



COMPROMETIDA COM A PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA ENGENHARIA E DAS CIÊNCIAS MECÂNICAS

7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO
7th BRAZILIAN CONGRESS ON MANUFACTURING ENGINEERING
20 a 24 de maio de 2013 – Penedo, Itatiaia – RJ - Brasil
May 20th to 24th, 2013 – Penedo, Itatiaia – RJ – Brazil

ESTIMATIVA DE FLUXO DE CALOR E TEMPERATURA NUMA FERRAMENTA DE CORTE USANDO TÉCNICAS DE PROBLEMAS INVERSOS E ANSYS CFX®.

Carlos Adriano Corrêa Ribeiro¹, cadrianocr@unifei.edu.br
João Roberto Ferreira¹, jorefe@unifei.edu.br
Hélcio Francisco Villa Nova¹, helcio.villanova@unifei.edu.br
Solidônio Rodrigues de Carvalho³, srcarvalho@mecanica.ufu.br
Rogério Fernandes Brito², rogbrito@unifei.edu.br
Sandro Metrevelle M. Lima e Silva¹, metrevel@unifei.edu.br

¹ Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Instituto de Engenharia Mecânica – IEM, Laboratório de Transferência de Calor – LabTC, Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, CEP 37500-903, Caixa Postal 50, Itajubá, MG, Brasil

² Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Rua Um, s/n, Distrito Industrial II, CEP 35903-081, Itabira, MG, Brasil.

³ Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC, Av. João Naves de Ávila, 2160, Bairro Santa Mônica, CEP 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil.

Resumo: Muitos processos em engenharia têm seu desempenho afetado pelos elevados valores de temperatura. Um exemplo é o processo de usinagem, em que a vida útil da ferramenta de corte é fortemente afetada pelas altas temperaturas que surgem durante este processo. O conhecimento correto dos valores de temperatura e fluxo de calor aplicados nesse processo possibilita desenvolver maneiras mais eficientes de refrigeração. Entretanto, a medição direta da temperatura em um processo de usinagem é de difícil execução devido ao movimento da peça e a presença do cavaco. Assim, o uso de técnicas inversas em condução de calor, apresenta-se como uma boa alternativa para obtenção dessas temperaturas, uma vez que essas técnicas permitem o uso de dados experimentais obtidos em regiões acessíveis. As técnicas de problemas inversos consistem em obter o valor de uma variável através da medição de outra grandeza que possa ser mensurada diretamente. Estas técnicas muitas vezes usam algoritmos de otimização, a fim de minimizar o erro entre o valor calculado e real, da variável de interesse. Neste trabalho, é proposto o uso de técnicas de problemas inversos, juntamente com o software comercial ANSYS CFX®, 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 de problema inverso, função especificada, foi desenvolvido para estimar o fluxo de calor aplicado na ferramenta, a partir do histórico de temperatura experimental. Conhecido o fluxo de calor é então usado mais uma vez o ANSYS CFX® para obter o campo de temperatura na ferramenta de corte. A validação da metodologia é feita comparando os resultados numéricos de temperatura com dados experimentais.

Palavras-chave: problemas inversos, função especificada, temperatura, volumes finitos, torneamento.

1. INTRODUÇÃO

Vários processos em engenharia têm seu desempenho e qualidade afetados pelos elevados valores de temperatura. Um típico exemplo é o processo de usinagem, cujas temperaturas na ferramenta de corte podem ser superiores a 900°C (Trent e Wright, 2000). Para o processo de usinagem, temperaturas elevadas provocam alterações na microestrutura da ferramenta, alteram suas propriedades físicas e químicas, reduzindo sua capacidade de resistir às tensões mecânicas que aparecem durante o seu uso, (Gostimirovic *et al.*, 2011). A consequência direta destas alterações é a redução da vida da ferramenta e de seu desempenho. Isso acaba elevando os custos da operação e reduz a qualidade do produto acabado. O conhecimento correto dos valores de temperatura e fluxo de calor aplicados nesse tipo de processo traz vantagens como possibilitar o desenvolvimento de maneiras mais eficientes de refrigeração e melhores especificações dos parâmetros de corte do processo de usinagem.

Segundo Komanduri e Hou (2001), Thompson e Rumford (1798) foram os primeiros a estudar o fluxo de calor aplicado em ferramentas de corte, como as usadas em torneamento. Desde então, diversos outros pesquisadores têm estudado este tema. Os estudos sobre este tema envolvem técnicas experimentais, como uso de termopares inseridos em microfuros na ferramenta, Tay (1991), e câmeras de infravermelho, Stephenson (1991). Outras maneiras de se mensurar as temperaturas numa ferramenta de corte são citadas por Komanduri e Hou (2001), como o pirômetro ótico, efeito termopar ferramenta, entre outras. Ao longo dos anos, as técnicas de instrumentação também evoluíram, por isso

Carvalho *et al.*, (2006) também usaram termopares em seus estudos de temperatura em ferramenta de corte, porém os termopares foram fixados usando solda por descarga capacitiva. Novos pirômetros óticos e câmeras de infravermelho, de maior precisão e menor tempo de resposta, têm sido usados atualmente, como em Freund e Kabelac (2010). Todavia, em algumas situações, são usados métodos analíticos para prever campos de temperatura na ferramenta de corte, como em Wang *et al.* (2010).

