



SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS COM VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL NO MICRO-TORNEAMENTO ORTOGONAL DO AÇO AISI D2

CÉSAR MARANHÃO¹, LEONARDO R. SILVA², JOÃO PAULO DAVIM¹

¹Universidade de Aveiro

Departamento de Engenharia Mecânica
Campus Santiago, 3810-193, Aveiro, Portugal

²Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais CEFET/MG
Departamento de Engenharia de Materiais,

Av. Amazonas, 5253, Nova Suíça, CEP: 30.421-169, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

(Recibido 5 de febrero de 2015, para publicación 18 de junio de 2015)

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 por possíveis métodos de medição experimentais. O artigo apresenta simulação por FEM (*Finite Element Method*) com validação experimental no micro-torneamento ortogonal do aço AISI D2. 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 D2. Os resultados experimentais e simulados mostraram valores muito próximos no que diz respeito à força de corte.

Palavras-chave – Simulação de usinagem, aço AISI D2, micro-usinagem.

1. INTRODUÇÃO

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 por 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, processos de usinagem convencionais 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 da 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-ferramenta convencionais usadas para usinagem de precisão melhoraram consideravelmente com respeito à precisão de movimento e capacidade dimensional. 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].

Um número considerável de investigações tem sido dirigida à predição e medição de forças de corte. A razão para isso reside no fato de que forças de corte geradas durante o corte do metal tem 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 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. 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 [9]. 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. Trent e Wright [9] e Sartkulvanich *et al.* [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.* [11] analisou 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.* [12], mostrou 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.* [13] simulou e testou 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 [14] 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.

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,

Tabela 1. Composição química em (%) e propriedades mecânicas do aço AISI D2.

C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Limite de resistência (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza (HB)
1,55	0,50	0,30	12,0	0,80	0,90	710 1260	≥ 320	≥ 16	260

deformação plástica, taxa de deformação e a distribuição de temperatura de corte durante o micro-torneamento ortogonal do aço AISI D2 usando ferramentas de corte de metal duro não revestido em função do 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. 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 para corte a frio (AISI D2). A tabela 1 apresenta a composição química e as propriedades mecânicas do aço AISI D2.

A ferramenta utilizada 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.

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 despendar custos avultados na experimentação. Os parâmetros de corte utilizados na experimentação e na simulação de micro-usinagem do aço AISI D2 podem ser encontrados na tabela 2. Uma análise comparativa entre os valores apresenta-

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

PEÇA	
Comprimento peça	2,5 mm
Altura peça	2 mm
FERRAMENTA	
Ângulo de posição	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 usinagem	100 µm
Comprimento de usinagem	2,5 mm
Avanço	[10; 20; 40; 80] µm/rot
Velocidade de corte	100 m/min
Coefficiente 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

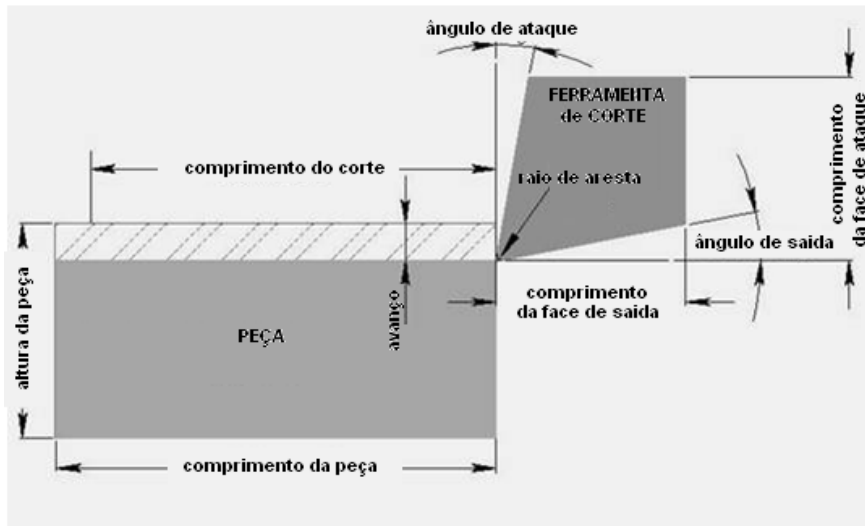


Fig. 1. Dados de entrada do software utilizado (Cortesia *Third Wave Advantedge*®).

dos na simulação para forças de corte e de avanço e os valores obtidos na experimentação foi calculado através da equação 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 Fig. 1 apresenta alguns dos parâmetros de entrada utilizados pelo software *Third Wave Advantedge*®.

