

## TRANSFERÊNCIA DE CALOR UNIDIMENSIONAL: UM EXPERIMENTO DIDÁTICO

### Ronaldo do Espírito Santo Rodrigues

Centro Universitário Feevale  
Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas(ICET)  
RS-239, 2755 • Novo Hamburgo • RS • CEP 93352-000 • Telefone: (51) 3586-8800  
ronaldorodrigues@feevale.br

### Ângela Beatrice Dewes Moura

Centro Universitário Feevale  
Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas(ICET)  
RS-239, 2755 • Novo Hamburgo • RS • CEP 93352-000 • Telefone: (51) 3586-8936  
angelab@feevale.br

### Cintia Ourique Monticelli

Centro Universitário Feevale  
Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas(ICET)  
RS-239, 2755 • Novo Hamburgo • RS • CEP 93352-000 • Telefone: (51) 3586-8936  
cintiam@feevale.br

**Resumo.** A visualização e o entedimento dos fenômenos físicos e matemáticos relacionados à condução de calor transiente e estacionária é uma das grande dificuldades dos estudantes de engenharia. Neste sentido, as atividades experimentais representam uma oportunidade para que ocorra superação destas dificuldades na disciplina de Fenômenos de Transporte. Considerando estes aspectos, este trabalho apresenta um experimento didático de condução de calor unidimensional. O experimento foi construído de forma a ter uma boa interface gráfica para que o estudante possa acompanhar todo o processo experimental e permitir a comparação em condições transientes, entre dois materiais diferentes ao mesmo tempo. Neste experimento o estudante tem a opção de escolha do regime, bem como da temperatura máxima de trabalho e do tempo de amostragem. Após a coleta dos dados os resultados podem ser comparados com resultados analíticos e numéricos. Este experimento parece bastante adequado para introduzir o estudante nas atividades de transferência de calor experimental. Além disto, os autores estão convencidos de que atividades de laboratório em transferência de calor oferecem a oportunidade de um procedimento claro e direto pra obter o interesse dos alunos e aumentar-lhes a motivação. Consolidando desta forma, os objetivos da disciplina de Fenômenos de Transporte do Centro Universitário Feevale.

*Palavras chave:* transferência de calor, condução de calor, aparato experimental, ensino de engenharia, fenômenos de transporte.

## 1. Introdução

Um dos aspectos relevantes no ensino de engenharia é a compreensão de fenômenos de transferência de calor, tanto no regime estacionário quanto no regime transiente. Este assunto é desenvolvido na disciplina de Fenômenos de Transporte nos cursos de Engenharia Industrial e Engenharia Eletrônica da instituição onde os autores trabalham.

A compreensão dos fenômenos de transferência requer uma sólida base matemática e física. Aliado a isto, o futuro engenheiro deve conseguir observar o comportamento e a influência das variáveis envolvidas, tais como temperatura, condutividade térmica, calor específico entre outras.

Com o objetivo de aumentar a motivação e propiciar ao aluno uma oportunidade de investigação da condução de calor, introduzindo, desta forma, um caráter experimental na disciplina de Fenômenos de Transporte, foi projetada e construída a montagem que será descrita neste trabalho.

## 2. Descrição do equipamento

A bancada de experimentação é constituída dos seguintes equipamentos:

- Duas barras (aço e latão) em suportes isolantes.
- Termopares tipo J.
- Resistência elétrica.
- Bloco de chaveamento.
- Sistema de aquisição de dados (conversor A/D e comunicação de dados)
- Computador.
- Software para aquisição e controle.

O diagrama de blocos da montagem é apresentado na Fig. 1. O computador tem duas funções. A primeira é chavear a resistência ligando-a e desligando-a através do “bloco de chaveamento”. Este bloco é uma interface de potência capaz de chavear a resistência que está conectada à rede elétrica. A segunda é armazenar os dados digitalizados de temperatura adquiridos, formando um arquivo de dados. Ao ligar as resistências, que estão na parte central do experimento, o aquecimento das mesmas, por efeito Joule, faz com que haja transferência de calor para a montagem que a circunda. Entre as resistências e as barras cilíndricas há duas placas de amianto, uma de cada lado, que tem a função de uniformizar o aquecimento, de forma a simular as condições de contorno em uma das extremidades. A outra extremidade da barra está em contato com o ambiente permitindo a transferência de calor por convecção e radiação com o meio. As duas barras cilíndricas de metais diferentes (alumínio e latão), podem ser aquecidas de forma separada ou simultânea. A área lateral das barras é toda isolada de maneira que seja possível consideração de transferência de calor unidimensional (na direção do comprimento da barra). Ao longo do do eixo de cada uma das barras estão colocados 4 sensores de temperatura (termopar tipo J), igualmente espaçados e na mesma profundidade radial.

Detalhes construtivos dos cilindros e da colocação dos termopares são apresentados na Fig.2 e Fig.3. A Fig. 4 apresenta de maneira esquemática a disposição dos componentes. A Fig. 5 mostra fotos da interface com os blocos de chaveamento, digitalização e comunicação(a) e do aparato experimental (b).

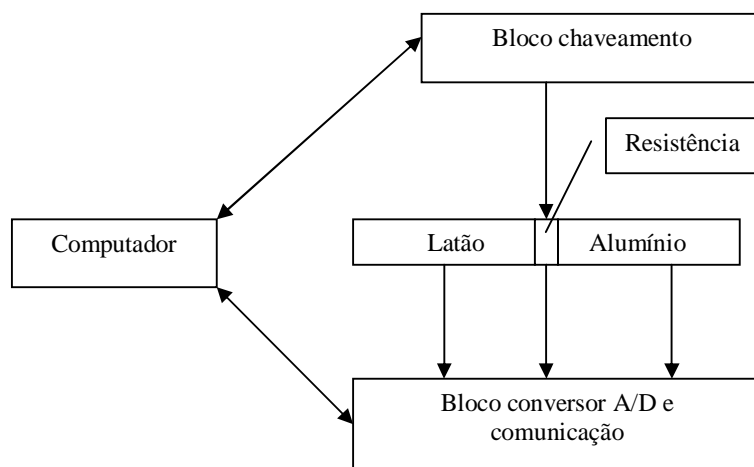


Figura 1. Diagrama de blocos da montagem.

