

DETERMINAÇÃO DO CAMPO DE TEMPERATURA DE UMA FERRAMENTA DE CORTE DE METAL DURO UTILIZANDO PROBLEMAS INVERSOS E COMSOL

Nícolas Pinheiro Ramos

Rodrigo Gustavo Dourado da Silva

João Roberto Ferreira

Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Instituto de Engenharia Mecânica – IEM, Laboratório de Transferência de Calor – LabTC, Campus Professor José Rodrigues Seabra, Avenida BPS, nº 1303, Bairro Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá – MG.

e-mails: nicolas.pramos@outlook.com, rodrigogdourado@hotmail.com, jorofe@unifei.edu.br, metrevel@unifei.edu.br

Resumo. Neste artigo é apresentada uma metodologia para estimar do fluxo de calor gerado na região de contato entre cavaco e ferramenta. Na estimação do fluxo de calor é feita uma comparação entre três metodologias: Método da Função Especificada (SFSM) clássico, SFSM iterativo e Time Traveling Regularization (TTR). Com o fluxo de calor estimado foi calculado a distribuição de temperatura na região de corte, o hotspot da ferramenta e analisou-se a influência dos revestimentos de óxido de alumínio e nitreto de titânio na ferramenta. Os fluxos de calor estimados tiveram pouca variação entre as diferentes técnicas utilizadas e a temperatura teve como maior diferença cerca de 3% em relação à experimental. A cobertura de óxido de alumínio apresentou uma redução maior de temperatura na ferramenta de corte quando comparada à cobertura de nitreto de titânio.

Palavras chave: Problemas Inversos, Torneamento, Transferência de Calor Numérica, Metal Duro.

1. INTRODUÇÃO

Nos processos de usinagem, como o torneamento, praticamente toda a energia mecânica envolvida no corte se transforma em energia térmica, ou seja, se converte em calor. O calor está associado à deformação plástica do material, à formação e ao cisalhamento do cavaco e, em menor escala, ao atrito entre cavaco e superfície de saída. Estima-se que cerca de 10% do calor gerado no processo de torneamento seja conduzido pela ferramenta de corte. À primeira vista, tal percentual pode não parecer de grande significância, contudo, não raramente, este calor pode levar a ferramenta de corte a atingir temperaturas de até 1200 °C. (Diniz *et al.*, 2013). O desenvolvimento de altas temperaturas torna a ferramenta de corte mais suscetível a desgastes, sobretudo por conta do fenômeno de difusão, que é estimulado com o aumento de temperatura, e devido à diminuição de sua dureza, que propicia o aparecimento do desgaste do tipo abrasivo. Além dos desgastes, que acarretam menor vida útil dos insertos de metal duro, o calor faz com que haja a dilatação da ferramenta de corte, logo, torna-se difícil a obtenção de tolerâncias finas e de altas qualidades em acabamentos superficiais.

A aplicação de revestimentos nas ferramentas de corte tem sido amplamente difundida como uma maneira de diminuir os desgastes, inclusive aqueles advindos dos efeitos térmicos, sendo que estudos anteriores já mostraram reduções de até 100°C em pastilhas revestidas em comparação às não revestidas (Marusich *et al.*, 2002). Em Brito *et al.* (2009) tem-se um estudo térmico de como a espessura da camada de cobertura influencia na difusão de calor no inserto de corte. As pastilhas de metal duro revestidas representam cerca 80-90 % das ferramentas de corte utilizadas no mercado de usinagem (Sandvik, 2018). Desse modo, no estudo térmico de ferramentas de corte, é natural e importante que se faça a análise neste tipo de inserto de corte. Neste trabalho, então, faz-se a comparação do comportamento térmico apresentada por três insertos de metal duro: um revestido com uma camada de nitreto de titânio (TiN), um com cobertura de óxido de alumínio (Al₂O₃) e outro sem qualquer revestimento.

