

CALOR E TERMODINÂMICA

➤ Ementa do Curso:

1) Termologia

- 1.1 – Temperatura, Escalas Termométricas e Dilatação.
- 1.2 – Termômetros.

2) – Termodinâmica

- 2.1 – Quantidade de Calor Sensível e Latente. Lei Zero da Termodinâmica.
- 2.2 – Capacidade Calorífica e Calor específico. Calorímetros.
- 2.3 – Superfícies PVT para substância real e gás perfeito.
- 2.4 – Pontos Tríplice e Crítico. Diagrama de Fase.
- 2.5 – Calor Latente e Mudança de Fase.
- 2.6 – Transmissão de Calor.
- 2.7 – Primeira Lei da Termodinâmica. Trabalho e Energia Interna.

3) Transmissão de Calor

- 3.1 – Condução. Fluxo de Calor.
- 3.2 – Convecção.
- 3.3 – Radiação. Lei de Stefan-Boltzmann. Corpo Negro e Radiador Ideal.

4) Gases Perfeitos.

- 4.1 – Gás Perfeito. Definição.
- 4.2 – Equações de Estado de um gás.

5) Transformações Gasosas.

- 5.1 – Processos isobáricos, Isocóricos e Isotérmicos.
- 5.2 – Processos de Estrangulamento.
- 5.3 – Capacidades Caloríficas de um gás Perfeito.
- 5.4 – Processos adiabáticos.

6) A Segunda Lei da Termodinâmica.

- 6.1 – Máquinas Térmicas. Ciclo de Carnot. Máquina a Vapor.
- 6.2 – Motores de Combustão Interna. Ciclo Otto. Ciclo Diesel.
- 6.3 – Ciclo de Stirling.
- 6.4 – Ciclo de Refrigeração e Refrigeradores.
- 6.5 – Entropia e a Segunda Lei.

Bibliografia:

1. **Física, Mecânica dos Fluidos – Calor – Movimento Ondulatório**, V2, *Sears & Zemansky & Young*, Editora LTC, 2ª Edição – 1984.
2. **Fundamentos da Termodinâmica**, *Gordon J. Van Wylen, Richard E. Sonntag*, Editora Edgard Blücher Ltda.
3. **Termodinâmica**, *Zemansky*, Editora Guanabara 2.

1. Termologia

1.1 – Temperatura, Escalas Termométricas e Dilatação.

Uma definição operacional de temperatura é que é uma medida da transição comum da energia cinética associada com o movimento microscópico desordenado de átomos e moléculas. São descritos os detalhes dessa relação associada ao movimento molecular na temperatura na teoria cinética dos gases. Temperatura não é diretamente proporcional à energia interna desde que a temperatura mede só a parte translacional da energia interna, assim dois objetos com a mesma temperatura não têm a mesma energia interna em geral. As temperaturas são medidas em quaisquer umas das três escalas padrões de temperatura (Centígrado, Kelvin, e Fahrenheit).

Normalmente existem duas escalas para medida de temperatura, chamada de Fahrenheit (em homenagem a Gabriel Fahrenheit, 1686-1736) e Celsius. A escala Celsius foi chamada originalmente de Centígrada, mas, atualmente, é designada por escala Celsius em homenagem a Anders Celsius (1701-1744), o astrônomo Sueco que a idealizou.

Até 1954 essas duas escalas eram baseadas em dois pontos fixos, facilmente duplicados, o ponto de fusão e de ebulição da água doce. A temperatura do ponto de fusão é definida como a temperatura de uma mistura de gelo e água em equilíbrio com ar saturado à pressão de 1 atm. A temperatura de ebulição da água é a temperatura em que a água e vapor se encontram em equilíbrio a pressão de 1 atm. Na escala Fahrenheit esses dois pontos recebem os números 32 e 212 respectivamente e, na escala Celsius, eles são enumerados como 0 e 100. A base para os números na escala Fahrenheit tem um passado interessante. Na procura para um ponto facilmente reproduzível, Fahrenheit selecionou a temperatura do corpo humano, designando-a pelo número 96. Ele escolheu o número 0 para a temperatura de uma certa mistura de sal, gelo e uma solução salina. Nessa escala, o ponto de fusão do gelo era aproximadamente 32. Após uma ligeira revisão dessa escala e sua fixação em termos dos pontos de fusão do gelo e de ebulição da água, a temperatura normal do corpo humano passou a ser 98,6 °F.

Os símbolos °F e °C indicarão as escalas Fahrenheit e Celsius, respectivamente.

O símbolo T se referirá à temperatura em Kelvin. As escalas Celsius, Kelvin, e Fahrenheit são baseadas em relação às temperaturas de mudança de fase de água. A escala Kelvin é chamada temperatura absoluta e **o Kelvin é a unidade de SI** para temperatura.

Na décima Conferência de Pesos e Medidas em 1954, a escala Celsius foi redefinida em termos de um ponto simples fixo e da escala de temperatura do gás ideal. O ponto simples fixo é o ponto triplo da água.

O ponto triplo de água é 273.16 K, e é um ponto de temperatura padrão internacional. O ponto de gelo da água a uma pressão de um atmosfera, 0.00°C, é 0.01K abaixo disso: 273.15 K. Se você quer ser realmente preciso sobre isto, o ponto de ebulição é 373.125 K, ou 99.75 °C. Mas para propósitos gerais, só 0 °C e 100 °C são

bastante precisos. As relações entre as escalas Celcius e Fahrenheit e Celcius e Kelvin são mostradas a seguir:

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

$$T = 273 + \theta_c$$

Enquanto o tratamento típico de medidas de temperatura leva o ponto de fusão da água para ser 0 °C e o ponto de ebulição a pressão padrão (1atm) ser 100 °C, há tratamentos mais precisos de pontos padrões para definir temperatura. Por acordo internacional, um ponto padrão (*Standard*) é o ponto triplo de água que foi definida para ser 273.16K. O ponto de gelo da água a pressão atmosférica está .01K abaixo de 273.15K.

Para obter um segundo ponto padrão por meio de um termômetro que não depende de uma dada substância, um termômetro de gás de constante-volume foi escolhido para medir o ponto de ebulição de água. Este método é baseado na lei do gás ideal, supomos que se o volume é fixo, a temperatura é diretamente proporcional à pressão. Esta medida conduz a um ponto de ebulição de 373.125K ou 99.975 C sobre o gelo à pressão padrão. Esta medida é independente do gás e assim temos o termômetro.

Substância	Estado Físico	Temperatura K
Hidrogênio	Ponto triplo	13.81
Hidrogênio	Ponto de vapor	20.28
Neônio	Ponto de vapor	27.102
Oxigênio	Ponto de vapor	54.361
Argônio	Ponto triplo	83.798
Oxigênio	Ponto de vapor	90.188
Água	Ponto triplo	273.16
Água	Ponto de vapor	373.125
Latão	Ponto de fusão	505.074
Zinco	Ponto de fusão	692.664
Cobre	Ponto de fusão	1235.08
Ouro	Ponto de fusão	1337.58

Pontos fixos na escala internacional de temperatura

Do livro Halliday & Resnick

Em cima de alcances de temperatura pequenos, a natureza linear de expansão térmica conduz a relações de expansão para comprimento, área e volume em termos do coeficiente de expansão linear.

Acima de variações de temperatura, a natureza linear de expansão térmica conduz a relações de expansão para duração, área, e volume em termos do coeficiente de expansão linear.

Material	Coefficiente α $^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$	Expansão fracional por grau $^{\circ}\text{F} \times 10^{-6}$
Vidro, (comum)	9	5
Vidro (pyrex)	4	2.2
Quartzo (fundido)	0.59	0.33
Alumínio	24	13
Metal	19	11
Cobre	17	9.4
Ferro	12	6.7
Aço	13	7.2
Platina	9	5
Tungstênio	4.3	2.4
Ouro	14	7.8
Prata	18	10

Acima de pequenos valores de temperatura, a expansão térmica fracionária de objetos lineares uniformes é proporcional o a mudança de temperatura.

A expansão térmica é descrita pelo coeficiente de expansão linear. A expansão linear é dada por:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \cdot \Delta \theta \Leftrightarrow L = L_0 (1 + \alpha \cdot \Delta \theta)$$

Analogamente, se tivermos uma expansão térmica em um material bidimensional, teremos para a área a uma certa temperatura:

$$\frac{\Delta S}{S_0} = \beta \cdot \Delta \theta \Leftrightarrow S = S_0 (1 + \beta \cdot \Delta \theta)$$

Um material tridimensional expandindo-se termicamente, terá volume a uma certa temperatura dada por:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \gamma \cdot \Delta \theta \Leftrightarrow V = V_0 (1 + \gamma \cdot \Delta \theta)$$

A relação entre os coeficientes de dilatação superficial β , o coeficiente de dilatação volumétrica γ e o linear α é dada por:

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

1.2 - Termômetros

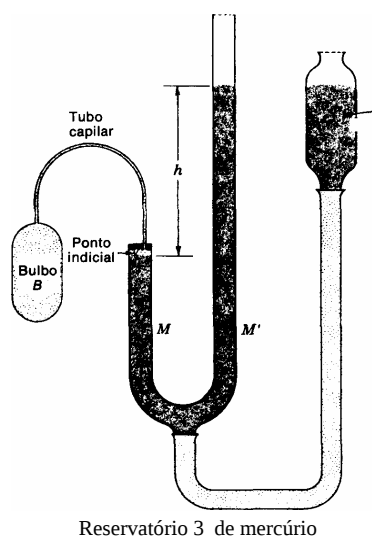
Quando medimos a temperatura com um termômetro, devemos considerar os diversos valores de pressão que devem ser corrigidos levando-se em conta as seguintes fontes de erro:

1. O gás presente no espaço morto (e em quaisquer outros volumes nocivos) está a uma temperatura diferente da do bulbo.

2. O gás presente no tubo capilar que liga o bulbo ao manômetro possui um gradiente de temperatura: não está a uma temperatura uniforme.

3. O bulbo, o tubo capilar, e os volumes nocivos sofrem variações de volume quando a temperatura e a pressão mudam.

Fig. 1 Termômetro de gás de volume constante, simplificado. O reservatório de mercúrio é elevado ou abaixado de maneira que o menisco à esquerda sempre toque o ponto indicial. A pressão no bulbo é igual a h mais a pressão atmosférica.



Reservatório 3 de mercúrio

❖ **Termopares** – Em 1822, o físico Thomas Seebeck descobriu (acidentalmente) que a junção de dois metais gera uma tensão elétrica que é função da temperatura. O funcionamento dos termopares é baseado neste fenômeno, que é conhecido como **Efeito Seebeck**. Um fenômeno reverso é o efeito Peltier.

O **efeito Peltier** é a produção de um gradiente de temperatura em duas junções de dois materiais condutores ou semicondutores diferentes quando submetidos a uma tensão elétrica em um circuito fechado (conseqüentemente, percorrido por uma corrente elétrica).

É também conhecido como *Força eletromotriz de Peltier* e é o reverso do efeito Seebeck em que ocorre produção de diferença de potencial devido à diferença de temperatura neste mesmo tipo de circuito.

Estes dois efeitos podem ser também considerados como um só e denominado de *efeito Peltier-Seebeck* ou *efeito termelétrico*. Na verdade,

4. Se o diâmetro do capilar é comparável com o caminho livre médio das moléculas do gás, existe um gradiente de pressão no tubo capilar (efeito Knudsen).
5. Algum gás é adsorvido pelas paredes do bulbo e do tubo capilar;
6. Quanto mais baixa é a temperatura, maior é a adsorção.
7. Existem efeitos devidos à temperatura e compressibilidade do mercúrio no manômetro.

A maioria dos grandes melhoramentos no projeto de termômetros de gás foram feitos em anos recentes.

são dois efeitos que podem ser considerados como diferentes manifestações do mesmo fenômeno físico.

Embora praticamente se possa construir um termopar com qualquer combinação de dois metais, utilizam-se apenas algumas combinações normalizadas, isto porque possuem tensões de saída previsíveis e suportam grandes gamas de temperaturas.

Assim, Termopar é um tipo de sensor de temperatura muito simples, robusto, barato e de fácil utilização. O dispositivo gera eletricidade a partir de diferenças de temperatura. Dois fios condutores de eletricidade, por exemplo, o cobre e uma liga de cobre-níquel chamada *constantan*, quando unidos em uma de suas extremidades, geram uma tensão elétrica, que pode ser medida na outra extremidade, se existir diferença de temperatura entre elas. Como a diferença de potencial é proporcional à diferença de temperatura entre suas junções, este princípio, que vimos o denominado efeito Seebeck em homenagem ao cientista que o descreveu, é amplamente utilizado para medir temperatura na indústria, em muitos tipos de máquinas e equipamentos.

Um termopar é constituído por dois fios de metais dissimilares (de composição química diferente) unidos em uma das extremidades e tendo a outra extremidade conectada ao instrumento de medição.

O termopar tipo "J" é constituído por dois fios diferentes, sendo a perna positiva de ferro e a perna negativa de *constantan* (liga cobre-níquel). Pode operar na faixa de 0 a 760°C e aplica-se a ambiente oxidantes, inertes, redutores em vácuo parcial.

Já o termopar tipo "K" tem sua perna positiva de uma liga de níquel-cromo conhecida como cromel e a negativa de outra liga níquel-alumínio, chamada alumel*. Pode operar na faixa de temperatura entre -200 a 1260°C, em ambientes oxidantes ou inertes.

Maiores informações podem ser obtidas nas normas NBR específicas sobre esse assunto.

A temperatura da junção de referência para termopares foi fixada em 0°C para simplificar as equações matemáticas usadas que descrevem o comportamento dos termopares. Como conseqüência, as tabelas de referência dos termopares pressupõem uma junção de referência em 0°C.

Para realizar medições corretas o usuário deverá assegurar-se que essa condição está sendo atendida, seja por meios físicos (banho de gelo) ou por meios eletrônicos (compensação automática realizada pelo instrumento de leitura).

Existem tabelas normalizadas que indicam a tensão produzida por cada tipo de termopar para todos os valores de temperatura que suporta, por exemplo, o termopar tipo K com uma temperatura de 300 °C irá produzir 12,2 mV. Contudo, não basta ligar um voltímetro ao termopar e registrar o valor da tensão produzida, uma vez que ao ligarmos o voltímetro estamos a criar uma segunda (e indesejada) junção no termopar. Para se fazerem medições exatas devemos compensar este efeito, o que é feito recorrendo a uma técnica conhecida por compensação por junção fria.

Caso se esteja a interrogar porque é que ligando um voltímetro a um termopar não se geram várias junções adicionais (ligações ao termopar, ligações ao aparelho de medida, ligações dentro do próprio aparelho, etc...), a resposta advém da lei conhecida como lei dos metais intermédios, que afirma que ao inserirmos um terceiro metal entre os dois metais de uma junção dum termopar, basta que as duas novas junções criadas com a inserção do terceiro metal estejam à mesma temperatura para que não se manifeste qualquer modificação na saída do termopar. Esta lei é também importante na própria construção das junções do termopar, uma vez que assim se garante que ao soldar os dois metais a solda não irá afectar a medição. Contudo, na prática as junções dos termopares podem ser construídas soldando os materiais ou por aperto dos mesmos.

