

ESTIMAÇÃO SIMULTÂNEA DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE MATERIAIS COMPOSTOS USANDO TÉCNICAS DE PROBLEMAS INVERSOS

Carla Daniela Peres Rodrigues¹ (IC), Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva (PQ)¹

¹Laboratório de Transferência de Calor, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Estimação de Propriedades Termofísicas. Condutividade Térmica. Capacidade de Calor Volumétrica. Compósitos.

Introdução

O estudo dos materiais compósitos tem se tornado cada vez mais relevante em setores como o aeroespacial, automobilístico e construção civil, devido às suas propriedades desejáveis, como resistência à corrosão e alta resistência mecânica a um custo acessível (NASSEH, 2008). Recentes avanços na pesquisa de materiais compósitos têm permitido inovações em design e fabricação, resultando em opções mais resistentes, leves e duráveis, o que aprimora o desempenho e a segurança em diversas aplicações (SATHISHKUMAR et al., 2014).

Este trabalho visa estimar as propriedades térmicas, especificamente a condutividade térmica, k , e a capacidade de calor volumétrica, ρc_p , do compósito formado por resina epóxi e fibra de vidro, essenciais em aplicações que exigem leveza e resistência, como em aeronaves.

A pesquisa é justificada pela necessidade de desenvolver materiais com melhor desempenho térmico, que sejam econômicos e atendam a altos padrões de segurança e eficiência. O método utilizado foi o método de estimação dos mínimos quadrados para problemas inversos, minimizando uma função objetivo definida pela diferença ao quadrado das temperaturas experimental e numérica pelo método iterativo de Gauss, o que possibilitou a obtenção de estimativas precisas das propriedades térmicas.

Na montagem foi garantido um fluxo de calor constante, uniforme e isolamento térmico adequado, permitindo um experimento unidimensional. A medição da temperatura foi realizada com um termopar do tipo T, posicionado na face inferior da amostra, oposta ao aquecimento. O software MATLAB foi empregado para calcular a temperatura numérica e os coeficientes de sensibilidade, além de minimizar a função objetivo.

Metodologia

Procedimento Experimental

Utilizou-se uma amostra de compósito composta por resina epóxi reforçada com 62,38% de fibra de vidro, selecionada por suas propriedades mecânicas desejáveis.

O aquecimento da amostra foi realizado com um aquecedor resistivo de Kapton, conhecido por sua capacidade de fornecer calor uniforme e constante, essencial para garantir um aquecimento homogêneo. A montagem do sistema foi feita em um isolamento térmico de isopor, minimizando as perdas térmicas e assegurando que a maior parte do calor gerado fosse transferida para a amostra.

Um termopar do tipo T foi posicionado na face oposta ao aquecedor, visando medições mais precisas da temperatura, dado que essa face apresenta melhor sensibilidade. Os sinais de temperatura foram registrados por um sistema de aquisição de dados controlado por um microcomputador, permitindo a coleta e análise em tempo real, facilitando a avaliação do comportamento térmico do compósito.

Um transdutor de fluxo de calor foi utilizado para medir o fluxo térmico aplicado à amostra, enquanto a potência fornecida ao aquecedor resistivo de Kapton foi controlada por uma fonte de alimentação. As amostras foram padronizadas com dimensões de 100 mm x 100 mm x 10 mm, e o aquecedor teve as mesmas dimensões, garantindo que toda a superfície fosse aquecida e possibilitando um estudo unidimensional (1D) do fluxo de calor.

Os parâmetros experimentais foram definidos por meio de análises de sensibilidade, maximizando a eficiência da análise e assegurando que as medições fossem representativas das propriedades térmicas do material. A duração da incidência de calor foi de 60 segundos, com aquisições de dados a cada 0,1 segundo. Após o desligamento do aquecedor, o calor retido na superfície contribuiu para a estimativa das propriedades térmicas do compósito. A configuração experimental utilizada é ilustrada na Figura 1, que apresenta a montagem e os dispositivos envolvidos, proporcionando uma visão detalhada do sistema e dos componentes utilizados na análise das propriedades térmicas do compósito.

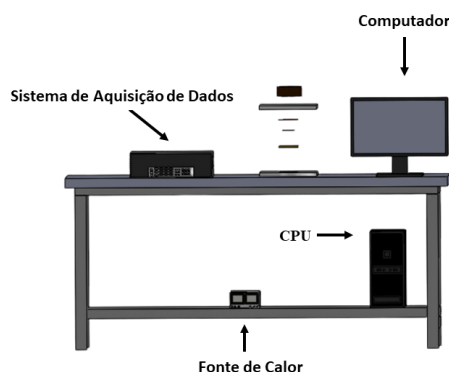


Figura 1 - Componentes Essenciais para Realização do Experimento.