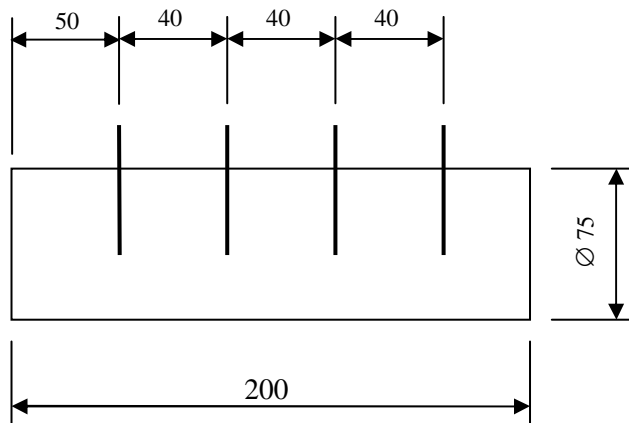


Figura 2. Dimensões das barras de latão e alumínio com termopares

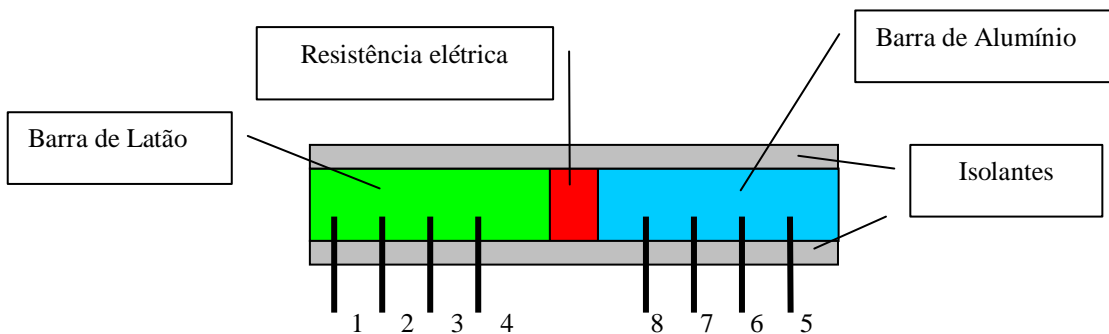


Figura 3. Esquema da montagem dos cilindros e da resistência.

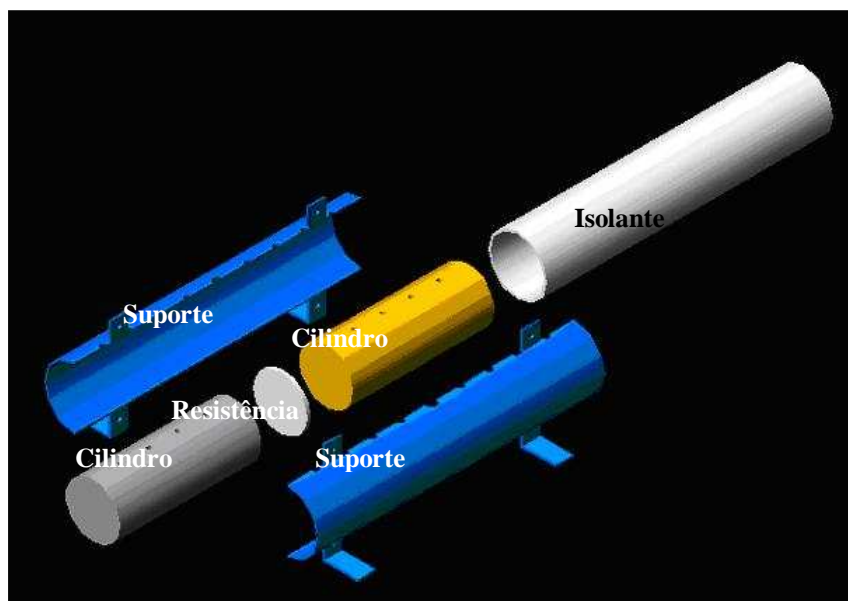


Figura 4. Esquema dos cilindros, termopares e resistência elétrica.



Figura 5. Fotos da montagem: a. blocos de chaveamento, digitalização e comunicação b. aparato experimental.

O bloco “Conversor A/D e comunicação” recebe o sinal analógico vindo dos termopares, amplifica-o e o digitaliza. Em seguida envia para o computador segundo o protocolo adequado à porta RS232 (serial). As tarefas deste bloco são desempenhadas por um CLP. A resolução típica da temperatura digitalizada é da ordem de  $1/10^{\circ}\text{C}$ .

Foram montados nove termopares no experimento, com a seguinte distribuição: quatro para a barra de alumínio (8, 7, 6 e 5), quatro para a barra de latão (1, 2, 3 e 4) e um para servir de controle de temperatura ao redor da resistência. Todos eles são do tipo J.

A potência de cada resistência elétrica é de 150W (valor nominal-eficaz). É possível controlá-la por meio de um chaveamento, de maneira que a temperatura possa ser monitorada. Por exemplo, é possível que se estipule uma temperatura, por “software”, e o “bloco de chaveamento” será acionado toda vez que for necessário que a temperatura seja maior ou menor que o valor de temperatura previamente arbitrado.