O agente responsável pelo forte aumento de temperatura na ferramenta de corte é o fluxo de calor por ela recebido quando do torneamento, sendo que ele depende das condições de corte empregadas no processo de usinagem. Logo, o conhecimento deste fluxo é importante para a caracterização das solicitações térmicas às quais a pastilha estará submetida. A estimação do fluxo de calor é feita por meio de problemas de condução de calor (IHCP – *Inverse Heat Conduction Problems*), que, em suma, trata-se da criação de modelos matemáticos nos quais é possível representar com exatidão a física do problema térmico sem a necessidade de gastar tempo e dinheiro com procedimentos experimentais. Como salientado em Carvalho *et al.* (2006), a medição direta e experimental de temperatura num inserto de metal durante o torneamento é de difícil realização, devido aos movimentos inerentes à usinagem, às condições severas e restrições de acessibilidade nas regiões de interesse. Dessa forma, faz-se, então, a aplicação dos problemas inversos em transferência

de calor na área de usinagem, no qual há muitos processos em que parâmetros são desconhecidos ou impossíveis de medir diretamente. Muitas vezes, a solução analítica desses problemas é de difícil obtenção ou, até mesmo, é impossível devido à complexidade dos termos matemáticos envolvidos.

Muitos trabalhos em usinagem foram publicados utilizando *IHCP*. Entre eles, podem ser citados o trabalho de Carvalho *et al.* (2006) no qual foi elaborado um modelo matemático para estimar o fluxo de calor na superfície de uma ferramenta de corte de metal duro em usinagem por torneamento; Huang *et al.* (2018a) desenvolveram um método para realizar a estimativa do fluxo de calor online na ferramenta de corte durante um processo de usinagem por torneamento; Huang *et al.* (2018b) aprimorou o modelo térmico utilizado para estimar o fluxo de calor no torneamento considerando que o fluxo de calor é uma função do espaço e do tempo na região de contato entre cavaco e ferramenta.

O presente trabalho apresenta um estudo térmico de uma ferramenta de corte de metal duro durante o processo de torneamento, em diferentes configurações. Portanto, os objetivos do artigo são: a estimação do fluxo de calor ao qual a pastilha é submetida durante o processo de torneamento e a determinação da distribuição de temperaturas na ferramenta de corte, bem como a identificação de seu hot spot (ponto de maior temperatura). Após as ações citadas, uma análise térmica da influência dos revestimentos em ferramentas de corte de metal duro é realizada.

2. METODOLOGIA

2.1. Modelo térmico

Devido às grandes variações de temperatura durante o processo de usinagem, deve ser considerado um modelo térmico não linear. O domínio é composto por três subdomínios: suporte e calço (Ω_2 e Ω_3), inserto (Ω_1) e revestimento (Ω_4). Cada subdomínio possui suas próprias propriedades térmicas, as quais são funções da temperatura. Considerando um fluxo de calor transiente $q(t)$, o problema é modelado pela equação transiente e não linear da difusão do calor, bem como as condições de fronteira de convecção, fluxo prescrito e radiação, como mostra as Eqs. (1.a – 1.e).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_j(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_j(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_j(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho_j(T) c_{p_j}(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.a)$$

$$-k_j(T) \frac{\partial T}{\partial n} = q(t) \quad (1.b) \qquad -k_j(T) \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_\infty) \quad (1.c)$$

$$-k_j(T) \frac{\partial T}{\partial n} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4) \quad (1.d) \qquad T(x, y, z, 0) = T_\infty \quad (1.e)$$

O índice $j=1,2,3$ representa cada subdomínio, k a condutividade térmica, ρ a massa específica, h o coeficiente de troca de calor por convecção, ε a emissividade, σ a constante de Stefan-Boltzman e T_∞ a temperatura ambiente. A variável n é o vetor normal à superfície que aponta para fora do domínio.

