

ANÁLISE TÉRMICA EM FERRAMENTA DE METAL DURO REVESTIDA

Rogério Fernandes Brito¹
rogbrito@unifei.edu.br

Solidônio Rodrigues de Carvalho
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 – Uberlândia, MG, Brasil
srcarvalho@mecanica.ufu.br

Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva¹
metrevel@unifei.edu.br

João Roberto Ferreira¹
¹Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Instituto de Engenharia Mecânica – IEM, campus Prof. José Rodrigues
Seabra, Av. BPS,1303, CEP: 37500-903, Itajubá, MG, Brasil
jorofe@unifei.edu.br

Resumo: Durante a usinagem ocorrem altas deformações no processo de formação do cavaco, onde uma grande quantidade de calor é gerada. O calor é um parâmetro que tem forte influência no desempenho e na vida da ferramenta. Para melhorar o desempenho da ferramenta são aplicados revestimentos sobre sua superfície. Estes revestimentos são geralmente materiais cerâmicos que proporcionam um menor desgaste, com características de isolamento térmico. A determinação da temperatura durante o corte é um dos fatores mais importante no estudo de vida de ferramentas, pois permite analisar e entender os mecanismos de desgastes. O presente trabalho propõe um estudo da influência térmica em ferramentas de metal duro, variando-se a espessura do revestimento. O objetivo dessa análise térmica é investigar os parâmetros térmicos e geométricos envolvidos na análise, possibilitando uma melhor distribuição da temperatura na região de corte, visando aumentar a vida da ferramenta e minimizando os custos de usinagem. O revestimento de nitreto de titânio (TiN) é usado, com espessuras de 1 e 10 (μm). A metodologia numérica a ser adotada no presente trabalho utiliza um pacote comercial, baseado no Método de Volumes Finitos, o qual permite obter em um mesmo espaço de tempo, todas as variáveis envolvidas na simulação. Os cálculos são conduzidos em condições de regime transiente, considerando conhecidas as condições de contorno por convecção e o fluxo de calor, além das propriedades termo físicas da ferramenta e do revestimento envolvidos na análise numérica. Para a validação da metodologia proposta será usado um experimento em condições controladas. Os resultados obtidos da simulação numérica são: campo de temperatura na ferramenta de corte e o estudo da influência térmica do revestimento.

Palavras-chave: análise térmica, método de volumes finitos, ferramenta de metal duro, revestimento, transferência de calor.

1. INTRODUÇÃO

No processo de usinagem, como em outro processo no qual ocorrem altas deformações do material, uma grande quantidade de calor é gerada. O calor é um parâmetro que tem forte influência no desempenho da ferramenta durante este processo. Uma das formas de aumentar a vida da ferramenta consiste em revestir a superfície de corte da ferramenta com materiais que proporcionam um menor desgaste com características de isolamento térmico.

Uma importante investigação, consiste no estudo da influência dos revestimentos das ferramentas de corte sobre a transferência de calor e sobre o desgaste por atrito, resultando em uma distribuição de temperatura de corte no cavaco e na ferramenta. Pode-se observar na literatura que a maioria das simulações de cortes ortogonais em metais foi destinada às ferramentas de metal duro sem revestimento e que agora, uma tendência oposta vem considerar o uso de um único e múltiplos revestimentos. Destacam-se alguns trabalhos envolvendo o estudo dos revestimentos: Marusich et al (2002) fizeram uma simulação utilizando-se um modelo numérico baseado no Método de Elementos Finitos (MEF), usando o software *Thirdwave AdvantEdge*[®] para simular o desempenho do quebra-cavaco de ferramentas revestidas e não revestidas. Um de seus resultados mostraram uma redução na temperatura da ordem de 100 ($^{\circ}\text{C}$) para substratos de

ferramentas com revestimentos formados por múltiplas camadas. Grzesik (2003) estudou os mecanismos de corte de várias ferramentas de metal duro com revestimento. O estudo mostrou que dependendo do revestimento, a área de contato da ferramenta-cavaco e a temperatura média na interface da ferramenta-peça de trabalho foram modificadas, sem comprovar em seu trabalho que os revestimentos foram capazes de isolar o substrato. Os primeiros trabalhos completos que tratam da avaliação de um modelo de corte ortogonal para ferramentas de metal duro com revestimentos formados por múltiplas camadas usando o MEF foi apresentado por Yen et al (2003) e Yen et al (2004). Neste modelo, as propriedades térmicas de três camadas de carboneto de titânio (TiC), óxido de alumínio (Al_2O_3) e nitreto de titânio (TiN) foram consideradas individualmente e em conjunto, considerando uma camada com propriedades térmicas equivalentes. Os resultados indicaram que os revestimentos de uma fina espessura com uma camada intermediária de Al_2O_3 não alteraram significativamente os gradientes de temperatura, para o regime estacionário, entre o cavaco e o substrato da ferramenta. Os estudos de Rech et al (2004) e de Rech et al (2005) trataram da qualificação do sistema tribológico 'material de trabalho - ferramenta de corte de metal duro com revestimento - cavaco'. O objetivo deste estudo era obter um entendimento mais claro do fluxo de calor gerado durante o processo de torneamento. A aplicação da metodologia proposta, para vários revestimentos depositados em insertos de metal duro, mostrou que os revestimentos não apresentaram uma influência significativa sobre o isolamento térmico do substrato. Kusiak et al (2005) fizeram um estudo da influência térmica dos diversos revestimentos depositados em uma ferramenta de corte. Essa análise foi feita através de um modelo analítico desenvolvido pelos autores. Um ensaio experimental do torneamento do aço AISI 1035 foi realizado a fim de examinar os diferentes insertos revestidos para condições reais de corte. Os resultados obtidos mostraram que o revestimento de Al_2O_3 apresentou uma ligeira diminuição do fluxo de calor na ferramenta, enquanto que os outros revestimentos utilizados não modificaram o campo térmico significativamente. Coelho et al (2007) apresentaram resultados dos desgastes em insertos de nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN) usando o MEF. Foram utilizadas ferramentas de corte com revestimentos de nitreto de alumínio titânio (TiAlN) e nitreto de cromo alumínio (AlCrN) e sem revestimentos no torneamento do aço AISI 4340. As simulações realizadas indicaram que a temperatura na interface cavaco-ferramenta foi de aproximadamente 800 (°C) na ausência de desgaste de flanco, independentemente de revestimento.