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-obra e a 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 possam 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-los, e o uso do microfuro para sua inserção, modifica a geometria da ferramenta, podendo levar a resultados equivocados. As câmeras e pirômetros, não estão sujeitas a sofrerem danos pela presença de cavaco, nem alteração da geometria da ferramenta, mas não conseguem também, captar a temperatura exatamente na região de contato entre a ferramenta de corte e a peça-obra.

Com uma maior disponibilidade de recursos computacionais, o uso de métodos numéricos ganhou espaço, e não demorou muito para serem usados, juntamente com os métodos experimentais no estudo de campos de temperatura, em ferramentas de corte. Os métodos mais difundidos são, respectivamente, o método das diferenças finitas e o método dos elementos finitos. Posteriormente surgiu também o método dos volumes finitos. Cada um destes métodos tem suas próprias características. O método das diferenças finitas teve seu uso mais difundido nos problemas de dinâmica dos fluidos, devido a sua habilidade em tratar termos não lineares, enquanto que o método dos elementos finitos é o típico método para resolver problemas puramente difusivos, (Maliska, 2004). O método dos volumes finitos 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 usadas mais de um método numérico, visando aproveitar o ponto forte de cada um dos métodos numéricos, como Wang e Tian (2005).

Outra consequência da evolução dos computadores, é o desenvolvimento e crescente uso das *técnicas inversas*. As técnicas inversas consistem em obter o valor de uma variável de interesse, através da 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 já têm sido aplicadas para estudar campos de temperatura em ferramentas de corte, como em Stephenson (1996), Jen *et al.* (2001). Em situações como estas, as temperaturas na ferramenta de corte são obtidas usando termopares inseridos próximos à aresta de corte, como em Battaglia *et al.* (2005), Lazard e Corvisier (2005), Carvallho *et al.* (2006), Chang *et al.* (2007), Ulutan *et al.*,(2009). Uma alternativa ao uso de termopares é o uso de câmeras de infravermelho, como em Chang e Hung (2005). Devido a 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. Estimado o fluxo de calor é então usado mais uma vez 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.

2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

2.1. Modelo Térmico do Conjunto.

O problema tratado neste trabalho é representado pelas Figuras 1a e 1b. A Figura representa 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. Há também um grampo e um parafuso, para fixação do conjunto. Uma vista em perspectiva é mostrada pela Figura 1a, enquanto que uma vista explodida do conjunto é mostrada pela Figura 1b.

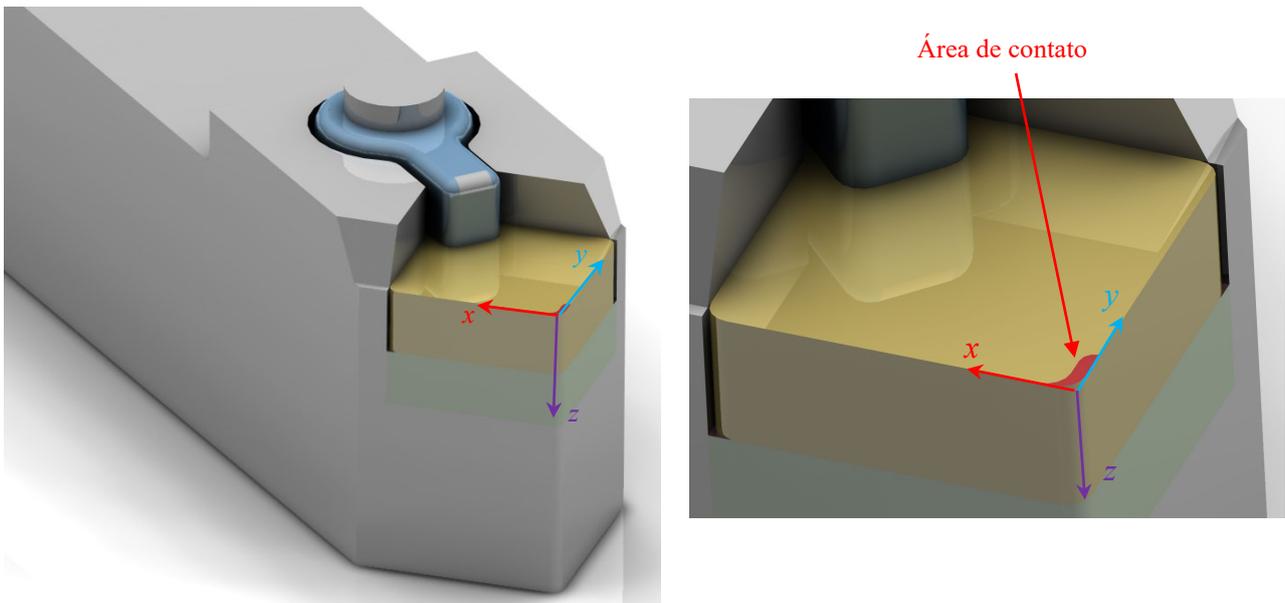


Figura 1. a) Conjunto Ferramenta, Calço e Porta Ferramenta e b) detalhe da interface de contato entre ferramenta e peça obra.

