

## LEI ZERO DA TERMODINÂMICA

### METAS

Iniciar o estudo da termodinâmica através de sua lei zero. Estudar os diversos tipos de termômetros e escalas termométricas. Aprender a manipular as leis que regem a variação volumétrica com a temperatura para sólidos, líquidos e gases.

### OBJETIVOS

Ao final desta aula, o aluno deverá:

relacionar conceitos de equilíbrio térmico com a Lei Zero da Termodinâmica;  
reconhecer as diferenças entre as escalas termométricas e efetuar mudanças de escalas termométricas;

determinar coeficientes de expansão linear e volumétrica de sólidos e líquidos; e

descrever as características macroscópicas do gás ideal

### PRÉ-REQUISITOS

Álgebra.



Termômetro (Fonte: <http://www.gettyimages.com>).

### INTRODUÇÃO

Em nossos estudos até agora tomamos muito cuidado para definir alguns conceitos já bastante conhecidos tais como massa, força e energia cinética para facilitar as nossas contas. Novamente faremos isto: uma descrição quantitativa dos fenômenos térmicos (que envolvem calor) exige que apresentemos definições muito específicas de grandezas físicas tais como temperatura, calor (viu só, já são diferentes...) e energia *interna*. Começaremos este capítulo com a discussão da temperatura e com a lei mais estranha da física (pelo menos o nome): a lei *ZERO*. Em seguida veremos como e porque o tipo de material estudado determina como ele reage às mudanças de temperatura. Fecharemos o capítulo com *chave de ouro* que é o estudo dos gases ideais na escala macroscópica. Uma glória para a física.



(Fonte: <http://www.gettyimages.com>).

## A TEMPERATURA E A LEI ZERO DA TERMODINÂMICA

Nossa intuição nos ensina desde a infância o que é frio e o que é quente. Temos então uma espécie de “indicador de temperatura” na ponta de nossos dedos. Infelizmente, estes nossos indicadores não são muito confiáveis. Quem gosta de sopa entende perfeitamente o que quero dizer... Vamos agora tentar aprimorar um pouco este indicador: imagine-se retirando de seu congelador uma forma de gelo de alumínio e um pacote de inhame congelado. A temperatura dos dois é igual, afinal de contas saíram do mesmo lugar, mas, eles parecem ter a mesma temperatura? Não! A explicação pode parecer um pouco maluca, mas na verdade o que diferencia um do outro é o material: o alumínio é diferente do Inhame (como todos já percebemos em uma situação ou outra). Olhando bem de perto notamos que o alumínio e o inhame são diferentes em quase tudo! Qual é a tal propriedade de faz com que sintamos uma diferença de temperatura? A resposta tem um nome feio, mas um significado simples: Condutividade Térmica. Alguns materiais têm uma alta condutividade térmica e outros têm uma baixa condutividade térmica. Compare por exemplo o ferro e a madeira. Porque será que os fósforos são feitos de madeira e não de ferro?? Sua resposta está certa! A condutividade térmica do ferro é muito mais alta que a da madeira. Podemos acender um fósforo e esperá-lo queimar até o fim sem sentir calor, mas, se o fósforo fosse de ferro estaríamos com um probleminha entre os dedos. Onde você prefere tomar o seu café? Em uma xícara de porcelana ou um copinho de estanho?? O mecanismo é o mesmo. O que nós precisamos é de um método confiável e reproduzível de medir o calor ou o frio relativo ao invés da velocidade da transferência de calor. Objetos foram desenvolvidos para fazer este tipo de medida e eles são chamados de termômetros.

Todos nós já percebemos que quando colocamos em contato dois objetos que tem temperatura diferente, eles alcançam uma temperatura intermediária. Duvida? Dê um sorvete a uma criança de três anos. Se queremos tomar um suco de melancia gelado, basta colocar alguns cubos de gelo no copo e, em poucos minutos, o gelo terá derretido, mas o suco estará incomensuravelmente mais gostoso.

Para estudar apropriadamente o conceito de temperatura precisamos definir dois termos muito específicos:

- Contato Térmico;
- Equilíbrio térmico.

Vamos começar visualizando o primeiro deles: o exemplo não será o mais adequado para a seriedade deste curso, mas talvez traga uma visualização difícil de esquecer.



Antes de sair alegremente para um churrasco à beira da praia, o namorado coloca seis latinhas de cerveja cuja temperatura é **ideal**, dentro de uma caixinha de isopor. Sua linda e carinhosa namorada traz de casa uma belíssima peça de picanha, à temperatura ambiente, e aconchega os dois preciosos materiais. Não detalharei o resultado. Pode ser MUITO feio. Eles estão em contato térmico. Energia térmica é transferida de um dos corpos (adivinha qual) para o outro. Pois bem, este acontecimento trágico é conhecido como contato térmico. Se o trajeto for muito longo ocorrerá o terrível equilíbrio térmico... Sua cerveja ficará intragável. A tragédia que acaba de ocorrer foi a transferência de energia de um corpo mais quente (picanha) para um corpo mais frio (cerveja). Este tipo de energia que é transferida de um corpo para outro é conhecida como *CALOR*. Este conceito terá sua utilidade neste capítulo para definir que dois objetos se encontram em contato térmico se energia pode ser transferida um para o outro. Agora podemos definir o estado de *Equilíbrio Térmico* como sendo uma situação na qual dois objetos que se encontram em contato térmico deixam de trocar energia na forma de calor.

Vamos agora enunciar classicamente a lei zero da termodinâmica: Consideremos dois objetos A e B que não se encontram em contato térmico. Nossa intenção é determinar se A e B estão em equilíbrio térmico um com o outro. Para fazer esta determinação utilizaremos um equipamento chamado de *termômetro*, ou seja, aquele que mede a temperatura. Vamos chamá-lo de objeto C.

O objeto C é colocado em *contato térmico* com o objeto A. Um fluxo de calor se estabelece entre estes dois até o momento em que se atinge o *equilíbrio térmico*. A leitura do termômetro é anotada como sendo  $T_A$ . Em seguida o termômetro é colocado em *contato térmico* com o corpo B. Após certo tempo, quando a temperatura medida no termômetro não varia mais, podemos assumir que os dois se encontram em *Equilíbrio Térmico* e anotamos o valor desta Temperatura  $T_B$ .

Se as duas temperaturas  $T_A$  e  $T_B$  são iguais, então os corpos A e B estão em equilíbrio térmico. Esta é a famosa lei Zero da Termodinâmica. Isto pode ser facilmente comprovado experimentalmente e é muito importante porque nos permite definir temperatura.

**ESCALAS TERMOMÉTRICAS**

Já mencionamos neste texto a existência dos termômetros. Todas as mães já utilizaram um para saber se seu filho tem uma febre. Todos os termômetros são baseados no princípio de que alguma propriedade física do sistema se alterará com a variação da temperatura. Podemos citar algumas delas:

- O volume de um líquido;
- O comprimento de um sólido;
- A pressão de um gás, quando o volume é constante;
- O volume de um gás quando a pressão é constante; a resistência elétrica de um condutor;
- Até mesmo a cor de um material.

Para uma dada substância e uma dada variação de temperatura, podemos estabelecer uma escala de temperatura baseada em qualquer uma destas propriedades físicas. Talvez o mais comum de todos os termômetros encontrados no dia a dia seja aquele que consiste de uma massa específica de líquido, geralmente o mercúrio ou o álcool, que se expandem dentro de um tubo de vidro de dimensões capilares.

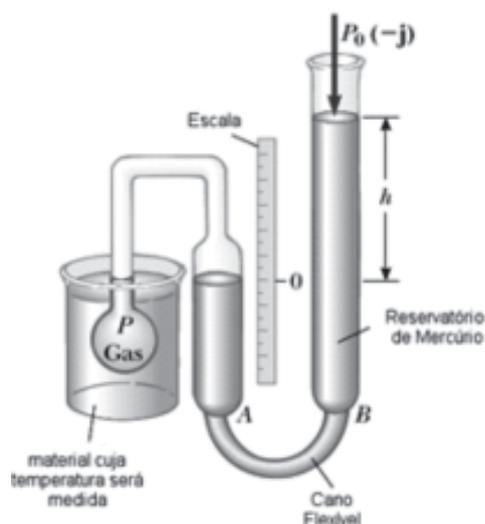


Neste caso, a propriedade física é a variação do volume do líquido. Qualquer variação na temperatura pode ser definida como sendo proporcional à variação em comprimento da coluna líquida. Neste caso é bastante claro que a propriedade física que varia com a temperatura é o volume de um líquido. Qualquer variação na temperatura pode ser definida como proporcional à variação no comprimento da coluna de líquido. O

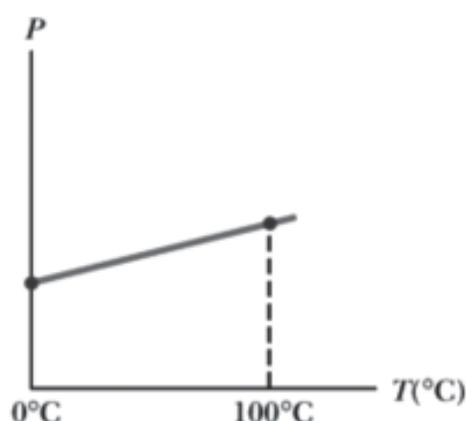
termômetro pode ser calibrado simplesmente colocando-o em contato térmico com um sistema qualquer que mantém a sua temperatura constante. Um destes sistemas é uma mistura entre água e gelo em equilíbrio térmico e que estejam sujeitos à pressão atmosférica. Este ponto é claramente um ponto importante para estabelecer um parâmetro, mas, como é usual, diferentes pesquisadores e diferentes países resolveram utilizar diferentes unidades e diferentes nomes e aí começou a confusão. Uma das escalas mais conhecidas de temperatura é aquela chamada de escala Celsius. Nesta escala afirmamos que a mistura de água e gelo se encontram à temperatura de zero graus Celsius, ou  $0^{\circ}\text{C}$ , esta temperatura é chamada de ponto de gelo da água. Um outro ponto muito comum para estabelecer um parâmetro de temperatura é aquele formado por água e seu vapor quando sujeitos à pressão atmosférica. Dizemos que a sua temperatura corresponde à temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$  e é conhecido como o ponto de vapor da água. Uma vez que o nível do líquido dos termômetros foi estabelecido para estes dois pontos em especial, a distância métrica entre estes dois pontos é dividida entre 100 segmentos iguais para criar a *Escala Celsius*. Por questões históricas, vale ressaltar que esta escala era conhecida (até no meu tempo...) como escala centígrado, porque existem 100 gradações entre os pontos de gelo e de vapor da água).

### O TERMÔMETRO COM VOLUME CONSTANTE DE GÁS E A ESCALA ABSOLUTA DE TEMPERATURA

As leituras de temperatura dadas por um termômetro a gás são praticamente independentes da substância usada no termômetro. Uma versão é o termômetro a gás de volume constante mostrado na figura abaixo.



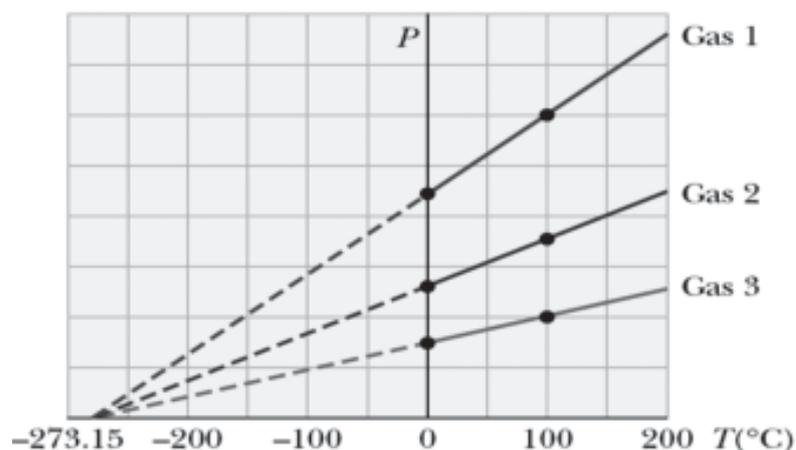
A alteração física explorada neste aparato é a variação da pressão de um volume fixo de gás com a temperatura. Quando o termômetro a gás de volume constante foi desenvolvido, ele foi calibrado utilizando os pontos de vapor e de congelamento da água. O balão foi imerso em um banho de gelo; o reservatório de mercúrio  $B$  foi levantado ou baixado até que o topo do mercúrio na coluna  $A$  estivesse no ponto zero da escala. A altura  $h$ , a diferença entre os níveis do mercúrio no reservatório  $B$  e coluna  $A$ , indicaram a pressão no frasco a  $0^{\circ}\text{C}$ . O frasco era então inserido na água no ponto de vapor, e o reservatório  $B$ , era reajustado até que o topo do mercúrio na coluna  $A$  estivesse novamente no zero da escala; isto garantiu que o volume de gás era o mesmo da mesma maneira que o era no banho de gelo (daí veio o nome “volume constante”) Este ajuste do reservatório  $B$  forneceu um valor para a pressão do gás a  $100^{\circ}\text{C}$ . Estes dois valores de pressões e temperaturas foram então colocados em um gráfico e estão mostrados na figura abaixo.



