

Comsol e técnicas de problemas inversos para estimar o fluxo de calor em uma ferramenta de corte

R. F. Brito, S. R. Carvalho e S. M. M. L. Silva

Com a proposta de utilizar técnicas de problemas inversos em conexão com o pacote Comsol Multiphysics 4.4, este trabalho visa aferir o fluxo de calor e o campo da temperatura em uma ferramenta de torneamento em regime transiente. Para isso, um código foi implementado em Matlab para calcular o fluxo de calor aplicado sob a ferramenta, a partir dos registros de temperatura experimentais. A validação da metodologia é realizada pela comparação dos resultados numéricos e experimentais da temperatura.

Vários processos de engenharia têm o seu desempenho e qualidade afetada por elevados valores de temperatura. Um exemplo típico é o processo de usinagem em que as temperaturas da ferramenta de corte podem ser maiores do que 900°C ^[11]. As temperaturas elevadas alteram a microestrutura e as propriedades físicas da ferramenta durante a usinagem, reduzindo assim a sua capacidade de resistir à tensão mecânica^[4]. A consequência direta dessas alterações é a redução de sua vida útil e desempenho, além de levar a altos custos de operação e redução da qualidade do produto final.

O conhecimento correto dos valores de temperatura e fluxo de calor aplicado neste tipo de processo resulta em vantagens, como o desenvolvimento de técnicas de resfriamento mais eficientes e melhores especificações dos parâmetros de corte em processos de usinagem. Essas temperaturas tem influência de controle sobre a taxa de desgaste da ferramenta de corte, como também sobre o atrito entre a sua área de contato e o cavaco.

No entanto, a medição direta da temperatura num processo de usinagem é difícil de se realizar, devido

ao movimento da peça e a presença de cavaco. Assim, a utilização de técnicas de problemas inversos de condução de calor apresenta-se como uma boa alternativa para obter essas temperaturas, uma vez que permitem a utilização dos dados experimentais obtidos a partir de regiões acessíveis.

Problemas inversos consistem em obter o valor de uma variável pela medição da outra variável que pode ser obtida diretamente^[1]. Estas técnicas usam frequentemente algoritmos de otimização, a fim de minimizar o erro entre o valor calculado e o real da variável em questão. Hoje em dia, vários pesquisadores têm proposto a combinação de técnicas inversas e soluções numéricas de transferência de calor para analisar os campos térmicos durante os processos de usinagem.

Devido ao avanço dos recursos computacionais, o uso de métodos numéricos vem ganhando espaço e passaram a ser utilizados – juntamente com métodos experimentais – nos estudos de campo de temperatura em ferramentas de corte. Um modelo baseado na diferença finita tridimensional para prever a temperatura nos processos de usinagem foi apresentado por Ulutan^[12], que

Rogério Fernandes Brito e Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva desenvolveram este trabalho pela Universidade Federal de Itajubá (Unifei). Solidônio Rodrigues de Carvalho, pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Este artigo foi originalmente apresentado no 8º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (Conem), realizado de 10 a 15 de agosto de 2014, em Uberlândia (MG). Reprodução autorizada.

apresentou soluções muito rápidas e razoavelmente precisas.

Os resultados simulados foram validados com medições térmicas infravermelhas que foram determinadas a partir da usinagem dos materiais AISI 1050 e AISI H13, sob várias condições de corte. No estudo realizado por Wang^[15], um modelo para a análise numérica foi implementado para a obtenção da temperatura de corte do aço inoxidável 316L. A simulação foi criada com o uso do pacote Abaqus v6.8, no qual se utiliza o método de elementos finitos, que é adequado para o cálculo dinâmico não linear. Este combina as vantagens de ambas as descrições lagrangeana e euleriana, assim como o modelo de Johnson-Cook foi usado para modelar o material da peça de trabalho.

Os resultados obtidos dos modelos analítico e numérico por elementos finitos se apresentaram muito próximos. No trabalho de Yang^[13], a distribuição da temperatura da microferramenta no processo de microfresamento foi investigada por meio de simulações numéricas e por uma abordagem experimental. Os processos de microfresamento foram modelados pelo método de elementos finitos tridimensionais acoplados aos efeitos termomecânicos. A distribuição da temperatura de corte na microferramenta, o efeito de variação do raio da aresta sobre a força de corte, e a tensão efetiva durante o microfresamento da liga de alumínio Al2024-T6 usando uma microferramenta de carbeto de tungstênio também foram investigados. Os resultados das simulações mostraram que, com o aumento do raio da aresta da ferramenta, a força de corte aumenta, enquanto que a tensão efetiva e a temperatura de corte média diminuem ligeiramente.