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

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

e

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

e tendo como condição inicial

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

sendo que η representa a normal, para fora, nas coordenadas x , y e z , q_0'' o fluxo de calor, T a temperatura, T_∞ a temperatura ambiente, T_0 a temperatura inicial, k a condutividade térmica, α a difusividade térmica e h o coeficiente de transferência de calor por convecção.

2.2. Solução do Problema Direto.

O problema direto consiste em resolver a equação da difusão de calor, segundo as condições de contorno mencionadas acima. Para isto é usado o programa ANSYS CFX®, que resolve problemas térmicos utilizando o método dos volumes finitos.

2.3. O Problema Inverso.

A técnica inversa adotada neste trabalho é a Função Especificada. Esta técnica exige, primeiramente, o cálculo do coeficiente de sensibilidade, que é feito numericamente, a partir do Teorema de Duhamel, Corrêa Ribeiro, (2012). 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, através de um programa em linguagem *FORTRAN*, o fluxo de calor. A metodologia é representada pela Fig. 2.

Outro parâmetro importante é o valor dos tempos futuros r . Na Técnica da Função Especificada, são usados 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 Eq. 5, para cada instante de tempo.

$$F = \sum_{p=1}^{np} (T_{\text{exp}}(x, y, z, t)_p - T_{\text{num}}(x, y, z, t)_p)^2 \quad (5)$$

em que np é o número total de tomadas de temperatura e p os tempos discretos de aquisição de temperatura.

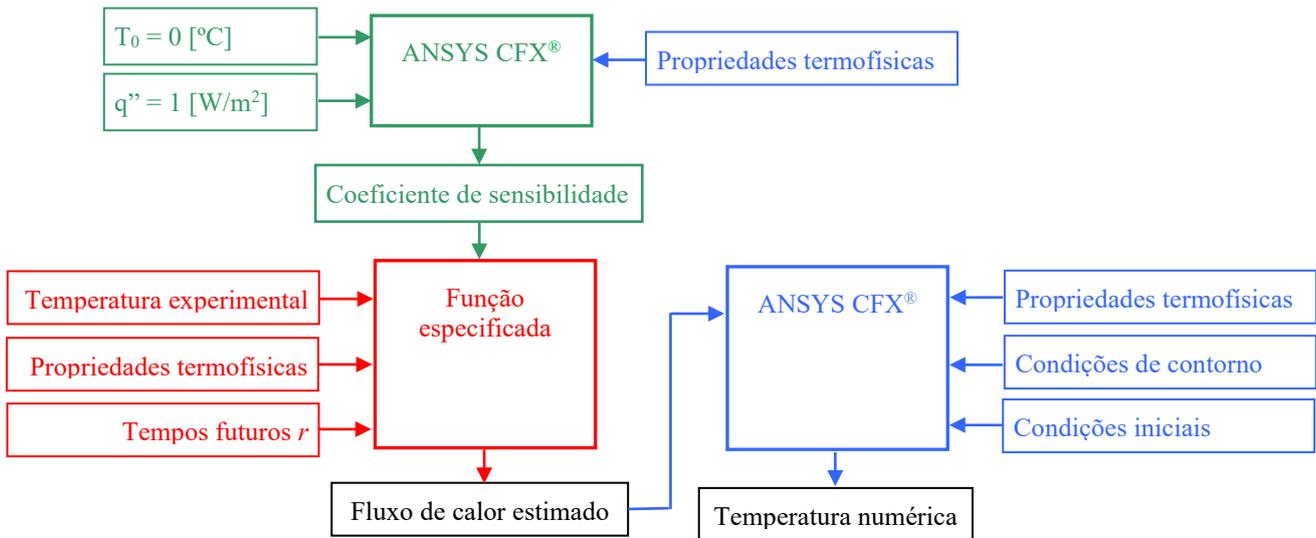


Figura 2. Metodologia para o uso da Função Especificada, para modelo térmico tridimensional, em regime transiente, juntamente com o ANSYS CFX®.

3. VALIDAÇÃO

A validação da metodologia foi realizada segundo Corrêa Ribeiro (2012), em que foram realizados 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 60,0 x 100,0 x 9,5 mm. O aparato experimental é representado pela Fig. 3.

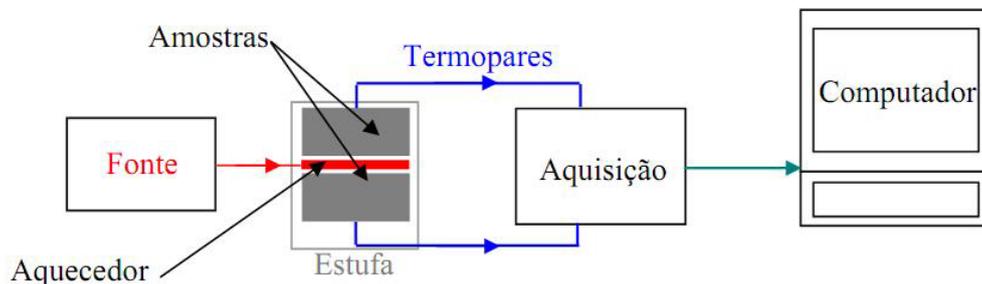


Figura 3. Aparato experimental usado para validação da metodologia proposta.

