



XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP  
Artigo CREEM2012

## ESTUDO NUMÉRICO PARA A OBTENÇÃO DO CAMPO DE TEMPERATURA NO CONJUNTO FERRAMENTA, CALÇO, PORTA-FERRAMENTA EM PROCESSO DE USINAGEM

**Lucas Guedes de Oliveira<sup>1</sup>**

UNIFEI, Universidade Federal de Itajubá, Curso de Engenharia de Produção  
lucas.guedesoliveira@hotmail.com

**Solidônio Rodrigues de Carvalho<sup>2</sup>**

<sup>2</sup>UFU, Universidade Federal de Uberlândia - FEMEC, Faculdade de Engenharia Mecânica  
Campus Santa Mônica - Av. João Naves de Ávila, 2160. Bairro Santa Mônica - CEP 38400-902 – Uberlândia – Minas Gerais  
srcarvalho@mecanica.ufu.br

**Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva<sup>3</sup>**

metrevel@unifei.edu.br

**João Roberto Ferreira<sup>3</sup>**

jorofe@unifei.edu.br

<sup>3</sup>UNIFEI, Universidade Federal de Itajubá - IEM, Instituto de Engenharia Mecânica  
Campus Prof. José Rodrigues Seabra - Av. BPS,1303. Bairro Pinheirinho - CEP 37500-903 – Itajubá – Minas Gerais

**Rogério Fernandes Brito<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>UNIFEI, Universidade Federal de Itajubá  
Campus Avançado de Itabira - Rua Irmã Ivone Drumond, 200. Bairro Distrito Industrial II - CEP 35903-087 – Itabira – Minas Gerais  
rogbrito@unifei.edu.br

### Introdução

As ferramentas de corte, apesar de serem fabricadas com inúmeros diferenciais, são, na maioria das vezes, agrupadas de acordo com a necessidade do cliente para a usinagem de peças. Desse modo, a presença ou ausência de revestimento exhibe peculiaridades dentro da classificação mencionada, uma vez que acrescentam propriedades importantes à ferramenta e garantem a produtividade exigida para o processo de usinagem. Sob esse aspecto, o estudo sobre os revestimentos é muito útil na análise do fluxo de calor gerado em ferramentas de corte, visto que o comportamento da ferramenta ao ser submetida ao processo para o qual é destinada na usinagem de materiais difere, em muito, nos dois casos apresentados: necessidade de revestimentos e casos em que estes ainda não são utilizados. Isso porque, analítica e praticamente, um revestimento em uma ferramenta de corte pode melhorar significativamente seu desempenho e durabilidade.

Para casos como esse que envolvem o uso e a aplicação de revestimentos em ferramentas de corte e outros em que tal técnica não é utilizada (como referido anteriormente), muitos estudos são apresentados no âmbito científico na análise da transferência de calor. Carvalho *et. al.* (2006) analisou as altas temperaturas geradas na interface de “cavaco-ferramenta” durante o processo de usinagem. Em seu trabalho, assim, o autor contemplou o desenvolvimento de um modelo térmico tridimensional transiente com vista para o conjunto “ferramenta, calço e porta-ferramenta”. E, ao contrário de muitos pesquisadores, Carvalho *et. al.* (2006) desenvolveu um código computacional próprio. Huang *et. al.* (2007) realizaram experimentos utilizando-se de ferramenta de corte de titânio. Dada a impossibilidade de se mensurar a temperatura na interface de corte da ferramenta, foram aplicadas técnicas para estimação do fluxo de calor ao longo da superfície de corte, considerando-se as temperaturas medidas na ferramenta em estudo. Huang e Chaing (2008), semelhantemente aos autores supracitados, utilizaram-se do *Steepest Descend Method* na formulação do problema inverso aplicado a geometrias em três dimensões de análise. No entanto, como subprograma para solução do problema estabelecido, os pesquisadores empregaram o pacote comercial CFD-RC<sup>®</sup>. O objetivo do trabalho, sob esses termos, foi definido para a determinação das variáveis desconhecidas por meio da simulação da temperatura medida na superfície da geometria. Brito *et. al.* (2009) estudaram a influência do calor em ferramentas de corte em vista da variação de espessura do revestimento e do fluxo de calor. Como consequência da análise da influência do fluxo de calor e da variação de espessura dos