Técnicas inversas já têm sido utilizadas para estudar os campos

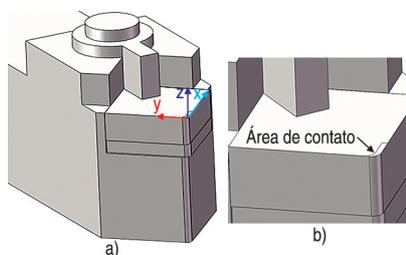


Figura 1 – Esquema de problema térmico (a); detalhe da interface de contato entre a ferramenta e a peça (b)

de temperatura na ferramenta de corte. A solução de um problema de condução de calor inverso tridimensional utilizando um algoritmo (Evolutionary Algorithm) foi demonstrada por Woodbury^[16]. O fluxo de calor na ferramenta durante o processo de torneamento foi determinado utilizando operações evolutivas combinadas com as temperaturas medidas na superfície da ferramenta. A condução de calor tridimensional na ferramenta e porta-ferramenta foi simulada usando o pacote Fluent.

No trabalho de Luchesi e Coelho^[8], um método inverso foi proposto para estimar as fontes de calor no problema de condução de calor bidimensional transiente em um domínio retangular com superfícies convectivas. A equação diferencial parcial não homogênea é resolvida usando o método de transformação de integrais. A função teste para o termo de geração de calor foi obtida pela geometria do cavaco e pela força de corte termomecânica. Em seguida, o termo de geração de calor foi estimado pelo método do gradiente conjugado com problema adjunto.

O método da função especificada sequencial foi utilizado para estimar o fluxo de calor transiente aplicado à face inclinada da ferramenta de corte durante a operação com duas hipóteses diferentes^[10]. Em um deles, a condutividade térmica é assumida como sendo

constante, enquanto na outra varia com a temperatura. A ferramenta de corte foi modelada como um objeto tridimensional. Dados de temperatura simulados foram utilizados para recuperar o fluxo de calor na superfície da ferramenta de corte usando soluções lineares, bem como soluções não lineares.

Este trabalho propõe a utilização de técnicas de problemas inversos com o pacote comercial Comsol Multiphysics 4.4 para estimar o fluxo de calor e do campo de temperatura na zona de contato em regime transiente, em uma ferramenta de corte de torneamento. Um programa em Matlab, com a técnica da função especificada, foi desenvolvido para estimar o fluxo de calor aplicado sobre a ferramenta de corte, usando registros de temperatura experimentais em um determinado ponto. A validação da metodologia proposta foi realizada em experimentos controlados em laboratório.

Formulação teórica

Modelo térmico

O problema tratado neste trabalho é representado pela figura 1, que traz o conjunto que consiste em uma ferramenta de corte de metal duro, um calço posicionado debaixo da ferramenta de corte e este entre a ferramenta e o porta-ferramenta. Há também um grampo e um parafuso para fixar o conjunto. Na figura 1a, o modelo esquemático para o problema térmico de usinagem é apresentado. A geração de calor durante o processo é indicada por uma distribuição do fluxo de calor $q''(x, y, t)$ desconhecido, sobre a área arbitrária no plano x-y. Uma vista detalhada do conjunto é mostrada na figura 1b.

A equação de difusão de calor governando este problema pode ser dada como:

