
MEDIÇÃO DO CALOR ESPECÍFICO DO AR EM SALA DE AULA*

Klaus Weltner

Paulo Miranda

Instituto de Física – UFBA

Salvador – Bahia

Resumo

No presente trabalho apresentamos um enfoque teórico e experimental da medição do calor específico do ar, a pressão constante, c_p , totalmente em nível de ensino médio, utilizando, em lugar de aparelhos sofisticados, material do dia a dia do estudante. Até mesmo um dinamômetro pode ser substituído. Além disso, a definição do processo termodinâmico envolvido foi determinada experimentalmente. Os resultados que obtivemos apresentam uma discrepância de cerca de 10 por cento do valor tabelado.

Palavras-chave: *Calor específico, calor específico do ar, medição.*

I. Introdução

Experimentalmente, mede-se nas salas de aulas o calor específico de líquidos (água) e de sólidos (alumínio, chumbo). O de um gás normalmente não é medido, embora ele tenha um papel fundamental na termodinâmica, na tecnologia e na meteorologia. Por isso, é desejável mostrar a obtenção do calor específico de, pelo menos, um gás. Apresentamos, a seguir, um procedimento experimental simples e barato em que se utilizam um secador de cabelos e alguns conhecimentos elementares de Física básica para medir o calor específico do ar. Nossa abordagem é destinada ao uso nas aulas de Física do ensino médio. Este trabalho, em língua portuguesa, adequa e amplia o conteúdo da referência¹ de um de seus autores.

II. Teoria e raciocínio

O secador aquece o ar. Isso significa que a energia fornecida por ele é usada para aumentar a temperatura do ar que passa pelo aparelho. Digamos que em

* Publicado no Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 19, n. 2, ago. 2002.

um determinado tempo t uma massa m será aquecida pelo secador, desde a temperatura ambiente $T_{ambiente}$ até a temperatura $T_{saída}$ na sua saída, ambas medidas por um termômetro.

O ar também será acelerado desde a velocidade $v_0=0$ até a velocidade v . A velocidade $v_0=0$ significa que o ar que passa pelo secador está inicialmente em repouso e sai do aparelho com velocidade v .

Com essas considerações podemos escrever o balanço de energia. Ele exige que a energia fornecida pelo secador, Q , seja igual ao calor absorvido pelo ar. Este calor absorvido é proporcional: à massa do ar, ao calor específico c do ar e à diferença entre as temperaturas $\Delta T = T_{saída} - T_{ambiente}$. O calor específico c equivale à quantidade de calor necessária para aquecer um quilograma da amostra em um grau Celsius ou Kelvin. Podemos então escrever o balanço de energia:

$$Q = m c \Delta T \quad (1)$$

Desta equação, obtemos a expressão para o calor específico do ar:

$$c = \frac{Q}{m \Delta T} \quad (2)$$

A energia fornecida pelo secador é: $Q = P \cdot t$, sendo P a sua potência e t o tempo em que ele esteve ligado para aquecer a massa m de ar.

Então a equação fundamental assume a forma:

$$c = \frac{P t}{m \Delta T} \quad (3)$$

A potência P do secador consta do seu manual ou está impressa no aparelho ou pode ser determinada com mais precisão, medindo-se a tensão na sua entrada, $V_{entrada}$, a corrente que passa por ele, $I_{secador}$, ou a sua resistência $R_{secador}$. Este procedimento confere maior confiabilidade ao valor da sua potência. Assim, escrevemos: $P_{medido} = V_{entrada} \cdot I_{secador} = V_{secador}^2 / R_{secador}$. A diferença de temperatura é obtida medindo-se o seu valor no jato de ar aquecido e no ambiente.