Todas as tabelas normalizadas dão os valores da tensão de saída do termopar considerando que a segunda junção do termopar (a junção fria) é mantida a exactamente zero graus °C. Antigamente isto conseguia-se conservando a junção em gelo fundente (daqui o termo compensação por junção fria). Contudo a manutenção do gelo nas condições necessárias não era fácil, logo optou-se por medir a temperatura da junção fria e compensar a diferença para os zero graus Celsius.

Tipicamente a temperatura da junção fria é medida por um termistor (semicondutores sensíveis à temperatura) de precisão. A leitura desta segunda temperatura, em conjunto com a leitura do valor da tensão do próprio termopar é utilizada para o cálculo da temperatura verificada na extremidade do

termopar. Em aplicações menos exigentes, a compensação da junção fria é feita por um semiconductor sensor de temperatura, combinando o sinal do semiconductor com o do termopar. É importante a compreensão da compensação por junção fria; qualquer erro na medição da temperatura da junção fria irá ocasionar igualmente erros na medição da temperatura da extremidade do termopar.

Um termómetro de resistência de platina pode ser utilizado para trabalhos de grande precisão dentro do intervalo de temperaturas compreendido entre -253 e 1200°C. A calibragem do instrumento implica a medida de *parâmetros*, em várias temperaturas conhecidas, e a representação dos resultados por meio de uma fórmula empírica.

Em um intervalo limitado utiliza-se frequentemente uma equação quadrática com a temperatura.

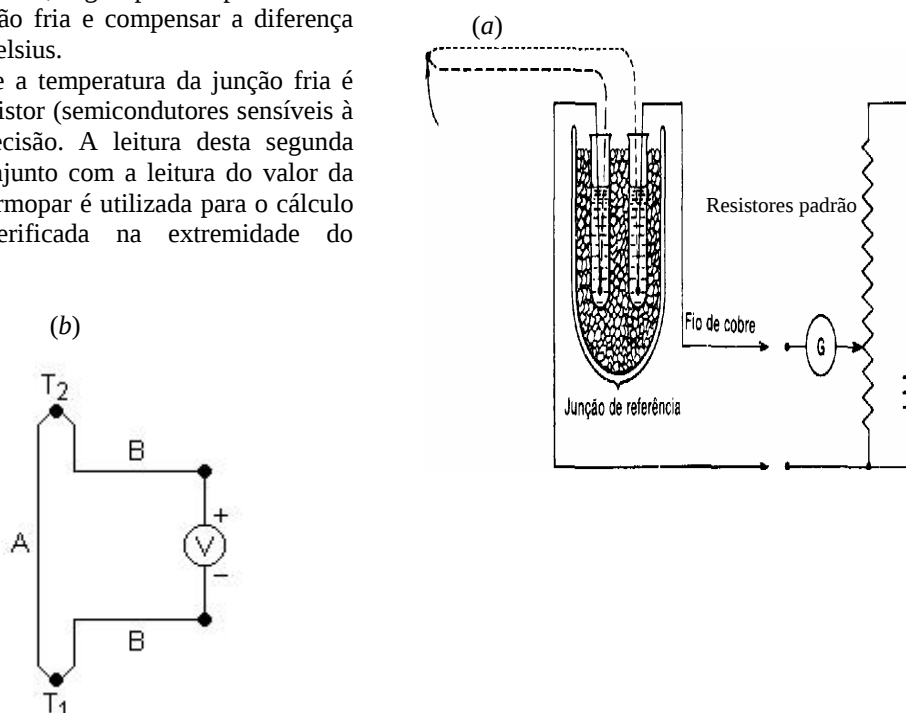
O uso do par termoelétrico é mostrado na Figura 2.

A força eletromotriz (fem) térmica se mede com um potenciômetro, o qual, em regra, deve ser colocada a certa distância do sistema cuja temperatura se quer medir. A junção de referência está, por isso, colocada próximo à junção de teste e consiste de duas conexões de fio de cobre, mantidas à temperatura de fusão do gelo. Este dispositivo permite o uso de fios de cobre para conexão do potenciômetro. Os bornes de ligação do potenciômetro são normalmente de latão, e por isso o potenciômetro possui dois termopares de cobre-latão.

Se ambos os bornes se acham à mesma temperatura, estes dois termopares de cobre-latão não introduzem nenhum erro. Um termopar é calibrado medindo-se a fem térmica em várias temperaturas conhecidas enquanto se mantém a junção de referência a 0°C. Os resultados de tais medidas podem ser usualmente representados, na maior parte dos termopares.

Fig. 2 - (a) Termopar de fios elétricos A e B com uma junção de referência composta de duas conexões com fio de cobertas unidas a um potenciômetro.

(b) Circuito mostrando o esquema de um termopar.



❖ **Escala prática internacional de temperatura**

Na reunião da 7ª Conferência Geral de Pesos e Medidas em 1927, onde 31 nações estavam representadas, foi adotada uma escala prática internacional de temperaturas, não para substituir o centígrado ou a dos gases perfeitos, mas para proporcionar uma escala capaz de ser utilizada fácil e rapidamente para a calibragem de instrumentos científicos e industriais. Em revisões efetuadas em 1945 e 1960 vários aperfeiçoamentos foram feitos.

Outro tipo de termômetro é quando se utiliza em lugar do gás termométrico no bulbo, comunicando-se diretamente com o mercúrio no manômetro, dois volumes separados de gás: o gás termométrico, o qual vai tão longe quanto o permita um diafragma e exerce pressão em um dos lados deste; e um gás manométrico do outro lado do diafragma em comunicação com o manômetro. O próprio diafragma é uma placa de um capacitor, com a outra placa fixada nas proximidades. Uma diferença de pressão através do diafragma causa um leve movimento deste, resultando numa variação de capacitância observada com o auxílio de uma ponte de corrente alternada. A cerca de 1 atm, uma pressão diferencial de 1 parte por milhão é detectável. Quando o diafragma não apresenta deflexão alguma, a pressão do gás manométrico é a mesma do gás termométrico, e uma leitura do manômetro dá a pressão no bulbo.

Um outro melhoramento detalhado na Figura 1.8 é um espaço de gás compensador envolvendo o bulbo. O gás manométrico é deixado preencher este espaço. No momento em que é feita a leitura do manômetro, não existe nenhuma força líquida tendendo a alterar as dimensões do bulbo, e por isso nenhuma correção necessita ser feita para a variação do volume do bulbo com a pressão.

Os maiores melhoramentos foram feitos no manômetro de mercúrio. O menisco de mercúrio em cada tubo é feito muito plano por causa do alargamento dos tubos, uma vez que o espaço vazio não depende desta largura como acontecia nos instrumentos mais antigos. A posição do menisco de mercúrio é obtida usando-o como uma placa do capacitor, com a outra sendo fixa nas proximidades, e medindo-se a capacitância com uma ponte de corrente alternada.

Com blocos calibradores mede-se a diferença em altura das duas colunas de mercúrio. As pressões podem ser medidas com exatidão até uns poucos décimos de milésimos de milímetro de mercúrio.

Um termômetro a gás foi construído com um diafragma de pressão diferencial no próprio bulbo do termômetro, eliminando assim todo o espaço morto.

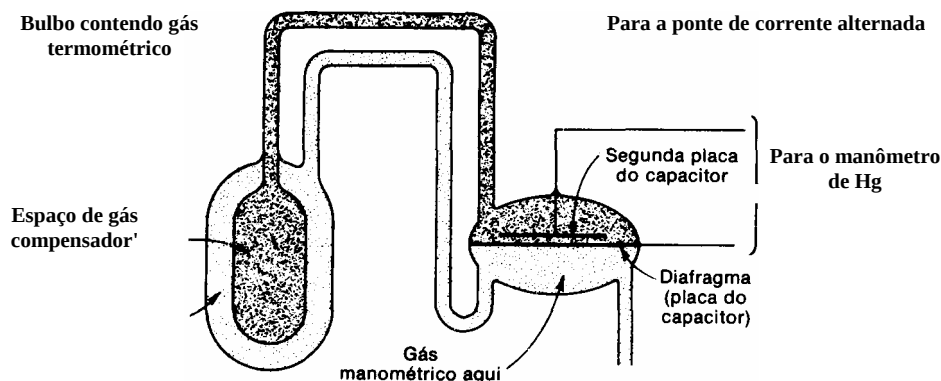


Fig. 3 - Diagrama esquemático de dois aperfeiçoamentos introduzidos no termômetro de gás utilizado no NBS dos Estados Unidos.

2) Termodinâmica

2.1 – Quantidade de Calor Sensível e Latente.

Lei Zero da Termodinâmica.

A definição termodinâmica de calor é um tanto diferente da interpretação comum da palavra. Portanto, é importante compreender claramente a definição de calor dada aqui porque ela se envolve em muitos problemas de termodinâmica.

Se um bloco de cobre quente for aquecido num vaso de água fria, sabemos pela experiência, que o bloco de cobre se resfria e a água se aquece até que o cobre e a água atinjam a mesma temperatura. O que causa esta diminuição de temperatura do cobre e o aumento de temperatura da água? Dizemos que isto é o resultado da transferência de energia do bloco de cobre à água. E desta transferência de energia que chegamos a uma definição de calor.

O calor é definido como sendo a forma de energia transferida através da fronteira de um sistema numa dada temperatura, a um outro sistema (ou o meio) numa temperatura inferior, em virtude da diferença de temperatura entre os dois sistemas. Isto é, o calor é transferido do sistema à temperatura superior ao sistema à temperatura inferior, e a transferência de calor ocorre unicamente devido à diferença de temperatura entre os dois sistemas. Um outro aspecto desta definição de calor é que um corpo nunca contém calor. Ou melhor, o calor pode somente ser identificado quando ele atravessa a fronteira. Assim, o calor é um fenômeno transitório. Se considerarmos o bloco quente de cobre como um sistema e a água fria do vaso como um outro sistema, reconhecemos que originalmente nenhum sistema contém calor (eles contêm energia, naturalmente). Quando o cobre é colocado na água e os dois estão em comunicação térmica, o calor é transferido do cobre à água, até que seja estabelecido o equilíbrio de temperatura. Neste ponto, já não há mais transferência de calor, pois não há diferença de temperatura. Nenhum sistema contém calor no fim do processo. Infere-se, também, que o calor é identificado na fronteira do sistema, pois o calor é definido como sendo a energia transferida através da fronteira do sistema.

A quantidade de calor sensível é definida por:

$$Q = m \int_{\theta_i}^{\theta_f} c \cdot d\theta$$

Aqui c é definido como calor específico; para muitas substâncias, a uma certa variação de temperatura, o calor específico é constante; aí, podemos escrever:

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

Consideremos agora os mesmos blocos de cobre e, também, um termômetro. Coloquemos agora em contato com o termômetro um dos blocos até que a igualdade de temperatura seja estabelecida e então removamo-lo. Coloquemos, então, o segundo bloco de cobre em contato com o termômetro e suponhamos que nenhuma mudança no nível de mercúrio do termômetro ocorra durante esta operação. Podemos então dizer que os

dois blocos estão em equilíbrio térmico com o termômetro dado.

A lei zero da termodinâmica diz que, quando dois corpos têm igualdade de temperatura com um terceiro corpo, eles terão igualdade de temperatura entre si. Isso parece bastante óbvio para nós, porque estamos familiarizados com essa experiência. Entretanto, sendo esse fato independente de outras leis e, uma vez que na apresentação da termodinâmica, ele precede a primeira e a segunda lei. Damos a denominação de "**lei zero da termodinâmica**". Esta lei constitui realmente a base da medida da temperatura, porque podemos colocar números no termômetro de mercúrio e, sempre que um corpo tem igualdade de temperatura com o termômetro, podemos dizer que o corpo tem a temperatura lida no termômetro. O problema permanece, entretanto, com relação às temperaturas lidas nos diferentes termômetros de mercúrio ou às obtidos através de diferentes aparelhos de medida de temperatura tais como, pares termoeletrônicos e termômetros de resistência. Isso sugere a necessidade de uma escala padrão para as medidas de temperatura

2.2 – Capacidade Calorífica e Calor específico. Calorímetros.

❖ Capacidade Calorífica

Definimos a capacidade calorífica pela equação:

$$C = m \cdot c$$

Onde c é o calor específico da substância.

Unidade: J/kg ou cal/g

• Calor específico

O calor específico é a quantia de calor por massa de unidade exigiu elevar a temperatura através de um grau Centígrado. A relação entre calor e mudança de temperatura normalmente é expressa na forma anterior onde c é o calor específico. A relação não aplica se uma mudança de fase é encontrada, porque o durante uma mudança de fase não há mudança de temperatura. Os calores específicos da maioria dos sólidos a temperatura de quarto e sobre é quase constante, de acordo com a Lei de Dulong e Petit. As mais baixas temperaturas o calor específico varia, pois o modelo quântico fica significante. O baixo comportamento de temperatura é descrito pelo Modelo de Einstein-Debye do calor específico. O calor específico é a quantidade de calor por massa necessário para elevar a temperatura de um grau Centígrado. A relação entre calor e mudança de temperatura normalmente é expressa na forma mostrada onde c é o calor específico. A relação não aplica se uma mudança de fase é encontrada, porque o calor envolvido durante uma mudança de fase não muda a temperatura de uma substância pura.

❖ Caloríficas Molares Médias de Metais

Tabela 1 - Calores Específicos e Capacidades

Metal	c $Jg^{-1}^{\circ}C^{-1}$	Intervalo de temperatura, $^{\circ}C$	M. $g \cdot mol^{-1}$	Molar. $C = Mc J \cdot mol^{-1} (^{\circ}C)$
Be	1,97	20-100	9,01	17,7
Al	0,91	17-100	27,0	24,6
Fe	0,47	18-100	55,9	26,3
Cu	0,39	15-100	63,5	24,8
Ag	0,234	15-100	108	25,3
Hg	0,138	0-100	201	27,7
Pb	0,130	20-100	207	26,9

➤ Calorímetros.

