

# Um experimento para ensino de conceitos de transferência de calor em laboratório de física

(An experiment to teach heat transfer concepts in a physics laboratory)

Everton Lüdke<sup>1</sup>, Alcides G.R. Adornes<sup>1</sup>, Cezar A. Gomes<sup>1</sup>, Rosane Bohrer Adornes<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Física, Centro de Ciências Naturais e Exatas,  
Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil*

<sup>2</sup>*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Farroupilha, Campus Julio de Castilhos,  
Júlio de Castilhos, RS, Brasil*

Recebido em 21/9/2010; Aceito em 9/1/2013; Publicado em 18/2/2013

Nesse artigo, apresentamos um experimento simples e de baixo custo para estudantes de física experimental em nível de terceiro ano universitário que possibilita a comprovação de conceitos fundamentais em fenômenos de transporte de energia na forma de calor e a solução da lei de Fourier em coordenadas cilíndricas.

**Palavras-chave:** experimento, transferência de calor, laboratório de física.

In this paper, we present a simple, low-cost experiment for experimental physics in a university third-year level which allows to corroborate the main fundamental concepts regarding heat transport phenomena and to assess the solutions of the Fourier law in cylindrical coordinates.

**Keywords:** experiment, heat transfer, physics laboratory.

## 1. Introdução

É um fato corriqueiro entre os professores de laboratório experimental de física, a dificuldade de aquisição de experimentos comerciais para a implementação de experimentos ilustrativos em termodinâmica e calorimetria em aulas práticas laboratoriais, o que é principalmente relevante em disciplinas de física geral e experimental.

Apesar do fato do ensino de termodinâmica e a física de fenômenos de transporte e transferência de calor ser extremamente importante nos primeiros três anos de cursos universitários em física, química e engenharias, ainda hoje persistem problemas na implementação de procedimentos apropriados para a investigação experimental laboratórios de física básica que possibilitem a interconexão dos conceitos fundamentais e relevantes em física de transporte de calor em sistemas simples, a sua implementação laboratorial, a um custo razoável e de construção fácil.

Tendo em vista a nossa necessidade de implementar experimentos de termodinâmica envolvendo fenômenos de transporte em laboratórios de física geral e experimental de segundo e terceiro anos para cursos de licenciatura em física, licenciatura e bacharelado em química e engenharia química, desenvolvemos uma metodologia prática com excelente custo-benefício para possibilitar

aos alunos uma discussão sobre o problema da solução da lei de Fourier em coordenadas cilíndricas e suas aplicações práticas em termodinâmica experimental.

## 2. O experimento

A Fig. 1 ilustra os detalhes de construção do experimento mostrando a cavidade com o resistor de aquecimento

Como resistor de aquecimento, foi empregado uma resistência de 40 W e 2,0 k $\Omega$  reaproveitado de um antigo ferro de soldar, o qual foi desmontado cuidadosamente e o mandril da ponteira original do ferro de soldar foi removida com uma serra de metal para possibilitar a inserção desse resistor cilíndrico de modo que toque a parede da cavidade e permaneça firme ali. É importante destacar que cuidados de manuseio devem ser tomados para preservar o revestimento externo de mica e, assim, evitando o contato elétrico entre a rede elétrica e as paredes do cilindro.

O cilindro de latão foi recortado de um vergalhão comercial, com aproximadamente 42 mm de diâmetro da base e altura de 82 mm. Foi feito um furo central com 60 mm de profundidade onde foi inserido o resistor de aquecimento e esse espaço foi preenchido com

<sup>1</sup>E-mail: eludke@smail.ufsm.br.

óleo de cárter de veículos automotivos para melhorar a condução térmica do resistor com o cilindro. A tensão nominal de rede de 60 Hz foi monitorada durante o experimento com o valor de pico AC de 217 V. Um orifício de 3 mm de diâmetro e 15 mm de profundidade foi feito para alojar a extremidade da ponteira medidora de temperatura, a uma distância de 28 mm do eixo do cilindro. Todo o conjunto foi embrulhado em um tecido de algodão espesso e bem fechado para possibilitar um bom isolamento térmico. Para o cilindro, outros materiais como alumínio e cobre podem ser empregados com bons resultados. Uma toalha de algodão é dobrada múltiplas vezes para isolar a base do cilindro com a mesa, evitando perdas de calor indesejáveis por condução pelo fundo do cilindro.

