

## Experimento 7

### *Equivalente Mecânico do Calor*

Neste experimento, vamos comparar as ordens de grandeza da energia produzida em duas situações muito diferentes na aparência. Por um lado, realizaremos um trabalho mecânico com uma força que vai deslocar um objeto mecânico e, por outro, obteremos energia com a transformação química de uma pequena quantidade de matéria. Quando ainda não se havia entendido que calor é energia de movimento dos átomos e moléculas, era necessário medir a relação entre energia mecânica, medida em joules, e energia térmica, medida em calorias, uma relação conhecida como *Equivalente Mecânico do Calor*, mas hoje essa ideia de equivalência não faz mais sentido. Além disso, a 9ª Conferência Geral de Pesos e Medidas, em 1948, banuiu a caloria do Sistema Internacional de unidades, e, hoje, a energia térmica também deve ser medida em joules, de modo que também não é necessário determinar a relação entre a caloria e o joule. A ideia de equivalente mecânico tem, porém, importância histórica e nos dará os elementos para comparar concretamente as ordens de grandeza típicas da energia em fenômenos associados ao deslocamento de objetos mecânicos extensos (por exemplo, um avião) com aqueles da matéria que realiza processos químicos (a queima de querosene na turbina do avião).

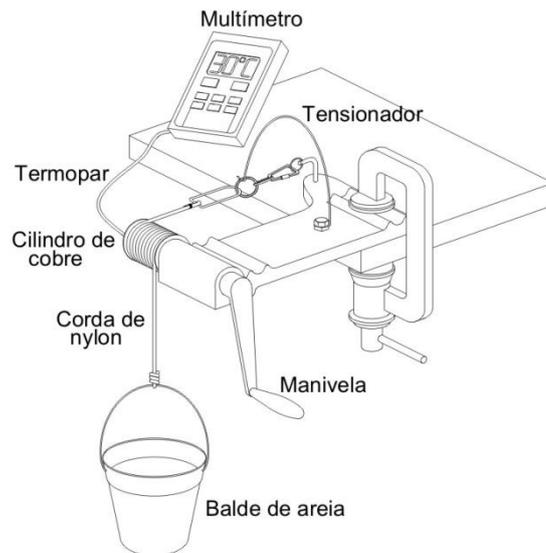
A caloria foi definida originalmente como a quantidade de energia necessária para aquecer 1 g de água em 1° C, mas logo se verificou que essa quantidade de energia varia com a temperatura. Isso permitiu várias definições, tais como a energia necessária para aquecer a água de 14,5 a 15,5 °C, ou 1% da energia para aquecer a água de 0 a 100 °C, com valores entre 4,184 a 4,187 J. Por causa dessa ambiguidade, essa unidade foi abandonada na física, mas ela ainda é usada em outros ramos da ciência e tecnologia. Assim, a caloria nos interessa porque ela é uma grandeza do cotidiano e também porque serve para comparar a energia de movimento dos corpos extensos com a energia liberada ou incorporada nas transformações químicas e nas mudanças de temperatura, que é o conteúdo central desta experiência.

### **Introdução**

O princípio da conservação da energia estabelece que a *energia* térmica resultante da transformação *exclusivamente em calor* do trabalho mecânico de uma força deve ser *idêntica* à quantidade de trabalho realizado. Assim, o arranjo experimental consistirá em um dispositivo mecânico com um reservatório de calor ligado a um termômetro, de modo que possamos medir o aquecimento desse reservatório pelo acionamento controlado do dispositivo.

A Figura 1 é um esquema do equipamento disponível no laboratório didático para o estudo desse fenômeno. Quando se roda a manivela, realiza-se trabalho sobre o cilindro de cobre, por causa da fricção da corda de nylon enrolada nele e que está pressionada pela força peso de um saco de areia, que está preso na outra extremidade da corda. O truque do aparelho é escolher o peso da areia igual à força de atrito cinética entre o cilindro e a corda, o que se constata pelo fato da corda ficar frouxa do lado do tensionador da figura. Dessa forma, o torque que age sobre o cilindro será constante e mensurável, enquanto o operador mantiver o movimento e não permitir que a corda estique.