O modelo de tensão do material utilizado pelo programa é a equação de Johnson-Cook, que pode ser representada pela equação 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.

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, conforme Fig. 2.

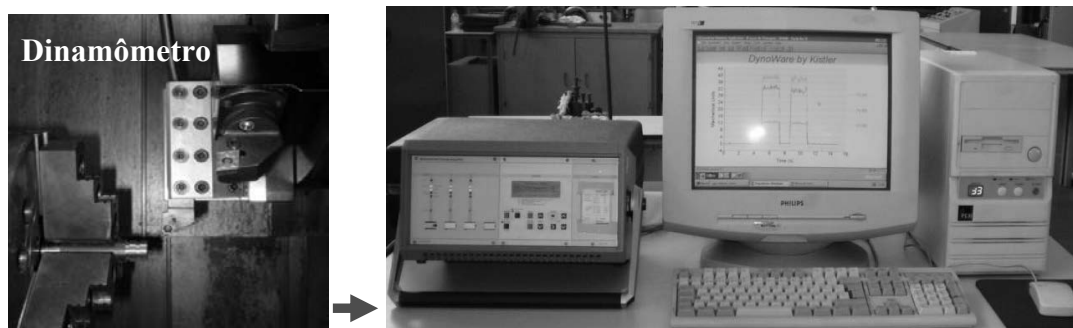


Fig. 2 Sistema de aquisição para medição das forças de corte.

