

O USO DO COMSOL E DE TÉCNICAS DE PROBLEMAS INVERSOS PARA ESTIMAR O FLUXO DE CALOR EM UMA FERRAMENTA DE CORTE

Rogério Fernandes Brito, rogbrito@unifei.edu.br¹

Solidônio Rodrigues de Carvalho, srcarvalho@mecanica.ufu.br²

Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva, metrevel@unifei.edu.br³

¹Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Itabira, Minas Gerais, Brasil,

²Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil,

³Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Itajubá, Minas Gerais, Brasil.

Resumo: Este trabalho propõe a utilização de técnicas de problemas inversos em conexão com o pacote COMSOL Multiphysics 4.4[®] para estimar o fluxo de calor e o campo da temperatura em uma ferramenta de corte de torneamento em regime transiente. O principal objetivo do presente trabalho é apresentar as melhorias realizadas em relação a trabalhos anteriores dos autores para desenvolver a geometria complexa de um processo de usinagem. A função especificada, que é uma técnica problema inverso, foi implementada em um código para o ambiente em MATLAB[®] para calcular o fluxo de calor aplicado sobre a ferramenta, a partir dos registros de temperatura experimentais. Uma vez que o fluxo de calor é conhecido, o pacote é novamente utilizado para obter o campo de temperatura na ferramenta de corte. A validação da metodologia é realizada através da comparação dos resultados numéricos e experimentais da temperatura.

Palavras-chave: COMSOL, problema inverso, processo de usinagem, transferência de calor.

1. INTRODUÇÃO

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 (Trent e Wright, 2000). As temperaturas elevadas alteraram a microestrutura e as propriedades físicas da ferramenta durante a usinagem, reduzindo assim a sua capacidade de resistir à tensão mecânica (Gostimirovic *et al.*, 2011). A consequência direta dessas alterações é a redução de sua vida útil e desempenho. Isto leva a altos custos de operação e redução da qualidade do produto final. O conhecimento correto dos valores de temperatura e fluxo de calor aplicada neste tipo de processo resulta em vantagens como o desenvolvimento de técnicas de resfriamento mais eficientes, bem como melhores especificações dos parâmetros de corte em processos de usinagem. Essas temperaturas tem uma influência de controle sobre a taxa de desgaste da ferramenta de corte, bem como sobre o atrito entre a área de contato da ferramenta de corte e o cavaco. No entanto, a medição direta da temperatura num processo de usinagem é difícil de se realizar, devido ao movimento da peça, bem como 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 estas técnicas permitem a utilização dos dados experimentais obtidos a partir de regiões acessíveis. Problemas inversos consistem em obter o valor de uma variável, através da medição da outra variável que pode ser obtida diretamente (Beck *et al.*, 1985). Estas técnicas usam frequentemente algoritmo 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 não demorou muito antes que eles começassem a ser utilizados, juntamente com métodos experimentais, nos estudos de campos 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 *et al.* (2009). O modelo baseado no método de diferenças finitas proposto neste trabalho apresentou soluções muito rápidas e razoavelmente precisas. Os resultados simulados foram validados com medições térmicas infravermelhas que foram determinados a partir da usinagem dos materiais AISI 1050 e AISI H13 sob várias condições de corte. No estudo realizado por Wang *et al.* (2010) 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[®] a qual utiliza o método de elementos finitos, que é adequado para o cálculo dinâmico não-linear. Um modelo de elementos finitos, que combina as vantagens de ambas as descrições lagrangeana e

euleriana, foi usado. 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 *et al.* (2011), a distribuição da temperatura da micro-ferramenta no processo de micro-fresamento foi investigado por meio de simulações numéricas e por uma abordagem experimental. Os processos de micro-fresamento foram modelados pelo método dos elementos finitos tridimensionais acoplados aos efeitos termomecânicos. A distribuição da temperatura de corte na micro-ferramenta, o efeito de variação do raio da aresta da ferramenta sobre a força de corte, e a tensão efetiva durante o micro-fresamento da liga de alumínio Al2024-T6 usando uma micro-ferramenta de carboneto 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 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 Woodburg *et al.* (2007). 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 (2012), 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 aplicada à face inclinada da ferramenta de corte durante a operação de corte com duas hipóteses diferentes (Samadi *et al.*, 2012). Em um deles, a condutividade térmica é assumida como sendo constante, e na outra esta 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, numa 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.