Com o movimento do cilindro, o atrito entre ele e a corda converte o trabalho realizado pela manivela em calor, que aumenta a temperatura do cilindro. A partir do aumento da temperatura do cilindro é possível determinar a energia térmica que foi para o cilindro. A razão entre o trabalho realizado pela manivela e a energia térmica transferida ao cilindro é que era chamada de equivalente mecânico do calor.



**Figura 1.** Desenho esquemático da montagem a ser utilizada para a comparação entre ordens de grandeza típicas dos movimentos macroscópicos com os das reações químicas e transformações termodinâmicas.

Neste experimento, vamos medir o aquecimento do cilindro de cobre devido a uma quantidade controlada de energia mecânica e, dessas grandezas, determinar a capacidade térmica do cilindro. A seguir, mediremos o aquecimento desse cilindro pela queima de um palito de fósforo e, do aumento de temperatura resultante e da capacidade térmica medida na etapa anterior, deduziremos a energia obtida da queima do palito.

Do procedimento experimental, poderemos comparar os tempos necessários ao aquecimento por atrito com o devido à queima do palito, bem como confrontar a quantidade de matéria envolvida na reação de combustão do fósforo com aquela envolvida na produção da energia mecânica.

Das grandezas extensivas que determinaremos – capacidade térmica do cilindro de cobre e energia de combustão do palito de madeira – obteremos as grandezas intensivas: calor específico do cobre e calor de combustão por unidade de massa (poder calorífico) da lenha seca, que poderão ser comparados com valores tabelados. Finalmente, a partir da razão entre o calor específico do cobre e o da água –  $1,00 \text{ cal}/(\text{g } ^\circ\text{C})$  – determinaremos quantos joules equivalem a uma caloria, o antigo equivalente mecânico do calor e, hoje, simplesmente um fator de conversão de uma unidade em desuso na Física, a “caloria”, para a unidade adotada como padrão de energia.

### Fundamentos teóricos

O trabalho realizado por meio da manivela sobre o cilindro é igual a  $W = \int \tau d\theta$ , onde  $\tau$  é o torque que atua sobre o cilindro e  $\theta$  é o ângulo que mede a posição do cilindro, e a integral deve ser efetuada sobre toda a rotação do cilindro. Se a manivela é virada com velocidade constante, o torque da força externa (que você faz sobre a manivela) é igual ao torque da força de atrito e, se a corda permanecer frouxa na parte que se liga à mesa, então o torque realizado pela força de atrito será igual ao torque devido ao peso, de modo que o torque do atrito (cujo deslocamento é a fonte de energia) pode ser calculado através da equação:

$$\tau = MgR \quad (1)$$

onde  $M$  é a massa pendurada na corda,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $R$  o raio do cilindro de cobre.

A cada volta completa, o cilindro roda de um ângulo  $2\theta$  radianos, de modo que o trabalho total do torque do atrito após  $N$  voltas do cilindro (ou da manivela) será:

$$W = \tau\theta = MgR(2\pi)N \quad (2)$$

O aumento de temperatura do cilindro é

$$Q = mc(T_f - T_i) = W \quad (3)$$

onde  $m$  é a massa do cilindro,  $c$  o calor específico do cobre,  $T_i$  a temperatura inicial e  $T_f$  a temperatura final.

Se substituirmos na equação acima o aumento observado da temperatura e o valor do trabalho mecânico, podemos deduzir  $c$ ; se substituirmos o aumento de temperatura e o valor conhecido de  $c$ , podemos determinar o valor do calor transferido. O *Equivalente Mecânico do Calor (J)* era definido como a razão entre o trabalho realizado e o calor produzido:

$$J = \frac{W}{Q}$$

Por uma questão de precisão experimental, é necessário corrigir a condução de calor do cilindro de cobre para o resto do sistema, seja para o meio ambiente, seja para a corda e o eixo da manivela. A quantidade de energia conduzida para fora do cilindro é difícil de calcular e de medir, mas podemos supor que ela só dependa da diferença de temperatura e considerar que o calor fluirá para fora ou para dentro do cilindro conforme o cilindro estiver mais quente ou mais frio, respectivamente, que os outros objetos. Se supusermos que o sinal da diferença de temperatura somente afete o sentido da transferência de calor e não o módulo do calor transferido, então poderemos compensar a perda de calor enquanto o cilindro está a uma temperatura maior que o entorno simplesmente começando a aquecê-lo a uma temperatura mais baixa que a ambiente, de modo que a temperatura média entre a inicial e a final seja aproximadamente igual à temperatura ambiente.

