Exercícios Resolvidos

01. Uma fonte térmica fornece 400 cal a um sistema. Ao mesmo tempo, o meio exterior realiza sobre o sistema um trabalho de 328 J.

Qual a variação de energia interna do sistema, em Joules? Dado: 1 cal = 4,18 J.

Resolução

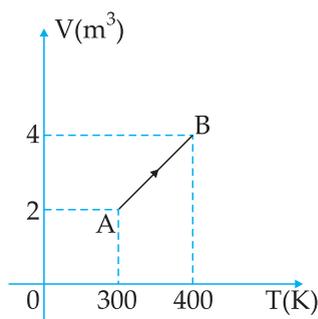
$$1^{\circ} \begin{cases} Q = 400 \text{ cal} \left(\begin{array}{l} Q > 0, \text{ porque o sistema} \\ \text{recebe calor} \end{array} \right) \\ Q = 400 \cdot 4,18 \text{ J} = 1672 \text{ J} \end{cases}$$

$$2^{\circ} \begin{cases} \mathcal{E} = -328 \text{ J} \left(\begin{array}{l} \mathcal{E} < 0, \text{ porque o sistema} \\ \text{recebe energia do meio} \end{array} \right) \\ \Delta U = Q - \mathcal{E} = 1672 - (-328) \end{cases}$$

$$\Delta U = 2000 \text{ J}$$

(aumentou a energia interna do sistema)

02. O volume de um gás ideal varia com a temperatura de acordo com o gráfico seguinte, sob pressão constante de 5 N/m². Durante a transformação AB, o gás recebe 50 J de calor.



Determine:

- O trabalho realizado na transformação AB.
- A variação de energia interna do gás.

Resolução

Como a pressão é constante

$$a) \mathcal{E} = p \cdot \Delta V = p \cdot (V_B - V_A) = 5(4 - 2)$$

$$\mathcal{E} = 10 \text{ J}$$

$$b) \Delta U = Q - \mathcal{E} = 50 - 10 \Rightarrow \Delta U = 40 \text{ J}$$

4. Transformações Gasosas

4.1. Transformação Isobárica

A pressão do gás é constante e o volume varia diretamente proporcional à temperatura;

Então:

$$\mathcal{E} = p \cdot \Delta V = p \cdot (V_f - V_i) \neq 0$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot n \cdot R \cdot \Delta T \neq 0$$

$$\Delta U = Q - \mathcal{E}$$

4.2. Transformação Isométrica

O volume do gás é constante e a pressão varia diretamente proporcional à temperatura.

Então:

$$\mathcal{E} = p \cdot \Delta V = p(V_f - V_i) = p \cdot 0 = 0$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} n R \Delta T \neq 0$$

$$\Delta U = Q - \mathcal{E} \Rightarrow \Delta U = Q$$

O gás não troca energia com o meio exterior na forma de trabalho. Todo calor que o gás receber será transformado em energia interna.

4.3. Transformação Isotérmica

A temperatura do gás é constante e o volume varia inversamente proporcional à pressão.

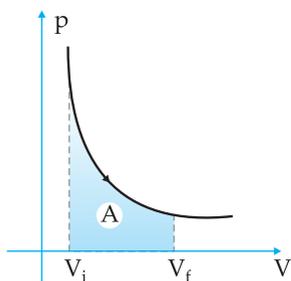
Então:

$$\Delta U = \frac{3}{2} n \cdot R \cdot \Delta T = \frac{3}{2} n \cdot R (T_f - T_i) = 0$$

O gás não sofre variação de energia interna (não aquece nem esfria).

$$\Delta U = Q - \mathcal{E} = 0 \Rightarrow \mathcal{E} = Q$$

Todo calor que o gás recebe é transferido para o meio na forma de trabalho e vice-versa.



O trabalho da força que o gás aplica é obtido pela área do gráfico $p \times V$.

4.4. Transformação Adiabática

É a transformação em que não há troca calor ($Q=0$) entre o gás (sistema) e o meio externo.

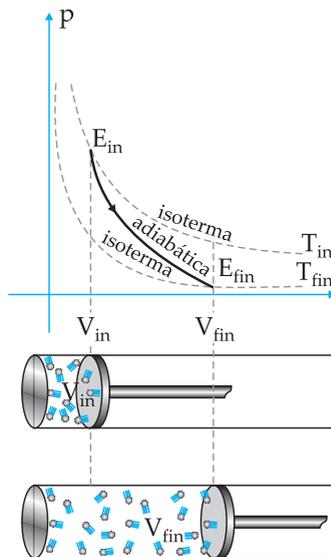
Para conseguirmos uma transformação adiabática, basta isolarmos termicamente o gás, ou efetuarmos a transformação rapidamente, pois a troca de calor é um processo lento.

$$\Delta U = Q - \mathcal{E} = 0 - \mathcal{E}$$

$$\Delta U = -\mathcal{E}$$

Se o gás sofrer expansão ($\mathcal{E} > 0$), a sua energia interna diminui, e o gás esfria.