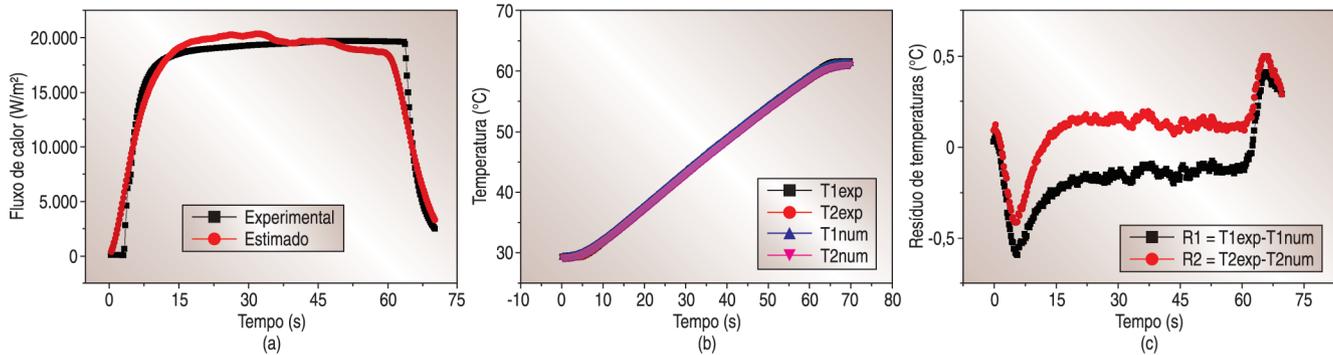


Figura 2 – Fluxo de calor experimental e estimado (a); temperaturas experimentais e estimadas (b); resíduos de temperaturas (c)

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, y, z, t) + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}(x, y, z, t) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}(x, y, z, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}(x, y, z, t), \quad (1)$$

Sujeito às seguintes condições de contorno:

$$-k \frac{\partial T}{\partial z}(x, y, 0, t) = q_0'', \quad \text{na interface de contato com a peça de trabalho (figura 1b)} \quad (2)$$

e

$$-k \frac{\partial T}{\partial \eta} = h(T - T_\infty), \quad \text{nas regiões restantes do conjunto, e ter o seguinte como a condição inicial} \quad (3)$$

$$T(x, y, z, t) = T_0, \quad \text{para } t = 0. \quad (4)$$

O problema direto consiste na obtenção da solução da equação de difusão de calor de acordo com as condições de contorno (equações 1 a 4). O pacote da Comsol, que resolve os problemas térmicos usando o método de elementos finitos, é usado para este propósito. Seu uso para as soluções numéricas das equações diferenciais que governam o fenômeno físico investigado deve ser destacado. Além disso, o Comsol permite ajustar quaisquer condições de contorno, bem como a modelação da geometria, de modo a representar fielmente o sistema investigado como apresentado na figura 1a.

Problema inverso

A técnica inversa adotada neste trabalho é a função especificada^[1]. Esta técnica requer o cálculo do coeficiente de sensibilidade que é feito numericamente a partir do Teorema de Duhamel^[9]. O coeficiente de sensibilidade é então obtido com a utilização de uma sonda numérica que segue as mudanças de temperatura nos pontos equivalentes onde os termopares foram colocados nos experimentos. Uma vez que o coeficiente de sensibilidade é conhecido, o fluxo de calor é estimado com o uso de um código escrito para o ambiente Matlab. Outro parâmetro importante é o valor dos passos de tempos futuros r . Na técnica da função especificada, um valor determinado dos passos dos tempos futuros r é utilizado para estimar o fluxo de calor no presente instante. Na solução do problema inverso, a técnica da função especificada procura por um valor de fluxo de calor que minimiza a função objetivo dada pela equação 5, para cada passo de tempo.

$$F = \sum_{p=1}^r \sum_{j=1}^{ns} (\hat{y}_{j, M+p-1} - T_{j, M+p-1})^2 \quad (5)$$

Validação da metodologia proposta

A grande dificuldade na solução de problemas inversos de condução de calor é a validação da técnica utili-

zada. Esta dificuldade é inerente ao problema, uma vez que a validação do fluxo de calor estimado requer o conhecimento prévio do fluxo de calor experimental.

Observou-se que, em problemas inversos reais, tais como em processos de usinagens, o fluxo de calor experimental não é conhecido. Assim, uma alternativa para a validação da técnica inversa é a realização de um experimento controlado, no qual o fluxo de calor e a temperatura são medidos na ferramenta de corte.

Neste sentido, antes da análise do processo de usinagem real, uma ferramenta de corte de metal duro com dimensões de 12,7 x 12,7 x 4,7 mm foi usada. Um transdutor de fluxo de calor, dois termopares previamente calibrados e um aquecedor elétrico tipo kapton foram utilizados nesta ferramenta.

