

NOVA ABORDAGEM NA CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATERIAIS PARA O CORTE ORTOGONAL

Silva C.M.A.¹, Cristino V.A.M.², Rosa P.A.R.³ e Martins P.A.F.⁴

¹MSc. Investigador, ²MSc.Téc.Lab, ³Prof. Auxiliar, ⁴Prof. Catedrático
Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal



RESUMO

O presente trabalho apresenta uma investigação compreensiva do escoamento plástico de metais nos processos de corte por arranque de apara. O desenvolvimento experimental passou pelo projecto, fabrico e a integração de diferentes sistemas, os quais, em conjunto com um elaborado plano de ensaios, permitiram introduzir melhorias na qualidade das estimativas numéricas obtidas para os processos de fabrico baseados na deformação plástica de materiais. Originando assim numa nova abordagem/metodologia de caracterização do comportamento mecânico dos materiais com a velocidade de deformação controlada, que permite uma melhor compreensão do escoamento plástico que o material sofre ao passar pelo plano de corte.

1- INTRODUÇÃO

Actualmente, existe um vasto número de metodologias que visam determinar a tensão de escoamento no corte por arranque de apara de forma a obter modelações analíticas e numéricas do processo (Sartkulvanich (2005)). Embora a maioria dos autores defenda que a tensão de escoamento no corte é função da extensão, velocidade de deformação e da temperatura (Childs (1998)), outros autores, como Anurag (2007), acrescentam que a tensão de escoamento também depende de vários outros factores, tais como evoluções microestruturais e históricos de extensão, velocidade de deformação e temperatura.

Muitos aspectos práticos do corte por arranque de apara são controlados fundamentalmente por mecanismos associados ao processo de formação da apara, durante o qual o material é submetido a deformação plástica a

elevadas extensões ($\epsilon > 2$) e velocidades

de deformação ($10^3 - 10^6 \text{ s}^{-1}$) (Chandrasekaran (2005)). No entanto, o recurso a técnicas experimentais de caracterização mecânica a alta velocidade (barras de Hopkinson, ensaios de corte, etc.), continua a não ser condição suficiente para garantir a correcta avaliação do escoamento plástico dos materiais sob estas condições. De facto, a

correlação entre estimativas numéricas e experimentação, mesmo a extensões e velocidades de deformação relativamente elevadas, tem mostrado um desacordo significativo para alguns processos de fabrico, tais como o corte por arranque de apara (Bil (2004)).

Um grande impulso na investigação do corte tem sido o de estabelecer teorias fiáveis com base no método dos elementos finitos (FEM), prevendo com precisão as condições no corte ortogonal, tais como forças de corte, temperaturas no plano de corte, formação da apara, desgaste da ferramenta, acabamento superficial, mudanças micro-estruturais da superfície, tensões residuais etc. Este método tem permitido um melhor controlo e optimização dos processos de maquinagem e das máquinas ferramenta inerentes ao processo (Sartkulvanich (2005)). No entanto é estritamente necessário que o comportamento mecânico do material durante a formação da apara seja percebido em termos do efeito do histórico das propriedades dos materiais de trabalho e das condições de corte.

O presente trabalho tem como objectivo realizar uma investigação compreensiva do escoamento plástico nos processos de corte por arranque de apara. Apresenta uma metodologia inovadora baseada na assinatura do processo de fabrico, a qual é utilizada para projectar um mecanismo que permite ensaiar o material em condições adequadas. O projecto assenta em estimativas numéricas do escoamento viscoplástico durante a formação de apara. Este trabalho demonstra a importância da assinatura viscoplástica na preparação da simulação numérica dos processos de corte ortogonal.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma modelação exacta do comportamento mecânico dos materiais é pré-requisito para uma análise efectiva de um determinado processo de produção, embora uma pesquisa desta complexa

