

# ABERTURA DE NOVAS SUPERFÍCIES NO CORTE ORTOGONAL

Carlos M.A.Silva<sup>1</sup>, Pedro A.R.Rosa<sup>2</sup>, Paulo A.F.Martins<sup>3</sup>

<sup>1</sup>MSc. Investigador, <sup>2</sup>Prof. Auxiliar, <sup>3</sup>Prof. Catedrático  
Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico  
Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal  
pedro.rosa@ist.utl.pt



## Resumo

*Compreender o fenómeno físico da separação do material junto à aresta de corte é fundamental para entender os mecanismos de formação da apara e de geração de novas superfícies. Surpreendentemente, e apesar da evolução que o corte por arranque de apara tem vindo continuamente a registar no âmbito tecnológico e no domínio do desenvolvimento teórico e experimental, este assunto ainda não se encontra totalmente compreendido. Este artigo desenvolve-se em torno da caracterização e quantificação da energia consumida na abertura de novas superfícies (tenacidade à fractura) junto da aresta de corte. O trabalho experimental consistiu na caracterização da tenacidade à fractura do chumbo tecnicamente puro e o trabalho teórico consistiu na simulação numérica dos ensaios experimentais e na avaliação da capacidade preditiva das estimativas computacionais obtidas por intermédio do método dos elementos finitos. Os resultados obtidos permitiram quantificar a evolução da energia consumida na abertura de novas superfícies em função da velocidade de corte, parâmetro fundamental para avaliar a importância desta energia relativamente à energia total consumida nos processos de corte por arranque de apara.*

## 1 - INTRODUÇÃO

Os fundamentos teóricos em que assentam os mecanismos de formação de apara e de geração de novas superfícies são actualmente interpretados de duas maneiras distintas, Atkins (2006). A interpretação clássica considera que o mecanismo de formação de apara é, no essencial, um problema de plasticidade e de atrito e admite que a energia necessária para a abertura de novas superfícies é suficientemente baixa para poder ser desprezada, Shaw (1984). Esta interpretação decorre dos trabalhos pioneiros de Piispanen (1937), Ernst e Merchant (1941) e Lee e Shaffer (1951) e

está implícita em algumas das principais contribuições fenomenológicas para a compreensão da mecânica do corte por arranque de apara que foram efectuadas por Zorev (1966), Shaw (1984) e Oxley (1989). A visão clássica é também aquela que é habitualmente leccionada nas unidades curriculares de corte por arranque de apara que constam dos curricula universitários e politécnicos.

A interpretação alternativa, não-tradicional e controversa, considera a abertura de fissuras e a formação de novas superfícies junto da aresta de corte como aspectos fundamentais para a compreensão do mecanismo de formação da apara,

Atkins (2003). Admite que a energia consumida na abertura das novas superfícies (designada por tenacidade à fractura,  $R$ ) é significativa, podendo alcançar valores da ordem de grandeza dos  $kJ/m^2$ , ou seja, valores muito superiores aos  $J/m^2$  típicos dos fenómenos de tensão superficial e que estão na base da interpretação clássica.

A aceitação de um mecanismo de formação de aparas exclusivamente baseado na teoria da plasticidade e no atrito parece ser, em primeira análise, a opção mais conveniente tendo em consideração o elevado número de trabalhos científicos que têm vindo a ser publicados com base neste pressuposto e o facto de ser utilizada por autores de renome internacional no domínio do corte por arranque de aparas.

No entanto, o historial de publicações científicas internacionais no domínio dos fundamentos do corte por arranque de aparas encontra inúmeros registos de trabalhos que identificam dificuldades e incoerências na aplicação dos modelos teóricos construídos com base na interpretação clássica. Citam-se como exemplo os trabalhos Watkins e Wilkinson (1957), Chisholm e McDougall (1952), Pugh (1958), Creveling, Jordan e Thomsen (1957) e Astakov (2005). Indirectamente, chega-se à mesma conclusão quando se procuram utilizar programas de simulação numérica construídos com base na interpretação clássica dos fundamentos do corte por arranque de aparas, Tekkaya (2004).

Recentemente foi demonstrado por Rosa e colaboradores (2007) que quando a energia de abertura de novas superfícies junto da aresta de corte é devidamente contabilizada nos modelos computacionais de elementos finitos, as estimativas passam a reproduzir com exactidão as observações e medições experimentais. O trabalho foi realizado em condições ‘quasi-estáticas’ de forma a eliminar os efeitos decorrentes da temperatura e da velocidade de deformação e, desta forma, permitir focalizar a investigação no fenómeno de abertura de

novas superfícies junto da aresta de corte da ferramenta. A simulação numérica foi realizada com base num programa de elementos finitos especificamente desenvolvido para o efeito e os dados de entrada relativos ao comportamento mecânico do material e ao atrito, foram obtidos com base em procedimentos de caracterização experimental independentes dos ensaios de corte por arranque de aparas. A energia necessária à formação de novas superfícies foi contabilizada de um modo desacoplado após a finalização da simulação numérica.