O gerenciamento do experimento é feito utilizando-se o aplicativo “Elipse”, com uma rotina dedicada ao experimento. As Fig. 6 e 7 mostram as telas do experimento em 2 instantes diferentes.

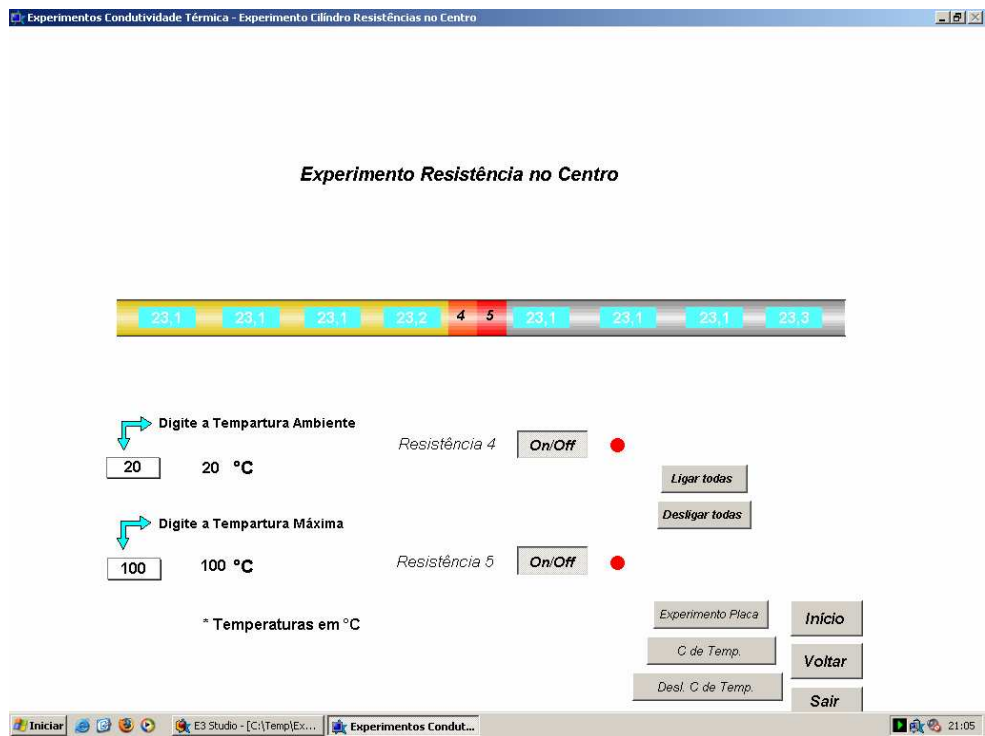


Figura 6 - Tela do experimento no tempo 0 min.

Na fig 6 estão sendo mostrados, todos os controles comentados anteriorente, inclusive a indicação da temperatura em ° C, que está sendo medida em cada um dos termopares a qualquer tempo do experimento. Além disto, a medida em que a temperatura aumenta, as cores de fundo dos retângulos onde são indicadas as temperaturas vão tendo suas cores alteradas (do verde, para temperaturas mais baixas, ao vermelho, para temperaturas mais altas). Este efeito fica claro na comparação da fig 6 com a fig 7, que mostra a tela no tempo de 20 min após o início do experimento .

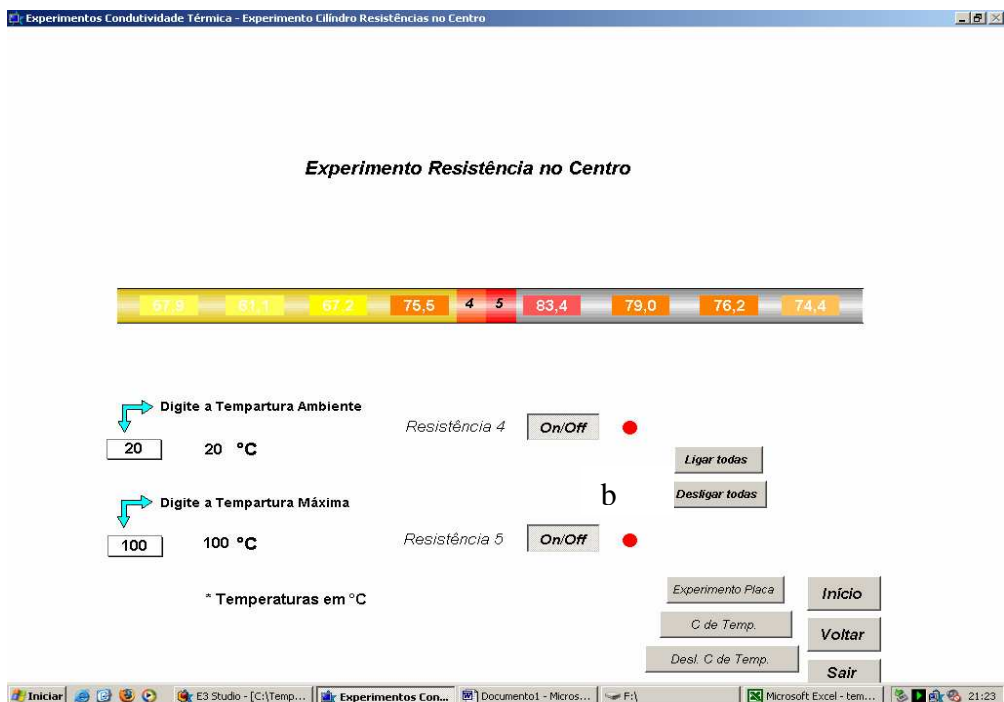


Figura 7 – Tela do experimento no tempo de 20 min. após o início do experimento.

### 3 Resultados experimentais

A seguir são apresentados alguns resultados obtidos nos testes iniciais do experimento. Primeiramente foram plotados, nas figuras 8 e 9, os gráficos da temperatura em função do tempo para todas as posições onde estão os termopares. A figura 8 mostra a rampa de aquecimento do cilindro de alumínio e a figura 9 para o latão. Estes dados correspondem ao experimento transiente sem controle de temperatura e com tempo de coleta de amostra de uma hora.

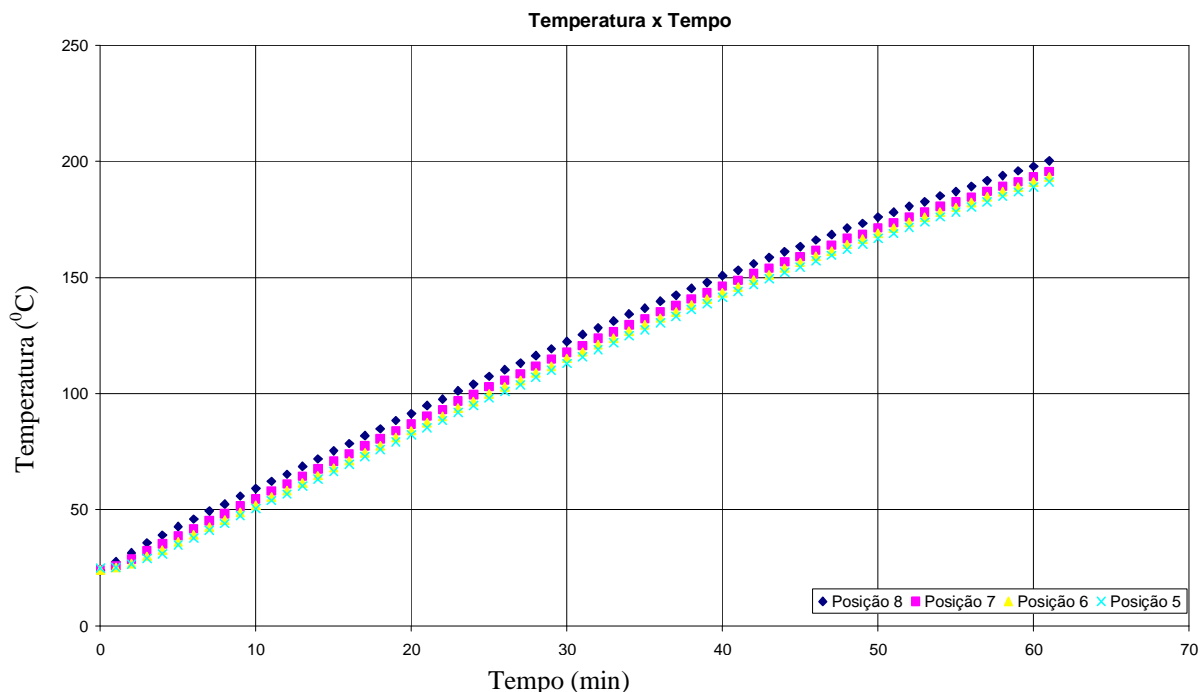


Figura 8. Distribuição de Temperatura [° C ] em função do tempo [min] – alumínio – Resultados experimentais.

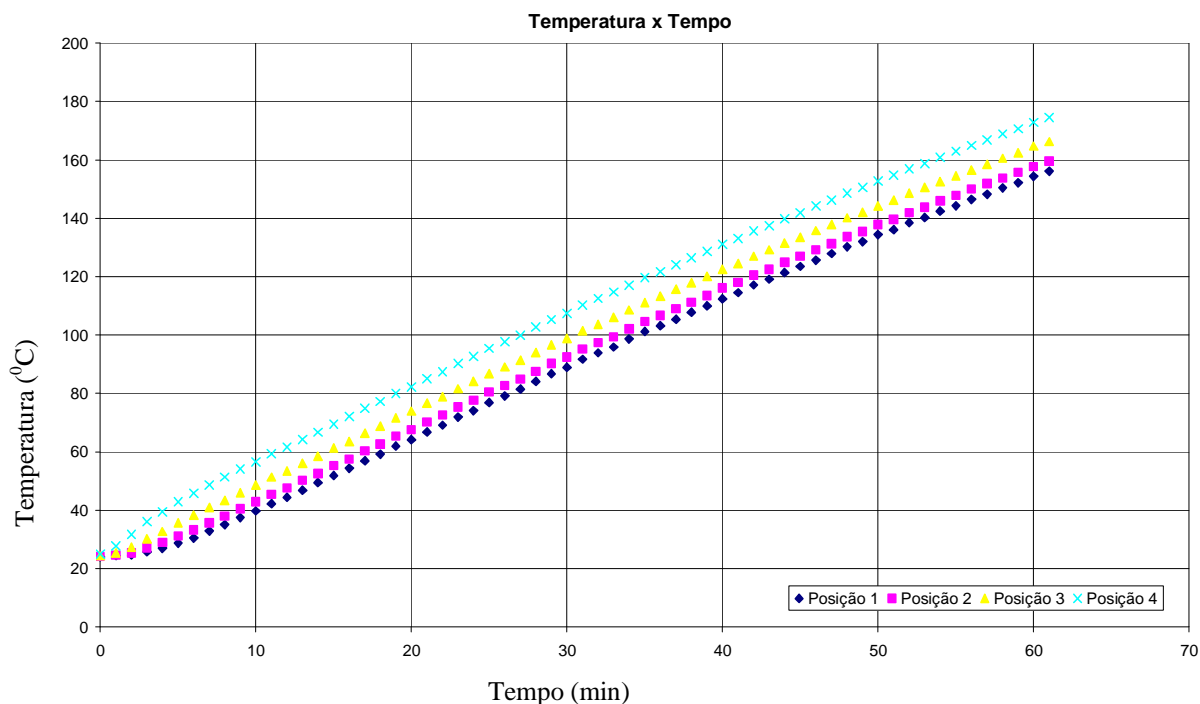


Figura 9. Distribuição de Temperatura [° C ] em função do tempo [min] – latão - Resultados experimentais.

As curvas com maiores temperaturas são os valores obtidos com os termopares mais próximos da fonte (resistência elétrica), seguindo a seqüência das posições mostradas na Fig.3.

Abaixo são mostrados os gráficos da distribuição de temperatura ao longo das barras (em função da posição) para alguns instantes: 0, 10, 20, 30, 40, 50 e 60 min. Estes são apresentados nas Fig.10 e Fig.11 para o alumínio e o latão respectivamente.

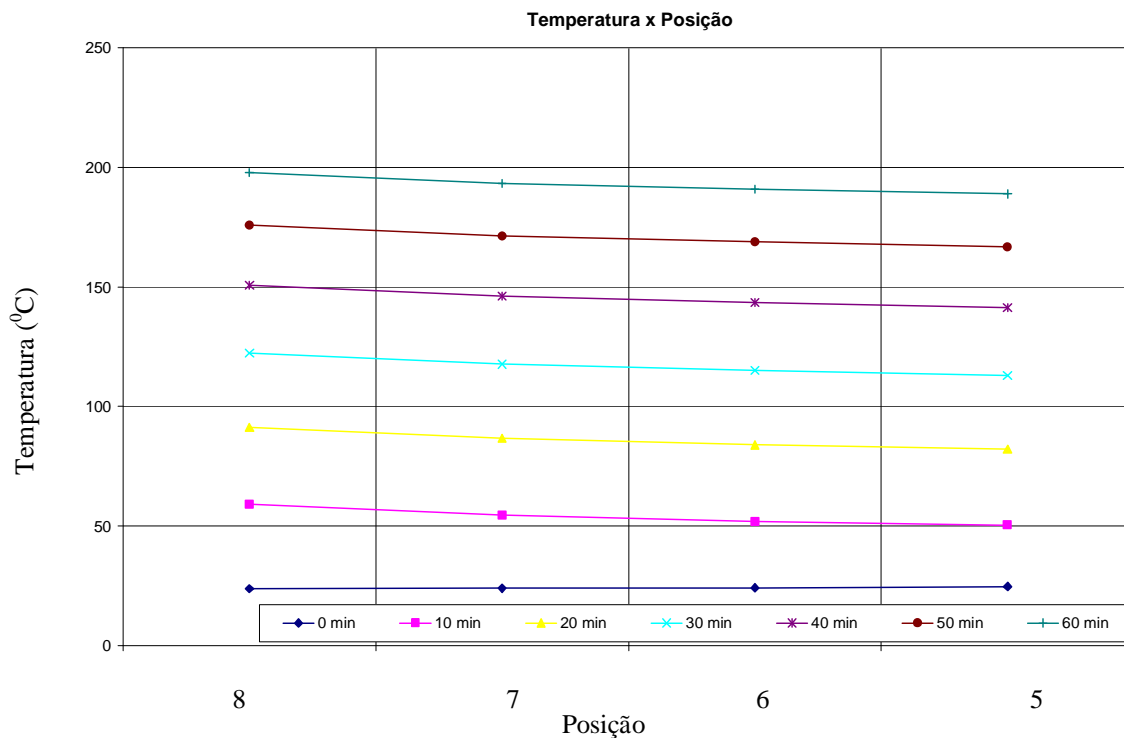


Figura 10. Distribuição de temperatura [° C] em função da posição para diferentes tempos. Material: alumínio.