revestimentos no campo de temperatura na interface “cavaco-ferramenta”, enfim, os autores perceberam que tais revestimentos não influenciam na diminuição de temperatura. Samadi *et. al.* (2011), estimaram o fluxo de calor para ferramentas modeladas em três dimensões. Por meio do método da função especificada sequencial (*sequential function specification method*), os autores puderam realizar o estudo partindo do tempo em que os valores do fluxo de calor eram implementados sequencialmente na superfície definida como “superfície ativa”.

O objetivo do presente trabalho é fazer um estudo numérico para obtenção do campo de temperatura em ferramentas de corte na região do conjunto “ferramenta, calço e porta-ferramenta” durante o processo de usinagem. No processo de análise dos dados, assim, são utilizados os pacotes comerciais AutoCAD® e SolidWorks®. Além disso, para a obtenção do campo de temperatura na ferramenta, utiliza-se o pacote comercial ANSYS® *Academic Research*, v. 14. Na simulação do presente trabalho, então, é tomada, primeiramente, uma ferramenta de corte sem revestimento e conduzido um estudo voltado para a solução de um problema direto estabelecido, considerando-se uma geometria tridimensional com dimensões caracterizadas por sua proximidade com as observadas no caso real. Em continuidade ao presente trabalho, serão realizados estudos futuros voltados para técnicas de problema inverso; sendo este primeiro, uma introdução ao estudo numérico proposto.

## Metodologia

Inicialmente, foram adotados dados experimentais obtidos do trabalho realizado por Carvalho (2005) – e, Carvalho *et. al.* (2006). Na ocasião dos experimentos, o autor utilizou-se de ferramenta de corte de metal duro de dimensões  $(1,27 \times 1,27 \times 0,47) \cdot 10^{-2}$  m para a validação numérica de seu trabalho (isto é, experimento controlado em laboratório com a ferramenta citada seguido da simulação numérica considerando o conjunto ferramenta, calço e porta-ferramenta). A partir disso, então, foram utilizadas tais dimensões no presente trabalho com o objetivo de se fazer a análise computacional proposta e a validação numérica da metodologia utilizada com vista para a maior proximidade possível com o caso real. A ferramenta considerada, submetida, assim, à usinagem no trabalho do autor supracitado, apresentou, na ocasião mencionada, uma região de desgaste evidenciada por uma modificação na sua aparência. Essa região, como descrita, é mostrada na Fig. 1. Nela, são exibidas parte da ferramenta e a região desgastada sob um ângulo fotográfico escolhido pelo pesquisador (a). Uma vez obtida a imagem apresentada na Fig. 1(a), então, esta foi inserida por Carvalho (2005) em um pacote comercial capaz de evidenciar a região de desgaste da ferramenta, estabelecer seus limites e medir um de seus segmentos (LabView®). Dessa maneira, estes dados foram também computados para aplicações futuras no presente trabalho. A Figura 1(b), além de conter os elementos gráficos citados (preenchimento da região e limitações da ferramenta no trecho considerado), disporia (no pacote comercial citado), em milímetros, do valor do referido segmento (realçado em vermelho), expresso por  $(0,520819) \cdot (10^{-3})$  m. Em virtude das vantagens operacionais e dos recursos proporcionados pelo pacote comercial AutoCAD®, a Fig. 1(b) foi utilizada como subsídio para delimitação gráfica da região desgastada na ferramenta de corte. Assim, a geometria foi inserida na plataforma ICEM CFD da ANSYS®. Através dela, então, foi possível gerar a malha (isto é, discretizar a geometria ou, dividir o desenho em vários elementos tetraédricos) e com auxílio do ANSYS CFX® realizar a simulação numérica.