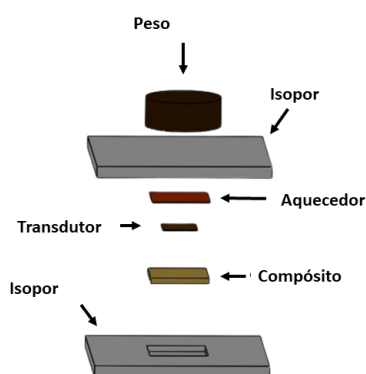


Figura 2 - Vista Explodida da Montagem Experimental.

A amostra, de seção quadrada e plana, submetida a uma temperatura inicial, é posicionada sobre o aquecedor. Esse gerador de calor impõe um fluxo de calor unidirecional na amostra, desconsiderando as perdas de calor laterais. Com o uso de um isolamento em isopor, as perdas térmicas são minimizadas, promovendo a propagação de calor de forma unidimensional.

Para obter os valores de temperatura na superfície da amostra, utilizou-se a equação da difusão de calor unidimensional. Aplicou-se o Método de Diferenças Finitas Implícito, que oferece resultados numéricos robustos, não dependentes de critérios de estabilidade e com baixo custo computacional.

Esse método funciona de forma iterativa, permitindo a resolução da malha discretizada ao longo do tempo. A cada iteração, a temperatura em cada ponto da amostra é calculada com base nas temperaturas dos pontos adjacentes, considerando as condições de contorno e a condição inicial do sistema. A formulação implícita do método permite incluir grandes incrementos de tempo sem comprometer a estabilidade da solução.

Além disso, foi feita uma análise de sensibilidade essencial para a estimação das propriedades térmicas,

refletindo como variações nas condições experimentais podem influenciar os resultados. A derivada numérica é expressa de maneira que a malha seja totalmente discretizada, calculando a temperatura em um ponto específico como uma média ponderada das temperaturas adjacentes, considerando os parâmetros e as condições de contorno. Essa abordagem resulta em um sistema de equações que pode ser resolvido iterativamente, proporcionando uma distribuição de temperatura precisa ao longo da amostra.

Análise dos Coeficientes de Sensibilidade

Nos estudos de problemas inversos de condução térmica na engenharia reversa, os coeficientes de sensibilidade indicam como variações nas propriedades térmicas afetam as temperaturas medidas. Uma alta sensibilidade significa que pequenas mudanças nas propriedades térmicas causam grandes variações nas medições, indicando um problema bem condicionado. No entanto, se houver correlação entre os coeficientes, a estimativa das propriedades térmicas torna-se inviável, sinalizando um problema mal condicionado.

Para identificar as condições ideais para a estimativa das propriedades, foi realizado um estudo sobre os coeficientes de sensibilidade da condutividade térmica e da capacidade de calor volumétrica da amostra. Esse estudo ajuda a definir parâmetros como o tempo total do experimento, o intervalo de coleta de dados, a localização dos termopares e a intensidade do fluxo de calor. A análise busca maximizar a magnitude dos coeficientes de sensibilidade, pois disparidades entre eles podem dificultar a minimização da função objetivo. Assim, a análise de sensibilidade é crucial para validar e robustecer modelos térmicos. Avaliando como variações nas propriedades influenciam os resultados, é possível identificar os parâmetros que impactam mais as estimativas de temperatura, aprimorando a precisão das medições e orientando a otimização dos experimentos. Portanto, a análise de sensibilidade é uma ferramenta indispensável para interpretar dados e desenvolver soluções eficazes em engenharia térmica.

Foi desenvolvido um algoritmo programado no MATLAB para a realização dos cálculos das equações acima. Nas Figuras 3 e 4 estão os valores de sensibilidade encontrados para cinco diferentes posicionamentos do termopar. Esses resultados não apenas demonstram a eficácia do algoritmo, mas também fornecem insights valiosos sobre a influência da localização dos sensores nas medições. A análise das figuras revela como a escolha do posicionamento pode impactar significativamente a precisão das estimativas, permitindo ajustes que podem levar a uma maior confiabilidade nas medições das propriedades térmicas.

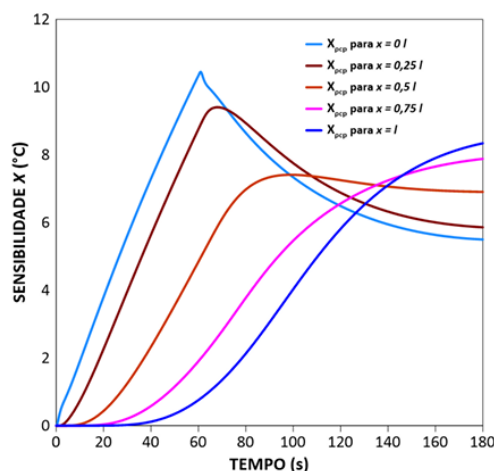


Figura 3 - Coeficientes de Sensibilidade para a Capacidade de Calor Volumétrica em cinco posições diferentes.