O objetivo do presente trabalho é fazer uma análise numérica da influência térmica do revestimento em ferramentas de corte durante o processo de corte. O objetivo dessa análise é verificar os parâmetros térmicos e geométricos da ferramenta revestida, visando uma distribuição da temperatura de maneira mais adequada na região de corte. Para a obtenção do campo de temperatura na ferramenta de corte, utiliza-se o pacote comercial ANSYS[®] *Academic Research*, v. 11. Nas simulações do presente trabalho, a ferramenta de corte terá uma única camada de revestimento.

Neste trabalho, quatro casos serão analisados com ferramenta de corte revestidas, utilizando uma única camada de TiN como revestimento, variando sua espessura com 1 (μ m) e 10 (μ m) e dois tipos de fluxos de calor utilizados na interface ferramenta-cavaco. São eles: (1) K10 revestida com TiN de 1 (μ m) de espessura com fluxo de calor $q_1''(t)$, sendo esse uniforme e variável no tempo; (2) K10 com TiN de 1 (μ m) e fluxo de calor $q_2''(t)$, sendo $q_2''(t) = 10 q_1''(t)$; (3) K10 com TiN de 10 (μ m) e com fluxo $q_1''(t)$ e (4) K10 com TiN de 10 (μ m) e com fluxo $q_2''(t)$.

Com isto, serão obtidos os campos de temperaturas nas ferramentas de corte e uma análise numérica da influência térmica deste revestimento será apresentada no presente trabalho.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O modelo térmico de condução de calor e suas regiões para a imposição das condições de contorno em ferramentas tridimensionais com revestimento são apresentados nas Figs. (1a), (1b) e (1c). Nessas figuras são apresentadas a geometria com os domínios computacionais representados por Ω_1 e Ω_2 , respectivamente, os sólidos do revestimento, de altura e , do substrato da ferramenta de corte, de altura H e a interface C entre o revestimento e o substrato. Foi considerado um único tipo de material para a ferramenta de corte, de dimensões 12,7 (mm) x 12,7 (mm) x 4,7 (mm) (L x P x A), com raio R de 0,8 (mm) e região S_2 do fluxo de calor com área aproximadamente de 1,424 (mm²). Os valores da espessura do revestimento adotados foram: $e = 0,010$ (mm) e 0,001 (mm).

A Tabela (1) apresenta as propriedades termo físicas da ferramenta de corte e do revestimento utilizadas nas simulações numéricas do presente trabalho.

Tabela 1. Parâmetros térmicos dos materiais investigados, como dado de entrada, para o substrato da ferramenta e o revestimento na temperatura ambiente.

| Propriedade | Ferramenta de metal duro ISO K10 | Revestimento com TiN |
|--|----------------------------------|----------------------|
| Massa específica ρ (kg m ⁻³) | 14.900 [1] | 4.650 [2] |
| Calor específico C_p (J kg ⁻¹ K ⁻¹) | 200 [3] | 645 [2] |
| Condutividade térmica k (W m ⁻¹ K ⁻¹) | 130 a 25 (°C) [1] | 21 a 100 (°C) [2] |

[1] Engqvist et al (2000); [2] Yen et al (2004); [3] valor adotado no presente trabalho.

As Figuras (2a) e (2b) apresentam uma das malhas utilizadas na simulação numérica formada por elementos hexaédricos. A Fig. (2c) apresenta uma área de contato na interface cavaco-ferramenta típica e utilizada nas simulações numéricas do presente trabalho, de valor aproximado de 1,4245 (mm²). Esta área foi obtida por Carvalho (2005), para

as seguintes condições de corte: velocidade de corte de 209,23 (m/min), avanço de 0,138 (mm/rot) e profundidade de corte de 3,0 (mm).

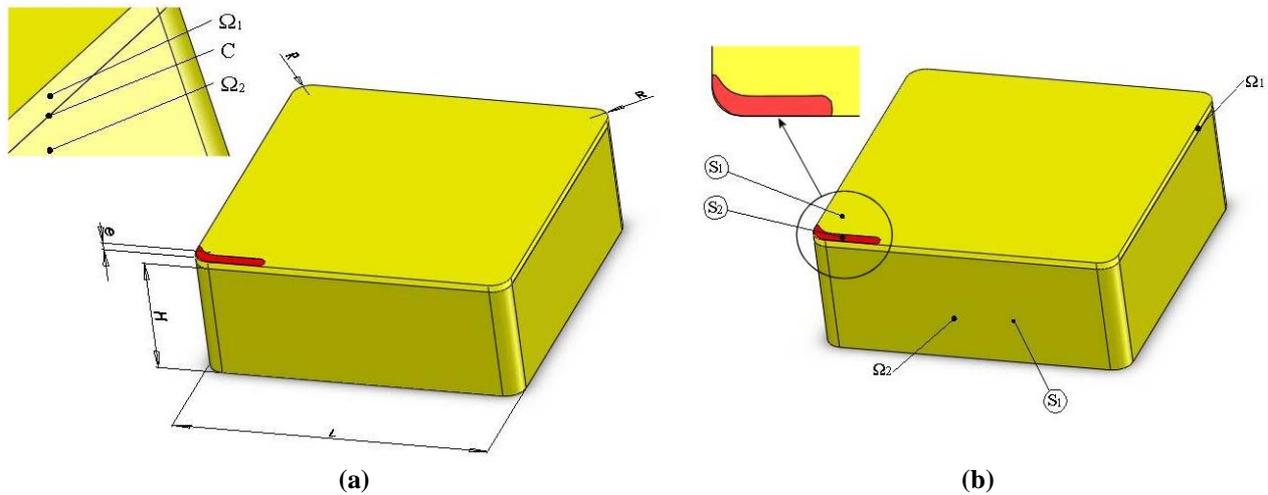


Figura 1. Ferramenta de metal duro com revestimento: detalhe da interface (a) e a região do fluxo (b).