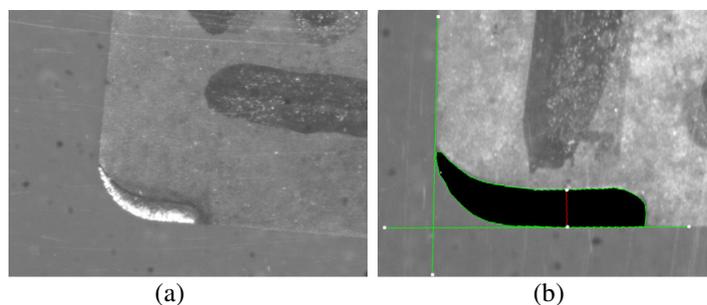


Figura 1 – Região de desgaste da ferramenta de corte: (a) Imagem de parte da ferramenta usada (b) Destaque da região de desgaste por meio de um pacote comercial empregado.

Fonte: Carvalho, 2005.

## Descrição do Problema

Para o caso em estudo, foram assumidas as propriedades do conjunto analisado conforme o trabalho de Carvalho (2005). Essas propriedades são: para ferramenta e calço de metal duro (Classe K10) - massa específica

$\rho = 14.900 \text{ kg m}^{-3}$ ; calor específico  $C_p = 332,45 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ; condutividade térmica  $k = 43,1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ; para porta-ferramenta de metal duro (ISO CSBNR 20K12) -  $\rho = 7.850 \text{ kg m}^{-3}$ ;  $C_p = 486,126 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ;  $k = 49,8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  [Carvalho *et. al.* (2006)]. Assim, conhecidos esses valores, avalia-se, também, a geometria utilizada. Essa geometria, desse modo, é mostrada na Fig. 2. Por meio dela, pode-se observar a interface de contato ferramenta-peça-de-trabalho evidenciada por um desenho característico que representa essa área de desgaste.

A Figura 3 mostra a malha computacional desenvolvida na simulação numérica do presente trabalho. Constituída de 1.645.401 elementos tetraédricos e 271.628 pontos nodais, pode-se visualizar, através dela, detalhes da interface cavaco-ferramenta (ou, interface de contato), onde se fez o refinamento da malha a fim de se garantir melhores resultados visto que se trata da região de maior gradiente de temperatura [Carvalho *et. al.*, 2006]. A área correspondente a essa região foi obtida para as seguintes condições de corte (segundo dados experimentais de usinagem de Carvalho, 2005): avanço de 0,132 mm/rot; rotação de 360 rpm; profundidade de corte de 3,0 mm; comprimento usinado de 77 mm; diâmetro inicial de 77 mm; e velocidade de corte de 135,47 m/min.

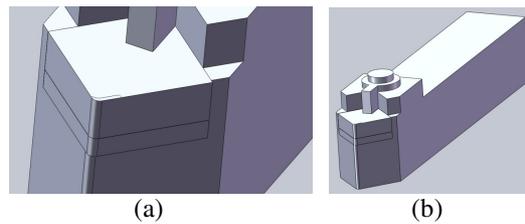


Figura 2 – Conjunto ferramenta de corte, calço e suporte: (a) Detalhe da ferramenta de corte e sua interface de contato (b) Vista geral do conjunto.

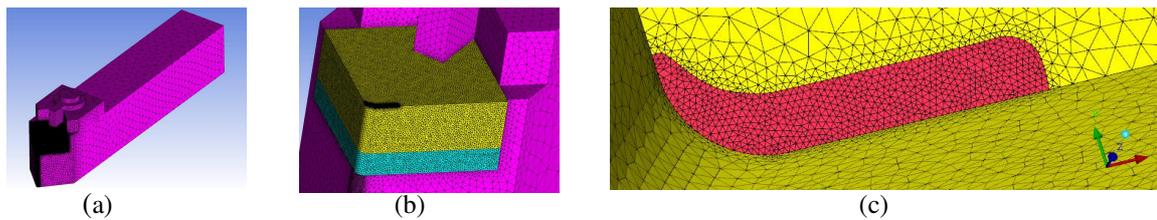


Figura 3 – Malha tetraédrica típica utilizada: (a) Vista geral (b) Vista, em detalhe, da ferramenta de corte (c) Detalhe da região da interface “cavaco-ferramenta”