2.2. O problema inverso de estimação do fluxo de calor

Para estimar o fluxo de calor na ponta da ferramenta de corte é necessário minimizar a função objetiva S , a qual consiste na soma do quadrado dos resíduos entre as temperaturas experimentais, Y , e as temperaturas estimadas \hat{T} , como é mostrado na Eq. (2).

$$S = \sum_{i=1}^r \left(Y_{m+i-1} - \hat{T}_{m+i-1} \right)^2 \quad (2)$$

Existem vários métodos para resolver um problema inverso de condução de calor. Neste trabalho serão comparadas as soluções de três técnicas: o método da Seção Áurea com Regularização Viagem no Tempo (*Time Traveling Regularization – TTR*) que pode ser verificado em Silva *et al.* (2018b); o Método da Função Especificada (*SFSM*) clássico (Beck *et al.*, 1985), cujas temperaturas estimadas são calculadas através de uma aproximação do Teorema de Duhamel; o Método da Função Especificada iterativo (Woodbury, 2003), no qual as temperaturas estimadas são calculadas através de uma aproximação em séries de Taylor e o valor do fluxo de calor é corrigido iterativamente em um mesmo intervalo de tempo.

No *SFSM* clássico, o fluxo de calor pode ser calculado diretamente em cada intervalo de tempo m através da Eq. (3).

$$q_m = \frac{\sum_{i=1}^r (Y_{m+i-1} - T_{m+i-1}) X_i}{\sum_{i=1}^r X_i^2} \quad (3)$$

No *SFSM* iterativo, o fluxo é calculado pela Eq. (4), já o fluxo de calor é calculado iterativamente pela Eq. (5):

$$\Delta q = ([X]^T [X])^{-1} [X]^T ([Y] - [T]) \quad (4)$$

$$q_m^{(i+1)} = q_m^{(i)} + \Delta q_m^{(i)} \quad (5)$$

sendo que todos os termos do lado direito da Eq. (4) são vetores de comprimento r .

Na técnica *TTR* para cada passo de tempo é dado um chute para o intervalo inicial no qual está contido o fluxo de calor que minimiza a função S . Neste método as temperaturas estimadas são calculadas numericamente em cada iteração através do *software* comercial COMSOL. Essas temperaturas são exportadas para outro programa através do recurso *LiveLink* do COMSOL, no qual foi implementado o método da seção áurea que otimiza a função objetivo S . Uma vez que o método converge para o passo de tempo atual m , segue-se para o passo seguinte com um novo chute.

2.3. Procedimento experimental

Para a realização desse trabalho foram retirados dados experimentais de Carvalho *et al.* (2006). O experimento foi realizado em um torno convencional com uma ferramenta de metal duro usinando ferro fundido cinzento. Foi fixado um termopar tipo K em uma posição acessível do flanco secundário da ferramenta. O experimento foi realizado com uma velocidade de corte de 135 m/min, avanço de 0,14 mm/volta e profundidade de corte de 3 mm.

A área de contato entre o cavaco e o inserto de metal duro foi determinada de maneira experimental. Em um microscópio eletrônico foi verificada a região desgastada após a usinagem e com o auxílio de um software analisador de imagens foi possível modelar com precisão a superfície e exportá-la para o modelo tridimensional. A área correspondente à condição de contorno de fluxo de calor é de 0,411 mm².

3. RESULTADOS

A usinagem durou em torno de 60 s e os dados de temperatura foram aquiritados com um intervalo de tempo de 0,5 s. O ponto escolhido para a fixação do termopar se encontrava inicialmente a 30,9 °C e atingiu uma temperatura máxima de 187,3 °C.

Na Figura 1a são encontrados os fluxos de calor estimados utilizando as técnicas citadas nesse trabalho. Percebe-se que as técnicas iterativas *TTR* e *SFSM* iterativo obtiveram resultados com pouca divergência. Já a técnica *SFSM* clássica apresentou uma curva de fluxo de calor com valores mais baixos e um pouco de atraso. A Figura 1b apresenta as temperaturas calculadas através dos fluxos de calor estimados e a temperatura experimental no mesmo ponto do domínio