2. FORMULAÇÃO TEÓRICA

2.1. Modelo Térmico

O problema tratado neste trabalho é representado pela Fig. 1a, que representa 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 de usinagem é indicado por uma distribuição do fluxo de calor $q''(x, y, t)$ desconhecido, sobre a área arbitrária sobre o plano x-y. Uma vista detalhada do conjunto é mostrada na Fig. 1b.

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

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

sujeito às seguintes condições de contorno:

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

e

$$-k \frac{\partial T}{\partial \eta} = h(T - T_\infty), \text{ nas regiões restantes do conjunto,} \quad (3)$$

e ter o seguinte como a condição inicial

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

O problema direto consiste na obtenção da solução da equação de difusão de calor de acordo com as condições de contorno (Eqs. 1 a 4). O pacote da COMSOL, que resolve os problemas térmicos usando o método do elementos finitos, é usado para este propósito. O uso do COMSOL 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 Fig. 1a.

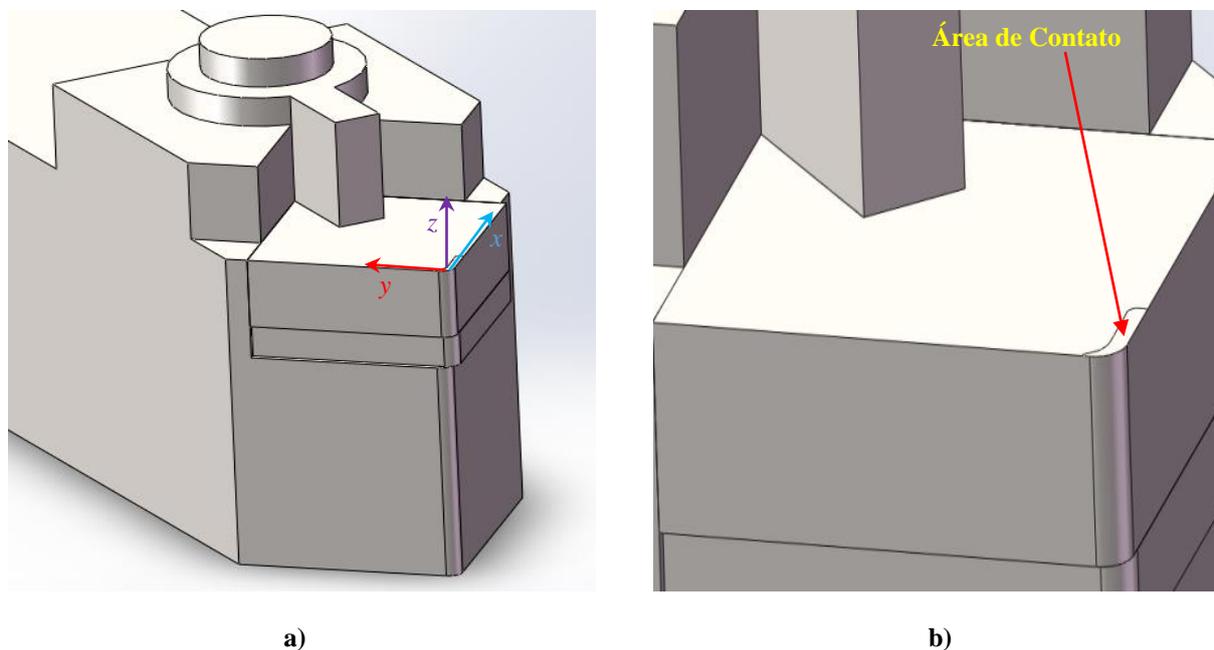


Figura 1. a) Esquema de problema térmico e b) Detalhe da interface de contato entre a ferramenta e a peça.