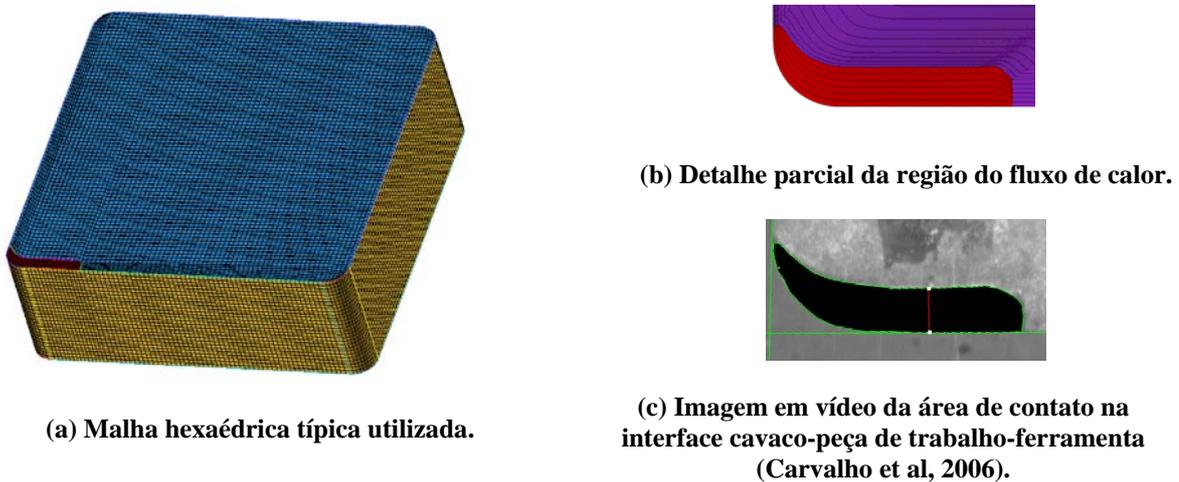


Figura 2. Malha de volumes finitos não estruturada (a), detalhe da malha (b) e imagem da área do fluxo (c).

2.1. Hipóteses do Problema

As seguintes hipóteses foram consideradas na presente análise: - domínio geométrico tridimensional; - regime transiente; - ausência de modelos de radiação; - as propriedades térmicas tais como a massa específica ρ , a condutividade térmica k e o calor específico C_p são independentes da temperatura e elas são uniformes para a camada de revestimento e para o corpo do substrato; - existe um contato térmico perfeito e nenhuma resistência térmica de contato existe entre a camada de revestimento e o corpo do substrato; - 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_∞ são constantes e também conhecidas; - não existe nenhuma geração de energia interna, tanto na camada do revestimento, como no corpo do substrato.

2.2. Equacionamento Geral

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

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

onde μ é a viscosidade dinâmica ($N \cdot s \cdot m^{-2}$), D/Dt é a derivada substancial, ∇^2 é o operador Laplace e Φ é o termo de dissipação viscosa (Huang e Chen, 2000).

Mediante as considerações apresentadas anteriormente no item 2.1, é descrita na forma de derivadas parciais, sendo dada pela equação da difusão de calor tridimensional e transiente, como sendo:

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

sendo $i = 1, 2$, com $i = 1$ para o revestimento de nitreto de titânio TiN e $i = 2$ para o substrato da ferramenta de corte de metal duro.

2.3. Condições Iniciais e Condições de Contorno

A simulação numérica da transferência de calor por condução em ferramentas de corte revestidas do presente trabalho, em um dado processo de usinagem, é realizada na temperatura ambiente, assumindo as temperaturas iniciais do substrato e do revestimento iguais.

O presente modelo térmico está sujeito às seguintes condições iniciais e de contorno:

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

$$T_{t=0} = T_i = T_\infty = 29,5 \text{ (}^\circ\text{C)}, \quad (\text{para } S_1 \text{ e } S_2, \text{ em } \Omega_i, \text{ com } i = 1, 2, \text{ para } t = 0), \quad (3)$$

sendo T_i a temperatura inicial ($^\circ\text{C}$) e T_∞ a temperatura do meio externo ($^\circ\text{C}$).

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 η 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 sólidos do substrato S e do revestimento R , com diferentes condutividades térmicas, estão em contato (superfície em comum aos domínios computacionais Ω_1 e Ω_2), isto é, $k_S(\partial T_S/\partial \eta_S)|_c = k_R(\partial T_R/\partial \eta_R)|_c$.

ii) Condições de contorno:

$$-k \frac{\partial T}{\partial \eta} = q_1''(t), \quad (\text{em } S_2, \text{ em } \Omega_i, \text{ para } t > 0), \quad (4)$$

onde $q_1''(t)$ 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 controlado em laboratório (Carvalho, 2005 e Carvalho et al, 2006) e S_2 representa a superfície na fronteira do domínio Ω_1 , como mostrado na Fig. (1).

$$-k \frac{\partial T}{\partial \eta} = h(T - T_\infty), \quad (\text{em } S_1, \text{ em } \Omega_i, \text{ para } t > 0), \quad (5)$$

onde $\partial T/\partial \eta$ é a derivada ao longo da direção normal da superfície da ferramenta de corte, de domínios Ω_1 e Ω_2 , em contato com o meio ambiente e S_1 representa as superfícies nas fronteiras dos domínios Ω_1 e Ω_2 , conforme a Fig. (1).

$$k_S \left(\frac{\partial T_S}{\partial \eta_S} \right) \Big|_c = k_R \left(\frac{\partial T_R}{\partial \eta_R} \right) \Big|_c, \quad (\text{em } C, \text{ entre } \Omega_1 \text{ e } \Omega_2, \text{ para } t \geq 0), \quad (6)$$

onde se tem condição de contorno, na interface, de fluxo conservativo.

3. MÉTODO NUMÉRICO

A solução das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia em regime não permanente utiliza o Cálculo da Dinâmica de Fluidos pelo Método de Volumes Finitos (MVF) com esquema Euleriano para discretização espacial e temporal do domínio físico, utilizando um número finito de volumes de controle (Versteeg e Malalasekera, 2007; Löhner, 2008).

Por este método, os elementos de volume de controle seguem o esquema Euleriano com malha do tipo não estruturada, Barth e Ohlberger (2004). Por este esquema, as equações de transporte podem ser integradas aplicando o Teorema da Divergência de Gauss, onde a aproximação da integral de superfície é realizada com dois níveis de aproximação: primeiro, as variáveis físicas são integradas em um ou mais pontos nas faces dos volumes de controle; segundo, o valor do integrando no centróide das faces é aproximado em termos dos valores nodais. Esta aproximação

pele valor nodal no centróide nas faces do volume de controle representa a média da grandeza física em todo o volume de controle com precisão de 2ª ordem, Shaw (1992).