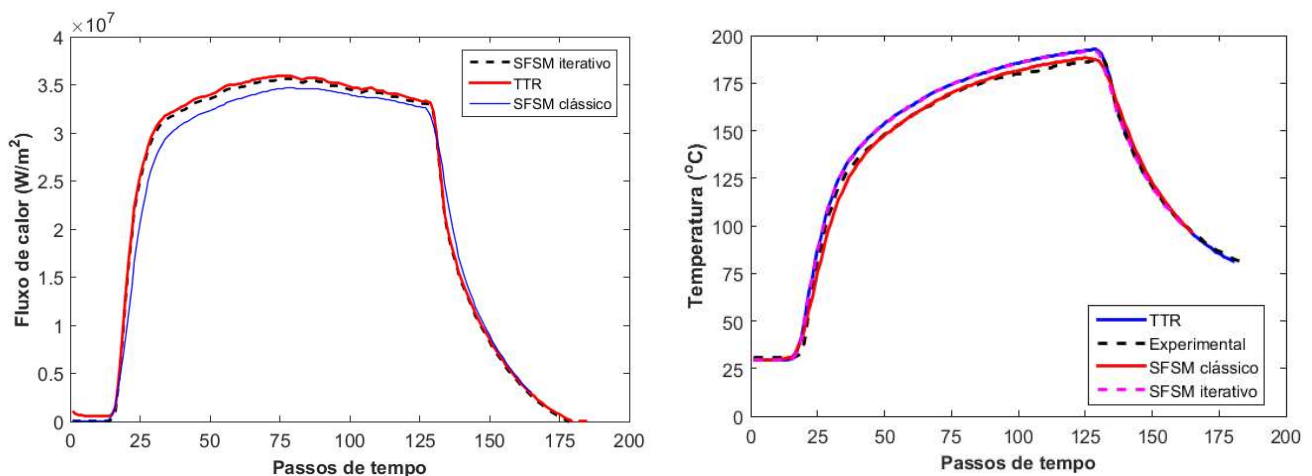


Figura 1. Fluxos de calor estimados (a). Temperaturas estimada e experimental (b).

É possível perceber que em regiões de grande variação de fluxo de calor ocorrem grandes erros nas temperaturas calculadas. Também se nota que para esse caso, as temperaturas calculadas através do fluxo de calor estimado pela técnica SFMSM clássica obtiveram menor resíduo com uma média de 0,274 °C e um desvio padrão de 2,828 °C. As outras técnicas apresentaram resultados similares com uma média de 4,023 °C para a TTR e 3,560 °C para a SFMSM iterativa. Em contrapartida, o menor desvio padrão nos dados de resíduo foi de 2,690 °C para a TTR e o maior foi de 3,116 °C para a SFMSM iterativa. A maior diferença entre a temperatura experimental e estimada numericamente representa apenas 3,2 % da variação de temperatura durante o experimento.

O *hotspot* da ferramenta, ou seja, o ponto que atinge a maior temperatura se encontra nas coordenadas (x; y; z) = (0,5808; 0,0306; 0) e atinge a temperatura máxima de 868 °C. A Figura 2 mostra a posição do *hotspot* em relação a origem e a distribuição de temperatura na face superior da ferramenta de corte para o tempo 41 s (tempo no qual o processo atinge máxima temperatura).