Uma das características das substâncias é o calor específico, pois é própria de cada uma e é praticamente invariável para a mesma substância. Por definição, calor específico de uma substância é a quantidade de calor necessária para elevar de $1^{\circ}C$ a temperatura de um grama dessa substância. Segundo a termodinâmica: “Havendo troca de calor entre os corpos isolados termicamente do meio externo, a quantidade de calor cedida pelos corpos que arrefecem é igual à quantidade de calor recebida pelos corpos que aquecem”. Haverá troca de calor entre eles até que a igualdade de temperatura se estabeleça. Um método simples para se determinar o calor específico de uma substância é chamado “método das misturas”. Como o nome indica, esse método consta em “misturar” corpos com temperaturas diferentes, porém conhecidas. A mistura deve ser realizada num ambiente isolado termicamente para que a troca de calor seja restrita aos corpos em estudo. O calorímetro, descrito a seguir, proporciona esse ambiente dentro de limites razoáveis. Ele é constituído de um recipiente metálico (vaso de cobre), protegido por um outro que é isolante térmico (isopor). A tampa do vaso de isopor possui dois furos: um para o termômetro e o outro para o agitador, que se destina a homogeneizar a temperatura da água.

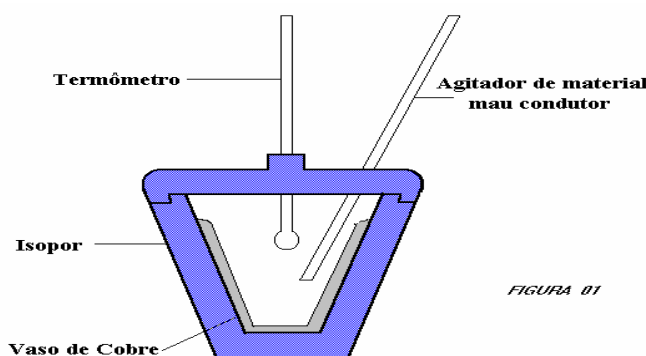


FIGURA 01

2.3 – Superfícies PVT para substância real e gás perfeito.

2.4 – Pontos Tríplice e Crítico. Diagrama de Fase.

2.5 – Lei Zero da Termodinâmica.

2.6 – Calor Latente e Mudança de Fase.

➤ Mudança de Fase de uma substância pura.

A seguir mostramos para uma substância pura as curvas correspondentes às fases físicas em que elas se encontram.

1) Curva de sublimação; onde ocorrem os limites entre as fases sólidas e líquidas;

2) líquido e vapor, sobre a curva de vaporização.

3) líquido e sólido, sobre a curva de fusão.

No caso particular da água, a curva de sublimação se denomina *linha de geada*; a de vaporização, *linha de vapor* d'água; e a de fusão, *linha de gelo*.

As inclinações das curvas de sublimação e de vaporização são positivas para todas as substâncias. Entretanto, a inclinação da curva de fusão pode ser positiva ou negativa. A curva de fusão da maior parte das substâncias tem inclinação positiva. A água é uma das mais importantes exceções. Na chamada equação de Clapeyron, veremos que toda substância, como a água, que se contrai ao fundir-se tem uma curva de fusão de inclinação negativa, enquanto que sucede o contrário para as substâncias que se dilatam ao fundir-se.

Em Física, o **ponto triplo** de uma substância é a temperatura e a pressão nas quais três fases (sólido, líquido e gasoso) de uma substância podem coexistir em equilíbrio termodinâmico.

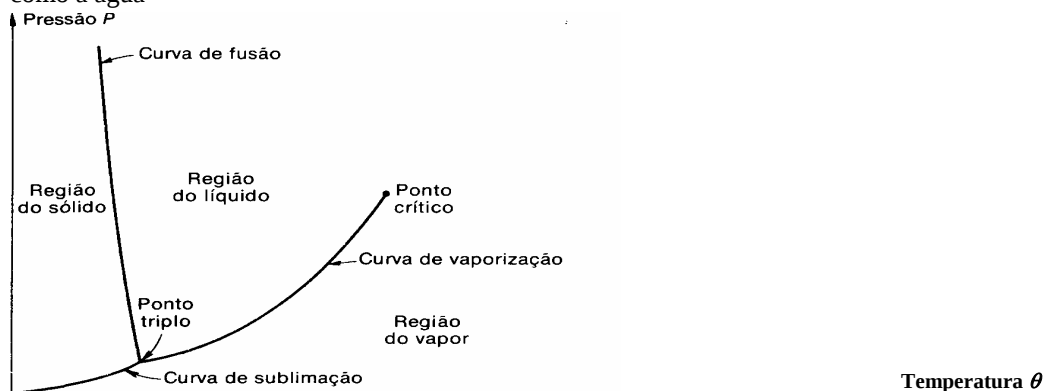
Por exemplo, no ponto triplo a temperatura da água é exatamente 273,16 K ($0,01^{\circ}C$) e a pressão é 611,73 pascal (cerca de 0,006 bar). O ponto triplo do mercúrio é a $-38,8344^{\circ}C$ e a 0,2 mPa.

O ponto triplo é o ponto de interseção das curvas de sublimação e de vaporização. Deve ser compreendido que somente num diagrama $P\theta$ o ponto triplo é representado por um ponto. Num diagrama PV ele é representado por uma linha. O Quadro 2.1 dá os dados do ponto triplo para algumas substâncias interessantes.

Ao investigar a linha de gelo da água a pressões muito altas, Bridgman e Tammann descobriram cinco novas variedades de gelo, designadas como gelo II, III, V, VI e VII, reservando para o gelo comum a designação I. Encontraram também duas outras modificações instáveis de gelo, os chamados IV e VIU.

As condições de equilíbrio entre estas formas de gelo e líquido originam outros seis pontos triplos que, com o correspondente a baixa pressão, estão listados na tabela a seguir.

Fig. 4 - Diagrama $P\theta$ para uma substância tal como a água



Substância	Temp. Em K	Pressão em mm Hg
Hélio (4) (ponto \)	2,172	37,80
Hidrogénio (normal)	13,84	52,8
Deutério (normal)	18,63	128
Neônio	24,57	324
Nitrogénio	63,18	94
Oxigénio	54,36	1,14
Amónia	195,40	45,57
Dióxido de carbono	216,55	3880
Dióxido de enxofre	197,68	1.256
Água	273,16	4,58

Tabela 2 Dados do ponto triplo.

Todas as informações que estão representadas em ambos os diagramas, PV e $P\theta$, podem ser mostradas sobre um diagrama único, se as três coordenadas P , V e θ forem plotadas ao longo de três eixos retangulares. O resultado se denomina *superfície $PV\theta$* .

As Figuras 5 e 6 mostram duas destas superfícies: a primeira, para uma substância como a H_2O ,

Tabela 3 - Pontos triplos da água.

Fases	Em equilíbrio	Pressão	Temp. em °C
Gelo	I, líquido, vapor I,	4,579 mm Hg	+ 0,01
Gelo	líquido, gelo III I,	2.115 kg/cm ²	-22,0
Gelo	gelo II,	2.170 kg/cm ²	-34,7
Gelo	gelo III II,	3.510 kg/cm ²	-24,3
Gelo	gelo III, gelo V ,	3.530 kg/cm ²	-17,0
Gelo	líquido	6.380 kg/cm ²	+ 0,16
Gelo	gelo VI,	22.400 kg/cm ²	+81,6
	líquido, gelo VII		

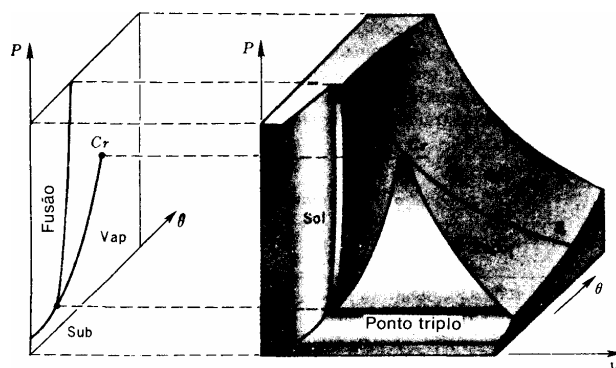
que se contrai ao fundir-se; a segunda, para outra como o CO_2 , que se dilata ao fundir-se.

Os diagramas não foram desenhados em escala, estando o eixo dos volumes consideravelmente escurçado. Se o estudante imaginar uma superfície $PV\theta$ pro-jetada sobre o plano PV , verá o diagrama PV de uso corrente. Projetando a superfície sobre o plano $P\theta$, toda a região sólido-vapor se projeta na curva de sublimação, toda região líquido-vapor se projeta na curva de vaporização, toda a região sólido-líquido se projeta na curva de fusão e, finalmente, a linha do ponto triplo (linha tripla ou linha tríplice) se projeta no mesmo.

O ponto crítico é denotado pelas letras Cr , e o ponto triplo por Tr . A isotérmica crítica representa-se por θ_c . Uma substância que não possui superfície livre e cujo volume está determinado pelo do recipiente chama-se *gás* se sua temperatura é superior à temperatura crítica; em outro caso chama-se *vapor*.

Todos os pontos triplos da água aparecem representados sobre a superfície PVT da Figura 5, construída por Verwiebe tomando como base as medidas de Bridgman.

Fig. 5 - Superfície $PV\theta$ para uma substância que se contrai ao fundir-se.



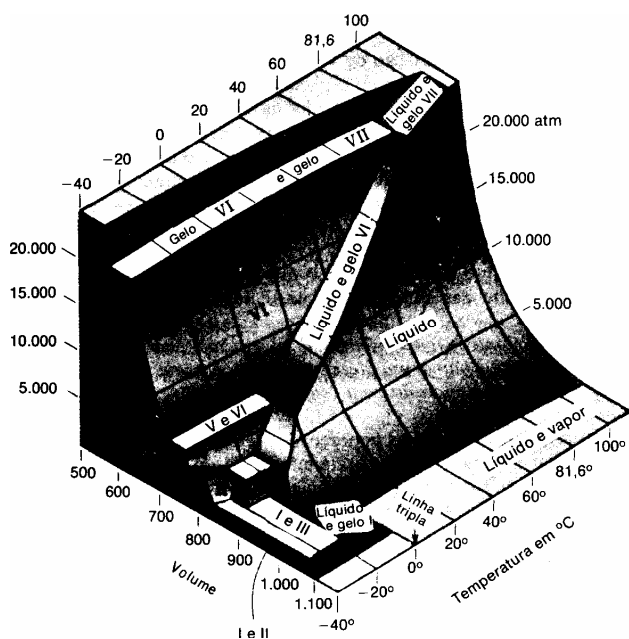
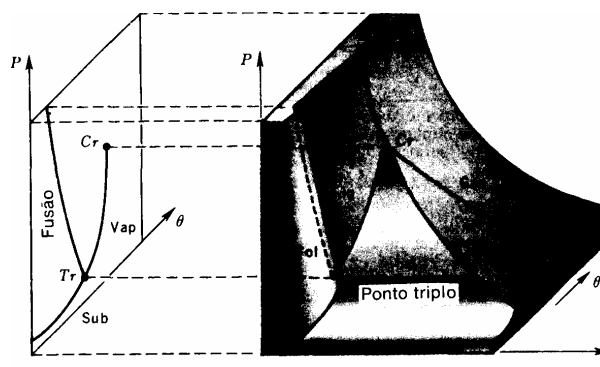


Fig. 6 - Superfície $PV\theta$, para uma substância que se dilata ao fundir-se.

É impossível expressar por meio de uma única equação o comportamento completo de uma substância sobre todo o intervalo de valores medidos de P , V e θ .

Mais de sessenta equações de estado foram propostas para representar somente as regiões de líquido, vapor e líquido-vapor, as quais englobam desde a equação dos gases perfeitos, que veremos mais tarde.

Fig. 7 - Superfície $PV\theta$ para a água, mostrando todos os pontos triplos (Construída por Verwiebe tomando como base as medidas de Bridgman).



❖ Equações de estado

❖ Unidades de Calor

Devemos ter unidades para o calor, como para todas as outras quantidades em termodinâmica. Consideremos como um sistema, 1 lbm de água a 59.5 °F e coloquemos um bloco de cobre quente na água. Façamos com que o bloco de cobre tenha uma massa e uma temperatura tais que. Quando o equilíbrio térmico ó estabelecido, a temperatura da água é de 60.5 °F. Definimos como nossa unidade de calor a quantidade de calor transferida do cobre à água, e denominamos a unidade de calor de unidade térmica britânica, que é abreviada Btu. Mais especificamente, esta é chamada de Btu a 60 graus, que pode ser definida como a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de 1 lbm de água de 59.5 F a 60.5 F'. Analogamente, uma caloria pode ser definida como sendo a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de 1 grama de água de 14.5 C a 15.5 C.

Outrossim, o calor transferido *para um* sistema é considerado positivo e os calores transferidos de um sistema, negativo. Assim, calor positivo representa a energia transferida para um sistema e calor negativo representa a energia transferida de um sistema. E usado o símbolo Q para representar o calor.

Um processo em que não há troca de calor ($Q = 0$) é chamado de processo adiabático.

Do ponto de vista matemático, o calor, como o trabalho, é uma função de linha e é reconhecido como sendo uma diferencial inexata. Isto é, a quantidade de calor transferida quando um sistema sofre uma mudança, do estado 1 ao estado 2, depende do caminho que o sistema percorre durante a mudança de estado.

A relação entre a caloria e o Joule é dada por:

$$1\text{cal} \cong 4,18 \text{ J}$$

2.4 – Calor Latente e Mudança de Fase.

O termo *fase*, usado aqui se relaciona ao fato de que a matéria existe como sólido, líquido ou gás. Assim, a substância química H_2O existe na fase *sólida* como gelo, na *líquida* como água e na *gasosa* como vapor. Desde que não se decomponham a altas temperaturas, todas as substâncias podem existir em qualquer das três fases, sob condições adequadas de temperatura e pressão. Transições de uma a outra fase são acompanhadas pela absorção ou liberação de calor e, usualmente, por uma mudança de volume, mesmo quando a transição ocorra à temperatura constante.

Como ilustração, suponha que se retire gelo de um refrigerador, onde sua temperatura era, digamos 25°C. Quebre rapidamente o gelo, ponha-o num vaso e coloque um termômetro na massa. Imagine o vaso rodeado por uma resistência elétrica que forneça calor ao gelo, com uma taxa uniforme e suponha que nenhum outro calor chegue ao gelo. Observa-se que a temperatura do gelo aumenta gradualmente, como é mostrado na parte do gráfico de a b da Figura 8, até atingir 0°C. Nesse intervalo de temperatura, o calor específico do gelo é aproximadamente $2,00 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot (\text{°C})^{-1}$ ou $0,48 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot (\text{°C})^{-1}$. Tão logo essa temperatura seja alcançada, observa-se um pouco de água líquida no vaso. Em outras palavras, o gelo começa a *derreter-se*. O processo de fusão é uma *mudança de fase*, da sólida para a líquida. O termômetro, entretanto, não indica *aumento de temperatura* e, embora esteja sendo fornecido calor na mesma proporção que antes, a temperatura permanece em 0°C até que *todo* o gelo seja derretido (ponto r), se a pressão for mantida constante em uma atmosfera.

