

TÉCNICA PARA ESTIMAÇÃO SIMULTÂNEA DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE MATERIAIS COMPÓSITOS

Luiz Augusto Pereira de Abreu¹ (IC), Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá

Palavras-chave: Capacidade de Calor Volumétrica. Compósitos. Condutividade Térmica. Fibra de Vidro. Método de Gauss.

Introdução

O estudo em material compósito destaca a crescente importância global dos materiais compósitos devido às suas vantagens únicas (SATHISHKUMAR et al., 2014), (BIAN et al., 2021), como resistência, leveza e durabilidade. No entanto, para potencializar ao máximo o uso desses materiais em aplicações industriais, é essencial compreender seus comportamentos mecânicos e térmicos.

As propriedades térmicas, como a condutividade térmica (k) que representa a capacidade do material de conduzir calor e a capacidade de calor volumétrica (ρc_p) que se refere à quantidade de energia necessária para causar uma variação de temperatura, desempenham um papel fundamental na análise do comportamento térmico dos compósitos. A determinação dessas propriedades envolve várias técnicas experimentais, cada uma adequada a diferentes situações.

Recomenda-se que compósitos reforçados com fibra de vidro considerem a condutividade térmica como um parâmetro importante (CZINHOS; DAUM, 2007). Também, técnicas como o método da placa quente protegida medem apenas a condutividade térmica (JANNOT et al., 2009). Abordagens não estacionárias, como o fio quente transitório e o método flash a laser, permitem medições adicionais, mas têm limitações em relação à temperatura ambiente e materiais isolantes (PALACIOS et al., 2019). A Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) é comumente usada, mas é mais eficaz em altas temperaturas e com amostras homogêneas (YANG; LIU, 2018).

No entanto, essas técnicas têm limitações, incluindo restrições de temperatura e materiais. Este estudo visa superar essas limitações, estimando simultaneamente a condutividade térmica e a capacidade de calor volumétrica de um compósito de resina epóxi e fibra de vidro. Usando técnicas experimentais baseadas no método de Gauss em uma amostra específica, o estudo busca fornecer estimativas precisas das propriedades térmicas. Isso é relevante para otimizar o uso desses

compósitos em setores industriais como aviação, automobilística e construção, enquanto também contribui para o avanço do conhecimento em materiais compósitos.

Metodologia

Aspectos experimentais

A análise dos coeficientes de sensibilidade é fundamental para otimizar a realização de experimentos. Isso envolve determinar os aspectos experimentais mais relevantes, como a posição do termopar na amostra, a intensidade do fluxo de calor e o tempo de aquecimento da amostra. Esse coeficiente é a derivada parcial de primeira ordem da temperatura em relação ao parâmetro que se deseja analisar.

As Figuras 1 e 2 mostram os comportamentos das sensibilidades modificadas para a amostra de compósito em diferentes posições. Nos materiais compósitos, como o estudado, fica claro que os coeficientes são mais altos na superfície da amostra ($x=0$), pois o termopar está próximo da região aquecida. No entanto, medir a temperatura nesses locais não é viável, uma vez que os coeficientes estão correlacionados, impossibilitando estimar simultaneamente as propriedades térmicas.

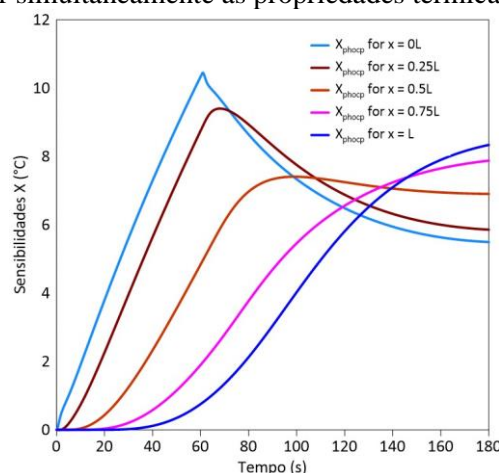


Figura 1 - Coeficientes de sensibilidades da capacidade de calor volumétrica em diferentes posições.

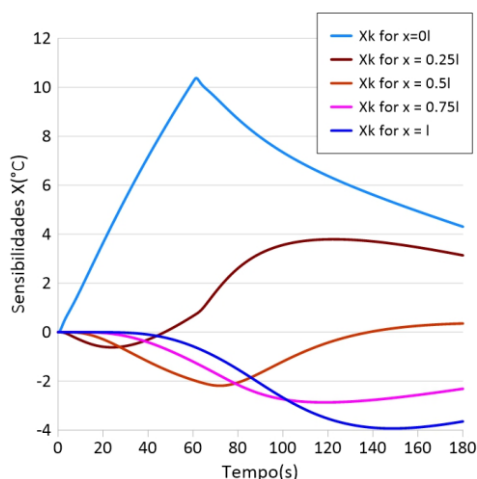


Figura 2 - Coeficientes de sensibilidade da condutividade térmica em diferentes posições.