deformação coloque grandes dificuldades. Uma série de análises de modelos constitutivos empíricos e semi-empíricos têm sido desenvolvidas com o intuito de prever a tensão de escoamento com elevada exactidão nos processos de maquinagem. Quando se considera o efeito de elevados valores de extensão, velocidade de deformação e temperatura, aparte de evoluções microestruturais e históricos de deformação verificados no corte, um vasto número de modelos constitutivos têm sido testados recorrendo a testes de compressão e corte a alta velocidade a partir de uma barra de Hopkinson (SHPB). Embora amplamente utilizada na obtenção do comportamento mecânico dos materiais, apresenta algumas limitações a baixas velocidades (Jaspers (2001), Zheng (1999)). Por outro lado, um ensaio de corte ortogonal bem projectado pode fornecer um método eficaz para estimar o valor médio da tensão de escoamento (Lei (1999), Shatla, (2001)). A principal desvantagem deste método reside no facto de a equação constitutiva obtida ser válida somente para valores elevados de extensões, velocidades de deformação e temperatura, havendo por vezes a necessidade de extrapolar dados ou de combinar este tipo de ensaios com testes convencionais de compressão, de forma a superar as desvantagens dos dois tipos de ensaios (Guo, (2003), Özel, (2000)).

3- METODOLOGIA

O conhecimento da evolução teórica da velocidade de deformação no processo de corte por arranque de apara torna-se imprescindível para a compreensão deste processo. Recorrendo ao método dos elementos finitos é possível comprovar se os históricos de velocidade de deformação utilizados nos tradicionais ensaios de caracterização de materiais são compatíveis com os verificados no corte. Com base na equação constitutiva do comportamento mecânico do chumbo UNS L51120, obtida por Silva (2009) através de

Contribuição para uma nova abordagem na caracterização do comportamento mecânico de materiais para o corte ortogonal

ensaios de compressão numa ampla gama de velocidades, foi possível realizar simulações numéricas de corte ortogonal recorrendo ao programa ICut2D. Esta equação foi formulada a partir de ensaios

em provetes cilíndricos de altura h_0 (Fig. 1) em condições de velocidade de

compressão V_{comp} constante, o que corresponde a uma evolução exponencial

da velocidade de deformação $\dot{\epsilon}$ em função

da extensão ϵ (Eq. (1)).

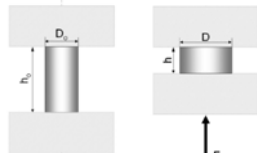


Fig 1- Esquema de ensaio de compressão

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_{mp}(\epsilon)}{h_0} V_{comp} \quad (1)$$

Para obtenção dos históricos de extensão e de velocidade de deformação verificados durante o processo de corte por arranque de apara, recorreu-se à análise de diversos elementos posicionados em zonas distintas da malha de elementos quadráticos utilizada na simulação. Foram realizadas simulações a diferentes velocidades de corte (10, 50 e 100 mm/s) para o mesmo valor de ângulo de ataque e de saída, 10° e 5° respectivamente, e para uma espessura de corte constante de 0.25mm.

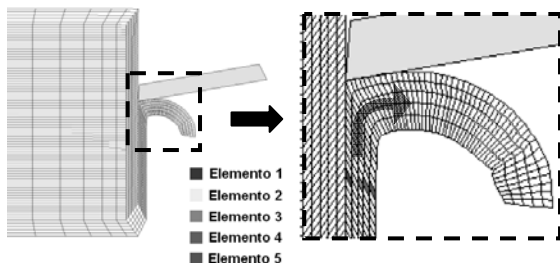


Fig. 2 - Modelo de elementos finitos utilizado na simulação numérica de corte.

Através dos dados obtidos da simulação foi possível obter o histórico de deformação ao longo da apara e dos

elementos sob diferentes velocidades de corte. Verificou-se que a velocidade de deformação em função da extensão (Fig. 3) apresentava uma evolução próxima da linear, a qual corresponde a uma ótima correlação para o ajuste do histórico de deformação no corte por arranque de apara. Esta conclusão permite comprovar que os históricos verificados no corte por arranque de apara são distintos dos obtidos nos ensaios tradicionais de caracterização, uma vez que a maioria dos trabalhos são realizados a velocidade de deformação

aproximadamente constante ($\dot{\epsilon} = cte$) (barra de Hopkinson).

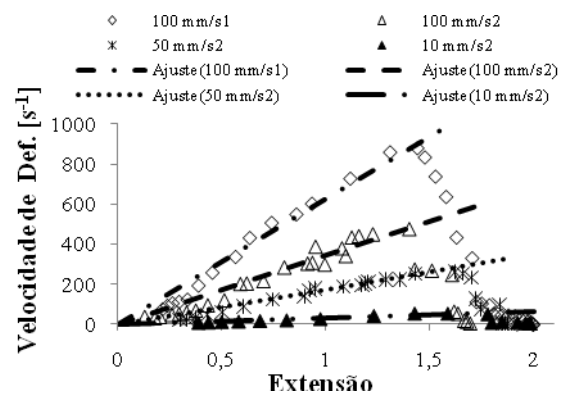


Fig. 3 - Evolução da velocidade de deformação nos elementos 1 e 2, obtida na simulação numérica para diferentes velocidades de corte.

