

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

DETERMINAÇÃO DO CAMPO DE TEMPERATURA NA FERRAMENTA DE CORTE DURANTE PROCESSO POR TORNEAMENTO UTILIZANDO O SOFTWARE COMSOL E PROBLEMA INVERSO

Lucca S. Pereira¹ (IC), Sandro M. M. Lima e Silva (PQ)¹

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

Palavras-chave: COMSOL. IHCP. Método da Função Especificada Não Linear. Transferência de Calor. Usinagem.

Introdução

A transferência de calor constitui um fenômeno central em diversas áreas da engenharia e da ciência, sendo indispensável para o desenvolvimento de sistemas de refrigeração, geração de energia, controle térmico e processos industriais. O estudo desse fenômeno permite compreender os mecanismos de propagação da energia térmica em diferentes meios e sob variadas condições, viabilizando a otimização de equipamentos e o aprimoramento do desempenho térmico de materiais e dispositivos.

Nesse contexto, os problemas inversos em transferência de calor assumem papel relevante, uma vez que possibilitam a determinação de parâmetros desconhecidos a partir de medições indiretas. Diferentemente dos problemas diretos, nos quais as propriedades e condições térmicas são conhecidas e o objetivo é prever a distribuição de temperatura, nos problemas inversos busca-se estimar fontes de calor, propriedades térmicas ou condições de contorno a partir de dados experimentais. Por apresentarem natureza mal posta, tais problemas são altamente sensíveis a ruídos e incertezas, exigindo a aplicação de técnicas robustas de regularização e métodos numéricos avançados para a obtenção de soluções estáveis e fisicamente consistentes (Woodbury *et al.* 2023).

Nos problemas lineares de transferência de calor, considera-se que as propriedades térmicas do material, como a condutividade térmica e a difusividade térmica, permanecem constantes ao longo de todo o processo, independentemente da variação de temperatura. Essa simplificação permite que as equações governantes mantenham um comportamento matemático linear, facilitando a análise e a solução do problema. Em contrapartida, nos problemas não lineares, essas propriedades variam de forma significativa com a temperatura, fazendo com que as equações se tornem não lineares e a solução dependa de métodos numéricos mais complexos e, muitas vezes, iterativos. Essa distinção é

fundamental, pois a consideração ou não da variação das propriedades térmicas influencia diretamente a precisão dos modelos e a complexidade computacional envolvida (Woodbury *et al.* 2023).

Neste trabalho, emprega-se o software COMSOL Multiphysics e a ferramenta Matlab LiveLink para aplicação do método inverso da Função Especificada Não Linear, com o objetivo de estimar o fluxo de calor e a temperatura na ferramenta de corte durante um processo de usinagem. Essa abordagem permite correlacionar dados experimentais e modelagem numérica, proporcionando uma estimativa mais precisa das condições térmicas envolvidas e contribuindo para a compreensão e otimização do desempenho da ferramenta, que está diretamente relacionado as temperaturas do inserto durante o processo de usinagem.

Kovac *et al.* (2019) propuseram um método inovador para a estimativa da vida útil de ferramentas de corte no fresamento. A técnica consiste na medição da temperatura na interface entre a ferramenta e a peça, por meio de um termopar, associada ao monitoramento do desgaste da ferramenta. Com esses parâmetros, a vida da ferramenta é prevista utilizando a relação de Taylor. Os resultados obtidos demonstraram boa concordância em comparação com métodos normatizados de avaliação do desgaste de ferramentas de corte.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo determinar o campo de temperatura na ferramenta de corte durante o processo de torneamento, empregando o software COMSOL Multiphysics associado ao método inverso da Função Especificada Não Linear. Busca-se, assim, estimar o fluxo de calor e correlacionar os resultados experimentais e numéricos, de modo a compreender o comportamento térmico no inserto da ferramenta, otimizar seu desempenho e contribuir para a redução do desgaste durante a usinagem.

Metodologia

Método da Função Especificada para Problemas Inversos Não Lineares

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Nos casos onde a abordagem do problema será feita de maneira não linear, como dito anteriormente, faz-se necessário a utilização de um método iterativo. As equações utilizadas e suas devidas deduções podem ser vistas no trabalho de Woodbury *et al.* (2023).