Nas regiões intermediárias da amostra, os resultados foram inferiores, e a introdução dos termopares dentro da amostra causaria descontinuidade. Portanto, a superfície inferior da amostra ($x=I$) se mostrou a mais adequada para maximizar os coeficientes de sensibilidade. Consequentemente, o termopar foi colocado na superfície inferior das amostras durante os procedimentos experimentais. Por fim, percebeu-se que a maximização dos coeficientes eram diretamente proporcionais a maximização do fluxo, o qual foi escolhido pelas limitações dos fabricantes do aquecedor resistivo, do transdutor e pela máxima diferença de temperatura desejada.

Procedimento Experimental do Método da Placa Quente

Almejando-se medir a condutividade térmica do compósito é montada uma bancada experimental representada pela Figura 3.

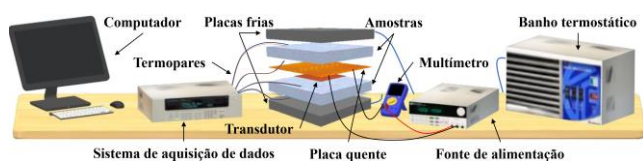


Figura 3 - Representação experimental do Método da Placa Quente.

A bancada experimental, montada para medir a condutividade térmica de um compósito, usa uma placa quente feita de Kapton, com dimensões semelhantes a uma folha de papel e uma resistência de cerca de 13Ω , ligada a uma fonte de corrente contínua. Para evitar espaços de ar entre as amostras e o aquecedor, são usados suportes de madeira pressionados por sargentos.

Quatro termopares do tipo T são utilizados, um para monitorar a temperatura ambiente e os outros para medir temperaturas nas amostras e na placa quente, todos fixados com fita adesiva. Todos estão conectados a um

sistema de aquisição de dados controlado por computador. Testes são realizados para determinar a potência necessária para atingir o gradiente térmico desejado no regime permanente.

A montagem experimental é simétrica, com amostras de seção quadrada de cerca de 100 mm e espessura de 4 mm. Uma superfície das amostras é mantida em contato com uma placa fria para obter uma transferência de calor unidirecional, enquanto a outra superfície é aquecida por um aquecedor resistivo entre as duas amostras.

A bancada inclui um transdutor de fluxo de calor para medir o fluxo estacionário recebido pelas amostras e usa isolamento de isopor para minimizar a fuga de calor lateral. As temperaturas das duas superfícies das amostras são coletadas usando termopares do tipo T, e a diferença entre essas temperaturas é usada para calcular a condutividade térmica do compósito através da Lei de Fourier.

Foram coletados dados de 60 pontos em uma frequência de 0,1Hz após 4 horas do início do experimento, com o regime permanente atingido em cerca de 1h, devido ao uso da placa fria. O experimento também menciona o uso de duas placas frias e isolamento de isopor para manter o fluxo de calor o mais unidimensional possível.

Procedimento Experimental do Método Sanduíche

O estudo obteve simultaneamente a condutividade térmica e a capacidade de calor volumétrica de um compósito. Para isso, utilizou-se uma montagem experimental como na Figura 4.

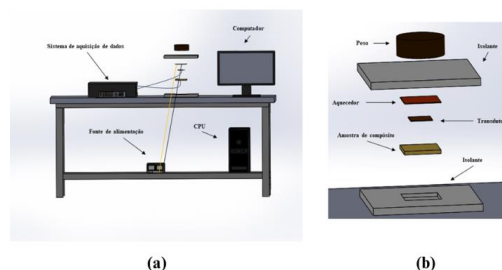


Figura 4 - Representação experimental do Método Sanduíche. A montagem inclui a aquisição de dados, onde as temperaturas são coletadas pelo termopar e pelo transdutor, um computador que controla os parâmetros, um termopar tipo T para medir as temperaturas, um transdutor para medir o fluxo de calor, um aquecedor resistivo de Kapton para aquecer a amostra com energia da fonte de alimentação e a própria fonte de alimentação que fornece a potência ao aquecedor resistivo. No entanto, devido às características isolantes do material compósito, a perda de calor é significativa, e o transdutor é usado para medir o fluxo real aplicado à amostra, como mostrado na Figura 5.

