

## COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO NA MICROUSINAGEM DO AÇO AISI 4140: SIMULAÇÃO NUMÉRICA COM VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

*Thermo-mechanical behavior in the micromachining of the AISI 4140: numerical simulation with experimental validation*

**César Maranhão<sup>1</sup>, Leonardo Roberto Silva<sup>2</sup>, João Paulo Davim<sup>3</sup>**

<sup>1,3</sup>Professor do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, Campus Santiago, 3810-193, Aveiro, Portugal

<sup>3</sup>E-mail: pdavim@ua.pt

<sup>2</sup>Professor do Curso de Engenharia de Materiais do CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Avenida Amazonas, 5253, Nova Suíça, CEP: 30.421-169, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, Tel. (31) 3319-7155, Fax (31) 3319-7157

E-mail: lrsilva@deii.cefetmg.br

### RESUMO

Na última década, diversas pesquisas demonstraram como o *software* de elementos finitos pode ser usado para prever a formação do cavaco, as forças de corte, a temperatura, o desgaste da ferramenta, as tensões residuais na peça e outros parâmetros importantes na usinagem. Este artigo apresenta simulação usando FEM (*Finite Element Method*) com validação experimental no microtorneamento ortogonal do aço AISI 4140. Simulações de usinagem utilizando o *software* de FEM *AdvantEdge*® foram aplicadas para prever as forças de corte e de avanço, tensões de *von Mises*, tensão máxima de corte, deformação plástica, taxa de deformação e a distribuição de temperatura de corte. O trabalho visa avaliar a evolução das variáveis citadas em função do avanço utilizando ferramentas de metal duro sem revestimento. O corte ortogonal foi validado comparando as forças de corte obtidas experimentalmente com os resultados simulados. Também foi realizada uma previsão da temperatura de corte, deformação plástica e taxa de deformação plástica durante a usinagem de aço AISI 4140. A combinação da técnica de elementos finitos com medições reais de teste de corte permite melhorar e aperfeiçoar as condições de usinagem. Os resultados experimentais e simulados mostraram valores próximos no que respeita a força de corte.

**Palavras-chave:** Aço AISI 4140; FEM; Simulação de usinagem; Temperatura de corte; Microusinagem.

### ABSTRACT

In the last decade, various researches has shown how the finite element software can be used to predict the chip formation, cutting forces, temperature, tool wear, residual stresses in workpiece and other important parameters in machining. This article presents simulation using FEM (Finite Element Method) with experimental validation in orthogonal microturning of AISI 4140 steel. Machining simulation using FEM *AdvantEdge*® were applied to predict the cutting and thrust forces, von Mises stress, maximum cutting stress, plastic deformation, deformation rate and cutting temperature distribution. The work aims to evaluate the evolution of these variables as a function of feed rate using uncoated carbide tools. The orthogonal cutting was validated by comparing the cutting forces obtained experimentally with simulated results. Predictions of cutting temperature, plastic deformation and deformation rate during the machining of AISI 4140 steel were also obtained. The combination of finite element technique with actual measurements of cutting test allows to improve and to optimize the machining conditions. Experimental and simulated results showed close values as regards the cutting force.

**Keywords:** AISI 4140; Finite Element Method; Machining simulation; Cutting temperature; Micromachining.

### 1 – INTRODUÇÃO

A usinagem é um dos processos de manufatura mais importante na indústria mecânica. Os testes tradicionais de corte fornecem informações úteis sobre um determinado processo, mas não proporcionam, necessariamente, uma compreensão da mecânica de tal processo. Parâmetros como as tensões e a temperatura na ferramenta de corte e no cavaco são difíceis de medir experimentalmente. A simulação em computador pode prever e mostrar esses valores com razoável precisão. A combinação da técnica de elementos finitos com medições reais de teste de corte permite melhorar e aperfeiçoar as condições de usinagem.

A modelagem e a simulação dos processos de manufatura representam um passo importante para a redução de custos e de tempo de produção. Um número considerável de investigações tem sido dirigido à predição e medição de forças de corte. A razão para isso reside no

fato das forças de corte geradas durante o corte do metal apresentarem uma influência direta na geração de calor e, por conseguinte, sobre o desgaste da ferramenta, rugosidade e precisão dimensional e geométrica da peça. Devido à complexidade das condições de corte e fatores desconhecidos, cálculos de força de corte teóricos não têm produzido resultados precisos. Assim, a medição experimental das forças de corte torna-se inevitável. Por outro lado, a rugosidade é considerada predominantemente como a característica mais importante de superfícies de engenharia devido a sua influência no desempenho do componente usinado. Comparada com a usinagem convencional, porém, a qualidade de micropeças é muito mais difícil de ser controlada e a qualidade de microcomponentes tornou-se um aspecto pertinente de microusinagem (Wang *et al.*, 2005; Zaman *et al.*, 2006).

O mercado mundial e a importância econômica da tecnologia de microsistemas estão em processo dinâmico

de desenvolvimento, e devem crescer bastante nos próximos anos. A microusinagem está se tornando uma tecnologia de fabricação importante devido à demanda crescente para produtos miniaturizados nos últimos anos. Isto é principalmente conduzido pelas necessidades de maiores reduções em tamanho e peso; melhor eficiência em consumo de energia e a alta portabilidade de aplicações comerciais. O valor de muitos produtos pode ser aumentado substancialmente à medida que seu peso é reduzido. A última década mostrou um interesse sempre crescente em alta precisão e miniaturização em uma larga faixa de atividades industriais. Muitos setores industriais requerem microcomponentes, por exemplo, telecomunicação, automobilístico, tecnologia biomédica e microinteligente. A microusinagem por cisalhamento é capaz de produzir alta precisão dimensional e geométrica, alta qualidade superficial e boa integridade de subsuperfície a razoável baixo custo. Deste modo, processos de usinagem convencionais deveriam ser a primeira escolha entre vários processos industriais. Além disso, processo de usinagem convencional como torneamento, fresamento e retificação já estão bem estabelecidos. Por outro lado, como o avanço e a profundidade de corte são reduzidos, atenção especial deve ser dada à preparação de aresta de corte. Para a usinagem com espessuras mínimas de cavacos, o raio de aresta tem importância decisiva, pois o processo de corte realiza-se quase exclusivamente na área do arredondamento do canto. Contudo, dificuldades devido às reduzidas dimensões da máquina ferramenta ainda estão por resolver e usam-se máquinas ferramenta convencionais para microusinagem (Dornfeld *et al.*, 2006; Weck *et al.*, 1997; Fang *et al.*, 2003; Fang e Liu, 2004; Azizur Rahman *et al.*, 2005).

