



Análise de incerteza na medição da condutividade térmica usando dispositivo placa quente protegida

Geovanne Melo Gomes Pereira¹, Gilmar Guimarães²

RESUMO: A condutividade térmica de vários materiais não condutores é medida através do projeto de um aparato experimental que simula a solução da equação de difusão de calor em uma amostra. Um desses experimentos é o chamado Dispositivo de Placa Quente Protegida. Este dispositivo é normalmente projetado com um anel de proteção de aquecimento para garantir que o calor gerado na placa de central seja transferido na direção da espessura da amostra. Neste trabalho, uma placa quente sem compensação de perda de calor foi construída para determinar a condutividade térmica de uma amostra de PVC. Análises de incerteza sobre a ausência de um anel de proteção são apresentadas, bem como o resultado das estimativas de condutividade térmica considerando várias condições de aquecimento.

PALAVRAS-CHAVE: Placa quente compensada. Condutividade térmica. Incerteza de medição. Equação de Fourier. Regime permanente.

Uncertainty analysis in the measurement of thermal conductivity using guarded-hot-plate apparatus

ABSTRACT: The thermal conductivity of the various non-conductive materials is measured by a design of experimental apparatus that simulates the solutions of the heat diffusion equation in the sample. One of this experiment is the so-called Guarded-Hot-Plate apparatus. This device is usually designed with a guard ring to ensure that the heat generated in the central hot plate is transferred in the direction to the thickness of the sample. In this work, a hot-plate apparatus without heat loss compensation was constructed to estimate the thermal conductivity of a PVC sample. Uncertainty analysis about the absence of a guard ring is presented as well as the result of the thermal conductivity estimates considering various heating conditions.

KEYWORD: Guarded-Hot-Plate apparatus. Thermal conductivity. Measurement uncertainty. Fourier's law. Steady-state condition

INTRODUÇÃO

Sistemas ou processos de engenharia podem ser estudados de forma experimental ou analítica (ÇEGEL, GHAJAR, 2012). No que tange à transferência de calor, diversas constatações teóricas são comprovadas na prática, assim como o conhecimento outrora empírico é reafirmado de forma teórica. Conhecer as propriedades termo físicas dos materiais é de extrema importância para a o entendimento de vários processos que ocorrem em Engenharia.

Um dos métodos usados para a medição da condutividade térmica de um sólido é baseado na Equação de Fourier em regime permanente, a qual é dada na equação 1.

$$k = \frac{q''L}{\Delta T} \quad (1)$$

Onde k é coeficiente de condutividade térmica, q'' é o fluxo térmico por unidade de área, L é o comprimento da amostra, ΔT é a diferença de temperatura entre uma superfície e outra da placa.

Essa relação pode então ser simulada experimentalmente através do dispositivo de placa quente compensada (ASTM C177, 2019). Neste dispositivo, uma amostra em forma de placa plana é colocada em sanduíche entre uma placa quente e duas placas frias em

condições tais que o fluxo de calor que atravessa a área central da amostra é unidirecional. Assim, nas condições de regime permanente, a condutividade térmica pode ser determinada pela medição do fluxo de calor e do gradiente médio de temperatura na amostra. Nesse trabalho, propõe-se a medição da condutividade térmica usando-se um dispositivo de placa quente, porém sem o anel de guarda de perdas de calor laterais.

Como o anel de guarda não está presente, este trabalho pretende além de determinar a condutividade térmica de uma amostra de PVC, estimar as perdas laterais devido a convecção de calor para o ambiente, definidas pela Lei do resfriamento de Newton e calculadas em cada superfície da amostra exposta ao ambiente através da equação 2.

$$q'' = h(T_{sup} - T_{\infty}) \quad (2)$$

Onde h é o coeficiente de transferência de calor, T_{sup} é a temperatura de cada superfície e T_{∞} é a temperatura do ambiente.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do experimento, utilizou-se duas placas frias de 30 por 30 centímetros, uma placa quente de mesma dimensões laterais e uma resistência de 14,5 Ω , sendo que as placas de PVC analisadas possuíam área de 0,09 m² e espessura de 0,025 m. Foram instalados na amostra 7 termopares do tipo K e 1 termopar do tipo T. Os termopares localizados no centro das amostras foram numerados com algarismos ímpares, em ordem crescente de baixo para cima; enquanto os termopares localizados nas extremidades foram numerados com algarismos pares. Os sinais de temperatura foram medidos usando-se uma unidade de aquisição de dados LXI 34972A Keysight® comandados pelo software Agilent BenchLink®. O sistema de montagem está representado na figura 1. Além disso, o sistema foi isolado com Poliestireno Expandido, de forma a diminuir as perdas de calor laterais, conforme observado na figura 2.