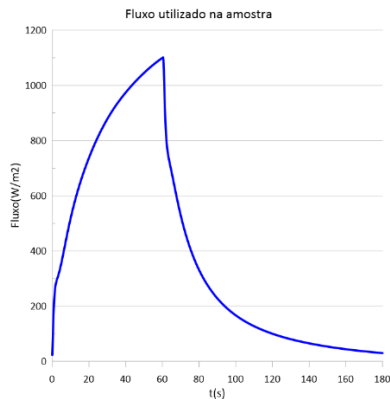


Figura 5 - Fluxo imposto na amostra.

Na Figura 5, fica evidente que o tempo de aquecimento foi de 60 segundos, com um tempo total de experimento de 180 segundos, resultando em uma diferença de temperatura apropriado para estimar as propriedades térmicas do material.

A amostra do compósito possui as mesmas dimensões do aquecedor (100x100x10 mm), garantindo que toda a superfície da amostra seja aquecida, tornando a transferência de calor unidimensional. Além disso, para minimizar as perdas de calor, foi utilizado isopor para isolar a amostra, mesmo que haja alguma perda de calor para o ambiente devido ao uso de dois materiais isolantes.

Resultados e discussão

Resultado utilizando o Método da Placa Quente

Apresenta-se a seguir à média e o desvio padrão de 5 medidas para a medição da condutividade térmica da amostra de compósito, como pode-se perceber na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultado da Condutividade -Placa Quente

Média ($Wm^{-1}K^{-1}$)	0,157
Desvio Padrão ($Wm^{-1}K^{-1}$)	8,37e-4

Logo, por haver algum grau de incerteza nas medições, seja devido à amostra não ser exatamente uniforme, ou seja, por haver perda de calor pela lateral do experimento, utilizou-se lã de fibra de vidro ao redor da montagem. Entretanto, pela pequena discrepância entre o valor médio, pode-se afirmar que a técnica foi conduzida satisfatoriamente e que os resultados são confiáveis, tal fato é comprovado pela pequena magnitude do valor de desvio padrão.

Resultado utilizando Gauss

Em Holman (2012), tem-se que para obter uma análise estatística dos dados experimentais obtidos, considerando os erros pertencentes ao experimento, é necessário obter pelo menos 20 medidas para que se tenha uma análise considerável confiável. Dito isso, utilizando os conceitos estatísticos citados em Guimarães e Azevedo Júnior,

(2020); realizou-se um teste de estatística descritiva, usando o Software Minitab, para determinar o número total de medidas do experimento, com uma margem de 10% de erro, com um nível de confiança de 95% e com um desvio padrão de 0,22, obtém-se que serão necessárias 22 medidas.

Assim, pela Figura 6, a magnitude de $X_{\rho cp}$ aumenta de maneira proporcional com o aumento da intensidade do fluxo de calor imposto na amostra, além disso, X_k possui o mesmo comportamento da sensibilidade da capacidade de calor volumétrica, porém a sua magnitude teve um valor menor. Portanto, o experimento mostrou-se apto para estimar as propriedades térmicas simultaneamente, pois não há correlação entre essas sensibilidades.

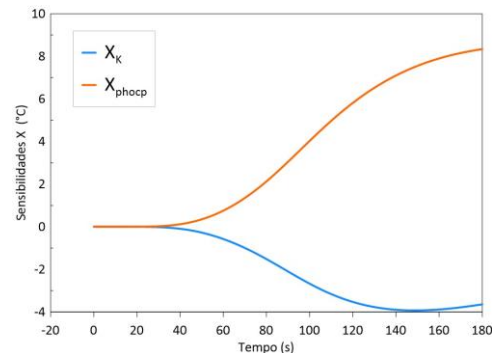


Figura 6 - Coeficientes de Sensibilidades obtidos na superfície inferior da amostra de compósito.

Já, na Figura 7, são apresentadas as temperaturas experimental e numérica medidas na superfície inferior da amostra, $x = 1$. A temperatura numérica foi calculada por meio da metodologia de diferenças finitas implícitas, utilizando o fluxo obtido no experimento do Método Sanduíche desenvolvido neste trabalho. Desta maneira, fazendo uma comparação entre essas temperaturas pode-se concluir que tiveram ótimos resultados já que houve poucos ruídos e uma ótima concordância entre essas temperaturas, tais fatos são comprovados pelo resíduo das temperaturas, que ocorreu uma divergência máxima de $0,07\text{ }^{\circ}C$, como mostrado na Figura 8.