Perante estes resultados propôs-se uma nova correlação, desta feita linear, para o histórico de deformação nos ensaios de caracterização de materiais que visam obter a tensão de escoamento em condições similares ao corte ortogonal (Eq.(2)).

$$\dot{\epsilon} = m\epsilon \quad (2)$$

Tendo em conta esta evolução, foi possível implementá-la num ensaio de compressão através do controlo do

coeficiente entre a extensão ϵ e a

velocidade de deformação $\dot{\epsilon}$ (declive m). Uma vez que a evolução da velocidade de deformação num ensaio de compressão é dada pela Eq. 3, é possível, através da

variação da velocidade de compressão

V_{comp} ao longo do ensaio, garantir o histórico de deformação que se pretenda implementar.

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{h} \frac{dh}{dt} = \frac{V_{comp}}{h} \quad (3)$$

Desta forma, o declive m das rectas de ajuste da Fig. 3 corresponde à Eq. 4 para um ensaio tradicional de compressão.

$$m = \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon} = \frac{V_{comp}}{h \cdot \epsilon} \quad (4)$$

Sabendo que a altura h do provete e consequentemente a extensão ϵ variam ao longo do ensaio, para manter o valor do

declive m constante torna-se obviamente necessário alterar o valor da velocidade de

compressão V_{comp} no decorrer do ensaio.

4- PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para implementar a metodologia apresentada na caracterização dos materiais para o corte ortogonal, foi necessário projectar e fabricar um mecanismo de compressão e um sistema de actuação que permitissem realizar ensaios de compressão controlados.

4.1 - Mecanismo de compressão

De acordo com as características da metodologia apresentada neste trabalho, foi projectado e fabricado um mecanismo de compressão, baseado no conceito de came linear (Fig. 4), o qual consiste em transformar uma velocidade de actuação da came V_x numa evolução previamente definida V_y (Eq. (5)).

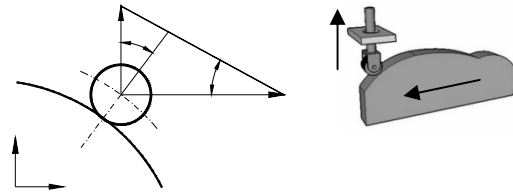


Fig. 4 - Relação entre a velocidade da came V_x e do seguidor V_y e o ângulo de pressão γ . (Moon, 1962).

$$\tan \gamma = \frac{V_y}{V_x} = \frac{V_{compressão}}{V_{actuação}} \quad (5)$$

O mecanismo desenvolvido é composto por uma came linear e por uma estrutura metálica, na qual a came desliza. Um punção que está acoplado à came por meio de um espigão move-se perpendicularmente à medida que a came se desloca, que por sua vez faz com que o prato inferior realize a compressão do provete.

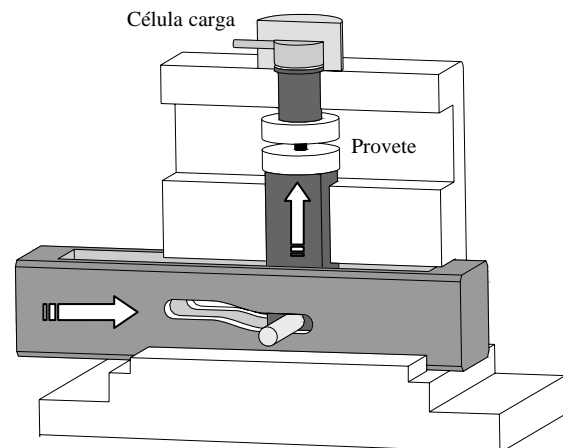


Fig. 5-Esquema do Mecanismo de Compressão.

4.2 - Actuação e Instrumentação

Tendo como objectivo realizar ensaios numa ampla gama de velocidades (quasi-estáticas e elevadas), foi necessário acoplar o mecanismo de compressão a dois sistemas de actuação linear. Para velocidades quasi-estáticas foi utilizada uma prensa hidráulica com controlo numérico e para velocidades superiores recorreu-se a um actuador electromagnético desenvolvido pelos autores (Silva (2008)), ambos actuando com velocidade constante (Fig. 5).