Mais detalhes, sobre os conceitos envolvidos pelo MVF, podem ser encontrados 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.

4. VALIDAÇÃO NUMÉRICA

O presente trabalho utiliza os resultados experimentais e numéricos de Carvalho (2005) e Carvalho et al (2006) a fim de fazer uma comparação com os resultados obtidos pelo *software* utilizado. Carvalho (2005) realizou um experimento em condições controladas no qual foi usado uma ferramenta de corte de metal duro ISO K10 de dimensões 12,7 (mm) x 12,7 (mm) x 4,7 (mm) (Fig. 4a). A Figura (3) apresenta o fluxo térmico experimental entregue à ferramenta de corte (Fig. 3a) e as temperaturas medidas por dois termopares (Fig. 3b) para o tempo variando de $t = 0$ a 110 (s). Os termopares foram fixados na ferramenta de corte (Fig. 4a) nas seguintes posições para o termopar T4: $x = 4,3$ (mm); $y = 3,5$ (mm); $z = 4,7$ (mm) e o termopar T5: $x = 3,5$ (mm); $y = 8,9$ (mm); $z = 4,7$ (mm).

Os dados deste experimento são utilizados como dados de entrada (*input*) para a validação numérica do *software* ANSYS® *Academic Research*, v. 11 utilizado no presente trabalho. Nesta validação do modelo numérico, as propriedades térmicas da ferramenta de corte simuladas numericamente foram: $k = 43,1$ ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$), $C_p = 332,94$ ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$) e $\rho = 14.900$ ($kg\ m^{-3}$). Para a comparação entre as temperaturas medidas experimentalmente e as temperaturas simuladas pelo ANSYS® *Academic Research*, v. 11, mediu-se as coordenadas x , y , z de cada um dos termopares T4 e T5 (Fig. 3b).

A Figura (4) apresenta a geometria (Fig. 4a) e a malha (Fig. 4b) geradas no presente trabalho e utilizada na validação numérica do *software* ANSYS® *Academic Research*, v. 11. A malha numérica foi desenvolvida com a ajuda do utilitário ANSYS® ICEM-CFD, sendo este parte integrante do *software* ANSYS® *Academic Research*, v. 11. Verifica-se na Figura (4b) que o *software* ANSYS® ICEM-CFD gerou uma malha estruturada, tridimensional, na qual as regiões em azul e verde representam a ferramenta de corte e a região mais clara, em verde, a área (Fig. 4b) submetida à taxa de transferência de calor obtida experimentalmente por Carvalho (2005) (Fig. 7b). Após um estudo da independência da malha (Tab. 2), adotou-se uma malha tridimensional contendo 15.548 elementos hexaédricos e 17.497 pontos nodais. A área em verde possui dimensões 10,4 (mm) x 10,4 (mm), no plano xy para $z = 0$ (mm). Uma vez gerada a malha, inicia-se o processo de implementação das condições iniciais e de contorno, sendo estas realizadas no utilitário ANSYS® CFX-Pre. Para a solução do problema usa-se o ANSYS® CFX-Solver (ANSYS® *Academic Research*, v. 11.0, 2008). Na preparação do teste numérico, no ANSYS® *Academic Research*, v. 11, foram inseridos pontos de monitoramento das temperaturas durante a simulação numérica no presente trabalho, equivalentes às posições dos termopares T4 e T5 inseridas na ferramenta durante o experimento realizado por Carvalho (2005).

As Figuras (5a) e (5b) apresentam uma comparação entre as temperaturas obtidas, pelos termopares T4 e T5, experimentalmente e numericamente por Carvalho (2005) e as temperaturas obtidas numericamente, no presente trabalho, com o *software* ANSYS® *Academic Research*, v. 11. O maior e o menor desvio encontrado em relação ao caso experimental de Carvalho (2005) foi de, respectivamente, 6,07 % para o termopar T5 e -0,53 % também para o termopar T5. O maior e o menor desvio encontrado em relação ao caso numérico de Carvalho (2005) foi de, respectivamente, -2,18 % para o termopar T5 e 0,25 % também para o termopar T5.

A Tabela (2) apresenta um estudo da influência do refinamento da malha sobre os resultados de temperatura calculada no presente trabalho pelo *software* ANSYS® *Academic Research*, v. 11. A temperatura foi calculada para o ponto $x = 6,35$ (mm), $y = 6,35$ (mm) e $z = 4,7$ (mm) na ferramenta de corte apresentada na Fig. (4a), no intervalo de tempo $t = 0$ a 5 (s). De acordo com este estudo, a malha do Teste 3 já é suficiente para a obtenção dos resultados com uma boa precisão. Para uma malha desenvolvida com um número maior de elementos do número de elementos utilizados no Teste 5, o valor da temperatura se repete, não ocorrendo sua variação com o refinamento da malha.

Tabela 2. Números de pontos nodais (NP) e de elementos (NE) hexaédricos para cada caso teste estudado no presente trabalho.

| Teste | Refinamento (x, y, z) em (mm) | NE | NP | $T_{t=5(s)}$ (°C) |
|-------|-------------------------------|---------|---------|-------------------|
| 1 | 2,0 x 2,0 x 0,8 | 216 | 343 | 382,58 |
| 2 | 1,0 x 1,0 x 0,4 | 1.728 | 2.197 | 382,70 |
| 3 | 0,5 x 0,5 x 0,2 | 14.196 | 16.038 | 380,15 |
| 4 | 0,25 x 0,25 x 0,1 | 122.200 | 129.744 | 381,73 |
| 5 | 0,125 x 0,125 x 0,05 | 958.894 | 988.380 | 380,73 |

Com as simulações numéricas realizadas no presente Caso teste (Fig. 5), verificou-se que os maiores gradientes de temperatura, na ferramenta de corte, ocorreram para o tempo de aproximadamente 67 (s), apresentando valores de temperatura de aproximadamente 79 (°C). A partir do instante 63 (s), iniciou-se o processo de decaimento do fluxo de calor, onde a temperatura começa a cair depois de aproximadamente 4 (s). Como a região em azul da ferramenta (Fig. 4), não se encontra em contato físico com nenhum metal e apenas com o meio ambiente, verificou-se que o mesmo na

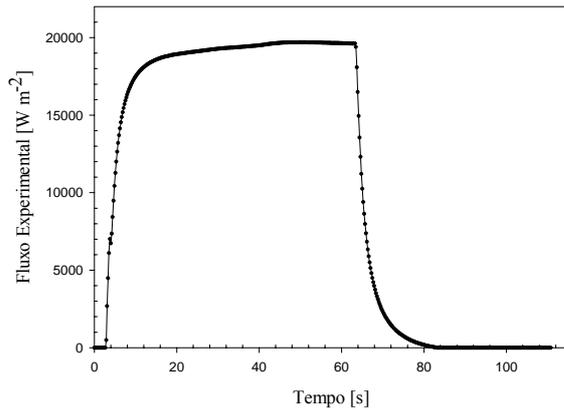


Figura 3a. Fluxo térmico experimental (Carvalho, 2005).