A maioria da pesquisa experimental relativa à microusinagem e a usinagem de precisão tem sido desenvolvida em máquinas-ferramenta convencionais ou protótipos de máquinas-ferramenta construídas por pesquisadores. As máquinas-ferramentas convencionais usadas para usinagem de precisão melhoraram consideravelmente com respeito à precisão de movimento e capacidade. Em geral, a microusinagem é executada em máquinas-ferramenta de precisão com potência e dimensões típicas de máquinas convencionais, porém, a potência requerida e o tamanho da peça são muito menores no caso da microusinagem. A transferência de conhecimento desenvolvido para operações de macrousinagem para microprocessos é crítica, porém, das experiências apreendidas de macroprocessos provem um valioso recurso para futuras pesquisas em microusinagem (Dornfeld *et al.*, 2006; Chae *et al.*, 2006).

O método por elementos finitos tem sido uma ferramenta muito popular na análise de operações de usinagem, em particular para o estudo do mecanismo de formação de cavacos. As formulações dos elementos finitos são mais fáceis de aplicar do que os métodos analíticos, que tendem a ser complexos e envolvem por vezes longas operações. Neste trabalho é abordada a aplicação do *software* FEM (*Advantedge™*) como meio de previsão do comportamento da usinagem. Constitui um processo complexo que envolve uma variedade de

fenômenos físicos, tais como deformação plástica, atrito, transformações termo mecânicas e os mecanismos de formação de cavacos (Trent e Wright, 2000). Mediante a definição dos parâmetros de corte no *software*, é possível avaliar a usinabilidade de um processo de corte por meio da previsão das forças de corte, da distribuição de temperaturas, do desgaste da ferramenta, das tensões residuais na superfície usinada e da qualidade de superfície. A simulação por elementos finitos são usadas para apoiar ensaios experimentais em diversas áreas.

O sucesso da análise por elementos finitos depende em muito da proximidade dos resultados obtidos por simulação com os experimentais, e para tal é imprescindível a rigorosa definição dos parâmetros de entrada. Sartkulvanich *et al.*, (2005) e Trent e Wright, (2000), afirmaram que os parâmetros mais importantes que influenciam a exatidão das simulações numéricas são, a curva de comportamento material constituinte da peça e o coeficiente de atrito na interface ferramenta cavaco, o critério de fratura e os parâmetros térmicos.

Grzesik *et al.*, (2004) analisaram a variação do gradiente de temperatura usando o método de elementos finitos e experimental no torneamento do aço AISI 1045 com ferramentas de corte revestidas e não revestidas. Quando os resultados computados foram comparados com os valores experimentais selecionados, foi possível verificar a precisão da simulação.

Uma investigação sobre a interface cavaco-ferramenta usando ferramentas de metal duro revestidas e não revestidas no torneamento com alta velocidade na condição de corte a seco no aço AISI 1045, realizada por Iqbal *et al.*, (2007), mostrou que simulações com o método de elementos finitos dependem principalmente o valor do coeficiente de atrito ( $\mu$ ) empregado para obter valores precisos.

Umbrello *et al.*, (2006) simularam e testaram a evolução do coeficiente de transferência de calor para o aço AISI 1045 na interface do ângulo de cisalhamento/ferramenta e propôs, em particular, a lei que ajusta os dados experimentais de simulação.

Davim e Maranhão, (2009) apresentaram em seus experimentos na usinagem com alta velocidade do aço AISI 1045 que a simulação por elementos finitos pode ser usada para determinar a deformação plástica ou a taxa de deformação plástica se uma atenção especial é tomada em consideração ao usar os modelos analíticos. A partir de simulações pode concluir-se que a taxa de deformação plástica e deformação plástica podem ser previstas com boa precisão na usinagem quando da utilização de modelo FEM.

Neste artigo é realizada a simulação numérica usando *software* FEM *AdvantEdge®* na previsão da evolução da forças de corte e de avanço, tensões de von Mises, tensão máxima de corte, deformação plástica, taxa de deformação e a distribuição de temperatura de corte durante o microtorneamento ortogonal do aço AISI 4140, usando ferramentas de corte de metal duro não revestido, em função da velocidade de avanço. Alguns testes são replicados com a definição dos parâmetros de entrada e os seus resultados comparados com os obtidos na

experimentação no que respeita a força de corte. Cabe ressaltar, que os experimentos foram desenvolvidos em um torno CNC convencional.

## 2 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Testes de microtorneamento ortogonal foram realizados para estudar a influência do avanço ( $f$ ) sobre as forças de torneamento (forças de corte e de avanço) no aço de alta

resistência e baixa liga (AISI 4140). A Tabela 1 apresenta a composição química e as propriedades mecânicas do aço AISI 4140.

As ferramentas utilizadas na experimentação foi de metal duro classe ISO K10 sem revestimento e sem quebra cavacos, conforme especificação ISO, com o seguinte código da geometria: DCMW 11T3 04 H13, montada em um porta-ferramenta com geometria SDJCL 2020 K11.

Tabela 1 – Composição química (em %) e propriedades mecânicas do aço AISI 4140

C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Limite de resistência (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza (HB)
0,42	0,65	0,25	1,05	0,20	-	≥ 770	≥ 510	≥ 10	225

Para a experimentação deste trabalho foi utilizado um torno CNC *Kingsbury* MHP 50 com rotação máxima no eixo-árvore de 4.500 RPM e potência do motor de 18 kW sob condição de corte a seco. O porta-ferramenta foi montado em um dinamômetro piezoelétrico *Kistler* modelo 9121 com um amplificador de carga conectado a um computador que foi utilizado para a aquisição das forças de usinagem. O *software Kistler Dynoware* foi usado para aquisição de dados. Devido ao fato que o trabalho experimental foi realizado em um torno CNC convencional, foram realizados testes preliminares para conferir a precisão da máquina-ferramenta. Estes testes indicaram um repetibilidade de  $\pm 1 \mu\text{m}$  no diâmetro.

O *software* de elementos finitos específico para usinagem “*Third Wave Advantedge®*” foi utilizado para análise comparativa da força de corte experimental com a força simulada permitindo assim melhorias e otimização do processo. Com esse *software* é possível determinar parâmetros de usinagem e configurações de ferramentas tornando possível a avaliação das forças de corte e de

avanço, temperatura, pressão, tensões de *von Mises*, tensão de corte máxima, tensões residuais, deformação plástica e velocidade de deformação em função dos parâmetros de usinagem, sem ser necessário despendar custos avultados na experimentação. Os parâmetros de corte utilizados na experimentação e na simulação de microusinagem do aço AISI 4140, assim como as dimensões do corte e o comprimento da peça podem ser encontrados na Tabela 2. Uma análise comparativa entre os valores apresentados na simulação para forças de corte e de avanço e os valores obtidos na experimentação foi calculado por meio da seguinte Equação 1:

$$\text{Desvio}(\%) = \frac{|F_{\text{exp}} - F_{\text{fem}}|}{F_{\text{exp}}} \times 100 \quad (1)$$

Onde,  $F_{\text{exp}}$  é o valor da força de corte experimental e  $F_{\text{fem}}$  é o valor da força de corte simulada.

Tabela 2 – Parâmetros de entrada na experimentação e na simulação com *software*

Peça	
Comprimento da peça	2,5 mm
Altura da peça	2 mm
Ferramenta	
Ângulo de posição	90°
Comprimento da aresta de corte	1 mm
Ângulo de saída	7°
Comprimento da face de saída	1 mm
Raio de aresta	0,02 mm
Material	K10
Processo	
Profundidade de corte	100 $\mu\text{m}$
Comprimento de corte	2,5 mm
Taxa de avanço	[10; 20; 40; 80] $\mu\text{m}/\text{rot}$
Velocidade de corte	100 m/min
Coefficiente de atrito	0,5
Lubrificrefrigeração	Não utilizado
Simulação	
Máximo número de nós	12.000
Máximo tamanho do elemento	0,1 mm
Mínimo tamanho do elemento	0,02 mm

A lei do comportamento do material utilizada pelo software é a lei de Johnson-Cook conforme a Equação 2:

$$\sigma_{eq} = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})) (1 - (\frac{T - T_{room}}{T_m - T_{room}})^m) \quad (2)$$

Onde  $\varepsilon$  é a deformação plástica,  $\dot{\varepsilon}$  é a velocidade de deformação ( $s^{-1}$ ),  $\dot{\varepsilon}_0$  é a velocidade de deformação de referência ( $s^{-1}$ ),  $T$  é a temperatura do material ( $^{\circ}C$ ),  $T_m$  é a temperatura de fusão do material,  $T_{room}$  é a temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ ) e  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $m$  e  $n$  são constantes do material.

Nas simulações foi utilizado o valor “standard” para o coeficiente de atrito entre o cavaco e a ferramenta de 0,5.

### 3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados da simulação por FEM foram comparados com os valores experimentais para verificar se as diferenças

entre as forças de corte eram aceitáveis quando da variação da velocidade de avanço no microtorneamento do aço AISI 4140.

#### 3.1 – Forças de corte e de avanço e temperatura de corte

Na Figura 1 pode-se observar a diferença entre as forças de corte e de avanço e da temperatura de corte ao longo do tempo, para diferentes avanços. Tanto as forças de corte como a temperatura aumentam com o aumento do avanço. Por exemplo, para uma velocidade de avanço de 10  $\mu m/rot$ , a força de corte média é de 6,1 N, a força de avanço cerca de 6,0 N e a temperatura de corte atinge os 450  $^{\circ}C$ . Ao se comparar estes valores com um avanço de 80  $\mu m/rot$ , verifica-se que a força de corte média é de 29,02 N, a força de avanço de 15,3 N e a temperatura atinge os 630  $^{\circ}C$ .

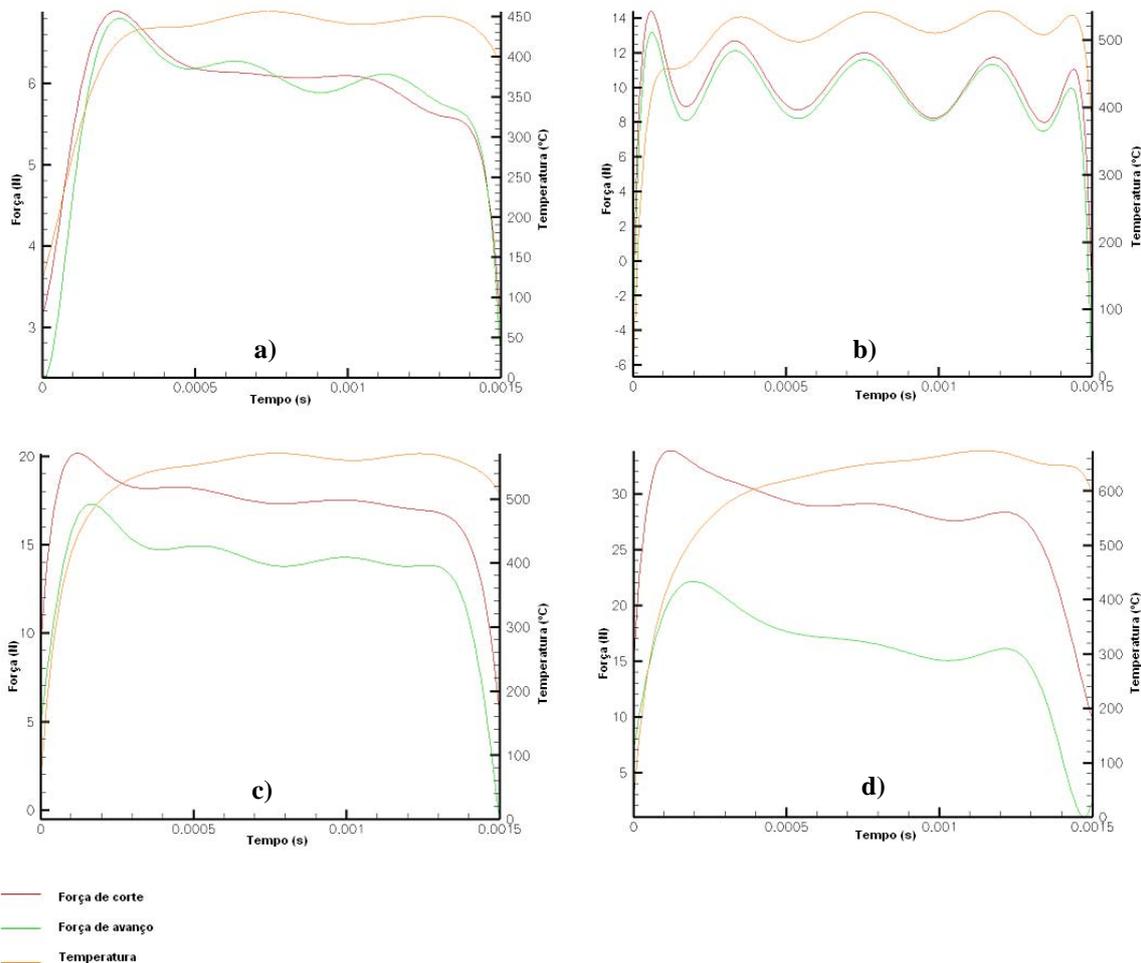


Figura 1 – Evolução na simulação das forças de corte e de avanço e da temperatura de corte ao longo do tempo, para diferentes avanços: a) Avanço de 10  $\mu m/rot$ ; b) avanço de 20  $\mu m/rot$ ; c) Avanço de 40  $\mu m/rot$ ; d) Avanço de 80  $\mu m/rot$

A análise comparativa entre os valores apresentados na simulação para as forças de corte e os valores obtidos na experimentação foi calculada por meio da Equação 1 conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Análise comparativa entre os valores apresentados na simulação e os valores obtidos na experimentação

Avanço $\mu\text{m}/\text{rot}$	Força de corte experimental (N)	Força de corte simulada (N)	Desvio (%)
10	4,23	6,1	44,2
20	7,8	10,52	34,8
40	15,15	16,5	8,9
80	36,27	29,02	19,9

A Figura 2 apresenta os mapas de simulação da temperatura de corte com a variação do avanço, no final do comprimento do corte. A simulação por elementos finitos

oferece um meio auxiliar para determinar a carga térmica e mecânica sem ensaios muito extensos. À medida que o avanço aumenta, há um aumento da temperatura de corte. Por exemplo, para um avanço de  $10 \mu\text{m}/\text{rot}$ , a temperatura de corte atinge os  $420 \text{ }^\circ\text{C}$  e para um avanço de  $80 \mu\text{m}/\text{rot}$ , a temperatura atinge cerca de  $650 \text{ }^\circ\text{C}$ . Esse crescimento progressivo da temperatura pode estar relacionado com a quantidade de energia necessária para o cisalhamento de um volume maior de material, devido ao acréscimo da seção de corte com o aumento do avanço. O calor gerado na zona de cisalhamento secundário é o maior responsável pelas temperaturas da ferramenta de corte na superfície de saída.