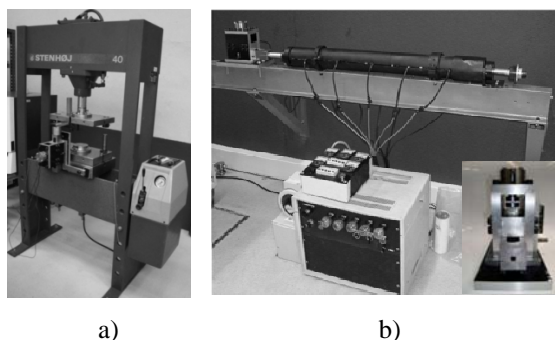


Fig. 5 – Aparato experimental utilizado para ensaios a velocidades: a) quasi-estáticas b) elevadas.

Durante o ensaio a força exercida no provete é medida através de uma célula de carga que se encontra fixa na parte superior da estrutura. O deslocamento do punção, que corresponde à variação de altura do provete, é medido por intermédio de um potenciómetro fixo á estrutura e ao punção, tal como é possível verificar no esquema de montagem (Fig. 6). Para assegurar a monitorização e a aquisição dos dados experimentais foi desenvolvido um programa em ambiente LabView.

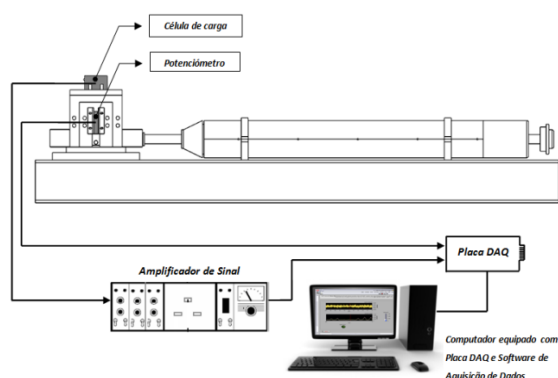


Fig. 7 – Aparato experimental: a) esquema de aquisição de dados; b) potenciómetro; c) célula de carga; d) placa DAQ; e) amplificador de sinal.

4.3 - Plano de Ensaio

Recorrendo aos procedimentos experimentais desenvolvidos, foram realizados ensaios de compressão para

diferentes valores de $\dot{\epsilon}$ (0-2000) usando provetes de chumbo tecnicamente puro (99,9%) (UNS L51120) com diâmetro

$D = 6 \text{ mm}$ e altura $h_0 = 6 \text{ mm}$. Foi utilizado o chumbo devido à sua capacidade de modelar a deformação plástica de materiais

largamente utilizados em engenharia, tal como os aços, quando aplicados em circunstâncias de elevadas velocidades de deformação e temperaturas. É um material de boa maquinabilidade, dado que apresenta baixo encruamento, baixa dureza e elevada tenacidade.

5- RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através da manipulação matemática dos valores de força-deslocamento adquiridos dos respectivos ensaios de compressão, foi possível estabelecer a equação que caracteriza o chumbo em condições similares às encontradas no corte ortogonal, isto é, o valor da tensão de

escoamento σ em função do histórico de extensão e da velocidade de deformação. O modelo utilizado para representar a tensão de escoamento do chumbo tecnicamente puro é apresentado na Eq. 8, onde as

funções $f_1, f_2, f_3, f_4 = f(\dot{\epsilon})$ são polinómios de terceiro grau, função da velocidade de deformação.

$$\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}) = f_1 \cdot \epsilon^3 + f_2 \cdot \epsilon^2 + f_3 \cdot \epsilon + f_4 \cdot \dot{\epsilon} \quad (8)$$

A Fig. 8 apresenta os valores de tensão-extensão experimentais para os

diversos valores de declive m em que se realizou cada ensaio e o respectivo ajuste com a Eq. (8), a qual apresenta uma óptima correlação com os dados experimentais. Esta metodologia para além de representar num ensaio de compressão o histórico de deformação de um processo de fabrico, neste caso o corte ortogonal, apresenta um importantíssimo contributo na eliminação das vibrações características dos ensaios de caracterização de materiais a elevadas velocidades de deformação (barra de Hopkinson).