Este aquecedor foi ligado a uma fonte de alimentação digital (MCE). O transdutor de fluxo de calor foi colocado entre o aquecedor e a ferramenta, a fim de medir o calor. As temperaturas da ferramenta foram medidas com dois termopares. O fluxo de calor e os sinais de temperaturas foram obtidos por um sistema de aquisição de dados HP Série 75000, controlado por um PC. As temperaturas foram medidas com o uso de termopares tipo K (30AWG) ▶

Tabela 1 – Localização dos termopares mostrados na figura 3b

Posição / Termopares	1	2	3	4	5	6	7	8
x (mm)	0	0	0	4,49	6,528	7,222	9,512	5,3
y (mm)	6,45	7,25	3,95	4,116	6,579	4,74	1,715	14,55
z (mm)	-6,55	-11,65	-2,12	-4,83	-4,83	0	0	9,4

soldado por descarga capacitiva e calibrado por meio de um calibrador de temperatura de banho Ertco com incerteza de $\pm 0,01^\circ\text{C}$.

A solução da equação de difusão de calor tridimensional é obtida com o uso do método de elementos finitos, por meio do pacote Comsol. Para isso, um modelo térmico computacional foi utilizado para representar fielmente o modelo experimental da amostra.

Este modelo foi discretizado em uma malha computacional tetraédrica. Os resultados da validação são apresentados nas figuras 2a, 2b e 2c (pág. 54). A figura 2a apresenta uma comparação entre os fluxos experimental e estimado, enquanto a figura 2b compara as temperaturas experimental e numérica. A figura 2c, por sua vez, apresenta o resíduo de temperaturas entre as temperaturas experimental e numérica. O método da função especificada para r igual a 10 intervalos de tempos futuros foi usado na figura 2a.

Montagem experimental em um processo real de usinagem

O teste de usinagem foi realizado em um torno Imor Maxi-II-520-6CV convencional sem refrigeração. O material utilizado no experimento foi um cilindro de ferro fundido cinzento FC 20 EB 126 ABNT de 77 mm de diâmetro externo. A pastilha e o porta-ferramenta usados foram: ferramenta de metal duro ISO SNUN12040408 K20/Brassinter e ISO CSBNR 20K12/Sandvik

Coromant, respectivamente. As temperaturas foram medidas em locais acessíveis da pastilha, calço e porta-ferramenta, utilizando termopares tipo K e um sistema de aquisição de dados HP 75000 Series B controlado por um PC (figura 3a, pág. 57). A tabela apresenta a localização dos termopares mostrados na figura 3b.

A determinação da área de contato da ferramenta de corte representa um dos mais importantes e delicados aspectos entre as principais fontes de erros na obtenção da solução do problema do modelo térmico. Alguns métodos para identificar esta região podem ser encontrados na literatura como, por exemplo, a utilização de um pacote de análise de imagens^[7], ou a aplicação de revestimentos^[14].

Em ambos os processos, a área é medida após o corte. No entanto, neste trabalho, as áreas de contato na interface foram obtidas a partir de três ensaios realizados com as mesmas condições de corte. Para medir a área de contato, um programa de sistema de imagem com câmera de vídeo modelo CCD Hitachi, KP-110, um microcomputador com processador AMD K6 de 450 MHz e o pacote de imagem Global Lab foram utilizados. A área típica de contato é apresentada nas figuras 4a e 4b (pág. 58). O valor da área de contato foi $1,41 \text{ mm}^2$, obtido para o avanço de $0,138 \text{ mm/rot}$, velocidade de corte igual a $135,47 \text{ m/min}$ e profundidade de corte de 5 mm .

