

RESULTADOS DE MEDIDAS DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE METAIS OBTIDOS PELO MÉTODO FLUXIMÉTRICO EM APARATO EXPERIMENTAL DE BAIXO CUSTO

Josué Alexandre Aquino¹, José Antônio da Silva²

¹ Centro Universitário do Sul de Minas, Unis-MG, Brasil

² Universidade Federal de São João del-Rei, Brasil

RESUMO

A condutividade térmica é uma importante propriedade no estudo de condução de calor sendo, pois continuamente estudada. Uma das dificuldades relatadas pelos pesquisadores é a utilização métodos que resultam em equipamentos caros para sua medição. Este trabalho mostra resultados de condutividade térmica de espécimes metálicos utilizando um aparato experimental de baixo custo desenvolvido especialmente para esse fim que utiliza o método fluximétrico. O conhecimento deste fluxo é conseguido, utilizando-se corpo metálico de condutividade térmica previamente conhecida, no qual são inseridos termopares que irão fornecer os gradientes térmicos que após sofrerem tratamento estatístico, alimentarão as equações de um modelo matemático capaz retornar o valor da condutividade térmica de outro corpo de prova a ser ensaiado. A Lei de Fourier para a condução térmica unidimensional e estacionária foi a ferramenta matemática utilizada para a manipulação das variáveis extraídas dos ensaios. Os valores de condutividade térmica medidos com o aparato ficaram dentro da faixa apresentada pela literatura sendo obtido 414,7 W/m.K para o cobre eletrolítico, 103,8W/m.K para o latão CLA 360 e 51,2 W/m.K para o aço SAE 1020, com incertezas de 6,9% para o cobre e latão e 3,9% para o aço, valores aceitáveis para aplicações em pesquisa e desenvolvimento.

Palavras-chave: Condutividade. Resultados. Térmica. Aparato. Experimental.

ABSTRACT

The thermal conductivity is an important property in heat conduction study was therefore studied continuously. One of the difficulties reported by the investigators is to use methods

that result in expensive equipment for their measurement. This work shows results of thermal conductivity of metal specimens using a low cost experimental apparatus specially developed for this purpose using the method flowmetric. The knowledge of this stream is achieved using metal body with previously known thermal conductivity, in which thermocouples are inserted that will provide thermal gradients that after suffering statistical analysis, the equations will feed a mathematical model able to return the value of the thermal conductivity of another specimen to be tested. Fourier's Law for the one-dimensional and stationary thermal conductivity was the mathematical tool used for manipulating the variables extracted from the tests. The thermal conductivity values measured with the apparatus were within the range provided in the literature and obtained 414.7 W / mK for copper, 103,8W / mK for the CLA 360 brass and 51.2 W / mK for the SAE steel 1020, with uncertainties of 6.9% for copper and brass and 3.9% for steel, acceptable values for applications in research and development.

Keywords: Conductivity. Thermal. Results. Apparatus. Experimental.

INTRODUÇÃO

A condutividade térmica é uma importante propriedade de transporte que indica a taxa pela qual a energia é transferida pelo processo de difusão (INCROPERA at AL, 2008). Ela quantifica, portanto, a habilidade dos materiais de conduzirem calor. Esta propriedade termofísica tem característica específica para cada material, e depende fortemente tanto da pureza como da temperatura na qual o material se encontra além do seu estado físico, (Çengel, 2002).

Os métodos de medição das propriedades termofísicas entre elas a condutividade térmica de materiais novos ou antigos estão em constante desenvolvimento e os processos que envolvem transferência de calor são continuamente estudados e a cada ano surgem novas propostas de medição e controle das variáveis térmicas.

Este trabalho tem como proposta principal apresentar os resultados de condutividade térmica de três amostras metálicas obtida utilizando um aparato experimental de baixo custo e que opera segundo o método fluximétrico.

