

NOVA METODOLOGIA PARA CARACTERIZAR O COMPORTAMENTO MECÂNICO DO MATERIAL EM CONDIÇÕES DE CORTE ORTOGONAL

C. M. A. Silva¹, V. A. M. Cristino², P. A. R. Rosa³, P. A. F. Martins⁴

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



RESUMO

Para a modelação teórica do corte ortogonal estão actualmente disponíveis diversas técnicas analíticas e numéricas bem consolidadas e com resultados concordantes mas que, e em geral, diferem da experimentação do processo de corte ortogonal. Este desacordo tem vindo a ser observado por diversos investigadores que têm procurado sem sucesso encontrar uma solução que simultaneamente satisfaça o campo de tensões e de extensões para o mecanismo de formação de apara. Diversos aspectos têm vindo a ser apontados como causas prováveis para a diferença entre a modelação teórica e a experimentação, mas é possivelmente na descrição do comportamento mecânico do material que reside a maior contribuição para esta divergência. O presente trabalho apresenta uma investigação compreensiva do escoamento plástico de metais nos processos de corte por arranque de apara. O desenvolvimento teórico passou pela simulação numérica do processo de corte ortogonal com a intenção de identificar o histórico de deformação do material ao passar pelo plano de corte e quantificar a sua influência no escoamento plástico da apara. O desenvolvimento experimental passou pelo projecto, fabrico e a integração do aparato experimental que, em conjunto com um elaborado plano de ensaios, permitiram introduzir melhorias na caracterização do comportamento mecânico do UNS L51120. Como resultado desta investigação é apresentada uma nova metodologia para a caracterização do comportamento mecânico dos materiais que faz intervir o histórico de deformação do material e que permite melhorar a qualidade das estimativas teóricas para os processos de fabrico onde ocorra o escoamento plástico de materiais.

1 - INTRODUÇÃO

Muitos aspectos práticos dos processos de maquinaria são influenciados por alterações no comportamento mecânico do material, promovidas pela elevada extensão efectiva () e pela variação da velocidade de deformação (de até) ocorridas ao passar no plano de corte (Chandrasekaran, 2005). Estes aspectos têm

particular importância na simulação numérica do mecanismo de formação de apara pois a tensão de escoamento do material é um dos principais parâmetros de entrada do modelo teórico. A caracterização do comportamento mecânico do material no corte por arranque de apara é em geral obtida através da realização de ensaios mecânicos ou, de forma indirecta, através

de metodologias numéricas de identificação inversa (Sartkulvanich, 2005).

De entre os ensaios mecânicos, a barra de Hopkinson é a técnica experimental mais utilizada pois permite avaliar a tensão de escoamento do material na gama típica da velocidade de deformação em que ocorrem os processos de maquinagem (Jaspers, 2002; Zheng, 1999). Esta técnica avalia a evolução da tensão de escoamento do material em função da extensão verdadeira para uma velocidade de deformação aproximadamente constante. A realização de ensaios para diferentes velocidades de deformação permite estabelecer a tensão de escoamento em função da extensão verdadeira e da velocidade de deformação, $\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon})$.

As metodologias numéricas de identificação inversa da tensão de escoamento recorrem à utilização combinada de ensaios de corte e da sua replicação através de técnicas de simulação numérica. Deste modo, o comportamento do material é um parâmetro que é ajustado de modo a permitir reproduzir os valores da força de corte e da força de penetração observadas durante a realização dos ensaios de corte em condições laboratoriais controladas (Lei, 1999; Shatla, 2001). Esta é uma metodologia aparentemente eficaz para estimar o valor médio da tensão de escoamento, mas que é significativamente influenciada por outros fenómenos, que apesar de interligados com o mecanismo de formação de avara, nada têm a ver com o fenómeno de plasticidade.

A utilização das metodologias apresentadas anteriormente têm mostrado resultados distintos, onde por vezes a lei do comportamento do material obtida experimentalmente não permite reproduzir os valores das forças de corte, ou os valores estimados numericamente para a tensão de escoamento são fisicamente inaceitáveis para determinado tipo de material. Outras investigações têm mostrado estimativas numéricas para as forças de corte e tensão de escoamento aceitáveis, mas onde foi necessário ajustar o valor do atrito (Bil, 2004). A maioria dos investigadores defende que apesar da tensão de escoamento ser função da

extensão verdadeira e da velocidade de deformação, esta é fortemente influenciada pela temperatura (Childs, 1998); Enquanto outros adicionam a dependência de outros factores, tais como as evoluções microestruturais e o histórico de deformação (Anurag, 2007).