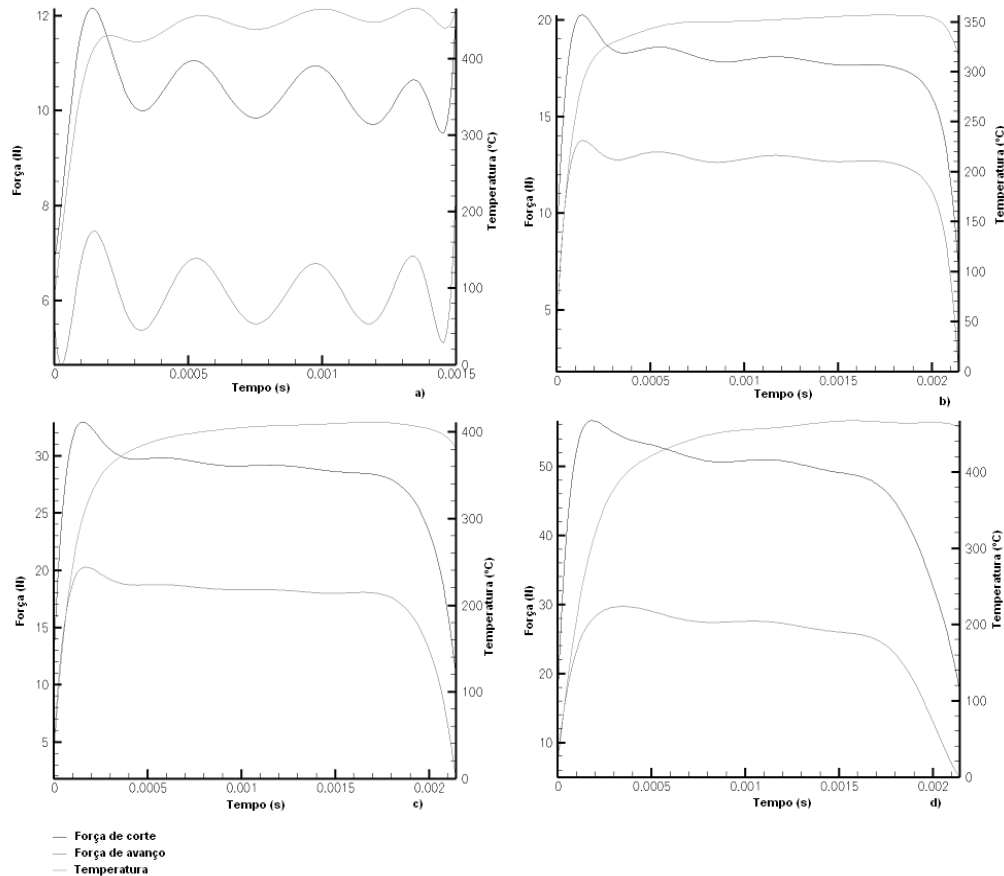


Fig. 3. Evolução das forças de corte e de avanço e da temperatura de corte em função do avanço ao longo do tempo: a) avanço de 10 $\mu\text{m}/\text{rot}$; b) avanço de 20 $\mu\text{m}/\text{rot}$; c) avanço de 40 $\mu\text{m}/\text{rot}$; d) avanço de 80 $\mu\text{m}/\text{rot}$.

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.

3. RESULTADOS

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 do avanço no micro-torneamento do aço AISI D2. 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 Fig. 3, pode-se observar a diferença entre as forças de corte e de avanço e da temperatura de corte, em função da variação do avanço ao longo do tempo.

A Fig. 4 apresenta os mapas de simulação com a evolução da temperatura de corte com a variação do avanço no final do comprimento do corte.

3.2. Tensões de von Mises e tensão máxima de corte de corte

Na Fig. 5, observa-se a distribuição da tensão de von Mises na ferramenta, na peça, no cavaco e na rebarba no final do comprimento do corte.

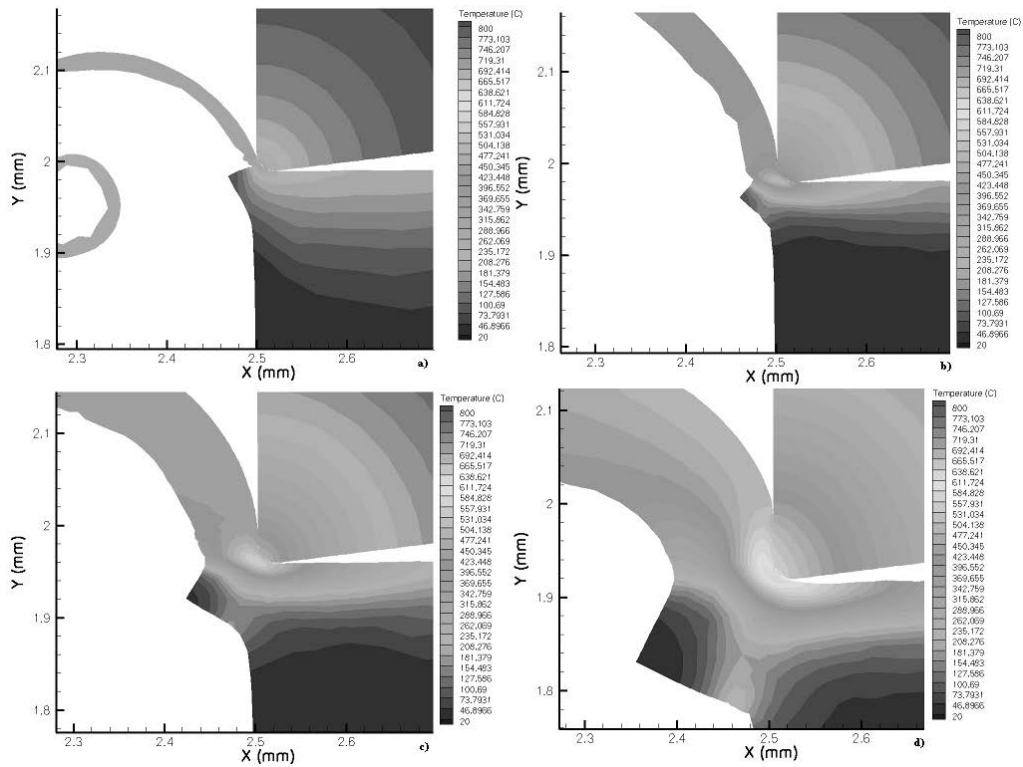


Fig. 4. Evolução da temperatura de corte em função do avanço: a) avanço de 10 μm/rot; b) avanço de 20 μm/rot; c) avanço de 40 μm/rot; d) avanço de 80 μm/rot.