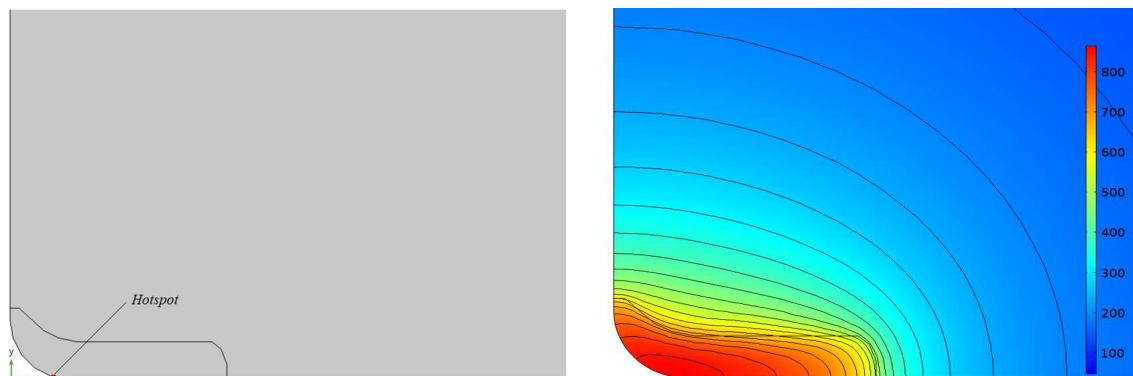


Figura 2. Posição do *hotspot* (esquerda) e distribuição de temperatura na face superior da ferramenta (direita).

Para observar a influência da camada de revestimento na pastilha de metal duro foram considerados dois modelos diferentes: o primeiro com cobertura de TiN e o segundo com Al_2O_3 . Considerou-se a espessura de revestimento de 20 μm e as propriedades termofísicas dos materiais variando com a temperatura foram retiradas de Ferreira (2017). Nota-se, a partir da Figura 3a, que os revestimentos funcionam como isolantes térmicos, mas para esse caso a diferença de temperatura não é tão significativa. Como mostrado na Figura 3b, a diminuição da temperatura no inserto foi maior para o revestimento de óxido de alumínio com uma média de 22,02 °C durante o período de usinagem e de 16,45 °C para nitreto de titânio. Em compensação a temperatura de corte atingindo 912 °C para o Al_2O_3 e 940 °C para o TiN.

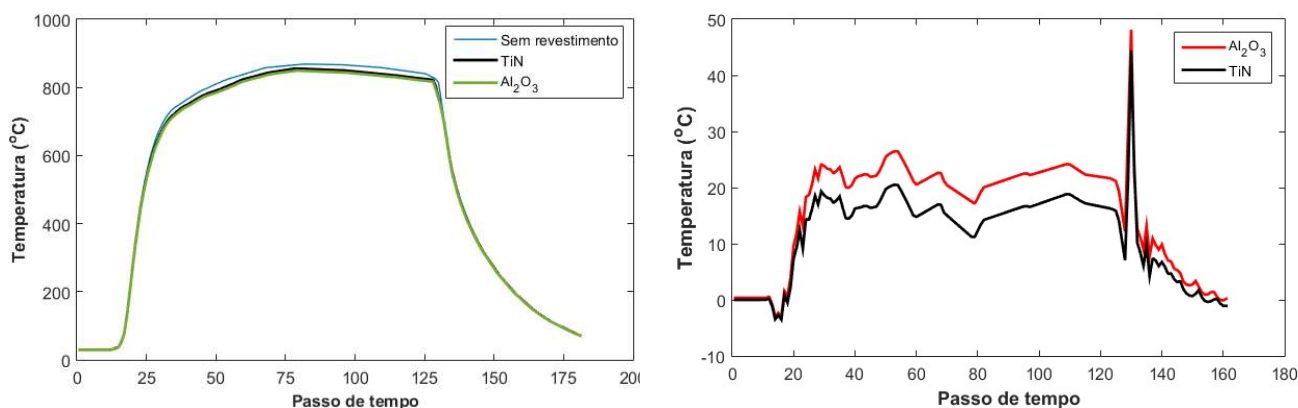


Figura 3. Comparação entre as temperaturas do *hotspot* para diferentes revestimentos (a). Diferença entre as temperaturas sem revestimento e com revestimento (b).