2.2. Problema Inverso

A técnica inversa adotada neste trabalho é a função especificada (Beck *et al.*, 1985). Esta técnica requer o cálculo do coeficiente de sensibilidade que é feito numericamente a partir do Teorema de *Duhamel* (Correa Ribeiro, 2012). O coeficiente de sensibilidade é então obtido com a utilização de uma sonda numérico 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 Eq. (5), para cada passo de tempo.

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

3. VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

A grande dificuldade na solução de problemas inversos de condução de calor é a validação da técnica utilizada. 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 0,0127 x 0,0127 x 0,0047 m 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 fornecido à ferramenta. 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) soldado por descarga capacitiva e calibrado usando-se um calibrador de temperatura de banho ERTCO com incerteza de $\pm 0,01$ °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 Multiphysics® 4.4. 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 Figs. 2a, 2b e 2c. A Figura 2a apresenta uma comparação entre os fluxos experimental e estimado, enquanto a Fig. 2b compara as temperaturas experimental e numérica. A Figura 2c 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 Fig. 2a.

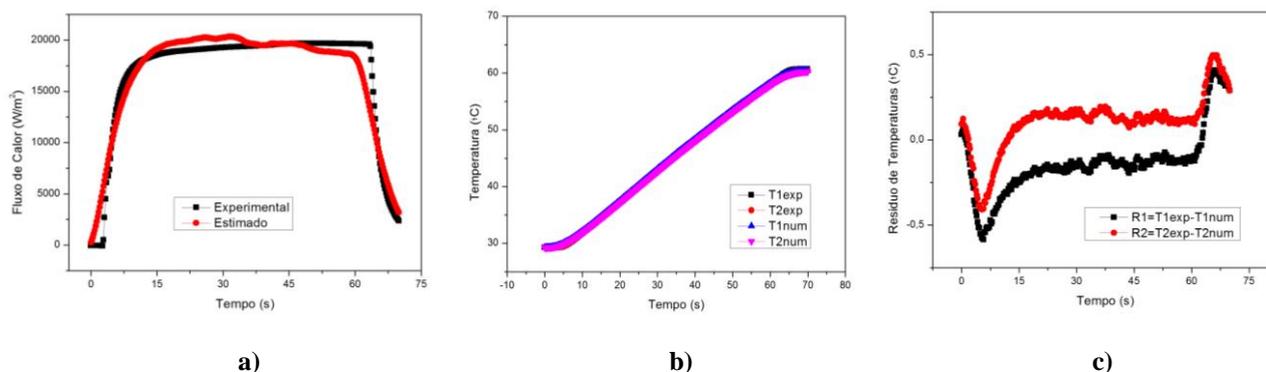


Figura 2. a) fluxo de calor experimental e estimado, b) as temperaturas experimentais e calculadas c) resíduos de temperatura.

4. 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. O inserto e o porta-ferramentas usados foram: ferramenta de metal duro ISO SNUN12040408 K20/Brassinter e ISO CSBNR 20K12/SANDVIK COROMAT, respectivamente. As temperaturas foram medidas em locais acessíveis do inserto, calço e porta-ferramenta, utilizando termopares tipo K e um sistema de aquisição de dados HP 75000 Series B controlado por um PC (Fig. 3a). A Tabela 1 apresenta a localização dos termopares mostrados na Fig. 3b.