A linha conectando os dois pontos serve como uma curva de calibração para temperaturas desconhecidas. Se nós quiséssemos medir a temperatura de uma dada substância, tudo que teríamos que fazer seria colocar o frasco de gás em contato com a substância e ajustar a altura do reservatório  $B$  até que o topo da coluna  $A$  estivesse no zero da escala. A altura da coluna de mercúrio indicaria a pressão do gás e, conhecendo a pressão, poderíamos facilmente encontrar a temperatura da substância.

Vamos agora supor que as temperaturas são medidas com termômetros que contenham diferentes gases a diferentes pressões iniciais. Os experimentos mostram que as leituras dos termômetros são praticamente independentes do tipo de gás usado. Se mantivermos a condição de que a pressão do gás é baixa e de que a temperatura está bem acima do ponto onde o gás se liquefaz, a concordância entre os termômetros usando os vários gases melhora quando a pressão é reduzida.

(obtida de Serwey - refazer)



A concordância entre os termômetros usando os vários gases melhora conforme a pressão diminui. Se as curvas são estendidas para valores negativos chega-se ao ponto de encontrar um valor único para a temperatura quando a pressão é nula:  $-273,15^{\circ}\text{C}$ . Esta não é uma temperatura qualquer. Ela é utilizada como sendo a base para a escala absoluta de temperaturas, que marca  $-273,15^{\circ}\text{C}$  como sendo o seu ponto zero. Esta temperatura é conhecida como zero absoluto. O comprimento de um grau na escala Celsius é igual ao comprimento de um grau na escala absoluta, portanto, a conversão entre estas duas temperaturas é linear. Se usamos  $T_c$  como a temperatura Celsius e  $T$  como sendo a temperatura absoluta, sua relação é trivial:

$$T = T_c + 273,15$$

Uma vez que os pontos de gelo e de vapor são difíceis de estabelecer experimentalmente, uma escala absoluta de temperatura baseada em *um único ponto* foi adotada em 1954 pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas (lembra-se dele?) A partir de uma lista de pontos fixos associados a várias substâncias, o ponto triplo da água foi escolhido como temperatura de referência para esta nova escala. O ponto triplo da água é a única combinação de temperatura e pressão onde água, gelo e vapor podem coexistir em equilíbrio. Este ponto triplo ocorre a uma temperatura de aproximadamente  $0,01^{\circ}\text{C}$  e a uma pressão de  $4,58\text{ mmHg}$ . Nesta nova escala, que recebe o nome de Kelvin, a temperatura da água no ponto triplo corresponde a  $273,16$  kelvin.

