

MEDIDAS DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE SÓLIDOS E RESISTÊNCIA  
TÉRMICA DE CONTATO SOB VÁCUO

EZIO CASTEJON GARCIA\*

PEDRO CARAJILESCOV†

\* Laboratório de Integração e Testes - INPE

† Departamento de Engenharia Mecânica - PUC/RJ

O presente trabalho consiste no desenvolvimento, construção, calibração e testes de um aparato experimental para realização de medidas de condutividade térmica de materiais sólidos e de medidas de resistência térmica de contato em vácuo. Para as medidas de condutividade térmica, diversos metais comerciais foram analisados. Nas medições de resistência térmica de contato, foram analisados os efeitos da pressão de contato.

## INTRODUÇÃO

A operação de sistemas que envolvem geração e troca de calor, de forma econômica e segura, é em muitos casos limitada pelos níveis de temperatura atingidos por seus componentes. Entre estes sistemas podem ser mencionados os reatores nucleares, foguetes propulsores e satélites artificiais. Por esta razão, os processos que envolvem transferência de calor são continuamente estudados. Nos casos particulares, onde a condução térmica desempenha papel de grande destaque, o conhecimento da condutividade térmica dos materiais envolvidos e a resistência térmica que surge no contato entre dois materiais se torna essencial para o cálculo das trocas de calor que irão ocorrer.

A Condutividade Térmica. A difusão de calor em sólidos, usualmente chamada condução, ocorre por dois mecanismos principais: a) devido às "ondas de energia" originadas das interações moleculares conhecidas como "lattice waves", que estão sempre presentes; e b) devido ao movimento livre de elétrons, presente em metais e semicondutores. Estes dois mecanismos são afetados por várias outras componentes, tais como forças

moleculares, imperfeições dos cristais, etc.

Em um sistema térmico, as taxas de troca de calor por condução são calculadas através da equação de condução de Fourier, descrita por:

$$q_n = -K.A. \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right) \quad (1)$$

onde:  $q_n$  = taxa de calor [w];  
 $A$  = área da seção transversal [m<sup>2</sup>];  
 $K$  = condutividade térmica [w/m.°C];  
 $\partial T/\partial n$  = gradiente de temperatura [°C/m].

A condutividade térmica, definida por esta equação, é usualmente determinada experimentalmente. Seus valores, para sólidos, variam muito dependendo do material ser um bom condutor de calor como os metais, ou um isolante térmico como o asbesto.

Resistência Térmica de Contato. Quando superfícies nominalmente planas são colocadas em contato e atravessadas por uma taxa de calor, observa-se no local a ocorrência de um salto de temperatura, atribuída à resistência da interface do contato, conforme mostrado na Figura 1.

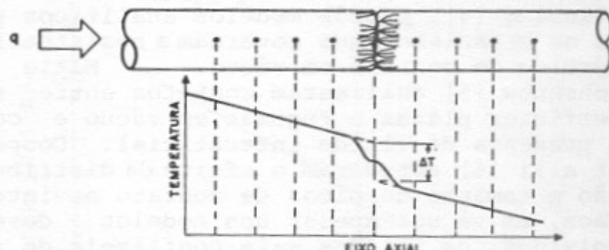


Fig. 1 Salto de Temperatura no Contato.

Esta resistência térmica é função da área efetiva de contato, das propriedades físicas e térmicas dos materiais e do eventual fluido intersticial. Obviamente, a área de contato é dependente da carga aplicada e das propriedades mecânicas dos materiais envolvidos.

Considera-se que o mecanismo de troca

de calor é basicamente dado pela condução sólida, eventual condução através do fluido intersticial e radiação entre os contatos. A contribuição da radiação pode ser desprezada a temperaturas abaixo de 600°C, como mostrado por Fenech [1] e por Clausing e Chao [2]. Em vácuo, não há fluido no interstício entre os contatos. Desta forma, desprezando a radiação, toda a transferência de calor no contato é dada apenas por condução no sólido através dos pontos de contato.

Experimentalmente, a resistência térmica de contato por ser definida na forma:

$$R_{tc} = \Delta T / q, \quad (2)$$

onde:  $\Delta T$  é o salto de temperatura devido ao contato.