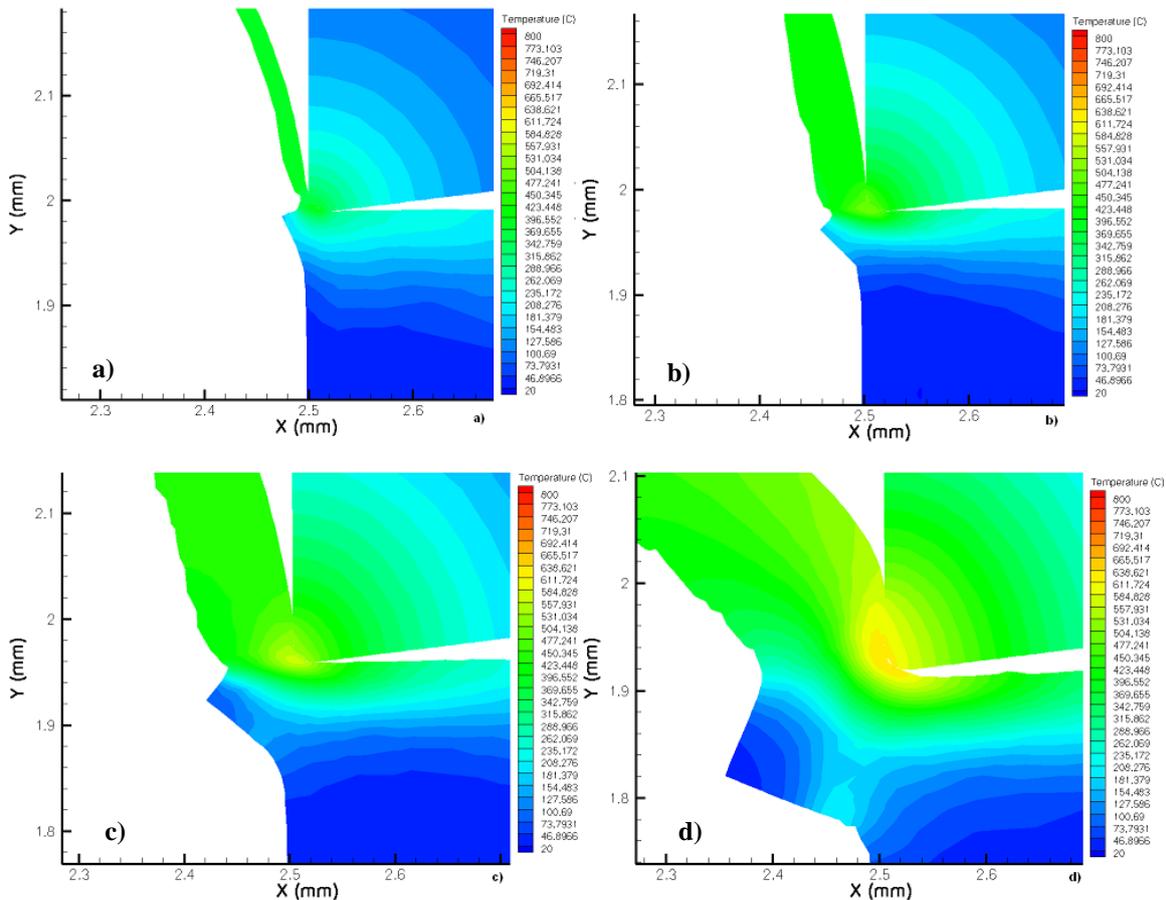


Figura 2 – Distribuição da temperatura de corte para: a) Avanço de  $10 \mu\text{m}/\text{rot}$ ; b) Avanço de  $20 \mu\text{m}/\text{rot}$ ; c) Avanço de  $40 \mu\text{m}/\text{rot}$ ; d) Avanço de  $80 \mu\text{m}/\text{rot}$

### 3.2 – Tensões de *von Mises* e tensão máxima de corte

Na Figura 3 observa-se a distribuição da tensão de *von Mises* na ferramenta, na peça, no cavaco e na rebarba. A tensão de *von Mises* máxima faz-se sentir em mais zonas conforme aumenta o avanço, havendo maior influência da

tensão de *von Mises* na microusinagem com avanço de  $80 \mu\text{m}/\text{rot}$ . O valor máximo atingido da tensão é próximo de  $2100 \text{ MPa}$ .

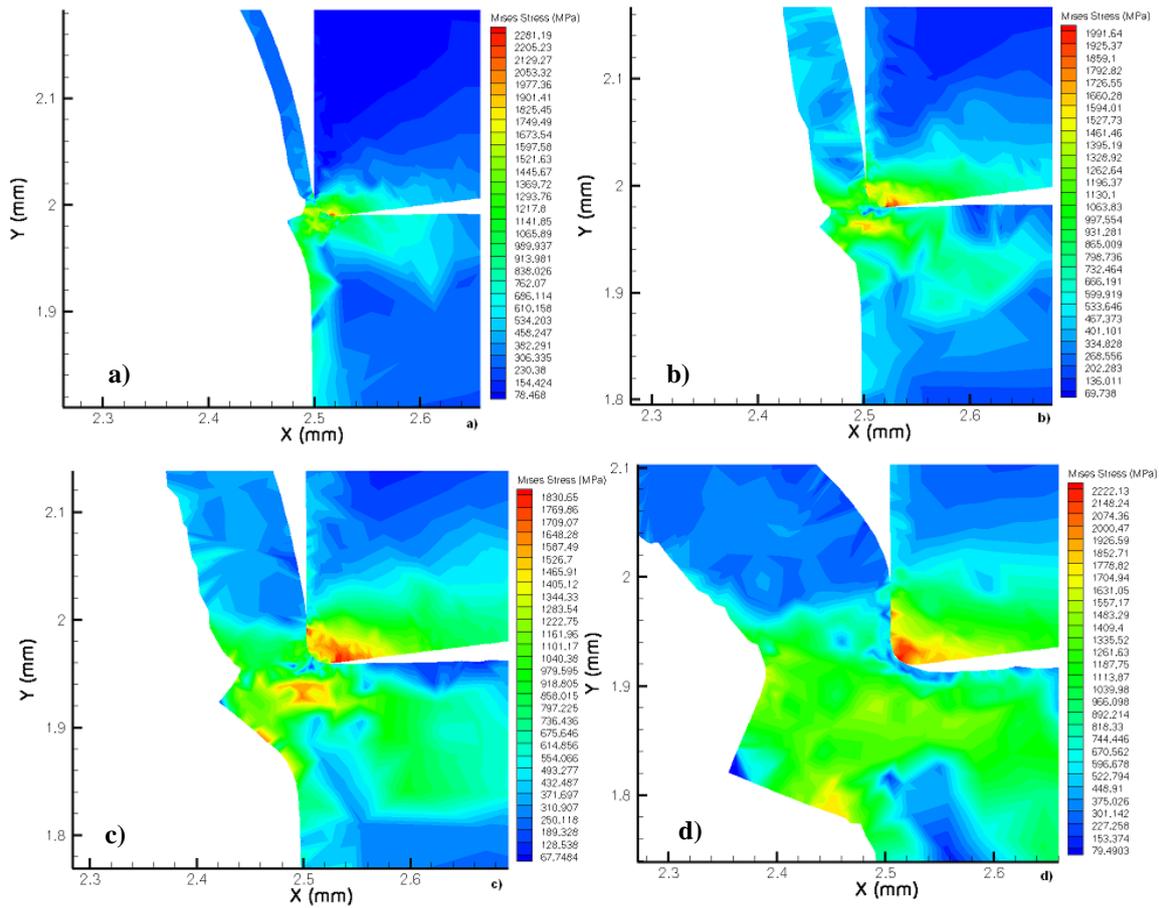


Figura 3 – Distribuição da tensão de von Mises no final do comprimento do corte para: a) Avanço de 10  $\mu\text{m}/\text{rot}$ ; b) Avanço de 20  $\mu\text{m}/\text{rot}$ ; c) Avanço de 40  $\mu\text{m}/\text{rot}$ ; d) Avanço de 80  $\mu\text{m}/\text{rot}$

Na Figura 4 pode-se observar a distribuição de tensão máxima de corte para diferentes avanços. Essa tensão tem um valor máximo para avanço de 80  $\mu\text{m}/\text{rot}$  (e a zona afetada por a tensão também é superior para o avanço,

fazendo-se notar no material, na ferramenta, no cavaco e na rebarba) e o seu valor máximo atinge cerca de 1.200 MPa.