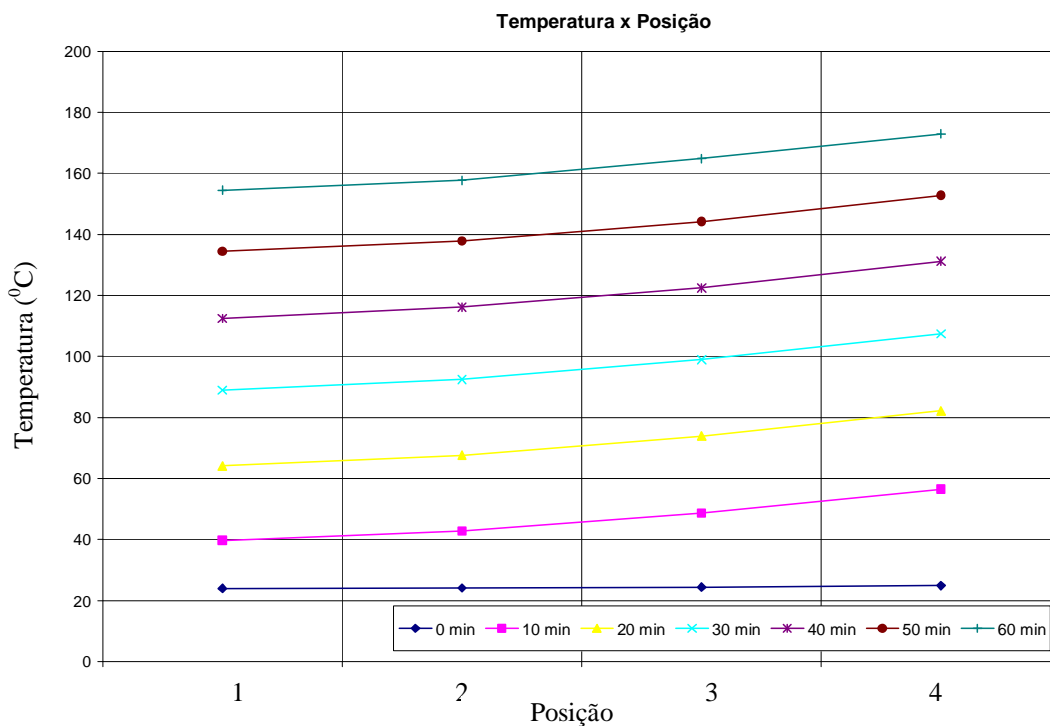


Figura 11. Distribuição de temperatura [° C] em função da posição para diferentes tempos. Material: latão.

Como o termopar utilizado foi o tipo J, pode-se supor uma incerteza associada ao sensor de  $\pm 2,2^{\circ}\text{C}$ . Isto significa que para a faixa de trabalho (entre  $10^{\circ}\text{C}$  até  $100^{\circ}\text{C}$ ), a incerteza, em termos de percentuais, deve variar de cerca de 20% no início a cerca de 2% no final.

Entre o sensor e o cilindro foi colocada uma pasta condutora para redução do tempo de resposta do mesmo, bem como para diminuição da resistência de contato.

#### 4. Análise dos resultados

Conforme os gráficos apresentados anteriormente o objetivo primário do experimento foi atingido: apresentar ao estudante o fenômeno de transferência de calor em regime transiente. Esta montagem revelou-se profícua, pois várias análises podem ser feitas a partir dos seus resultados.

Primeiramente a análise mais elementar que se pode fazer é o fato das temperaturas dos sensores mais próximos da resistência serem maiores que os mais afastados. Também pode-se fazer análise comparativa entre o latão e o alumínio, no mesmo instante. Como os sensores foram colocados de maneira simétrica com relação à resistência, pode-se compreender o papel que a condutividade térmica desempenha no processo. Através dos gráficos da temperatura em função da posição, para alguns instantes (Fig.10 e Fig.11), observa-se claramente isto. Para o alumínio este gráfico é mais próximo da horizontal que o gráfico do latão. Por outro lado o alumínio atingiu temperaturas maiores que o latão. Discussões sobre qual seria o material mais adequado para dissipação de calor ficam completamente contextualizadas diante destes resultados.

Uma vez de posse dos dados experimentais o aluno pode ser incentivado a comparação dos mesmos com resultados teóricos para problemas de transferência de calor. Um deles, por exemplo, seria a comparação dos resultados experimentais com os do modelo analítico de condução unidimensional em um sólido semi-infinito, com fluxo térmico constante na superfície e calculado a partir da razão entre a potência da resistência elétrica e a superfície de transferência. Segundo Incropera & DeWitt (2003) e Özisick (1980), a distribuição de temperatura em função do tempo (t) e da posição (x) é dada por:

$$T_{(x,t)} - T_i = \frac{2q_0''(\alpha t / \pi)^{1/2}}{k} \exp\left(\frac{-x^2}{4\alpha t}\right) - \frac{q_0''x}{k} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (1)$$

Utilizando-se a Eq.1, parâmetros tabelados (condutividade térmica, difusividade térmica, calor específico a pressão constante) (ASHRAE, 1982; Incropera, 2003) e as grandezas características do experimento (dimensões e fluxo térmico), são apresentados os gráficos da distribuição de temperatura em função do tempo para o latão (posições 1, 2, 3 e 4) na Fig.12 e para o alumínio (posições 5, 6, 7 e 8) na Fig. 13.

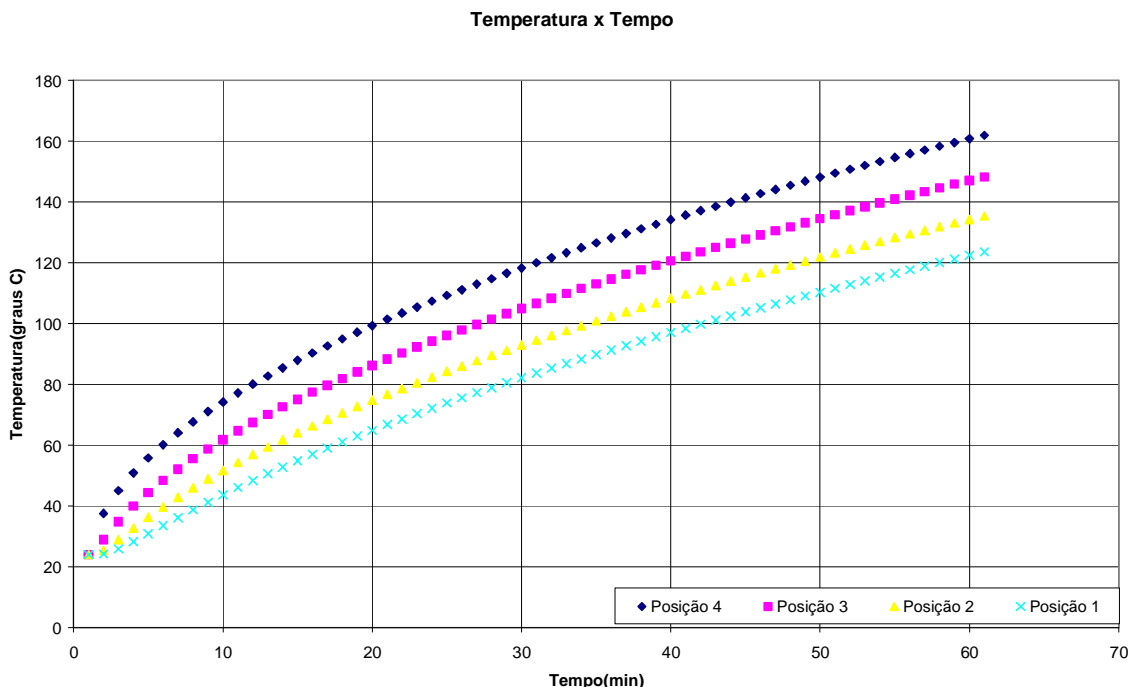


Figura 12. Distribuição de Temperatura em função do tempo para as posições 1, 2, 3 e 4 (latão) – modelo sólido semi-infinito.