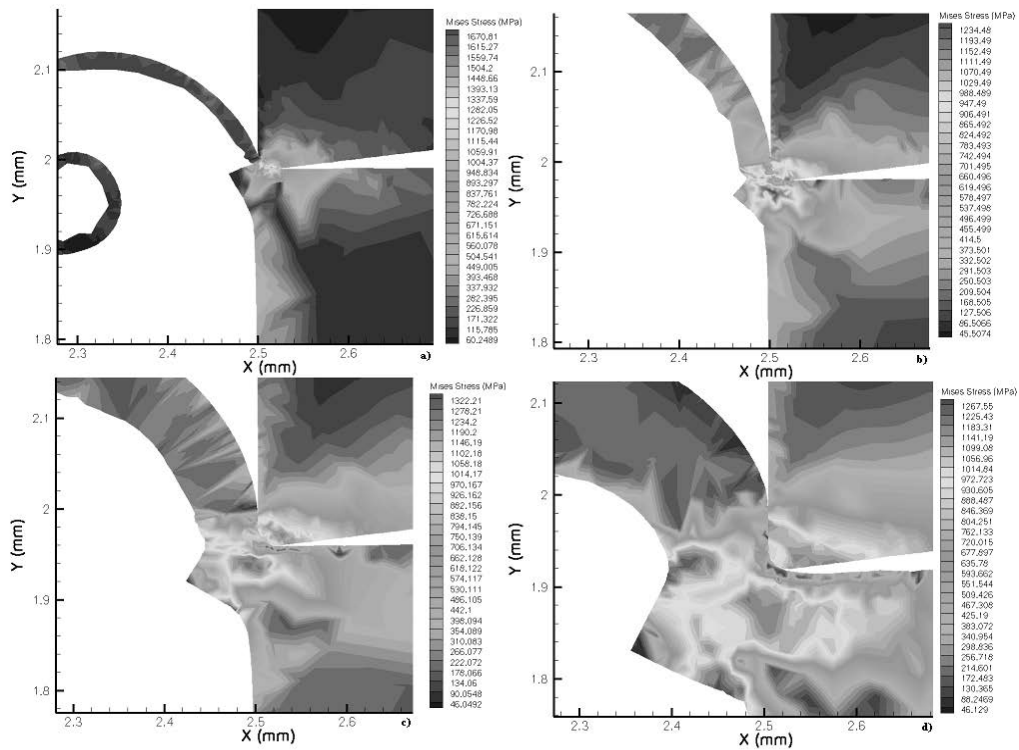


Fig. 5. Evolução da tensão de von Mises em função do avanço no final do comprimento do corte: a) avanço de 10 μm/rot; b) avanço de 20 μm/rot; c) avanço de 40 μm/rot; d) avanço de 80 μm/rot.