### Hipóteses do Problema

As seguintes hipóteses foram consideradas no presente estudo: domínio geométrico tridimensional; regime transiente; ausência de modelos de radiação; as propriedades térmicas tais como a massa específica  $\rho$ , a condutividade térmica  $k$  e o calor específico  $C_p$  são independentes da temperatura e elas são uniformes para cada elemento sólido; existe um contato térmico perfeito e nenhuma resistência térmica de contato existe entre os elementos sólidos; a condição de contorno de fluxo de calor  $q(t)$  é uniforme e variável no tempo; as condições de contorno do coeficiente de transferência de calor  $h$  e da temperatura ambiente  $T_\infty$  são constantes e também conhecidas [Incropera, 2008]; não existe nenhuma geração de energia interna nos sólidos envolvidos.

### Equacionamento Geral

A equação governante da conservação de energia, dependente do tempo e na forma dimensional, é dada por:

$$(\rho C_p)_i \frac{DT}{Dt} = k_i \nabla^2(T) + \mu_i \Phi, \quad (\text{em } \Omega_i, \text{ para } t > 0), \quad (1)$$

onde  $\mu$  é a viscosidade dinâmica ( $\text{N s m}^{-2}$ ),  $D/Dt$  é a derivada substancial,  $\nabla^2$  é o operador Laplace e  $\Phi$  é o termo de dissipação viscosa [Huang e Chen, 2000]. Mediante as considerações apresentadas anteriormente no item anterior, é descrita na forma de derivadas parciais, sendo dada pela equação da difusão de calor tridimensional e transiente, como sendo:

$$(\rho C_p)_i \frac{\partial T}{\partial t} = k_i \nabla^2(T), \quad (\text{em } \Omega_i, \text{ para } t > 0), \quad (2)$$

sendo  $i = 1, 3$ , com  $i = 1$  para a ferramenta de corte;  $i = 2$  para o calço da ferramenta e  $i = 3$  para o suporte do conjunto.

### Condições Iniciais e Condições de Contorno

A simulação numérica da transferência de calor por condução no conjunto do presente trabalho, em um dado processo de usinagem, é realizada na temperatura ambiente, assumindo conhecidas as temperaturas iniciais de cada elemento sólido. O presente modelo térmico está sujeito às seguintes condições iniciais e de contorno:

i) Condições iniciais de *Cauchy*, descrevendo os estados térmicos dos sólidos:

$$T_{t=0} = T_i = T_\infty = 24,1 (^{\circ}C), \quad (\text{em } \Omega_i, \text{ com } i = 1, 3, \text{ para } t = 0), \quad (3)$$

sendo  $T_i$  a temperatura inicial ( $^{\circ}C$ ) e  $T_\infty$  a temperatura do meio externo ( $^{\circ}C$ ). No modelo proposto, três tipos de condições de contorno são aplicadas: condição de *Neumann* ou condição de contorno de segundo tipo, sendo  $-q_0 = -k(\partial T/\partial \eta)$ , onde  $\eta$  é a normal externa ao contorno e  $q_0$  é o fluxo de calor ( $W m^{-2}$ ); condição de *Fourier* ou condição de contorno de terceiro tipo, sendo  $-k(\partial T/\partial \eta) = h(T - T_\infty)$ ; condição de quarto tipo quando os domínios  $\Omega_i$  de cada elemento sólido, com diferentes condutividades térmicas, estão em contato (superfície em comum), isto é,  $k_1(\partial T_1/\partial \eta_1)|_c = k_2(\partial T_2/\partial \eta_2)|_c = k_3(\partial T_3/\partial \eta_3)|_c$ .

ii) Condições de contorno:

$$-k \frac{\partial T}{\partial \eta} = q(t), \quad (\text{na região de desgaste, para } t > 0), \quad (4)$$

onde  $q(t)$  é o fluxo de calor uniforme e variável ( $W m^{-2}$ ), gerado devido ao contato com a ferramenta de corte e o cavaco, sendo que esse é de valor conhecido a partir de um experimento realizado por Carvalho (2005) e Carvalho *et. al.* (2006) como mostrado na Fig. 3 (c).

