

APRIMORAMENTO DE UM ALGORITMO COMPUTACIONAL PARA A ANÁLISE TÉRMICA DO PROCESSO DE USINAGEM DE AÇO LIVRE- CORTE COM FERRAMENTA DE AÇO-RÁPIDO

Marcelo Ribeiro dos Santos
Solidônio Rodrigues Carvalho
Gilmar Guimarães

mrsantos@mecanica.ufu.br; srcarvalho@mecanica.ufu.br ; gguima@mecanica.ufu.br;

Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, campus Santa Mônica, Av. João Naves de Ávila, 2160, Bairro Santa Mônica CEP 38400-902 Tel: (34) 3239-4206, Uberlândia, MG, Brasil.

Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva

metrevel@unifei.edu.br;

Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Instituto de Engenharia Mecânica - IEM, Prof. José Rodrigues Seabra Campus, 1303 BPS Av., Pinheirinho , CEP 37500-903, Caixa Postal 50, Itajubá, MG, Brasil

Resumo: No processo de torneamento a energia mecânica é convertida em calor através da deformação plástica envolvida no cavaco e através do atrito entre a ferramenta e a peça. Grande parte deste calor conduzido na ferramenta de corte resulta em altas temperaturas na interface cavaco-peça-ferramenta. Estas temperaturas têm um impacto negativo na vida útil da ferramenta. A ferramenta torna-se mais vulnerável e se desgasta mais rapidamente. Através do conhecimento dessas temperaturas é possível avaliar de uma forma mais eficiente esses efeitos negativos. Contudo existe uma dificuldade em se medir a temperatura na interface cavaco-ferramenta, mostrando a importância do desenvolvimento de técnica eficiente para a análise desta variável. Neste sentido, o Laboratório de Transferência de Calor e Massa e Dinâmica dos Fluidos (LTCM) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) vêm desenvolvendo softwares específicos que utilizam técnicas inversas para determinar o fluxo de calor e a distribuição de temperatura em processos de fabricação, mais especificamente de usinagem. Dentre os softwares existentes no laboratório destaca-se o INV3D desenvolvido por Carvalho (2005), que resolve problema diretos e inversos de transferência de calor. O INV3D baseia-se na solução numérica, via diferenças finitas, de um modelo térmico tridimensional transiente (problema direto) utilizando malha irregular e co-localizada. Para a solução do problema inverso esse software possui implementadas as seguintes técnicas: Seção Áurea, Simulated Annealing e Função Especificada Sequencial. Fazendo uso do Inv3D em casos testes, identificou-se algumas falhas neste software, principalmente quando aplicado a geometrias complexas. O que se verificou foi que este não apresentava conservação de energia para tais geometrias, fato esse que fere os princípios físicos e compromete os resultados gerados pelo aplicativo. Nesse sentido, esse trabalho tem como objetivos iniciais corrigir as falhas encontradas no software INV3D e implementar melhorias. Numa segunda etapa busca-se validar o novo algoritmo computacional a partir de experimentos controlados e soluções analíticas transientes. A terceira etapa consiste em aplicar o software no estudo dos campos térmicos desenvolvidos no processo de usinagem por torneamento de aço livre-corte com ferramenta de aço-rápido. Ressalta-se os resultados encontrados pelo INV3D serão comparados com o método experimental do termopar-ferramenta-peça.

Palavras-chave: problemas inversos, conservação de energia, condução de calor tridimensional, temperatura de corte, otimização.

1. INTRODUÇÃO

No processo de usinagem a energia mecânica é convertida em calor através da deformação plástica do cavaco e do atrito entre a ferramenta e a peça. A contínua necessidade de aumento das velocidades de corte em processos de usinagem de alto desempenho e estudos de maximização da taxa de remoção de material tem impulsionado pesquisas de novos materiais resistentes a altas temperaturas. A medida da temperatura durante o corte é importante na investigação do uso de ferramentas, pois permite analisar os fatores que influenciam no seu uso, vida útil e desgaste. No entanto, a dificuldade de se medir a temperatura na interface cavaco-ferramenta, mesmo para condições de corte simples mostra a importância do desenvolvimento de uma técnica eficiente para a análise desta variável. Neste sentido, o Laboratório de Transferência de Calor e Massa e Dinâmica dos Fluidos (LTCM) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) vêm desenvolvendo softwares específicos que utilizam técnicas inversas para determinar o fluxo de calor e a distribuição de temperatura em processos de fabricação, mais especificamente de usinagem. Dentre os softwares existentes no laboratório destaca-se o INV3D, implementado em C++, desenvolvido por Carvalho (2005), que resolve problema diretos e inversos de transferência de calor. O INV3D baseia-se na solução numérica, via diferenças finitas, de um modelo térmico tridimensional transiente (problema direto) utilizando malha irregular e co-localizada. Para a solução do problema inverso esse software possui implementadas as seguintes técnicas: Seção Áurea, Simulated Annealing e Função Especificada Sequencial. Além disso, apresenta ferramentas auxiliares como: um gerador de malhas cartesianas irregulares e auto-ajustáveis; e ferramentas de análise visual e interfaces gráficas.