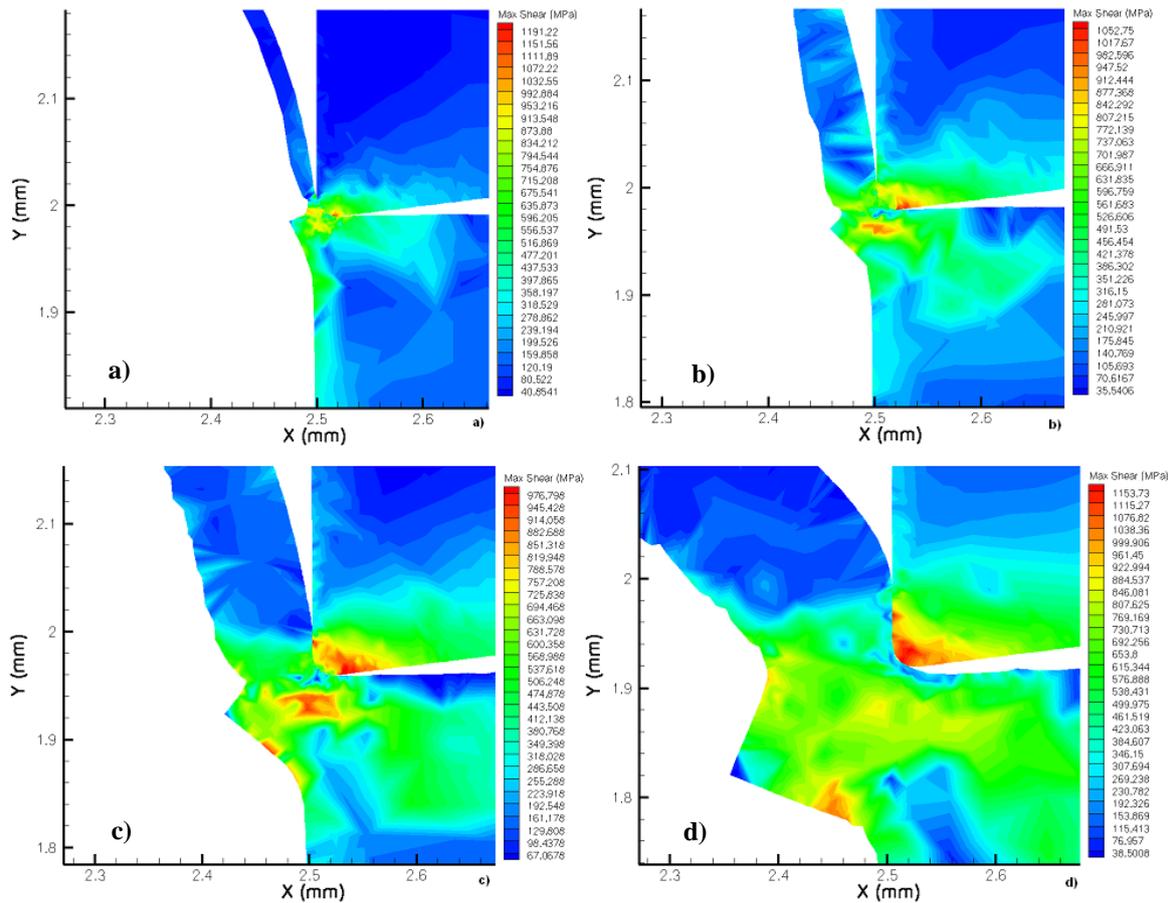


Figura 4 – Distribuição da tensão máxima de corte no final do comprimento do corte para: a) Avanço de 10 μm/rot; b) Avanço de 20 μm/rot; c) Avanço de 40 μm/rot; d) Avanço de 80 μm/rot

### 3.3 – Deformação plástica e velocidade de deformação plástica

A Figura 5 mostra os mapas de simulação da deformação plástica no final do comprimento do corte para diferentes avanços. A deformação máxima ocorre para um avanço de 10 μm/rot e atinge cerca de 8. Os mapas mostram essa deformação plástica acontecer no cavaco e na superfície da

peça com o máximo de pontos na parte externa do cavaco. Esse crescimento progressivo da deformação plástica pode estar relacionado com a quantidade de energia necessária para o cisalhamento de um volume maior de material, devido ao aumento da seção de corte com o acréscimo do avanço.