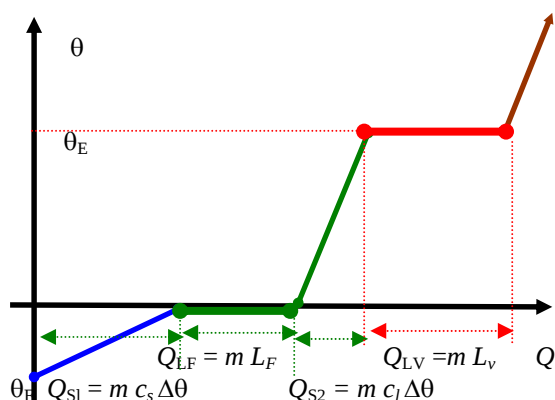


Fig. 8 – Mudança de Fase. Curva de aquecimento. A temperatura permanece constante durante cada mudança de fase, desde que a pressão permaneça constante.

Tão logo o último pedaço de gelo haja derretido, a temperatura começa a se elevar novamente numa proporção constante (de c a d, Fig. 8), embora essa proporção seja menor que a de a e b, porque o calor específico da água é maior que o do gelo. Quando atinge 100°C (ponto d), bolhas de vapor (água gasosa ou vapor d'água) começam a escapar da superfície do líquido, ou seja, a água começa a *fervor*. A temperatura permanece constante a 100°C (a pressão atmosférica constante) até que toda a água tenha fervido. Ocorreu, assim, outra mudança de fase, da líquida para a gasosa.

Se todo o vapor d'água tivesse sido armazenado no recipiente (seria necessário um vaso muito grande), o processo de aquecimento poderia ser continuado de e para f. O gás seria agora chamado "vapor superaquecido".

Um ponto essencial nesta discussão é que, quando se adiciona calor lentamente (para manter o equilíbrio térmico) a uma substância que pode existir em fases diferentes, ou a temperatura aumenta ou parte da substância muda de fase, mas nunca ambos ao mesmo tempo. Uma vez atingida a temperatura de transição, não há variação de temperatura até que toda a substância tenha mudado de fase.

Esse tipo de curva, para a água, é também obtido para muitas outras substâncias. Algumas,

entretanto, decompõem-se antes de atingir o ponto de fusão ou ebulição, e outras, como vidro ou piche, não mudam de fase em temperatura bem definida, tornando-se cada vez mais moles à medida que a temperatura aumenta.

Substâncias cristalinas, como gelo ou metal, derretem-se em temperatura definida. Vidro e piche comportam-se como líquidos superesfriados de viscosidade muito alta.

A quantidade de calor por unidade de massa que deve ser fornecida à substância no seu ponto de fusão, para convertê-la totalmente em líquido a *mesma temperatura*, é chamada *calor de fusão* da substância. *Calor de Vaporização* de uma substância é a quantidade de calor por unidade de massa, que lhe deve ser fornecida em seu ponto de ebulição, para convertê-la totalmente em gás, a mesma temperatura. Calores de fusão e Vaporização são expressos em unidades de energia por unidades de massa, como joules por quilograma, caloria ama ou Btu por libra. Assim, o calor de fusão do gelo é aproximadamente $3,34 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 79,7 calorias por grama ou 143 Btu por libra. O calor de vaporização da água a 100°C é $2,26 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 540 cal g⁻¹ ou 972 Btu-lb⁻¹.

As temperaturas em que ocorrem mudanças de fase dependem da pressão bem como dos calores correspondentes. Por exemplo, água sob pressão atmosférica normal ferve a 100°C com um calor de vaporização de $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$, mas se a pressão for reduzida para 0,5 atm (correspondente a uma altitude de 6 000 m acima do nível do mar), a temperatura de ebulição será de 82° C e o calor de vaporização, 2 310 J•g⁻¹.

Efeitos semelhantes ocorrem com a fusão, embora a dependência com a pressão seja menos pronunciada. Alguns calores de fusão e vaporização sob pressão atmosférica normal estão listados na Tabela 4. Essas quantidades de calor são às vezes chamadas *calores latentes*, porque mudam a fase do material, mas não a sua temperatura. Este termo é de certa forma redundante, não sendo usado aqui.

Substância	Ponto Normal de Fusão		Calor de Fusão, J.g ⁻¹	Ponto Normal de Ebulição		Calor de Vaporização, J.g ⁻¹
	K	°C		K	°C	
Hidrogênio	13,84	-259,31	58,6	20,26	-252,89	452
Nitrogênio	63.18	-209.97	25.5	77.34	-195.81	201
Oxigênio	54.36	-218.79	13.8	90.18	-182.97	213
Álcool etílico	159	-114	104.2	351	78	854
Mercurio	234	- 39	11.8	630	357	272
Água	273.15	0.00	335	373.15	100.00	2256
Enxofre	392	119	38.1	717.75	444.60	326
Chumbo	600.5	327.3	24.5	2023	1750	871
Antimônio	903.65	630.50	165	1713	1 440	561
Prata	1 233.95	960.80	88.3	2466	2193	2336
Ouro	1 336.15	1 063.00	64.5	2933	2660	1578
Cobre	1356	1083	134	1460	1 187	5 069

Tabela 4 - Calores de Fusão e Vaporização

Quando se retira calor de um gás, sua temperatura cai e, em temperatura igual à de ebulição, retorna à líquida, ou seja, *condensa-se*. Ao fazer assim, cede ao meio ambiente a mesma quantidade de calor requerida para vaporizá-lo. O calor assim cedido é igual ao de vaporização. Analogamente, um líquido retorna à fase sólida, ou congela, quando esfriado em temperatura em que foi derretido, cedendo calor, exatamente igual ao de fusão.

Normalmente, a fusão e a solidificação ocorrem à mesma temperatura, assim como a ebulição e a condensação, mas sob certas condições, um material pode ser esfriado ou aquecido à temperatura abaixo ou acima da normal de transição de fase em que a transição ocorra. O estado resultante é instável, sendo chamado de *superesfriado* ou *superaquecido*. Água muito pura pode ser esfriada vários graus abaixo do ponto normal de congelamento sob certas condições ideais. Quando um pequeno cristal de gelo é mergulhado na água, ou é agitada, a cristalização ocorre muito rapidamente. Da mesma forma, o vapor d'água superesfriado condensa-se rapidamente em gotículas de neblina, quando uma perturbação, como partículas de poeira ou radiação ionizada é introduzida. Este fenômeno é usado na câmara de bolhas e na câmara de nuvens.

Uma substância no ponto de fusão congela-se ou derrete-se conforme o calor esteja sendo retirado ou tecido. Isto é, se fornecer calor a um bquer contendo gelo e água a 0°C, parte do gelo derreter-se-á, mas retirando-se calor, parte da água congelar-se-á. Em ambos os casos, a temperatura permanecerá em 0°C, desde que haja gelo e água presentes. *Se não houver fornecimento nem retirada de calor, não haverá mudança e as quantidades relativas de gelo e água, assim como a temperatura permanecerá constante.* Diz-se que tal sistema está em *equilíbrio de fase*, mostrando, então, outro ponto de vista, que pode ser tomado a respeito do ponto de fusão, isto é, o ponto de fusão (congelamento) de uma substância é *a temperatura em que as fases líquida e sólida podem coexistir*. Em temperatura mais alta, a substância só pode ser líquida; na mais baixa, só sólida.

A expressão geral *calor de transformação* aplica-se tanto ao de fusão como ao de vaporização, sendo ambos designados pela letra L . Como L representa o calor absorvido ou liberado na mudança de fase, por unidade de massa, o calor Q absorvido ou liberado na mudança de fase de uma massa m é:

$$Q = m \cdot L$$

O sistema caseiro de aquecimento usa o processo de condensação-ebulição para transferir calor da fomalha aos radiadores. Cada quilo (litro) de água transformado em vapor absorve cerca de 539 000 cal (2,26 X 10⁶ J) da fomalha, fornecendo essa quantidade quando se condensa nos radiadores. (Esse número é válido se a pressão de vapor for de 1 atm. Será levemente menor a pressões mais altas.) Assim, no sistema de aquecimento por vapor não é preciso fazer circular tanta água quanto no de água quente. Se a água sair da fomalha a 60°C e voltar a 40°C, caindo de 20°C, cerca de 27 kg de água deverão circular para levar a mesma quantidade de calor transportada em forma de calor de vaporização, por 1 kg de vapor.

Os mecanismos de controle de temperatura de muitos animais de sangue quente operam num principio semelhante. Quando o hipotálamo detecta um ligeiro aumento na temperatura do sangue, as glândulas sudoríparas são ativadas. À medida que o suor (basicamente água) se evapora, remove calor do corpo, como calor de vaporização. Isto faz o mesmo papel que os canos que ligam a fomalha aos radiadores e o coração faz o papel de bomba de circulação num sistema de água quente com circulação forçada.

Sob condições adequadas de temperatura e pressão, uma substância pode mudar diretamente da fase sólida para a gasosa, sem passar pela líquida. Essa mudança chama-se *sublimação* e diz-se que o sólido *sublimou*. O "gelo seco" (dióxido de carbono sólido) sublima à pressão atmosférica. O dióxido de carbono líquido não pode existir a pressão abaixo de cerca de 5 . 10⁵ Pa (cerca de 5 atm).

O calor é absorvido no processo de sublimação, sendo liberado no processo inverso. Chama-se *calor de sublimação* à quantidade de calor por unidade de massa transferida nesse processo.

Quantidades definidas de calor estão envolvidas em reações químicas. As mais familiares talvez sejam as associadas à combustão. A combustão completa de um grama de gasolina produz aproximadamente 46 000 J ou 11 000 cal e diz-se que o *calor de combustão* da gasolina é de 46 000 J • g⁻¹ ou 46.10⁶ J • kg⁻¹. Definem-se os valores de energia dos alimentos de maneira semelhante. A unidade de energia alimentar é o *quilo-caloria* (kcal) ou 1 000 cal ou 4 186 J. Quando se diz que um grama de manteiga de amendoim "contém" 12 calorias, significa que quando ela reage com oxigênio, com ajuda de enzimas, para converter o carbono e o hidrogênio em CO₂ e H₂O, a energia total liberada como calor é de 12 000 cal ou 50 200 J. Nem toda essa energia é utilizável diretamente como trabalho mecânico; o assunto da eficiência da utilização de energia será discutido mais tarde.

Como foi indicado anteriormente, o princípio básico do cálculo que envolve quantidades de calor é que quando há ocorrência de fluxo de calor entre dois corpos em contato térmico, a quantidade de calor perdida por um desses corpos tem de ser igual à recebida pelo outro. Os exemplos a seguir indicam este princípio no contexto de fenômenos discutidos neste capítulo.

Exemplo 1 - Uma taça de cobre, cuja massa é de 0,1 kg, inicialmente a 20°C, é cheia com 0,2 kg de café, inicialmente a 70°C. Qual a temperatura final, depois que o café e a taça chegarem ao equilíbrio térmico?

Para determinar a tensão térmica em uma barra presa, calculamos a dilatação devido à tração que *acorreria* caso ela não estivesse presa e a seguir achamos a tensão para comprimi-la (ou esticá-la) até que ela atinja seu comprimento original. Suponha uma barra de comprimento L_0 e seção reta com área A seja mantida com o comprimento constante enquanto sua temperatura se reduz (ΔT negativa), produzindo uma tensão. A variação relativa do comprimento caso a barra estivesse livre e pudesse se contrair seria dada por

$$\left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)_{\text{Térmico}} = \alpha \cdot \Delta \theta$$

As variações ΔT e ΔL são negativas. A tensão deve aumentar de um valor F precisamente suficiente para produzir uma variação relativa de comprimento igual a $(\Delta L/L_0)$. De acordo com a definição de **módulo de Young**:

$$Y = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} \Rightarrow \left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)_{\text{Tensão}} = \frac{F}{AY}$$

Como o comprimento deve permanecer constante, a variação relativa total do comprimento deve ser igual a zero. Pelas Equações anteriores isto significa que:

$$\left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)_{\text{Tensão}} + \left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)_{\text{Térmico}} = 0$$

$$\frac{F}{A} = -Y\alpha\Delta T$$

Para uma diminuição de temperatura, como ΔT é negativa, concluímos que F e F/A são grandezas positivas: isto significa que a tensão e a deformação devem ser de dilatação para manter o comprimento constante. Quando ΔT é positivo, F e F/A são grandezas negativas e a deformação e a tensão necessárias correspondem a uma COMPRESSÃO do material.

Quando no interior de um corpo existem diferenças de temperatura, dilatações ou pressões não uniformes são produzidas e tensões térmicas são induzidas. Você pode quebrar um recipiente de vidro se despejar nele água muito quente; as tensões térmicas entre as partes quentes e frias do recipiente superam a tensão de ruptura do vidro produzindo fraturas. O mesmo fenômeno produz fraturas em cubos de gelo despejados em um recipiente com água quente. Alguns vidros resistentes ao calor, como o vidro Pyrex podem possuir um coeficiente de dilatação extremamente pequenos e resistências elevadas.

Exemplo 2 - Um cilindro de alumínio de 10 cm de comprimento e seção reta com área igual a 20 cm² deve ser usado para separar duas paredes de aço. A 17,2 °C, ele está quase escorregando entre as duas paredes. Quando aquecido até 22,3 °C, calcule a tensão no cilindro e a torça total que ele exerce sobre cada parede, supondo que as paredes sejam completamente rígidas e a distância entre elas permaneça constante.

SOLUÇÃO A Equação relaciona a tensão com as variações de temperatura.

Dados:

$$Y = 7,0 \times 10^{10} \text{ Pa}$$

$$\alpha = 2,4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

A variação de temperatura é dada por:

$$\Delta T = 22,3^\circ\text{C} - 17,2^\circ\text{C} = 5,1^\circ\text{C} = 5,1 \text{ K}$$

A tensão é F/A . Da Equação anterior:

$$\frac{F}{A} = -Y\alpha\Delta T$$

$$\frac{F}{A} = -(0,7 \cdot 10^{11})(2,4 \cdot 10^{-5})(5,1) = -8,6 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

O sinal negativo indica que é necessária uma tensão de compressão, em vez de dilatação, para manter o comprimento do cilindro constante. Esta tensão não depende do comprimento nem da área da seção reta do cilindro.