A lei de Fourier é a base matemática na descrição da condução térmica de calor (OZISIK, 1980). Ela é baseada em evidências experimentais e para a condução térmica unidimensional segue a seguinte formulação matemática da equação (1.0).

$$\dot{q} = -K.A.\frac{dT}{dx} \quad (1.0)$$

Onde:

\dot{q} = a taxa de calor [W]

K= Condutividade térmica [W/m.K]

A= Área da seção normal ao fluxo [m²]

$\frac{dT}{dx}$ = Gradiente térmico [°C/m].

O método fluximétrico

A determinação da condutividade térmica pelo método fluximétrico exige como condições experimentais, a uni dimensionalidade do fluxo térmico e o regime estacionário de condução de calor.

O método consiste basicamente na submissão de um corpo de prova (espécime) entre uma fonte de calor (resistor elétrico) e um dispositivo refrigerador. O valor do fluxo térmico é determinado através da aplicação da Lei de Fourier usando-se os gradientes térmicos levantados em quatro pontos num bloco metálico de composição química e condutividade térmica previamente conhecida da literatura, doravante denominado fluxímetro.

Este fluxo é o mesmo que atravessa o corpo de prova colocado em série com o fluxímetro compondo o circuito termal inserido entre a fonte quente e a fria. O conjunto fica alojado no interior de uma câmara em ambiente de vácuo, objetivando reduzir as perdas radiais de calor por convecção e envolvido por isolantes Kapton e manta de lã cerâmica a fim de se reduzir as perdas radiais por radiação. O diagrama esquemático do circuito termal é mostrado na figura 1.

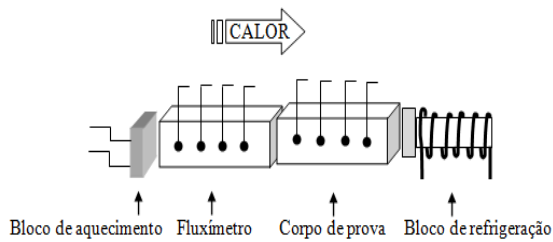


Figura 1 – Diagrama do circuito termal. (Fonte: Autores)

Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios e dentro da faixa de valores encontrados na literatura. Para o cobre eletrolítico o valor de condutividade térmica ficou determinado em $414,7 \pm 29 \text{ W/m.K}$, para o Latão 360 CLA a condutividade foi $103,8 \pm 7 \text{ W/m.K}$ e para o aço SAE 1020 o valor determinado foi de $51,1 \pm 2 \text{ W/m.k}$.

Materiais e métodos

Foram realizados três ensaios usando corpos de prova de cobre eletrolítico, latão CLA 360 e Aço SAE 1020. Como forma de simplificação, este trabalho mostra em detalhes apenas o ensaio com o corpo de prova de cobre eletrolítico e os resultados dos demais ensaios.

Estes corpos de prova foram preparados com isolamento lateral de fita Kapton e graxa térmica nas faces por onde flui o fluxo térmico principal. O conjunto foi inserido na câmara com isolamento interno de lã de cerâmica e feito o ambiente de vácuo (câmara termovácuo) atingindo em todos os ensaios 0,11 bar para a pressão interna da câmara. Os termopares foram inseridos no eixo axial dos blocos (fluxímetro e corpo de prova) e forneceram os gradientes térmicos. A figura 2 mostra o comportamento térmico do fluxímetro de alumínio. No eixo horizontal estão representadas as abscissas dos pontos onde foram alojados os termopares e no vertical as temperaturas obtidas pelos termopares nestes pontos.