Carvalho (2005), por sua vez, apresenta no processo de validação do Inv3D um estudo dos campos térmicos desenvolvidos em uma geometria retangular tridimensional. Além disso, a partir de dados experimentais, o autor faz uso do software para determinar a temperatura na interface cavaco-ferramenta durante o processo de usinagem por torneamento.

Durante o estudo de diversos casos teste com o Inv3D, identificou-se algumas falhas neste software, principalmente quando aplicado a geometrias complexas. O que se verificou foi que o software não apresentava conservação de energia para tais geometrias, fato esse que fere os princípios físicos e compromete os resultados gerados pelo aplicativo.

Nesse sentido, esse trabalho tem como objetivo corrigir as falhas identificadas no algoritmo computacional e, além disso, implementar melhorias no software. Finalizada essa etapa, propõe-se uma validação do novo algoritmo computacional a partir de experimentos controlados e soluções analíticas transientes. O objetivo final deste trabalho é aplicar o Inv3D no estudo dos campos térmicos desenvolvidos no processo de usinagem por torneamento de aço livre-corte com ferramenta de aço-rápido. Além disso, propõe-se uma análise do ponto de vista térmico da influência dos parâmetros de corte (avanço, profundidade e velocidade de corte) na vida útil da ferramenta. Ressalta-se ainda que os resultados encontrados pelo software serão comparados com o método experimental do termopar-ferramenta-peça.

2. PROBLEMA TERMICO DE USINAGEM

Na Figura 1 apresenta-se o modelo esquemático do problema térmico de usinagem. A geração de calor durante o processo de usinagem é indicada por uma fonte de calor desconhecida $q_o''(t)$ desenvolvida na área de contato cavaco-ferramenta. Neste trabalho resolve-se o problema de difusão de calor em coordenadas cartesianas. Considerou-se neste caso uma ferramenta de corte sem quebra cavacos. Durante o experimento não foi utilizado fluido de corte. Portanto, como condições de contorno considera-se que todas as faces do conjunto ferramenta estão submetidas a um coeficiente de transferência de calor por convecção variável $h(x,y,z,t)$.

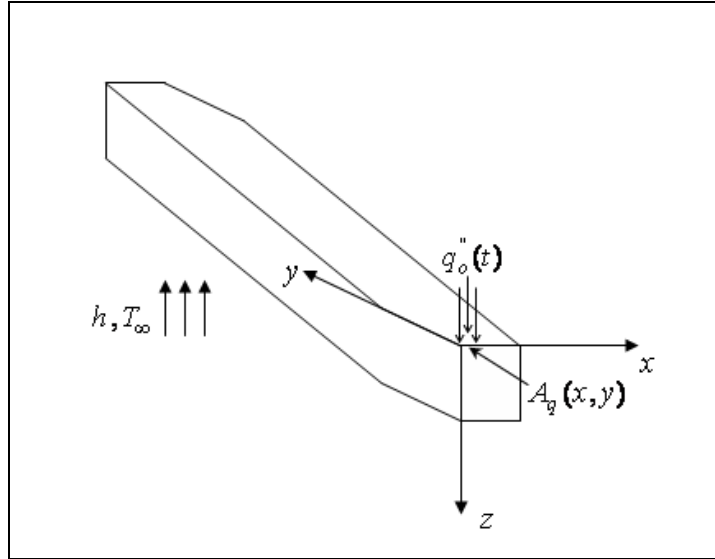


Figura 1: Representação esquemática da ferramenta de aço-rápido.

