



Special Issue on Polymers and Composites

Comportamento termo mecânico no micro-torneamento ortogonal do aço AISI 1045 (Ck45 - DIN): Simulação via elementos finitos e validação experimental

Thermomechanical behavior in orthogonal micro-turning of AISI 1045 steel (Ck45 - DIN): Finite element method simulation and experimental validation

C. Maranhão^a, Leonardo R. Silva^{b,*}, J. Paulo Davim^a

^aUniversity of Aveiro, Campus Santiago, Department of Mechanical Engineering, Aveiro, 3810-193, Portugal

^bFederal Center for Technological Education of Minas Gerais - CEFET/MG, Department of Materials Engineering, Av. Amazonas, 5253, Belo Horizonte, 30.480-000, Brazil

Resumo

Devido à flexibilidade do método de elementos finitos, os processos de usinagem podem ser modelados de forma abrangente. Com o seu uso, é fácil efetuar análises detalhadas que dificilmente seriam obtidas nos métodos de medição experimentais. Este artigo apresenta simulação FEM (Finite Element Method) com validação experimental no micro-torneamento ortogonal do aço AISI 1045 (Ck45 - DIN). 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 da velocidade de 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 micro-usinagem. Os resultados experimentais e simulados mostraram valores muito próximos no que se refere a força de corte.

© 2013 Sociedade Portuguesa de Materiais (SPM). Publicado por Elsevier España, S.L. Todos os direitos reservados.

Palavras chave: aço AISI 1045; método de elementos finitos; simulação de usinagem; força de corte; temperatura de corte; micro-usinagem.

Abstract

Because of the flexibility of the finite element method, machining processes can be modeled in a comprehensive manner. With its use, it is easy to perform detailed analyses that hardly would be obtained in methods of experimental measurement. This article presents FEM (Finite Element Method) simulation with experimental validation in orthogonal micro-turning of AISI 1045 steel (Ck45-DIN). Machining simulation using FEM AdvantEdge® were applied to predict cutting and thrust forces, von Mises stress, maximum stress cutting, 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. Was also held a prediction of cutting temperature, plastic deformation and deformation rate during the micro-machining. Experimental and simulated results showed similar values concerning the cutting force.

© 2013 Sociedade Portuguesa de Materiais (SPM). Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

Keywords: AISI 1045; finite element method; machining simulation; cutting temperature; cutting force; micro-machining.

* Corresponding author.

E-mail address: lrsliva@deii.cefetmg.br (Leonardo R. Silva)

1. Introdução

A competitividade do mercado leva as empresas a buscar, na simulação de processos, uma nova tecnologia para o aperfeiçoamento contínuo da manufatura. Consequentemente, a cada dia os produtos tornam-se mais perfeitos e qualificados, e seus preços mais competitivos e acessíveis, para atender necessidades e exigências de clientes/consumidores. A operação de usinagem representa uma etapa muito versátil e comum de manufatura e é, reconhecidamente, o processo de fabricação mais popular do mundo.

A procura de produtos industriais de reduzidas dimensões tem vindo a aumentar com o passar dos anos. A micro-usinagem é a tecnologia mais aplicada na produção de pequenos componentes e miniaturas. Como a miniaturização de componentes industriais tem vindo a ganhar relevo na evolução tecnológica, a micro-usinagem tem desempenhado um importante papel nos processos de produção. Contudo, dificuldades devido às reduzidas dimensões da máquina ferramenta ainda estão por resolver e usam-se máquinas ferramenta convencionais para micro-usinagem [1].

O mercado mundial e a importância econômica da tecnologia de microssistemas estão em processo dinâmico de desenvolvimento, e devem crescer bastante nos próximos anos. A micro-usinagem 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 micro-componentes, por exemplo, telecomunicação, automobilístico, tecnologia biomédica e micro-inteligente. A micro-usinagem por cisalhamento é capaz de produzir alta precisão dimensional e geométrica, alta qualidade superficial e boa integridade de sub-superfície a razoavelmente 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 micro-usinagem [1-5].

A maioria da pesquisa experimental relativa à micro-usinagem 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 micro-usinagem 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 micro-usinagem. A transferência de conhecimento desenvolvido para operações de macro-usinagem para micro-processos é crítica, porém, as experiências aprendidas de macro-processos provêm um valioso recurso para futuras pesquisas em micro-usinagem [1, 6].

Os recentes avanços na tecnologia de software e de computadores tornaram possível a simulação prática nos processos de usinagem. Um número considerável de investigações tem sido dirigido à predição e medição de forças de corte. A razão para isso reside no fato que forças de corte geradas durante o corte do metal têm 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 tem 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 de usinado. Comparada com a usinagem convencional, porém, a qualidade de micro-peças é muito mais difícil ser controlada e a qualidade de micro-componentes tornou-se um aspecto pertinente de micro-usinagem [7-8].

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. A grande vantagem do uso de softwares FEM na usinagem reside na possibilidade de testar uma grande gama de parâmetros, condições, materiais e ferramentas de corte sem a necessidade de envolver custos associados a ferramentas, materiais e máquinas-ferramenta para além do tempo envolvido. Permitem desta forma diminuir consideravelmente o número de interações de parâmetros a aplicar num processo tornando-o mais eficiente [9].