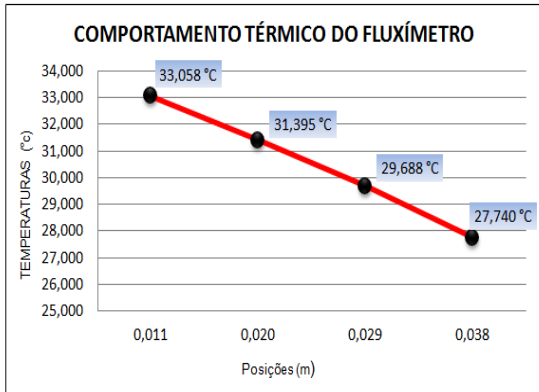


Figura 2 – Gráfico do gradiente térmico no fluxímetro. (Fonte: Autores)

Para o corpo de prova de cobre a figura 3 mostra o comportamento térmico com os gradientes de temperatura.

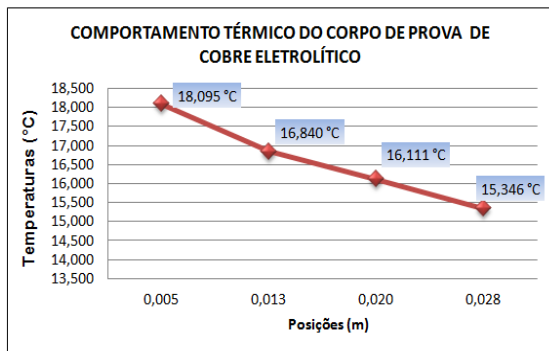


Figura 3 – Comportamento térmico do corpo de prova de cobre eletrolítico. (Fonte: Autores)

Para a aquisição dos dados de temperatura foi usado o *software Signal Express* do pacote Lab View da *National Instruments*. A tabela 1 mostra os valores de temperatura versus posição de medição no fluxímetro de alumínio cuja condutividade adotada da literatura foi 237 W/m.K. A média de temperatura neste bloco foi de 30°C.

SENSORES	TEMPERATURA (°C)	POSIÇÃO (m)
SENSOR 1	33,058	0,011
SENSOR 2	31,395	0,020
SENSOR 3	29,688	0,029
SENSOR 4	27,740	0,038

Tabela 1 – Temperatura x posição no fluxímetro de alumínio. (Fonte: Autores)

O gráfico referente a esta tabela foi mostrado na figura 2.

Para o corpo de prova de cobre os dados levantados são mostrados na tabela 2.

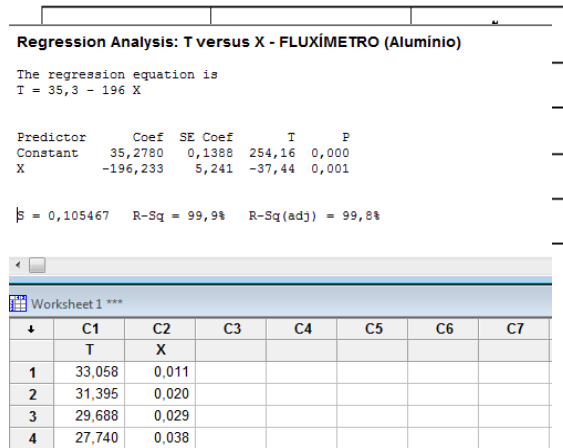


Tabela 2 - Temperatura x posição no CP de cobre. (Fonte: Autores)

O gráfico referente à tabela 2 foi mostrado na figura 3.

A tela final do ensaio com o corpo de prova de cobre é mostrada na figura 4. Cada linha colorida representa as tomadas de temperatura de cada um dos quatro termopares a cada 3 segundos. Observa-se na figura um “ripple” causado pelas constantes variações nas tomadas dos termopares cuja precisão alcança décimos de milésimos de grau Celsius.