Se o gás sofrer compressão ($\mathcal{E} < 0$), a sua energia interna aumenta, e o gás aquece.



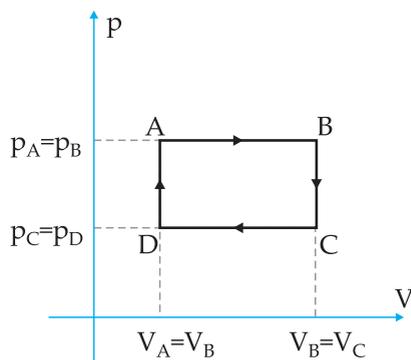
Na expansão, diminui a energia interna.

4.5. Transformação Cíclica

É a transformação em que o estado final do gás coincide com o estado inicial.

Essa é a transformação sofrida por uma máquina térmica que transforma energia térmica em energia mecânica, fazendo o gás, após sofrer transformações, voltar ao seu estado inicial.

Consideremos um gás ideal sofrendo uma transformação ABCDA, conforme a figura:





AB ⇒ O gás sofre um aquecimento à pressão constante, aumentando o volume.

BC ⇒ O gás sofre um esfriamento a volume constante, diminuindo a pressão.

CD ⇒ O gás sofre um esfriamento à pressão constante, diminuindo o volume.

DA ⇒ O gás sofre um aquecimento a volume constante, aumentando a pressão.

$$\mathcal{E}_{AB} = p_A (V_B - V_A) = p_A \cdot \Delta V$$

$$\mathcal{E}_{BC} = p \cdot \Delta V = p \cdot 0 = 0$$

$$\mathcal{E}_{CD} = p_D \cdot (V_D - V_C) = p_D \cdot (-\Delta V)$$

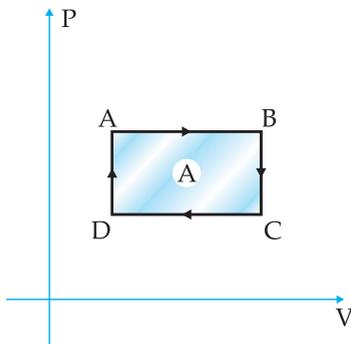
$$\mathcal{E}_{DA} = p \cdot \Delta V = p \cdot 0 = 0$$

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{AB} + \mathcal{E}_{BC} + \mathcal{E}_{CD} + \mathcal{E}_{DA}$$

$$\mathcal{E}_R = p_A \Delta V + 0 - p_D \Delta V + 0 = (p_A - p_D) \Delta V$$

$$\mathcal{E}_R^N = A_{\text{ciclo}} \Rightarrow \text{transformação no sentido}$$

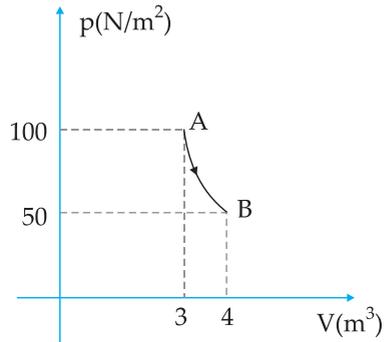
horário



Exercícios Resolvidos

01. Um mol de gás ideal sofre uma expansão adiabática conforme o gráfico abaixo. Sabendo-se que a temperatura inicial do gás era de 300 K, calcule a temperatura do gás no estado B e o trabalho realizado pelo gás.

Dado: $R = 8 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$.



Resolução

$$\frac{p_A \cdot V_A}{T_A} = \frac{p_B \cdot V_B}{T_B} \Rightarrow \frac{100 \cdot 3}{300} = \frac{50 \cdot 4}{T_B}$$

$$T_B = 200 \text{ K}$$

Trans. Adiabática: $Q = 0$

$$\mathcal{E} = -\Delta U = -\frac{3}{2} \cdot n \cdot R \cdot \Delta T$$

$$\mathcal{E} = -\frac{3}{2} \cdot 1 \cdot 8 \cdot (200 - 300) = -(-1200)$$

$$\mathcal{E} = 1200 \text{ J}$$

Como $\Delta U < 0$, a energia interna do gás diminuiu, então o gás sofreu um resfriamento.