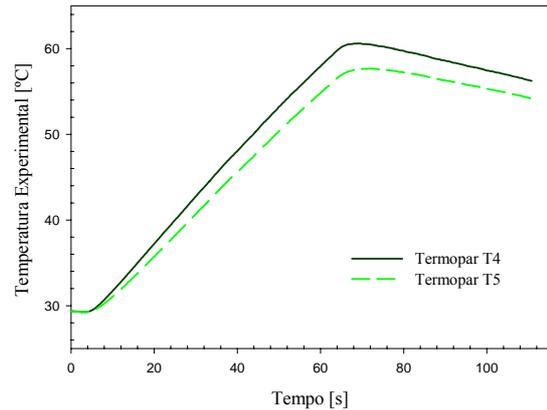
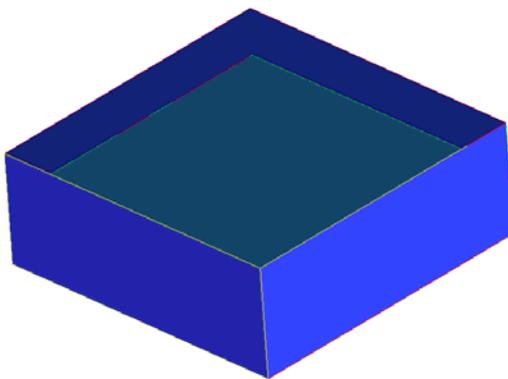
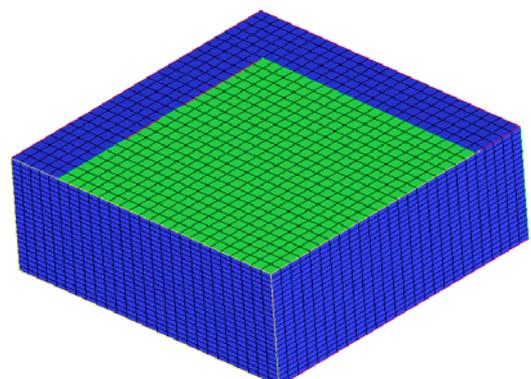


Figura 3b. Temperatura experimental (Carvalho, 2005).

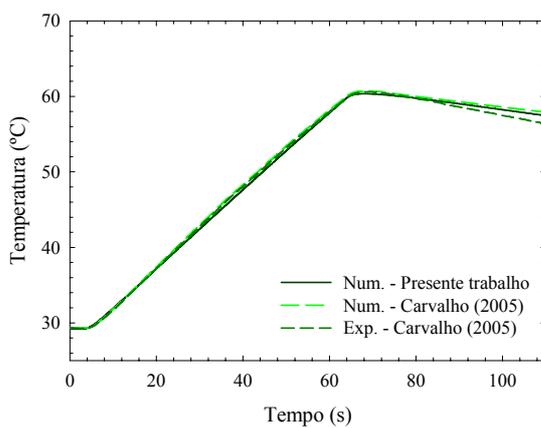


(a)

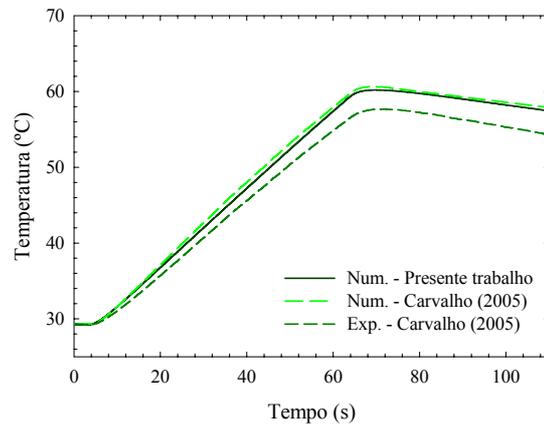


(b)

Figura 4 – Geometria (a) e malha numérica tridimensional (b).



(a)



(b)

Figura 5 – Termopares T4 (a) e T5 (b): comparações entre as temperaturas experimental e numérica (Carvalho, 2005) e a calculada numericamente no presente trabalho.

temperatura ambiente $T_{\infty} = 29,2$ (°C) e considerando $h = 20$ ($W m^{-2} K^{-1}$) (Yen et al, 2003), favoreceu consideravelmente a dissipação da taxa de transferência de calor na ferramenta, fazendo com que a temperatura caísse de aproximadamente 79 (°C) até 71,6 (°C) no instante final 110 (s).

Uma vez realizada a validação do caso teste 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, são concluídos. Assim, no presente trabalho são implementados os modelos numéricos das ferramentas de corte de metal duro com revestimento, variando-se sua

espessura e o valor do fluxo de calor imposto na ferramenta de corte. A taxa de calor $q(t)$ (Fig. 7a), obtida experimentalmente por Carvalho (2005) e utilizada na validação do item 4 do presente trabalho, foi utilizada para a obtenção dos resultados do presente trabalho.

A seguir, são apresentados os resultados obtidos numericamente da simulação térmica de ferramentas de corte de metal duro do tipo K10 com revestimento com TiN. Ressalta-se que a ferramenta de metal duro usada nesta simulação possui uma condutividade térmica diferente da ferramenta usada no item 4.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

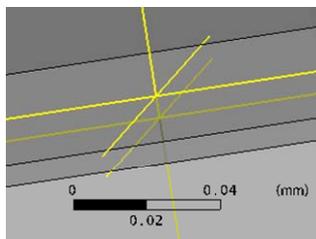
A fim de investigar a distribuição da temperatura para um intervalo de tempo t , foram selecionados quatro casos. O objetivo principal é analisar a influência térmica do fluxo de calor e da variação da espessura do revestimento em ferramentas de corte de metal duro.