Alguns investigadores têm procurado resolver esta divergência através da utilização combinada das metodologias anteriores (Guo, 2003, Özel, 2000) apresentando melhorias significativas na qualidade das estimativas teóricas. No entanto, e apesar do interesse, não parece existir na literatura da especialidade um estudo compreensivo do comportamento mecânico dos materiais em condições de corte ortogonal que permita esclarecer as razões do desacordo e apontar metodologias para a sua resolução.

Este trabalho apresenta uma investigação compreensiva do escoamento plástico dos metais nos processos de corte por arranque de avara baseada no conceito da assinatura de processo recentemente apresentado por Silva (2010). Procura alargar esse conceito aos processos de corte por arranque de avara e verificar a influência do histórico de deformação visco-plástico na simulação numérica do processo de corte ortogonal. O desenvolvimento experimental passou pelo projecto, fabrico e pela integração de diferentes sistemas, os quais, em conjunto com um elaborado plano de ensaios, permitiram melhorar a modelação do comportamento mecânico do UNS L51120. Como resultado da investigação é apresentada uma nova metodologia para a caracterização do comportamento mecânico dos materiais e demonstrada a sua influência na qualidade da simulação numérica dos processos de corte ortogonal.

2 - METODOLOGIA

A lei do comportamento mecânico para grandes deformações é tipicamente obtida através da compressão uniaxial de provetes cilíndricos em máquinas universais de ensaios em condições de deformação quasi-estáticas, permitindo estabelecer uma lei de comportamento empírica elasto-plástica ou

rígido-plástica para esse material (Fig. 1a)). Quando se pretende avaliar os fenómenos visco-plásticos do material é então necessário executar a compressão uniaxial dos provetes em máquinas de ensaios adequadas (máquinas de ensaios hidráulicas, martelos de queda, barra de Hopkinson, etc). A utilização dessas máquinas de ensaios está associada a uma assinatura do equipamento que influencia por sua vez o histórico de deformação do material e o valor da tensão de escoamento. De facto, foi demonstrado por Silva (2010) que a lei constitutiva $\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon})$ não é unívoca, apresentando um valor que depende do histórico de deformação (Fig. 1b)).

Devido à ausência de soluções práticas na literatura para resolver esta questão, o presente trabalho procura realizar o ensaio de compressão uniaxial do material em condições de deformação similares às que se verificam durante o processo tecnológico de fabrico. A metodologia proposta recorre à simulação numérica para obter uma estimativa numérica do histórico de deformação, $(\epsilon, \dot{\epsilon})$, do processo de fabrico.

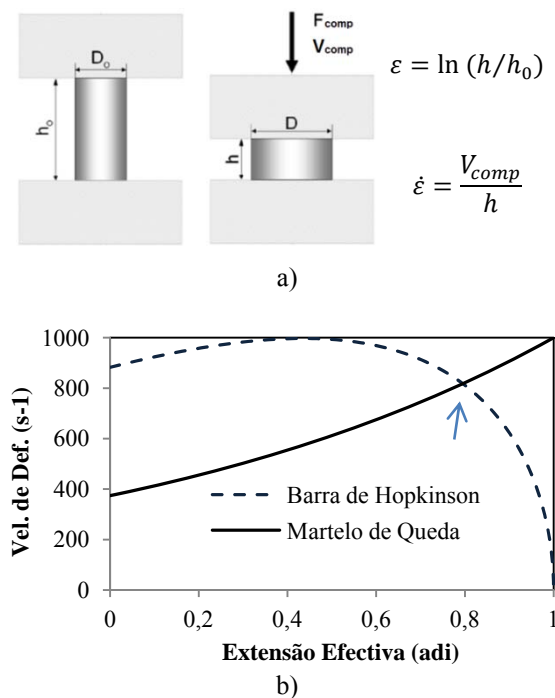


Fig. 1 - Ensaio mecânico de compressão; a) descrição das principais variáveis, b) comparação do ensaio conduzido numa barra de Hopkinson (1) e num martelo de queda (2).