Para utilização em projeto, define-se, ainda, a condutância térmica de contato como:

$$hc = \left( \frac{q/A}{\Delta T} \right) \quad (3)$$

Medidas de condutividade térmica e de resistência térmica de contato têm sido extensamente realizadas por diferentes técnicas experimentais. O "Thermophysical Properties Research Center Data Books" [3] lista aproximadamente 800 referências sobre medições de condutividade térmica em sólidos, com cerca de 600 empregando fluxo de calor linear. Apesar do número elevado de trabalhos nesta área, a discrepância de resultados é surpreendente. Desta forma, o desenvolvimento de aparatos experimentais para medidas de condutividade térmica de materiais, particularmente de materiais novos ou de interesse apenas do País, para os quais não se obtêm valores na literatura, se torna essencial.

A resistência térmica de contato tem sido analisada por diversos autores. Clausing [4], propôs modelos analíticos para os mecanismos que governam a resistência térmica de contato em vácuo. Mikie e Rohsenow [5] analisaram contatos entre superfícies planas e rugosas em vácuo e com a presença de fluido intersticial. Cooper et alii [6] estudaram o efeito da distribuição e tamanho de picos de contato na interface, em vácuo. Apesar dos modelos desenvolvidos, os valores mais confiáveis de resistência térmica, utilizados pelos projetistas, são provenientes de medidas experimentais.

O presente trabalho consiste no desenvolvimento de um aparato experimental para medições de condutividade térmica e de resistência térmica de contato em vácuo.

#### APARATO EXPERIMENTAL

O arranjo experimental consiste, essencialmente, em uma fonte quente e em uma fonte fria, entre as quais são colocados os corpos de prova e um fluxímetro de calor, montados em uma câmara de vácuo, e de um

sistema de alavanca para aplicação de carga, utilizado para medidas de resistência térmica de contato. Este arranjo é mostrado esquematicamente na Figura 2.

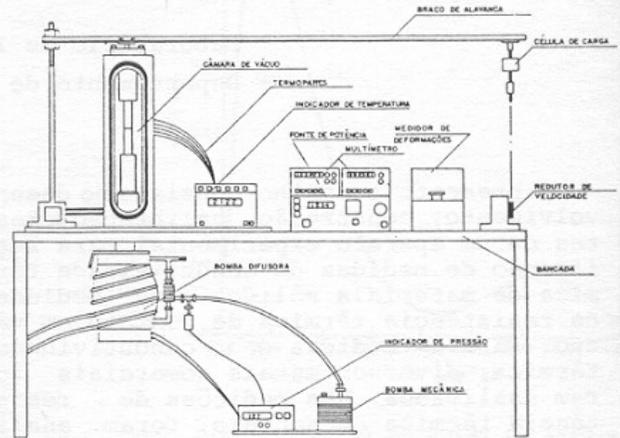


Fig. 2 Vista esquemática do aparato experimental.

As fontes quente e fria consistem em blocos de duralumínio que são, respectivamente, envolvidos por uma manta aquecedora e por uma serpentina por onde escoia a água de resfriamento. O fluxímetro consiste em um bloco de aço dotado de termopares para a medida de distribuição de temperatura axial, e localizado junto ao bloco refrigerador. Conhecida sua condutividade térmica, suas características geométricas e o gradiente de temperatura estabelecido, obtém-se a taxa de calor que atravessa os corpos de prova. Detalhes da câmara de vácuo são apresentados na Figura 3.

A utilização do vácuo permite a eliminação das perdas por convecção. Sabe-se que o erro máximo ao se desprezar a convecção para o ar em vácuo à temperatura ambiente é dado por:

$$E < \frac{35 \cdot P}{\epsilon}$$

onde:  $\epsilon$  = emissividade;  
P = pressão em Torr.

A pressão durante os ensaios realiza-se para um valor médio de  $1 \times 10^{-5}$  torr. Por tanto para um valor médio de  $\epsilon = 0,5$  obtemos um erro de 0,1%. Para a redução das perdas por radiação, procura-se trabalhar a baixas temperaturas e coloca-se um cilindro com uma camada de alumínio com alta refletividade, ao redor dos corpos de prova. As extremidades deste cilindro são conectadas à fonte quente e fria, respectivamente, estabelecendo-se assim um gradiente de temperatura próximo ao verificado nos corpos de prova e fluxímetro.