Até agora nós pudemos verificar que a temperatura de um corpo pode ser determinada através de várias escalas, nominalmente Celsius e Kelvin. Verificaremos agora que uma terceira e importante escala é uti-

lizada em muitos lugares do mundo, a Fahrenheit. Em uma das equações descritas acima, verificamos que a temperatura em Celsius  $T_C$  se diferencia da temperatura absoluta Kelvin por  $273.15^\circ$ . Como o comprimento de um grau (lembre-se do termômetro) é o mesmo, uma variação de temperatura de  $5^\circ\text{C}$  é igual a uma variação de  $5\text{ K}$ . A única diferença entre as duas escalas se encontra em nossa escolha de quem será o zero, ou origem da escala. Portanto, a temperatura de congelamento da água,  $273.15\text{ K}$ , corresponde a  $0^\circ\text{C}$ . uma terceira escala utilizada comumente nos EUA hoje em dia é a Fahrenheit. Esta escala estabelece a temperatura de congelamento como sendo  $32^\circ\text{F}$  e a temperatura de evaporação como sendo de  $212^\circ\text{F}$ . é fácil ver que dois termômetros em escalas diferentes terão distância entre graus diferentes, mas a conversão de uma escala para outra é muito simples.

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32^\circ\text{C}$$

### ATIVIDADES

Atende aos itens 1 e 2

1. Um dia (frio?) em que a temperatura alcança a marca de  $50^\circ\text{F}$ , qual é a temperatura em Celsius e Kelvin?
2. Uma panela com água é aquecida de  $25$  a  $80^\circ\text{C}$ . Qual é a variação na sua temperatura nas escalas Kelvin e Fahrenheit?



### COMENTÁRIO SOBRE AS ATIVIDADES

1. A solução é obtida simplesmente pela utilização das equações de conversão:

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32) = 10^\circ\text{C}$$

$$T = T_C + 273.15 = 283.15$$

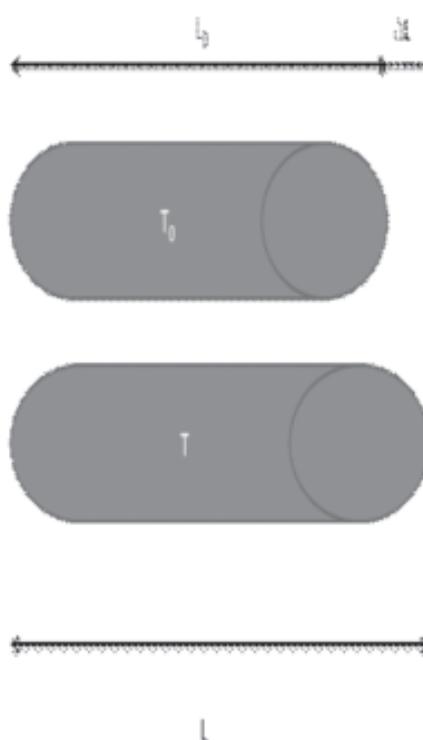
2. Como as escalas Celsius e Kelvin tem o mesmo comprimento, então a mesma variação deve ocorrer:  $\Delta T = 55\text{K}$ . A variação para a temperatura Fahrenheit também é trivial e é dada por:

$$\Delta T_F = \frac{9}{5}\Delta T_C = 99^\circ\text{F}$$

## COEFICIENTES DE EXPANSÃO E CONTRAÇÃO TÉRMICA

A maioria das substâncias se expande quando são aquecidas e se contraem quando são resfriadas. O fator de expansão ou contração, no entanto, depende do material.

Expansão Linear: os experimentos realizados até hoje indicam que um aumento de temperatura  $DT$  leva a um aumento de comprimento de magnitude  $DL$  praticamente linear. Considere a figura abaixo:



Como já era de se esperar, a variação no comprimento também é proporcional ao comprimento inicial do objeto:  $L_0$ . A figura acima nos indica que uma mesma variação de temperatura  $DT$  induzirá um crescimento muito maior naquela barra que originariamente já era maior. Uma simples equação de proporcionalidade pode facilmente relacionar estas grandezas:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

Onde a constante de proporcionalidade é conhecida como coeficiente de expansão linear para cada material em particular e tem unidades de ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ). Os valores de  $\alpha$  para vários materiais a  $20^{\circ}\text{C}$  foram colocados na tabelinha abaixo. Note que  $\alpha$  não varia muito com a temperatura.

Material	$\alpha$ ( $10^{-6}$ ) ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
—	35
Latão	19
Cobre	17
Ferro	12
Chumbo	29
Vidro (pyrex)	3
Vidro (comum)	9

Esta tabela nos dá uma indicação precisa da razão de utilizarmos apenas vidro da qualidade do Pyrex para levar assados ao forno.