Neste trabalho é abordada a aplicação do software FEM (*Finite Element Method* - 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 [10]. Mediante a definição dos parâmetros de corte no software, é possível avaliar a usinabilidade de um processo de corte através 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.

O sucesso da análise por elementos finitos depende em muito da proximidade dos seus resultados obtidos com os experimentais, e para tal é imprescindível a rigorosa definição dos parâmetros de entrada. Sartkulvanich *et al.* [11] e Trent e Wright [10], 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.* [12] 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 foram computados e 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.* [13], mostraram que simulações com o método de elementos finitos dependem principalmente o valor do coeficiente de atrito (μ) empregado (tal como um valor de entrada no software) para obter valores precisos.

Umbrello *et al.* [14] simularam e testaram a evolução do coeficiente de transferência de calor global 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 [15] apresentam 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.

Mahnama e Movahhedy [16] apresentaram um modelo dinâmico FEM de formação de cavaco que incluía a flexibilidade da ferramenta e assim pode simular as condições sob as quais se desenvolve a vibração. No entanto, os efeitos do aumento da temperatura no comportamento do material, que é causado pelo atrito e deformação plástica, não foram incluídos nesse trabalho.

List *et al.* [17] realizaram simulações numéricas e abordagens experimentais específicas mutuamente para estabelecer um modelo de elementos finitos no processo de corte ortogonal. Os resultados estão relacionados com a usinagem de aço carbono com ferramenta de metal duro sem revestimento. Resultados satisfatórios são encontrados no que diz respeito a medições de forças de corte, comprimento de contato e temperatura.

Neste artigo é realizada a simulação numérica usando software FEM *AdvantEdge*® na previsão de análise por FEM 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 micro-torneamento ortogonal do aço AISI 1045 (Ck45 - DIN) 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 se refere a força de corte. Cabe ressaltar, que os experimentos foram desenvolvidos em um torno CNC convencional.

2. Materiais e Métodos

Testes de micro-torneamento ortogonal foram realizados para estudar a influência do avanço (f) sobre as forças de torneamento (forças de corte e de

avanço) no aço ao carbono AISI 1045 (Ck45 - DIN). A Tabela 1 apresenta a composição química e as propriedades mecânicas do aço AISI 1045.

Tabela 1. Composição química (em %) e propriedades mecânicas do aço AISI 1045

C	Mn	Si	Limite de resistência (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Along. (%)	Dureza (HB)
0,45	0,65	0,25	600 - 720	≥ 360	≥ 18	205

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

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 este 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 despender custos avultados na experimentação. Os parâmetros de corte utilizados na experimentação e na simulação de micro-usinagem do aço AISI 1045 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 através da seguinte Eq. 1:

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

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

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

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

onde ε 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.

Tabela 2. Parâmetros de entrada na experimentação e na simulação com software

Peça:	
Comprimento peça	2,5 mm
Altura peça	2 mm
Ferramenta:	
Ângulo de ataque	0°
Comprimento da face de ataque	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 μm
Comprimento de corte	2,5 mm
Velocidade de avanço	[10; 20; 40; 80] $\mu m/rot$
Velocidade de corte	100 m/min
Coeficiente de atrito	0,5
Lubri-refrigeração	Não utilizado
Simulação:	
Máximo número de nós	12.000
Máximo tamanho do elemento	0,1 mm
Mínimo tamanho do elemento	0,02 mm

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 corte. 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 uma repetibilidade de $\pm 1 \mu m$ no diâmetro.

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 micro-torneamento do aço AISI 1045 (Ck45). Considerando as variáveis analisadas pode-se afirmar que os resultados de FEM foram satisfatórios com o trabalho experimental.

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 avanço e temperatura de corte em função da variação da velocidade de avanço ao longo do tempo. Tanto as forças de corte como a temperatura aumentam com o aumento da velocidade de avanço. Por exemplo, para uma velocidade de avanço de 10 $\mu\text{m/rot}$, a força de corte é de 4,3 N, a força de avanço cerca de 3,88 N e a temperatura de corte atinge os 320 $^{\circ}\text{C}$. Se compararmos estes valores com uma velocidade de avanço de 80 $\mu\text{m/rot}$, verifica-se que a

força de corte é cerca de 23,2 N, a força de avanço cerca de 12,2 N e a temperatura atinge os 522 $^{\circ}\text{C}$.