Na Equação (1) é calculado o incremento $\Delta \vec{b}$ para o parâmetro \vec{b} para cada iteração no instante de tempo t . Conforme $\Delta \vec{b}$ se aproxima de zero, considera-se que a convergência foi atingida para aquele tempo.

$$\Delta \vec{b} = \left([X_\beta]^T [X_\beta] \right)^{-1} [X_\beta]^T (\vec{Y} - \vec{T} |_{\vec{b}}) \quad (1)$$

Utilizando o algoritmo gaussiano e o processo explicado anteriormente, o fluxo de calor desconhecido na região de contorno pode ser estimado para problemas não lineares uni, bi e tridimensionais.

Assim como no método utilizado para problemas lineares, a estimação será feita apenas para um valor de fluxo q_M por vez correspondente ao tempo atual t_M . Para regularizar o método, novamente, medições de temperatura futuras são utilizadas. Para isso, assume-se valores temporários para os fluxos $q_M, q_{M+1}, \dots, q_{M+r-1}$. Uma vez que o único parâmetro β desconhecido é o fluxo de calor, tem-se $p = 1$, logo a matriz de sensibilidade $[X_\beta]$ se torna um vetor \bar{X}_q . Deste modo, o produto $[X_q]^T [X_q]$ é um escalar, que pode ser calculado pela Eq. (2).

$$[X_q]^T [X_q] = \sum_{n=1}^r \left(\frac{\delta T_n}{\delta q_M} \right)^2 = \sum_{n=1}^r \chi_{q_n}^2 \quad (2)$$

Por fim, substituindo a Eq. (2) na Eq. (1), tem-se a Eq. (3).

$$\Delta q_M = \frac{\sum_{n=1}^r \chi_{q_n} (Y_n - T_n)}{\sum_{n=1}^r \chi_{q_n}^2} \quad (3)$$

A Equação (3) é muito parecida com a forma linear da Função Especificada, no entanto a maneira de calcular \bar{X}_q e \vec{T} são diferentes, além de que o fluxo de calor q_M não é obtido de maneira instantânea.

O algoritmo utilizado para estimar o fluxo de calor em problemas não lineares é:

- (1) Entrar com um valor arbitrário para q_M ;
- (2) Determinar uma tolerância. Neste trabalho foi utilizado $tol = 0,0001$;
- (3) Resolver o modelo matemático para obter as temperaturas \vec{T} a partir do fluxo q_M ;
- (4) Resolver as equações necessárias para determinar o valor \bar{X}_q ;
- (5) Utilizar a Eq. (1) para calcular uma correção $\Delta q_M^{(i)}$;
- (6) Se $\Delta q_M < tol$, então o processo convergiu. Se não, então o valor de q_M é atualizado:

$$q_M^{(i+1)} = q_M^{(i)} + \Delta q_M^{(i)}$$

- (7) Retornar ao passo (3) até garantir a convergência do passo (6);
- (8) Iniciar o algoritmo novamente para um novo passo de tempo.

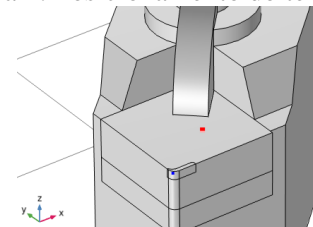
A convergência do passo (6) pode ser difícil de ser atingida. Para isso, um critério de parada é utilizado definido pela Eq. (4).

$$\frac{\Delta q_M^{(i)}}{q_M^{(i+1)}} \leq tol \quad (4)$$

Procedimento experimental

Para a análise da transferência de calor durante o processo de torneamento, foi utilizado um torno mecânico convencional IMOR MAXI – II – 520 – 6CV, associado a um sistema de aquisição de dados HP 75000 Series B, equipado com um voltímetro E1326B e controlado por um computador. A medição das temperaturas experimentais foi realizada por meio de um termopar tipo K, posicionado nas coordenadas (7,222; 4,740; 0) mm. O posicionamento do termopar está ilustrado na Figura 1, onde o ponto azul indica a origem do sistema de coordenadas e o ponto vermelho indica a localização do sensor.

Figura 1. Posicionamento do termopar.



Para simplificar a modelagem numérica do conjunto, optou-se pela utilização de uma ferramenta de corte com geometria simplificada, de formato octaédrico e sem furo. Foram empregadas ferramentas de metal duro SANDVIK (ISO SNUN 12 04 12 H1P – K10), fixadas em um porta-ferramenta ISO CSBNR 20K12 (SANDVIK COROMANT). Como material de trabalho, utilizaram-se corpos de prova em ferro fundido cinzento ABNT FC 20 EB 126A. A escolha desse material deve-se à característica naturalmente negativa das ferramentas utilizadas, que as torna adequadas ao corte de ferro fundido cinzento. Os ensaios foram realizados em barras desse material, com diâmetro de 77 mm, sendo cada corpo de prova dividido em três segmentos iguais, com comprimento $L=77$ mm.