02. Uma certa massa gasosa de volume 8 m^3 , sob pressão de 3000 N/m^2 , sofre transformação isotérmica, recebendo 7200 J de calor do meio externo. Sendo o número de mols do gás igual a 10 e a constante dos gases perfeitos igual a $8,31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$, determine:

- a temperatura da transformação;
- a variação de energia interna do gás;
- o trabalho realizado na transformação.

Resolução

$$V_i = 8 \text{ m}^3$$

$$p_i = 3000 \text{ N/m}^2$$

$$Q = 7200 \text{ J}$$

$$n = 10 \text{ mols}$$

$$R = 8,31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

a) $p_i \cdot V_i = n \cdot R \cdot T$
 $3000 \cdot 8 = 10 \cdot 8,31 \cdot T$

$T = 288,8 \text{ K}$

b) Como a temperatura é constante

$\Delta U = \frac{3}{2} n R \Delta T = 0$

$\Delta U = 0$

c) $\Delta U = Q - \mathcal{E} \Rightarrow 0 = 7200 - \mathcal{E}$

$\mathcal{E} = 7200 \text{ J}$

03. Um gás ideal sofre uma transformação isobárica à pressão de 10 N/m^2 . Qual o trabalho das forças de pressão durante o deslocamento do pistão, sabendo que o volume inicial do gás era de 4 m^3 e que o volume final é de 10 m^3 ?

Resolução

$$\begin{cases} p = 10 \text{ N/m}^2 \\ V_i = 4 \text{ m}^3 \\ V_f = 10 \text{ m}^3 \end{cases}$$

Como a pressão é constante, podemos calcular o trabalho pela expressão.

$\mathcal{E} = p \Delta V$

$\mathcal{E} = 10 (10 - 4)$

$\mathcal{E} = 60 \text{ J}$

04. Uma massa de gás ocupa volume de $0,5 \text{ m}^3$ sob pressão de 600 N/m^2 . Após receber 800 J de calor, mantendo constante a pressão, o volume passa a $1,5 \text{ m}^3$. Determine a variação de energia interna.

Como p é constante $\Rightarrow \mathcal{E} = p \Delta V$

Resolução

$$\begin{cases} p = 600 \text{ N/m}^2 \\ V_i = 0,5 \text{ m}^3 \\ V_f = 1,5 \text{ m}^3 \\ Q = 800 \text{ J} \end{cases}$$

$\mathcal{E} = p (V_f - V_i) = 600 (1,5 - 0,5)$

$\mathcal{E} = 600 \text{ J}$

$\Delta U = Q - \mathcal{E} = 800 - 600$

$\Delta U = 200 \text{ J}$

05. Um mol de gás perfeito recebe 500 J de calor e sofre uma transformação a volume constante. Diga, justificando, se o gás sofreu um aquecimento ou resfriamento.

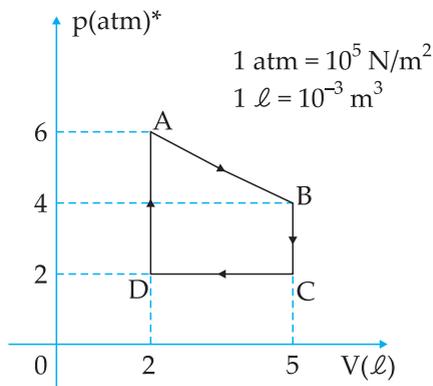
Resolução

$\mathcal{E} = p \cdot \Delta V = p \cdot 0 = 0$

$\Delta U = Q - \mathcal{E} = 500 - 0 = 500 \text{ J}$

Como $\Delta U > 0 \Rightarrow$ aumentou a energia interna e, conseqüentemente, o gás sofreu um aquecimento.

06. O diagrama $p \times V$ abaixo representa a transformação cíclica sofrida por uma amostra de gás perfeito no sentido ABCDA.



Determine o trabalho total no ciclo.

Resolução

$\mathcal{E} = + A_{\text{ciclo}} \Rightarrow$ sentido horário

$\mathcal{E} = \left(\frac{4 \cdot 10^5 + 2 \cdot 10^5}{2} \right) \cdot 3 \cdot 10^{-3}$

$\mathcal{E} = 9 \cdot 10^2 \text{ J}$



Devemos verificar, no gráfico, a escala usada e se as unidades estão de acordo. No caso do exemplo acima, a pressão deve ser multiplicada por 10^5 e o volume por 10^{-3} .