Vários testes foram realizados para observar a influência

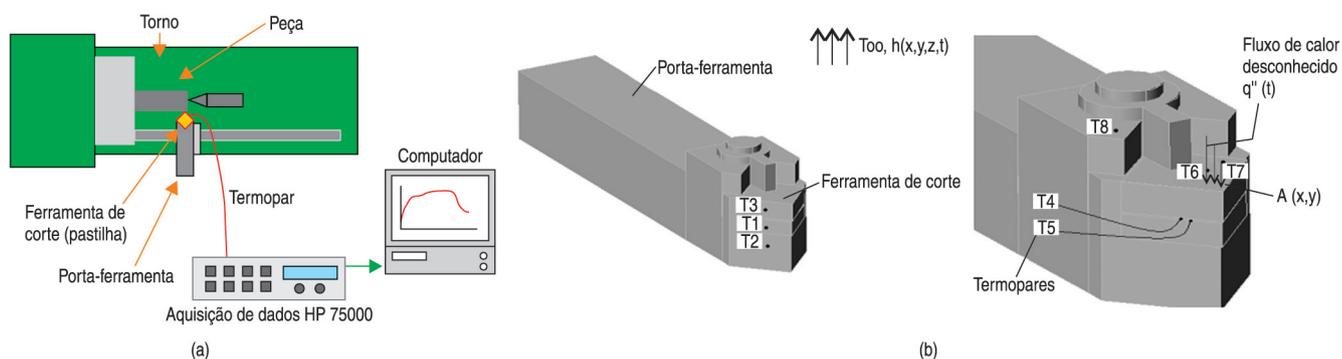


Figura 3 – Aparato experimental utilizado para a aquisição dos sinais de temperatura na ferramenta durante a usinagem (a); detalhes da posição dos termopares soldados na ferramenta (b)

da velocidade de corte, avanço e profundidade na distribuição da temperatura. No entanto, devido à limitação de páginas do presente trabalho, os resultados são apresentados para apenas dois testes. As identificações do teste com as

condições de corte são apresentadas na tabela 2 (pág. 60). Cada condição de corte foi refeita três vezes para observar a repetibilidade. Em cada experimento, o número total de medidas de cada termopar foi $n_t = 180$, com um passo de tempo de 0,5

s. A condutividade e a difusividade térmicas da ferramenta de corte são, respectivamente, $\lambda = 43,1$ Wm/K e $\alpha = 14,8 \times 10^{-6}$ m²/s^[2].

O porta-ferramentas é de aço AISI 1045 e suas propriedades térmicas são: $\lambda = 49,8$ Wm/K e $\alpha = 13,05$ x

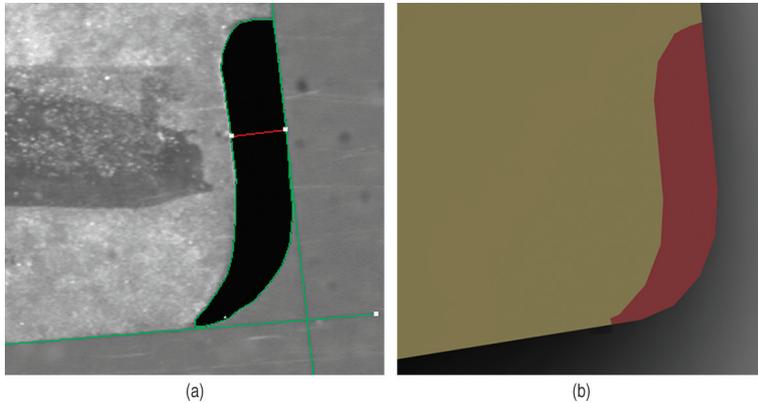


Figura 4 – Tratamento de imagens da área de contato (a); área de contato do modelo computacional (b)

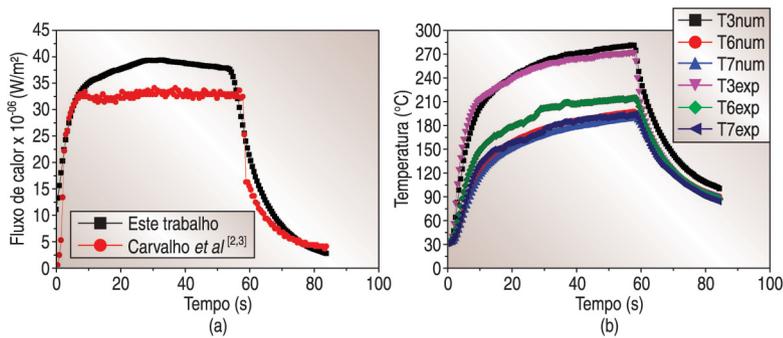


Figura 5 – Fluxo de calor estimado (a); comparação entre as temperaturas experimentais e estimadas para os termopares T_3 , T_6 e T_7

$10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^{[5]}$. O calço abaixo da ferramenta tem as mesmas propriedades térmicas que a ferramenta de corte. Todas as faces, exceto a interface de contato da ferramenta/cavaco, foram submetidas a um coeficiente de

transferência de calor por convecção constante, $h = 20 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. Outra fonte importante de erro que deve ser levada em conta é a resistência térmica de contato existente entre a ferramenta, o calço e o porta-ferramenta.