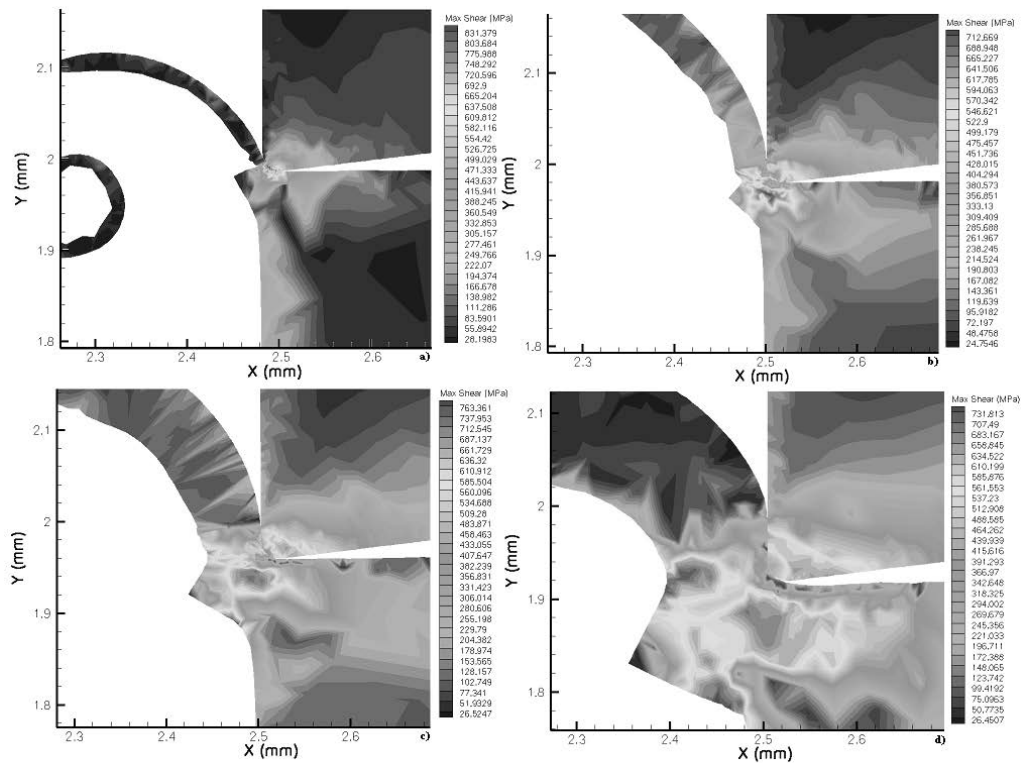


Fig. 6. Evolução da tensão máxima de corte em função do avanço no final do comprimento do corte: a) avanço de 10 $\mu\text{m}/\text{rot}$; b) avanço de 20 $\mu\text{m}/\text{rot}$; c) avanço de 40 $\mu\text{m}/\text{rot}$; d) avanço de 80 $\mu\text{m}/\text{rot}$.

A Fig. 6 apresenta a evolução da tensão máxima de corte com a variação do avanço no final do comprimento do corte.

3.3. Deformação plástica e velocidade de deformação plástica

A Fig. 7 mostra os mapas de simulação com a evolução da deformação plástica com a variação do avanço no final do comprimento do corte.

Na Fig. 8, pode-se observar os mapas de simulação com a evolução da velocidade de deformação plástica com a variação do avanço no final do comprimento do corte.

4. DISCUSSÃO

Os valores de forças de corte e de avanço em função da variação do avanço ao longo do tempo são apresentados na Fig. 3. A evolução da temperatura de corte em função do avanço no final do comprimento do corte é apresentada por mapas de simulação conforme mostra a Figura 4. Tanto as forças de corte como a temperatura aumentam com o aumento do avanço. Por exemplo, para um avanço de 10 $\mu\text{m}/\text{rot}$, a força de corte é de 10,1 N, a força de avanço cerca de 6,1 N e a temperatura de corte atinge os 430°C. Se compararmos estes valores com um avanço de 80 $\mu\text{m}/\text{rot}$, verificamos que a força de corte é cerca de 50 N, a força de avanço cerca de 28 N e a temperatura atinge os 445°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 equação 1 como mostra a tabela 3.

Nota-se que a 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 340°C e para um avanço de 80 $\mu\text{m}/\text{rot}$, a temperatura atinge cerca de 600°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