Estes valores são posteriormente utilizados no planeamento dos ensaios mecânicos e no projecto de uma máquina de ensaios com assinatura adequada à compressão uniaxial dos provetes em condições próximas daquelas que o material experimenta durante o processo de fabrico

A Figura 2 apresenta a simulação numérica do corte ortogonal que foi realizada no programa I-Form2D (Martins, 2004; Rosa, 2007) com base numa lei do comportamento mecânico do UNS L51120 genérica (Silva, 2010), permitindo obter uma estimativa aproximada do histórico de deformação deste processo. A Figura 3 apresenta a evolução do par $(\epsilon, \dot{\epsilon})$ durante o escoamento plástico através do plano de corte (ϕ) para os vários elementos de volume apresentados na Figura 2, distribuídos ao longo na secção de corte, para diferentes velocidades de corte (10, 50 e 100 mm/s) mantendo constante os restantes parâmetros operativos (ângulo de ataque 10° , ângulo de saída 5° e espessura de corte de 0.2mm). A evolução do histórico de deformação para os diferentes elementos (Fig. 3a)) e para diferentes velocidades de corte (Fig. 3b)) apresenta um declive m constante, possibilitando o estabelecimento de uma correlação matemática linear (Equação 1) para o histórico de deformação durante o processo de corte ortogonal. Da análise da Figura 3 observa-se ainda que os elementos de volume ao passarem através do plano de corte atingem uma velocidade de deformação máxima, após o qual rapidamente incorporam o movimento de corpo rígido da apara.

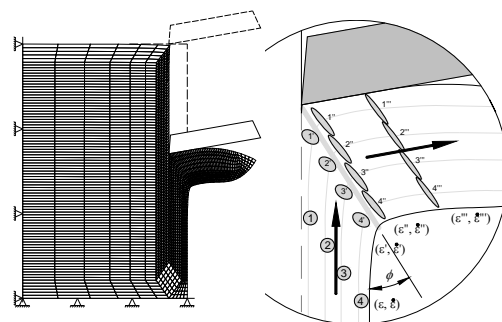


Fig. 2- Modelo de elementos finitos utilizado na simulação numérica do corte ortogonal

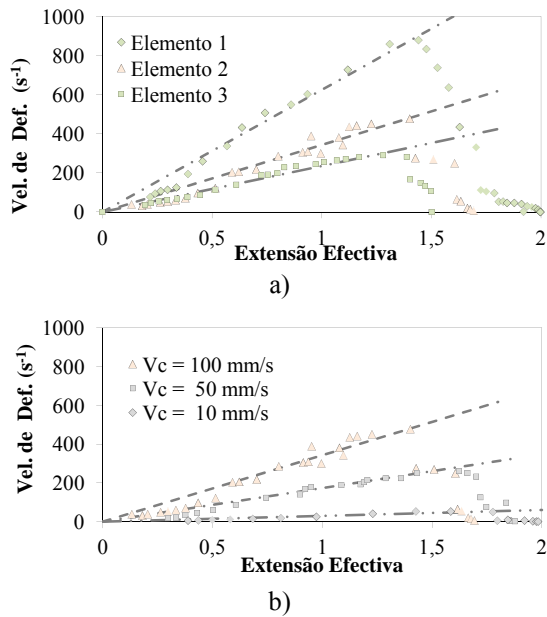


Fig. 3 - Histórico de deformação para o processo de corte ortogonal para, a) diferentes elementos ao longo da espessura de corte ($V_c = 100 \text{ mm/s}$) e b) diferentes velocidade de corte (elemento nº2).

Para caracterizar o comportamento mecânico dum material respeitando um determinado histórico de deformação é necessário controlar a velocidade de actuação da máquina de ensaios, V_{comp} , durante o ensaio de compressão uniaxial. Para um histórico de deformação linear (declive m constante) é necessário combinar as Equações 1 e 2, estabelecendo a relação entre os principais parâmetros operativos do ensaio de compressão (Equação 3), a qual deve permanecer inalterada durante o ensaio para permitir reproduzir as condições de deformação plástica do corte ortogonal.

$$\dot{\varepsilon} = m\varepsilon \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{h} \frac{dh}{dt} = \frac{V_{comp}}{h} \quad (2)$$

$$m = \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon} = \frac{V_{comp}}{h\varepsilon} \quad (3)$$

3- PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 - Ferramenta de compressão

De acordo com as características da metodologia apresentada, foi projectada e fabricada uma ferramenta de compressão baseado no conceito de came linear (Fig. 4), o qual permite transformar uma velocidade de

actuação da came V_x (velocidade constante) numa evolução previamente definida V_y (Fig. 4a)). O mecanismo desenvolvido é composto por uma came linear, por uma estrutura na qual a came desliza, por um punção que liga à came por meio de um espigão e por um par de pratos de compressão (Fig. 4b)).