O contato térmico depende de muitos parâmetros e condições, tais como a natureza de contato, as propriedades da superfície, as pressões etc. Um grande esforço foi gasto no modelo e na técnica de identificação. Embora este problema não seja tratado aqui, o efeito deste contato térmico é simulado como uma dimensão de $10 \mu\text{m}$ de espessura entre os materiais envolvidos, com as propriedades do ar a 300 K . As propriedades térmicas usadas para o ar são: $\lambda = 0,026 \text{ Wm}/\text{K}$ e $\alpha = 22,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^{[6]}$.

Análise dos resultados

Nesta seção, os resultados obtidos para as estimativas do fluxo de calor e da temperatura usando técnicas de problema inverso, função especificada com pacote Comsol, são apresentados. Como mencionado acima, para o estudo do campo de temperatura na ferramenta de corte, três experimentos foram realizados sem alterações nas condições de montagem ou operações.

Cada experimento durou 90 s , com a leitura de temperatura realizada a cada $0,5 \text{ s}$, totalizando 180 valores de temperatura. Vale a pena mencionar que, no início do experimento, não existe contato entre a ferramenta e a peça de trabalho. Por consequência, a ferramenta se

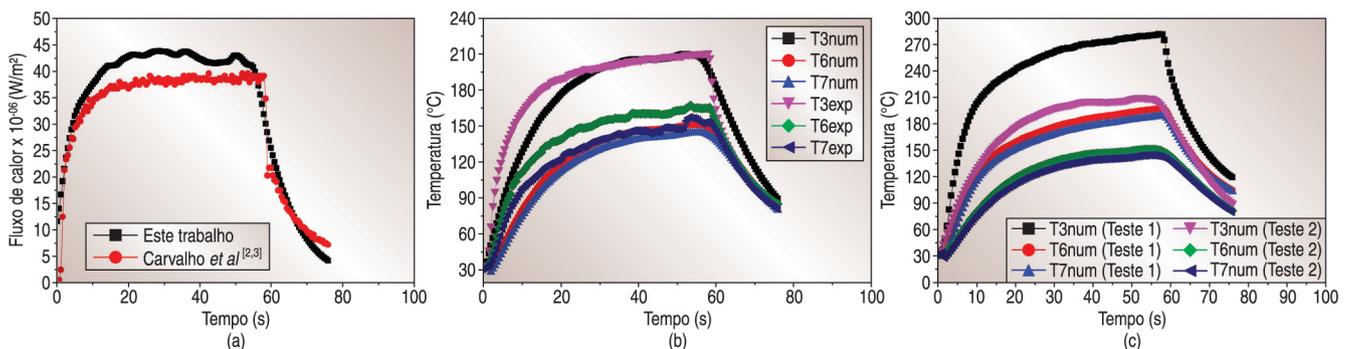


Figura 6 – Fluxo de calor estimado (a); comparação entre as temperaturas experimentais e estimadas para os termopares (b); comparação entre as temperaturas estimadas nas posições T_3 , T_6 e T_7 para testes 1 e 2

Tabela 2 – Condições de corte

Parâmetros de corte	Teste 1	Teste 2
Avanço	0,138 mm/rot	0,138 mm/rot
Velocidade de corte	135,47 m/min	135,47 m/min
Profundidade de corte	5 mm	1 mm
Diâmetro final	72 mm	76 mm

encontra à temperatura ambiente uniforme. O tempo de corte aconteceu entre o tempo inicial até 60 s. Após o sexagésimo segundo, o processo de corte é interrompido e a ferramenta se distancia da peça de trabalho. É justamente durante o tempo de corte que o fluxo de calor é aplicado sobre a ferramenta.

O coeficiente de sensibilidade foi calculado numericamente com a utilização do Comsol, como o problema direto, utilizando-se condições de contorno de fluxo de calor igual a 1 W/m^2 e temperatura inicial igual a 0°C , e um coeficiente de convecção médio de $20 \text{ W/m}^2\text{K}$. Muitas simulações

foram realizadas, como em Carvalho^[2], para analisar a influência do valor de $h = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Na figura 5a (pág. 58), o fluxo de calor foi estimado para o teste 1 (tabela 2), usando a técnica da função especificada para o parâmetro passos de tempos futuros, $r = 10$. Nesta figura, uma comparação com o fluxo de calor, estimado em Carvalho^[2] e Carvalho^[3], também é apresentado. Os testes foram realizados com os valores mais elevados e menores dos passos de tempos futuros para confirmar este valor de r . De acordo com o gráfico, o fluxo de calor é aplicado a partir do início