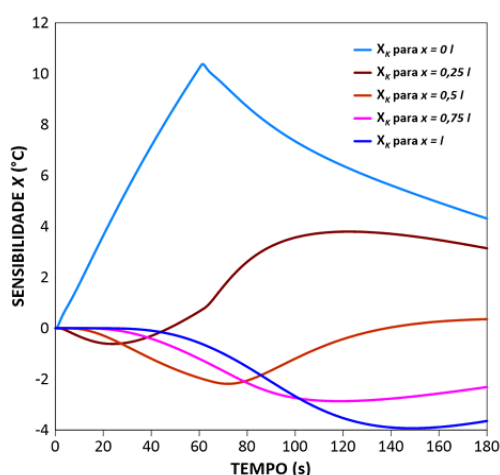


Figura 4 - Coeficientes de Sensibilidade para a Condutividade Térmica em cinco posições diferentes.

A partir dos gráficos é possível observar que a sensibilidade para ρc_p aumenta de acordo com o aumento da intensidade de calor aplicada, e que a sensibilidade para k varia de acordo com a posição. Para o termopar na posição $x = 0$, ou seja, na superfície da amostra que está em contato direto com o aquecedor resistivo, o coeficiente de sensibilidade tanto para a capacidade de calor volumétrica quanto para a condutividade térmica são maiores do que as encontradas nos demais pontos. Entretanto, nesse ponto os coeficientes estão correlacionados, ou seja, não é possível estimar as propriedades simultaneamente uma vez que não é possível separar os efeitos de cada uma delas, ou seja, são correlacionadas.

Dessa forma, fez-se as seguintes considerações: embora sejam posições de interesse, colocar os termopares no centro da amostra entre $0.25l \leq x \leq 0.75l$, implicaria em perfurar a amostra para alocar os termopares, criando

assim o efeito de descontinuidade na amostra. Portanto, a posição $x = l$, ou seja, a face inferior da amostra, foi definida como tendo o comportamento mais adequado para o coeficiente de sensibilidade das propriedades, sendo utilizada nesse experimento.

Resultados e discussão

Foram realizados 22 experimentos para estimar simultaneamente a condutividade térmica e a capacidade de calor volumétrica da amostra do compósito de resina epóxi com 62,38% de fibra de vidro. Cada experimento teve duração total de 180s, com um tempo de aquecimento de 60s com a aplicação do fluxo de calor. O fluxo de calor foi variado, começando em aproximadamente 2300 Wm^{-2} nos primeiros 60 segundos e, em seguida, reduzindo para cerca de 570 Wm^{-2} até o final do experimento. As temperaturas foram monitoradas a cada 0,1s. A configuração do experimento foi projetada para manter a diferença de temperatura entre a superfície superior e inferior da amostra o mais baixa possível. Durante a análise dos resultados, observou-se que a diferença máxima entre as temperaturas experimental e numérica foi de $0,07 \text{ }^{\circ}\text{C}$, indicando uma boa concordância entre os dados obtidos e as simulações realizadas.

A análise do coeficiente de sensibilidade foi realizada para identificar a melhor posição para a estimativa das propriedades térmicas, utilizando os valores de condutividade térmica e capacidade de calor volumétrica obtidos em experimentos anteriores. Essa análise incluiu a avaliação de diferentes valores dos coeficientes de sensibilidade de acordo com o posicionamento, permitindo a seleção de pontos que proporcionam estimativas precisas das propriedades termofísicas. A região escolhida foi fundamental para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos, conforme ilustrado na Figura 5, que apresenta os coeficientes de sensibilidade..

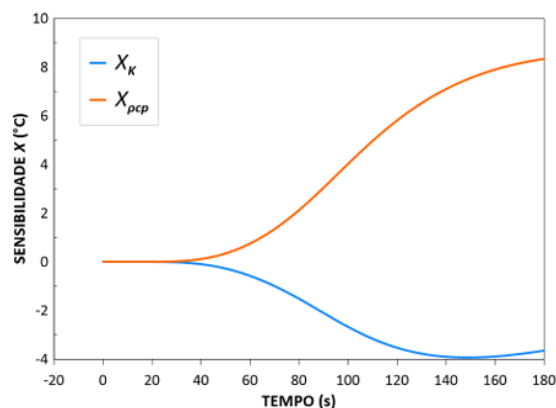


Figura 5 - Coeficientes de Sensibilidades para k e para ρc_p na face inferior da amostra.