Vel.
Deformação s-1

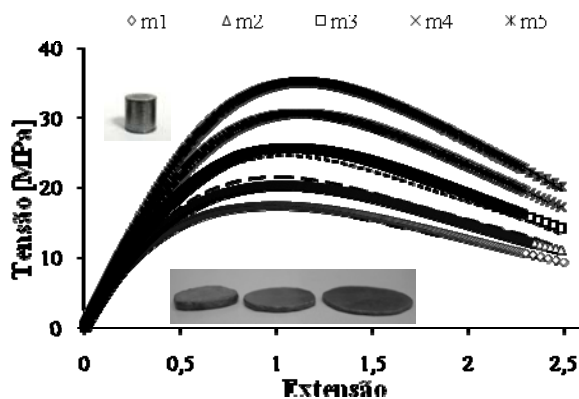


Fig. 8- Valores de tensão-extensão experimentais para os vários grupos de ensaios ($m_1=1.94$, $m_2=484.4$, $m_3=716.9$, $m_4=1337.3$, $m_5=1998$).

A Fig. 9 apresenta os dados experimentais obtidos e o ajuste tridimensional correspondente ao modelo utilizado, o qual caracteriza o comportamento mecânico do chumbo em condições de deformação similares ao corte por arranque de aparas. É possível verificar através desta representação tridimensional das curvas tensão-extensão os diversos ensaios a diferentes valores do coeficiente entre a extensão e a velocidade

de deformação (declive m).

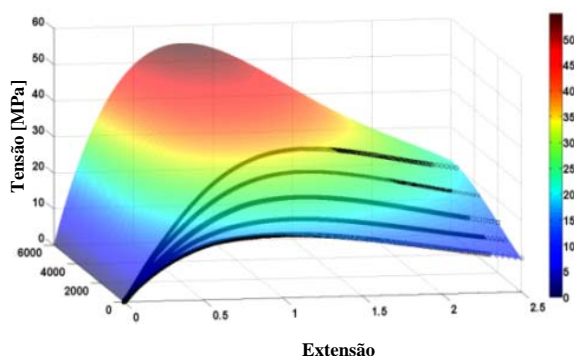


Fig. 9 – Evolução tensão-extensão-velocidade de deformação dos diversos ensaios de compressão a

diferentes valores de m .

Comparando os resultados obtidos neste trabalho com a metodologia adotada por Silva (2009), ($V_{comp} = cte$), conclui-se que o histórico da velocidade de deformação toma uma importância fundamental na caracterização dos materiais, dado que uma variação do

histórico da velocidade de deformação durante o ensaio pode resultar numa diferença de tensão de escoamento de cerca de 50%, bem como no formato das curvas tensão-extensão (Fig. 10).

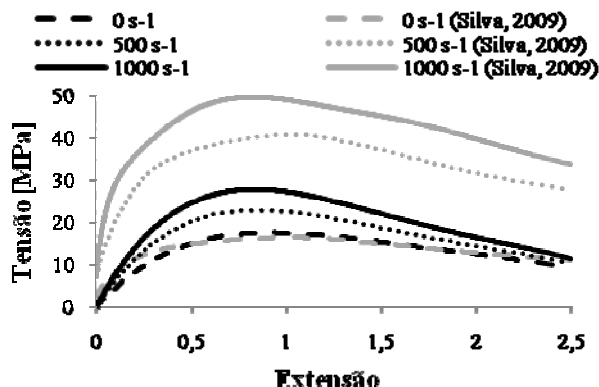


Fig. 10 – Comparação entre as curvas tensão-extensão para velocidades de deformação constantes.

6- CONCLUSÕES

Partindo do trabalho experimental realizado inicialmente na caracterização do chumbo (Silva, 2009), foi possível realizar simulação numérica do corte ortogonal no programa I-Cut2D, onde se verificou que a evolução da velocidade de deformação apresentava uma tendência linear em quase toda a gama de extensão. No entanto, para obter esta evolução linear num ensaio de compressão surgiu a necessidade de variar a velocidade de compressão ao longo do ensaio. Tendo em conta esse objectivo, foi desenvolvido pelos autores um mecanismo que cumpre essa exigência, o qual, baseado no conceito de came linear, permitiu realizar ensaios de compressão com um histórico pré-determinado de velocidade de deformação. Os ensaios foram conduzidos em provetes cilíndricos de UNS L51120 a diferentes valores de

declive m , obtendo-se desta forma os dados de força-deslocamento para cada grupo de ensaio. Através de manipulação matemática foi possível estabelecer com elevada precisão a equação que caracteriza o comportamento mecânico do chumbo em condições muito próximas da deformação plástica verificada no corte ortogonal,

podendo ser utilizada em simulações numéricas do corte por arranque de apra.