Assim como uma estrutura linear se expande com o aumento da temperatura, uma estrutura tri-dimensional também sofre um processo de expansão quando é aquecido e um processo de contração quando é resfriado. Isto nos leva a uma questão interessante: imagine uma chapa de alumínio com um buraco em seu centro, como na figura abaixo:



Quando o metal é aquecido, o que acontece com o buraco? Ele se torna maior ou menor?

Você poderia imaginar que o metal se expande em direção ao buraco, tornando-o menor, mas estaria errado. Ao invés de cortar um buraco na lâmina, imagine que você apenas faz um desenho na lâmina do mesmo tamanho do buraco. Quando o metal se expandem o metal dentro daquele círculo também se expande com o restante do material, portanto o círculo *se expande: o buraco cresce*. O material não cresce para dentro para fechar o buraco. Em um objeto sólido, todas as seções se expandem com o aumento da temperatura.

A variação no volume de um material que sofre uma variação em sua temperatura tem uma expressão muito similar àquela que acabamos de ver e, na realidade, é dada por:

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T$$

Onde a única nova variável é  $\beta$  que corresponde ao coeficiente de expansão volumétrica. Por completeza, inserimos também uma pequena tabela mostrando os valores de  $\beta$  para alguns materiais.

Material	$\beta$ ( $10^{-6}$ ) ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
Alumínio	75
Latão	56
Cobre	50
Ferro	35
Chumbo	87
Vidro (pyrex)	9
Vidro (comum)	27

Um dos usos destas equações descritas anteriormente é descrever como se comportam os gases quando ocorre a variação da temperatura, mas elas não são muito úteis. Estas falhas decorrem principalmente da imensa variação de volume com temperatura e pela tendência dos gases de preencher quaisquer vasilhames que os contenham. A segunda dessas equações na realidade só faz sentido se a pressão é mantida constante. O volume de um gás depende não apenas da temperatura, mas também de sua pressão. Desta percepção nasce a necessidade de determinar uma relação entre a massa, o volume, a temperatura e a pressão de uma certa quantidade de gás. Uma relação deste tipo é conhecida como EQUAÇÃO DE ESTADO.

Se o estado de um sistema é variado, nós sempre teremos que esperar até que a pressão e a temperatura alcancem um certo dado valor. Nós consideramos então apenas **estados de equilíbrio** de um sistema – quando as variáveis que descrevem este sistema (tais como temperatura e pressão) são a mesma em todos os pontos do sistema e não estão mais variando. Isto tudo parece muito vago, está ruim. Imagine que você pega uma barra de ferro e coloca uma de suas pontas dentro de uma fornalha. A temperatura não é uniforme em toda a barra. A temperatura total irá variar até que ela se equilibre em toda a barra. Quando isto tiver finalmente ocorrido, então o sistema estará em equilíbrio, mas não antes.

Para uma certa quantidade de gás foi determinado experimentalmente que dentro de um certo erro experimental, o volume de um gás é inversamente proporcional à pressão aplicada sobre ele quando a temperatura é mantida constante. Esta relação é historicamente conhecida como lei de Boyle.

$$V \propto \frac{1}{p}, T = \text{constante}$$

Relações similares são conhecidas como as leis de Charles e Gay-Lussac, mas elas realmente não se tratam de leis no sentido em que usamos hoje em dia (precisas, profundas, de grande aplicabilidade). Elas são apenas aproximações que são verdadeiras para gases reais desde que a pressão e a densidade do gás não são muito altas, e de que o gás não esteja muito próximo da condensação.

## A LEI DO GÁS IDEAL

As leis que discutimos até agora foram obtidas através de uma técnica que é muito útil na ciência: manter uma ou mais variáveis constantes com o objetivo de observar claramente os efeitos de se variar apenas uma destas variáveis. Estas leis podem agora ser combinadas em uma única relação mais geral entre a pressão, a temperatura e o volume de uma quantidade fixa de gás.