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 uma resistência de 15 Ω e área de aquecimento de 50,00 x 50,00 mm e 0,20 mm espessura. Como o aquecedor, possui uma área menor que a área da amostra, obtêm-se o efeito de propagação de calor tridimensional. Este problema tridimensional possui condição de contorno de fluxo de calor prescrito na região de aquecimento e isolamento nas demais regiões (Corrêa Ribeiro, 2012). Na Figura 4 é mostrada a posição do aquecedor perante a amostra metálica.

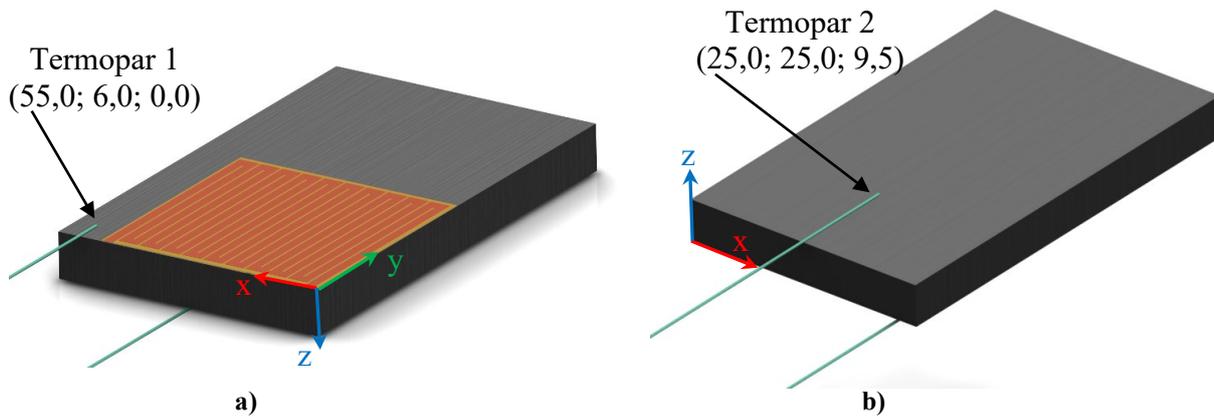


Figura 4. Posicionamento dos termopares a) na superfície superior e b) inferior, no modelo tridimensional.

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 através 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. Além disso, o conjunto foi todo posicionado dentro de uma estufa Marconi MA030. Os interstícios de ar entre as amostras são reduzidos com uso de pasta térmica de prata, Artic Silver, melhorando o contato entre as amostras.

A solução da equação de difusão de calor tridimensional é obtida com o uso do método dos volumes finitos, através 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 pelas Fig. 5a, 5b e 5c. Na Figura 5a é apresentada uma comparação entre o fluxo experimental e estimado, enquanto que na Figura 5b são comparadas as temperaturas experimental e numérica. Na Figura 5c apresenta-se o desvio entre temperatura experimental e numérica.

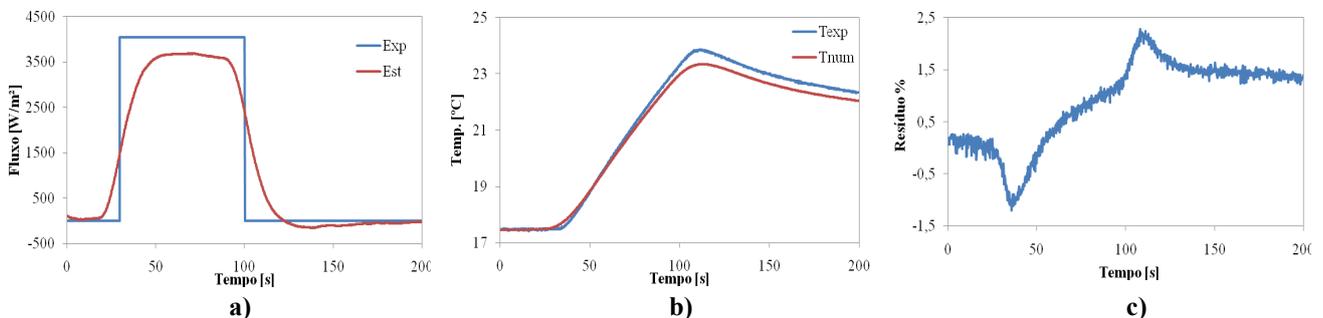


Figura 5. Comparação entre resultados experimentais a) fluxo de calor, b) temperatura e c) desvio entre temperaturas experimental e numérica.

4. O PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para obter dados experimentais, foram realizados experimentos utilizando-se um torno mecânico convencional IMOR MAXI II 520 de 6cv de potência, e 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 Fig. 6a. Na Figura 6b, observa-se o detalhe da fixação do termopar soldado por descarga capacitiva.