Comparando os resultados obtidos com a metodologia adotada por Silva (2009), conclui-se que o histórico da velocidade de deformação toma uma importância fundamental na caracterização dos materiais, dado que uma variação na evolução da velocidade de deformação durante o ensaio resulta numa diferença de tensão de escoamento de cerca de 50%. Uma compressão mais suave e progressiva (obtida para uma evolução linear da velocidade de deformação) ao invés de uma compressão brusca e constante (obtida para uma evolução exponencial da velocidade de deformação) permite reduzir a tensão de escoamento para metade e eliminar grande parte das vibrações características dos tradicionais ensaios de caracterização dos materiais para o corte por arranque de apra. A influência do histórico da velocidade de deformação foi neste trabalho abordada de forma individual, embora a influência de outros parâmetros não abrangidos neste estudo estejam também associados a esta diferença de valores na tensão de escoamento.

Com esta nova metodologia é possível criar uma base de dados universal do comportamento mecânico dos materiais mais utilizados em engenharia, para que a partir de um software de elementos finitos seja possível simular não só o processo de corte por arranque de apra, mas qualquer processo em que a evolução de histórico de deformação seja adaptável a esta metodologia. Permitindo assim à indústria atingir uma melhoria substancial na compreensão e adaptação a novos materiais e processos.

7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anurag, S. e Guo, Y.B. 2007. A modified micromechanical approach to determine flow stress of work materials experiencing complex deformation histories in manufacturing processes. *Int. J. of Mechanical Sciences*, 49, p. 909–918.
- Bil H., Kiliç S. E. e Tekkaya A. E. 2004. A comparison of orthogonal cutting data from experiments with

three different finite element models, *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, 44, p. 933-944.

- Chandrasekaran, H., M'Saoubi, R. e Chazal, H. 2005. Modelling of material flow stress in chip formation process from orthogonal milling and split hopkinson bar tests, *Machining Science and Technology*, 9:1, p. 131-145.
- Childs, T. H. C. 1998. Material property needs in modeling metal machining, *Machining Science and Technology*, 2: 2, 303-316.
- Guo, Y.B. 2003. An integral method to determine the mechanical behavior of materials in metal cutting, *J. of Materials Processing Technology*, 142, p. 72–81.
- Jaspers, S.P.F.C. e Dautzenberg, J.H. 2001. Material behaviour in conditions similar to metal cutting: flow stress in the primary shear zone, *J. of Materials Processing Technology*, 122, p. 322–330.
- Lei, S., Shin, Y. C. e Incropera, F. P. 1999. Material constitutive modeling under high strain rates and temperatures through orthogonal machining tests, *J. of Manufacturing Science and Engineering*, 121, p. 577-585.
- Moon, C. H., 1962, *Cam Design Manual for Engineers, Designers, and Draftsmen*, Commercial Cam Division - Emerson Electric Company.
- Özel, T. e Altan, T. 2000. Determination of workpiece flow stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting, *Int. J. Machine Tools Manuf*, 40, p. 133–152.
- Sartkulvanich, P., Altan, T. E Soehner, J. 2005. Flow stress data for finite element simulation in metal cutting: a progress report on madams, *Machining Science and Technology*, 9:2, p. 271- 288.

- Shatla, M., Kerk, C. e Altan, T. 2001. Process modeling in machining. Part I: determination of flow stress data, *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, 41, p. 1511–1534.
- Silva, C.M.A., Martins, P.A.F., Rosa, P.A.R., Bastos, A.J.R. 2008. Actuador linear simultâneo de relutância magnética, Patent request nr. PT 104165 - INPI, Portugal.
- Silva, C.M.A., Rosa, P.A.R., Martins, P.A.F. 2009. Mechanical Characterization of Materials for Bulk Forming Using a Drop Weight Testing Machine, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*.
- Zheng, Y., Sutherland, J.W. 1999. An orthogonal cutting model based on finite deformation analysis. Part II. Constitutive equations and experimental verification, *ASME MED*, 10, p. 301–309;