A força total é dada pelo produto da área da seção reta vezes a tensão:

$$F = A \cdot \left(\frac{F}{A} \right) = (20 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2) \cdot (-8,6 \cdot 10^6 \text{ Pa})$$

$$= -1,7 \times 10^4 \text{ N.}$$

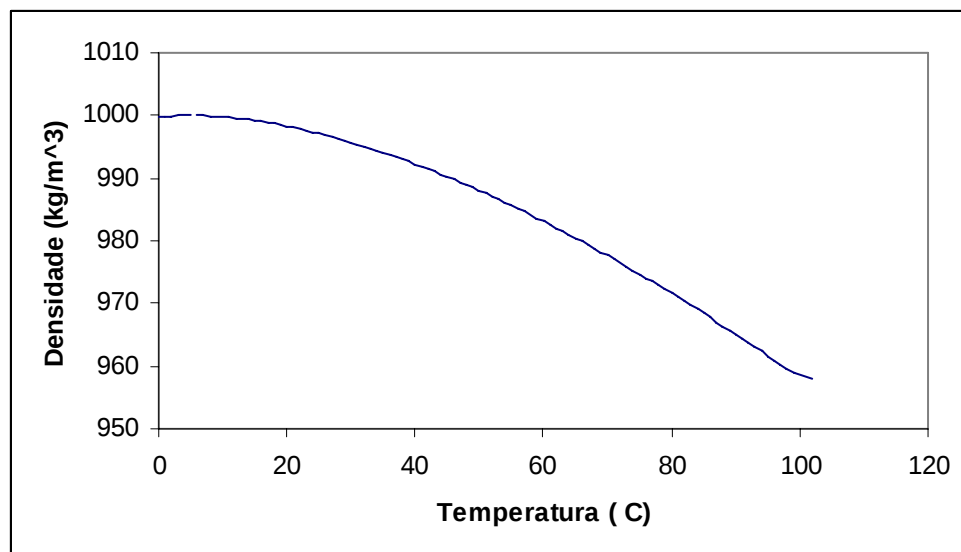
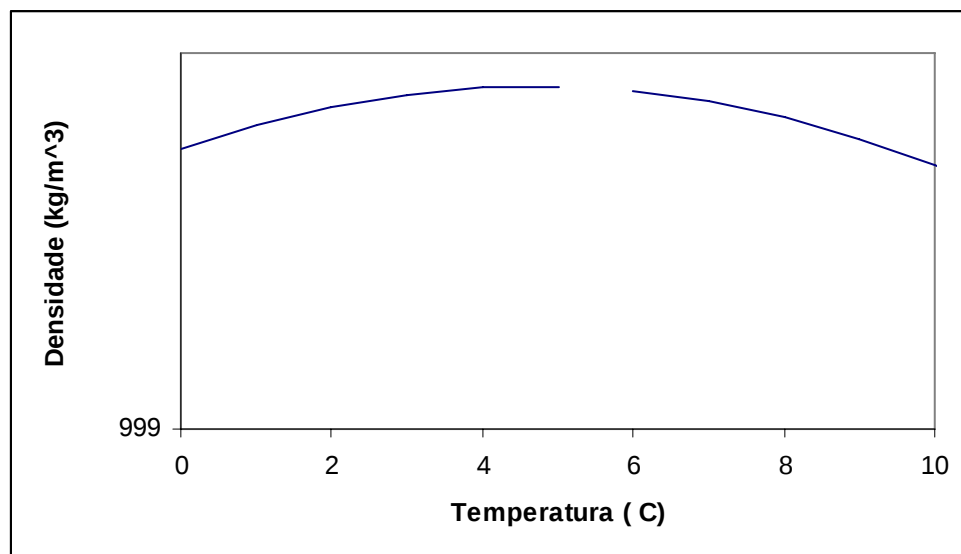
O sinal negativo indica torça de compressão.

Dados importantes da água

Temperatura	Pressão	Pressão de vapor de Saturação	Densidade	Entalpia específica da água líquida		Calor específico		Capacidade calorífica volume	Viscosidade dinâmica
°C	Pa	Pa	kg/m ³	kJ/kg	kcal/kg	kJ/kg	kcal/kg	kJ/m ³	kg/m.s
0.00	101325	611	999.82	0.06	0.01	4.217	1.007	4216.10	0.001792
1.00	101325	657	999.89	4.28	1.02	4.213	1.006	4213.03	0.001731
2.00	101325	705	999.94	8.49	2.03	4.210	1.006	4210.12	0.001674
3.00	101325	757	999.98	12.70	3.03	4.207	1.005	4207.36	0.001620
4.00	101325	813	1000.00	16.90	4.04	4.205	1.004	4204.74	0.001569
5.00	101325	872	1000.00	21.11	5.04	4.202	1.004	4202.26	0.001520
6.00	101325	935	999.99	25.31	6.04	4.200	1.003	4199.89	0.001473
7.00	101325	1001	999.96	29.51	7.05	4.198	1.003	4197.63	0.001429
8.00	101325	1072	999.91	33.70	8.05	4.196	1.002	4195.47	0.001386
9.00	101325	1147	999.85	37.90	9.05	4.194	1.002	4193.40	0.001346
10.00	101325	1227	999.77	42.09	10.05	4.192	1.001	4191.42	0.001308
11.00	101325	1312	999.68	46.28	11.05	4.191	1.001	4189.51	0.001271
12.00	101325	1402	999.58	50.47	12.06	4.189	1.001	4187.67	0.001236
13.00	101325	1497	999.46	54.66	13.06	4.188	1.000	4185.89	0.001202
14.00	101325	1597	999.33	58.85	14.06	4.187	1.000	4184.16	0.001170
15.00	101325	1704	999.19	63.04	15.06	4.186	1.000	4182.49	0.001139
16.00	101325	1817	999.03	67.22	16.06	4.185	1.000	4180.86	0.001109
17.00	101325	1936	998.86	71.41	17.06	4.184	0.999	4179.27	0.001081
18.00	101325	2063	998.68	75.59	18.05	4.183	0.999	4177.72	0.001054
19.00	101325	2196	998.49	79.77	19.05	4.182	0.999	4176.20	0.001028
20.00	101325	2337	998.29	83.95	20.05	4.182	0.999	4174.70	0.001003
21.00	101325	2486	998.08	88.14	21.05	4.181	0.999	4173.23	0.000979
22.00	101325	2642	997.86	92.32	22.05	4.181	0.999	4171.78	0.000955
23.00	101325	2808	997.62	96.50	23.05	4.180	0.998	4170.34	0.000933
24.00	101325	2982	997.38	100.68	24.05	4.180	0.998	4168.92	0.000911
25.00	101325	3166	997.13	104.86	25.04	4.180	0.998	4167.51	0.000891
26.00	101325	3360	996.86	109.04	26.04	4.179	0.998	4166.11	0.000871
27.00	101325	3564	996.59	113.22	27.04	4.179	0.998	4164.71	0.000852
28.00	101325	3779	996.31	117.39	28.04	4.179	0.998	4163.31	0.000833
29.00	101325	4004	996.02	121.57	29.04	4.179	0.998	4161.92	0.000815
30.00	101325	4242	995.71	125.75	30.04	4.178	0.998	4160.53	0.000798
31.00	101325	4491	995.41	129.93	31.03	4.178	0.998	4159.13	0.000781
32.00	101325	4754	995.09	134.11	32.03	4.178	0.998	4157.73	0.000765
33.00	101325	5029	994.76	138.29	33.03	4.178	0.998	4156.33	0.000749
34.00	101325	5318	994.43	142.47	34.03	4.178	0.998	4154.92	0.000734
35.00	101325	5622	994.08	146.64	35.03	4.178	0.998	4153.51	0.000720
36.00	101325	5940	993.73	150.82	36.02	4.178	0.998	4152.08	0.000705
37.00	101325	6274	993.37	155.00	37.02	4.178	0.998	4150.65	0.000692
38.00	101325	6624	993.00	159.18	38.02	4.178	0.998	4149.20	0.000678
39.00	101325	6991	992.63	163.36	39.02	4.179	0.998	4147.74	0.000666
40.00	101325	7375	992.25	167.54	40.02	4.179	0.998	4146.28	0.000653
41.00	101325	7777	991.86	171.71	41.01	4.179	0.998	4144.80	0.000641
42.00	101325	8198	991.46	175.89	42.01	4.179	0.998	4143.30	0.000629
43.00	101325	8639	991.05	180.07	43.01	4.179	0.998	4141.80	0.000618
44.00	101325	9100	990.64	184.25	44.01	4.179	0.998	4140.28	0.000607
45.00	101325	9582	990.22	188.43	45.01	4.180	0.998	4138.75	0.000596
46.00	101325	10085	989.80	192.61	46.00	4.180	0.998	4137.20	0.000586
47.00	101325	10612	989.36	196.79	47.00	4.180	0.998	4135.64	0.000576

48.00	101325	11161	988.92	200.97	48.00	4.180	0.998	4134.06	0.000566
49.00	101325	11735	988.47	205.15	49.00	4.181	0.999	4132.47	0.000556
50.00	101325	12335	988.02	209.33	50.00	4.181	0.999	4130.87	0.000547
51.00	101325	12960	987.56	213.51	51.00	4.181	0.999	4129.25	0.000538
52.00	101325	13612	987.09	217.69	52.00	4.182	0.999	4127.61	0.000529
53.00	101325	14292	986.62	221.88	52.99	4.182	0.999	4125.97	0.000521
54.00	101325	15001	986.14	226.06	53.99	4.182	0.999	4124.30	0.000512
55.00	101325	15740	985.65	230.24	54.99	4.183	0.999	4122.63	0.000504
56.00	101325	16510	985.16	234.42	55.99	4.183	0.999	4120.94	0.000496
57.00	101325	17312	984.66	238.61	56.99	4.183	0.999	4119.24	0.000489
58.00	101325	18146	984.16	242.79	57.99	4.184	0.999	4117.52	0.000481
59.00	101325	19015	983.64	246.97	58.99	4.184	0.999	4115.79	0.000474
60.00	101325	19919	983.13	251.16	59.99	4.185	0.999	4114.05	0.000467
61.00	101325	20859	982.60	255.34	60.99	4.185	1.000	4112.30	0.000460
62.00	101325	21837	982.07	259.53	61.99	4.186	1.000	4110.53	0.000453
63.00	101325	22854	981.54	263.72	62.99	4.186	1.000	4108.75	0.000447
64.00	101325	23910	981.00	267.90	63.99	4.187	1.000	4106.97	0.000440
65.00	101325	25008	980.45	272.09	64.99	4.187	1.000	4105.17	0.000434
66.00	101325	26148	979.90	276.28	65.99	4.188	1.000	4103.36	0.000428
67.00	101325	27332	979.34	280.46	66.99	4.188	1.000	4101.54	0.000422
68.00	101325	28561	978.78	284.65	67.99	4.189	1.000	4099.71	0.000416
69.00	101325	29837	978.21	288.84	68.99	4.189	1.001	4097.88	0.000410
70.00	101325	31161	977.63	293.03	69.99	4.190	1.001	4096.03	0.000404
71.00	101325	32533	977.05	297.22	70.99	4.190	1.001	4094.18	0.000399
72.00	101325	33957	976.47	301.41	71.99	4.191	1.001	4092.31	0.000394
73.00	101325	35433	975.88	305.60	72.99	4.192	1.001	4090.45	0.000388
74.00	101325	36963	975.28	309.79	73.99	4.192	1.001	4088.57	0.000383
75.00	101325	38548	974.68	313.99	74.99	4.193	1.001	4086.69	0.000378
76.00	101325	40190	974.08	318.18	76.00	4.194	1.002	4084.80	0.000373
77.00	101325	41890	973.46	322.37	77.00	4.194	1.002	4082.91	0.000369
78.00	101325	43650	972.85	326.57	78.00	4.195	1.002	4081.01	0.000364
79.00	101325	45473	972.23	330.76	79.00	4.196	1.002	4079.11	0.000359
80.00	101325	47359	971.60	334.96	80.00	4.196	1.002	4077.20	0.000355
81.00	101325	49310	970.97	339.16	81.01	4.197	1.002	4075.29	0.000351
82.00	101325	51328	970.33	343.35	82.01	4.198	1.003	4073.38	0.000346
83.00	101325	53415	969.69	347.55	83.01	4.199	1.003	4071.46	0.000342
84.00	101325	55572	969.04	351.75	84.01	4.200	1.003	4069.54	0.000338
85.00	101325	57803	968.39	355.95	85.02	4.200	1.003	4067.62	0.000334
86.00	101325	60107	967.73	360.15	86.02	4.201	1.003	4065.70	0.000330
87.00	101325	62488	967.07	364.35	87.02	4.202	1.004	4063.78	0.000326
88.00	101325	64947	966.41	368.56	88.03	4.203	1.004	4061.85	0.000322
89.00	101325	67486	965.74	372.76	89.03	4.204	1.004	4059.93	0.000319
90.00	101325	70108	965.06	376.96	90.04	4.205	1.004	4058.00	0.000315
91.00	101325	72814	964.38	381.17	91.04	4.206	1.005	4056.08	0.000311
92.00	101325	75607	963.70	385.38	92.05	4.207	1.005	4054.15	0.000308
93.00	101325	78488	963.01	389.58	93.05	4.208	1.005	4052.23	0.000304
94.00	101325	81460	962.31	393.79	94.06	4.209	1.005	4050.31	0.000301
95.00	101325	84525	961.62	398.00	95.06	4.210	1.006	4048.39	0.000298
96.00	101325	87685	960.91	402.21	96.07	4.211	1.006	4046.47	0.000295
97.00	101325	90943	960.20	406.42	97.07	4.212	1.006	4044.55	0.000291
98.00	101325	94301	959.49	410.64	98.08	4.213	1.006	4042.64	0.000288
99.00	101325	97760	958.78	414.85	99.09	4.214	1.007	4040.73	0.000285
100.00	101325	101325	958.05	419.06	100.09	4.216	1.007	4038.82	0.000282

Característica da densidade da água em função da temperatura:



Perguntas

- 14-1** Faz sentido afirmar que um corpo está duas vezes mais quente que outro?
- 14-2** Um estudante afirma que os termômetros são inúteis, porque sempre medem a sua própria temperatura. Como você responderia?
- 14-3** Que outras propriedades da matéria, além das mencionadas no texto, poderiam ser usadas como propriedades termométricas? Como poderiam ser usadas na construção de um termômetro?
- 14-4** Um termômetro é deixado ao sol. Que temperatura ele mede: a do ar, do sol ou do quê?
- 14-5** Alguns termômetros contêm um líquido vermelho ou azul, que é freqüentemente etanol. Que vantagens e desvantagens ele tem em comparação com o mercúrio?
- 14-6** Um termômetro semelhante ao da Fig. 14-1 a poderia ser feito com água como líquido? Que dificuldades tal termômetro apresentaria?
- 14-7** Qual a temperatura do vácuo?
- 14-8** Existe alguma razão particular para se construir uma escala de temperatura com números maiores, correspondendo a corpos mais quentes em vez do inverso?
- 14-9** Se um pino de latão for ligeiramente maior do que o orifício em um bloco de aço em que deve ser encaixado, você deve aquecer o pino e esfriar o bloco ou fazer ao contrário?
- 14-10** Quando um bloco com um buraco é aquecido, por que o material em volta do buraco não se dilata diminuindo o orifício?
- 14-11** Muitos motores de automóvel têm cilindros de aço e pistões de alumínio. Que tipo de problemas ocorreria se o motor ficasse quente demais?
- 14-12** Quando se abre uma torneira de água quente, o fluxo, freqüentemente, diminui gradualmente antes de se estabilizar. Por que isso acontece?
- 14-13** Dois corpos feitos do mesmo material têm as mesmas dimensões externas e a mesma aparência, mas um é oco e o outro é sólido. Quando eles forem aquecidos, a expansão volumétrica será diferente ou igual?
- 14-14** Um termostato para controlar sistemas de aquecimento ou refrigeração de casas frequentemente contém um elemento bimetalico que consiste em duas tiras de metais diferentes soldadas face a face. Quando a temperatura varia, esta tira composta dobra-se numa direção ou na outra. Por quê?
- 14-15** Por que às vezes se consegue soltar tampas metálicas rosqueadas, em recipientes de vidro, mergulhando-as em água quente?
- 14-16** A freqüência de oscilação de um pêndulo depende de seu comprimento. Um relógio de pêndulo poderia adiantar no calor e atrasar-se no frio ou o inverso? Pode-se desenhar um pêndulo, talvez usando dois metais diferentes, que não variem de comprimento com a temperatura?
- 14-17** Quando uma barra é resfriada, mas impedida de contrair-se, como na Seq. 14-6, aparece uma tensão térmica.