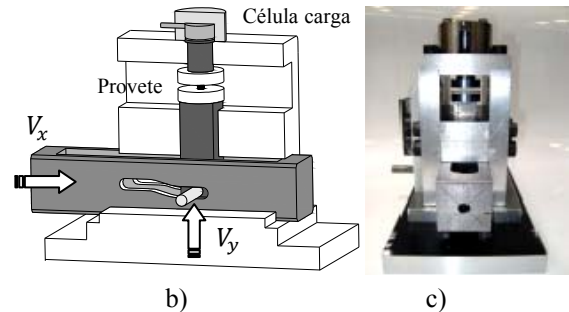
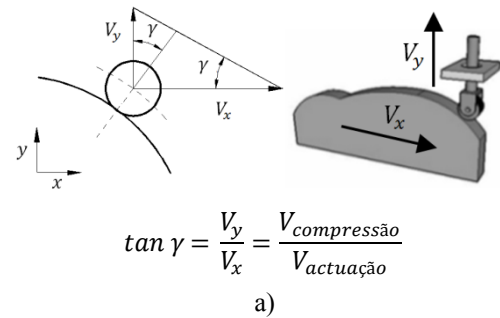
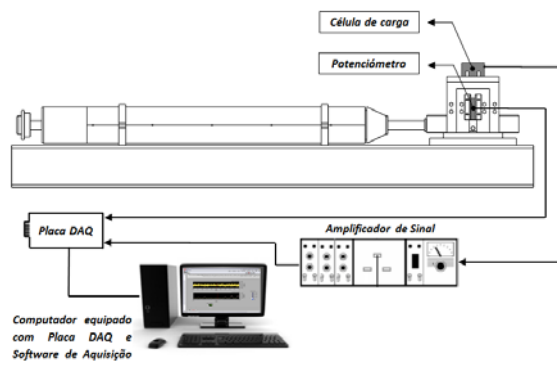


Fig. 4 - Desenvolvimento da ferramenta de compressão com histórico de deformação programado; a) relação entre a velocidade da came, o ensaio de compressão e o ângulo de pressão, γ , (Moon, 1962); b) conceito de funcionamento da ferramenta com uma came linear; c) montagem da ferramenta de compressão.

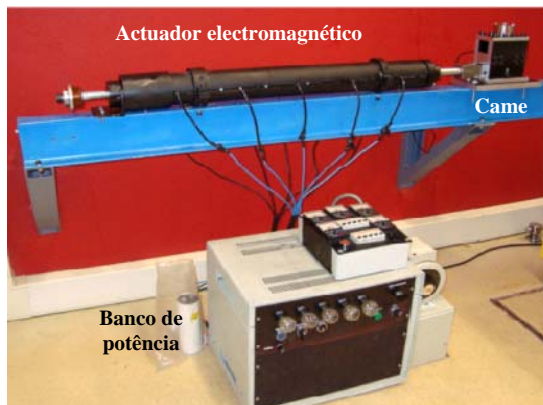
A Figura 4.c apresenta a ferramenta de compressão desenvolvida e utilizada na presente investigação. A ferramenta permite introduzir comes com diferentes perfis adequados ao histórico de deformação de diferentes processos de fabrico e/ou para características das diferentes máquinas de ensaios. De referir a simplicidade de execução e baixo custo de obtenção desta ferramenta de compressão.

3.2 - Actuação da ferramenta e instrumentação

No intuito de realizar a caracterização do material numa gama alargada de velocidades de deformação foi utilizado um actuador linear electromagnético (média e alta velocidade de deformação) desenvolvido por (Silva, 2008) e



a)



b)

Fig. 5 - Aparato experimental utilizado nos ensaios de compressão; a) Integração dos diferentes equipamentos e esquema de ligações, b) Actuador electromagnético para ensaios de média/alta velocidade

uma prensa hidráulica (condições quasi-estáticas e de baixa velocidade de deformação).

A força e o deslocamento do ensaio de compressão foram medidos através de uma célula de carga e de um potenciômetro resistivo apresentado no esquema da montagem experimental da Figura 5. A monitorização foi assegurada por uma placa de aquisição de dados e um programa desenvolvido em LabView.