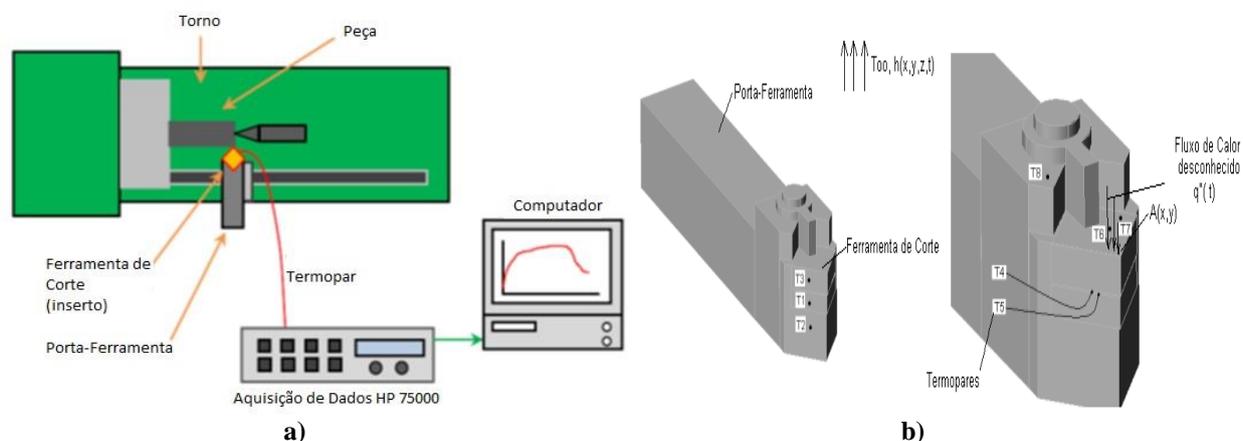


Figura 3. a) Aparato experimental utilizado para a aquisição dos sinais de temperatura na ferramenta durante a usinagem e b) detalhes da posição dos termopares soldados na ferramenta.

Tabela 1. Localização dos termopares mostrados na Fig. 3b.

Posição/Termopares	1	2	3	4	5	6	7	8
x [mm]	0,0	0,0	0,0	4,490	6,528	7,222	9,512	5,300
y [mm]	6,45	7,25	3,950	4,116	6,579	4,740	1,715	14,55
z [mm]	-6,55	-11,65	-2,12	-4,83	-4,83	0,0	0,0	9,4

A determinação da área de contato da ferramenta de corte representa um dos mais importantes 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, (Jen e Gutierrez, 2000), ou a aplicação de revestimentos (Yen e Wright, 1986). Em ambos os processos, a área é medida após o processo de corte. Este procedimento também é utilizado aqui. 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 Figs. 4a e 4b. O valor da área de contato foi 1,41 mm², obtidos para a avanço de 0,138 mm/rot, velocidade de corte igual a 135,47 m/min e profundidade de corte de 5,0 mm.

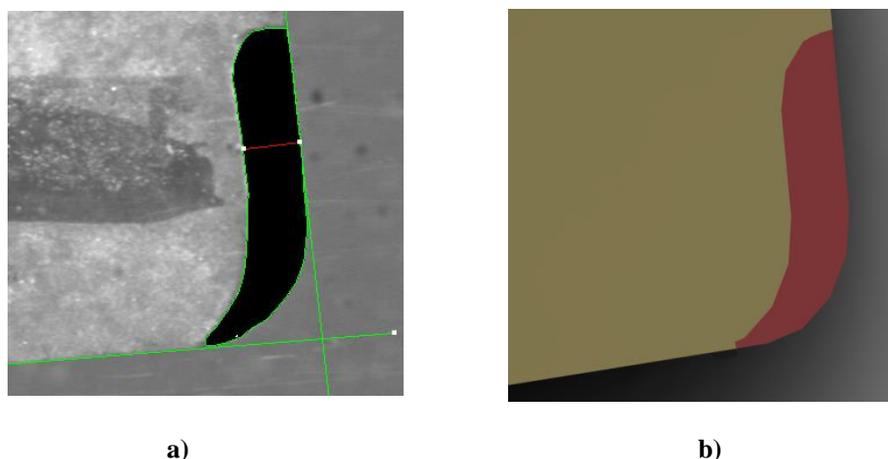


Figura 4. a) Tratamento de imagens da área de contato e, b) área de contato do modelo computacional.