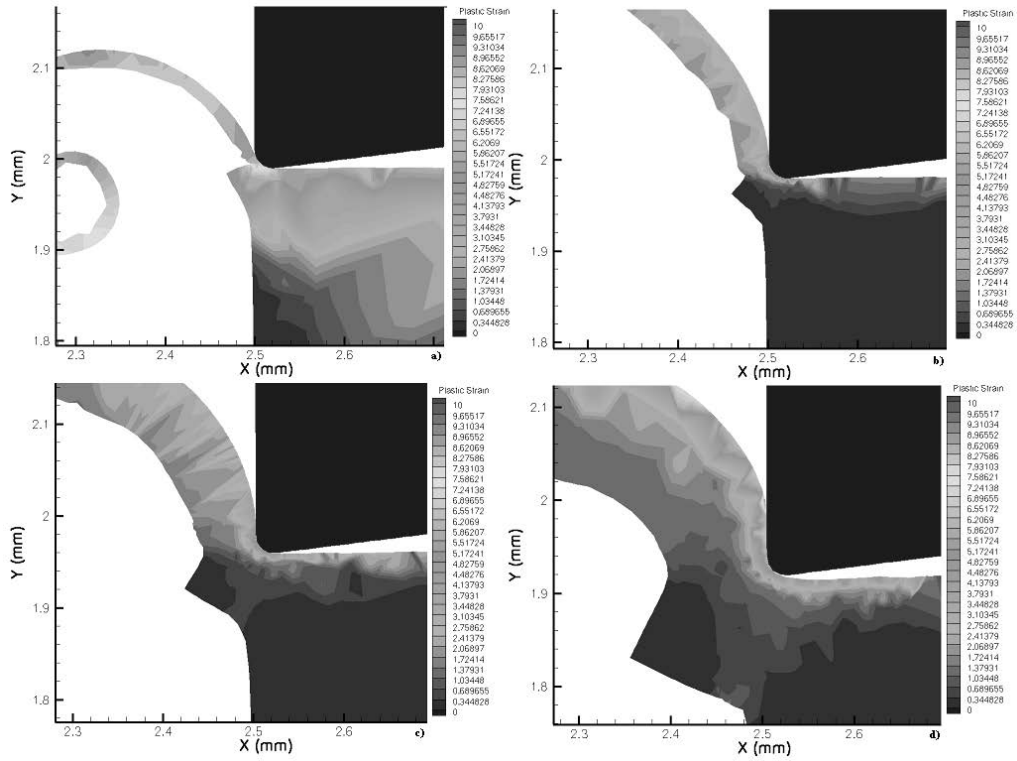


Fig. 7. Evolução da deformação plástica em função do avanço no final do comprimento do corte: a) avanço de 10 μm/rot; b) avanço de 20 μm/rot; c) avanço de 40 μm/rot; d) avanço de 80 μm/rot.

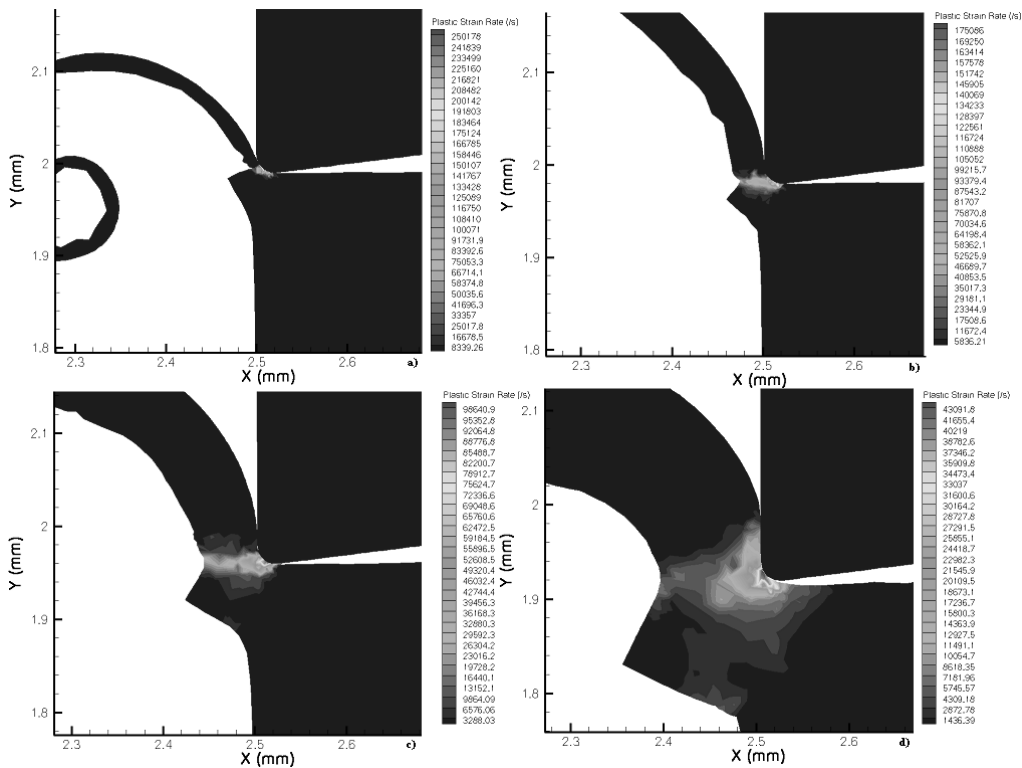


Fig. 8. Evolução da velocidade de deformação em função do avanço no final do comprimento do corte: a) avanço de 10μm/rot; b) avanço de 20μm/rot; c) avanço de 40μm/rot; d) avanço de 80μm/rot.

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 Expe- rimental (N)	Força de Corte Simulada (N)	Desvio (%)
10	14,15	10,1	28,6
20	19,05	18,2	4,46
40	27	29,6	9,6
80	40,25	50	24

acréscimo da seção de corte com o aumento do avanço. A maior percentagem de calor permanece no cavaco removido e isso produz um aumento de temperatura em uma zona estreita onde ocorre alta deformação e bandas de cisalhamento adiabática são formadas.