Nestas circunstâncias, a *espessura* da barra varia? Se assim for, como se poderia calcular a variação?

Problemas

- 14-1** A razão entre as pressões de um gás no ponto de fusão do chumbo e no ponto triplice da água, o gás sendo mantido a volume constante, é dado por 2,198 16. Qual a temperatura Kelvin do ponto de fusão do chumbo?
- 14-2** (a) Se você tiver uma febre de 104°F, nos EUA, deve-se preocupar com isso?
 (b) Qual é a temperatura normal do corpo humano na escala Fahrenheit?
 (c) O ponto normal de ebulição do oxigênio líquido é -182,97°C. Quanto o será nas escalas Kelvin e Rankine?
 (d) A que temperatura coincidem as escalas Fahrenheit e Celsius?
- 14-3** Se você viajasse para os Estados Unidos, há alguns anos, encontraria temperaturas medidas em escala Fahrenheit. Achar, na escala Celsius, as temperaturas correspondentes a:
 (a) um quarto frio (68°F);
 (b) um dia quente de verão (95°F);
 (c) um dia frio de inverno (5°F).
- 14-4** Numa experiência relativamente primitiva com um termômetro a gás em volume constante, a pressão no ponto triplice da água mediu $4,0 \cdot 10^4$ Pa e a pressão no ponto normal de ebulição $5,4 \cdot 10^4$ Pa. De acordo com esses dados, qual a temperatura do zero absoluto na escala Celsius?
- 14-5** Um termômetro a gás do tipo mostrado na Fig. 14-6 registrou uma pressão correspondente a 5 cm de mercúrio, quando em contato com a água no ponto triplice. Qual a pressão que ele indicará quando em contato com água no ponto normal de ebulição?
- 14-6** A resistência elétrica de alguns metais varia com a temperatura (medida por um termômetro a gás) aproximadamente, de acordo com a equação; $=R_0[l + \beta(T - T_0)]$, onde R_0 , é a resistência na temperatura T_0 . Para um dado metal, encontra-se $\beta = 0,004 \text{ K}^{-1}$.
 (a) Sendo a resistência a zero graus °C de 100 ohms, qual a resistência a 20°C?
 (b) A que temperatura a resistência é de 200 ohms?
- 14-7** O pêndulo de um relógio é feito de alumínio. Qual a variação fracional do seu comprimento, quando ele é resfriado, passando de 25°C para 10°C?
- 14-8** Uma trena de aço de 25 m está correia à temperatura de 20°C. A distância entre dois pontos, medida com a trena num dia em que a temperatura é de 35°C, é de 21,64 m. Qual a distância real entre os dois pontos?

14-9 Para assegurar um bom ajuste, os arrebites de alumínio usados em construção de aeroplanos são feitos ligeiramente maiores que os orifícios correspondentes e resfriados com gelo seco (CO₂, sólido) antes de serem colocados. Se o diâmetro do orifício for de 0,250 O pol, qual deverá ser o diâmetro de um arrebite a 20°C, se o seu diâmetro deve ser igual ao do orifício, quando o arrebite for resfriado a - 78°C, temperatura do gelo seco? Supor que o coeficiente de dilatação seja constante e igual ao valor dado no Probl. 14-1.

14-10 Um anel de aço de 3 000 pol de diâmetro interno a 20°C deve ser aquecido e encaixado num cilindro de latão com 3,002 pol de diâmetro a 20°C. (a) A que temperatura deverá ser aquecido?

(b) Se o anel e o cilindro forem resfriados juntos por algum meio, como, por exemplo, ar líquido, a que temperatura o anel sairá do cilindro?

14-11 Uma barra de metal de 30,0 cm de comprimento sofre uma dilatação de 0,075 cm, quando sua temperatura sobe de 0°C para 100°C. Outra barra de um metal deferente, de mesmo comprimento, dilata-se 0,045 cm, sob as mesmas condições. Uma terceira, também de 30,0 cm de comprimento é feita de dois pedaços dos metais acima, colocados em linha, e se expande 0,065 cm entre 0°C e 100°C. Achar o comprimento de cada parte da barra composta.

14-12 Perfura-se um buraco de 2,500 cm de diâmetro numa placa de latão, à temperatura de 20°C. Qual será o diâmetro do buraco quando se eleva a temperatura da placa para 200°C? Supor que o coeficiente de dilatação permaneça constante.

14-13 Supor que se possa construir um aro de aço em torno do equador da Terra, ajustando-o à temperatura de 20°C. Qual seria a distância radial entre o aro e a Terra se a temperatura do aro sofresse um aumento de 1°C?

14-14 Um relógio cujo pêndulo faz uma oscilação em 2 s está correio a 25°C. A haste do pêndulo é de aço e sua massa pode ser desprezada,

(a) Qual a variação fracional no comprimento da haste se ela for esfriada para 15°C?

(b) Quantos segundos por dia o relógio ganhará ou perderá a 15°C? (. Sugestão. Usar diferenciais.)

14-15 Um relógio de pêndulo com haste de latão trabalha corretamente a uma certa temperatura, (a) Qual deve ser o intervalo de temperatura em que o relógio pode ser mantido para que não ganhe ou perca mais que 1 s por dia? A resposta depende do período do pêndulo? (b) Aumento de temperatura fará o relógio adiantar ou atrasar?

14-16 Um termômetro semelhante ao da Fig. 14-1a tem ura bulbo esférico de 0,2 cm de raio e um tubo capilar de 0,05 mm de raio. Que distância na escala é coberta pelo intervalo de temperaturas entre 0°C e 100°C?

14-17 Enche-se completamente com água a 50°C uma garrafa de 250 cm³. Aquece-se a garrafa e a água até 60°C. Que quantidade de água extravasara se:

(a) a dilatação da garrafa for desprezada;

(b) a dilatação da garrafa for incluída? Usar ($\beta = 1,2 \cdot 10^{-5} (\text{°C})^{-1}$ para o vidro.

14-18 Mede-se uma área na superfície de um corpo sólido. Se a área for A_0 , numa dada temperatura inicial e, então, houver uma variação de ΔA , quando a temperatura variar de ΔT , mostrar que:

$$\Delta A = 2\alpha(A_0) \Delta T.$$

14-19 Um cubo de alumínio, de 10 cm de lado, é aquecido de 10°C a 30°C. Qual a variação de seu volume? E da sua densidade?

14-20 Uma bola de latão de 6 cm de raio é esfriada de 100°C a 20°C. Achar a variação de seu volume: (a) primeiramente encontrando a variação no raio e, em seguida, calculando o novo volume;

(b) usando o coeficiente de dilatação volumétrica.

14-21 Enche-se um frasco de vidro de volume exatamente igual a 1 000 cm³ a 0°C, com mercúrio a esta temperatura. Quando o frasco e o mercúrio são aquecidos a 100°C, 15,2 cm³ de mercúrio transbordam. Sendo o coeficiente de dilatação volumétrica do mercúrio 0,000 182 por grau centígrado, calcular o coeficiente de dilatação linear do frasco.

14-22 À temperatura de 20°C, o volume de um certo frasco de vidro, até uma marca de referência no gargalo, é de 100 cm³. Enche-se o frasco até essa marca com um líquido de $\beta = 120 \cdot 10^{-5} (\text{°C})^{-1}$, estando tanto o líquido como o frasco a 20°C. O coeficiente de dilatação linear, α , do vidro é $8 \cdot 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$. A área da seção transversal do gargalo é de 1 mm² e pode ser considerada constante. A que altura o líquido subirá ou descera no gargalo quando a temperatura sobe para 40°C?

14-23 A pressão p , o volume V , o número de moles n e T temperatura Kelvin de um gás perfeito estão relacionados pela equação $pV = nRT$. Provar que o coeficiente de expansão volumétrica é igual ao recíproco da temperatura.

14-24 O comprimento de uma certa ponte é de 600 m. (a) Se fosse um vão contínuo, tendo uma extremidade fixa e outra livre, qual seria a variação do movimento da ponta livre, entre um dia frio de inverno (-20°F) e outro quente de verão (100°F)? (b) Se ambas as extremidades fossem rigidamente fixadas naquele dia de verão, qual seria a tensão no dia de inverno?

14-25 A seção transversal de uma barra de aço é de 10 cm². Qual deve ser a força mínima que evitará a contração da barra quando esfriada de 520°C para 20°C?

14-26 Verifica-se que um arame de aço, de 3 m de comprimento a 20°C, dilata-se 2 cm quando esquentado a 520°C.

(a) Calcular seu coeficiente médio de dilatação linear.

(b) Achar a tensão no arame se ele for esticado, tenso, a 520°C e, então, esfriado para 20°C, sem se permitir sua contração.

14-27 Duas barras de mesmo diâmetro, uma de aço de 40 cm de comprimento e a outra de cobre de 36 cm, estão presas entre si por dois suportes rígidos, sem tensões iniciais. Eleva-se de 50°C a temperatura das barras e pergunta-se qual a tensão em cada uma delas.

14-28 Uma barra pesada de latão tem suas extremidades em forma de T. Dois arames finos de aço, ligados às "pernas" do T estão esticados sem tração quando o sistema inteiro está a 0°C. Qual a tensão de tração nos arames, quando se eleva a temperatura do sistema para 300°C? Levantar quaisquer hipóteses simplificadoras que acharem razoáveis e mencioná-las.

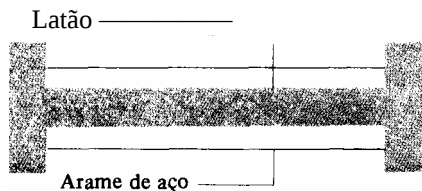


Fig. 14-9

14-29 Trilhos de aço de 18 m de comprimento são instalados num dia de inverno em que a temperatura é de 12°C.

(a) Que espaço deverá ser deixado entre eles, se devem tocar-se num dia de verão em que a temperatura seja de 40°C?

(b) Se os trilhos tivessem sido postos inicialmente em contato, qual seria a tensão sobre eles no dia de verão?

14-30 Provar que, se um corpo sob pressão hidrostática tiver sua temperatura elevada e impedida sua dilatação, sofrerá um aumento de pressão dado por:

$$\Delta p = B \beta \Delta t,$$

Onde o módulo volumétrico B e o coeficiente médio de dilatação (β são considerados positivos e constantes).

14-31 (a) Um bloco de metal a pressão de 1 atm e a temperatura de 20°C é mantido a volume constante. Se a temperatura aumentar para 32°C, qual será a pressão final? (b) Se o bloco for mantido em volume constante por meio de paredes rígidas, que podem suportar uma pressão máxima de 1 200 atm, qual a máxima temperatura que o sistema poderá ter? Supor que B e β permaneçam praticamente constantes, com valores $1,5 \cdot 10^{11}$ Pa e $5,0 \cdot 10^{-5} (\text{°C})^{-1}$, respectivamente.

14-32 Que pressão hidrostática será necessária para evitar a expansão de um bloco de cobre, quando sua temperatura é aumentada de 20°C para 30°C?

14-33 A Tab. 14-3 registra a densidade da água e o volume de 1 g à pressão atmosférica. Enche-se uma bomba de aço, com água, a 10°C e sob pressão atmosférica, aumentando depois a temperatura do sistema para 75°C. Qual será, então, a pressão na bomba? Supor que ela seja suficientemente rígida para evitar que seu volume seja afetado pelo aumento de pressão.

14-34 Encerra-se um líquido em um cilindro metálico provido de pistão do mesmo metal. O sistema está inicialmente sob pressão atmosférica e à temperatura de 80°C. Força-se o pistão para baixo até que a pressão sobre o líquido seja

aumentada de 100 atm, prendendo-o, então, nessa posição. Determinar a nova temperatura sob a qual a pressão do líquido seja novamente de 1 atm. Supor que o cilindro seja suficientemente forte para evitar que seu volume seja alterado por mudanças de pressão, mas que o possa por variações de temperatura.

Compressibilidade do líquido

$$\kappa = 50 \times 10^{-6} \text{ atm}^{-1}.$$

Coeficiente de dilatação cúbica do líquido

$$\beta = 5,3 \cdot 10^{-4} (\text{°C})^{-1}.$$

Coeficiente de dilatação linear do metal.

$$\alpha = 10 \cdot 10^{-6} (\text{°C})^{-1}.$$

14-35 (a) Para um material qualquer, a densidade ρ , a massa m e o volume V estão relacionados por $\rho = m/V$. Provar que

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}$$

(b) A densidade do sal-gema entre -193°C e -13°C é dada pela fórmula empírica

$$\rho = 2,1680(1 - 11,2 \times 10^{-5} T - 0,5 \times 10^{-7} T^2), \text{ com}$$

T medido na escala Celsius. Calcular β a -100°C.

Perguntas

15-1 Supor uma garrafa térmica cheia até a metade de café frio. Você poderá aquecê-lo até a temperatura em que ele é bebido, sacudindo-o? Isto é possível *em princípio*? É praticamente possível? Você estará fornecendo calor ao café?

15-2 Quando o óleo de uma transmissão automática é sacudido pelas lâminas da turbina, ele se aquece e, normalmente, é necessário um circuito de refrigeração. É o motor que fornece calor ao óleo?

15-3 Um estudante propôs que uma possível unidade de calor específico seria $\text{l m}^2 \cdot \text{s}^2 (\text{°C})^{-1}$. É uma proposição correta?

15-4 O calor específico da água tem o mesmo valor numérico quando se expressa em $\text{cal} \cdot \text{g}^{-1} (\text{°C})^{-1}$ e em $\text{Btu} \cdot \text{lb}^{-1} (\text{°F})^{-1}$. Isto seria uma coincidência? Esta mesma relação vale para os calores específicos de outros materiais?