Vários testes foram realizados para observar a influência da velocidade de corte, avanço e profundidade do corte 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 apresentados na Tab. 2. Cada condição de corte foi repetida três vezes para observar a repetibilidade. Em cada experimento, o número total de medidas de cada termopar foi $nt = 180$, com um passo de tempo de 0,5 s. A condutividade térmica e difusividade térmica da ferramenta de corte são, respectivamente, $\lambda = 43,1 \text{ Wm/K}$ e $\alpha = 14,8 \times 10^{-06} \text{ m}^2/\text{s}$ (Carvalho *et al.*, 2006).

Tabela 2. Condições de corte.

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

O porta-ferramenta é de aço AISI 1045 e suas propriedades térmicas são: $\lambda = 49,8 \text{ Wm/K}$ e $\alpha = 13,05 \times 10^{-06} \text{ m}^2/\text{s}$ (Grzesik *et al.*, 2009). 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 submetidos a um coeficiente de transferência de calor por convecção constante, $h = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$. Outra fonte importante de erro que deve ser levado 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 μm de espessura entre os materiais envolvidos, com as propriedades do ar a 300 K. As propriedades térmicas usadas para o ar são: $\lambda = 0,026 \text{ Wm/K}$ e $\alpha = 22,5 \times 10^{-06} \text{ m}^2/\text{s}$ (Incropera *et al.*, 2007).

5. 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 Multiphysics® 4.4 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 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 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 move-se para distante da peça de trabalho. E é, 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 Multiphysics® 4.4, como o problema direto, utilizando-se condições de contorno de fluxo de calor igual a $1,0 \text{ W/m}^2$ e temperatura inicial igual a $0,0 \text{ }^\circ\text{C}$, e um coeficiente de convecção médio de $20 \text{ W/m}^2\text{K}$. Muitas simulações foram realizadas, como em Carvalho *et al.* (2006), para analisar a influência do valor de $h = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Na Figura 5a, o fluxo de calor foi estimado para o Teste 1 (Tab. 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 *et al.* (2006) e Carvalho *et al.* (2009), 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 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/m^2 . O tempo computacional para estimar o fluxo de calor através da técnica função especificada foi de 9 minutos e 24 segundos usando um microcomputador com processador Intel Core® i7®, com 6 GB de memória RAM, usando o 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.