A Tabela (3) apresenta os valores obtidos das temperaturas nas interfaces cavaco-ferramenta e revestimento-substrato, para o instante 63 (s), calculada no presente trabalho pelo *software* ANSYS® *Academic Research*, v. 11. A maior e a menor diferença de temperatura calculada foi para, respectivamente, o Caso 4 de 10 (μm) e o Caso 1 de 1 (μm).

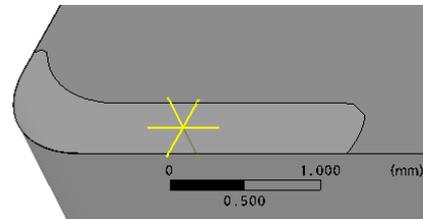
Tabela 3. Resultados numéricos obtidos dos valores das temperaturas no instante 63 (s).

| Caso | Revestimento (μm) | Fluxo de calor variável (W m^{-2}) | Temperatura na interface Cavaco-Ferramenta T_{CF} ($^{\circ}\text{C}$) | Temperatura na interface Revestimento-Substrato T_{RS} ($^{\circ}\text{C}$) | Diferença de temperatura $T_{CF} - T_{RS}$ ($^{\circ}\text{C}$) |
|------|--------------------------------|---|--|---|---|
| 1 | 1 | $q_1''(t)$ | 86,56 | 86,38 | 0,19 |
| 2 | 1 | $q_2''(t)$ | 600,15 | 598,29 | 1,86 |
| 3 | 10 | $q_1''(t)$ | 87,12 | 86,30 | 0,82 |
| 4 | 10 | $q_2''(t)$ | 605,80 | 597,60 | 8,20 |

A Figura (6) apresenta os dois pontos de monitoramento das temperaturas durante as simulações numéricas realizadas no presente trabalho, para coordenadas na superfície do substrato: $x = 1,5$ (mm), $y = 0,25$ (mm) e $z = 0$ (mm) e acima do revestimento: $x = 1,5$ (mm), $y = 0,25$ (mm) e $z = 10$ (μm).



(a) Detalhe sobre os dois pontos de monitoramento da temperatura.



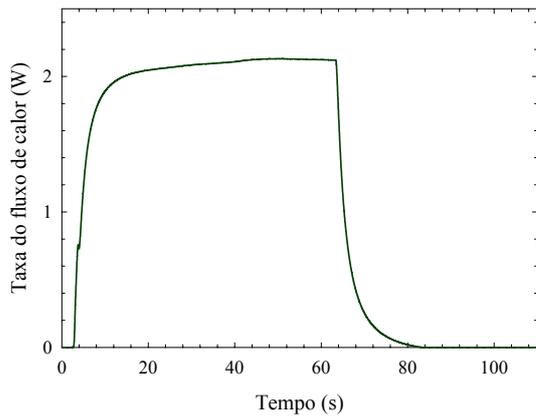
(b) Posição de monitoramento das temperaturas.

Figura 6 – Pontos de monitoramento das temperaturas localizados acima e abaixo da camada de 10 (μm) de revestimento de TiN, utilizando-se o ANSYS® CFX-Pre, incluído no *software* ANSYS® *Academic Research*, v. 11.

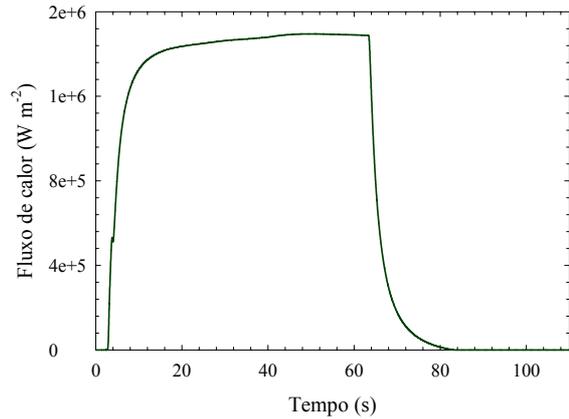
As Figuras (7a) e (7b) apresentam a taxa de calor $q(t)$ (W) e o fluxo de calor $q_1''(t)$ (W m^{-2}), respectivamente, no tempo utilizadas no presente trabalho.

Os números de pontos nodais utilizados para os Casos 1 e 2 foram 501.768 e para os Casos 3 e 4, 622.944. Os números de elementos para os Casos 1 e 2 foram 481.500 e para os Casos 3 e 4 foram de 600.066.

As Figuras (8) e (9) apresentam os resultados das simulações realizadas no presente trabalho com a ferramenta de metal duro K10 e com revestimento de TiN. Observa-se que a presença do revestimento não influenciou na redução da temperatura e conseqüentemente, uma pequena influência como isolamento térmico foi obtida. A maior queda da temperatura aconteceu para o Caso 04 (Fig. 9b e Tab. 3), com espessura de 10 (μm), onde o valor da temperatura diminuiu de 605,80 ($^{\circ}\text{C}$) para 597,60 ($^{\circ}\text{C}$), no instante 63 (s), resultando em um valor de 8,20 ($^{\circ}\text{C}$).

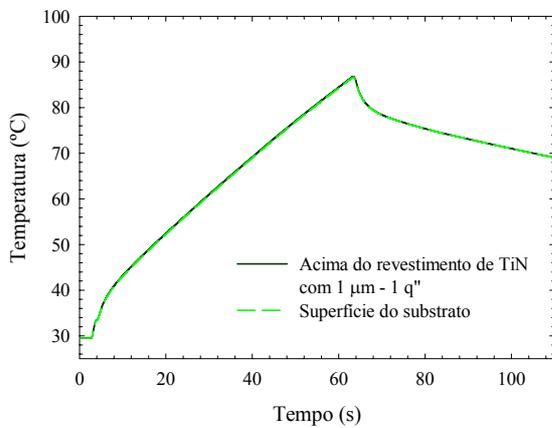


(a) Taxa de calor $q(t)$ (Carvalho, 2005).