3.3 - Plano de Ensaio

O material seleccionado para a presente investigação foi o UNS L51120 que, não sendo um material de engenharia, tem a vantagem de permitir modelar experimentalmente o comportamento do aço-carbono em elevada velocidade de deformação e temperatura em condições de baixa/media velocidade de deformação à temperatura ambiente. Este

material quando solicitado em condições de baixa velocidade de deformação apresenta também propriedades adequadas para a validação experimental de modelos teóricos baseados em leis de comportamento próximo do rígido-plástica devido ao facto de apresentar uma taxa de encruamento quase nula, uma tensão de cedência baixa e uma elevada ductilidade. Adicionalmente existem publicações na literatura da especialidade que abordam o comportamento deste material (Silva, 2010) numa gama alargada de velocidades de deformação através de ensaios em martelo de queda, podendo servir o propósito de uma primeira aproximação ao histórico de deformação do material em condições de corte ortogonal através das estimativas obtidas através de simulação numérica.

Para os ensaios de compressão uniaxial utilizaram-se provetes de secção transversal circular com diâmetro inicial d_0 , com uma relação L_0/d_0 (altura/diâmetro) para simultaneamente evitar os problemas de instabilidade e proporcionar melhores condições de deformação plástica. De forma a assegurar uma deformação homogénea recorreu-se a uma lubrificação dos provetes baseada na utilização de PTFE (suspensão líquida de partículas de politetrafluoretileno). Os ensaios foram planeados de modo a realizar compressão uniaxial numa gama alargada de valores de V_x , onde a velocidade de actuação foi mantida aproximadamente constante para os diferentes casos (tabela 1).

Tabela 1 – Plano de ensaios

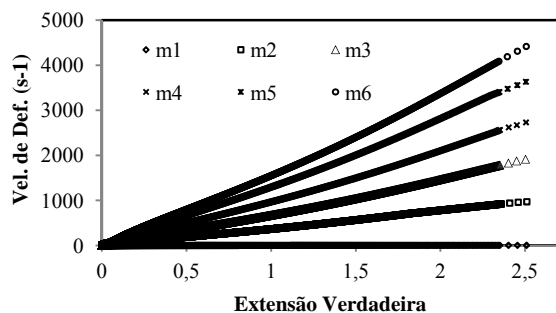
Caso	Condições de teste	V_x (m/s)
m1	Prensa Hidráulica	0.01
m2		2
m3		3.8
m4	Actuador Electromagnético	5,5
m5		7,2
m6		8,5

4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

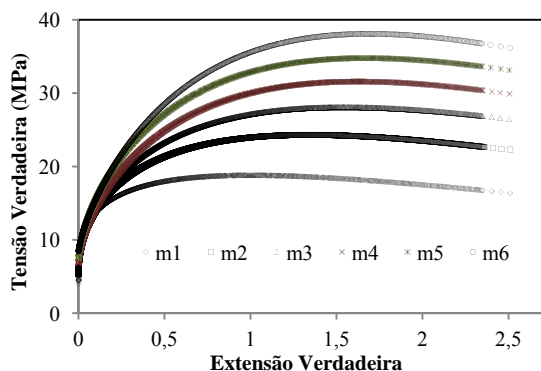
4.1 - Curvas de escoamento

A Figura 6a) apresenta o histórico de deformação realizado experimentalmente para diferentes valores de declive ϕ e a respectiva

evolução da tensão de escoamento com a extensão verdadeira (Fig. 6b)); Observa-se que o material apresenta uma taxa de encruamento negativa a partir de determinado nível de extensão verdadeira e que a utilização combinada de uma ferramenta de compressão actuada por cames e de um circuito de filtragem electrónica do tipo passa alto (alta frequência) permitiram obter evoluções da tensão de escoamento sem ruído. De facto, a ferramenta actuada por came também funciona como um filtro mecânico eliminando a interferência das ondas de pressão (média frequência) geradas durante o impacto (oscilação típica na barra de Hopkinson) pois o ensaio realiza-se numa direcção perpendicular à sua propagação. Este último aspecto é importante na medida que permite facilitar o tratamento dos dados experimentais de ensaios de caracterização mecânica realizados a elevadas velocidades de deformação, pois estes ensaios estão sempre associados à propagação dinâmica de ondas de pressão.



a)



b)

Fig. 6 - Comportamento mecânico do UNS L51120; a) Histórico de deformação com declive m constante ($m_1=1, m_2=400, m_3=700, m_4=1000, m_5=1300, m_6=1700$); b) Evolução da tensão de escoamento com a extensão verdadeira

4.2 - Modelo Constitutivo Empírico

Estão disponíveis na literatura da especialidade diversos modelos empíricos que permitem abreviar os dados experimentais do comportamento mecânico dos materiais numa simples equação constitutiva. No entanto, perante um material que apresente uma taxa de encruamento negativa a generalidade desses modelos não permite descrever esse comportamento mecânico real. De facto, essa taxa de encruamento negativa só é considerada em modelos termo-mecânicos onde exista o amaciamento da tensão de escoamento promovido pelas trocas de calor com o exterior.