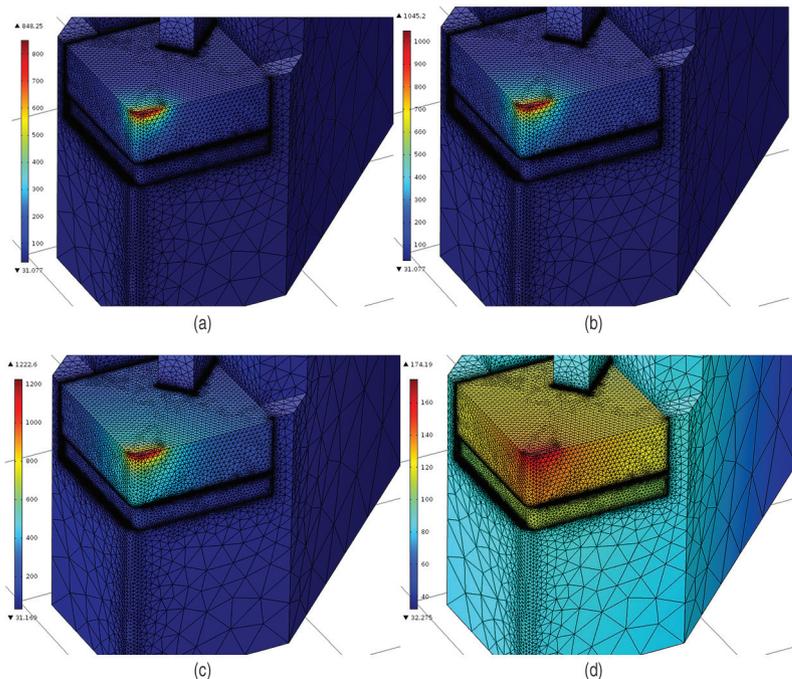


Figura 7 – Campo de temperatura no conjunto para os instantes: $t = 5 \text{ s}$ (a), $t = 10 \text{ s}$ (b), $t = 50 \text{ s}$ (c) e $t = 80 \text{ s}$ (d)

do processo de usinagem até aproximadamente 60 s. Após este intervalo de tempo, o fluxo de calor aplicado é nulo, ou seja, não ocorre usinagem do material. No intervalo de tempo entre 0 e 60 s, o fluxo de calor médio aplicado foi de aproximadamente 35 MW/m². O tempo computacional para estimar o fluxo de calor por meio da técnica da função especificada foi de 9 min e 24 s usando um microcomputador com processador Intel Core i7, com 6 GB de memória RAM, com Windows 7 Ultimate de 64 bits.

Na figura 5b, uma comparação entre as temperaturas experimentais e calculadas nas posições T_3 , T_6 e T_7 é apresentada. Nesta figura, bons resultados podem ser vistos quando se comparam as temperaturas estimadas e experimentais, especialmente para o termopar T_3 . Somente os resultados para valores maiores de temperatura são apresentados.

A figura 6a (pág. 58) apresenta o fluxo de calor estimado para o teste 2 (tabela 2) usando a função especificada para $r = 10$. Uma comparação entre as temperaturas experimentais e calculadas nas posições T_3 , T_6 e T_7 é apresentada na figura 6b. Há também uma boa concordância quando se compara com o trabalho anterior dos autores (figura 6a) e com as temperaturas experimentais (figura 6b). Além disso, uma comparação entre as temperaturas calculadas nas posições T_3 , T_6 e T_7 para os testes 1 e 2 é apresentado na figura 6c. Pode-se notar que as temperaturas aumentam para uma maior profundidade de corte. 

Para completar, as figuras 7a, 7b, 7c e 7d (pág. 60) mostram uma representação do campo de temperatura na montagem (ferramenta de corte, calço e porta-ferramenta) para o teste 1 de um acordo com o pacote Comsol para os instantes 5 s, 10 s, 50 s e 80 s, respectivamente. Como é mostrado na figura 7c, existe um elevado gradiente de temperatura na pastilha.

Conclusão

O campo de temperatura em qualquer região da montagem (ferramenta de corte, calço e porta-ferramenta) é calculado a partir do fluxo de calor estimado na interface de corte. Uma melhora significativa na técnica para estimar o fluxo de calor e as temperaturas numéricas

em um processo de usinagem foi apresentada neste trabalho. Para isso, o método da função especificada do problema inverso e pacote computacional Comsol foram combinados.