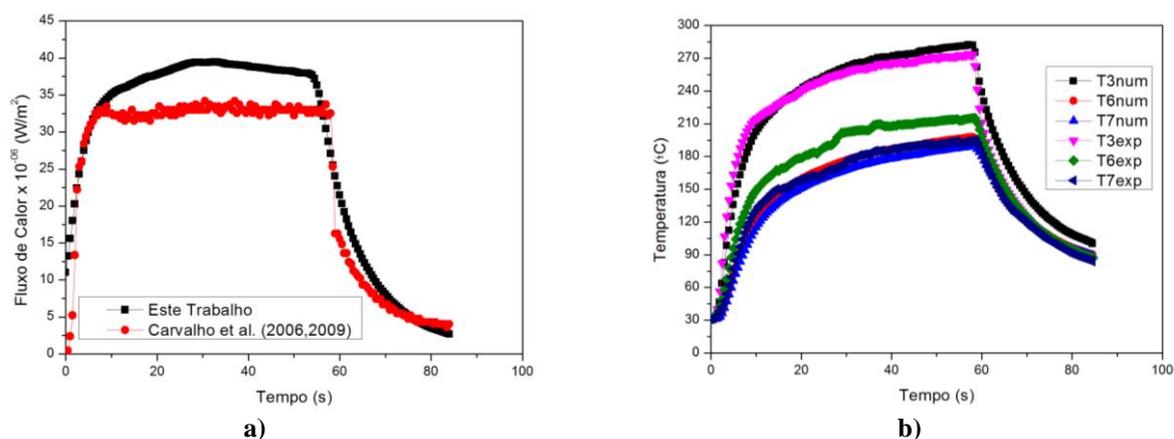
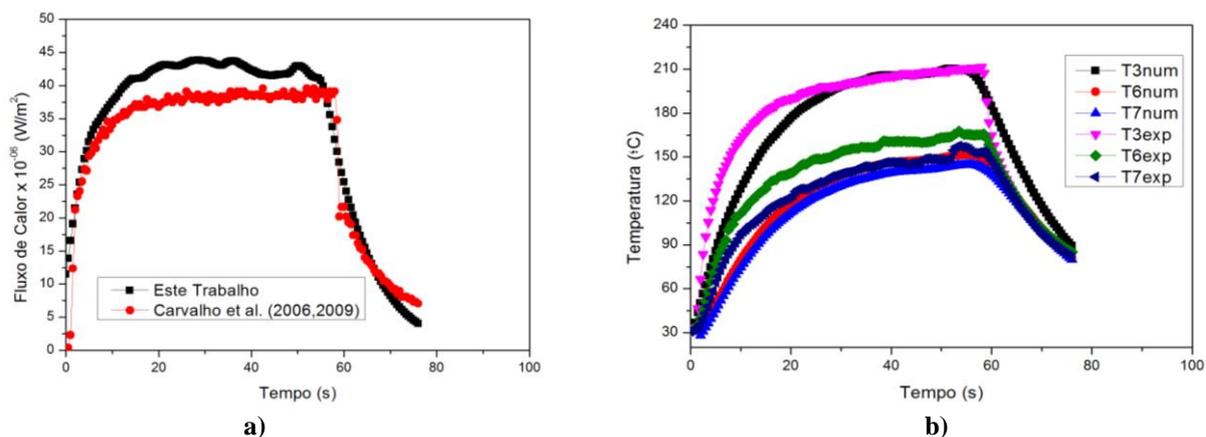
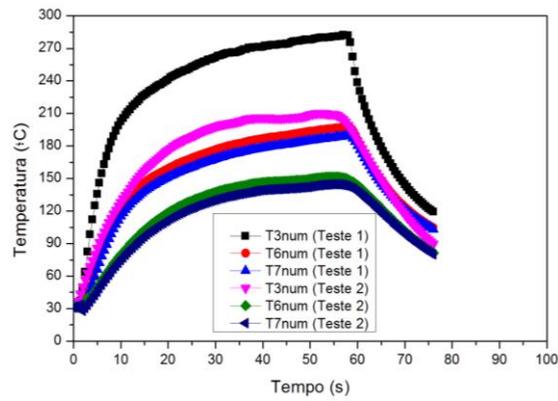


Figura 5. a) Fluxo de calor estimado e b) comparação entre as temperaturas experimentais e estimadas para os termopares T_3 , T_6 e T_7 .

A Figura 6a apresenta o fluxo de calor estimado para o Teste 2 (Tab. 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 Fig. 6b. Há também uma boa concordância quando se compara com o trabalho anterior dos autores (Fig. 6a) e com as temperaturas experimentais (Fig. 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 Fig. 6c. Pode-se notar que as temperaturas aumentam para uma maior profundidade de corte.





c)

Figura 6. a) Fluxo de calor estimado, b) comparação entre as temperaturas experimentais e estimadas para os termopares T₃, T₆ e T₇ e c) comparação entre as temperaturas estimadas nas posições T₃, T₆ e T₇ para Testes 1 e 2.

Para completar, as Figs. 7a, 7b, 7c e 7d 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 Multiphysics® 4.4 para os instantes 5 s, 10 s, 50 s e 80 s, respectivamente. Como é mostrado na Fig. 7c existe um elevado gradiente de temperatura no inserto.