Resta medir a massa de ar aquecido que passa pelo aquecedor. Esta medição não é trivial. Existem medidores de fluxo de gases mas são caros e ficam fora do alcance dos laboratórios das escolas ou até das universidades. Embora não possamos medir diretamente a massa de ar que passa pelo secador existe um modo de se obter o seu valor, descrito como segue: a argumentação é mais elaborada, pois usamos a força de reação do ar acelerado como meio de obter informações adicionais. A massa de ar que passa pelo secador em um tempo t é igual à massa contida em uma mangueira imaginária de mesma seção reta A que a da saída do tubo do secador e de comprimento $l = v t$. Sendo ρ a densidade do ar aquecido, podemos escrever a expressão da massa m que passa pelo secador em t segundos:

$$m = \rho A v t \quad (4)$$

Pela segunda lei de Newton a força necessária para acelerar uma massa m em t segundos do repouso até a velocidade final v será obtida a partir da relação entre a variação do momento linear, $mv - mv_0 = m v$ e o impulso da força, $I = F t$. Este impulso é fornecido pela hélice do ventilador dentro de secador aplicando uma força F ao ar. Segue então que:

$$F = \frac{m v}{t} \quad (5)$$

Combinando (4) e (5) temos:

$$F \cdot t = m \cdot v = \rho \cdot A \cdot v \cdot t \cdot v = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot t, \text{ logo}$$

$$F = \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (6)$$

Finalmente, obtemos:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\rho \cdot A}} \quad (7)$$

Pela terceira lei de Newton o secador empurra o ar e o ar empurra o secador com uma força de reação de igual intensidade mas de sentido contrário, então,

$$F = -F_{reação} \quad (8)$$

Esta força, $F_{reação}$, pode ser medida por um dinamômetro. Para isto penduramos o secador e marcamos o seu ponto de equilíbrio. A seguir, ligamos o aparelho que se desloca da posição de equilíbrio devido à força de reação. Trazendo-o de volta até a sua posição de equilíbrio com o auxílio de um dinamômetro, a força indicada em sua escala é a força medida da reação devido à aceleração do ar, isto é: $F_{medida} = -F_{reação}$. A Fig. 1a e 1b mostra o arranjo experimental.

Com o conhecimento da velocidade v , podemos determinar m :

$$m = \rho \cdot A \cdot \sqrt{\frac{F}{\rho \cdot A}} \cdot t = \sqrt{F \cdot \rho \cdot A} \cdot t \quad (9)$$

Inserindo a equação (9) na equação fundamental (3), obtemos finalmente:

$$c = \frac{P}{\sqrt{F \cdot \rho \cdot A \cdot \Delta T}} \quad (10)$$

O nosso raciocínio está quase completo mas restam ainda dois problemas: a definição do tipo de processo termodinâmico presente nesta medição de c e a determinação da densidade ρ em função da temperatura. A condição

termodinâmica presente é a pressão constante como mostramos no anexo 4.4 e o calor específico sob esta condição é representado por c_p .

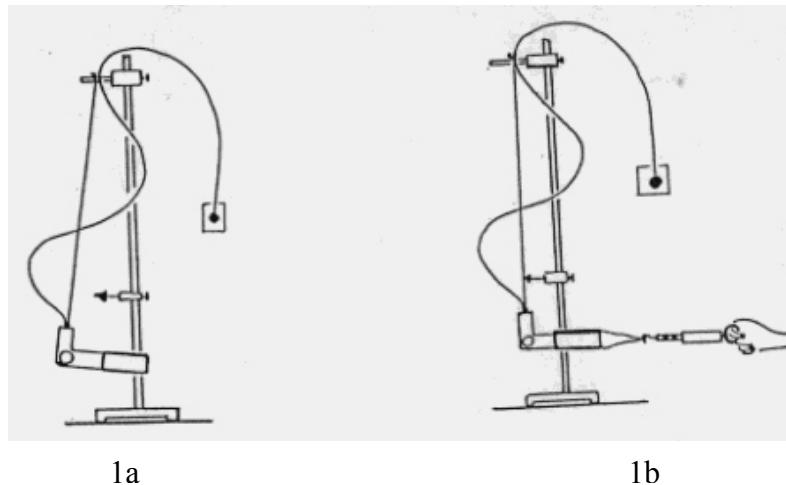


Fig. 1 - Arranjo experimental (a) O secador ligado está deslocado pela força de reação. (b) Restauração da posição inicial do secador aplicando-lhe uma força, medida pelo dinamômetro, que tem sentido contrário ao da força de reação.