O problema térmico apresentado na Figura 1 pode ser descrito pela equação da difusão de calor 3D transiente, ou seja,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = (\rho Cp) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Observa-se na Figura 1 que uma grande parte da superfície da ferramenta está exposta ao meio ambiente. A única região não exposta ao meio ambiente, está sujeita ao fluxo térmico $q_o''(t)$ devido ao contato cavaco-ferramenta e é identificada pela área de contato $A_q(x,y)$.

As condições de contorno impostas ao problema podem ser escritas por:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \eta} = h(T - T_\infty) \quad (2)$$

nas regiões expostas ao meio e

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \eta} = q_o''(t) \quad (3)$$

na interface definida por $A_q(x,y)$, onde η representa a normal pra fora nas coordenadas x , y , e z , T a temperatura, T_∞ a temperatura ambiente, λ a condutividade térmica, ρCp o produto densidade específica versus calor específico e h o coeficiente de transferência de calor por convecção. Como condição inicial adota-se:

$T(x, y, z, 0) = T_o$, onde T_o representa a temperatura inicial da ferramenta.

3. DISCRETIZAÇÃO DA EQUAÇÃO DA DIFUSÃO DE CALOR

A equação da difusão de calor Equação 1 foi discretizada a partir do método dos volumes finitos inteiros, com formulação implícita e malha irregular co-localizada, assim como apresentado na Figura 2 (Maliska, 2004).

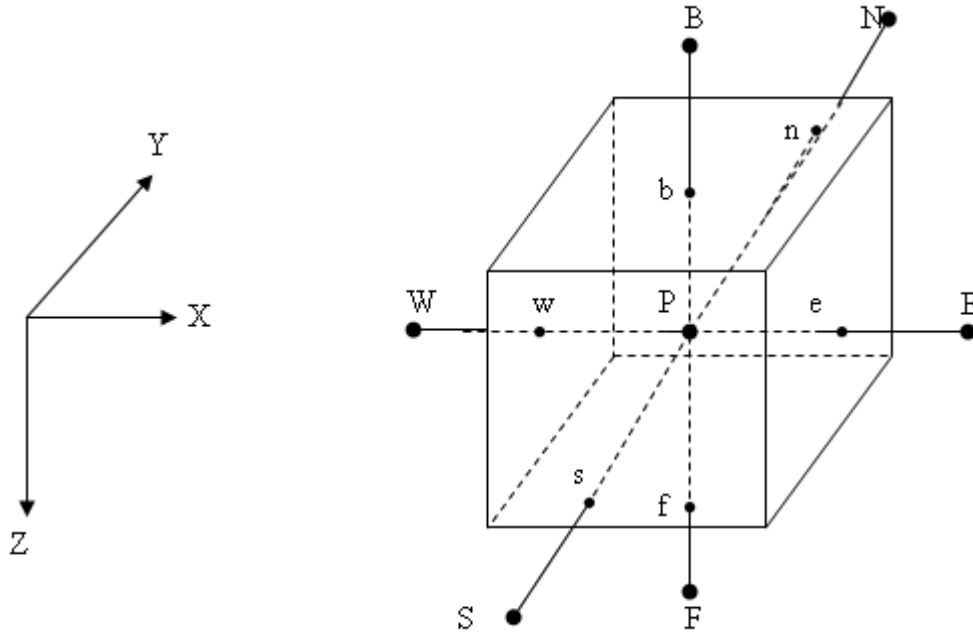


Figura 2: Volume elementar tridimensional e seus vizinhos.

Integrando a equação da difusão na forma conservativa no espaço e no tempo de acordo com os limites definidos na Figura 2 tem-se:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_b^f \int_s^n \int_w^e \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] dx dy dz dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_b^f \int_s^n \int_w^e \left[(\rho Cp)_i \frac{\partial T}{\partial t} \right] dx dy dz dt \quad (4)$$