A distribuição da tensão de von Mises na ferramenta, na peça, no cavaco e na rebarba no final do comprimento do corte é observado na Fig. 5. 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 micro-usinagem com avanço de $80\mu\text{m}/\text{rot}$. O valor máximo atingido da tensão é próximo de 1300 MPa. Os mapas da evolução da tensão máxima de corte com a variação do avanço são apresentados na Fig. 6. Esta tensão tem um valor máximo para o avanço de $80\mu\text{m}/\text{rot}$ (e a zona afetada por esta tensão também é superior para este avanço, fazendo-se notar no material, na ferramenta, no cavaco e na rebarba) e o seu valor máximo atinge cerca de 730 MPa.

A evolução da deformação plástica com a variação do avanço no final do comprimento do corte é apresentado por mapas de simulação conforme mostra a Fig. 7. A deformação máxima ocorre para um avanço de $10\mu\text{m}/\text{rot}$ e atinge cerca de 9. 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.

Os mapas de simulação com a evolução da velocidade de deformação plástica com a variação do avanço no final do comprimento do corte são observados na Fig. 8. A velocidade de deformação máxima ocorre para um 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. Novamente, 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 [15] 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.

Duan *et al.* [16] mostraram que a taxa de deformação plástica aumenta com o aumento da velocidade de corte. Esses autores também concluídos que a dureza da peça é capaz de influenciar a formação de cavaco e o mecanismo de deformação plástica.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais e simulações apresentadas às seguintes conclusões podem ser extraídas para o micro-torneamento ortogonal no aço AISI D2:

Na micro-usinagem, 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 veloci-

dade de deformação (estas aumentam à medida que aumenta o avanço e fazem-se sentir em mais zonas 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 D2, para as diferentes condições de corte;

Os resultados da força de corte simulada quando comparados com a força experimental produziram erro mínimo de 4,46% (avanço de 20 $\mu\text{m}/\text{rev.}$) e máximo de 28,6% (10 $\mu\text{m}/\text{rev.}$).

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 632.62°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 zona exterior tem maior valor de deformação quando comparado com a zona interior, ou seja, como a zona exterior esta sujeita a tração, enquanto que a zona interior é objeto de compressão;

Os mapas da velocidade de deformação plástica indicam que as deformações plásticas concentrar-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).

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de Produtividade em Pesquisa e ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro - Portugal, pelo desenvolvimento e apoio ao projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] Dornfeld, D., Min, S., Takeuchi, Y., "Recent Advances in Mechanical Micromachining", In: *Annals of the CIRP*, 55, 2, 745-768 (2006)
- [2] Weck, M., Fischer, S., Vos, M., "Fabrication of microcomponents using ultraprecision machine tools", *Nanotechnology*, 8, 145-148 (1997)
- [3] Fang, F.Z., Wu, H., Liu, X.D., Liu, Y.C., Ng, S.T., "Tool geometry study in micromachining", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 13, 726-731 (2003)
- [4] Fang, F.Z., Liu, Y.C., "On minimum exit-burr in micro cutting", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14, 984-988 (2004)
- [5] Azizur Rahman, M., Rahman, M., Senthil Kumar, A., Lim, H.S., "CNC microturning: an application to miniaturization", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45, 631-639 (2005)
- [6] Chae, J., Park, S.S., Freiheit, T., "Investigation of micro-cutting operations", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 313-332 (2006)
- [7] 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*, 162-163, 702-708 (2005)
- [8] Zaman, M. T., Senthil Kumar, Rahman, A., M., Sreeram, S., "A three-dimensional analytical cutting force model for micro end milling operation", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 353-366 (2006)
- [9] Trent, E.M., Wright, P.K., *Metal Cutting*, 4 ed., Woburn: Butterworth-Heinemann (2000)
- [10] 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*, 9, 1-26 (2005)
- [11] Grzesik, W., Bartoszek, M., Nieslony, P., "Finite Difference Analysis of the Thermal Behaviour of Coated Tools in Orthogonal Cutting of Steels", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44, 1451-1462 (2004)
- [12] 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*, 221, 909-916 (2007)