Tomando como referência, o sistema de coordenadas posicionado na ponta da ferramenta, conforme Figura 3b, as coordenadas *x*, *y* e *z* da posição do termopar, em mm, são respectivamente (0; 3,95 e 11,52). A ferramenta escolhida para fazer os ensaios é uma ferramenta de metal duro (código ISSO SNUN 120412 H1P – K10) e o respectivo porta ferramenta (código ISSO CSBNR 20K12). Como corpos de prova, foi utilizado corpos de ferro fundido cinzento ABNT FC 20 EB 126a, com 77mm de diâmetro e 77mm de comprimento. Foram realizados 5 experimentos para garantir uma repetibilidade dos resultados. Em cada teste, foram tomados 300 valores de temperatura num intervalo de tempo de 0,5s.

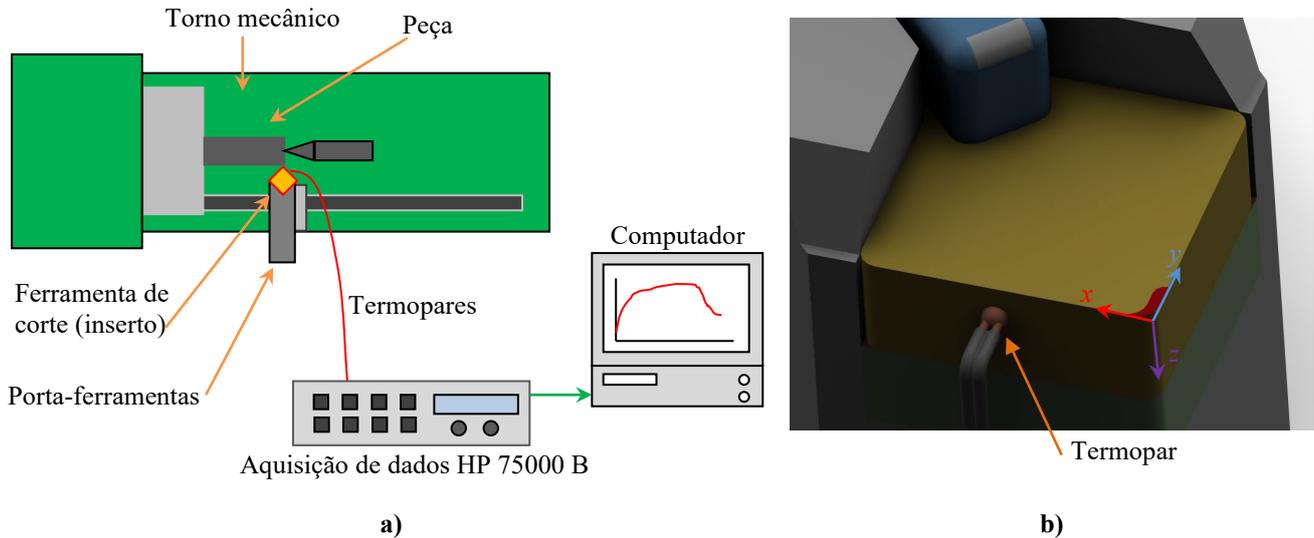


Figura 6. a) Aparato experimental, usado para aquisição de sinais de temperatura na ferramenta durante a usinagem e b) detalhe da posição do termopar soldado à ferramenta.

A identificação da correta área de contato entre a ferramenta e a peça obra foi obtida através do uso 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. Apresenta-se na Fig. 7a uma fotografia da área de contato e na Fig. 7b, a respectiva área após tratamento de imagem. O valor da área de contato obtido foi de $0,410835\text{mm}^2$, obtida para condição de corte de $0,138\text{mm/rot}$, velocidade de corte $217,72\text{mm/rot}$ e profundidade de corte de $3,0\text{mm}$.

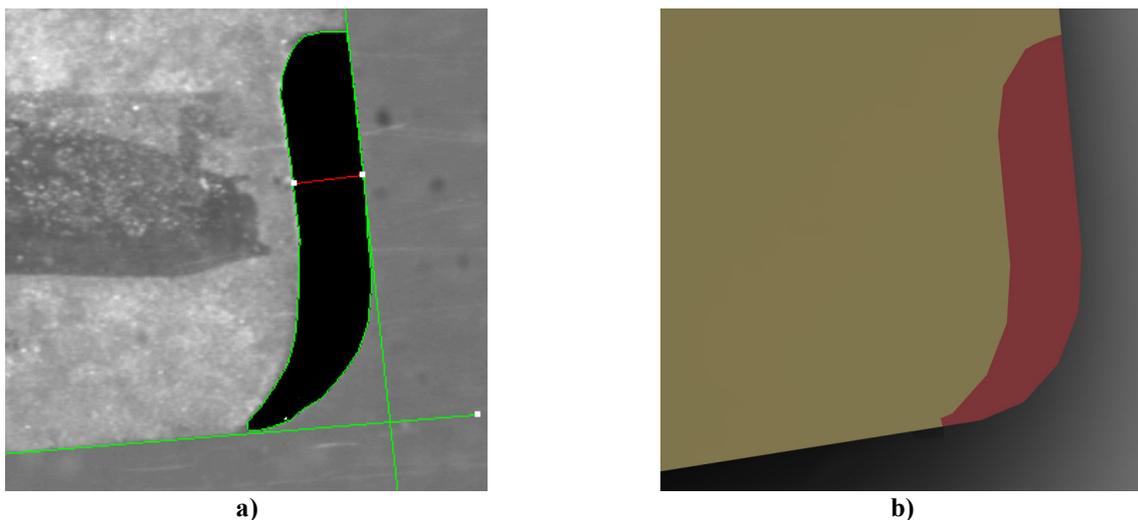


Figura 7. a) Tratamento de imagem da área de contato b) área de contato no modelo computacional.

5. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Nesta seção, são apresentados os resultados para a estimação de fluxo de calor e cálculo de temperatura, usando a técnica de problemas inversos Função Especificada junto ao software ANSYS CFX®. Os valores experimentais de temperatura foram obtidos com a realização de experimentos na Universidade Federal de Uberlândia, como já descrito em Carvalho *et al.* (2006), enquanto que a validação do uso de Técnicas Inversas e o programa ANSYS CFX® foi apresentada em Corrêa Ribeiro (2012).

5.1. Resultados.

Para o estudo do campo de temperatura em ferramenta de corte, foram realizados 5 experimentos, sem alterações nas condições de montagem e operação. Cada experimento teve a duração de 90s, com tomadas de temperaturas a cada 0,5s, totalizando 180 valores de temperatura. O tempo de corte dá-se entre o instante inicial e o instante 60s. Após 60s, cessa-se o corte e a ferramenta afasta-se da peça. 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 obra, a ferramenta encontra-se uniformemente a temperatura ambiente.

Nesta sessão são apresentados, os principais resultados obtidos. Nas simulações numéricas são adotadas as propriedades termofísicas apresentadas pela Tab. 1. O modelo numérico adotado não contempla resistência térmica de contato entre os componentes do conjunto.

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 x 10 ⁻⁶
Calço de Fixação	43,1	332.94	14.900	8.688 x 10 ⁻⁶
Porta ferramenta	49,8	486.13	7.850	13.050 x 10 ⁻⁶

O coeficiente de sensibilidade foi calculado numericamente, usando o programa ANSYS CFX®, como problema direto, usando condições de contorno de fluxo de 1W/m² e temperatura inicial de 0°C e coeficiente de convecção 20W/mK. A Figura 8 apresenta a evolução temporal do coeficiente de sensibilidade. O coeficiente de sensibilidade ϕ aponta 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.

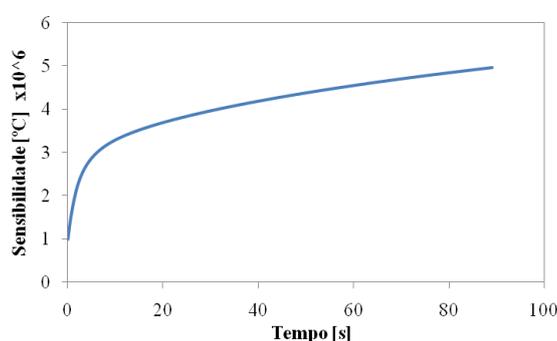


Figura 8. Coeficiente de sensibilidade.

A seguir, é apresentado o fluxo de calor estimado, segundo a técnica da Função especificada, para r igual a 10 tempos futuros. Segundo o gráfico, o fluxo de calor é aplicado desde o início do processo de usinagem até aproximadamente 60s. Após este momento, o fluxo de calor aplicado é nulo, ou seja, não ocorre usinagem de material. No intervalo de tempo entre 0 e 60s, o fluxo de calor médio aplicado foi de aproximadamente 32kW/m².

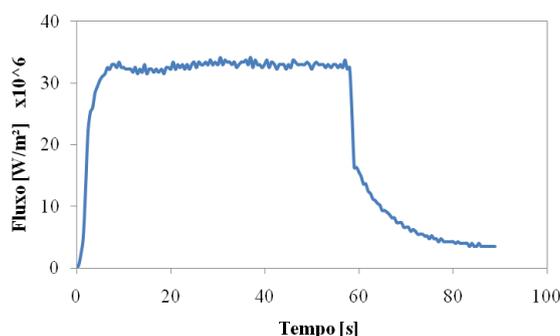


Figura 9. Comparação entre fluxo de calor experimental e estimado via Função Especificada.

A comparação entre a temperatura experimental e estimada é apresentada pela Fig. 10. Nota-se pequenas discordâncias nos instantes inicial e final, da usinagem, entretanto, no período de corte, houve concordância entre os valores de temperatura experimental e estimada. O desvio entre essas temperaturas é apresentado pela Fig. 11. Desconsiderando-se as regiões de início e término do torneamento (Fig. 11), a diferença entre a temperatura experimental e 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, em tratar discontinuidades no parâmetro a ser estimado, que neste trabalho, trata-se do fluxo de calor. Esta dificuldade é devido ao método basear-se no cálculo da taxa de variação da temperatura em função do calor aplicado. Na prática, essas discontinuidades representam os instantes em que o fluxo de calor sai de um valor nulo para um valor elevado, no início da usinagem, bem como, o instante em que o fluxo de calor sai deste valor elevado tornando-se nulo novamente.