Um multímetro IMPAC IP-370TR com ponteira metálica medidora de temperatura TP-02 foi empregada para obter a temperatura no interior do cilindro e o software Data Logger que acompanha o aparelho foi empregado para a leitura automática do multímetro via porta RS-232, em intervalos de tempo de 20 segundos. A Fig. 1 mostra a colocação do termopar TP-02 em sua cavidade para determinação das curvas de aquecimento e resfriamento do cilindro.

### 3. Análise experimental

Os trabalhos dos alunos consistem em (a) coletar os dados da curva de aquecimento e resfriamento e (b) os valores de temperatura em função do raio  $T(r)$ .

Para a parte (a) do experimento, os dados consistem em obter tabelas em dados ASCII contendo temperatura versus tempo quando o resistor é ligado até a temperatura medida exceder 95 graus e, depois, quando o resistor é desconectado da rede elétrica para o resfriamento.

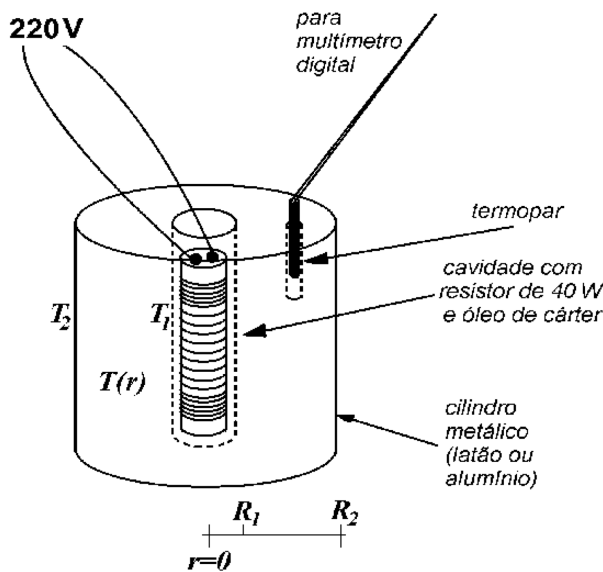


Figura 1 - Detalhes da construção do experimento que possibilita a análise térmica proposta.

Na parte (b) do experimento, a ponteira do termopar é retirada da cavidade e tocada em vários pontos na superfície do cilindro. Usando a ponteira com o termopar, pode-se obter a temperatura sobre a superfície superior do cilindro, entre  $R_1$  e  $R_2$  em intervalos de  $r$  de 3 mm e estimar  $T(r)$ , comparando com as previsões das equações fundamentais relevantes de análise e que pretendemos demonstrar experimentalmente, as quais são apresentadas e discutidas na próxima seção.

Verificamos que essas tabelas de dados são muito similares dentro de erros de 2 °C, em medidas que ocorrem em intervalos de tempo de dias, onde pudemos verificar uma boa repetibilidade das medições.

### 4. Discussão e análise

Um gradiente de temperatura em uma amostra de substância homogênea resulta em um taxa de transferência de energia dentro desse meio, que é dada pela lei de Fourier

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (1)$$

onde a derivada parcial é o gradiente de temperatura na direção normal à área  $A$  e  $k$  é a condutividade térmica, expressa por  $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ . O sinal negativo é um requisito da segunda lei da termodinâmica que requer que a transferência de energia térmica resultante de um gradiente de temperatura deve ser orientada na direção da região de maior temperatura para a de menor temperatura.

Em particular, a capacidade térmica a volume constante é definida em termos da energia interna por unidade de massa do corpo.

$$c_v = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right). \quad (2)$$

Para sólidos, a capacidade térmica é fracamente dependente da temperatura e muito pouco afetada pela pressão.