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

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

Avanço $\mu\text{m/rot}$	Força de corte experimental (N)	Força de corte simulada (N)	Desvio (%)
10	4,22	4,3	1,89
20	7,62	7,5	1,57
40	11,77	12,01	2,03
80	24,73	23,2	6,18

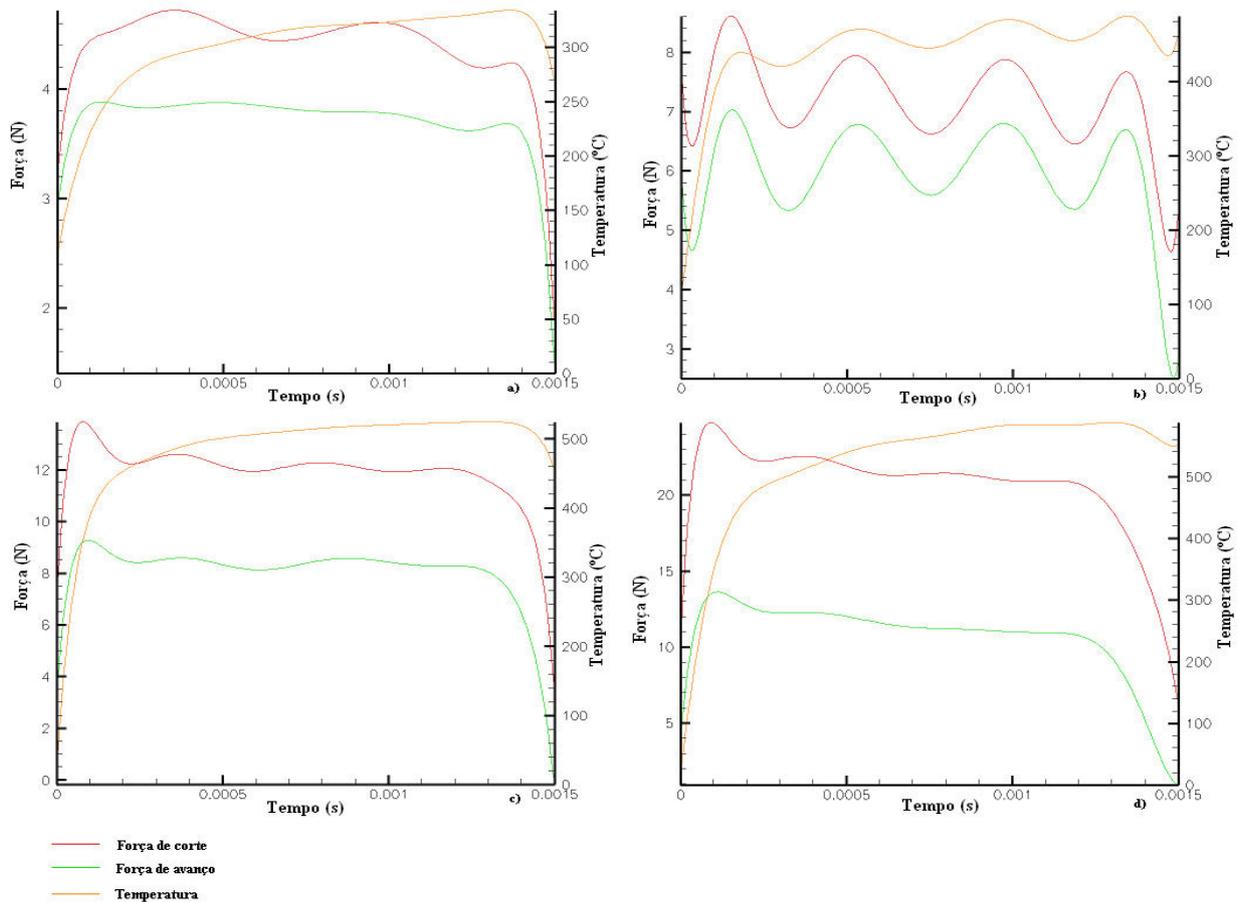


Fig. 1. Evolução das forças de corte e de avanço e da temperatura de corte em função da velocidade de avanço ao longo do tempo: a) velocidade de avanço de 10 $\mu\text{m/rot}$; b) velocidade de avanço de 20 $\mu\text{m/rot}$; c) velocidade de avanço de 40 $\mu\text{m/rot}$; d) velocidade de avanço de 80 $\mu\text{m/rot}$.

A Figura 2 apresenta os mapas de simulação com a evolução da temperatura de corte com a variação da velocidade de avanço no final do comprimento do corte. À medida que a velocidade de avanço aumenta, há um aumento da temperatura de corte. Por exemplo, para uma velocidade de $10 \mu\text{m/rot}$, a temperatura de corte atinge os $320 \text{ }^\circ\text{C}$ e para uma velocidade de avanço de $80 \mu\text{m/rot}$, a temperatura atinge cerca de $500 \text{ }^\circ\text{C}$. 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.

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 a velocidade de avanço, havendo maior influência da tensão de von Mises na micro-usinagem com avanço de $80 \mu\text{m/rot}$. O valor máximo atingido da tensão é próximo de 1400 MPa .

Na Figura 4, pode-se observar a evolução da tensão máxima de corte com a variação da velocidade de avanço. Esta tensão tem um valor máximo para a velocidade de avanço

de $80 \mu\text{m/rot}$ (e a zona afetada por esta tensão também é superior para esta velocidade, fazendo-se notar no material, na ferramenta, no cavaco e na rebarba) e o seu valor máximo atinge cerca de 800 MPa .