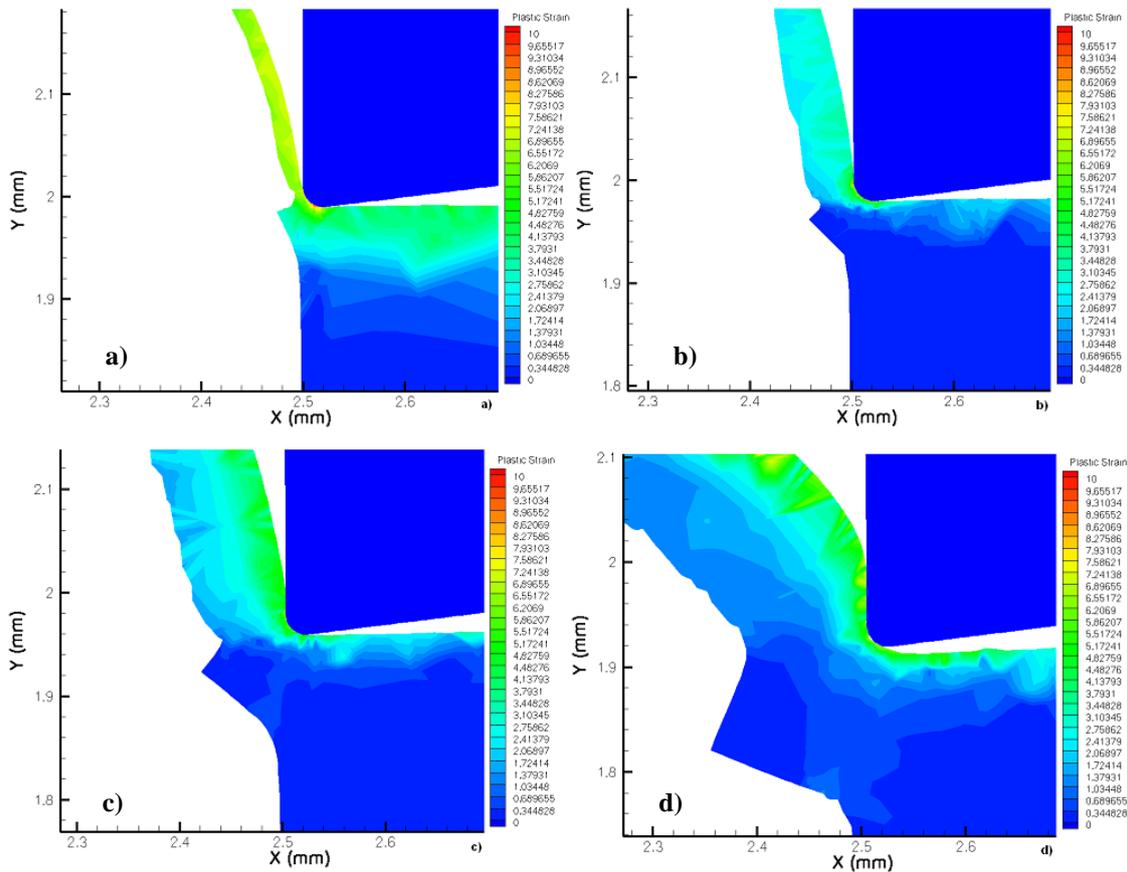


Figura 5 – Distribuição da deformação plástica no final do comprimento do corte para: a) Avanço de 10 µm/rot; b) Avanço de 20 µm/rot; c) Avanço de 40 µm/rot; d) Avanço de 80 µm/rot

Na Figura 6 observam-se os mapas de simulação da velocidade de deformação plástica no final do comprimento do corte, para diferentes avanços. A velocidade de deformação máxima ocorre para um avanço de 80 µm/rot e atinge  $5,8 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ . Esse valor é referente à zona primária de cisalhamento.

Os mapas mostram que a velocidade de deformação plástica aumenta na peça e no raio de ponta da ferramenta de corte e que o seu máximo valor ocorre na área onde acontece a abertura da fissura no plano de cisalhamento. A velocidade de deformação plástica varia com o aumento do avanço. Esse crescimento progressivo da velocidade de deformação plástica também pode estar relacionado com a

quantidade de energia gasta para o cisalhamento de um volume maior de material, devido ao aumento da seção de corte em função da variação do avanço.

Segundo Lee e Yeh, (1997) a temperatura afeta a taxa de deformação, que é controlado principalmente por um mecanismo termicamente ativado. Por outro lado, a deformação plástica em alta taxa gera significativo aquecimento e causa um aumento de temperatura que leva a instabilidade mecânica e a localização de deformação em estreitas lâminas de material (bandas de cisalhamento adiabáticas), que atuam como precursor para a eventual falha do material.