- [13] 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*, 47, 1738-1743 (2006)
- [14] 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*, 30, 160-165 (2009)
- [15] 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*, 71, 224-234 (1997)
- [16] Duan, C., Wang, M., Pang, J., Li, G., "A calculational model of shear strain and strain rate within shear band in a serrated chip formed during high speed machining", *Journal of Materials Processing Technology*, 178, 274-277 (2006)

FINITE ELEMENT SIMULATION WITH EXPERIMENTAL VALIDATION IN ORTHOGONAL MICRO-TURNING OF AISI D2 STEEL

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 possible by experimental measurement methods. The paper presents simulation using FEM (Finite Element Method) with experimental validation in orthogonal micro-turning of AISI D2 steel. Machining simulation using FEM AdvantEdge® were applied to predict cutting and thrust forces, cutting temperature distribution and plastic deformation. The work aims at evaluating 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. It was also held a prediction of cutting temperature and plastic deformation during the machining of AISI D2 steel. Experimental and simulated results showed values very close in terms of cutting force.

Keywords – Machining simulation, AISI D2 steel, Micro-machining.

REVISTA IBEROAMERICANA DE INGENIERÍA MECÁNICA

INFORMACIÓN Y SUSCRIPCIONES

Para solicitar información sobre la revista o suscripción y forma de pago, rellenar el siguiente formulario y remitirlo por fax al número +34 913 986 536, o escribir un correo electrónico a la dirección ribim@ind.uned.es.

Nombre y apellidos

Institución

Departamento

Cargo

Dirección completa

.....

Teléfono Fax

E.mail

El precio de la suscripción anual (2 números de la revista) es de 36 euros (45 USD). Se pueden solicitar números sueltos al precio de 20 euros (25 USD). Suscripción gratuita para los miembros de la Asociación Española de Ingeniería Mecánica.

Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica

[Inicio](#) [Comité Editorial](#) [Información Autores](#) [Revisores](#) [Base de Datos](#) [Contacto](#) [Enlaces](#)

Presentación

Números Publicados

Año 2015 (Vol. 19)
N. 2 - Octubre
N. 1 - Abril

Año 2014 (Vol. 18)
N. 2 - Octubre
N. 1 - Abril

Año 2013 (Vol. 17)
N. 2 - Octubre
N. 1 - Abril

Año 2012 (Vol. 16)
N. 2 - Octubre
N. 1 - Abril

Año 2011 (Vol. 15)
N. 2 - Octubre
N. 1 - Abril

Año 2010 (Vol. 14)
N. 2 - Octubre
N. 1 - Abril

Año 2009 (Vol. 13)
N. 2 - Octubre
N. 1 - Abril

Año 2008 (Vol. 12)
N. 2 - Octubre
N. 1 - Abril

Año 2007 (Vol. 11)
N. 2 - Septiembre
N. 1 - Mayo



Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica

La Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica es una publicación semestral que edita la Universidad Nacional de Educación a Distancia desde 1997.

Editor
Prof. Francisco Alba Juez Universidad Nacional de San Juan
Instituto de Mecánica Aplicada San Juan
República Argentina

Objetivos y alcance

El objetivo fundamental de la Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica es proporcionar un medio de comunicación entre los ingenieros y científicos que trabajan en la investigación y el desarrollo en el vasto campo de la Ingeniería Mecánica, y fomentar los lazos de colaboración entre los países iberoamericanos.

La Revista publica trabajos originales, tanto teóricos como experimentales, que aporten nuevas ideas o técnicas relacionadas con cualquiera de las áreas de la ingeniería mecánica, como son: mecánica fundamental, teoría de máquinas y mecanismos, tribología, robótica, vibraciones, mecánica de fluidos, turbomáquinas, vehículos, fabricación, metrología, mantenimiento, calidad, estructuras, materiales, métodos numéricos y diseño asistido por computador.

Último número publicado:
VOLUMEN 19, N.º 2 - Octubre 2015

Copyright © 2016 Universidad Nacional de Educación a Distancia

ISSN 1137-2729. Depósito legal I. M. 1338-1997
Edita: SECCIÓN DE MEDIOS IMPRESOS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA
Calle Bravo Murillo 38, 28015 Madrid
Impreso en España - Printed in Spain

Página web de la
Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica
www.uned.es/ribim