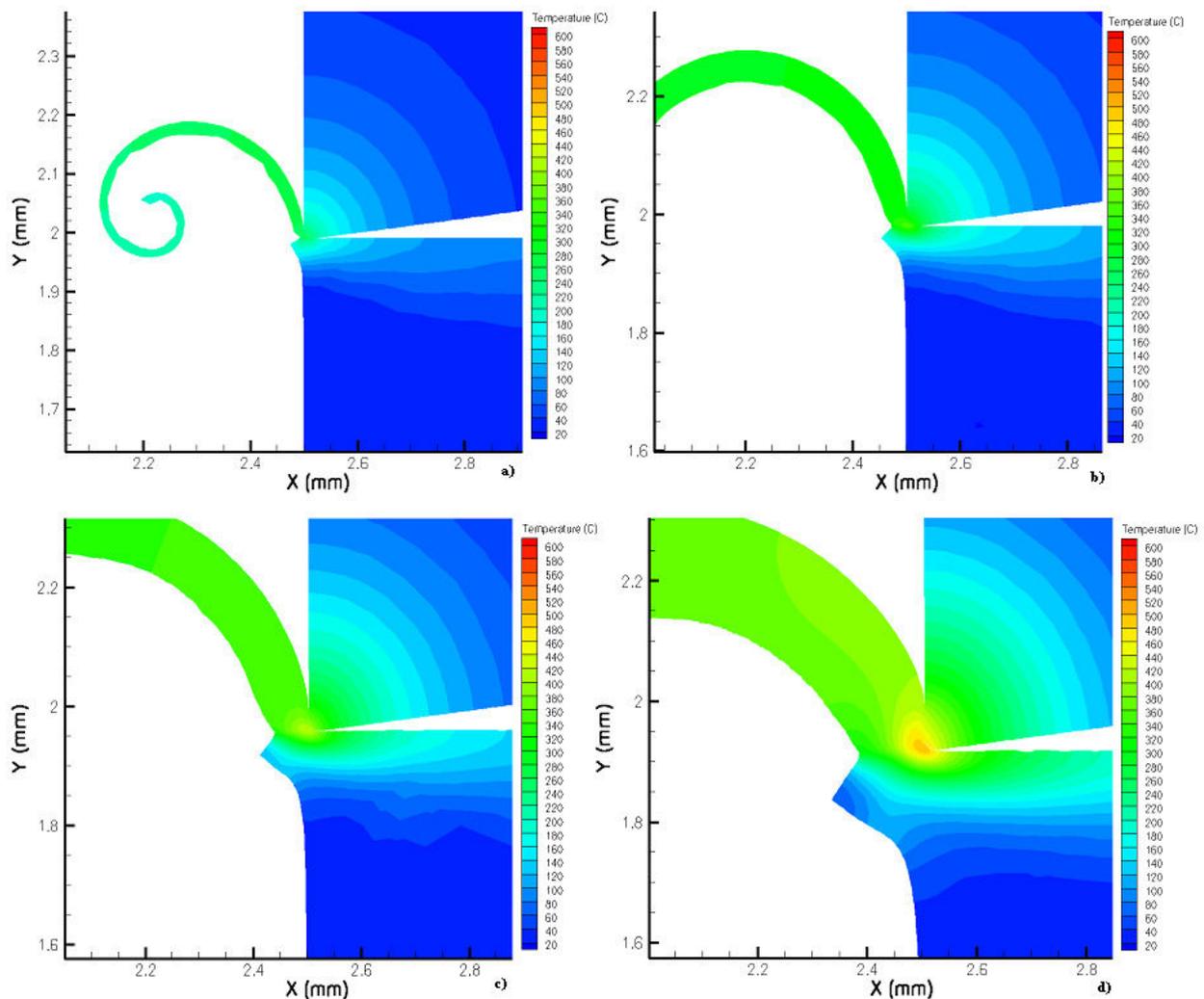


Fig. 2. Evolução temperatura de corte em função da velocidade de avanço: a) velocidade de avanço de $10 \mu\text{m/rot}$; b) velocidade de avanço de $20 \mu\text{m/rot}$; c) velocidade de avanço de $40 \mu\text{m/rot}$; d) velocidade de avanço de $80 \mu\text{m/rot}$.