15-5 Um estudante argumentou que, quando o calor de dois corpos que não estão em equilíbrio térmico são postos em contato, o aumento de temperatura do mais frio tem sempre de igualar a diminuição da temperatura do mais quente. Você concorda com isso? Existe algum princípio da conservação de temperatura ou algo parecido?

15-6 Na escolha de um líquido para circular num motor a gasolina para resfriá-lo (tal como a água), você escolheria um material com grande ou com pequeno calor específico? Por quê? Que outras condições são importantes?

15-7 Qualquer calor latente tem um valor numérico em $\text{cal}^\circ\text{g}^{-1}$ igual a 9/5 do seu valor numérico em $\text{Btu} \cdot \text{lb}^{-1}$. Por que a conversão é tão simples?

15-8 Por que você pensa que o calor de vaporização da água é tão maior do que o de fusão?

15-9 Alguns aparelhos de ar condicionado usados em climas secos esfriam o ar soprando-o através de um filtro umidecido com água, evaporando parte dela. Como funciona este aparelho? Este sistema funcionaria em clima de alta umidade no ar?

15-10 Por que a panela de pressão cozinha mais rápida do que a água fervendo em panela aberta?

15-11 Como o corpo humano mantém a temperatura de 37°C no deserto, onde a temperatura é de 50°C ?

15-12 Viajantes no deserto às vezes levam água em uma bolsa de camurça. Parte da água vaza através do couro e evapora-se. Como isto esfria a água dentro da bolsa?

15-13 Quando se coloca água na bandeja de gelo do congelador, por que a água não congela toda de uma vez quando a temperatura atinge 0°C ? Na realidade, ela se congela primeiro numa camada adjacente aos lados da forma. Por quê?

15-14 Quando um motor de automóvel é superaquecido e a água do radiador ferve, o carro ainda pode seguir um pouco antes de ocorrer um estrago catastrófico. Por quê? O que determina o início do superaquecimento realmente desastroso?

15-15 Por que os fabricantes de automóveis, nos países frios, recomendam uma solução anticongelante para o radiador tanto no verão como no inverno?

15-16 Quando você sai do banho, sente frio, mas tão logo esteja seco sente-se mais quente, mesmo que a temperatura ambiente seja a mesma. Por quê?

15-17 Suponha que o calor da fusão do gelo fosse de apenas $10 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ em vez de $334 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$. Isto mudaria o modo de se preparar chá gelado, martini ou limonada?

15-18 Por que o clima das regiões próximas a grandes massas de água são normalmente mais moderados do que os das regiões longe dessas massas?

Problemas

15-1 Realiza-se uma experiência de combustão, queimam-se uma mistura de óleo e oxigênio, a volume constante, numa "bomba" envolvida por um banho de água. Observa-se que a temperatura da água se eleva durante a experiência. Considerando a mistura como um sistema:

(a) houve transferência de calor?

(b) houve realização de trabalho?

15-2 Agita-se irregularmente um líquido em um vaso bem isolado, elevando-se, assim, sua temperatura. Tomando o líquido como o sistema: (a) houve transferência de calor?

(b) houve realização de trabalho?

15-3 Um automóvel pesando 1500 kgf locomove-se a $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Quantos joules são transferidos no sistema de freio quando o automóvel é levado ao repouso?

15-4 Um vaso de cobre de 200 g de massa contém 400 g de água. Esta é aquecida por atrito, através de um dispositivo que dissipa energia mecânica e se observa que a temperatura do sistema se eleva com a taxa de $3^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$. Desprezar a perda de calor para o meio ambiente. Que potência em watts é dissipada na água?

15-5 Por quanto tempo poder-se-ia operar um motor de 2000 hp , baseado na energia caloriífica liberada por 5 km^3 de água do mar, quando a temperatura da água baixa de 1°C , supondo-se que todo esse calor fosse convertido em energia mecânica? Por que não se utiliza esse enorme reservatório de energia?

15-6 (a) Em uma certa casa, queimam-se 10 t de carvão durante a estação de frio. O calor de combustão do carvão é de $6000 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$. Se as perdas fossem de 15% , quantas calorias foram realmente usadas para aquecer a casa?

(b) Em alguns lugares aquecem-se grandes tanques de água por meio de radiação solar, durante o verão, a energia armazenada sendo usada para aquecimento no inverno. Determinar as dimensões requeridas para o tanque de armazenamento, supondo-o cúbico, para guardar uma quantidade de energia igual à calculada na parte (a). Supor que a temperatura da água suba a 50°C no verão e desça para 25°C no inverno.

15-7 Um satélite artificial de alumínio circula a Terra com uma velocidade de $29000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,

(a) Determinar a razão entre sua energia cinética e a energia necessária para elevar sua temperatura de 600°C . (O ponto de fusão do alumínio é 660°C .) Supor constante o calor específico, igual a $0,2 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot (^\circ\text{C})^{-1}$.

(b) Discutir qualquer relação entre sua resposta e a reentrada de um satélite na atmosfera terrestre.

15-8 Um calorímetro contém 100 g de água a 0°C . Colocam-se no calorímetro dois cilindros de 1000 g cada, um de cobre e outro de chumbo, ambos a 100°C . Achar a temperatura final se não houver perda de calor para o meio ambiente.

15-9 (a) Comparar as capacidades caloríficas (isto é, calor por unidade de variação de temperatura) de massas iguais de água, cobre e chumbo,

(b) Comparar as capacidades caloríficas de volumes iguais de água, cobre e chumbo.

15-10 Uma panela de alumínio de 500 g de massa contém $117,5 \text{ g}$ de água a temperatura de 20°C . Coloca-se na panela um bloco de ferro de 200 g a 75°C . Achar as temperaturas finais, supondo que não haja perda de calor para o meio ambiente.

15-11 Tira-se de uma fornalha uma peça fundida pesando 50 kgf , quando a temperatura era de 400°C , sendo colocada num tanque contendo 400 kg de óleo a 30°C . A temperatura final é de 40°C e o calor específico do óleo, $0,5 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot (^\circ\text{C})^{-1}$. Qual o calor

específico da peça fundida? Desprezar a capacidade calorífica do tanque e quaisquer perdas de calor.

15-12 Um projétil de chumbo, propagando-se a $350 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, atinge um alvo, sendo levado ao repouso. Qual seria o aumento de temperatura do projétil se não houvesse perda de calor para o meio ambiente?

15-13 Um calorímetro de cobre de 300 g de massa contém 500 g de água a temperatura de 15°C . Coloca-se um bloco de 560 g de cobre, a 100°C , no calorímetro, e verifica-se que sua temperatura aumenta para $22,5^\circ\text{C}$. Desprezar per-0,54 hp.

(a) Qual a eficiência do motor? (Isto é, que fração de energia elétrica é convertida em energia mecânica?).

(b) Quantas calorias são geradas no motor numa hora de operação, admitindo-se que a energia elétrica que não se converteu em mecânica foi convertida em calor?

Desprezar perdas de calor para o meio ambiente. Achar o calor específico do cobre.

15-14 Coloca-se uma amostra de 50 g de uma substância, a temperatura de 100°C , num calorímetro contendo 200 g de água, inicialmente a 20°C . O calorímetro é de cobre e sua massa de 100 g. Sua temperatura final é de 22°C . Calcular o calor específico da amostra.

15-15 Mostra-se na Fig. 15-6 um aquecedor elétrico, cujo propósito é prover um suprimento contínuo de água quente. A água escoa na proporção de 300 gmin^{-1} , o termômetro de entrada registra 15°C , o voltímetro lê 120 V e o amperímetro, 10 A .

(a) Quando finalmente se alcança um estado estacionário, qual a leitura do termômetro de saída? (b) Por que é desnecessário levar em consideração a capacidade calorífica (mc ou nC) do aparelho?

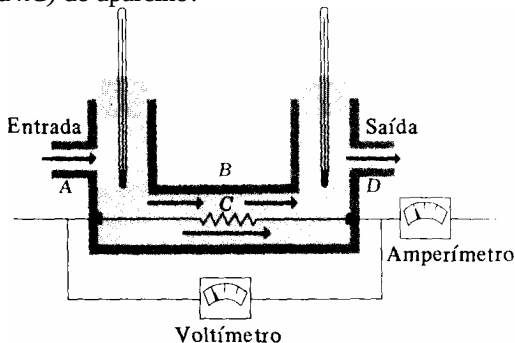


Fig. 15-6

15-16 A capacidade calorífica molar de uma substância, a pressão constante, varia com a temperatura de acordo com a equação empírica

$$C = 6,50 \text{ cal} \cdot \text{mol}^{-1} (\text{K})^{-1} + 10^{-3} \text{ cal} \cdot \text{mol}^{-1} \text{K}^{-2} \cdot T.$$

Quantas calorias são necessárias para mudar a temperatura de 10 moles de 27°C para 527°C ?

15-17 A temperaturas muito baixas, a capacidade calorífica molar do sal-gema varia com a temperatura de acordo com a "lei T^3 de Debye"; assim,

$$C = \kappa \frac{T^3}{\Theta^3}$$

onde: $\kappa = 1940 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ e $\Theta = 281 \text{ K}$.

(a) Que quantidade de calor é necessária para elevar a temperatura de 10 K para 50 K , de 2 moles de sal-gema?

(b) Qual a capacidade calorífica molar média nesse intervalo?

(c) Qual a verdadeira capacidade calorífica molar a 50 K ?

15-18 Um motor de automóvel cuja potência é de 40 HP usa 18 litros de gasolina por hora. O calor de combustão é de $3 \times 10^7 \text{ J}$ por litro. Qual a eficiência do motor, isto é, que fração do calor de combustão é convertida em trabalho mecânico?

15-19 A potência elétrica fornecida a um motor elétrico é de $0,5 \text{ kW}$ e a potência mecânica fornecida por ele é de

temperatura final do sistema, supondo que não haja perdas de calor.

15-20 A evaporação do suor é um mecanismo importante no controle da temperatura em animais de sangue quente. Que massa de água deverá evaporar-se da superfície de um corpo humano de 80 kg para resfriá-lo 1°C ? O calor específico do corpo humano é aproximadamente $1 \text{ cal g}^{-1} \cdot (\text{C})^{-1}$ e o calor latente de vaporização da água na temperatura do corpo (37°C) é de $577 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1}$.

15-21 Se a alimentação de uma pessoa, corresponder à energia de 2 400 calorias por dia e se toda esta energia for convertida em calor, qual a taxa média de energia liberada em watts? Quantas pessoas em um quarto, liberando esta taxa de calor, seriam necessárias para liberar a mesma energia que um aquecedor elétrico de 1500 W ?

15-22 Um pedaço de gelo a 0°C sai do repouso, caindo em um lago a 0°C , e meio por cento de gelo derrete. Calcular a altura mínima de onde caiu o gelo.

15-23 Qual deverá ser a velocidade inicial de uma bala de chumbo à temperatura de 25°C para que o calor liberado pelo choque que a imobiliza seja suficiente para derretê-la?

15-24 A Fig. 15-7 mostra o esquema de um calorímetro de fluxo contínuo, usado para medir o calor de combustão de um combustível gasoso. Fornece-se água na proporção de $5,6 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ e gás a $0,56 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. No regime estacionário, os termômetros de entrada e saída registram 15°C e 25°C , respectivamente. Qual o calor de combustão do gás natural em kcal l^{-1} ? Por que se deve fazer o fluxo de gás tão pequeno quanto possível?

15-25 Um resistor elétrico é imerso num líquido e a energia elétrica é dissipada por 100 s à taxa constante de 50 W . A massa do líquido é de 530 g e sua temperatura aumenta de $17,64^\circ\text{C}$ até $20,77^\circ\text{C}$. Achar o calor específico médio do líquido nesta faixa de temperatura.

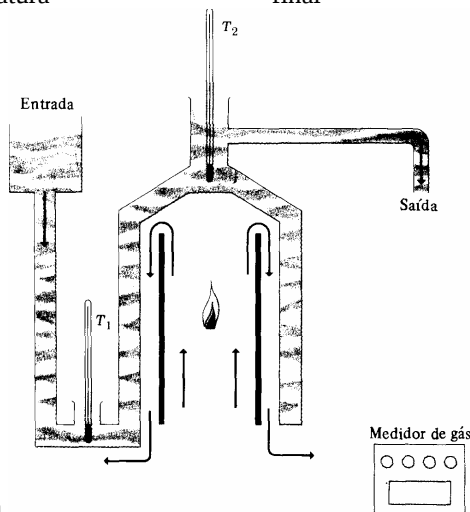
15-26 Que quantidade de calor é necessária para converter 1 g de gelo a -10°C em vapor a 100°C ?

15-27 Um bquer de massa muito pequena contém 500 g de água à temperatura de 80°C. Quantos gramas de gelo à temperatura de -20°C devem ser colocados na água para que a temperatura final do sistema seja de 50°C?

15-28 A um vaso aberto, de massa desprezível, contendo 500 g de gelo a -20°C, fornece-se calor com a taxa constante de 100 cal • min⁻¹, durante 100 min. Desenhar uma curva em que o tempo gasto seja a abscissa e a temperatura, a ordenada.

15-29 Um calorímetro de cobre de 100 g de massa contém 150 g de água e 8 g de gelo, em equilíbrio térmico a pressão atmosférica. Colocam-se no calorímetro 100 g de chumbo à temperatura de 200°C. Achar a temperatura final se não houver perda de calor para o meio ambiente.

15-30 Colocam-se 500 g de gelo a -16°C em um calorímetro contendo 1 000 g de água a 20°C. O vaso do calorímetro é de cobre e tem uma massa de 278g .Calcular a temperatura final do



sistema.

15-31 Um tubo liga um calorímetro a um frasco contendo água em fervura, sob pressão atmosférica. O calorímetro tem massa de 150 g, capacidade calorífica de 0,1 cal • g⁻¹ e contém, inicialmente, 340 g de água a 15°C. Permite-se condensar o vapor no calorímetro até que a temperatura deste aumente para 71°C, depois do que a massa total do conteúdo e do calorímetro passa a ser de 525 g. Calcular o calor de condensação do vapor.

15-32 Um cantil de alumínio, de 500 g de massa, contém 750g de água e 100 g de gelo. Ele cai de um avião e, depois de atingir o solo, verifica-se que sua temperatura é de 25°C. Supondo que não cedeu energia ao solo durante o impacto, qual era a velocidade do cantil no momento em que atingiu o solo?

15-33 Um calorímetro contém 500 g de água e 300 g de gelo, todos à temperatura de 0°C. Tira-se de uma fornalha um bloco de metal de 1 000 g de massa a 240°C, colocando-o rapidamente no calorímetro. Como resultado, todo o gelo se derrete. Qual seria a temperatura final do sistema se a massa do bloco fosse duas vezes maior? Desprezar a perda

de calor do calorímetro, assim como sua capacidade calorífica.

15-34 Um cubo de gelo de 50 g de massa é retirado de um congelador, onde sua temperatura era de -10°C, e colocado em um copo de água a 0°C. Se não houver trocas de calor com o meio ambiente, que quantidade de água se congelará sobre o cubo?