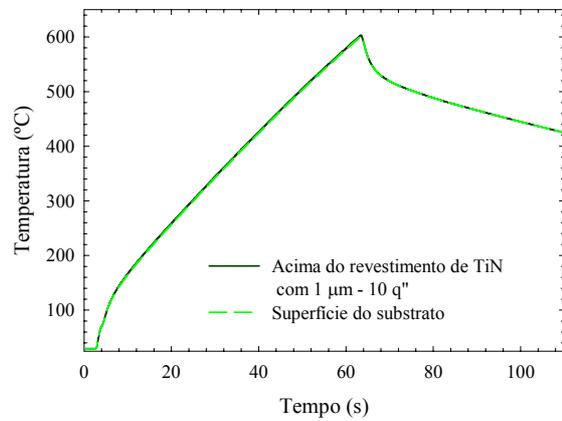


(b) Fluxo de calor $q_1''(t)$.

Figura 7. Taxa de calor e fluxo de calor utilizados no presente trabalho.

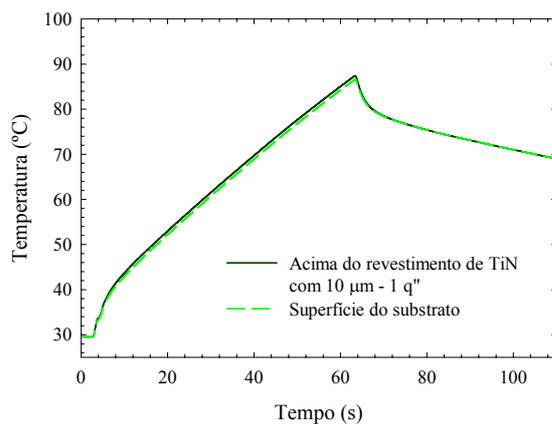


(a) Fluxo de calor $q_1''(t)$.

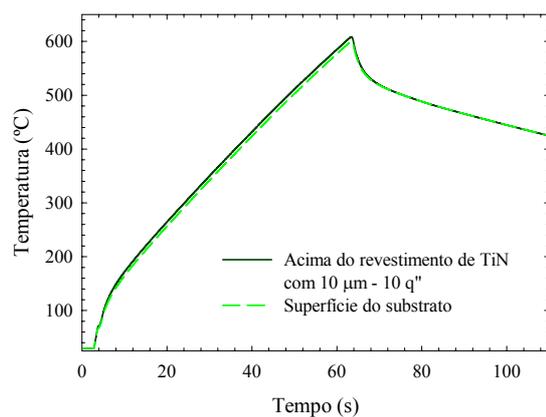


(b) Fluxo de calor $q_2''(t)$.

Figura 8. Casos 01 e 02 – Influência da variação do fluxo de calor sobre a temperatura.



(a) Fluxo de calor $q_1''(t)$.



(b) Fluxo de calor $q_2''(t)$.

Figura 9. Casos 03 e 04 – Influência da variação do fluxo de calor sobre a temperatura.

As Figuras (10a) e (10b) apresentam o campo de temperatura no instante 63 (s), respectivamente, para uma vista superior e inferior, para o Caso 4 com substrato da ferramenta de metal duro K10 e com revestimento de TiN de espessura 10 (μm).

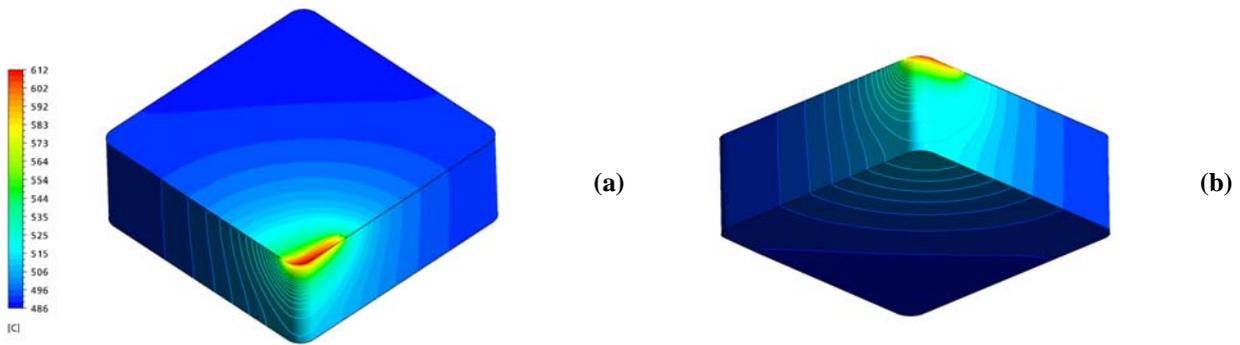


Figura 10 – Vistas superior (a) e inferior (b) dos campos de temperatura na ferramenta de corte para o Caso 4 para 40 isothermas, no instante $t = 63$ (s).

6. CONCLUSÃO

Em função dos resultados numéricos obtidos para o modelo térmico de transferência de calor em ferramentas de metal duro com revestimento, as seguintes conclusões podem ser citadas: 1) Os estudos realizados durante o desenvolvimento do trabalho mostraram que para uma fonte de calor uniforme e variável no tempo, considerando uma superfície de contato constante na ferramenta-cavaco, a temperatura na ferramenta pode ser ligeiramente influenciada pelos revestimentos, quando as propriedades térmicas do revestimento são bastante diferentes das propriedades do substrato, mesmo para revestimento de uma fina espessura $1\ (\mu\text{m})$; 2) Aumentando o fluxo de calor imposto na interface da ferramenta-cavaco em dez vezes, provocou-se um aumento proporcional da diferença de temperaturas medidas nos pontos de monitoramento em aproximadamente nove vezes; 3) O revestimento com TiN depositado sobre a ferramenta de metal duro analisada não apresentou resultados satisfatórios durante um processo de corte contínuo, mostrando uma ligeira diminuição do fluxo de calor para o revestimento com TiN de $10\ (\mu\text{m})$ (Rech et al, 2004; Yen et al, 2004; Kusiak et al, 2005; Rech et al, 2005; Coelho et al, 2007); 4) Para o revestimento com TiN de $1\ (\mu\text{m})$ não houve uma mudança significativa do fluxo de calor que penetra no substrato da ferramenta de metal duro; 5) A análise da transferência de calor em ferramentas de corte de metal duro com revestimentos utilizando ferramentas computacionais se revelou promissora no estudo da vida da ferramenta, na redução de custos em processos de usinagem a seco, diminuindo o tempo gasto para o estudo da influência térmica dos revestimentos e na redução de experimentos com a utilização de ferramentas computacionais comerciais; 6) Uma investigação mais detalhada é necessária a fim de considerar outros tipos de materiais dos revestimentos, com espessuras maiores dos mesmos, considerando a influência da variação da temperatura sobre a condutividade térmica k e o calor específico C_p .