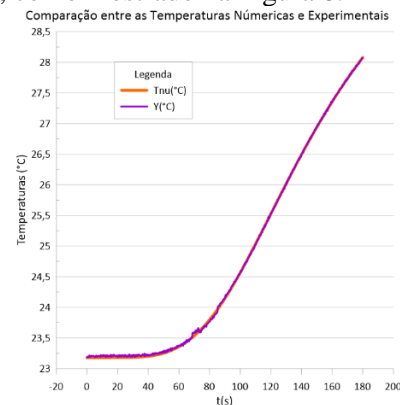


Figura 7 - Comparação entre a Temperatura Numérica e a Temperatura Experimental.

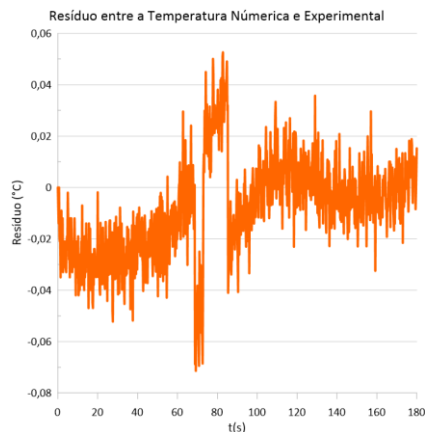


Figura 8 - Resíduo entre as Temperaturas.

Na Tabela 2, são apresentados a média e o desvio padrão das 22 medidas para a condutividade térmica e para a capacidade de calor volumétrica do compósito estudado, tais propriedades térmicas foram calculadas pelo método de Gauss utilizando como entrada os dados de temperatura e fluxo obtidos neste trabalho.

Tabela 2 - Resultado das Propriedades Térmicas pelo Método de Gauss.

Propriedade	Média	Desvio Padrão
$K (Wm^{-1}K^{-1})$	0,1356	0,0076
$\rho cp 10^6 (Jm^3kg^{-1}K^{-1})$	0,9312	0,0496

Portanto, analisando os resultados na Tabela 2, conclui-se que para as duas propriedades estimadas simultaneamente os valores obtidos apresentaram baixos desvio padrão.

Conclusões

O estudo desenvolveu uma técnica eficaz e econômica para estimar a condutividade térmica e a capacidade de calor volumétrica de compósitos de resina epóxi e fibra de vidro. A pesquisa cuidadosa de parâmetros e o uso de dados após o desligamento da fonte de calor foram essenciais para a realização do experimento. Os resultados dos dois métodos apresentaram boa concordância, com diferença de apenas 13%, e baixo desvio padrão. Quaisquer discrepâncias podem ser atribuídas ao isolamento experimental. Em resumo, o estudo demonstrou sucesso na estimativa simultânea dessas propriedades k e ρcp em compósitos, visto que não há nenhuma referência bibliográfica que estimou tais propriedades térmicas até o presente trabalho, com ressalva para a potencial melhoria no isolamento.

Agradecimentos

Agradecemos à concessão de uma bolsa de iniciação científica pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG). E por fim, o Conselho

Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e ao Conselho de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro ao LABTC.

Referências

- Bian, B., Xia, G., Li, J., Shao, S., Duan, Q. and Xie, Q., 2021. "Thermal-aging characteristics of epoxy/glass fiber composite materials for dry-type air-core reactors". *Polymer Composites*, Vol. 42, No. 8, pp. 3773–3785. URL <https://4spepublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pc.26092>.
- Czychos, H. and Daum, W., 2007. "Messtechnik und sensorik". Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau, pp. W1–W37.
- Guimarães, L.M. and de Azevedo Júnior, J.B., 2020. *Applied Statics in Engineering with Minitab*.
- Holman, J., 2012. *Experimental Methods for Engineers*. Economia e discipline aziendali. McGraw-Hill/Connect Learn Succeed. ISBN 9780071326483. URL <https://books.google.com.br/books?id=olfzygAACAAJ>.
- JANNOT, Y., ACEM, Z., KANMOGNE, A. (2006), *Transient Hot Plate Method with Two Temperature Measurements for Thermal Characterization of Metals*, *Measurement Science and Technology*, v 17, pp. 69-74.
- Palacios, A., Cong, L., Navarro, M., Ding, Y. and Barreneche, C., 2019. "Thermal conductivity measurement techniques for characterizing thermal energy storage materials a review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 108, pp. 32–52. ISSN 1364-0321. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119301625>.
- Sathishkumar, T., Satheeshkumar, S. and Naveen, J., 2014. "Glass fiber-reinforced polymer composites a review". *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 33, No. 13, pp. 1258–1275. URL <https://doi.org/10.1177/0731684414530790>.
- Yang, X.H. and Liu, J., 2018. "A novel method for determining the melting point, fusion latent heat, specific heat capacity and thermal conductivity of phase change materials". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 127, pp. 457–468. ISSN 0017-9310. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931018323627>