Qualitativamente os resultados segundo este modelo se aproximam daqueles obtidos experimentalmente. No modelo teórico as diferenças finais de temperaturas entre os pontos extremos, num mesmo material, são maiores que as

encontradas no modelo experimental. Os valores das temperaturas nos pontos de medição experimental ficaram mais agrupados no alumínio do que no latão.

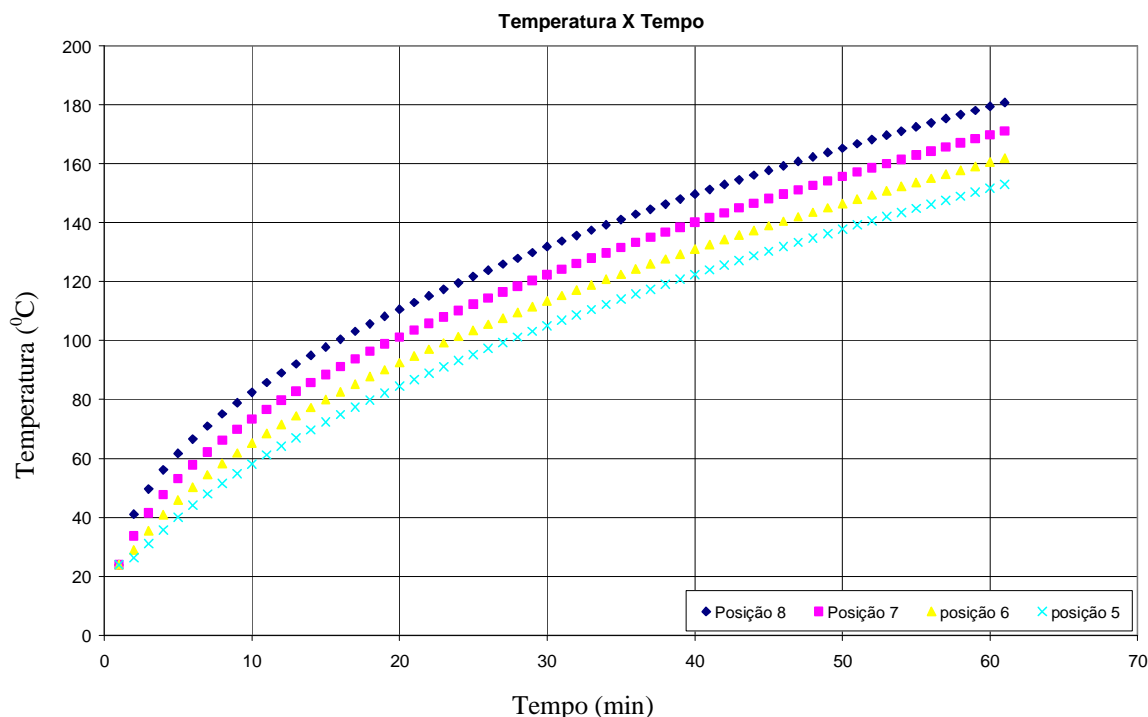


Figura 13. Distribuição de temperatura em função do tempo para as posições 5, 6, 7 e 8 (alumínio) – modelo sólido semi- infinito.

De forma a verificar quantitativamente os dados obtidos procedeu-se uma análise estatística (Hanna, 1989) entre os dados experimentais e os simulados a partir da Eq.1, e os resultados estão mostrados nas tabelas 1 e 2. Estas mostram os resultados da correlação, do “normalized mean square error” (NMSE), e do “fractional bias” (FB 9). Um bom modelo deve apresentar em relação a resultados experimentais um NMSE pequeno, um FB próximo a zero e um coeficiente de correlação próximo à unidade. Os resultados demonstram uma boa concordância entre os dados experimentais e os simulados. Isto já tinha sido verificado nos gráficos. Cabe ressaltar que o modelo teórico usado tenha sido o da condução unidimensional para sólido semi-infinito. Esta situação não corresponde à condição real do experimento, o qual experimenta condições de convecção natural na extremidade oposta à resistência. Este exemplo incentiva a discussão em aula e a busca por outros modelos teóricos mais adequados.

Tabela 1. Índices Estatísticos do latão.

Índices/Posição	1	2	3	4
NMSE	0,0252	0,0124	0,0109	0,0134
FB	0,0915	0,0147	0,0399	-0,0804
Coefficiente de correlação	0,9767	0,9736	0,9717	0,9709

Tabela 2. . Índices Estatísticos do alumínio.

Índices /Posição	5	6	7	8
NMSE	0,0243	0,0164	0,0142	0,0160
FB	0,0825	-0,0239	0,0290	0,0675
Coefficiente de correlação	0,9753	0,9731	0,9714	0,9700

## 5. Conclusões

Neste trabalho é mostrado um experimento de condução de calor unidimensional. O mesmo permite a visualização e obtenção de dados experimentais de forma separada ou simultânea para dois materiais (alumínio e latão). Igualmente é possível a escolha do tempo de amostragem e do controle ou não de uma temperatura máxima, evidenciando a versatilidade do experimento.