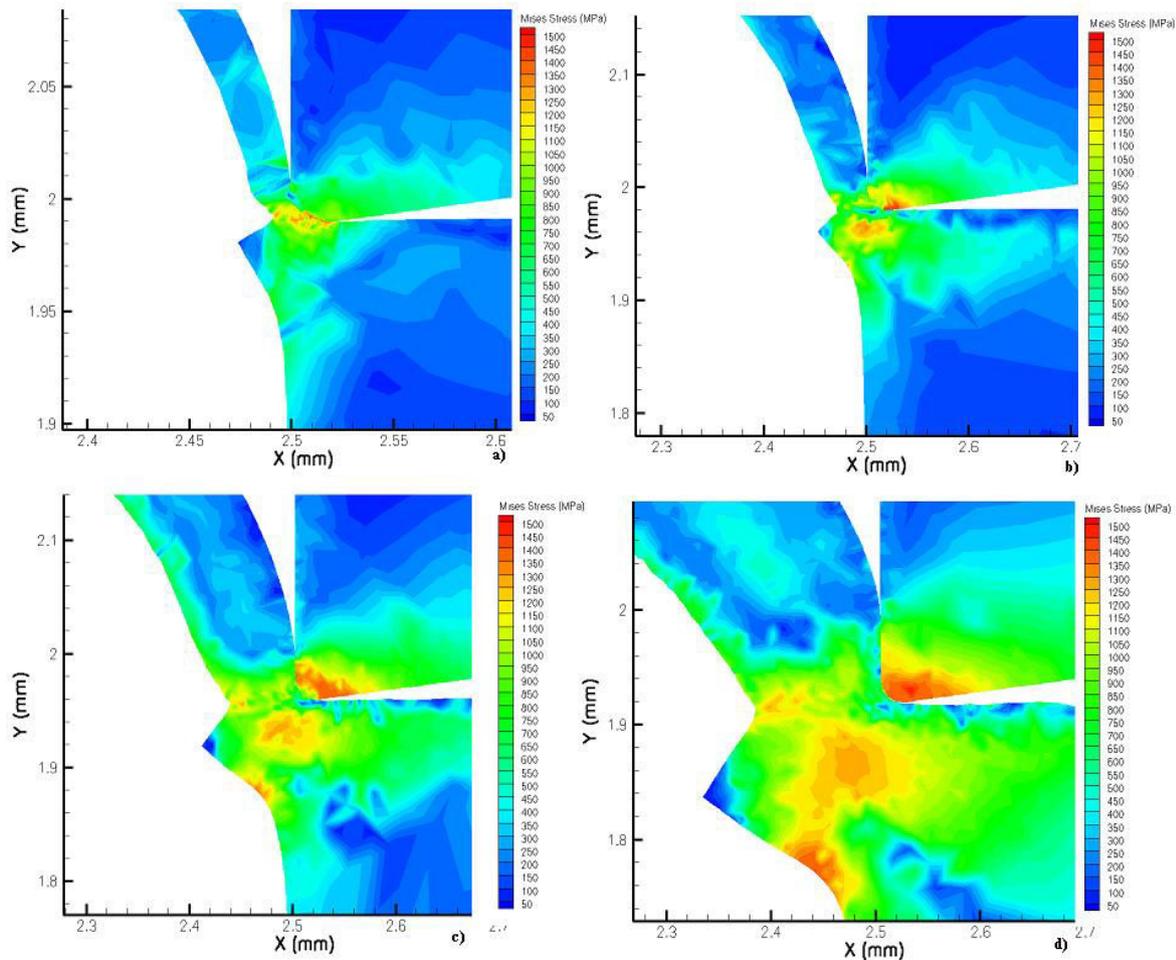


Fig. 3. Evolução tensão de von Mises em função da velocidade de avanço no final do comprimento do corte: a) velocidade de avanço de 10 $\mu\text{m}/\text{rot}$; b) velocidade de avanço de 20 $\mu\text{m}/\text{rot}$; c) velocidade de avanço de 40 $\mu\text{m}/\text{rot}$; d) velocidade de avanço de 80 $\mu\text{m}/\text{rot}$.

3.3. Deformação plástica e velocidade de deformação plástica

A Figura 5 mostra os mapas de simulação com a evolução da deformação plástica com a variação da velocidade de avanço no final do comprimento do corte. A deformação máxima ocorre para uma velocidade de avanço de 10 $\mu\text{m}/\text{rot}$ e atinge cerca de 5,5. 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.

Na Figura 6, pode-se observar os mapas de simulação com a evolução da velocidade de deformação plástica com a variação da velocidade de avanço no final do comprimento do corte. A velocidade de deformação máxima ocorre para uma velocidade de avanço de 80

$\mu\text{m}/\text{rot}$ e atinge cerca de $4,3 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$. Este valor é referente à zona primária de corte.

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 [18] 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 estreita lâminas de material (bandas de cisalhamento adiabáticas), que atuam como precursor para a eventual falha do material.