Sob condição de pressão constante o ar expande-se com o aumento da temperatura. Conseqüentemente a sua densidade diminui. Lembremos do balão de ar quente que pode subir devido à diminuição da densidade do ar aquecido.

A densidade do ar sob a temperatura de 0°C ou $T_0 = 273^\circ\text{K}$ e sob a pressão de uma atmosfera é tabelada e vale: $\rho_0 = 1,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

A densidade do ar na saída do secador é menor e vale:

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0}{T_{\text{saída}}} \quad (11)$$

Caso você não se lembre mais da relação (11), veja a sua dedução no Anexo 4.2. Substituindo o valor de ρ , dado por (11) teremos finalmente a expressão para o cálculo do calor específico do ar:

$$c_p = \frac{P}{\Delta T \cdot \sqrt{A \cdot \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_{\text{saída}}} \cdot F_{\text{medida}}}} \quad (12)$$

Medindo-se experimentalmente todas as grandezas envolvidas podemos determinar c_p .

III. Procedimento

O arranjo experimental já está esquematizado na Fig. 1a e b. Um simples secador de cabelos é a peça básica do nosso experimento. A potência dos secadores

comerciais encontrados está entre 800 e 1600 Watts. O jato de ar quente que sai destes aparelhos não apresenta temperatura homogeneamente distribuída em sua seção reta. Esta homogeneidade, necessária nas medições, pode ser obtida fixando-se na boca do secador um tubo de cartolina de mesmo diâmetro e com comprimento de 20-30 cm. O tubo pode ser confeccionado em classe, usando cartolina, tesoura e fita crepe e é preso por meio de fita crepe. Na outra extremidade do tubo, fixa-se, em pontos diametralmente opostos, um fio ao qual se prende um dinamômetro de 0-1 N.

O secador está suspenso em um suporte por um fio de tal modo que possa se movimentar livremente. A direção do tubo e do jato deve ser horizontal. Um apontador deve ser ajustado na haste vertical, próximo ao fio, para indicar o estado inicial do secador suspenso.

Como já enfatizamos, quando o secador for ligado ele será empurrado no sentido oposto ao do jato do ar. Com o dinamômetro puxa-se o secador para a posição inicial e mede-se a força necessária para tal, isto é $F_{medida} = -F_{reação}$.

Com um termômetro que possa medir temperaturas na faixa de 0-110°C, mede-se a temperatura ambiente e a do ar que sai do secador. Antes da leitura, o termômetro deve ficar dentro do tubo o tempo suficiente para se atingir o equilíbrio térmico.

A área da seção reta do tubo deve ser também determinada. Para isso, mede-se seu diâmetro e calcula-se sua área. Com estes dados o valor de c_p pode ser determinado.

Em experimentos por nós realizados em sala de aula, os valores medidos foram:

Força:	$F=0,22\text{ N}$
Diâmetro do tubo:	$d=0,038\text{ m}$
Área do tubo:	$A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = 11,3 \cdot 10^{-4}\text{ m}^2$
Potência do secador:	$P=1110\text{ watt}$
Temperatura ambiente:	$T_1 = 30^\circ\text{C} = 303\text{ K}$
Temperatura do jato:	$T_2 = 90^\circ\text{C} = 363\text{ K}$
Diferença das temperaturas:	$\Delta T = 60^\circ\text{C} \text{ ou } 60\text{ K}$

Como resultado, obtivemos o seguinte valor para o calor específico do ar a pressão constante:

$$c_p = \frac{P}{\Delta T \cdot \sqrt{A \cdot \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_{saída}} \cdot F_{reação}}} = 1,191 \frac{\text{KJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

O valor de tabela é: $c_p = 1,065 \frac{KJ}{kg \cdot K}$. Os erros estão na faixa de 10%.