15-35 O vaso de um calorímetro de cobre ($m_c = 30 \text{ cal} \cdot \text{grau}^{-1}$) contém 50 g de gelo, estando o sistema inicialmente a 0°C. Admite-se no calorímetro 12 g de vapor a 100°C e a 1 atm de pressão. Qual a temperatura final do calorímetro e de seu conteúdo?

15-36 Um vaso, cujas paredes são termicamente isoladas, contém 2 100 g de água e 200 g de gelo, tudo à temperatura de 0°C. O tubo de saída de um aquecedor, onde a água ferve sob pressão atmosférica, é inserido na água do vaso. Quantos

gramas de vapor devem ser condensados para elevar a temperatura do sistema para 20°C? Desprezar a capacidade calorífica do vaso.

15-37 Tira-se de um forno um bloco de ferro de 2 kg, quando sua temperatura era de 650°C, colocando-o sobre um grande bloco de gelo a 0°C. Supondo-se que todo o calor perdido pelo ferro seja usado para derreter o gelo, qual a quantidade de gelo derretido?

15-38 Num sistema de aquecimento doméstico, a água quente, fornece-se água a 60°C aos radiadores, que os abandona a 40°C. O sistema deve ser substituído por outro de vapor, no qual o vapor à pressão atmosférica condensa nos radiadores, o vapor condensado saindo destes a 80°C. Quantos quilogramas de vapor fornecerão a mesma quantidade de calor fornecida por 1 kg de água quente da primeira instalação?

15-39 Uma "casa solar" tem possibilidade de armazenar 1 milhão de kcal. Compare os espaços necessários para esse armazenamento, nas duas hipóteses seguintes: (a) o calor é armazenado em água, aquecida de uma temperatura mínima de 25°C para a máxima de 50°C; (b) o armazenamento se dá no sal-de-glauber ($\text{Na}_2 \cdot \text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2 \text{O}$) aquecido no mesmo intervalo.

Propriedades do sal-de-glauber

Calor específico (sólido) 0,46 kcal•kg⁻¹ • (°C)⁻¹

Calor específico (líquido) 0,68 kcal•kg⁻¹ • (°C)⁻¹

Densidade ... 1,6 g • cm⁻³.

Ponto de fusão .. 32°C.

Calor de fusão . 58 kcal. kg⁻¹

15-40 O valor nominal da energia da manteiga de amendoim é aproximadamente de 6 kcal • g⁻¹. Se toda esta energia pudesse ser convertida completamente em energia mecânica, que quantidade de manteiga seria necessária para sustentar um montanhista de 80 kg numa caminhada da base da montanha, numa altitude de 800 m, até o cume a 2 707 m? (Aproximadamente de Itatiaia ao cume das Agulhas Negras.).

15-41 A capacidade de condicionadores de ar é tipicamente expressa em Btu • h⁻¹ ou toneladas, sendo

este o número de toneladas de gelo que o aparelho pode congelar a partir da água a 0°C , em 24 horas, (a) Qual a taxa, em Btu h^{-1} , para um condicionador de uma tonelada? (b) Expressar a capacidade do condicionador de ar de uma tonelada em watts.

15-42 Um condicionador de ar de $6\,000\text{ Btu} \cdot \text{h}^{-1}$ consome aproximadamente 800 W de potência elétrica. Qual a razão entre a taxa de remoção de calor e a de consumo de energia elétrica? Expresse ambas as taxas na mesma unidade para obter um número adimensional.

15-43 Supor que um litro de gasolina alimente um automóvel ao longo de 10 km . A densidade da gasolina é de $0,7\text{ g cm}^{-3}$ e o seu calor de combustão, $4,6 \cdot 10^4\text{ Jg}^{-1}$.

(a) Se a eficiência do motor for de 25% , isto é, um quarto do calor de combustão for convertido em energia mecânica útil, qual o trabalho total que faz o motor durante o percurso de 10 km ?

(b) Se este trabalho for supostamente realizado para se opor a uma força constante F , achar o módulo desta força.

Apêndice I -

✚ Instalação Simples de uma Central Termoelétrica

Adaptado do livro:

Van Wylen, Sonntag, Borgnakke, *Fundamentos da Termodinâmica*, 6ª Edição, Edgard Blücher Ltda, 2003.

A Figura A mostra o esquema de uma central termoelétrica instalada recentemente. Observe que vapor superaquecido e a alta pressão deixa o tambor da caldeira, que também é chamada de gerador de vapor, e entra na turbina. O vapor expande na turbina e, realiza trabalho, o que possibilita à turbina acionar o gerador elétrico. O vapor a baixa pressão deixa a turbina e entra no trocador de calor, onde ocorre a transferência de calor do vapor (condensando-o) para a água de refrigeração. Como é necessária uma grande disponibilidade de água de refrigeração, as centrais termoelétricas são frequentemente instaladas perto de rios ou lagos. Um dos efeitos nocivos dessa transferência de calor é a poluição térmica do meio ambiente. A água de resfriamento também pode ser resfriada em grandes torres de resfriamento onde o rebaixamento da temperatura da água de resfriamento é alcançado a custa da evaporação de uma parte desta água. A água de resfriamento do condensador presente na central indicada na Figura A é utilizada para aquecer ambientes localizados na região vizinha à central termoelétrica.

A pressão do condensado, na seção de descarga do condensador, é aumentada na bomba, permitindo que o condensado escoe para o gerador de vapor. Os economizadores ou pré-aquecedores de água, são muito utilizados nos ciclos de potência a vapor. O ar utilizado na combustão também é pré-aquecido em muitas centrais termoelétricas. Esse pré-aquecimento é obtido através da transferência de calor dos gases de combustão para o ar. Os produtos de combustão também precisam ser limpos antes

de serem descarregados na atmosfera. É importante observar que existem vários equipamentos e processos bastante complicados na central de potência apesar de seu ciclo térmico ser simples.

A figura B é uma fotografia da central esboçada na figura A. O prédio alto, mostrado na parte esquerda da figura, é a casa das caldeiras. Perto dela estão posicionados os prédios que abrigam a turbina e outros componentes da central. A figura também mostra a chaminé acoplada a caldeira que é bastante alta, e o navio que transporta o carvão que é consumido na caldeira. Esta central de potência está localizada na Dinamarca, apresenta potência térmica de 850 MW (baseada no consumo e na energia disponível no carvão combustível) e atingiu o rendimento térmico recorde de quarenta e cinco por cento na sua posta em marcha, ou seja, a operação da central proporcionou que quarenta e cinco por cento da energia disponível no carvão fosse convertida em trabalho. O aquecimento dos ambientes localizados ao redor da usina consome quarenta e sete por cento da potência térmica da central. É importante frisar que o calor transferido nos condensadores da maioria das centrais de potência é simplesmente rejeitado no ambiente e que este processo não nos traz nenhum benefício.

A central termoelétrica descrita anteriormente utilizava carvão mineral como combustível. O gás natural, os óleos combustíveis e as biomassas também são utilizados como combustível em centrais termoelétricas.

Algumas outras centrais termoelétricas no mundo operam a partir do calor gerado pelas reações nucleares em vez da oxidação de combustíveis. A figura C mostra o esquema de uma instalação propulsora naval baseada na utilização de um reator nuclear. Um fluido secundário escoa pelo reator absorvendo o calor gerado pelas reações nucleares que ocorrem no equipamento, e é encaminhado para o gerador de vapor onde ocorre a transferência de calor do fluido secundário para a água. Observe que a água é vaporizada no gerador de vapor e que percorre um ciclo de vapor convencional. Nesta aplicação, a água de resfriamento do condensador é obtida no mar. É importante notar que a água de resfriamento volta ao mar apresentando uma temperatura superior àquela na seção de alimentação do condensador.

✚ Célula Combustível

Quando uma usina termoelétrica convencional é considerada globalmente, verificamos que o combustível e o ar entram na mesma e os produtos da combustão deixam a unidade. Há também uma transferência de calor para a água de refrigeração e produzido trabalho na forma de energia elétrica. O objetivo global da unidade é converter a disponibilidade

(para produzir trabalho) do combustível em trabalho (na forma de energia elétrica) da maneira mais eficiente possível mas levando em consideração os custos envolvidos o espaço necessário para a operação da usina, sua segurança operacional e também o impacto provocado pela construção e operação da usina no meio ambiente.

Poderíamos perguntar se são necessários todos os equipamentos da usina: tais como: o gerador de vapor, a turbina, o condensador e a bomba: para a produção de energia elétrica. Não seria possível produzir energia elétrica a partir do combustível de uma forma mais direta?

A célula de combustível é um dispositivo no qual esse objetivo é alcançado.

A figura D mostra o esquema da célula de uma célula de combustível do tipo membrana de troca de íons. Nessa célula, o hidrogênio e o oxigênio reagem para formar água. Consideremos, então os aspectos gerais da operação deste tipo de célula.

O fluxo de elétrons no circuito externo é do anodo para o catodo. O hidrogênio entra pelo lado do anodo e o oxigênio entra pelo lado do catodo. O hidrogênio é ionizado na superfície da membrana de troca de íons o modo indicado na Figura D.

Figura A - Esquema de usina termoeletrica

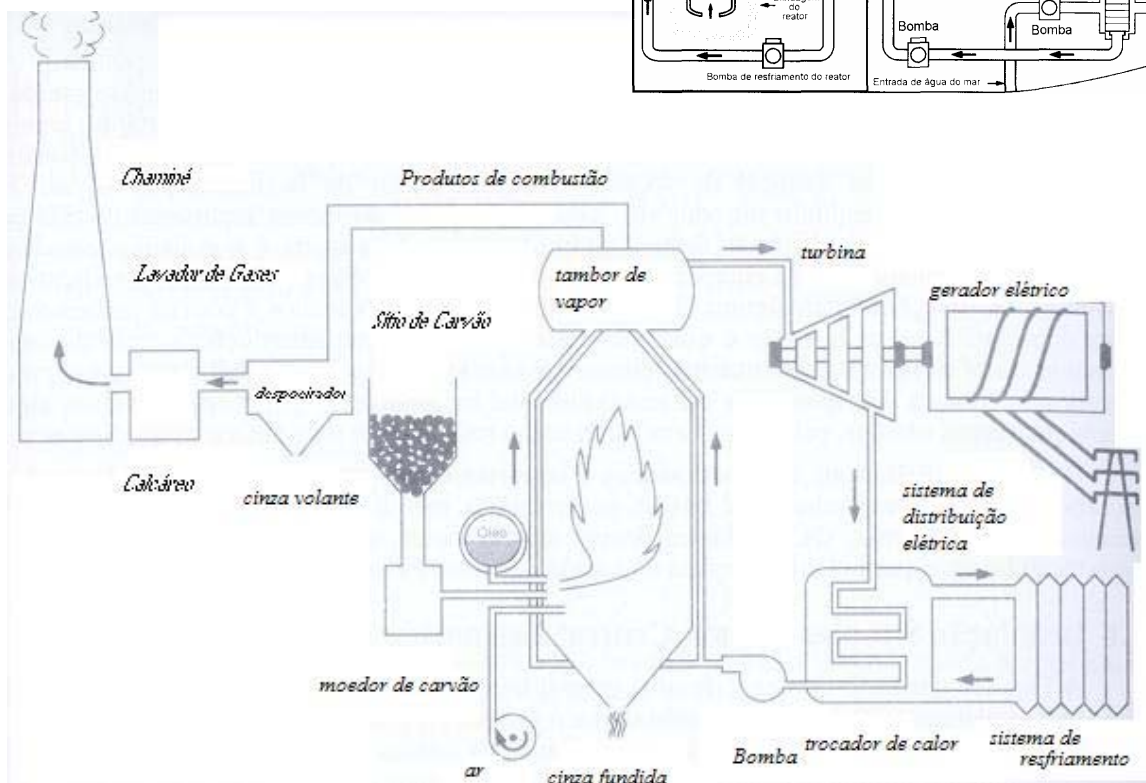
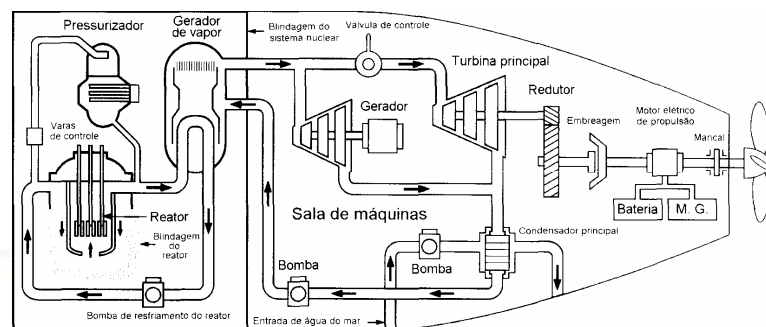


Figura B - Central termoeletrica Esbjerg.



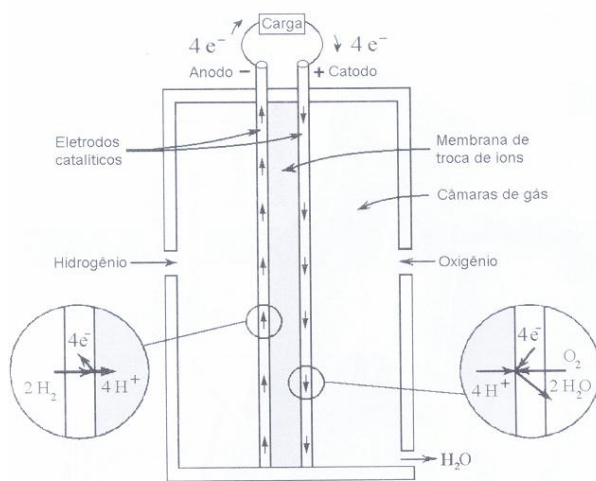
Figura C - Sistema nuclear de propulsão naval.



Os elétrons fluem através do circuito externo e os íons do hidrogênio fluem através da membrana para

o catodo, onde ocorre a formação de água. Há uma diferença de potencial entre o catodo e o anodo, resultando daí um fluxo elétrico que, em termos termodinâmicos, é considerado como trabalho. É possível que também ocorra uma transferência de calor da célula combustível para o meio.

Figura D - Esquema de uma célula combustível do tipo membrana.



Atualmente o combustível mais utilizado em células combustíveis é o hidrogênio, ou uma mistura gasosa de hidrocarbonetos e hidrogênio, e o oxidante normalmente é o oxigênio. Entretanto, as pesquisas atuais estão dirigidas para o desenvolvimento de células combustíveis que utilizem hidrocarbonetos e ar. Embora as instalações a vapores convencionais ou nucleares ainda sejam largamente empregadas em centrais termoelétricas, e motores convencionais de combustão interna e turbinas a gás como sistemas propulsores de meios de transporte, a célula combustível poderá se tornar uma série mais competitiva.