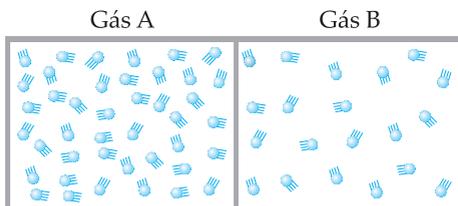
5. Segundo Princípio da Termodinâmica

O segundo princípio da Termodinâmica surgiu a partir de observações e fatos que ocorrem na natureza.

Não é possível transferir calor de um corpo frio para outro corpo quente espontaneamente.

Nas transformações naturais, existe uma tendência dos corpos atingirem uma situação de equilíbrio, ou seja, mais estável, e a transformação se processa sempre no mesmo sentido.

Diz o segundo princípio: **o calor passa espontaneamente dos corpos de maior temperatura para os de menor temperatura.**



As moléculas do gás A estão em alto grau de agitação, portanto alta temperatura.

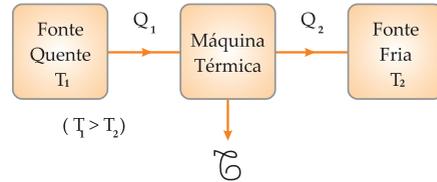
As moléculas do gás B estão em baixo grau de agitação, portanto baixa temperatura.

Se a membrana que separa o gás A do gás B permitir a troca de calor entre eles, o calor passa de A para B, até atingir o equilíbrio térmico (temperaturas iguais).

As máquinas térmicas são dispositivos que operam em ciclos, transformando calor em trabalho.

Ainda com base no segundo princípio: **Só é possível uma máquina térmica transformar calor em trabalho utilizando-se duas fontes de calor em temperaturas diferentes.**

A máquina térmica retira calor de uma fonte quente, transformando parte desse calor em trabalho e a parte restante cede para a fonte fria.



Usando a conservação de energia, temos:

$$Q_1 = W + Q_2 \Rightarrow W = Q_1 - Q_2$$

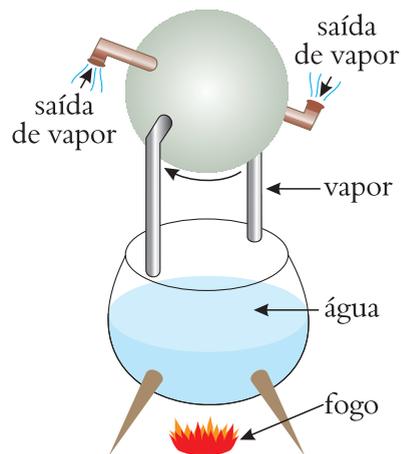
O trabalho, ou seja, a energia útil, é igual à diferença entre a energia que recebeu da fonte quente (Q_1) e a energia que transfere para a fonte fria (Q_2).

Observação:

O refrigerador faz o processo inverso. Ele retira calor da fonte fria e transfere para a fonte quente. Para isso, ele recebe trabalho de um agente externo (compressor) que é acionado por um motor elétrico.

A máquina a vapor realiza trabalho a partir do calor que recebe de uma fonte quente.

A figura mostra um modelo simplificado de uma máquina a vapor.



A água recebe calor da chama e sofre vaporização. O vapor sobe pelos dois canos e ganha a esfera que pode girar apoiada nos canos. O vapor sai da esfera pelos dois canos laterais. Como a toda ação corresponde uma reação oposta, o vapor sai de um lado e a esfera recebe a reação oposta, adquirindo movimento de rotação.

6. Rendimento da Máquina Térmica

Rendimento é definido como a relação entre a energia aproveitada (útil) e a energia recebida (total).

$$\eta = \frac{\mathcal{E}}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

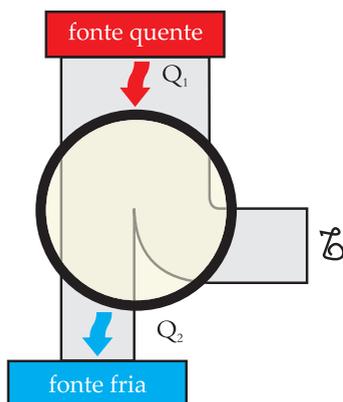
$$\eta = \frac{\mathcal{E}}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Como $\mathcal{E} < Q_1$, então:

$$0 \leq \eta < 1$$

Como a máquina só funciona se troca calor com a fonte fria, isto significa que o rendimento nunca será 1 (100%).

A figura abaixo mostra o esquema de uma máquina térmica.