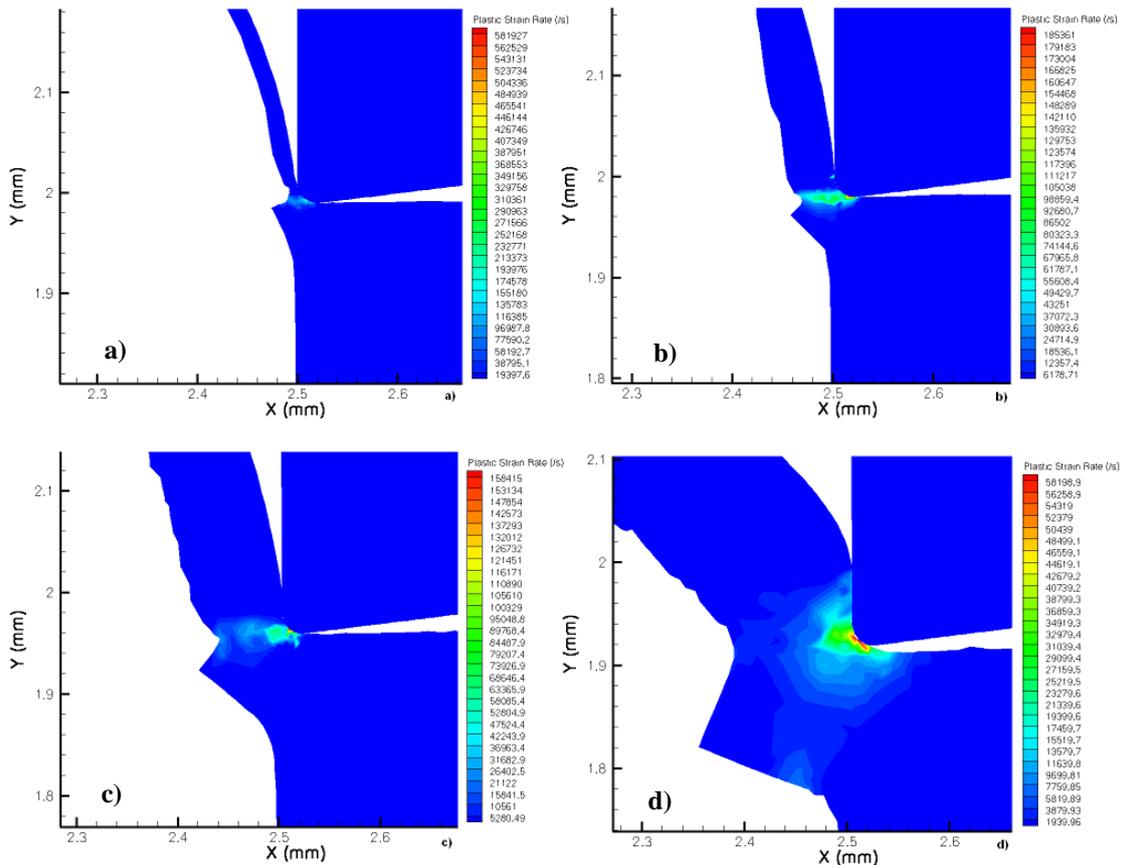


Figura 6 – Distribuição da velocidade de deformação no final do comprimento do corte para: a) Avanço de 10  $\mu\text{m/rot}$ ; b) Avanço de 20  $\mu\text{m/rot}$ ; c) Avanço de 40  $\mu\text{m/rot}$ ; d) Avanço de 80  $\mu\text{m/rot}$

#### 4 – CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais e simulações apresentadas, as seguintes conclusões podem ser extraídas para o microtorneamento ortogonal no aço AISI 4140:

Na microusinagem, foi possível prever um aumento da força de corte e de avanço e da temperatura de corte com o aumento do avanço. Foi também possível prever o comportamento na peça, no cavaco, rebarba e na ferramenta relativamente às tensões de *von Mises* e tensão máxima de corte, deformação e velocidade de deformação (estas aumentam à medida que aumenta o avanço e fazem-se sentir em mais regiões, com o aumento do avanço).

O recurso do *software AdvantEdge®* na simulação numérica FEM, permitiu comprovar a aptidão do *software* na previsão das respostas termo mecânicas na usinagem do aço AISI 4140, para as diferentes condições de corte; Os resultados da força de corte simulada quando comparados com a força experimental produziram erro mínimo de 8,94% (avanço de 40  $\mu\text{m/rev.}$ ) e máximo de 44,2% (10  $\mu\text{m/rev.}$ ).

Os mapas da simulação da temperatura de corte mostram a distribuição da temperatura na interface peça-ferramenta-cavaco com um valor máximo de 650  $^{\circ}\text{C}$ .

Mapas de simulação para deformação plástica mostram que esta deformação é mais evidente no cavaco do que na própria peça. Analisando o cavaco, pode-se observar que a região inferior tem maior valor de deformação quando comparado com a região superior.

Os mapas da velocidade de deformação plástica indicam que os maiores valores concentram-se no plano de cisalhamento primário. Os valores mais altos da velocidade de deformação plástica são para a condição de avanço de 80  $\mu\text{m/rev.}$ , e concentrados perto da ponta da ferramenta (ocorreram onde começa a abertura da fissura no plano de cisalhamento).

#### REFERÊNCIAS

- AZIZUR RAHMAN, M.; RAHMAN, M.; SENTHIL KUMAR, A.; Lim, H. S. CNC microturning: an application to miniaturization. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 45, p. 631-639, 2005.
- CHAE, J.; PARK, S. S.; FREIHEIT, T. Investigation of micro-cutting operations. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 46, p. 313-332, 2006.
- DAVIM, J. P.; MARANHÃO, C. A study of plastic strain and plastic strain rate in machining of steel AISI 1045 using FEM analysis. **Materials and Design**, v. 30, p. 160-165, 2009.
- DORNFELD, D.; MIN, S.; TAKEUCHI, Y., Recent Advances in Mechanical Micromachining. **Annals of the CIRP**, v. 55, n. 2, p. 745-768, 2006.
- FANG, F. Z.; LIU, Y. C. On minimum exit-burr in micro cutting. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, v. 14, p. 984-988, 2004.
- FANG, F. Z.; WU, H.; LIU, X. D.; LIU, Y. C.; NG, S. T. Tool geometry study in micromachining. **Journal of**

**Micromechanics and Microengineering**, v. 13, p. 726-731, 2003.

GRZESIK, W.; BARTOSZUK, M.; NIESLONY, P. Finite Difference Analysis of the Thermal Behaviour of Coated Tools in Orthogonal Cutting of Steels. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 44, p. 1451-1462, 2004.

IQBAL, S. A.; MATIVENGA, P. T.; Sheikh, M. A. Characterization of Machining of AISI 1045 Steel Over a Wide Range of Cutting Speeds. Part 1: investigation of contact phenomena. **Journal Engineering Manufacture**, v. 221, p. 909-916, 2007.

LEE, W.; YEH, G. The plastic deformation behaviour of AISI 4340 alloy steel subjected to high temperature and high strain rate loading conditions. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 71, p. 224-234, 1997.

SARTKULVANICH, P.; ALTAN, T.; GOCMEN, A. Effects of Flow Stress and Friction Models in Finite Element Simulation of Orthogonal Cutting – a Sensitivity Analysis. **Machine Science and Technology**, n. 9, p. 1-26, 2005.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**, ed. 4, p. 446. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000.

UMBRELLO, D.; FILICE, L.; RIZZUTI, S.; MICARI, F. On the Evaluation of the Global Heat Transfer Coefficient in Cutting. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 47, p. 1738-1743, 2006.

WANG, W.; KWEON, S. H.; YANG, S. H. A study on roughness of the micro-end-milled surface produced by a miniaturized machine tool. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 162-163, p. 702-708, 2005.

WECK, M.; FISCHER, S.; VOS, M. Fabrication of microcomponents using ultraprecision machine tools. **Nanotechnology**, v. 8, p. 145-148, 1997.

ZAMAN, M. T.; SENTHIL KUMAR, A.; AZIZUR RAHMAN, M.; SREERAM, S. A three-dimensional analytical cutting force model for micro end milling operation. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 46, p. 353-366, 2006.