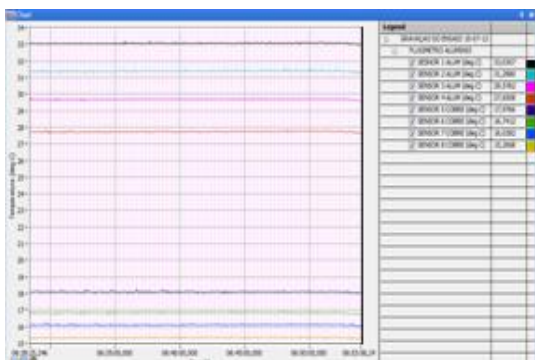


Figura 4 – Tela do “Signal Express” mostrando o final do ensaio com o corpo de prova de cobre. (Fonte: Autores)

Os dados levantados no fluxímetro e corpo de prova de cobre foram inseridos na ferramenta “Minitab” e sofreram regressão linear para ajuste da linearidade e o resultado obtido para o fluxímetro é mostrado na figura 5.

Regression Analysis: T versus X - FLUXÍMETRO (Alumínio)

The regression equation is
 $T = 35,3 - 196 X$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	35,2780	0,1388	254,16	0,000
X	-196,233	5,241	-37,44	0,001

$\beta = 0,105467$ R-Sq = 99,9% R-Sq(adj) = 99,8%

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	T	X					
1	33,058	0,011					
2	31,395	0,020					
3	29,688	0,029					
4	27,740	0,038					

Figura 5 – Tela do Minitab com a análise de variância para o fluxímetro. (Fonte: Autores)

Para este ensaio, a equação de regressão da temperatura T em função da posição X para o fluxímetro de alumínio obtida foi $T = 35,3 - 196X$.

A determinação da taxa de calor no fluxímetro de alumínio foi feita usando-se a Lei de Fourier para a condução unidimensional e estacionária adotando o valor de 237 W/m.K (fonte: Çengel (2002). para a condutividade do alumínio a 27°C.

$$\dot{q} = -K \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \rightarrow \dot{q} = 25,45W$$

O fluxo de calor através da área A da seção transversal do fluxímetro ficou então em 48.942,3W/m².

A análise de variância para o corpo de prova de cobre retornou o resultado mostrado na figura 6.

Regression Analysis: T versus X PARA CORPO DE PROVA DE COBRE ELETROLÍTICO

The regression equation is
 $T = 18,5 - 118 X$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	18,5486	0,1973	94,00	0,000
X	-118,22	10,63	-11,12	0,008

$\beta = 0,180732$ R-Sq = 98,4% R-Sq(adj) = 97,6%

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	T	X							
1	18,095	0,005							
2	16,840	0,013							
3	16,111	0,020							
4	15,346	0,028							
5									
6									

Figura 6 – Tela da ferramenta “Minitab” com os resultados da regressão para o CP de cobre. (Fonte: Autores)

Neste caso, a equação de regressão da temperatura T em função da posição X apresentada pelo “Minitab” foi $T = 18,5 - 118X$. Inserindo os dados novamente na equação de Fourier e com o valor do fluxo térmico já levantado no fluxímetro obteve-se a condutividade do cobre eletrolítico na temperatura ensaiada em K igual a 414,7 W/m.K.

Para o Latão 306 e para o Aço SAE 1020 o procedimento foi o mesmo e os valores obtidos são mostrados na tabela 3.

Tabela 3 – Valores de condutividade obtidos para os corpos de prova de latão 360 e aço SAE 1020. (Fonte: Autores).

Metal	Latão 360	Aço 1020
Condutividade W/m. K	103,8	51,2

Determinação das Incertezas

A incerteza total na taxa de calor no fluxímetro já consideradas as incertezas primárias foi determinada pela equação (2.0)

$$u_q = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial K}\right)^2 UK^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial A}\right)^2 UA^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial \left(\frac{dT}{dx}\right)}\right)^2 U\left(\frac{dT}{dx}\right)^2} \quad (2.0)$$

A tabela 4 mostra os dados de incertezas levantados nas medidas de temperaturas do fluxímetro no ensaio com o corpo de prova de cobre.