Os parâmetros de usinagem podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de usinagem.

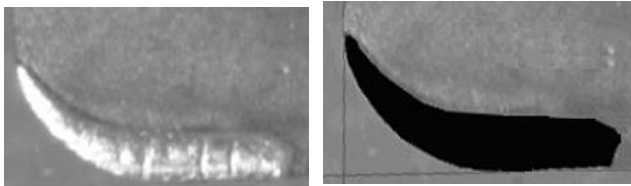
Parâmetros de usinagem	
Diâmetro Inicial	77 mm

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Comprimento Usinado	77 mm
Avanço	variável
Velocidade de corte	135,47 m/min
Profundidade de corte	1,5 mm
Diâmetro final	74 mm

Uma das principais dificuldades na implementação do modelo térmico proposto está na determinação precisa da área de contato cavaco–ferramenta. No presente estudo, essa área foi medida em três arestas distintas da ferramenta, sendo então calculado o valor médio. Para a medição, utilizou-se um sistema de análise de imagens composto por uma câmera de vídeo Hitachi CCD, modelo KP-110, conectada a um computador AMD K6 de 450 MHz, juntamente com um software específico para processamento das imagens. A Figura 2 apresenta, lado a lado, a fotografia da área de contato e a imagem processada utilizada para a determinação da área.

Figura 2. Área de contato da ferramenta.



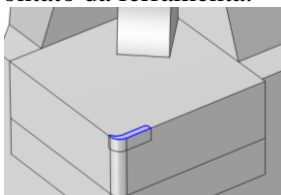
Solução numérica

Para a solução numérica do problema, o conjunto porta-ferramenta foi modelado no software COMSOL, de modo que com o auxílio da ferramenta LiveLink com o software Matlab fosse possível aplicar as equações do Método da Função Especificada Não Linear para estimar o fluxo de calor que a ferramenta estava sujeita durante o processo de usinagem.

Posteriormente, dispondo do fluxo de calor estimado, é possível utilizar o software COMSOL para estimar o campo de temperaturas no conjunto porta-ferramenta.

A modelagem pode ser vista na Figura 3, onde a área de contato foi estimada e foi utilizada como uma fonte de fluxo de calor e as faces restantes foram consideradas perdendo calor por convecção natural com o ar com um coeficiente de convecção, $h = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$.

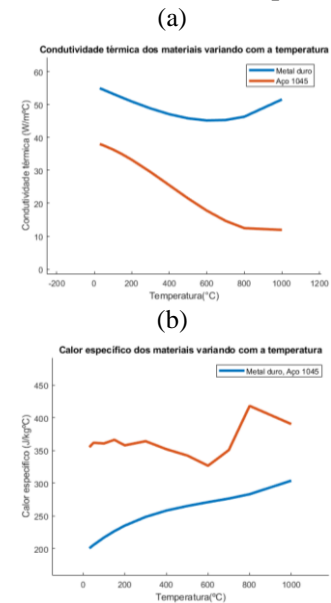
Figura 3. Conjunto porta ferramenta com área de contato da ferramenta.



Os valores das propriedades térmicas do metal duro e do aço 1045, materiais da ferramenta e do porta ferramentas respectivamente, foram retirados do trabalho

de Grzesik *et al.* (2009) e seus comportamentos podem ser vistos na Figura 4. Essas propriedades térmicas são de suma importância para a aplicação do método não linear da Função Especificada. As densidades foram consideradas constantes e os valores utilizados foram de 14900 kg/m^3 para o metal duro e 7870 kg/m^3 para o aço 1045.

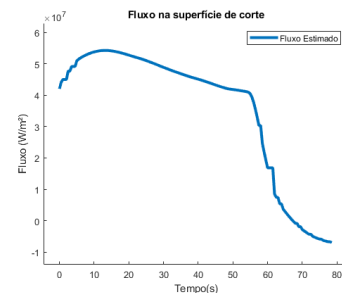
Figura 4. (a) Condutividade térmica dos materiais variando com a temperatura. (b) Calor específico dos materiais variando com a temperatura.



Resultados e discussão

Dispondo da temperatura obtida pelo termopar e utilizando a equação do Método da Função Especificada Não Linear no software COMSOL com auxílio da ferramenta LiveLink Matlab, foi possível estimar o fluxo de calor submetido a superfície de corte durante o processo de usinagem, que pode ser visto na Figura 5. Foram utilizados 13 passos futuros para regularização.

Figura 5. Fluxo de calor estimado na superfície.



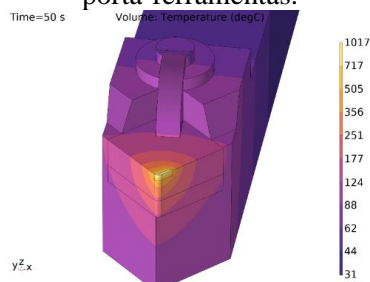
O formato do gráfico apresentado na Figura 5 reflete a evolução do fluxo de calor ao longo do tempo de usinagem. Observa-se que o fluxo apresenta um crescimento inicial, associado ao aumento da geração de calor devido ao contato entre ferramenta e peça, seguido

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

por uma estabilização, indicando um regime térmico quase estacionário. Após o término do processo de usinagem, nota-se o decréscimo do fluxo de calor, resultado da interrupção da geração térmica e da predominância dos mecanismos de dissipação. Nesse estágio, a ferramenta libera calor por condução e convecção até atingir gradativamente a temperatura ambiente

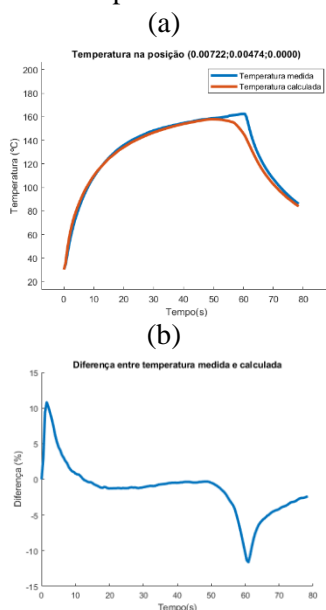
Utilizando o fluxo de calor estimado e o software COMSOL, é possível calcular o campo de temperaturas estimado no conjunto inserto e porta-ferramentas, sendo possível obter a temperatura em qualquer ponto do conjunto em qualquer tempo durante o processo de usinagem. Para exemplificar, o campo de temperaturas no tempo igual a 50 segundos pode ser visto na Figura 6.

Figura 6. Campo de temperaturas no conjunto inserto e porta-ferramentas.



Para verificar a precisão da estimativa de temperaturas apresentadas pelo método, calculou-se a diferença entre as temperaturas medidas pelo termopar e as temperaturas calculadas pelo software no ponto (7,222; 4,740; 0) mm, essa diferença pode ser vista no gráfico da Figura 7.

Figura 7. (a) Temperatura medida e calculada. (b) Diferença entre temperatura medida e calculada.



A diferença máxima entre temperatura medida e calculada foi de 11,36%, já a diferença média foi de 1,36%.

Conclusões

Conclui-se que o trabalho atingiu seus objetivos no que se refere à determinação do campo de temperaturas da ferramenta de corte durante o processo de usinagem, apresentando boa precisão. A diferença máxima entre a temperatura calculada e a medida experimental foi de 11,36%, enquanto a diferença média permaneceu em apenas 1,36%, evidenciando a consistência do método proposto.

A partir desses resultados, tornou-se possível estimar de forma confiável a temperatura na região do inserto da ferramenta de corte. Essa informação é fundamental para compreender o comportamento térmico durante o processo de usinagem e possibilita otimizar o desempenho da ferramenta, contribuindo para o aumento da eficiência do processo e a redução do desgaste.

Ainda assim, destaca-se que a precisão das estimativas poderia ser aprimorada por meio da caracterização detalhada das propriedades térmicas do conjunto inserto e porta-ferramenta, bem como por uma modelagem mais refinada da convecção, considerando a variação espacial e temporal do fluxo de calor.

Agradecimentos

Agradeço à Universidade Federal de Itajubá e ao Instituto de Engenharia Mecânica pela estrutura fornecida durante a realização do trabalho.

Agradeço, também, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de iniciação científica.

Referências

- GRZESIK, W.; BARTOSZUK, M.; NIESLONY, P. **Finite Difference Analysis of the Thermal Behavior of Coated Tool in Orthogonal Cutting of Steels**. International Journal of Machining Tools and Manufacture, 2004.
- KOVAC, P.; GOSTIMIROVIC, M.; RODIC, D.; SAVKOVIC, B. **Using the temperature method for the prediction of tool life in sustainable production**. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2019.
- WOODBURY, K. A.; NAJAFI, H.; DE MONTE, F.; BECK, J. V. **Inverse Heat Conduction: Ill-Posed Problems**. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2023.