$$-k \frac{\partial T}{\partial \eta} = h(T - T_\infty), \quad (\text{em } \Omega_i, \text{ exceto na área de desgaste, para } t > 0), \quad (5)$$

onde  $\partial T/\partial \eta$  é a derivada ao longo da direção normal da superfície de cada elemento sólido, em contato com o meio ambiente. Na interface de cada elemento sólido aplica-se a condição de fluxo conservativo, como sendo:

$$k_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial \eta_1} \right) \Big|_c = \dots = k_3 \left( \frac{\partial T_3}{\partial \eta_3} \right) \Big|_c, \quad (\text{em } C, \text{ para } t > 0), \quad (6)$$

### Método Numérico

A solução das equações de conservação que regem o problema físico do presente trabalho, em regime não permanente, utiliza o Método de Volumes Finitos (MVF) através do pacote comercial da ANSYS®. Sobre os conceitos envolvidos pelo MVF, podem ser encontrados mais detalhes no trabalho de Barth e Ohlberger (2004), que exploram as técnicas de discretização, técnicas de aproximação das integrais, critérios de convergência e estabilidade do cálculo.

### Validação Numérica

O presente trabalho utiliza os resultados experimentais e numéricos de Carvalho (2005) e Carvalho *et. al.* (2006) a fim de se fazer uma comparação com os resultados obtidos pelo pacote comercial utilizado. Carvalho (2005) realizou um experimento em condições controladas, no qual foi empregada uma ferramenta de corte de metal duro ISO K10 de dimensões  $12,7 (10^{-3}m) \times 12,7 (10^{-3}m) \times 4,7 (10^{-3}m)$ . Os resultados obtidos desta validação foram apresentados por Brito *et. al.* (2009). Uma vez realizada a validação [Brito *et. al.* (2009)] com dados experimentais e numéricos de Carvalho (2005) e Carvalho *et al.* (2006), o modelo térmico e a solução numérica do problema de usinagem proposto no presente trabalho, utilizando ferramentas de metal duro Sandvik® Coromant ISO K10, incluindo o calço e o porta ferramenta, foram

concluídos. O fluxo de calor transiente  $q(t)$  (Fig. 6), estimado numericamente por Carvalho (2005), foi utilizado para a obtenção dos resultados do presente trabalho. A seguir, são apresentados os resultados obtidos numericamente da simulação térmica do conjunto (problema direto).

### Análise dos Resultados

Com as simulações numéricas realizadas no presente trabalho, verificou-se que os maiores gradientes de temperatura, na ferramenta de corte, ocorreram para o tempo de aproximadamente 59 (s), apresentando valores de temperatura de aproximadamente 140 (°C). No presente trabalho, então, foram considerados: temperatura ambiente  $T_{\infty} = 24,1$  (°C); e coeficiente de transferência de calor por convecção  $h = 20$  ( $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ) [Yen *et al.*, 2003], os quais favoreceram consideravelmente a dissipação da taxa de transferência de calor na ferramenta, fazendo com que a temperatura caísse de aproximadamente 140 (°C) até 98 (°C) no instante final 76 (s). O objetivo principal do presente trabalho é obter o campo de temperaturas do conjunto ferramenta, calço e porta-ferramenta, com vista para a identificação dos maiores gradientes de temperatura a partir de dados experimentais conhecidos da literatura. A Figura 4(a) apresenta o caso real assumido inicialmente como subsídio para a análise proposta. O modelamento dessa ferramenta, utilizando-se de pacotes comerciais CAD/CAE, assim, é mostrado na Fig. 4(b). Foram utilizadas, para esse modelamento, 201 isotermas (ou, contornos); o instante de tempo em que foi apresentado o campo de temperatura foi de 62 (s); a temperatura mínima para esse instante foi de 24,16(°C) e a máxima de 373,4(°C). Em detalhe desta ferramenta, por fim, verifica-se a Fig. 4(c), na qual é possível observar que os maiores gradientes de temperatura ocorrem na região mais próxima do contato cavaco-ferramenta (região evidenciada em vermelho). Os gráficos mostrados na sequência, contemplam duas curvas, através das quais se comparam os dados de temperaturas numérica e experimental – Fig. 5. Observa-se também o fluxo de calor adotado (Fig. 6). Assim, na primeira figura, nota-se um desvio ocorrido em vista do distanciamento entre as curvas. Esse distanciamento se deve a fatores comentados no tópico final. Na Figura 7, é exibido o ponto de monitoramento da temperatura, de modo a evidenciar sua distância em relação à superfície de contato “ferramenta-cavaco”. As coordenadas desse ponto são, em metros,  $(0; 3,95; -2,129)10^{-3}$ .