Figura 1 – Localização dos termopares e montagem do experimento



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 2 – Montagem do experimento



Fonte: Elaborado pelo autor

O calor foi gerado por efeito Joule usando-se vários valores de tensão e corrente, medidos por uma fonte BK Precision® 9206. O calor gerado na resistência de aquecimento e aplicado nas amostras de simétricas de PVC foi então retirado através do uso de duas placas de resfriamento refrigerado por um banho térmico, denominadas

placas frias. Essas placas, com a potência gerada pela fonte, tendem a esquentar. Entretanto, esse calor é retirado delas pelo circuito de água alimentado

Estabeleceram-se 3 valores de tensão: 10 V, 15 V e 20 V para a obtenção da condutividade térmica. Observa-se que para cada valor de tensão imposta, obtêm-se diferentes pares de fluxo de calor e gradientes de temperatura, sendo a Eq. (1) válida somente sob condições de regime permanente. Assim, para cada teste, os valores de temperatura eram monitorados – obtendo-os em intervalos de 30 minutos - até que se percebesse que o regime permanente havia sido atingido. Para os valores de ΔT obtidos em regime permanente, determinou-se a condutividade térmica do material para a placa inferior, denominado k_1 , e para a placa superior, denominado k_2 , através da Eq. (1).

RESULTADOS FINAIS

Na tabela 1, tem-se o valor médio de condutividade térmica calculado a partir dos 3 testes, tanto para a placa inferior quanto para a superior (k_1 e k_2 , respectivamente). Além disso, a tabela contém os valores de calor perdidos por convecção, em média, para cada valor de tensão aplicada (dados por q , em Watts), e apresenta a potência relativa a cada diferença de tensão elétrica (expostos em P , em Watts). Para o cálculo do fluxo de calor, admitiu-se $h = 2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (INCROPERA, DEWITT, 1998). Este valor foi assumido devido a presença do isolamento nas laterais feito com Poliestireno Expandido. Outros valores contidos na tabela são as temperaturas médias em ambas as faces do PVC depois que o regime permanente foi atingido, sendo T_1 a temperatura da face superior (próxima à placa quente) e T_2 a temperatura da face inferior (próxima à placa fria), em graus Celsius.

Tabela 1 – Condutividade térmica do PVC obtida para tensões variadas

Tensão [V]	k_1 [W/m K]	k_2 [W/m K]	q [W]	P [W]	T_1 [° C]	T_2 [° C]
10	0,176	0,188	0,114	6,90	31,77	26,58
15	0,184	0,186	0,882	15,52	38,98	27,33
20	0,197	0,182	1,515	27,59	48,82	28,61

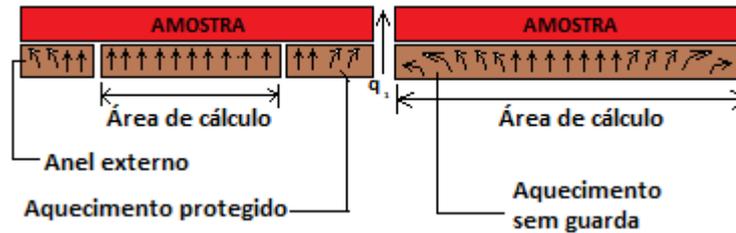
Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo Maksimov *et al* (2002), a condutividade térmica do PVC varia entre 0,151 e 0,21 W/mK, a depender do valor de potência aplicado e das variações do material. Todavia, tem-se um valor médio de 0,18 W/mK. Assim, comparando com os valores obtidos e expostos na tabela 1, tem-se erros de 1,10%, 2,7% e 5,01% para tensões de 10, 15 e 20 V respectivamente. Além disso, analisando o calor perdido e a potência, observa-se que as perdas por convecção correspondem a 3,30%, 11,36% e 10,98% para as respectivas tensões.

Apresenta-se na figura 4 um esquema das linhas de fluxo de calor presentes em uma placa de aquecimento com e sem anel protetor. Observa-se que no dispositivo com

guarda, garante-se que o fluxo de calor que atravessa a região de cálculo é unidimensional (linhas paralelas) o que não acontece na configuração sem proteção. Nesse caso, as linhas de fluxo não são paralelas em toda a região.

Figura 4 – Diferenças entre as perdas de calor para um sistema com e sem guardas



Fonte: Elaborado pelo autor

CONCLUSÃO

Após a realização do experimento sem guardas apresentar erro máximo de 5%, conclui-se que para utilização da placa quente com fins didáticos, não é necessário inserir a proteção, o que é bastante vantajoso visto que inserir a guarda pode ser oneroso e exige maior dificuldade na montagem. Entretanto, para aplicações que irão utilizar tensões mais altas, seguir a norma C177-19 se torna importante, visto que quanto maior a tensão aplicada, maiores serão as perdas, o que não ocorre na montagem protegida pois se restringe a área de cálculo a uma região em que o fluxo de calor é unidimensional. Isso se deve ao fato de que a placa quente compensada é um equipamento absoluto, ou seja, a geração de calor e as temperaturas do banho são estabelecidas no experimento.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C177-19**: Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus. 2019. Disponível em: <https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?C177+19>. Acesso em: 14 jun. 2019.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J.. **Transferência de calor e massa**: Uma abordagem prática. 4. ed. Porto Alegre: Amgh, 2012.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P.. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 4. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 1998.

MAKSIMOV, R. D. *et al.* **Mechanics of Composite Materials**: Elastic and thermophysical properties of poly(vinyl chloride) and chlorinated polyethylene blends. 2. ed. Moscow: Polym, 2002.

¹Graduando em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG

²Professor, Dr., Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG