



Estimativa de fluxo de calor e temperatura com o uso de técnicas de problemas inversos

C. A. C. Ribeiro, J. R. Ferreira, H. F. Villa Nova, S. R. Carvalho, R. F. Brito e S. M. M. Lima e Silva

O processo de usinagem é um dos muitos que têm seu desempenho afetado pelos elevados valores de temperatura. Entretanto, é difícil realizar a medição direta da temperatura, devido ao movimento da peça e à presença do cavaco. As técnicas inversas em condução de calor apresentam-se como uma boa alternativa para atingir o objetivo, uma vez que permitem o uso de dados experimentais obtidos em regiões acessíveis. As técnicas de problemas inversos consistem em obter o valor de uma variável por meio da medição de outra grandeza que possa ser mensurada diretamente. A validação da metodologia é feita comparando os resultados numéricos de temperatura com dados experimentais.

Em um processo de usinagem, as temperaturas na ferramenta de corte podem ser superiores a 900°C^[16]. Os resultados dessas temperaturas elevadas são alterações na microestrutura da ferramenta, nas suas propriedades físicas e químicas, o que reduz a capacidade da peça de resistir às tensões mecânicas que aparecem durante o seu uso^[7]. A consequência direta dessas alterações é a redução da vida da ferramenta e do seu desempenho. Isso acaba elevando os custos da operação e reduzindo a qualidade do produto acabado. O conhecimento correto dos valores de temperatura e fluxo de calor aplicados nesse tipo de processo traz como vantagens possibilitar o desenvolvimento de maneiras mais eficientes de refrigeração e melhores especificações dos parâmetros de corte do processo de usinagem.

Komanduri e Hou^[9] e Thompson e Rumford^[15] foram os primeiros a estudar o fluxo de calor aplicado em ferra-

mentas de corte, como as usadas em torneamento. Desde então, diversos outros pesquisadores têm estudado este tema envolvendo técnicas experimentais, como o uso de termopares inseridos em microfuros na ferramenta^[14] e câmeras de infravermelho^[12]. Outras maneiras de se mensurar as temperaturas numa ferramenta de corte são citadas por Komanduri e Hou^[9], como o pirômetro óptico e o efeito termopar-ferramenta.

Ao longo dos anos, as técnicas de instrumentação também evoluíram. Por isso, Carvalho *et al*^[2] também usaram termopares em seus estudos de temperatura em ferramenta de corte, mas com os termopares fixados por solda por descarga capacitiva. Novos pirômetros ópticos e câmeras de infravermelho, de maior precisão e menor tempo de resposta, têm sido usados atualmente, como em Freund e Kabelac^[6]. Todavia, em algumas situações, são usados métodos analíticos para prever campos

Carlos Adriano Corrêa Ribeiro, João Roberto Ferreira, Hélcio Francisco Villa Nova e Sandro Metrevelle M. Lima e Silva desenvolveram este trabalho no Laboratório de Transferência de Calor da Universidade Federal de Itajubá (Unifei, MG). Solidônio Rodrigues de Carvalho, pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU, MG) e Rogério Fernandes Brito, também na Unifei. Este artigo foi originalmente apresentado como palestra técnica no 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (Cobef), realizado de 20 a 24 de maio de 2013 em Itatiaia (RJ). Reprodução autorizada.

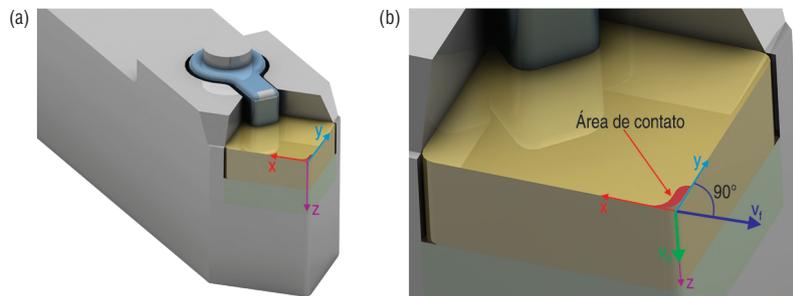


Figura 1 – Conjunto ferramenta, calço e porta-ferramenta (a) e detalhe da interface de contato entre ferramenta e peça (b)

de temperatura na ferramenta de corte, como em Wang *et al*^[19].

Embora os meios de instrumentação tenham também evoluído, a medição direta da temperatura em um processo de usinagem é difícil, devido ao movimento relativo da peça e à presença do cavaco. Dessa forma, deve-se usar meios de instrumentação corretos para mensurar os campos de temperatura na ferramenta. Mesmo havendo uma grande variedade de instrumentos que podem ser usados para mensurar campos de temperatura numa ferramenta de corte, deve haver critérios ao escolhê-los, pois cada instrumento tem vantagens e desvantagens, devendo ser aplicado numa determinada situação.

Os termopares, por exemplo, podem ser confiáveis. Contudo, a presença do cavaco na operação de corte pode danificá-lo, e o uso do microfuro para sua inserção modifica a geometria da ferramenta, podendo levar a resultados equivocados. As câmeras e pirômetros não estão sujeitos a danos pela presença de cavaco, nem alteração da geometria da ferramenta, mas também não conseguem captar a temperatura exatamente na região de contato entre a ferramenta de corte e a peça.

Com maior disponibilidade de recursos computacionais, o uso de métodos numéricos ganhou espaço. Não demorou muito para serem usados, juntamente com os métodos ex-

perimentais, no estudo de campos de temperatura em ferramentas de corte. Os métodos mais difundidos são o das diferenças finitas, o dos elementos finitos e o dos volumes finitos, cada um com suas características próprias.

O método das diferenças finitas teve seu uso mais difundido nos problemas de dinâmica dos fluidos, devido à sua habilidade em tratar termos não lineares, enquanto o dos elementos finitos é típico para resolver problemas puramente difusivos^[11]. O método dos volumes finitos, que surgiu posteriormente, tem o diferencial de ser conservativo em termos de elementos. Ou seja, faz um balanço de energia, momento e massa em todos os elementos da malha, o que não ocorre nos métodos anteriores. Em certas aplicações, são usados mais de um método numérico, visando aproveitar o ponto forte de cada um^[18].

Outra consequência da evolução dos computadores é o desenvolvimento e crescente uso das técnicas inversas. Elas consistem em obter o valor de uma variável de interesse, mediante a medição de outra grandeza que possa ser mensurada diretamente numa região de fácil acesso. Logo, estas técnicas soam como uma boa alternativa para análise térmica de processos de usinagem, uma vez que permitem, por exemplo, conhecer todo o campo de temperatura e fluxo de calor aplicado numa ferramenta de corte, a

partir do sinal de temperatura obtido num único ponto de fácil acesso.

Técnicas inversas têm sido aplicadas para estudar campos de temperatura em ferramentas de corte^[8,13]. Em situações como estas, as temperaturas na ferramenta de corte são obtidas usando termopares inseridos próximos à aresta de corte^[1,2,3,10,17]. Uma alternativa ao uso de termopares são as câmeras de infravermelho^[3]. Devido à natureza do processo, que impossibilita mensurar diretamente o fluxo de calor na aresta de corte, em muitos destes trabalhos, foram usadas técnicas inversas como Seção Áurea, Função Especificada e outras, para estimar o fluxo de calor aplicado na ferramenta.

Neste trabalho, é proposto o uso de técnicas de problemas inversos juntamente com o *software* comercial Ansys CFX 12, com o objetivo de estimar o fluxo de calor e o campo de temperatura, em regime transiente, numa ferramenta de corte de torneamento. Um programa em Fortran, que tem implementada a técnica inversa, função especificada, foi desenvolvido para estimar o fluxo de calor aplicado na ferramenta, a partir do histórico de temperatura experimental num determinado ponto. Quando o fluxo de calor é estimado, mais uma vez é então usado o Ansys CFX 12, para obter o campo de temperatura em toda a ferramenta de corte. A validação da metodologia é feita comparando os resultados numéricos de temperatura com dados experimentais.

Formulação do problema

Modelo térmico do conjunto

O problema tratado neste trabalho é representado pelas figuras 1a e 1b, que mostram um conjunto formado por uma ferramenta de corte de metal duro, um calço de fixação posicionado sob a ferramenta de corte (entre a

ferramenta e o porta-ferramenta) e o porta-ferramenta. Há também um grampo e um parafuso para fixação do conjunto. Uma vista em perspectiva é mostrada pela figura 1a, enquanto a figura 1b mostra o detalhe do conjunto. O vetor velocidade de avanço v_f está contido no plano xy , na direção x , formando um ângulo de 90° com o vetor y . O vetor velocidade de corte v_c está contido no plano xz , na direção positiva do eixo de orientação z .

A equação da difusão de calor, que rege este problema, pode ser dada por:

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

sujeito às seguintes condições de contorno $-k \frac{\partial T}{\partial z}(x, y, 0, t) = q_0''$ na interface de contato com a peça (figura 1b) e $-k \frac{\partial T}{\partial \eta} = h(T - T_\infty)$ e nas demais regiões do conjunto, tendo como condição inicial

$$T(x, y, z, t) = T_0 \text{ em } t = 0$$

Onde:

η = a normal, para fora, nas coordenadas x , y e z ,

q_0'' = fluxo de calor,

T = temperatura,

T_∞ = temperatura ambiente,

T_0 = temperatura inicial,

k = condutividade térmica,

α = difusividade térmica e

h = coeficiente de transferência de calor por convecção.

Solução do problema direto

O problema direto consiste em resolver a equação da difusão de calor, segundo as condições de contorno mencionadas anteriormente. Para isto, é usado o programa Ansys CFX, que resolve as equações diferenciais utilizando o método dos volumes finitos.

O problema inverso

A técnica inversa adotada neste trabalho é a função especificada. Primeiramente, esta técnica exige o cálculo do coeficiente de sensibilidade, que é feito numericamente a partir do teorema de Duhamel^[5].

O coeficiente de sensibilidade é então obtido com o uso de uma sonda numérica, que acompanha a evolução da temperatura no ponto equivalente ao que foi posicionado o termopar nos experimentos. Tendo em mãos o coeficiente de sensibilidade, é estimado, com o uso de um programa em linguagem Fortran, o fluxo de calor.

Outro parâmetro importante é o valor dos tempos futuros r . Pela técnica da função especificada, é usado um determinado valor de tempos futuros r para estimar o fluxo de calor no instante atual. Na resolução do problema inverso, a função especificada busca obter um valor de fluxo de calor que minimize a função objetivo dada pela equação 2 para cada instante de tempo.

$$F = \sum_{p=1}^{np} \left(T_{\text{exp}}(x, y, z, t)_p - T_{\text{num}}(x, y, z, t)_p \right)^2 \quad (2)$$

Onde:

np = número total de tomadas de temperatura e

p = tomada de temperatura no instante de tempo t , nas posições x , y , z .

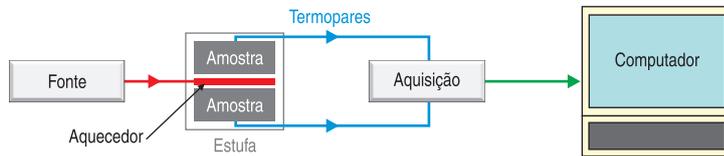


Figura 2 – Aparato experimental usado para validação da metodologia proposta

Validação

A validação da metodologia foi realizada segundo Correa Ribeiro^[5], com experimentos controlados nos quais os fluxos de calor e as temperaturas foram medidas em uma amostra homogênea de aço inox AISI 304 com dimensões de 60 x 100 x 9,5 mm. O aparato experimental é representado pela figura 2.

Durante o experimento, as amostras homogêneas de aço inox AISI 304 foram aquecidas uniformemente em sua superfície por um aquecedor resistivo de kapton, que possui resistência de 15 Ω e área de aquecimento de 50 x 50 mm e 0,2 mm espessura. Como o aquecedor possui uma área menor do que a área da amostra, obtém-se o efeito de propagação de calor tridimensional. Este problema tridimensional possui condição de contorno de fluxo de calor prescrito na região de aquecedor e é isolado nas demais regiões^[5].

Uma fonte de alimentação digital Instrutemp ST-305D-II foi usada para gerar o fluxo de calor, por efeito Joule, para o aquecedor. O controle da intensidade do fluxo de calor aplicado é feito por meio da variação

dos parâmetros de tensão e corrente. Para minimizar os erros na medição do fluxo de calor, utilizou-se uma montagem simétrica para a amostra. Além disso, os valores de corrente e tensão aplicados foram medidos pelos multímetros Instrutherm MD-380 e Minipa ET-2042C, previamente calibrados.

Os efeitos da convecção são desprezados pelo uso de poliestireno em volta da montagem, de maneira a manter uma espessura de 50 mm em qualquer direção. Adicionalmente, o conjunto foi todo posicionado dentro de uma estufa Marconi MA030. Os interstícios de ar entre as amostras são reduzidos com uso da pasta térmica de prata Artic Silver, que melhora o contato entre as amostras.

A solução da respectiva equação de difusão de calor tridimensional é obtida com o uso do método dos volumes finitos do pacote Ansys CFX. Para isso, foi usado um modelo térmico computacional representando fielmente o modelo experimental da amostra. Este modelo foi discretizado em uma malha computacional de elementos hexaédricos. Ao resolver as equações discretizadas que regem o modelo térmico, obtém-se o campo

de temperatura em qualquer ponto da amostra. A malha possui refinamento de modo a ter 60 volumes na direção x, 100 volumes na direção y e 20 volumes na direção z, perfazendo um total de 120.000 elementos.

Os resultados da validação são apresentados na figura 3. A figura 3a mostra uma comparação entre o fluxo experimental e estimado, enquanto a 3b compara as temperaturas experimental e numérica. Na figura 3c apresenta-se o desvio entre temperatura experimental e numérica.

Procedimento experimental

Para obter dados experimentais, foram realizados experimentos controlados com o uso de um torno mecânico convencional Imor modelo Maxi II 520, de 4,4 kW de potência, e de um sistema de aquisição de dados HP 75000 B com voltímetro E 1326B comandado por computador, ao qual está conectado um termopar tipo K para medição da temperatura. O esquema da bancada experimental é representado pela figura 4a (pág. 46). Na figura 4b observa-se o detalhe do termopar soldado por descarga capacitiva.

Tomando como referência o sistema de coordenadas posicionado na ponta da ferramenta, conforme figura 4b, as coordenadas x, y, z da posição do termopar são, respectivamente, 0; 3,95; 11,52 mm. Foi escolhida uma ferramenta de metal duro (código ISO SNUN 120412 H1P – K10) e seu res-

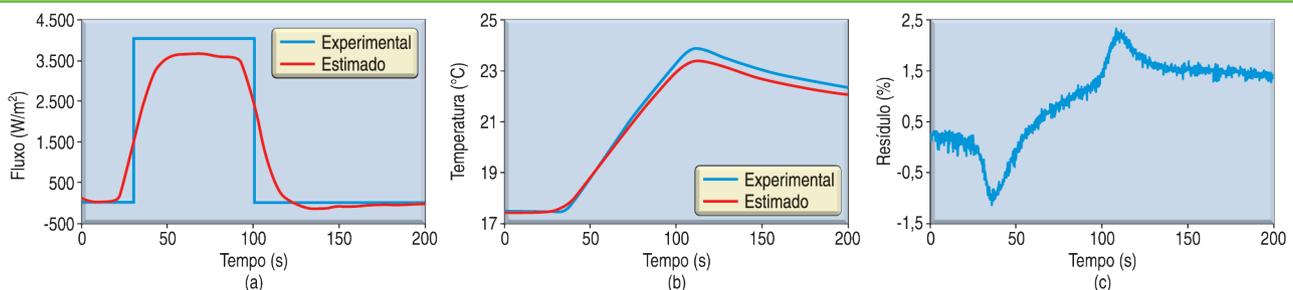


Figura 3 – Comparação entre resultados experimentais de fluxo (a), temperatura (b) e desvio entre temperaturas experimental e numérica (c)

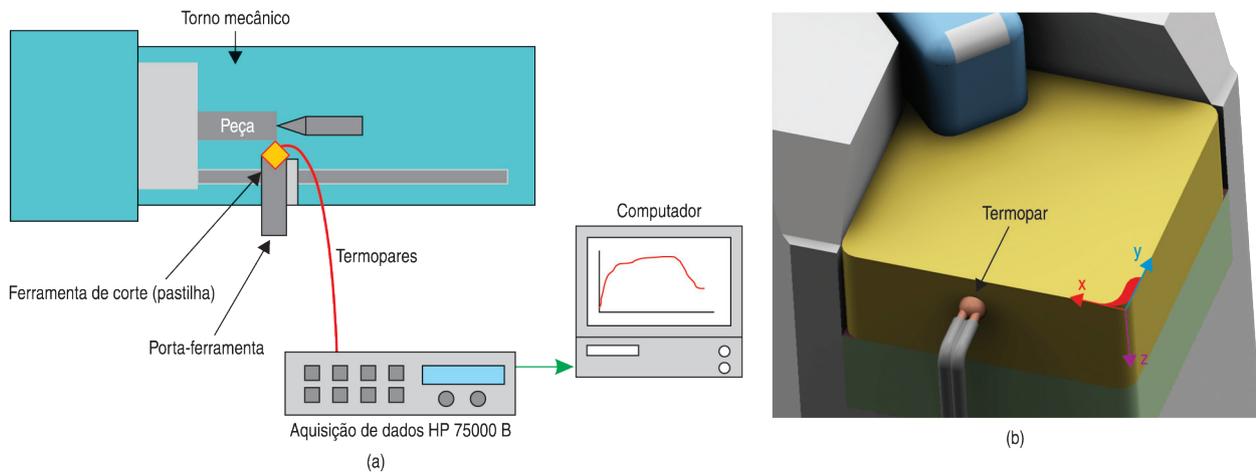


Figura 4 – Aparato experimental usado para adquirir temperaturas na ferramenta durante a usinagem (a) e detalhe da posição do termopar soldado à ferramenta (b)

pectivo porta-ferramenta (código ISO CSBNR 20K12). Nos corpos de prova foi utilizado o ferro fundido cinzento ABNT FC 20 EB 126a, com 77 mm de diâmetro e 77 mm de comprimento. Foram realizados 15 experimentos para garantir a repetibilidade dos resultados. Em cada teste, foram tomados 300 valores de temperatura num intervalo de tempo de 0,5 s.

A identificação da correta área de contato entre a ferramenta e

a peça foi obtida por meio de um sistema de tratamento de imagens, composto por uma câmera Hitachi CCD, modelo KP 110, um computador e *software* de tratamento de imagens Global Lab Image. O valor obtido da área de contato foi de $0,410835 \text{ mm}^2$ para a condição de corte de $0,138 \text{ mm/rot}$, velocidade de corte de $217,72 \text{ mm/rot}$ e profundidade de corte de 3 mm .

Resultados

Os valores experimentais de fluxo de calor e temperatura foram obtidos com a realização de experimentos controlados no Laboratório de Transferência de Calor e Massa da Universidade Federal de Uberlândia (UFU, MG), como já descrito em Carvalho^[2], enquanto a validação do uso de técnicas inversas e do programa Ansys CFX foi apresentada em Corrêa Ribeiro^[5].

Resultados

Para o estudo do campo de temperatura em ferramenta de corte, foram realizados 15 experimentos, sem alterações nas condições de montagem e operação. Cada experimento teve duração de 90 s, com tomadas de temperaturas a cada 0,5 s, num total de 180 valores de temperatura. O tempo de corte dá-se entre o instante inicial e o instante 60 s. Após 60 s, o corte é cessado e a ferramenta afasta-se da peça. E é durante o tempo de corte que o fluxo de calor é aplicado na ferramenta. Como no início do experimento não há contato entre a ferramenta e a peça, a ferramenta encontra-se homoganeamente em temperatura ambiente.

Nas simulações numéricas são adotadas as propriedades termofisi-

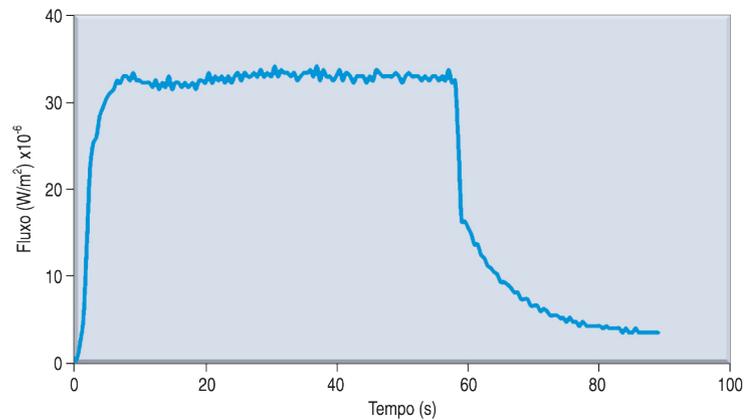


Figura 5 – Comparação entre fluxo de calor experimental e estimado via função especificada

cas apresentadas na tabela 1 (pág. 48). O modelo numérico adotado não contempla resistência térmica de contato entre os componentes do conjunto.

O coeficiente de sensibilidade foi calculado numericamente como

problema direto, usando o programa Ansys CFX, com condições de contorno de fluxo de 1 W/m^2 , temperatura inicial de 0°C e coeficiente de convecção 20 W/mK . O coeficiente de sensibilidade φ apon-

Tabela 1 – Propriedades termofísicas adotadas

| ELEMENTO | CONDUTIVIDADE (W/mK) | CALOR ESPECÍFICO (J/kgK) | MASSA ESPECÍFICA (kg/m ³) | DIFUSIVIDADE |
|---------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| Ferramenta de corte | 43,1 | 332.94 | 14.900 | 8.688×10^{-6} |
| Calço de fixação | 43,1 | 332.94 | 14.900 | 8.688×10^{-6} |
| Porta-ferramenta | 49,8 | 486.13 | 7.850 | 13.050×10^{-6} |

ta o quanto a temperatura, num determinado local da geometria, é afetada pelo fluxo de calor aplicado. Nota-se que o ganho de calor não é linear, devido ao efeito da convecção.

A figura 5 (pág. 47) apresenta o fluxo de calor estimado segundo a técnica da função especificada, para $r = 10$ tempos futuros. De acordo com o gráfico, o fluxo de

calor é aplicado desde o início do processo de usinagem até aproximadamente 60 s. Após este momento, o fluxo de calor aplicado é nulo, ou seja, não ocorre usinagem de material. No intervalo de tempo entre 0 e 60 s, o fluxo de calor médio aplicado foi de aproximadamente 32 kW/m².

A comparação entre a temperatura experimental e a estimada

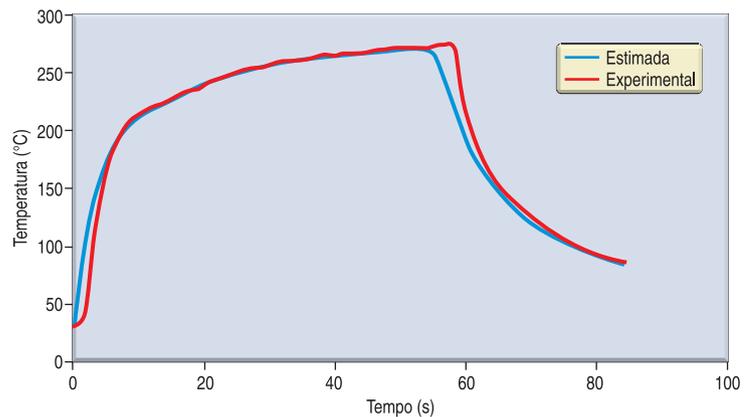
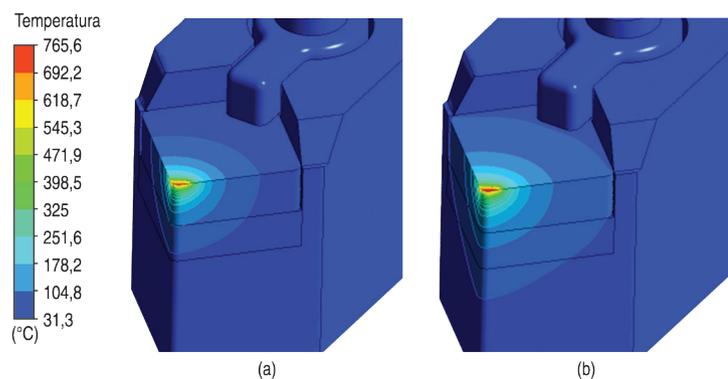


Figura 6 – Comparação entre temperatura experimental e estimada

Figura 7 – Gradiente de temperatura no instante $t = 30$ (a) e $t = 60$ (b)

é apresentada pela figura 6 (pág. 48). Notam-se pequenas discordâncias nos instantes inicial e final da usinagem. Entretanto, no período de corte houve concordância entre os valores da temperatura experimental e a estimada. O resíduo entre a temperatura experimental e a temperatura estimada foi em torno de 0,32%, cuja maior discrepância de valores é de 1,04%.

Essas discordâncias ocorrem em consequência da dificuldade que o método da função especificada tem para tratar descontinuidades no parâmetro a ser estimado que, neste trabalho, trata-se do fluxo de calor. Esta dificuldade acontece porque o método se baseia no cálculo da taxa de variação da temperatura em função do calor aplicado. Na prática, essas descontinuidades representam os instantes em que o fluxo de calor sai de um valor nulo para um valor elevado, no início da usinagem, bem como no instante em que o fluxo de calor sai desse valor elevado, tornando-se nulo novamente.

Para completar, a figura 7 (pág. 48) mostra uma representação do gradiente térmico no conjunto da ferramenta segundo o programa Ansys CFX, para os instantes de tempo de 30 e 60 s.

Conclusões

Uma técnica para estimar o fluxo de calor e a temperatura num processo de usinagem acoplando técnica inversa e o programa Ansys CFX foi apresentada neste trabalho. A diferença média entre as temperaturas experimental e esti- 

mada foi menor que 5%. As técnicas inversas mostram-se promissoras em estimar parâmetros que não possam ser mensurados diretamente por meio de outra variável qualquer. O uso de programas comerciais para resolução numérica de equações

diferenciais que regem os fenômenos físicos investigados merecem destaque, pois permitem adequar quaisquer condições de contorno, bem como modelar a geometria de modo a representar fielmente o sistema investigado.

Embora o acoplamento entre técnica inversa e o programa Ansys CFX tenha apresentado resultados satisfatório na estimação de fluxo de calor e temperatura, ainda cabem melhorias, como o uso de múltiplos sinais de temperatura medidas. 

Referências

- 1] Battaglia, J. L.; Puigsegur, L.; Cahuc, O.: *Estimated temperature on a machined surface using an inverse approach*. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 44, p. 2.671-2.680, 2005.
- 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] Chang, H. H.; Hung, C. L.: *A three-dimensional inverse problem in predicting the heat fluxes distribution in cutting tools*. Numerical Heat Transfer, v. 48, p. 1.009-1.034, 2005.
- 4] Cheng, H. H.; Li, C. J.; Li, R.; Shih, A. J.: *A three-dimensional inverse problem in estimating the applied heat flux of a titanium drilling: theoretical and experimental studies*. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 50, p. 3.265-3.277, 2007.
- 5] Correa Ribeiro, C. A.: *Uso combinado do software comercial CFX e técnicas de problemas inversos em transferência de calor*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil, 97 p., 2012.
- 6] Freund, S.; Kabelac, S.: *Investigation of local heat transfer coefficient in plate heat exchanges with temperature oscillations IR thermography and CFD*. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 53, p. 3.764-3.781, 2010.
- 7] Gostimirovic, M.; Kovac, P.; Sekulic, M.: *An inverse heat transfer for optimization of the thermal process in machining*. Sādhanā, v. 36, agosto de 2011, p. 489-504, 2011.
- 8] Jen, T. C.; Guitierrez, G.; Eapen, S.: *Numerical analysis in interrupted cutting tools temperatures*. Numerical Heat Transfer, v. 39, p. 1- 20, 2001.
- 9] Komanduri, R.; Hou, Z. B.: *A review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperature generated in* 

- some manufacturing process and tribology*. Tribology International, v. 34, p. 145-160, 2001.
- 10] Lazard, M.; Corvisier, P.: *Inverse method for transient temperature estimation during machining*. 5th International Conference on Inverse Problem in Engineering: Theory and Practice, Cambridge, UK, 2005.
- 11] Maliska, C. R.: *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*. LTC, 2^a ed., 453 p., 2004.
- 12] Stephenson, D. A.: *Assessment of steady-state metal cutting temperature based on simultaneous and infrared and thermocouple data*. Journal of Engineering for Industry, v. 113, p. 121-128, 1991.
- 13] Stephenson, D. A.: *Cutting temperature of ceramic tools in high speed machining of difficult-to-cut materials*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 36, p. 611-634, 1996.
- 14] Tay, A. O.: *The importance of allowing for the variation of thermal properties in numerical computational of temperature distribution in machining*. Journal of Material Processing Technology, v. 28, p. 49-58, 1991.
- 15] Thompson, B.; Rumford, C.: *An Enquiry Concerning the Source of Heat Which is Excited by Friction*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, v. 88, Londres, 1798.
- 16] Trent, E. M.; Whight, P. K.: *Metal cutting*. Butterworth Heinemann, 4^a ed., Woburn, EUA, 446 p., 2000.
- 17] 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.
- 18] Wang, B. J.; Tian, Z. H.: *Application of finite element-finite difference method to the determinations of transient temperature field in functionally graded materials*. Finite Element Analysis and Design, v. 41, p. 335-349, 2005.
- 19] Wang, L.; Sun, Z. L.; Wang, X. K.; Guo, S. C.: *Numerical and analytical modeling of temperature rise on the machined stainless steel 316L*. IRE Professional Group, v. 30, 2010. 