Assim, a precisão é bastante razoável para uma medição em sala.

Observação

A determinação experimental de c_p envolve a ação de medir diferentes grandezas, (algumas delas mais de uma vez, como a temperatura T e o diâmetro d). Isto significa que o erro relativo propagado, soma de várias parcelas, tende a aumentar. Além disso devemos considerar os erros sistemáticos (como outros destinos da energia fornecida) e os aleatórios (como, no nosso caso, a instabilidade da tensão da rede). Nestas condições, a discrepância ocorrida nos parece aceitável.

Bibliografia

¹ WELTNER, K. Measurement of specific heat capacity of air. **American Journal of Physics**, v. 61, p. 661-662, 1993.

² NUSSENZWEIG, M. **Curso de Física Básica**, Editora Edgard Blucher, 1981. v. 2.

Anexos

1. Uso de um pêndulo gravitacional ou simples como dinamômetro

Se um dinamômetro não for disponível, existe um recurso para medir a força de reação do secador. Podemos usar a força restauradora de um pêndulo gravitacional, pendurado ao lado do aparelho no sentido oposto ao da força a medir. O pêndulo é suspenso por uma alça que nos permite deslocar o seu ponto de suspensão na haste horizontal. Um barbante sem folga conecta o fio do pêndulo ao secador em repouso (veja a Fig. 2a). Se este for ligado, puxa o pêndulo para fora da posição inicial (veja a Fig. 2b). Deslocando-se a alça adequadamente, puxamos o secador para a sua posição inicial marcada pelo indicador fixo na haste vertical de sustentação. Nesse caso, a força restauradora do pêndulo é igual à força a medir (veja a Fig. 2c). Medindo-se o deslocamento Δs , o comprimento l e a massa M , podemos determinar a força restauradora que é igual à força com que o secador empurra o ar.

$$F_{restauradora} = M g \operatorname{sen} \alpha = M g \frac{\Delta s}{l} = F_{medida},$$

sendo, $\operatorname{sen} \alpha \approx \frac{\Delta s}{l}$ (pequenos ângulos).

Exemplo: Utilizamos os seguintes valores em um experimento em classe:

Massa do pêndulo gravitacional: $M = 0,200 \text{ kg}$

Comprimento do pêndulo: $l = 0,80 \text{ m}$

Deslocamento da alça: $\Delta s = 0,094 \text{ m}$

Aceleração da gravidade: $g = 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Força medida: $F_{\text{medida}} = 0,23 \text{ N}$

O resultado é o mesmo da medição com dinamômetro, dentro da faixa dos erros das nossas medidas.