## Procedimento Experimental

- 1) Determine a massa do saco de areia com uma balança adequada e anote a massa e diâmetro do cilindro.
- 2) Meça a temperatura ambiente,  $T_a$ , e a temperatura do cilindro de cobre no início do experimento, que deve ser próxima à temperatura ambiente.
- 3) Gire a manivela 50 voltas, com velocidade angular de aproximadamente 1 rotação por segundo, e anote a temperatura final do cilindro e calcule a variação  $\Delta T$ . Esta medição é preliminar, somente para determinar as condições ótimas do experimento, e não deve entrar no cálculo da capacidade térmica do cilindro. Note que o cilindro começa a esfriar segundos depois de parar a manivela e bem depressa, o que mostra a importância de corrigir a troca de calor com o ambiente para obter bons resultados.
- 4) Desenrole a corda do cilindro de cobre (preste atenção na forma como está enrolada, porque você precisará recolocá-la no lugar) e resfrie o cilindro com gelo até que fique abaixo da temperatura ambiente, mais ou menos à temperatura  $T_i = \left(T_a - \frac{\Delta T}{2} - 1\right)^\circ\text{C}$  e recoloque-o no eixo da manivela; não se esqueça de repor o termopar no lugar.
- 5) Assim que a temperatura do cilindro for aproximadamente  $T_i = T_a - \frac{\Delta T}{2}$ , gire a manivela 50 voltas e anote as temperaturas no início e no final do movimento da manivela. Repita o procedimento dos itens 4 e deste aqui pelo menos 5 vezes, para que possa estimar a incerteza da medição do aquecimento.
- 6) Determine a massa e o comprimento de um palito de fósforo; sugerimos que coloque 10 palitos na balança para melhor precisão.



**Figura 1.** Esquema do aquecimento do cilindro de cobre pela chama do fósforo, que ilustra a distância entre a chama e o cilindro.

- 7) Utilizando um palito de fósforo, verifique o aumento da temperatura ao manter o topo da chama a uma distância de aproximadamente 1 cm do cilindro de cobre (veja figura 2) enquanto estiver queimando com boa chama; apague o palito *antes* de removê-lo de perto do cilindro.
- 8) Meça o tamanho do pedaço do palito que não queimou.

## Síntese

- a) Faça uma descrição sucinta do experimento realizado, com suas palavras.
- b) **TRABALHO MECÂNICO:** Calcule o aumento médio de temperatura do cilindro de cobre observado nas etapas 4 e 5 do procedimento experimental e determine a capacidade térmica  $C = mc$  do cilindro de cobre a partir das equações 2 e 3.
- c) Determine, usando regra de 3, a massa da parte queimada do palito de fósforo, supondo que a massa se distribua uniformemente pelo palito.
- d) **AQUECIMENTO COM FÓSFORO:** Determine a energia  $Q$ , o calor fornecido pelo palito de fósforo a partir da equação 3, usando seu valor calculado para  $C$  no item b; ignore a perda de calor para o ar.
- e) Determine o calor específico do cobre a partir de  $C$  do item a e da massa do cilindro de cobre.
- f) Determine o poder calorífico da lenha,  $q$ , a partir dos resultados dos itens c e d.

$$q=Q/m$$

- g) Determine o equivalente mecânico, ou seja, o valor de 1 cal em joules, sabendo que o calor específico do cobre é 0,094 vezes o da água, que é 1,00 cal/(g °C).
- h) Faça uma discussão. Compare a eficácia da chama em aquecer o cilindro com a de seu trabalho manual. A fim de ter mais um elemento de discussão, calcule o número de litros de diesel que tem um calor de combustão igual à energia cinética de um caminhão em movimento a 108 km/h,