Apesar dos bons resultados alcançados por Rosa e colaboradores (2007) no âmbito ‘quasi-estático’ existe a necessidade de se proceder à quantificação desta energia para valores de velocidade de deformação mais elevados.

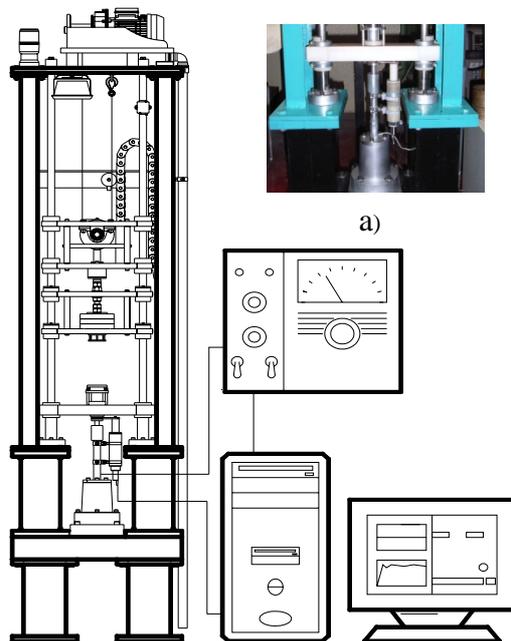
O presente trabalho está orientado para a avaliação da energia consumida na abertura de novas superfícies, junto da aresta de corte, em condições de velocidade de deformação próximas das que são correntemente utilizadas na indústria. O conhecimento deste valor e da sua evolução em função da velocidade de deformação é imprescindível para uma correcta previsão das forças de corte e importante para obter uma boa distribuição final de tensões e deformações. De facto, a contabilização da energia consumida na abertura de novas superfícies directamente nos modelos teóricos de corte por arranque de aparas, à semelhança do que é efectuado com a lei de comportamento do material e com o modelo de atrito, permitirá resolver algumas das questões que ainda estão em aberto relativamente à simulação numérica do processo.

## 2 – RECURSOS EXPERIMENTAIS

O trabalho experimental envolveu a utilização de uma prensa hidráulica e de um martelo de queda. A prensa hidráulica tem uma capacidade de 500KN e encontra-se instrumentada com um sistema piezo-eléctrico para medição de forças e um transdutor linear indutivo para medição de

deslocamentos. O martelo de queda, totalmente concebido, projectado e fabricado no âmbito deste trabalho (Fig 1), permite efectuar a caracterização mecânica de materiais a velocidades mais elevadas (na gama de 1 a 10 m/s), e complementa a caracterização mecânica que é efectuada por intermédio da prensa hidráulica (que apenas permite alcançar velocidades de actuação inferiores a 0.1 m/s).

Foi igualmente concebida, projectada e fabricada uma ferramenta tipo punção/matriz adequada aos ensaios de corte e de compressão. Esta ferramenta está instrumentada com uma célula de carga baseada numa ponte extensométrica e com um transdutor de deslocamento do tipo indutivo. Foram desenvolvidos vários procedimentos para a monitorização e o registo dos valores experimentais tendo a aquisição de dados sido efectuada por intermédio de um programa especialmente desenvolvido em ambiente LabView.



**Fig 1** – Aparato experimental utilizado nos ensaios de fractura realizados no martelo de queda e representação esquemática da instrumentação utilizada na caracterização da fractura; a) zona de ensaio.

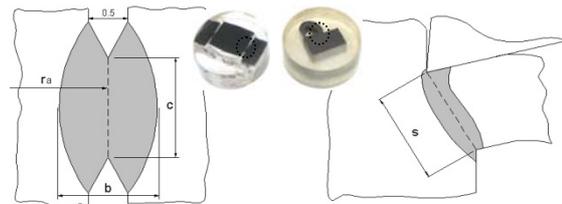
Os ensaios foram conduzidos em provetes de chumbo tecnicamente-puro (99.9%), de modo a aproximar o

comportamento mecânico do material a ensaiar dos requisitos rígido perfeitamente plásticos exigidos pelos modelos analíticos de corte por arranque de apar. De facto, os valores obtidos vão, na continuação do trabalho experimental que tem vindo a ser desenvolvido, servir de suporte a simulações numéricas com base no método dos elementos finitos.

A caracterização mecânica do chumbo tecnicamente puro foi obtida a partir de ensaios de compressão realizados à temperatura ambiente com diferentes velocidades de deformação ( $0.02s^{-1} < \dot{\epsilon} < 3000s^{-1}$ ). A relação entre a altura e o diâmetro iniciais dos provetes cilíndricos,  $H_0/D_0$ , foi mantida constante e igual a 1.5 em todos os ensaios e a lei de comportamento foi aproximada por intermédio de um modelo de Voce (Rodrigues e Martins (2005)) modificado da forma a seguir indicada,

$$\sigma = 19.765 \cdot \dot{\epsilon} - 11.934 \cdot \dot{\epsilon}^{0.0691} \times e^{-(0.4581 \times \ln(\dot{\epsilon}) + 6.1533) \times \dot{\epsilon}} \quad (1)$$

A geometria dos provetes de factura foi optimizada por intermédio de elementos finitos, Rosa (2007), de forma a permitir reproduzir os campos de tensões e deformações característicos do corte ortogonal (Fig 2).