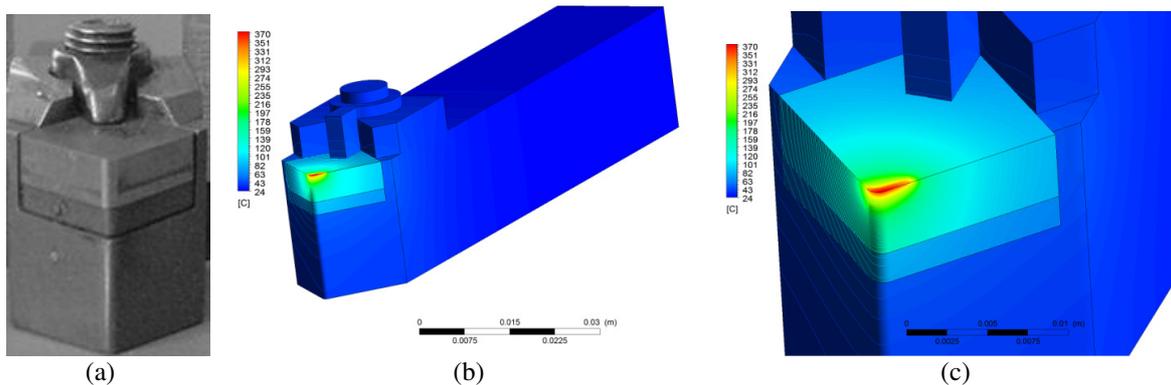


Figura 4 – Conjunto ferramenta, calço e porta-ferramenta: (a) imagem real do conjunto (Carvalho, 2005), (b) distribuição do campo de temperatura, (c) detalhe da distribuição na ferramenta de corte.

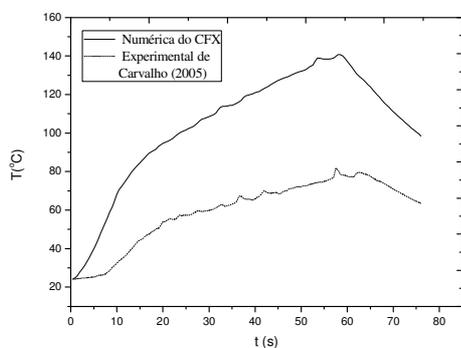


Figura 5 – Gráfico comparativo entre as temperaturas experimental e numérica

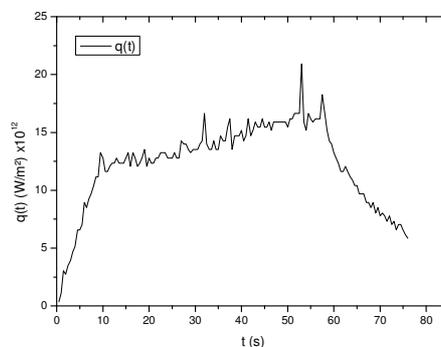


Figura 6 – Gráfico do Fluxo de calor adotado (Carvalho, 2005)

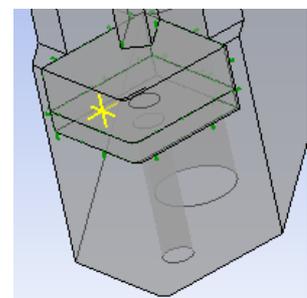


Figura 7 – Ponto de monitoramento de temperatura.