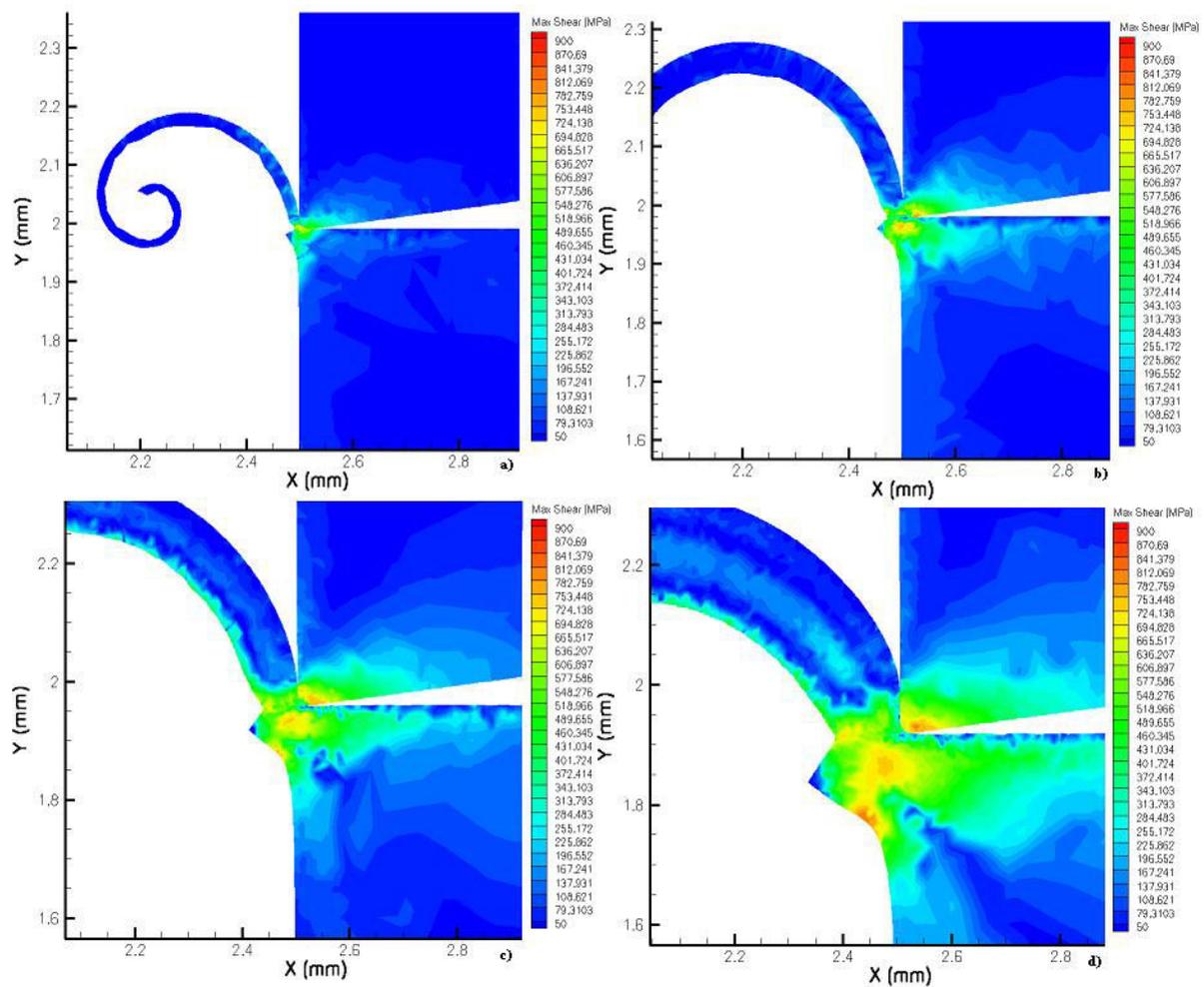


Fig. 4. Evolução da tensão máxima de corte em função da velocidade de avanço no final do comprimento do corte: a) velocidade de avanço de $10\mu\text{m}/\text{rot}$; b) velocidade de avanço de $20\mu\text{m}/\text{rot}$; c) velocidade de avanço de $40\mu\text{m}/\text{rot}$; d) velocidade de avanço de $80\mu\text{m}/\text{rot}$.

Duan *et al.* [19] mostraram que a taxa de deformação plástica aumenta com o aumento da velocidade de corte. Esses autores também concluídos que a dureza da peça pode influenciar a formação de cavaco e o mecanismo de deformação plástica.

4. Conclusões

Com base nos resultados experimentais e simulações apresentadas às seguintes conclusões podem ser extraídas para o micro-torneamento ortogonal no aço AISI 1045 (Ck45 - DIN):

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 1045, para as diferentes condições de corte;

Na micro-usinagem, foi possível prever um aumento da força de corte e de avanço e da temperatura de corte com o aumento da velocidade de 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 a velocidade de avanço e fazem-se sentir em mais zonas com o aumento do avanço);

Os resultados da força de corte simulada quando comparados com a força experimental produziram desvio mínimo de 1,57% (avanço de $20\mu\text{m}/\text{rev.}$) e máximo de 6,18% ($80\mu\text{m}/\text{rev.}$);

Os mapas da simulação da temperatura de corte mostram a evolução da temperatura na interface peça-ferramenta-cavaco com um valor máximo na simulação de $500\text{ }^\circ\text{C}$ para a condição de avanço de $80\mu\text{m}/\text{rot}$;