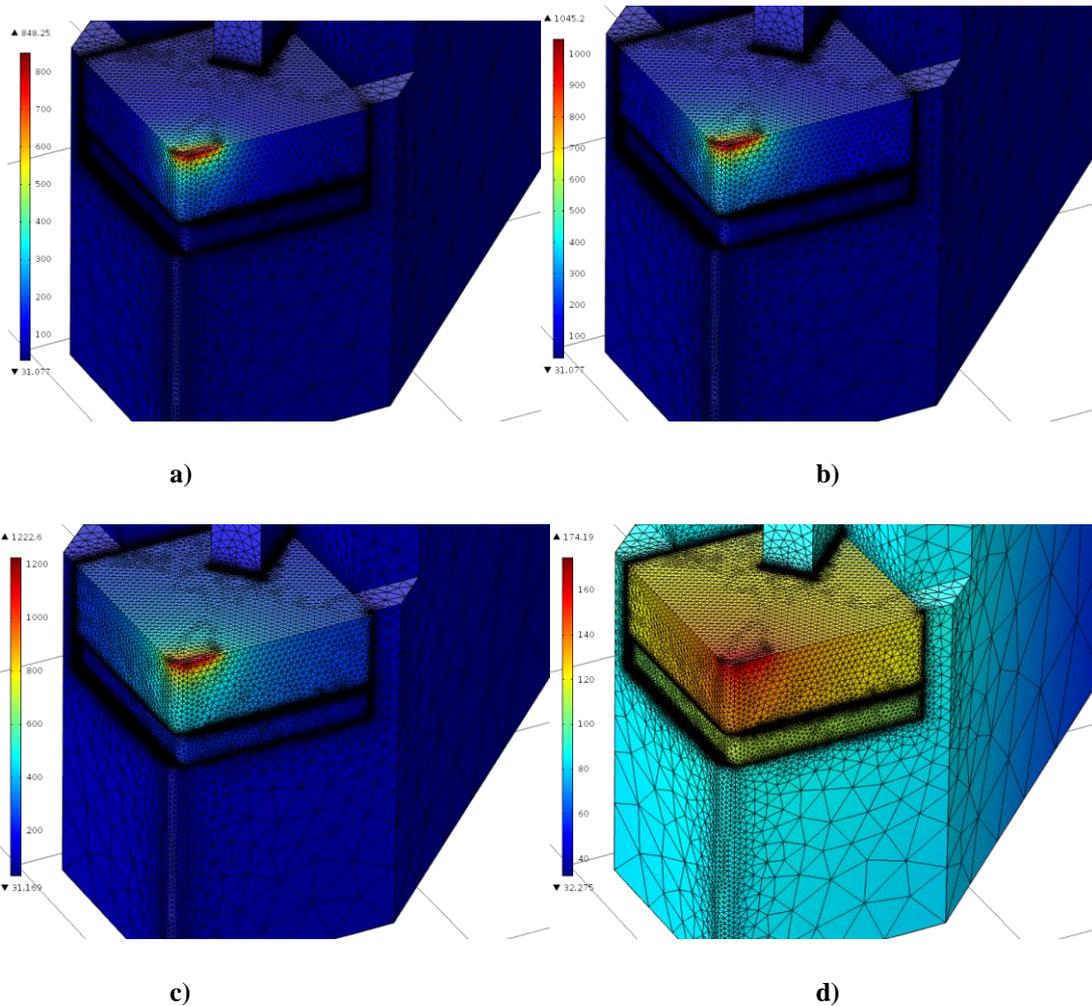


Figura 7. Campo de temperatura no conjunto para os instantes: a) $t = 5$ s, b) $t = 10$ s, c) $t = 50$ s e d) $t = 80$ s.

6. CONCLUSÕES

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 Multiphysics® 4.4 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 verificar 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, pois estes programas permitem ajustar quaisquer condições de contorno, bem como, modelar a geometria de forma a representar fielmente o sistema investigado.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq, FAPEMIG e CAPES pelo apoio financeiro, em especial o Processo de número 470971/2011-8 patrocinado pelo CNPq.