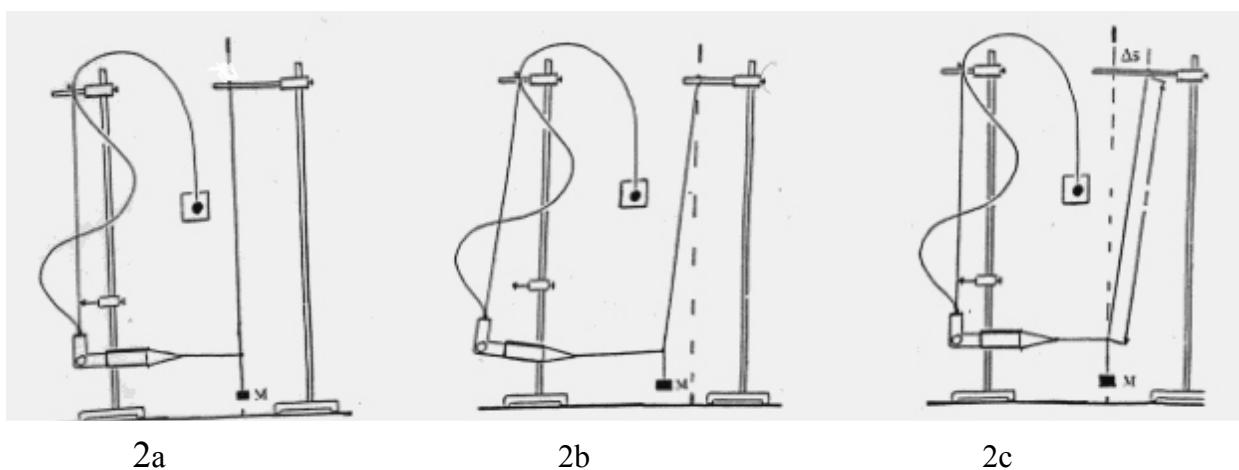


Fig. 2 - Medição da força de reação do secador com um pêndulo gravitacional (a) Secador e pêndulo em repouso. (b) Secador ligado puxando o pêndulo. (c) Secador ajustado à posição inicial devido ao deslocamento Δs da alça de suspensão.

2. Densidade do ar em função da temperatura

Para calcular a densidade do ar em função da temperatura, sob pressão constante, temos que usar a equação de estado dos gases ideais. Para uma massa de n moles, esta equação é:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T, \quad (13)$$

sendo $n = \frac{m}{M}$, a quantidade de moles, m , a massa do ar e M , a massa molar do ar.

Para uma temperatura de $T_0 = 273 \text{ K}$, obtemos a equação:

$$P_0 \cdot V_0 = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T_0. \quad (14)$$

Dividindo (14) pelo volume V_0 , temos:

$$P_0 = \rho_0 \cdot \frac{R}{M} \cdot T_0. \quad (15)$$

Para a mesma pressão temos na temperatura arbitrária T:

$$P_0 = \rho \cdot \frac{R}{M} \cdot T. \quad (16)$$

Igualando as últimas equações obtemos finalmente a relação procurada:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T}. \quad (17)$$

3. Correção de mais um erro sistemático

Até então assumimos que toda energia fornecida pelo secador fosse transformada em calor. Na realidade uma parte dela é transformada em energia cinética de translação do jato de ar e gasta para gerar som e vibrações.

Na nossa conta temos que subtrair da potência do secador a energia que não for transformada em calor. A potência corrigida é a potência do secador menos a potência gasta para outros fins. Podemos calcular, pelo menos, a energia fornecida ao secador e transformada em energia cinética do ar a fim de verificar se esta correção influencia o resultado.

Esta energia é:

$$E = \frac{m}{2} v^2.$$

A energia cinética transformada por segundo é a potência da energia cinética $P_{cinetica}$.

No nosso caso, temos:

$$P_{cinetica} t = \frac{m v^2}{2}$$

$$P_{cinetica} = \frac{m}{2 t} v^2. \quad (18)$$

Usando os valores já obtidos nas equações (9) e (10), obtemos a expressão:

$$P_{cinetica} = \frac{F_{medida}}{2} \sqrt{\frac{F_{medida}}{A \cdot \rho(T)}}. \quad (19)$$

Com os resultados experimentais já referidos obtemos o valor da potência a ser subtraída da potência do secador.

Essa correção é pequena comparada com os erros das medições feitas. Usando os dados já conhecidos podemos mostrar que ela está abaixo de um por

cento, sendo menor até que as alterações aleatórias na tensão da rede elétrica, freqüentemente observadas nos laboratórios, causadas pelas alterações da energia consumida na rede. O ligar e o desligar dos aparelhos de ar condicionado causam erros maiores.

4. Determinação experimental do processo termodinâmico

Até agora não justificamos suficientemente o processo termodinâmico envolvido na medição do calor específico c do ar. São vários os processos termodinâmicos: isovolumétrico, adiabático, isotérmico, isobárico e politrópico. Já mencionamos que a condição vigente é a isobárica. Esta afirmação pode ser justificada experimentalmente mediante o uso de um manômetro suficientemente sensível, que pode ser facilmente construído, se não existir algum em seu laboratório. Seu esquema está ilustrado na Fig. 3.