A difusividade térmica  $\alpha$ , dada por  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$  é dada por

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_v}. \quad (3)$$

Em coordenadas cilíndricas, a solução radial da equação de Fourier para transferência de calor que independe das demais coordenadas ( $\partial T / \partial \phi = 0$  e  $\partial T / \partial z = 0$ ) é dada por [3]

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( kr \frac{dT}{dr} \right) = 0. \quad (4)$$

Se o perfil de temperatura no cilindro for independente da posição radial e se houver um regime estacionário de transferência de calor, pode-se substituir a derivada parcial pela expressão

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1}. \quad (5)$$

Esse regime estacionário ocorre sempre que a temperatura em cada ponto dentro do corpo, incluindo as superfícies, é independente do tempo. Se a temperatura muda com o tempo, energia é armazenada ou removida de um corpo de massa  $m$  e capacidade térmica  $c_p$  a uma taxa de armazenamento dada por

$$Q_{arm} = mc_p \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (6)$$

Perdas de energia ocorrem devido à convecção do ar nas vizinhança do corpo, obedecendo a lei de Newton  $q = hA(T_s - T_a)$  onde  $h$  é o coeficiente de transferência de calor medido em  $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ , perda de radiação pela lei de Stefan-Boltzman e condução térmica com outros sólidos na vizinhança do experimento.

Para um cilindro homogêneo com raio interno  $R_1$  e raio externo  $R_2$  e comprimento  $L$  sendo  $T_1$  a temperatura na cavidade interna e  $T_2$  a temperatura na sua superfície externa, a distribuição de temperatura radial  $T(r)$  e a taxa de perda de calor  $q_p$  e a definição da resistência térmica do cilindro são obtidas a partir da solução da equação de Fourier com as condições de contorno apropriadas [2,3]. Portanto, essas quantidades são dadas pelas seguintes expressões

$$T(r) = \frac{T_1 - T_2}{\ln(R_1/R_2)} \ln(r/R_2) + T_2, \quad (7)$$

$$q_p = -kA \frac{dT}{dr} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_t}, \quad (8)$$

$$R_t = \frac{\ln(R_2/R_1)}{2\pi Lk}. \quad (9)$$

A tarefa de análise de dados pelos alunos consiste em coletar os dados de temperatura com o termopar em função do tempo para o aquecimento e resfriamento até uma temperatura limite de  $95^\circ\text{C}$  e pontos de temperatura em função da distância radial  $r$ , na cavidade interna ( $r < R_1$ ) e na parede externa do cilindro ( $r = R_2$ ).

De posse dos dados, os alunos podem medir o gradiente térmico entre os meios internos e externos pela Eq. (5) e calcular  $q_p$ , a difusividade térmica do material  $\alpha$ , a resistência térmica  $R_t$  e comparar os valores de  $T(r)$  estimados pela Eqs. (7)-(9) com os valores tabulados na literatura metalúrgica nos apêndices dos livros citados nesse artigo.

Como a potência dissipada pelo resistor de resistência  $R_q$  submetido a uma tensão de rede de pico  $V_p$  e dissipada primariamente na forma de calor à cavidade contendo o óleo de cárter é  $P = (\sqrt{2}V_p)^2/R_q$ , pode-se usar a lei de conservação de energia com a Eq. (6) e estimar os limites extremos da curva de aquecimento dada pela Fig. 2, após 45 minutos de aquecimento. Outra possibilidade é, sabendo-se a massa do cilindro com

uma balança digital, determinar a capacidade térmica a volume constante do cilindro, que pelos nossos cálculos resultou em um valor bem próximo a  $c_v = 3R$ .

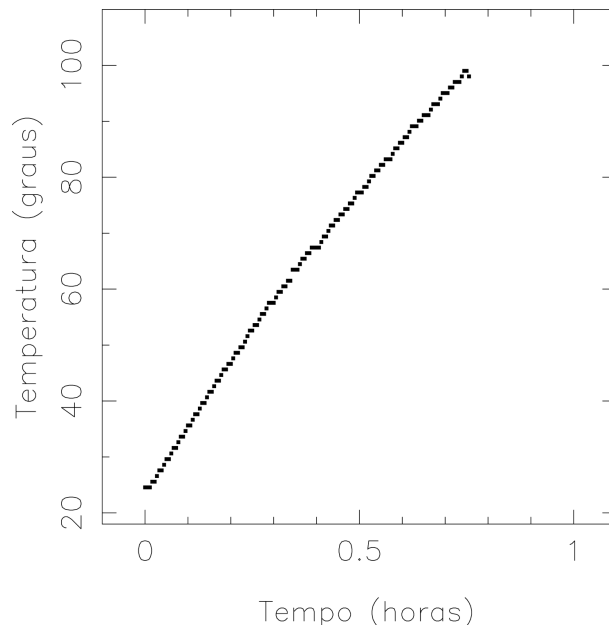


Figura 2 - Gráfico de aquecimento do cilindro.