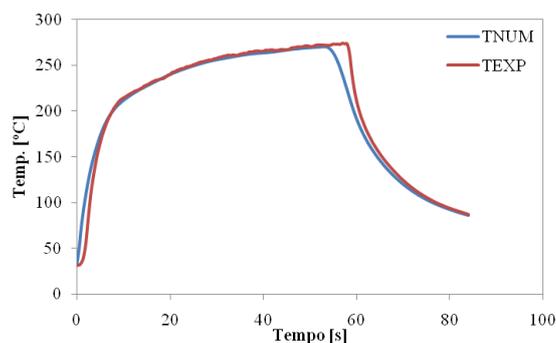


Figura 10. Comparação entre temperatura experimental e estimada.

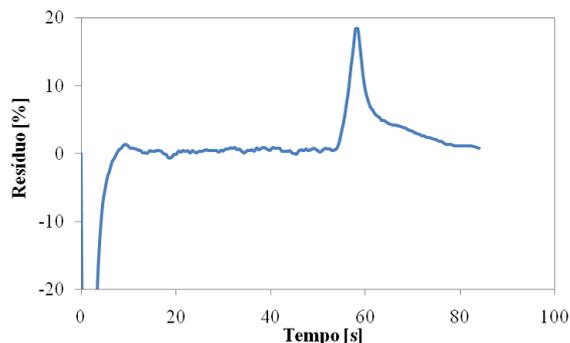


Figura 11. Desvio entre temperatura experimental e estimada via Técnica Inversa.

Para completar, é apresentado pela Figura 12, uma representação do campo de temperatura no conjunto da ferramenta, segundo o programa ANSYS CFX® para os instantes de tempo de 0, 60s em Figs. 12a e 12b respectivamente, bem como destaca-se o campo na ponta da ferramenta no instante t igual a 60s na Fig. 12c.

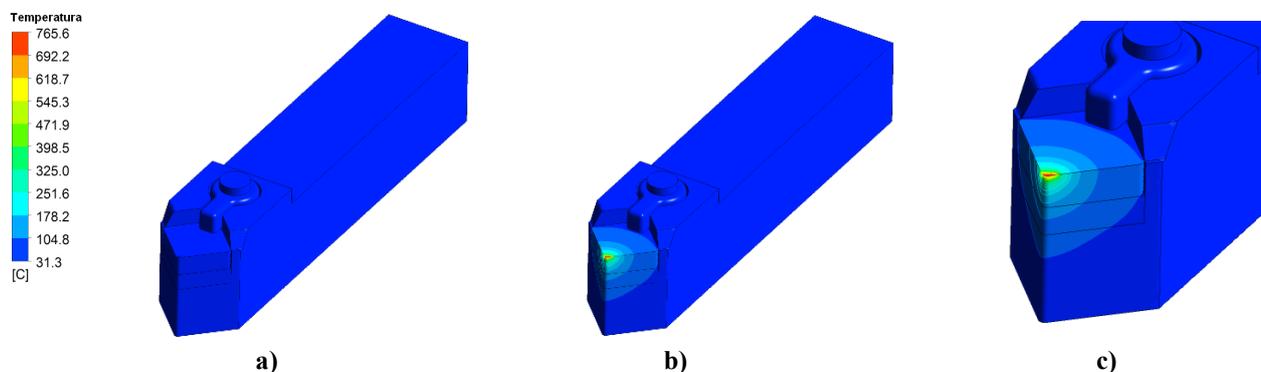


Figura 12. Campo de temperatura no conjunto nos instantes a) $t = 0$, b) $t = 60$ e c) na ponta da ferramenta em $t = 60$ s.

5.2. Conclusões.

Foi apresentada neste trabalho uma técnica para estimar fluxo de calor e temperatura num processo de usinagem acoplando Técnica Inversa e o programa ANSYS CFX®. As Técnicas Inversas mostram-se promissoras em estimar parâmetros, que não possam ser mensurados diretamente, através de outra variável qualquer. O uso de programas comerciais para resolução numérica de equações diferenciais que regem os fenômenos físicos investigados merece destaque, pois este programas 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, cabem ainda, melhorias como o uso de múltiplos sinais de temperatura medidas a serem implementados no método da Função Especificada.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos órgãos de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo apoio financeiro e à CAPES pela bolsa de doutorado concedida.