8. REFERÊNCIAS

- C. A. Corrêa Ribeiro, 2012, “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, Itajubá, Minas Gerais, Brasil.
- D. Ulutan, I. Lazoglu, C. Dinc, 2009, “Three-Dimensional Temperature Predictions in Machining Process using Finite Difference Method, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 1111-1121.
- D. W. Yen, P. K. Wright, 1986, “A Remote Temperature Sensing Technique for Estimating the Cutting Interface Temperature Distribution, Journal of Engineering for Industry, Vol. 108, pp.252-263.
- E. M. Trent, P. K. Wright, 2000, “Metal Cutting”, Butterworth Heinemann, 4th ed., Woburn, United States.
- F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine, 2007, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, 6th ed., John Wiley & Sons, USA.
- F. Samadi, F. Kowsary, A. Sarchami, 2012, “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, Vol. 39, pp. 298-303.
- J. V. Beck, B. Blackwell, C. St. Clair, 1985, “Inverse Heat Conduction: Ill-posed Problems”, Wiley-Interscience Publication, New York.
- K. A. Woodbury, S. Duvvuri, Y. K. Chou, J. Liu, 2007, “Use of Evolutionary Algorithms to Determine Tool Heat Fluxes in a Machining Operation”, Proceedings of the Inverse Problems Design and Optimization Symposium, IPDO, Miami Beach, Florida, USA.
- K. Yang, Y.-C. Liang, K.-n. Zheng, Q.-s. Bai, W.-q. Chen, 2011, “Tool Edge Radius Effect on Cutting Temperature in Micro-End-Milling Process”, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 52, pp. 905-912.
- L. Wang, Z. L. Sun, X. K. Wang, S. C. Guo, 2010, “Numerical and Analytical Modelling of Temperature Rise on the Machined Stainless Steel 316L”, International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering: (MACE 2010).
- M. Gostimirovic, P. Kovac, M. Sekulic, 2011, “An Inverse Heat Transfer Problem for Optimization of the Thermal Process in Machining”, Sādhanā, Vol. 36, pp. 489-504.
- S. R. Carvalho, M. R. Santos, P. F. B. Souza, G. Guimarães, S. M. M. Lima e Silva, 2009, “Comparison of Inverse Methods in the Determination of Heat Flux and Temperature in Cutting Tools during a Machining Process”, High Temperatures High Pressures, Vol. 38, pp. 119-136.
- S. R. Carvalho, S. M. M. Lima e Silva, A. R. Machado, G. Guimarães, 2006, “Temperature Determination at the Chip-Tool Interface using an Inverse Thermal Model considering the Tool Holder”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 179, pp. 97-104.
- T. C. Jen, G. Gutierrez, 2000, “Numerical Heat Transfer Analysis in Transient Cutting Tool Temperatures”, Proceedings of 34th National Heat Transfer Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, August, pp.20-22.
- V. M. Luchesi, R. T. Coelho, 2012, “An Inverse Method to Estimate the Moving Heat Source in Machining Process”, Applied Thermal Engineering, Vols. 45-46, pp. 64-78.
- W. Grzesik, P. Niesłony, M. Bartoszek, 2009, “Modelling of the Cutting Process Analytical and Simulation Methods”, Advances in Manufacturing Science and Technology, Vol. 33, pp. 5-29.

9. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

THE USE OF COMSOL AND INVERSE PROBLEM TECHNIQUE TO ESTIMATE THE HEAT FLUX ON A CUTTING TOOL

Rogério Fernandes Brito, rogbrito@unifei.edu.br¹

Solidônio Rodrigues de Carvalho, srcarvalho@mecanica.ufu.br²

Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva, metrevel@unifei.edu.br³

¹Federal University of Itajubá - UNIFEI, Itabira, Minas Gerais, Brazil,

²Federal University of Uberlândia - UFU, Uberlândia, Minas Gerais, Brazil,

³Federal University of Itajubá - UNIFEI, Itajubá, Minas Gerais, Brazil.

Abstract. *This work proposes the use of inverse problem techniques in connection with COMSOL Multiphysics 4.4[®] to estimate the heat flux and the temperature field on a turning cutting tool in transient regime. The main purpose of the present work is to present the improvements performed in relation to the authors' previous work to develop the complex geometry of a machining process. Specification function, which is an inverse problem technique, was implemented in a program to estimate the heat flux applied on the tool, from the experimental temperature records. Once the heat flux is known, COMSOL Multiphysics 4.4[®] is again utilized to obtain the temperature field on the cutting tool. The validation of the methodology is carried out by comparing the numerical and experimental results of temperature.*

Keywords: *COMSOL, inverse problems, machining process, heat transfer.*