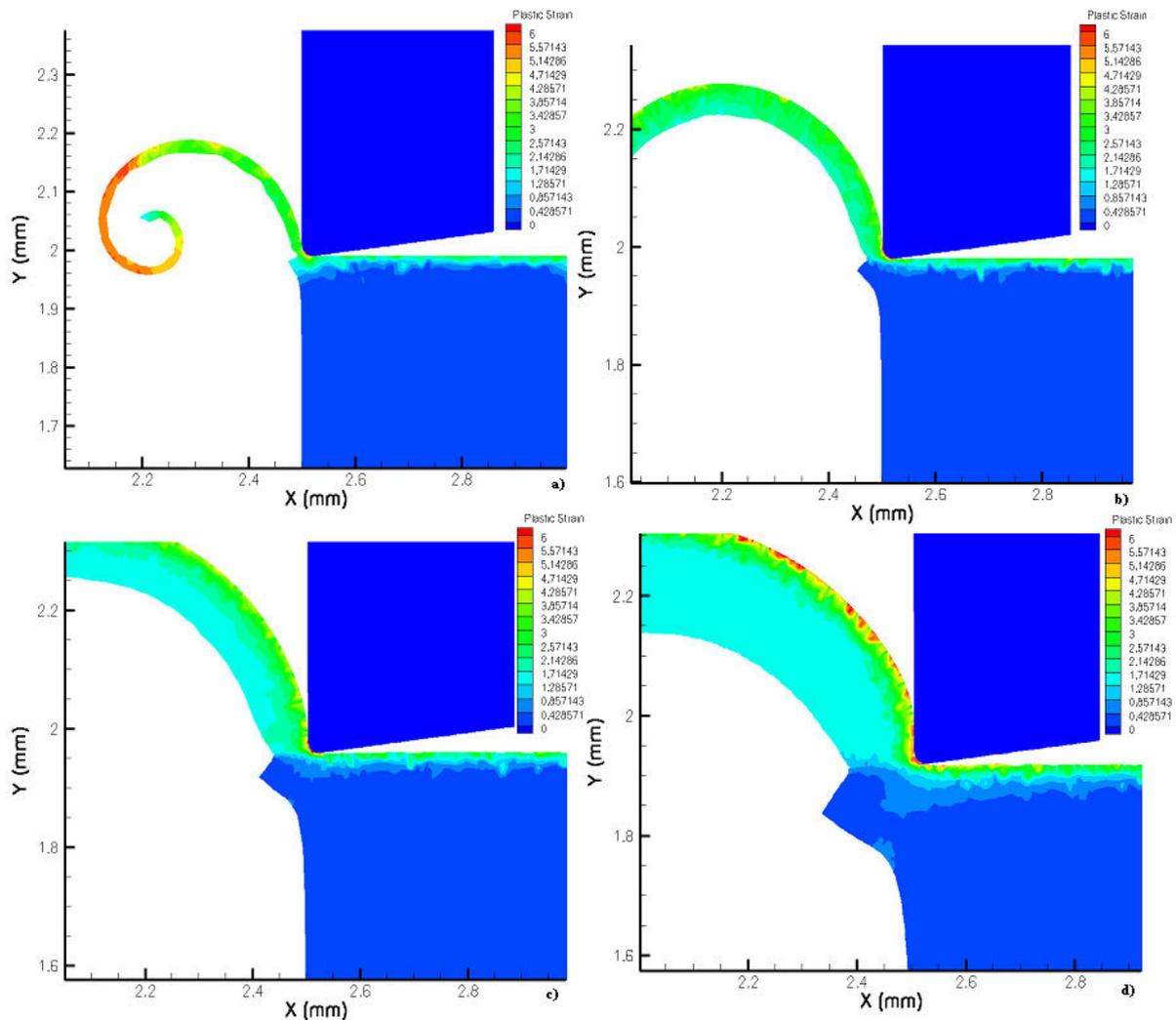


Fig. 5. Evolução da deformação plástica em função da velocidade de avanço no final do comprimento do corte: a) velocidade de avanço de $10\mu\text{m}/\text{rot}$; b) velocidade de avanço de $20\mu\text{m}/\text{rot}$; c) velocidade de avanço de $40\mu\text{m}/\text{rot}$; d) velocidade de avanço de $80\mu\text{m}/\text{rot}$.

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 zona exterior tem maior valor de deformação quando comparado com a zona interior, ou seja, como a zona exterior está sujeita a tração, enquanto que a zona interior é objeto de compressão;

Referências

- [1] D. Dornfeld, S. Min, Y. Takeuchi, *CIRP* **55**, 745 (2006).
- [2] M. Weck, S. Fischer, M. Vos, *Nanotech.* **8**, 145 (1997).
- [3] F.Z. Fang, H. Wu, X.D. Liu, Y.C. Liu, S.T. Ng, *J. Micromech. Microeng.* **13**, 726 (2003).
- [4] F.Z. Fang, Y.C. Liu, *J. Micromech. Microeng.* **14**, 984 (2004).

Os mapas da velocidade de deformação plástica indicam que as deformações plásticas concentram-se no plano de cisalhamento. Os valores mais altos da velocidade de deformação plástica são para a condição de avanço de $10\mu\text{m}/\text{rev.}$, e concentrados perto da ponta da ferramenta (ocorre onde começa a abertura da fissura no plano de cisalhamento).

- [5] M. Azizur, M. Rahman, A.S. Kumar, H.S. Lim, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **45**, 631 (2005).
- [6] J. Chae, S.S. Park, T. Freiheit, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **46**, 313 (2006).
- [7] W. Wang, S.H. Kweon, S.H. Yang, *J. Mat. Proc. Tech.* **162**, 702 (2005).
- [8] M.T. Zaman, A.S. Kumar, A.M. Rahman, S. Sreeram, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **46**, 353 (2006).
- [9] B. Haddag, M. Nouari, *Wear*. Article in Press (2013).

[10] E.M. Trent, P.K. Wright, *Metal Cutting*, 4th ed., Woburn, Butterworth-Heinemann, 2000.