4. CONCLUSÕES

O fluxo de calor estimado para esse processo foi da ordem de $3,5 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$. As temperaturas obtidas numericamente apresentaram uma diferença máxima de 3,2 % da experimental. Utilizando o software COMSOL foi possível determinar o *hotspot* da ferramenta que atingiu uma temperatura máxima de 868 °C. Finalmente, foram feitas simulações utilizando o fluxo de calor estimado e considerando revestimento de TiN e Al_2O_3 . Observou-se uma diminuição na temperatura de aproximadamente 22 °C para o Al_2O_3 e 16 °C para o TiN. Portanto, para as condições de corte utilizadas, a cobertura de óxido deu ao inserto uma melhor proteção térmica.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES e à FAPEMIG pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Beck, J.V.; Blackwell, B.; ST. Clair, C., 1985, *Inverse Heat Conduction: Ill-posed Problems*. New York: Wiley-Interscience Publication, 308p.
- Carvalho, S. R.; Lima e Silva, S. M. M.; Machado, A. R.; Guimarães, G., 2006, *Temperature Determination at the Chip-Tool Interface Using an Inverse Thermal Model Considering the Tool and Tool Holder*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 179, pp. 97-104.
- Diniz, A.E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L., 2013, *Tecnologia da usinagem dos Materiais*. São Paulo, Artliber Editora Ltda., Ed. 8.
- Ferreira, D. C., 2017, *Análise Numérica da Influência Térmica dos Revestimentos em Ferramenta de Corte Usando o Programa COMSOL e Problemas Inversos*, Itajubá, 73p., dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá.
- Huang, S., Tao, B., Li, J., Fan, Y., Yin, Z., 2018a, *Estimation Of The Time And Space-Dependent Heat Flux Distribution At The Tool-Chip Interface During Turning Using An Inverse Method And Thin Film Thermocouples Measurement*. The International Journal of Advanced Manufacturing.
- Huang, S., Tao, B., Li, J., Fan, Y., Yin, Z., 2018b, *On-Line Estimation Of The Tool-Chip Interface Temperature Field During Turning Using A Sequential Inverse Method*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 97(1-4), 939–952.
- Sandvik Coromant. “Metal Duro Revetido”. 1 Dez. 2018. < https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide/pages/default.aspx>.
- Silva, R. G. D., Magalhães, E. S., Lima e Silva, S. M. M., 2018b, *A Time Traveling Regularization Method For Three Dimensional Inverse Problems in Heat Conduction*. In: 17th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT 2018).
- Marusich, C.J. Brand, J.D. Thiele, 2002, *A methodology for simulation of chip breakage in turning processes using an orthogonal finite element model*, Proceedings of the Fifth CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operation, West Lafayette, USA, pp. 139–148.
- Woodbury, K. A., 2003, *Inverse Engineering Handbook*. The Mechanical Engineering Handbook Series, 466p.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

THERMAL PROPERTIES ESTIMATION AND TEMPERATURE FIELD DETERMINATION OF A TUNGSTEN CARBIDE CUTTING TOOL USING INVERSE PROBLEMS AND COMSOL

Nícolas Pinheiro Ramos

Rodrigo Gustavo Dourado da Silva

João Roberto Ferreira

Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva

Federal University of Itajubá – UNIFEI, Institute of Mechanical Engineering – IEM, Heat Transfer Laboratory – LabTC, Campus Professor José Rodrigues Seabra, Avenue BPS, 1303, Pinheirinho, Zip Code 37500-903, Itajubá – MG.
e-mails: nicolas.pramos@outlook.com, rodrigodourado@hotmail.com, jorofe@unifei.edu.br, metrevel@unifei.edu.br

Abstract. In this paper, a methodology is presented to estimate the heat flux generated in the contact region between the chip and the tool. In the estimation of heat flux, a comparison is made for three methodologies: Classic Specified Function (SFSSM), iterative SFSSM and Time Traveling Regularization (TTR). With the estimated heat flux the temperature distribution in the cut region was calculated, the tool hotspot and the influence of the aluminum oxide and titanium nitride coatings on the tool was analyzed. The estimated heat fluxes had little variation between the different techniques used and the temperature had the biggest difference about 3% in relation to the experimental one. The aluminum oxide coating presented a higher reduction of temperature in the cutting tool when compared to the titanium nitride coating.

Keywords: Inverse Problem, Turning Process, Numerical Heat Transfer, Optimization, Tungsten Carbide

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.