A fonte quente fornece energia para a máquina (Q_1). A máquina aproveita parte dessa energia, na forma de trabalho (\mathcal{E}), que é chamado de energia útil.

A outra parte da energia é perdida, ou seja, trocada com uma fonte fria (Q_2).

Exercício Resolvido

Uma máquina térmica retira em cada ciclo 800 J de uma fonte quente e cede 600 J a uma fonte fria. Determine:

- o trabalho realizado pela máquina em cada ciclo;
- o rendimento da máquina.

Resolução:

a) $Q_1 = 800 \text{ J}$ (fonte quente)

$Q_2 = 600 \text{ J}$ (fonte fria)

$\mathcal{E} = Q_1 - Q_2 = 800 - 600$

$\mathcal{E} = 200 \text{ J}$

b) $\eta = \frac{\mathcal{E}}{Q_1} = \frac{200}{800} \Rightarrow \eta = 0,25$

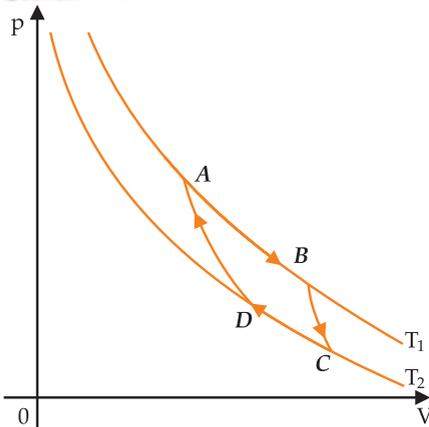
$\eta = 25\%$

Esse rendimento de 25 % significa que apenas 1/4 da energia total é aproveitada pela máquina e 3/4 é dissipado na forma de calor com a fonte fria.

7. Ciclo de Carnot

Carnot estudou a transformação de calor em trabalho, feito pelas máquinas térmicas, com o objetivo de aumentar o rendimento das máquinas (melhorar a eficiência).

Assim, é importante que uma máquina térmica receba calor da fonte quente Q_1 e troque o **mínimo** possível de calor com a fonte fria Q_2 , produzindo o maior trabalho ($\mathcal{E} = Q_1 - Q_2$); conseqüentemente apresentando um maior rendimento.



O ciclo de Carnot consta de duas transformações adiabáticas alternadas e duas isotérmicas.

AB e CD são isotérmicas

BC e DA são adiabáticas

T_1 é a temperatura da fonte quente

T_2 é temperatura da fonte fria

Carnot demonstrou que, em cada ciclo, as quantidades de calor trocadas com as fontes térmicas são proporcionais às respectivas **temperaturas absolutas** das fontes.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

Assim: $\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

Para a máquina operar com rendimento de 100 %, ou seja $\eta = 1$, T_2 deveria ser zero.

Como é impossível atingir o zero absoluto, é também impossível a máquina operar com rendimento de 100 %.

No gráfico da página anterior, ocorre as transformações:

AB \Rightarrow expansão isotérmica, onde o gás recebe calor da fonte quente (Q_1).

BC \Rightarrow expansão adiabática ($Q = 0$), onde o gás interrompe contato com as fontes.

CD \Rightarrow compressão isotérmica, onde o gás perde calor para a fonte fria (Q_2).

DA \Rightarrow compressão adiabática ($Q = 0$), onde o gás interrompe contato com as fontes.

Exercício Resolvido

Uma máquina térmica funciona segundo o ciclo de Carnot onde, em cada ciclo, ela fornece ao ambiente um trabalho igual a 800 J. As temperaturas das fontes quente e fria são, respectivamente, 127 °C e 27 °C. Calcule: (Dado: 1 cal = 4,186 J)

- o rendimento dessa máquina;
- as quantidades de calor recebidas da fonte quente e rejeitadas para a fonte fria, em calorias.

Resolução:

$E = 800 \text{ J}$

$T_1 = 400 \text{ K}$

$T_2 = 300 \text{ K}$

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

a) $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{300}{400}$

$\eta = 0,25 = 25\%$

b) $\eta = \frac{E}{Q_1} \Rightarrow 0,25 = \frac{800}{Q_1}$

$Q_1 = 3\,200 \text{ J} = \frac{3\,200}{4,186} \text{ cal} \Rightarrow Q_1 = 764,5 \text{ cal}$

$E = Q_1 - Q_2$

$800 = 3\,200 - Q_2$

$Q_2 = 2\,400 \text{ J}$

$Q_2 = 573,3 \text{ cal}$