SENSOR	(\bar{T}) (°C)	S	S(\bar{T})	Incerteza do instrumento	Incerteza Global	$u^2(T)$
SENSOR 1	33,058	0,03	1,3E-03	0,33	0,33	1,1E-01
SENSOR 2	31,395	0,03	1,3E-03	0,31	0,32	9,9E-02
SENSOR 3	29,688	0,03	1,3E-03	0,30	0,30	8,9E-02
SENSOR 4	27,740	0,03	1,3E-03	0,28	0,28	7,8E-02
					$\Sigma u^2 = 1,1E-01$	
					$u_c = 0,6$	

Tabela 4 – Incertezas nas temperaturas no fluxímetro de alumínio.

As incertezas nas temperaturas do corpo de prova de cobre são mostradas na tabela 5.

INCERTEZAS NAS TEMPERATURAS NO CORPO DE PROVA DE COBRE						
SENSOR	\bar{T} (°C)	S	S(\bar{T})	Incerteza do instrumento	Incerteza global	$u^2(T)$
SENSOR 5	18,095	0,04	1,8E-03	0,18	0,22	4,9E-02
SENSOR 6	16,840	0,03	1,3E-03	0,17	0,20	3,9E-02
SENSOR 7	16,111	0,03	1,3E-03	0,16	0,19	3,7E-02
SENSOR 8	15,346	0,03	1,3E-03	0,15	0,18	3,4E-02
					$\Sigma u^2=0,158$	
					$uc=0,4$	

Tabela 5- Incertezas nas temperaturas do corpo de prova de cobre. (Fonte: Autores)

$$u(k) = \sqrt{\left(\frac{u_{\lambda}}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{u_{dT}}{dT}\right)^2} \approx 29 \text{ W/m.K} \quad (2.1)$$

A condutividade do cobre determinada foi 414,7 W/m.K. A incerteza para essa condutividade pode ser obtida pela equação (2.1).

Desta forma a condutividade final para o corpo de prova de cobre foi de 414,7± 29 W/m.K.

Analogamente, para Latão CLA 360 e para o Aço SAE 1020 considerando as incertezas primárias, combinada e expandida, os valores de condutividade para estes metais ficaram em 103,8 ± 7 W/m.k para o Latão e 51,2 ± 2 W/m.k para o Aço 1020.

Análise dos Resultados

A tabela 6 faz um comparativo entre a condutividade térmica dos três metais ensaiados neste trabalho com aqueles encontrados na literatura.

Como pode ser observado, os valores de condutividade sofrem discrepâncias ocasionadas por pequenas variações na composição química dos corpos de prova e das condições físicas de medição como, por exemplo, da temperatura média do fluxímetro e do corpo de prova.

Segundo Hoyt (1954) apud Garcia (1987), o cobre com 99,9% de pureza apresenta uma condutividade térmica de 392 W/m.K. Com 99,8% de pureza a condutividade cai para 339 W/m.K. Para o Latão (94% Cu e 6% Zn), Hoyt apresenta uma condutividade de 233 W/m.K. Com uma composição de 84% Cu e 16% Zn, esta condutividade muda para 159 W/m.K e com

formulação de 64% Cu e 36% Zn, que é a mais próxima da amostra de latão ensaiada por este trabalho, a condutividade para o latão fica em 117 W/m.K.

Do exposto fica evidente a larga faixa de variação da condutividade térmica em função da composição química das amostras.

Outro fator de interferência relevante nos resultados deste trabalho foi a temperatura de ensaio. Por exemplo, no ensaio com o corpo de prova de cobre, a temperatura média na amostra foi de 17 °C, para o ensaio com o latão a temperatura média na amostra foi de 10,5 °C e no corpo de prova de Aço a temperatura média ficou em 11,5 °C. Os valores apresentados por Wulff e Çengel foram determinados a 27 °C enquanto que Ozisik determinou as constantes a 0 °C. Nos ensaios apresentados por Garcia a temperatura média para obtenção da condutividade térmica foi de 150 °C e para Young de 20°C. Portanto, a larga faixa de temperaturas de ensaio denotaram também grandes variações nos resultados encontrados para a condutividade térmica dos metais ensaiados.