[11] P. Sartkulvanich, T. Altan, A. Gocmen, *Mach. Sci. Tech.* **9**, 1 (2005).

[12] W. Grzesik, M. Bartoszek, P. Nieslony, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **44**, 1451 (2004).

[13] S.A. Iqbal, P.T. Mativenga, M.A. Sheikh, *J. Eng. Manuf.* **221**, 909 (2007).

[14] D. Umbrello, L. Filice, S. Rizzuti, F. Micari, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **47**, 1738 (2006).

[15] J.P. Davim, C. Maranhão, *Mat. Design.* **30**, 160 (2009).

[16] M. Mahnama, M. Movahhedy, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **50**, 611 (2010).

[17] G. List, G. Sutter, A. Bouthiche, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **54**, 1 (2012).

[18] W. Lee, G. Yeh, *J. Mat. Proc. Tech.* **71**, 224 (1997).

[19] C. Duan, M. Wang, J. Pang, G. Li, *J. Mat. Proc. Tech.* **178**, 274 (2006).

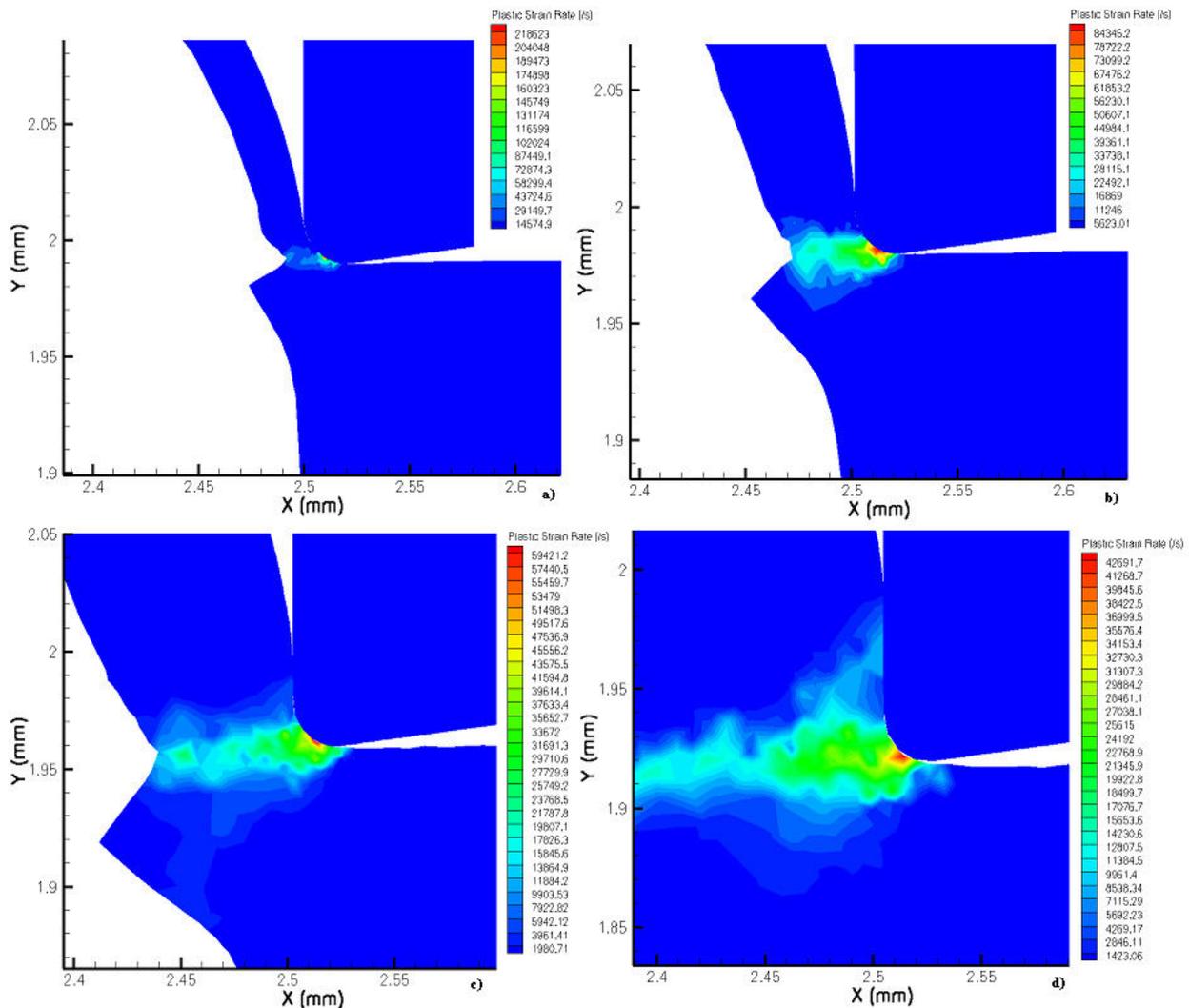


Fig. 6. Evolução da velocidade de deformação em função da velocidade de avanço no final do comprimento do corte: a) velocidade de avanço de 10μm/rot; b) velocidade de avanço de 20μm/rot; c) velocidade de avanço de 40μm/rot; d) velocidade de avanço de 80μm/rot.