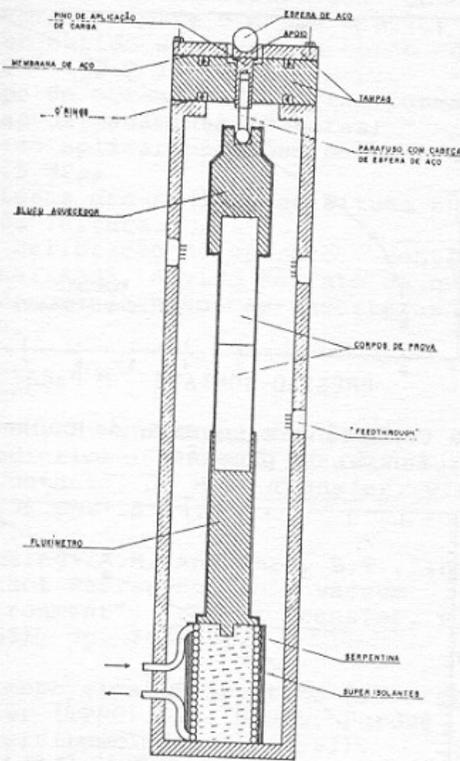


Fig. 3 Câmara de vácuo.

CALIBRAÇÃO DO FLUXÍMETRO

A precisão das medidas depende, essencialmente, do conhecimento da condutividade térmica,  $K_f$ , do material do fluxímetro. Para esta calibração, adotou-se o processo inverso, ou seja, através do ensaio de corpos de prova com condutividades térmicas previamente conhecidas, determina-se a taxa de calor que atravessa o fluxímetro. A obtenção de materiais para tais corpos padrões, representa uma séria dificuldade prática. Desta forma, foram fabricados dois corpos de prova, sendo um de alumínio e outro de aço. Amostras destes materiais foram analisados quimicamente, para a obtenção de suas composições, nos laboratórios do PMR-IPD-CTA. Através destas composições, obteve-se, da literatura, a precisa condutividade térmica deles. Assim, o material do fluxímetro foi calibrado contra estes materiais, obtendo-se os resultados mostrados da Tabela 1.

Tabela 1. Resultados da calibração.

ENSAIO	CORPO DE PROVA	$K_f$ (W/m.°C)	INCERTEZA (W/m.°C)
1	AÇO	17,91	-
2	LIGA DE ALUMÍNIO	17,69	-
VALOR MÉDIO (ADOTADO)		17,80	0,219

O valor obtido para  $K_f$  é típico de aços inoxidáveis comerciais, do qual é feito o fluxímetro. A incerteza do resultado de 1,23%, demonstra que a técnica de calibração adotada por ser considerada satisfatória.

tória.

RESULTADOS

Para as medidas, de condutividade térmica, foram fabricados dois corpos de prova, sendo um de cobre e o outro de latão.

Para as medidas de resistência térmica de contato, foram fabricados quatro corpos de prova, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Corpos de Prova.

CORPO DE PROVA	MATERIAL	RUGOSIDADE MÉDIA ( $\mu\text{pol}$ )	RUGOSIDADE MÁXIMA ( $\mu\text{pol}$ )
CP nº 1	Aço carbono	1,8	13,0
CP nº 2	Aço carbono	3,0	17,0
CP nº 3	Alumínio	0,2	1,30
CP nº 4	Alumínio	0,2	1,20

Condutividade Térmica. As Figuras 4 e 5 mostram as distribuições de temperatura dos corpos de prova.

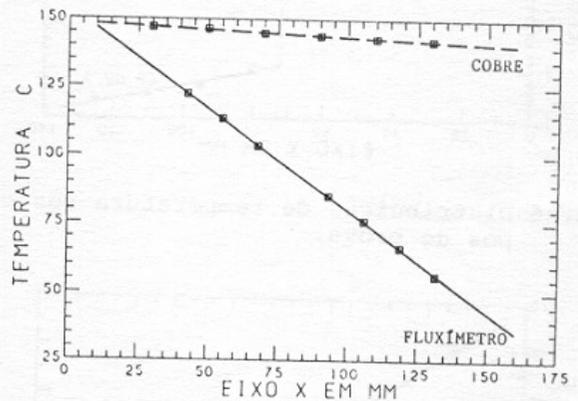


Fig. 4 Distribuições de temperatura no corpo de prova de cobre e no fluxímetro.