Aproximando as derivadas nas interfaces do volume elementar Figura 2 por diferenças finitas e usando formulação implícita, é possível montar um sistema linear composto pela matriz A, que envolve os coeficientes relacionados com a forma geométrica do modelo proposto, a Matriz T, que envolve as temperaturas que serão calculadas pelo modelo e a matriz B, que envolve as condições de contorno dos termos fontes do modelo proposto. Esse sistema possui uma notação matricial ($A \times T = B$) conforme mostrado abaixo:

$$A_P T_P + A_W T_W + A_E T_E + A_S T_S + A_N T_N + A_F T_F + A_B T_B = B \quad (5)$$

onde os da matriz A coeficientes são dados por

$$A_P = -k_e \frac{1}{\Delta x_E} Ayz - k_w \frac{1}{\Delta x_W} Ayz - k_n \frac{1}{\Delta y_N} Azx - k_s \frac{1}{\Delta y_S} Azx - k_f \frac{1}{\Delta z_F} Axy - k_b \frac{1}{\Delta z_B} Axy - \rho Cp T_P V \quad (6)$$

$$A_W = k_w \frac{1}{\Delta x_W} Ayz \quad (7)$$

$$A_E = k_e \frac{1}{\Delta x_E} Ayz \quad (8)$$

$$A_S = k_s \frac{1}{\Delta y_S} A_{zx} \quad (9)$$

$$A_N = k_n \frac{1}{\Delta y_N} A_{zx} \quad (10)$$

$$A_F = k_f \frac{1}{\Delta z_F} A_{xy} \quad (11)$$

$$A_B = k_b \frac{1}{\Delta z_B} A_{xy} \quad (12)$$

$$B = -\rho C_p^0 T_p^0 V \quad (13)$$

Com o uso de uma malha não uniforme as propriedades térmicas sobre as faces da célula devem agora ser interpoladas de maneira pertinente. Neste caso, propõe-se o uso do esquema de interpolação conforme sugerido por Patankar (1980).

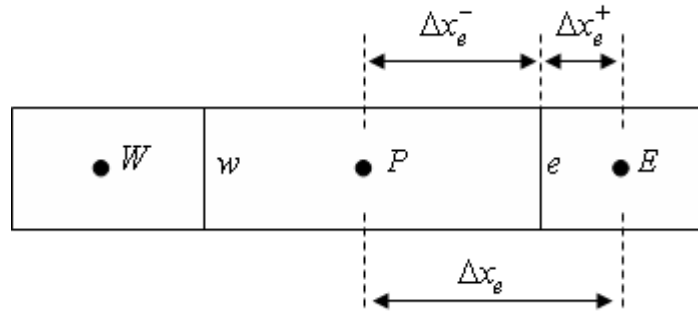


Figura 3: Malha não-uniforme e distâncias associadas a face e .

Para a interpolação da condutividade térmica sobre a face, utiliza-se uma aproximação linear entre os pontos vizinhos da seguinte forma:

$$k_e = f_e K_P + (1 - f_e) K_E \quad (14)$$

onde o fator de interpolação f_e é a razão entre as distâncias apresentadas na Figura 3, dada por:

$$f_e = \frac{\Delta x_e^+}{\Delta x_e} \quad (15)$$

Na solução do sistema linear, utilizou-se o método S.O.R. (Successive Over Relaxation) já implementado no Inv3D conforme apresentado em Carvalho (2005).

4. VALIDAÇÃO DO MODELO TÉRMICO A PARTIR DE UM EXPERIMENTO CONTROLADOS E SOLUÇÕES ANALÍTICAS TRANSIENTE

Atualmente essa etapa de validação do modelo térmico se encontra em andamento. Os resultados obtidos pelo software serão comparados a dados experimentais e a resultados obtidos a partir de soluções analíticas transientes.

5. MONTAGEM DA BANCADA EXPERIMENTAL E DESENVOLVIMENTO DO MODELO 3D DA FERRAMENTA DE AÇO RÁPIDO

Na montagem da bancada experimental para análise do processo de usinagem, utilizou-se um torno mecânico convencional IMOR MAXI – II – 520 – 6CV. As temperaturas experimentais foram medidas por meio de um sistema de aquisição de dados HP 75000 Series B com voltímetro E1326B comandado por PC no qual foram conectados cinco termopares do tipo T. Estes termopares foram posicionados nas faces inferior e superior da ferramenta a partir do método da descarga capacitiva (Carvalho, 2005). A Figura 4 apresenta em detalhes o posicionamento dos termopares na ferramenta de corte.