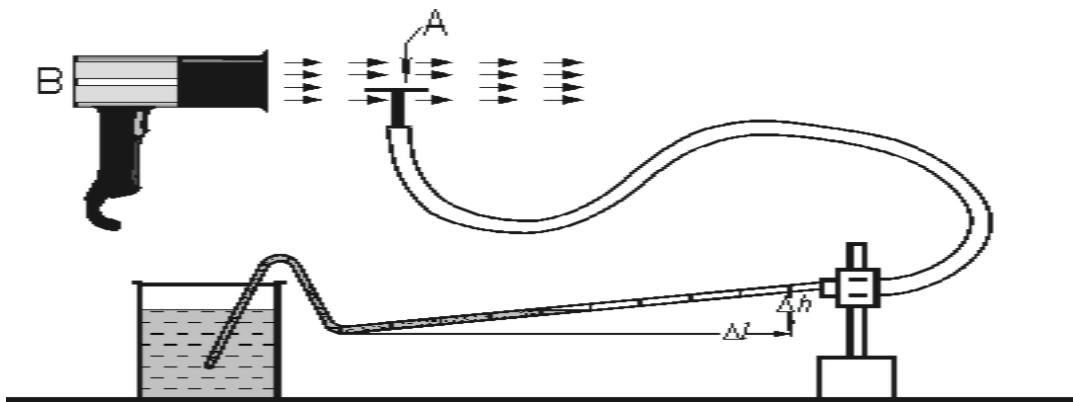


Fig. 3 - Manômetro sensível.

O manômetro consiste em um tubo fino de vidro de comprimento que pode variar de 60 a 100 centímetros, com uma das extremidades encurvada (como mostra a Fig. 3) colocada dentro de um pequeno reservatório com água colorida para facilitar a visualização. A outra extremidade é encaixada em uma mangueira de borracha bastante flexível, de mesmo calibre do tubo, e em um suporte regulável para calibrar o manômetro. A extremidade da ponta de prova deve ter um pequeno disco perfurado no centro e nela colado. Ele tem a função de manter paralelas as linhas de corrente do escoamento do fluxo de ar, nas vizinhanças da ponta. Veja a Fig. 4 (a e b).

Os resultados obtidos são inequívocos: a pressão medida no interior do fluxo de ar, e externamente ao tubo do secador, é sempre igual à pressão ambiente, ou seja, ela é a mesma dentro e fora do fluxo de ar, logo, a pressão é constante. O

processo é, portanto, isobárico ($p = \text{cte}$). Conseqüentemente, o calor específico será determinado a pressão constante e será representado como c_p .

Sugestão

Se um tubo de vidro não for disponível, pode-se usar uma mangueira fina de plástico transparente para construir um manômetro. Prende-se a mangueira a uma haste de madeira com fita crepe em intervalos regulares de 5 a 10 centímetros. Introduz-se um pequeno fio de cobre ou arame em uma de suas extremidades que será encurvada e imersa no reservatório do líquido como indicado no diagrama.

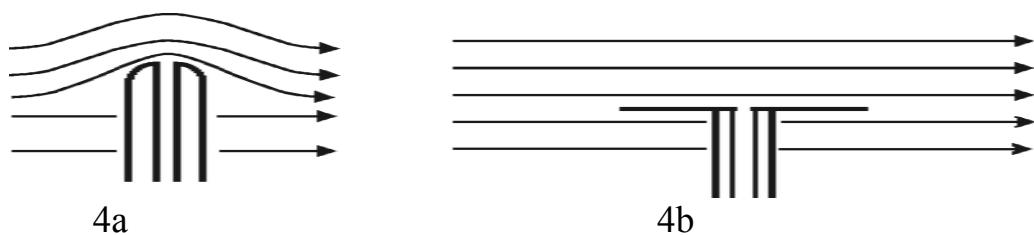


Fig. 4 - Linhas do escoamento do ar em torno da ponta de prova. (a) Surgimento de perturbações das linhas do escoamento do ar causadas pela ponta de prova sem o disco. (b) Eliminação das perturbações das linhas de escoamento mediante o uso de um disco perfurado e colado à ponta de prova.