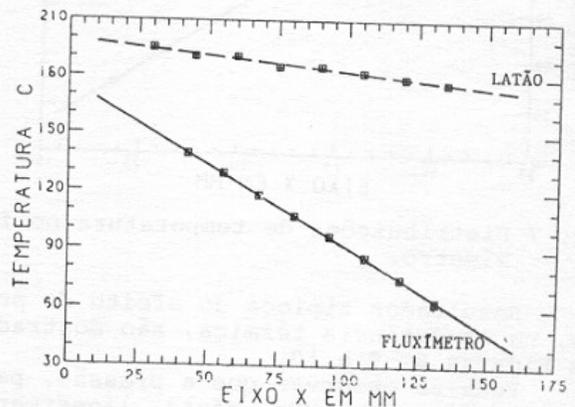


Fig. 5 Distribuições de temperatura no corpo de prova de latão e no fluxímetro.

Destas medidas, obteve-se, para o cobre

$$K = 424 \pm 7 \text{ w/m}^{\circ}\text{C}$$

e para o latão:

$$K = 144 \pm 3 \text{ w/m}^{\circ}\text{C}$$

Observa-se que a incerteza das medições situa-se em torno de 2%, e os resultados se encontram dentro das faixas de valores, para estes materiais, comumente fornecida na literatura (vide, por exemplo, ref. [7]).

**Resistência Térmica de Contato.** Foram realizadas corridas considerando todas as combinações possíveis dos corpos de prova, com a pressão de contato variando entre zero a 8,5 MPa. As leituras típicas de uma corrida são apresentadas nas Figuras 6 e 7.

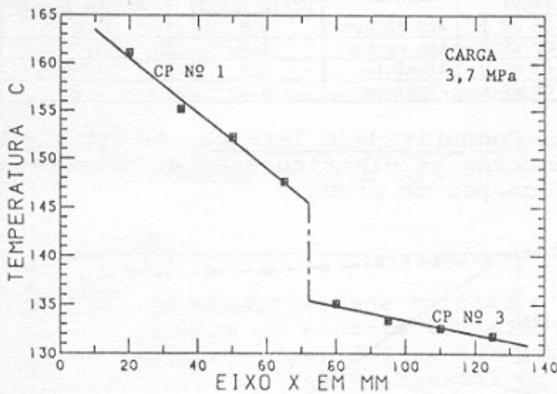


Fig. 6 Distribuição de temperatura nos corpos de prova.

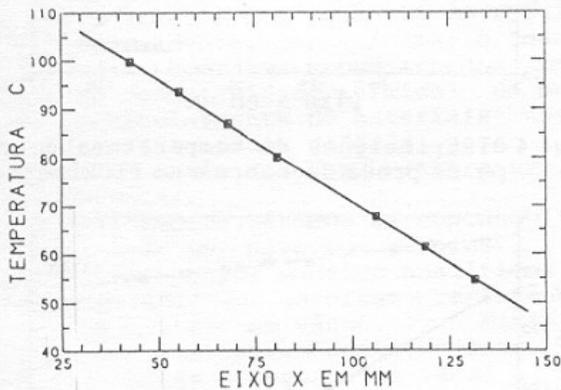


Fig. 7 Distribuições de temperatura no fluzímetro.

Resultados típicos do efeito da pressão, na condutância térmica, são mostrados nas Figuras 8, 9 e 10.

Pode-se observar que a pressão, para valores acima de 2 MPa, afeta linearmente a condutância térmica de contato. Para valores pequenos da pressão, observou-se que os resultados não são repetitivos devido às deformações plásticas dos pontos de contato, após ensaios com pressões elevadas.

Resultados adicionais podem ser encontrados na referência [8].