## Conclusão

Em vista da metodologia adotada, dos resultados analisados e dos argumentos apresentados no presente trabalho, pode-se notar que: 1) Os maiores gradientes de temperatura podem ser observados na região onde ocorre o contato mais próximo entre a ferramenta de corte e a peça de trabalho (região de corte), bem como na região do calço do conjunto (Carvalho *et. al.*, 2006); 2) Com relação ao trabalho de Carvalho *et. al.* (2006), pode-se dizer que o modelamento realizado no presente trabalho, utilizando-se de pacotes comerciais, apresenta um resultado mais próximo do caso real de usinagem. Isso pode ser exemplificado para a área de contato entre a ferramenta de corte e a peça de trabalho, cujo dimensionamento foi realizado por meio do pacote AutoCAD®. 3) Uma das contribuições do presente trabalho relaciona-se ao estudo da geometria de todo o conjunto envolvido no processo, à saber: ferramenta, calço e porta-ferramenta; em relação ao trabalho de Brito *et. al.* (2009). 4) Quanto aos desvios, estes podem ser justificados pela modelagem numérica do conjunto ser distinta da modelagem realizada por Carvalho (2005); além das incorrespondências entre as propriedades termofísicas e as condições iniciais e de contorno adotadas no presente trabalho com os parâmetros considerados pelo autor supracitado. 5) Uma investigação mais completa será realizada em trabalhos futuros a fim de se verificar a influência térmica da variação dos tipos de materiais do conjunto “ferramenta, calço e porta-ferramenta”; bem como o estudo numérico da influência térmica da variação dos tipos de revestimentos nesse conjunto; além de consideradas técnicas de problema inverso no estudo numérico da distribuição de temperatura no conjunto analisado. 6) Além disso, este trabalho vislumbra conceitos iniciais da distribuição de temperatura, atentando para o fato de que o custo operacional de experimentos é, por vezes, inviável; e, o emprego de pacotes comerciais de simulação, ao contrário, simplifica o processo de análise, bem como proporciona resultados de cunho prático e funcional.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG pela bolsa de Iniciação Científica concedida à Lucas Guedes de Oliveira.

## Referências Bibliográficas

- Barth, T., and Ohlberger, M., “Finite Volume Methods: Foundation and Analysis”, Encyclopedia of Computational Mechanics, John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
- Brito, R. F. *et. al.*, “Thermal analysis in coated cutting tools”, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol.36, pp.314-321, 2009.
- Carvalho, S. R., “Determinação do Campo de Temperatura em Ferramentas de Corte durante um Processo de Usinagem por Torneamento”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2005, 123p.
- Carvalho, S. R. *et. al.* “Temperature determination at the chip-tool interface using an inverse thermal model considering the tool and tool holder”, Journal of Materials Processing Technology, Vol.179, pp. 97-104, 2006.
- Dinc, C., Lazaglu, I., Serpenguzel, A., “Analysis of thermal fields in orthogonal machining with infrared imaging, Journal of Materials Processing Technology”, Vol.198, pp. 147-154, 2008.
- Huang, C.-H., and Chen, W.-C., “A Three-Dimensional Inverse Forced Convection Problem in Estimating Surface Heat Flux by Conjugate Gradient Method”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 43, pp. 3171-3181, 2000.
- Huang *et. al.*, Cheng-Huang, “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, 2007.
- Huang, Cheng-Huang, Chaing, Meng-Ting, “A transient three-dimensional inverse geometry problem in estimating the space and time-dependent irregular boundary shapes”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.51, pp. 5238-5246, 2008.
- Incropera, F. P., “Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”, 6ª ed., Ltc: 2008, 698 p.
- Samadi, F., Kowsary, F., Sarchami, A. “Estimation of heat flux imposed on the rake face of a cutting tool: A nonlinear, complex geometry inverse heat conduction case study”. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2011.
- Yen, Y. C., *et. al.*, “Computer Simulation of Orthogonal Cutting using a Tool with Multiple Coatings”, Proceedings of the Sixth CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operation, McMaster University, Canada, 2003, pp. 119-130.