São mostradas as telas onde o aluno interage com o experimento e acompanha visualmente a evolução do mesmo. Da mesma forma são apresentados gráficos dos dados experimentais obtidos no experimento para a condução de calor unidimensional e transiente. As rampas de aquecimento (Fig. 8 e 9) mostraram um comportamento coerente do experimento transiente de aquecimento das barras cilíndricas. As posições mais próximas alcançaram temperaturas mais elevadas e apresentam diferenças entre os dois materiais. Desta forma fica claro para o aluno a dependência que existe entre a taxa de transferência de calor por condução e o tipo de material (condutividade). Este comportamento coerente também ficou evidente nas figuras 10 e 11 que mostram a evolução temporal da temperatura do conjunto. As temperaturas aumentam com o aumento do tempo e de forma diferente para os dois materiais.

Para se evidenciar as possibilidades de abordagens que o experimento propicia, é mostrado um exemplo de comparação entre os dados experimentais e os simulados com um modelo analítico (Eq 1). Os resultados apresentam semelhança no comportamento dos dois modelos. No modelo teórico são alcançadas temperaturas mais altas que no modelo experimental. Os valores das temperaturas nos pontos de medição ficaram mais agrupados no alumínio do que no latão, fato que também ocorreu com os dados experimentais. Corroborando com isto os resultados estatísticos confirmaram a boa relação entre os mesmos. Uma comparação similar pode ser proposta aos alunos utilizando-se modelos numéricos, por exemplo através de diferenças finitas, ou com outros modelos analíticos.

Verificou-se que a montagem despertou interesse dos alunos pois estes viram no experimento uma oportunidade de aplicação de conhecimentos teóricos. Inclusive alunos que já tinham feito a disciplina anteriormente a construção do experimento, procuraram os autores para a realização dos mesmos. Este fato, em um local de ensino em que 99% dos alunos trabalham e cursam as disciplinas a noite é realmente um fato a considerar.

Em função de tudo o que foi apresentado, e do desempenho dos alunos, pode-se concluir que o experimento é bastante versátil, permitindo a exploração de diversas condições experimentais. Além disto, o aluno também se sente estimulado a realizar comparações com dados analíticos e numéricos relacionados ao problema, consolidando o aprendizado da transferência de calor na disciplina de fenômenos de transporte. Desta maneira contribui-se para a sólida formação do engenheiro.

## 6. Agradecimentos

Ao Centro Universitário Feevale pelo aporte financeiro no desenvolvimento deste trabalho.

Esta montagem foi desenvolvida e montada graças aos esforços e compreensão do professor Ms. Ewerton Capellatti, que na época da elaboração da mesma era o Diretor do Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas (ICET), da professora Ms. Cláudia Gonçalves Pereira, na época era a Coordenadora do Curso de Engenharia Industrial e do professor Ms. Ramon Fernando Hans, que era o coordenador dos trabalhos na oficina. Graças ao empenho destes três professores e ao corpo de colaboradores do Centro Universitário Feevale, este trabalho foi possível de ser realizado.

## 7. Referências

- Incoprera, F.P. & DeWitt, D.P., 1998, "Fundamentos de Transferência de Calor", Ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, Brazil, 494 p.
- Özisick, M. N., 1980. "Heat Conduction". John Wiley & Sons, New York, 2<sup>nd</sup> edition.
- American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Handbook of Fundamentals. ASHRAE, New York, 1972.
- Hanna, S. and Paine, R, 1989 "Hybrid Plume Dispersion Model (HPDM) development and evaluation", J. Applied Meteorology, vol 28, pp. 206-224.

## UNIDIMENSIONAL HEAT CONDUCTION: A DIDACTIC EXPERIMENT

### Ronaldo do Espírito Santo Rodrigues

Centro Universitário Feevale  
Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas (ICET)  
RS-239, 2755 • Novo Hamburgo • RS • CEP 93352-000 • Telefone: (51) 3586-8800  
ronaldorodrigues@feevale.br

### Angela Beatrice Dewes Moura

Centro Universitário Feevale  
Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas (ICET)  
RS-239, 2755 • Novo Hamburgo • RS • CEP 93352-000 • Telefone: (51) 3586-8936  
angelab@feevale.br

### Cintia Ourique Monticelli

Centro Universitário Feevale  
Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas (ICET)  
RS-239, 2755 • Novo Hamburgo • RS • CEP 93352-000 • Telefone: (51) 3586-8936

cintiam@feevale.br

*Abstract. To visualize and understand the physical and mathematical phenomena related with stationary and transient heat conduction, is the major difficulty of great number of undergraduate engineering students. In this sense, experimental activities show an opportunity to elucidate several mathematical and physical concepts. Considering these aspects, this work presents a didactic unidimensional heat conduction experiment. This experiment was constructed in order to supply a quite pleasant graphic interface to allowing a better understanding, and to permit a comparison between the stationary and transient phenomena in two different kind of material at the same moment. In this experiment the student can choose between the options like transient and stationary experience, and can determine the final temperature or time, and the interval of data collection. After this, the student can also deal with the temperature data generated and compare it with analytical and numerical results. These experiments seem very adequate in order to introduce the student in the heat transfer experimental activities. Additionally, without shadow of doubt, the authors have been convinced that laboratory activities in heat transfer, offer an opportunity of a clear and direct procedure to obtain the interest of the students and wake motivations. With this the consolidation of the objectives of the course of Transport Phenomena are reached.*

*Keyword: heat transfer, heat conduction, experimental set, engineering education, transport phenomena.*