Além disso, vários testes de processos de corte utilizando-se ferramentas de metal duro foram realizados a fim de verificar o modelo e a influência dos parâmetros de corte sobre o campo de temperatura. O uso de pacotes comerciais para as soluções numéricas de equações diferenciais que governam o fenômeno físico investigado deve ser destacado, uma vez que estes programas permitem ajustar quaisquer condições de contorno, bem como modelar a geometria de forma a representar fielmente o sistema investigado. 

Referências

- 1] Beck, J. V.; Blackwell, B.; Clair, C. S.: *Inverse heat conduction: Ill-posed problems*. Wiley-Interscience Publication, Nova York, EUA, 1985.
- 2] Carvalho, S. R.; Lima e Silva, S. M. M.; Machado, A. R.; Guimarães, G.: *Temperature determination at the chip-tool interface using an inverse thermal model considering the tool holder*. Journal of Materials Processing Technology. v. 179, p. 97-104, 2006.
- 3] Carvalho, S. R.; Santos, M. R.; Souza, P. F. B.; Guimarães, G.; Lima e Silva, S. M. M.: *Comparison of inverse methods in the determination of heat flux and temperature in cutting tools during a machining process*. High Temperatures High Pressures. v. 38, p. 119-136, 2009.
- 4] Gostimirovic, M.; Kovac, P.; Sekulic, M.: *An inverse heat transfer problem for optimization of the thermal process in machining*. Sādhanā. v. 36, p. 489-504, 2011.
- 5] Grzesik, W.; Niesłony, P.; Bartoszek, M.: *Modelling of the cutting process analytical and simulation methods*. Advances in Manufacturing Science and Technology, v. 33, p. 5-29, 2009.
- 6] Incropera, F. P.; DeWitt, D. P.; Bergman, T. L.; Lavine, A. S.: *Fundamentals of heat and mass transfer*. 6ª ed., John Wiley & Sons, Estados Unidos, 2007.
- 7] Jen, T. C.; Gutierrez, G.: 

- Numerical heat transfer analysis in transient cutting tool temperatures.* Proceedings of 34th National Heat Transfer Conference, Pittsburgh, Pennsylvania. p. 20-22, 2000.
- 8] Luchesi, V. M.; Coelho, R. T.: *An inverse method to estimate the moving heat source in machining process.* Applied Thermal Engineering. v. 45-46, p. 64-78, 2012.
- 9] Ribeiro, C. A. C.: *Uso combinado do software comercial CFX e técnicas de problemas inversos em transferência de calor.* Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2012.
- 10] Samadi, F.; Kowsary, F.; Sarchami, A.: *Estimation of heat flux imposed on the rake face of a cutting tool: A nonlinear, complex geometry inverse heat conduction case study.* International Communication on Heat and Mass Transfer. v. 39, p. 298-303, 2012.
- 11] Trent, E. M.; Wright, P. K.: *Metal cutting.* Butterworth Heinemann. 4^a ed., Woburn, EUA, 2000.
- 12] Ulutan, D.; Lazoglu, I.; Dinc, C.: *Three-dimensional temperature predictions in machining process using finite difference method.* Journal of Materials Processing Technology. v. 209, p. 1.111-1.121, 2009.
- 13] Yang, K.; Liang, Y.-c.; Zheng, K.-n.; Bai, Q.-s.; Chen, W.-q.: *Tool edge radius effect on cutting temperature in micro-end-milling process.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. v. 52, p. 905-912, 2011.
- 14] Yen, D. W.; Wright, P. K.: *A remote temperature sensing technique for estimating the cutting interface temperature distribution.* Journal of Engineering for Industry. v. 108, p. 252-263, 1986.
- 15] Wang, L.; Sun, Z. L.; Wang, X. K.; Guo, S. C.: *Numerical and analytical modelling of temperature rise on the machined stainless steel 316L.* International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, 2010.
- 16] Woodbury, K. A.; Duvvuri, S.; Chou, Y. K.; Liu, J.: *Use of evolutionary algorithms to determine tool heat fluxes in a machining operation.* Proceedings of the Inverse Problems Design and Optimization Symposium, IPDO, Miami, EUA, 2007.