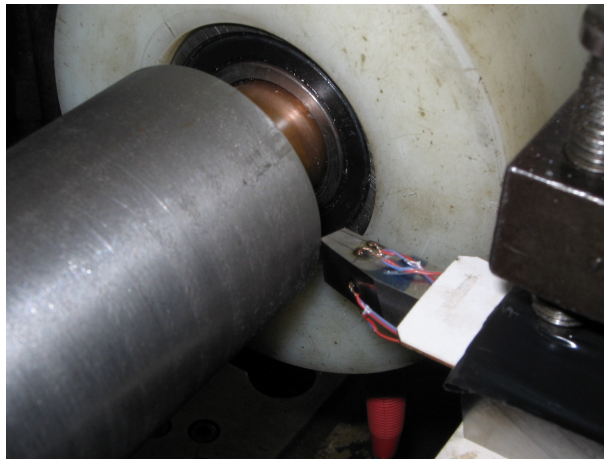


Figura 4: Termopares fixados à ferramenta a partir do método da descarga capacitiva
As dimensões da ferramenta de corte de aço rápido são apresentadas na Figura 5.

A Figura 5, por sua vez, apresenta as dimensões da ferramenta de corte de aço rápido.

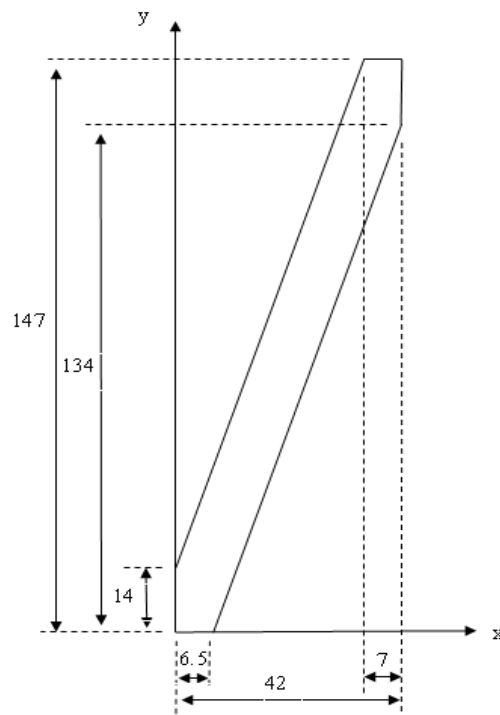


Figura 5: Dimensões em milímetros da ferramenta de corte de aço rápido. Eixo $z=9.5(\text{mm})$.

A Tabela 1 indica as coordenadas dos termopares de acordo com o eixo de coordenadas apresentado na Figura 5.

Tabela1: Posição dos termopares no conjunto ferramenta e porta-ferramenta

Posição/Termopar	1	2	3	4	5
X [mm]	0,61	2,70	0,00	3,30	2,00
Y [mm]	7,20	8,50	9,00	7,00	3,40
Z [mm]	0,00	0,00	5,00	9,50	9,50

Como relação ao material usinado e à ferramenta utilizada, foram usados corpos-de-prova de aço livre corte com baixo carbono ao chumbo ABNT 12L14 com diferentes níveis elementos químicos residuais (Cr, Ni e Cu). A ferramenta de corte, por sua vez, é de aço rápido AISI M3:2 C com 10% de cobalto.

Foram realizados 41 experimentos com barras de aço livre corte com diâmetro de 50.2 mm. Em cada experimento fez-se a aquisição da temperatura durante 168 segundos, com um intervalo de medição de 0.112 segundos. Detalhes sobre a bancada experimental são apresentados na Figura 6.



Figura 6: Banca experimental utilizada na realização dos experimentos.

Na Figura 6 podem ainda ser identificados os equipamentos usados para medir a temperatura na interface de corte a partir do método do termopar-ferramenta-peça. Essa técnica experimental consiste em medir a temperatura média da interface cavaco-ferramenta por meio de um fenômeno físico conhecido como efeito “Seebeck” (Borchardt & Gomes, 1979). Neste caso, a presença de dois materiais diferentes unidos e conectados em um circuito, gera uma diferença de potencial (milivolts) cuja grandeza depende dos materiais e da temperatura na junção (Borchardt & Gomes, 1979). Para se obter a relação entre a diferença de potencial e a temperatura da junta se faz necessário calibrar o sistema. A calibração é feita usando uma amostra do material da ferramenta de corte e outra da peça usinada. Tais materiais são unidos por descarga capacitiva e inseridos no interior de um forno de calibração. Para cada temperatura ajustada no forno mede-se a diferença de potencial na junção. Ressalta-se que a diferença de potencial é sempre medida em relação a uma junta fria, o que explica a presença de uma garrafa térmica com gelo na Figura 6. Em posse da curva de calibração para o conjunto ferramenta e peça, o próximo passo é medir a diferença de potencial gerada durante a usinagem e correlacionar tal grandeza com a temperatura previamente calibrada.