CONDUTIVIDADE W/m.K	ESTE TRABALHO	WULFF at al	HOYT	ÇENGEL	YOUNG	OZISIK	GARCIA
COBRE ELETROL.	414,7±29	401,9	392	401	385	387,6	309,5
LATAO 360	103,8±7	-	117	-	109	-	151,7
AÇO 1020	51,2±2	100,5	-	62	50,2	45	-

Tabela 6 – Quadro comparativo dos valores de condutividade térmica encontrados neste trabalho e outros retirados da literatura. (Fonte: Autores)

Conclusões

Os resultados obtidos permitem as seguintes conclusões:

- I. Os valores de condutividade térmica calculados com o auxílio do aparato experimental estão dentro da faixa apresentada pela literatura.
- II. As incertezas foram de 6,9% para o cobre e o latão e 3,9% para o aço, aceitáveis, portanto para aplicações em pesquisa e desenvolvimento.

III. A diferença entre as temperaturas de medição da condutividade adotadas neste trabalho e aquelas apresentadas na literatura mostrou-se como causa principal das discrepâncias nos valores de condutividade.

IV. As ligeiras diferenças na composição química das ligas Latão e Aço quando comparadas com aquelas tomadas como referência, também foram fator gerador de discrepâncias nos valores de condutividade térmica obtidos por este trabalho e a literatura.

Referências

ABNT. Projeto de Norma 02:135. 07-005: Desempenho Térmico de Edificações: Parte5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2003.

ASM – Metals Handbook – Failure Analyses and Prevention v.9, 9ª. Edição, Metals Park, Ohio. 1986.

CALLISTER JR., W. D. Materials science and engineering: an introduction. 4. Ed. New York: J. Wiley & Sons, 1997.

ÇENGEL, YUNUS A., HEAT TRANSFER, A practical Approach, Second Edition, McGraw-Hill, 2002.

GARCIA, E. C. **Desenvolvimento de um Aparato Experimental Para Medidas de Condutividade Térmica de Materiais Sólidos e Resistência Térmica de Contato**. 1987. Tese (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

HENRIQUE, Paulo Henrique Incerpi. **Incerteza de Medição – Método Proposto para a Análise da Conformidade do Produto**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. 2008.

INCROPERA, F. P De WITT, DP Bergman, TL Lavine, AS. Fundamentos de transferência de calor e de massa. 6. Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2008.

INMETRO. **Guia para a Expressão da Incerteza de Medição – ISO GUM 95**. 3ª edição brasileira da língua portuguesa. Rio de Janeiro, ABNT, INMETRO, 2003.

ISIDORO, Wagner Simioni, **Análise de Erros na Medição de Condutividade Térmica de Materiais Através do Método Fluximétrico**, Dissertação de Mestrado, UFSC, 2005.

J. P. Holman - Experimental Methods for Engineers.6th. Ed., McGraw-Hill, 1994.

KERN, Donald Q. Process Heat Transfer, McGraw-Hill, 1982.

Kline, S. J. and McClintock, F. A. (1953). **Describing the uncertainties in single sample.**
Ozisik, M.N."Heat Conduction", John Wiley & Sons, New York, USA., 1980.

PHILIPPI, P. C.; NICOLAU, V. P.; CUNHA NETO, J. A. B.; PERIN, M. G.; GÜTHS, S.;FERNANDES, C. P. **Procedimentos para a determinação das propriedades térmicas de materiais e elementos de edificações.** Relatório do SITERPA, UFSC. Florianópolis. 1988. Apud.

WULFF, J.; MOFFAT, W. G.; HAYDEN, W. Structure and properties of materials. J. Wiley & Sons, 1965. V. 3.

Young, Hugh D., University Physics, 7th Ed. Table 15-5. **Experiments.** *Mechanical Engineering*