Uma contribuição do trabalho é a melhora que ocorreu em relação ao trabalho de Carvalho (2005), onde uma área mais realista possível do fluxo de calor foi implementada no presente trabalho.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG, CAPES e CNPq pelos apoios financeiros concedidos ao presente trabalho, à empresa Sandvik® Coromant do Brasil S/A pelos suportes técnico e material e à ESSS Engenharia pelo suporte técnico.

8. REFERÊNCIAS

- ANSYS® Academic Research, Release 11.0, 2008, “Help System, Coupled Field Analysis Guide”, ANSYS, Inc.
- Barth, T., and Ohlberger, M., 2004, “Finite Volume Methods: Foundation and Analysis”, Encyclopedia of Computational Mechanics, John Wiley & Sons, Ltd.
- Carvalho, S. R., 2005, “Determinação do Campo de Temperatura em Ferramentas de Corte durante um Processo de Torneamento”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 123p.
- Carvalho, S. R., Lima e Silva, S. M. M., Machado, A. R., and Guimarães, G., 2006, “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.
- Coelho, R. T., Ng, E.-G., and Elbestawi, M. A., 2007, “Tool Wear when Turning Hardened AISI 4340 with Coated PCBN Tools using Finishing Cutting Conditions”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 47, pp. 263-272.
- Engqvist, H., Hogberg, H., Botton, G. A., Ederyd, S., and Axén, N., 2000, “Tribofilm Formation on Cemented Carbides in Dry Sliding Conformal Contact”, Wear, Vol. 239, pp. 219-228.
- Grzesik, W., 2003, “A Computational Approach to Evaluate Temperature and Heat Partition in Machining with Multiplayer Coated Tools”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, pp. 1311-1317.
- Huang, C.-H., and Chen, W.-C., 2000, “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.

- Kusiak, A., Battaglia, J. L., and Rech, J., 2005, "Tool Coatings Influence on the Heat Transfer in the Tool during Machining", Surface & Coatings Technology, Vol. 195, pp. 29-40.
- Löhner, R., 2008, "Applied Computational Fluid Dynamics Techniques: An Introduction Based on Finite Element Methods", 2nd Edition, ISBN-10: 047051907X, 544p., Wiley.
- Marusich, T. D., Brand, C. J., and Thiele, J. D., 2002, "A Methodology for Simulation of Chip Breakage in Turning Processes using an Orthogonal Finite Element Model", Proceedings of the Fifth CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operation, West Lafayette, IN, USA, 20-21 May, pp. 139-148.
- Rech, J., Kusiak, A., and Battaglia, J. L., 2004, "Tribological and Thermal Functions of Cutting Tool Coatings", Surface & Coatings Technology, Vol. 186, pp. 364-371.
- Rech, J., Battaglia, J. L., and Moisan, A., 2005, "Thermal Influence of Cutting Tool Coatings", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 159, pp. 119-124.
- Shaw, C. T., 1992, "Using Computational Fluid Dynamics - An Introduction to the Practical Aspects of using CFD", Prentice Hall Publications.
- Versteeg, H., and Malalasekera, W., 2007, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method", 2nd Edition, ISBN-10: 0131274988, 520p., Prentice Hall.
- Yen, Y. C., Jain, A., Chigurupati, P., Wu, W. T., and Altan, T., 2003, "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, ON, Canada, 20 May, pp. 119-130.
- Yen, Y. C., Jain, A., Chigurupati, P., Wu, W. T., and Altan, T., 2004, "Computer Simulation of Orthogonal Cutting using a Tool with Multiple Coatings", Machining Science and Technology, Vol. 8, pp. 305-326.

9. DIREITOS AUTORAIS

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

THERMAL ANALYSIS IN COATED CEMENTED CARBIDE TOOLS

Rogério Fernandes Brito¹
rogbrito@unifei.edu.br

Solidônio Rodrigues de Carvalho
College of Mechanical Engineering – FEMEC, Federal University of Uberlândia – UFU, Santa Mônica campus, João Naves de Ávila Avenue, #2,160, Santa Mônica District, Zip Code: 38,400-902, Uberlândia, MG, Brazil
sccarvalho@mecanica.ufu.br

Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva¹
metrevel@unifei.edu.br

João Roberto Ferreira¹
¹Federal University of Itajubá - UNIFEI, Mechanical Engineering Institute – IEM, Prof. José Rodrigues Seabra campus, BPS Avenue, #1,303, Zip Code:37,500-903, Itajubá, MG, Brazil
jorofe@unifei.edu.br

Abstract: *The chip formation process may undergo plastic deformation during machining, where a high amount of heat is yielded. Heat is a parameter that plays an important role in the performance and lifespan of the tool. To improve the performance of the tool, several types of coatings are applied to its surface. These coatings are often ceramic materials that provide minor wear, with thermal isolation features. The temperature determination during the cutting is one of the most important factors in the study of the lifespan of tools because it enables the analysis and understanding of the wear mechanisms. This present work proposes a study of heat influence in cemented carbide tools considering the variation of the coating thickness. The purpose of this thermal analysis is to investigate the thermal and geometrical parameters involved in the analysis, enabling a better temperature distribution in the cutting zone aiming to increase the lifespan and reduce costs. The titanium nitride coating (TiN) is used with 1 and 10 (µm) in thickness. The numerical methodology in this present work uses a commercial package based on Finite Volume Method which obtains all the variables involved in the simulation at the same time interval. The calculations are carried out under transient regime. Boundary conditions by convection, heat flux besides the thermo physical properties of the tool and coating involved in the numerical analysis are known. To validate the proposed methodology an experiment under controlled conditions is used. The results obtained from the numerical simulation are: cutting tool temperature field and study of the thermal influence of the coating.*

Keywords: *thermal analysis, finite volume method, cemented carbide tool, coating, heat transfer.*