É possível estabelecer que os coeficientes de sensibilidade dos dois parâmetros não estão correlacionados uma vez que o valor encontrado para $X\rho c_p$ aumenta de maneira proporcional com a intensidade de fluxo de calor imposto na amostra, enquanto Xk , apesar de ter um comportamento parecido, possui amplitude inversa. Essa distinção é crucial, pois indica que as variações em um parâmetro não afetam diretamente o outro, permitindo uma estimativa mais precisa das propriedades térmicas.

A temperatura numérica inicialmente considera valores para a condutividade térmica e para a capacidade de calor volumétrica baseados na literatura e em experimentos anteriores. O método funciona de forma que a temperatura em cada ponto da amostra é recalculada a cada iteração até que se atinja um critério de convergência. Esse processo iterativo é fundamental para garantir que as estimativas sejam ajustadas de acordo com as medições experimentais, refletindo com precisão as condições reais do sistema. A partir disso, obteve-se os seguintes valores estimados para a condutividade térmica e da capacidade de calor volumétrica:

Tabela 1 - Valores Estimados para a Condutividade Térmica e para a Capacidade de Calor Volumétrica.

PROPRIEDADE	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO
k [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,1356	0,0076
ρc_p [$\text{J}\cdot\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,0912	0,0496

Por fim, utilizando dos valores estimados para as duas propriedades termofísicas, a comparação entre a temperatura numérica e a experimental valida o modelo utilizado.

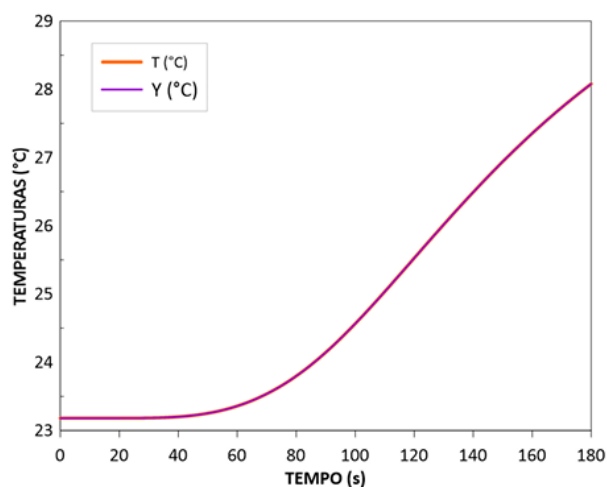


Figura 6 - Comparativo entre Temperaturas Experimental (Y) e Numérica (T).

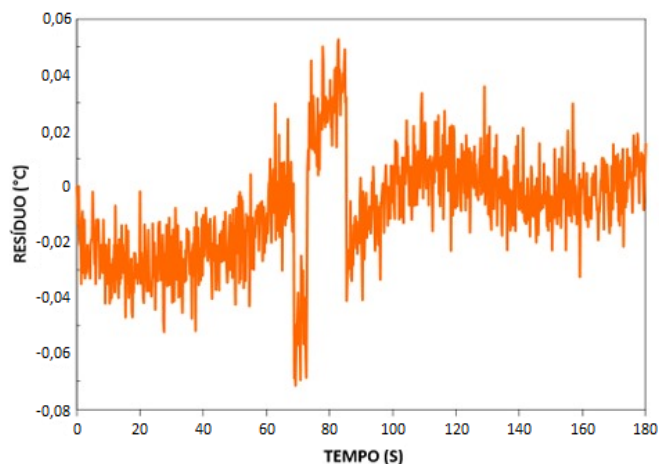


Figura 7 - Resíduos, diferença entre as Temperaturas experimental e calculada.

Conclusões

O trabalho demonstrou a eficácia do método de estimação simultânea das propriedades termofísicas de um composto de resina epóxi com fibra de vidro. Utilizando experimentos práticos e o método de minimização de Gauss, foram obtidas estimativas precisas da condutividade térmica ($0,1356 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) e da capacidade de calor volumétrica ($0,0912 \text{ J}\cdot\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), com desvios padrão que confirmam a confiabilidade das medições. A validação dos dados foi realizada pela comparação entre temperaturas calculadas e medidas, mostrando diferenças mínimas. A análise de sensibilidade foi crucial para otimizar as condições experimentais, como o posicionamento do termopar e a intensidade do fluxo de calor.

Agradecimentos

Agradeço a Universidade Federal de Itajubá pela concessão da bolsa de iniciação científica que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho. Aos CNPq, CAPES, FAPEMIG, IEM e LabTC por todo suporte financeiro.

Referências

NASSEH, J. Técnica e prática de laminação em composites. Rio de Janeiro: Jorge Nasseh, 2008.
SATHISHKUMAR, P. et al. Glass fiber-reinforced polymer composites: A review. 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265346634_Glass_fiber-reinforced_polymer_composites_-_A_review.