A Fig. 3 mostra a curva de resfriamento do bloco em função do tempo, mantendo-se o revestimento de algodão e pode-se estimar a taxa de emissão de radiação na forma de corpo negro ideal. Removendo-se o invólucro, percebe-se que os pontos caem a zero com uma taxa maior, mostrando que as perdas de energia por convecção do ar se tornam importantes. Em atividades laboratoriais mais avançadas para a implementação desse experimento, pode-se tentar modelar as perdas por corpo negro e por convecção e comparar as previsões de resfriamento por esses mecanismos com o decréscimo de temperatura no ponto  $r = (R_2 - R_1)/2$ , permitindo estimar  $h$  na equação de Newton para o resfriamento citada anteriormente.

Na prática, é necessário estudar soluções numéricas para diversas geometrias de sólidos sob aquecimento e resfriamento [4], possibilitando o estudo de fenômenos de transporte dentro do rigor da física estatística, atômica e molecular [5].

Os resultados podem ser reproduzidos facilmente para outros materiais como alumínio, cobre ou ferro a dependência do gradiente de temperatura com o coeficiente de condutividade térmica  $k$  pode ser explorada com mais detalhes que os apresentados aqui, cabendo essa tarefa como sugestão ao leitor.

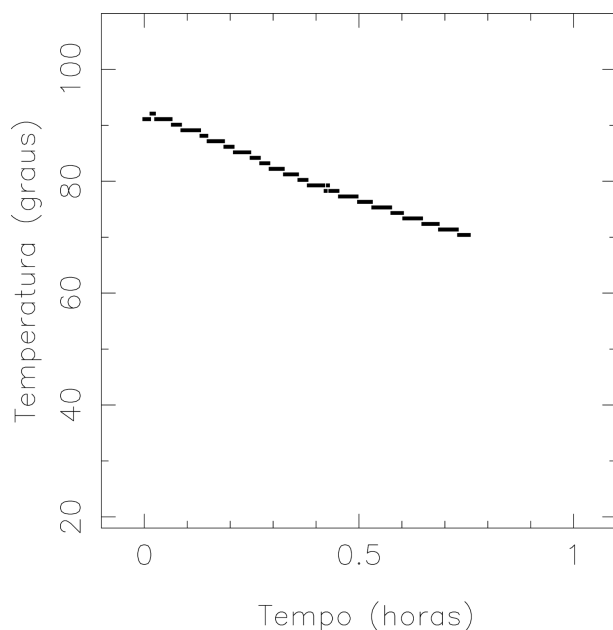


Figura 3 - Exemplo de curva de resfriamento onde se desliga o resistor de 40 W da rede elétrica, mantendo-se o envoltório isolador de algodão.

## 5. Conclusões

Nesse artigo, apresentamos e discutimos um experimento simples que envolve a análise da transferência de calor em um cilindro metálico e descrevemos um apa-

rato experimental de muito baixo custo para a obtenção de resultados experimentais que beneficiam os alunos envolvidos em disciplinas experimentais que envolvam ensaios laboratoriais em termodinâmica experimental.

Considerando o baixo custo de implementação e da instrumentação para aquisição de dados, além da boa reprodutibilidade e precisão dos resultados, o aparato discutido nesse artigo é uma excelente proposta didático-pedagógica para ensino em física experimental e fenômenos de transporte de calor em sólidos, com boas possibilidades de expansão e aprimoramento.

## Referências

- [1] D. Pitts and L.E. Sissom, *Schaum's Outline of Theory and Problems of Heat Transfer* (McGraw-Hill, New York, 1998), 2nd ed., p. 1-5.
- [2] W.M. Rohsenov, J.P. Hartnett and Y.I. Cho, *Handbook of Heat Transfer* (McGraw-Hill, New York, 1998), 3rd ed., p. 1.1-1.10.
- [3] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, T.L. Bergman e A.S. Lavine, *Fundamentos da Transferência de Calor e Massa* (LTC Editora, São Paulo, 2008), 6ª ed., p. 38-50 e p. 73-75.
- [4] F. Kreith, R.M. Manglik and M.S. Bohn, *Principles of Heat Transfer* (Cengage Learning, Stamford, 2011), 7th ed., p. 161-217.
- [5] M. Kaviany, *Heat Transfer Physics* (Cambridge University Press, Cambridge, 2008).