O presente trabalho sugere a utilização de um novo modelo constitutivo híbrido rígido-viscoplástico (Equação 4) que faz intervir exclusivamente os parâmetros operativos do ensaio de compressão uniaxial, $\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$, mas que possibilita taxas de deformação negativas. Este modelo considera o efeito combinado da extensão e da velocidade de deformação durante a deformação plástica, mas onde os fenómenos associados à evolução da micro-estrutura metalúrgica e à troca de calor com o exterior são contabilizados implicitamente nos coeficientes da Equação 4 (histórico de deformação). A Equação 4 faz intervir separadamente os efeitos combinados da extensão e do encruamento com os efeitos da velocidade de deformação, através do produto do primeiro pelo segundo parênteses da Equação 4, respectivamente. Deste modo as constantes $A, B, C, D, m, e n$ são o resultado combinado do comportamento mecânico do material e das condições de ensaio, assumindo os valores constantes de $A = 0.2, B = -161, C = 25, D = 1600, m = -0.45, n = 0.35$ para descrever a tensão de escoamento do UNS L51120 em condições de corte ortogonal.

$$\sigma = (A + e^{m\varepsilon} \varepsilon^n) (B + C \ln [D + \dot{\varepsilon}]) \quad (4)$$

Outra particularidade do modelo proposto está na possibilidade de reproduzir alguns dos modelos empíricos tradicionais, tais como o modelo de Ludwik, de Voce ou de Johnson e Cook simplificado, através do

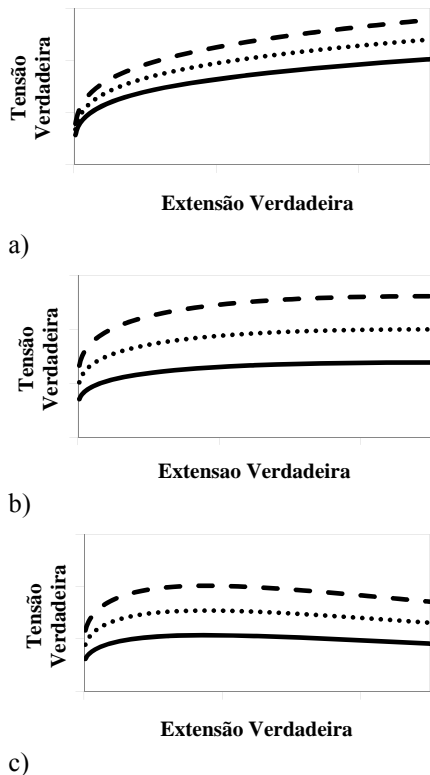


Fig. 7 - Aplicação da Equação 4 a três tipos distintos de comportamento mecânico com taxa de encruamento: a) positiva, b) nula (saturação da tensão de escoamento) e c) negativa (amaciamento da tensão de escoamento).

ajuste do valor dos coeficientes ($\sim 0, 0, e 1$) na Equação 4 (Tabela 2). A Figura 7 apresenta a utilização da Equação 4 para três comportamentos mecânicos dos materiais distintos do que são observados na prática dos ensaios mecânicos, fazendo notar a evolução da tensão verdadeira com taxa de encruamento negativa (Fig. 7c)).

Tabela 2 - Parametrização da Equação 4 para permitir reproduzir outros modelos constitutivos empíricos.

Modelo	Coefficientes nulos	Modelo
Ludwik	$A, C, m; r$	$\sigma = B \epsilon^n$
Voce	$C, n; r$	$\sigma = B \epsilon^n$
Johnson and Cook simplificada	$C, n; r$	$\sigma = (A + \epsilon^n)(B + \ln \dot{\epsilon})$

A Figura 8a) apresenta o ajuste tridimensional da Equação 4 aos dados experimentais, a 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).

A Figura 8b) compara os resultados obtidos neste trabalho com a metodologia adotada por Silva (2010), ($V_{comp} = cte$), concluindo-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 em cerca de 50%, bem como na morfologia das curvas tensão-extensão. A falta de uma concordância completa para a curva de escoamento em condições quasi-estáticas fica a dever-se a aspectos relacionados exclusivamente com aspectos matemáticos dos modelos de ajuste por se tratar de equações diferentes (Fig. 8b)).