Os parâmetros de corte adotados durante a realização dos experimentos são apresentados nas tabelas abaixo:

Tabela 2: Variação da profundidade de corte.

Profundidade de corte (ap)	Unidade [mm]			
	0.5	1.0	1.5	2.0

Tabela 3: Variação do Avanço.

Avanço (f)	Unidade [mm/rot]					
	0.138	0.162	0.176	0.204	0.242	0.298

Tabela 4: Variação da Rotação.

Rotação (rot)	Unidade (rpm)															
	28	45	56	71	90	112	140	180	224	280	355	450	560	710	900	1400

A área do contato cavaco-ferramenta, por sua vez, foi obtida a partir do seguinte procedimento: para cada condição de usinagem, utilizou-se uma aresta de corte da ferramenta. Após a realização dos experimentos, as áreas de contato foram medidas a partir de uma câmera de vídeo Hitachi CCD, modelo KP-110, controlada por um computador AMD K6 450 MHz e por um software de tratamento das imagens, o GLOBAL LAB Image. A Figura 8 apresenta a área de contato para a condição de corte: $ap = 0.5$ (mm), $f = 0.138$ (mm/rot) e $rot = 28$ rpm. No presente trabalho, optou-se por medir a largura (L) e a altura (h) da superfície de contato, obtendo-se, portanto, uma área retangular representativa da área de contato cavaco-ferramenta.

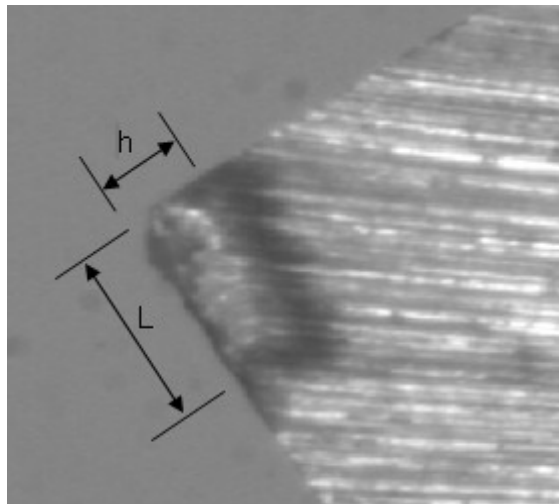


Figura 7: Área de contato cavaco-ferramenta para a condição de corte: $ap=0.5$ (mm), $f=0.138$ (mm/rot) e $rot=28$ rpm.

Conhecidos os parâmetros de corte, a área de contato cavaco-ferramenta e as temperaturas experimentais medidas para cada caso, resta desenvolver o modelo térmico da ferramenta no software Inv3D e estimar o fluxo de calor na interface de corte e a distribuição tridimensional de temperatura na ferramenta. No entanto, tal modelo depende da finalização das correções identificadas no algoritmo computacional presente no INV3D e da validação desse novo algoritmo utilizando um experimento controlado e um modelo analítico conforme comentado anteriormente.

Ressalta-se que os resultados obtidos serão comparados ao método experimental do termopar-ferramenta peça.

6. ANÁLISE DE TÉCNICAS INVERSAS

Nesse trabalho será feita uma análise utilizando diferentes técnicas inversas. O objetivo é verificar quais são as vantagens e desvantagens das técnicas inversas previamente implementadas no Inv3D (Carvalho, 2005), quando aplicadas na solução do problema térmico de usinagem. As técnicas inversas que serão analisadas são: Seção Áurea, Simulated Annealing, Função Especificada Sequencial e Observadores Dinâmicos baseados em Funções de Green conforme Souza (2006). Ressalta-se que para realizar tais análises serão usados dados experimentais.

7. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NA VIDA ÚTIL DA FERRAMENTA DE AÇO RÁPIDO

Propõe-se nessa etapa uma análise da influência da temperatura na interface de corte na vida útil da ferramenta de aço rápido para cada condição de corte adotada. Será verificada também a necessidade de execução de experimentos adicionais para a confirmação dos resultados obtidos.

8. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Essa etapa do trabalho será realizada à medida que os passos anteriores forem cumpridos.

9. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Capes, CNPq e Fapemig, pelo apoio financeiro.

10. REFERÊNCIAS

BORCHARDT, I. G. ; GOMES, A, F. (1979). Termometria termoelétrica- termopares. - Livro texto – Sagra: Porto Alegre.

Carvalho, S. R. (2005). Determinação da temperatura na interface cavaco-peça-ferramenta durante o processo de usinagem por torneamento. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

FERRARESI, D. (1977). Fundamentos da usinagem dos metais, Editora Edgard Blucher, vol1.

Melo, A. C. A. (1998). Estimação da Temperatura de Corte Utilizando Problemas Inversos em Condução de Calor, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

Machado, A. R., Silva, M.B. (2004). Usinagem dos Metais. 8ª Ed., Brasil.

Maliska C. R. (2004) Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos, Editora LTC 2ª Ed, Brasil.

Patankar, S. (1980). Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, USA: Hemisphere Publishing Corporation.

Sousa, P.F.B, (2006), Desenvolvimento de uma técnica baseada em funções de Green e observadores dinâmicos para aplicação em problemas inversos, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

TAYLOR, G. I. & QUINEY, H. (1937). Proc. R. Soc., A163, 157.

TRENT, E. M. (1984). Metal cutting, 2º Ed, Butterworths. London.

11. DIREITOS AUTORAIS

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

THE IMPROVEMENT OF A COMPUTATIONAL CODE FOR THE THERMAL FIELDS ANALYSIS DURING MACHINING OF FREE CUTTING STEEL WITH HIGH SPEED STEEL TOOL

Marcelo Ribeiro dos Santos
Solidônio Rodrigues Carvalho
Gilmar Guimarães

mrsantos@mecanica.ufu.br; srcarvalho@mecanica.ufu.br ; gguima@mecanica.ufu.br;

School of Mechanical Engineering – FEMEC, Federal University of Uberlândia – UFU, Campus Santa Mônica, João Naves de Ávila Av., 2160, Santa Mônica, ZIP CODE 38400-902, Uberlândia, MG, Brazil.

Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva

metrevel@unifei.edu.br;

Federal University of Itajubá - UNIFEI, Institute of Mechanical Engineering - IEM, Prof. José Rodrigues Seabra Campus, 1303 BPS Av., Pinheirinho , ZIP CODE 37500-903, Post Office Box 50, Itajubá, MG, Brazil

Abstract: *During machining the mechanical energy is converted in heat due to the plastic deformation and the friction between the tool and the piece. Great part of this transferred heat to the cut tool results in high temperatures in the chip-tool interface. These temperatures have a negative impact in the useful life of the tool. The tool becomes more vulnerable and it wears more quickly. Through the knowledge of those temperatures it is possible to analyze in a more efficient way the negative effects. However the difficulty of measuring the temperature in the chip-tool interface shows the importance of the development of an efficient technique for the analysis of this variable. In this sense, the Laboratory of Heat and Mass Transfer and Fluid Dynamics (LTCM) of the Federal University of Uberlândia (UFU) have been working in some specific softwares to determine the heat flux and the temperature distribution in industrial processes as the machining of metals. Among the softwares developed in LTCM, the INV3D (Carvalho, 2005) solves direct and inverse heat transfer problems. The computational algorithm is based on the numeric solution, through the finite differences technique, of a three-dimensional thermal transient model using irregular and co-located mesh. For the solution of the inverse problem the following techniques were implemented: Golden Section, Simulated Annealing and Sequential Specified Function. During several tests, it was identified some problems in this software, mainly when it was applied to complex geometries. It was verified that the software did not reach energy conservation for such geometries, and this fact infringes the physical principles and it compromises the results generated by the computational algorithm. Therefore, this work has as an initial objective that is to correct the problems founded in the INV3D and to implement improvements. The second stage is to validate the software using controlled experiments and analytical transient solutions. The third stage consists of applying the software in the study of the thermal fields developed in the machining process of free cutting steel with high speed steel tool. In this case the results will be compared with the thermocouple-tool-piece experimental method.*

Keywords: *Inverse problems, heat conduction, three-dimensional, machining, optimization.*