$$PV \propto T$$

Esta relação indica como quaisquer destas quantidades irão variar quando as outras duas quantidades variarem. Finalmente devemos incorporar o efeito da quantidade de gás presente. Experimentação levou à conclusão que quando a temperatura e a pressão se mantem constnte, o volume  $V$  de uma certa quantidade de gás aprisionado aumenta em proporção direta à quantidade de massa de gás presente:

$$PV \propto mT$$

Esta proporção pode ser transformada em uma equação ao introduzir uma constante de proporcionalidade. A experiência mostra que esta contante tem um valor diferente para cada gás, mas a constante de proporcionalidade se torna a mesma para todos os gases se, ao invés da massa  $m$  nós utilizamos o numero de moles. Um Mol é definido como é o número de gramas de uma substância numericamente igual à massa molecular. Por exemplo, a massa molecular do gás Hidrogênio é 2.0u. Portanto um mol de  $H_2$  tem uma massa de 2.0g

O mol é a unidade oficial no sistema SI. Em geral, o número de moles,  $n$ , de uma dada amostra de uma certa substância é igual à sua massa em gramas dividida por sua massa molecular especificada como gramas por mole:

$$n(\text{mol}) = \frac{\text{massa (gramas)}}{\text{massa molecular } (\frac{\text{g}}{\text{mol}})}$$

Por exemplo, o número de moles em 132 g de  $\text{CO}_2$  é:

$$n = \frac{132}{44\text{g/mol}} = 3.0 \text{ mol}$$

Agora sim nós podemos escrever a equação proposta.

$$PV = nRT$$

Onde  $n$  representa o número de moles e  $R$  é a constante de proporcionalidade  $R$  conhecida como constante universal dos gases.



## ATIVIDADES

1. Um bloco de concreto tem 12 m de comprimento a  $-5^\circ\text{C}$  em um dia de inverno. Qual é a variação de comprimento que ocorre quando chega o verão e a temperatura chega a  $35^\circ\text{C}$ ?
2. Uma panela com água é aquecida de  $25$  a  $80^\circ\text{C}$ . Qual é a variação na sua temperatura nas escalas Kelvin e Fahrenheit?

## COMENTÁRIO SOBRE AS ATIVIDADES

1. O coeficiente de expansão linear do concreto é de cerca e  $1 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . Aplicando a primeira equação de expansão térmica chegamos ao valor:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T = 5\text{mm}$$

2. Uma esfera de alumínio tem raio  $R$  de  $3,000 \text{ mm}$  a  $100,0^\circ\text{C}$ . Qual é o seu volume a  $0^\circ\text{C}$ ? O volume da esfera ( $\frac{4}{3}\pi R^3$ ) a  $100^\circ\text{C}$  é  $V = 113,1 \text{ mm}^3$ . Consultando uma tabela de coeficientes de expansão encontramos que  $b = 7,2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . Desta maneira fica muito fácil calcular a variação no volume:

$$\Delta V = 7,2 \times 10^{-5} \times 113,1 \times (-100) = -0,81\text{mm}^3$$

$$\Delta T_F = \frac{9}{5} \Delta T_C = 990 \text{ F}$$

**RESUMO**

Nesta aula, particularmente extensa, demos a largada para o estudo da termodinâmica, um dos pilares da ciência moderna. Vimos que existe uma lei Zero da termodinâmica. Verificamos como os materiais sofrem um processo de expansão e/ou contração dependendo da variação da temperatura.

**PRÓXIMA AULA**

Estender os conceitos termodinâmicos para termos mais específicos e definir os conceitos de calor e energia interna.

**REFERÊNCIAS**

GIANCOLI, Douglas C. **Physics for Scientists and Engineers**, 3 ed. Editora Prentice Hall, New Jersey, 2000.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física I – Mecânica**, 10 ed. Tradução de Adir Moysés Luiz. Editora Addison Wesley, São Paulo, 2003.

FREDERICK, J. Keller; GETTYS, W. Edward; SKOVE, Malcolm J. **Física**, v. 1, 1 ed. Tradução de Alfredo Alves de Farias. Editora Makron Books, São Paulo, 1997.

RESNICK, Robert; HALLIDAY, David; KRANE, Kenneth S. **Física 1**, 5 ed. Tradução de Pedro M. C. L. Pacheco, Marcelo A. Savi, Leydervan S. Xavier, Fernando R. Silva. LTC Editora, Rio de Janeiro, 2003.