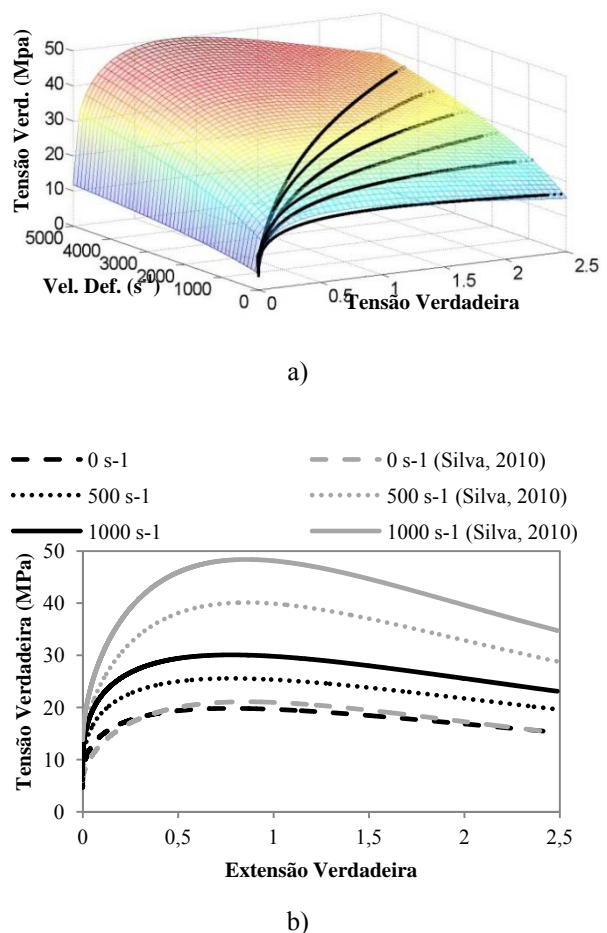


Fig. 8 - Comportamento mecânico do UNS L51120; a) Aplicação da Equação 4 e comparação com os dados experimentais, b) Comparação da Equação 4 com outro histórico de deformação (Silva, 2010).

4.3 - Simulação Numérica do Corte Ortogonal

A simulação numérica do corte ortogonal foi realizada no programa de elementos finitos I-Form2D (Martins, 2004) considerando o comportamento mecânico do UNS L51120 obtido no presente trabalho, enquanto os parâmetros operativos associados ao corte ortogonal foram mantidos constantes ($\alpha = 10^\circ$, $V_c = 6\text{m/min}$, $t_0 = 0.2\text{mm}$, $w = 20\text{mm}$, $\mu = 0.3$).

A Figura 9 apresenta a variação dos dois principais parâmetros tecnológicos do processo de corte ortogonal associados ao escoamento plástico da avara, o enrolamento da avara e o ângulo do plano de corte.

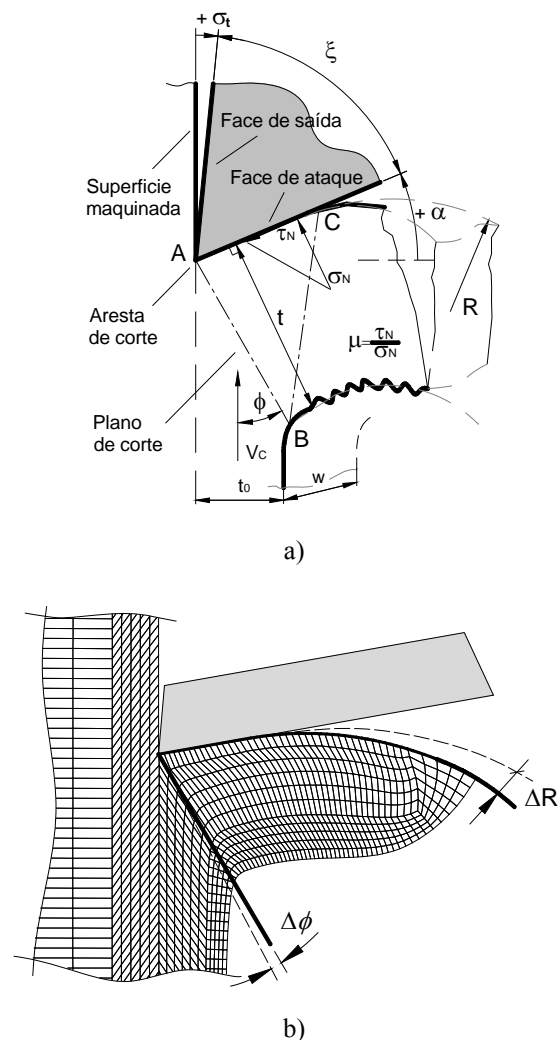


Fig. 9 - Simulação do corte ortogonal; a) descrição das principais variáveis, b) comparação da estimativa numérica do escoamento plástico obtido com base em (Silva, 2010; linha negrita) e no presente trabalho (linha tracejada).

Os resultados obtidos mostram que comparando as simulações realizadas com base na lei do material de (Silva, 2010) e com base na lei do presente trabalho existe uma diminuição do enrolamento da avara ($R + \Delta R$) e também do valor do ângulo do plano de corte ($\phi - \Delta \phi$) (Fig. 9b)).

5 - 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 um mecanismo que cumpre essa exigência, o qual, baseado no conceito de came linear permitiu realizar ensaios de compressão com um histórico de deformação específico. 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 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 avara.

Comparando os resultados obtidos com a metodologia adoptada por Silva (2010), conclui-se que o histórico de deformação tem uma importância fundamental na caracterização dos materiais, dado que uma pequena variação no seu perfil para a mesma velocidade de deformação média permite diferenças na tensão de escoamento em 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 implícitos neste estudo também estejam associados a esta diferença de valores na tensão de escoamento.

Com esta nova metodologia, através da substituição da came com um perfil adequado é possível reproduzir o histórico de deformação de diferentes processos de fabrico e/ou de máquinas de ensaios mecânicos. A utilização desta metodologia é importante para criar uma base de dados dos principais materiais utilizados em engenharia de modo a permitir melhorar a qualidade das simulações numéricas dos processos de fabrico, por substituição da tradicional barra de Hopkinson que não permite recriar o histórico de deformação dos materiais em condições de corte ortogonal.

6 - AGRADECIMENTOS

Os autores querem agradecer ao POCI-2011 e a FCT SFRH/BD/52513/2008 o apoio financeiro.

7 - REFERÊNCIAS

Anurag, S., 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*, Vol.49, pp.909-918.

Bil H., Kiliç S. 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*, Vol.44, pp.933-944.

Childs, T. H. C., 1998, "Material property needs in modeling metal machining, *Machining Science and Technology*", Vol.2, No.2, pp.303-316.

Chandrasekaran, H., M'Saoubi, R., Chazal, H., 2005, "Modelling of material flow stress in chip formation process from orthogonal milling and split hopkinson bar tests", *Machining Science and Technology*, Vol.9, No.1, pp.131-145

Guo, Y.B., 2003, "An integral method to determine the mechanical behavior of materials in metal cutting", *J. of Materials Processing Technology*, Vol.142, pp.72-81.

Jaspers, S.P.F.C., Dautzenberg, J.H., 2001, "Material behaviour in conditions similar to metal cutting: flow stress in the primary shear zone", *J. of Materials Processing Technology*, Vol.122, pp.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*, Vol.121, pp.577-585.

Martins P.A.F., Alves M.L. e Rodrigues J.M.C., 2004, "Three-dimensional modelling of forging processes by the finite element flow formulation", *Journal of Engineering Manufacture*, Vol.218, pp.1695-1708.

Moon, C. H., 1962, "Cam Design Manual for Engineers", *Designers and Draftsmen, Commercial Cam Division - Emerson Electric Company*.

Özel, T., Altan, T., 2000, "Determination of workpiece flow stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting", *Int. J. Machine Tools Manuf*, Vol.40, pp.133-152.

Rosa, P.A.R., Martins P.A.F., Atkins A.G., 2007, "Revisiting the fundamentals of metal cutting by means of finite elements and ductile fracture mechanics", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.47, No.3-4, pp.607-617.

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*, Vol.9, No.2, pp.271- 288.

Silva, C.M.A., Martins, P.A.F., Rosa, P.A.R., Bastos, A.J.R., 2008, "Actuador linear simultâneo de relutância magnética", *INPI-Portugal, Patente No.PT104165 (03-09-2008)*.

Silva, C.M.A., Rosa, P.A.R., Martins, P.A.F., 2010, "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, Vol.224, No.9.

Shatla, M., Kerk, C., Altan, T., 2001, "Process modeling in machining. Part I: determination of flow stress data", Int. J. of Machine Tools & Manufacture, Vol.41, pp.1511–1534.

Zheng, Y., Sutherland, J.W., 1999, "An orthogonal cutting model based on finite deformation analysis. Part II. Constitutive equations and experimental verification", ASME MED, Vol.10, pp.301–309;