7. REFERÊNCIAS

- Battaglia, J. L., Puigsegur, L., Cahuc, O., 2005, “Estimated Temperature on a Machined Surface Using an Inverse Approach”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 2671 – 2680.
- 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 Holder”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 179, pp. 97 – 104.
- Chang, H. H., Hung, C. L., 2005, “A Three-Dimensional Inverse Problem in Predicting the Heat Fluxes Distribution in Cutting Tools”, *Numerical Heat Transfer*, Vol. 48, pp. 1009 – 1034.
- Cheng, H. H., Li, C. J., Li, R., Shih, A. J., 2007, “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*, Vol. 50, pp. 3265 – 3277.
- Corrêa Ribeiro, C. A., 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.*
- Freund, S., Kabelac, S., 2010, “Investigation of Local Heat Transfer Coefficient in Plate Heat Exchanges With Temperature Oscillations IR Thermography and CFD”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 3764 – 3781.
- Gostimirovic, M., Kovac, P., Sekulic, M., (2011), “An Inverse Heat Transfer for Optimization of the Thermal Process in Machining”, *Sahana*, Vol 36, August 2011, pp 489 – 504.
- Jen, T. C., Guitierrez, G., Eapen, S., 2001, “Numerical Analysis in Interrupted Cutting Tools Temperatures”, *Numerical Heat Transfer*, Vol. 39, pp. 1- 20.
- Komanduri, R., Hou, Z. B., 2001, “A Review of the Experimental Techniques for the Measurement of Heat and Temperature Generated in Some Manufacturing Process and Tribology”, *Tribology International*, Vol. 34, pp. 145 – 160.
- Lazard, M., Corvisier, P., 2005, “Inverse Method for Transient Temperature Estimation During Machining”, *Proceeding of 5th International Conference on Inverse Problem in Engineering: Theory and Practice*, Cambridge, UK, 11 – 15th July, 2005.
- Maliska, C. R., 2004, “Transferência de calor e Mecânica dos Fluidos Computacional”, LTC, 2ª Edição, 453p.
- Stephenson, D. A., 1991, “Assessment of Steady-State Metal Cutting Temperature Based on Simultaneous and Infrared and Thermocouple Data”, *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 113, pp. 121 – 128.
- Stephenson, D. A., 1996, “Cutting Temperature of Ceramic Tools in High Speed Machining of Difficult – to – Cut Materials”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 36, pp. 611 – 634.
- Tay, A. O., 1991, “The Importance of Allowing for the Variation of Thermal Properties in Numerical Computational of Temperature Distribution in Machining”, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 28, nº 1 – 2, pp. 49 – 58.
- Thompson, B., Rumford, C., 1798, “An Enquiry Concerning the Source of Heat Which is Excited by Friction”, *Phil Trans Royal Society, London.*
- Trent, E. M., White, P. K., 2000, “Metal Cutting”, Butterworth Heinemann, 4th ed., Woburn, United States, 446p.
- Ulutun, D., Lazoglu, I., Dinc, C., 2009, “Three-Dimensional Temperature Predictions in Machining Process Using Finite Difference Method”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 1111 – 1121.
- Wang, B. J., Tian, Z. H., 2005, “Application of Finite Element – Finite Difference Method To the Determinations of Transient Temperature Field in Functionally Graded Materials”, *Finite Element Analysis and Design*, Vol. 41, pp. 335 – 349.
- Wang, L., Sun, Z. L., Wang, X. K., Guo, S. C., 2010, *Numerical and Analytical Modeling of Temperature Rise on the Machined Stainless Steel 316L.*

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

TEMPERATURE AND HEAT FLUX ESTIMATION ON A CUTTING TOOL BY USING INVERSE PROBLEMS TECHNIQUES AND ANSYS CFX®.

Carlos Adriano Corrêa Ribeiro¹, cadrianocr@unifei.edu.br

João Roberto Ferreira¹, jorefe@unifei.edu.br

Hélcio Francisco Villa Nova¹, helcio.villanova@unifei.edu.br

Solidônio Rodrigues de Carvalho³, srcarvalho@mecanica.ufu.br

Rogério Fernandes Brito², rogbrito@unifei.edu.br

Sandro Metrevelle M. Lima e Silva¹, metrevel@unifei.edu.br

¹ Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Instituto de Engenharia Mecânica – IEM, Laboratório de Transferência de Calor – LabTC, Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, CEP 37500-903, Caixa Postal 50, Itajubá, MG, Brasil

² Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Rua Um, s/n, Distrito Industrial II, CEP 35903-081, Itabira, MG, Brasil.

³ Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC, Av. João Naves de Ávila, 2160, Bairro Santa Mônica, CEP 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil.

Abstract: Many engineering processes have their efficiency affected by high temperature values. An example is machining process in which the lifespan of the cutting tool is highly affected by high temperatures. The right knowledge about these temperature values and heat flux applied in this process enables the development of more efficient cooling techniques. However, the direct measurement of the temperature in a machining process is difficult to accomplish due to the movement of the piece as well as the present of chips. Thus, the use of inverse heat conduction techniques convey a good alternative to obtain these temperatures, since these techniques allow the use of experimental data obtained from accessible regions. Inverse problems consist of obtaining the value of a variable through the measurement of another variable measured directly. These techniques often use optimization algorithm in order to minimize the error between the calculated and real value of the variable in question. This work proposes the use of inverse problem techniques in connection with ANSYS CFX®, with the aim of estimating the heat flux and the temperature field on a turning cutting tool in transient regime. Function Specification, 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, ANSYS CFX® is again utilized to obtain the temperature field on the cutting tool. The validation of the methodology is carried out by comparing the numerical results of the temperature with the experimental ones.

Key words: inverse problems, function specification, temperature, finite volumes, turning process.