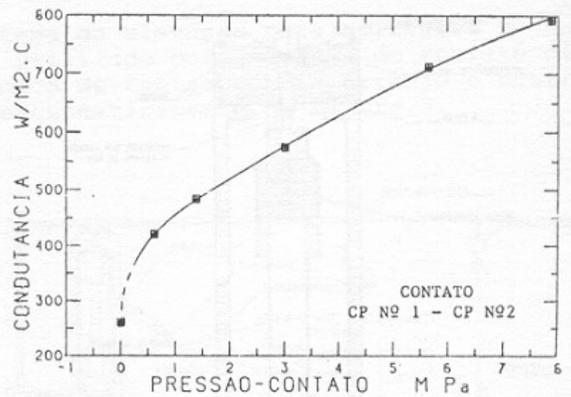


Fig. 8 Condutância térmica de contato em função da pressão.

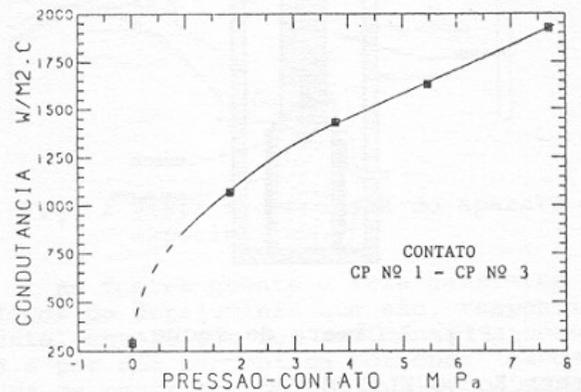


Fig. 9 Condutância térmica de contato em função da pressão.

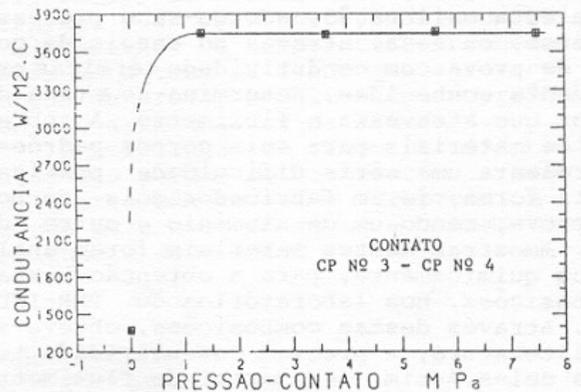


Fig. 10 Condutância térmica de contato em função da pressão.

#### COMENTÁRIOS FINAIS

Os ensaios realizados para a condutividade térmica e resistência térmica de contato produziram resultados equivalentes aos citados na literatura. Estas observações garantem a confiabilidade das medidas produzidas pelo aparato desenvolvido.

Quanto à operação do sistema, observou-se:

- . pode-se ensaiar materiais com condutividade térmica entre 5 a 500 w/m.°C;
- . o vácuo obtido situa-se em torno de  $5 \times 10^{-6}$  a  $1 \times 10^{-5}$  mbar;
- . o tempo de obtenção de regime permanente é de aproximadamente 12 horas;
- . podem-se aplicar pressões no contato em até 8,5 MPa;
- . incertezas das medidas se situam entre 2 a 8% da leitura.

A calibração do aparato continuará sendo analisada, devido ao fato de que esta exerce grande peso nas incertezas dos resultados.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Fenech, H. and Rohsenow, W.M., "Prediction of Thermal Metallic Surfaces in Contact", J. Heat Transfer, v.85 (1963) pp. 15-24.
- [2] Clausing, A.M. and Chao, B.T., "Thermal Contact Resistance in a Vacuum Environment", J. Heat Transfer, v.87 (1965), pp. 243-251.
- [3] Thermophysical Properties Research Center (TPRC) Data Books, Purdue University, Indiana, (1963).
- [4] Clausing, A.M., "An Experimental and Theoretical Investigation of Thermal Contact Resistance", University of Illinois, Nasa (1966).
- [5] Mikic, B.B. and Rohsenow, W.M., "Thermal Contact Resistance", MIT, Nasa (1966).
- [6] Cooper, M.G.; Mikic, B.B. and Yovanovich, M.M., "Thermal Contact Conductance", J. Heat Mass Transfer, v.12 (1969), pp. 279-300.
- [7] Hoyt, S.L., ASME Handbook Metal Properties. 1 ed. New York. McGraw-Hill (1954).
- [8] Garcia, E.C., "Desenvolvimento de um aparato experimental para medidas de condutividade térmica de materiais sólidos e de resistência térmica de contato", Dissertação de Mestrado, ITA, (1987).