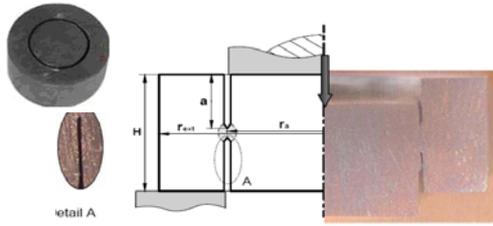


**Fig 2** – Comparação entre a zona de deformação plástica do provete de fractura cilíndrico duplamente entalhado e a zona em deformação plástica adjacente ao plano de corte  $s$  durante o mecanismo de formação de apar.

### 3 – TENACIDADE À FRACTURA

A tenacidade à fractura do chumbo tecnicamente-puro,  $R$ , foi avaliada através da realização de ensaios de corte em provetes cilíndricos duplamente entalhados (Fig 3).

Os ensaios tiveram como principal objectivo determinar a evolução da força



Detalhe A: simetria dos provetes usados na caracterização da tenacidade à fractura ( $r_a = 8.5mm$ ;  $H = 12.3mm$ ;  $r_{ext} = 15mm$ ). O lado direito da figura representa um provete deformado após o ensaio.

em função do deslocamento do punção e foram realizados fazendo variar a velocidade  $v$  (0.001, 1, 2, 4, 6 e 10 m/s) e a espessura de ligação entre os entalhes dos provetes,  $c$  (Fig 4 e 5).

A tenacidade à fractura (Fig 6) foi obtida a partir da energia calculada a partir da evolução

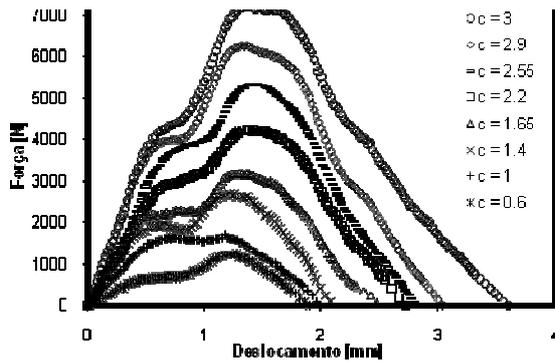


Fig 4 – Evolução experimental da força vs deslocamento para diferentes valores de  $c$  utilizados no ensaio de corte com uma velocidade igual a 10 m/s.

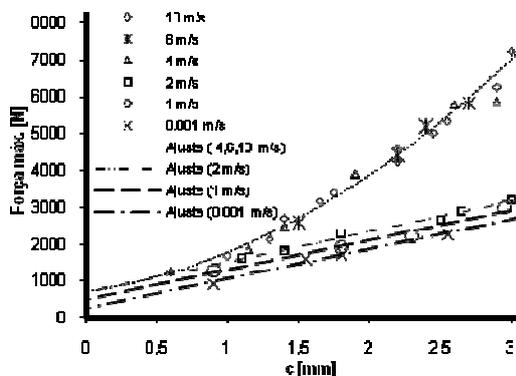


Fig 5 – Evolução das forças máximas em função da espessura de ligação  $c$  para as diferentes velocidades em que se realizaram os ensaios.

da força com o deslocamento e baseia-se no pressuposto que a formação e a propagação da fissura têm início no instante de força máxima por intermédio de tensões de corte (modo de abertura tipo II). Desta forma, o instante de força máxima fica associado a uma quantidade de energia necessária e suficiente para a formação de novas superfícies (tenacidade à fractura  $R$ ) a qual pode ser obtida a partir da seguinte equação,

$$R = \frac{W}{2\pi r_a c} \quad [KJ/m^2] \quad (2)$$

em que  $c$  é a espessura de ligação entre entalhes,  $r_a$  o raio interior e  $W$  é a energia necessária para iniciar a propagação da fissura, calculada por intermédio da integração da curva força-deslocamento até ao instante de força máxima.

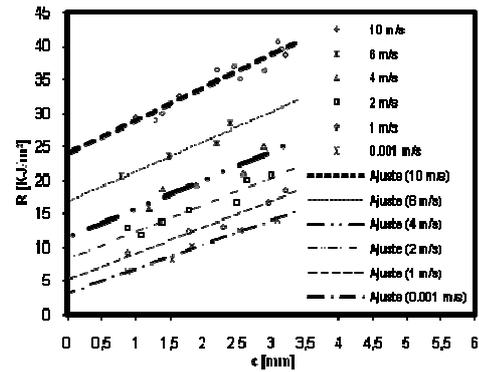


Fig 6 – Evolução da tenacidade à fractura  $R$  em função da espessura de ligação  $c$  para as diferentes velocidades em que se realizaram os ensaios

A combinação dos resultados experimentais anteriores permite escrever a equação da energia necessária à abertura de novas superfícies em função da velocidade de ensaio, da forma a seguir indicada,

$$R(v) = -0.0325 \times v^2 + 2.4208 \times v + 3.0927 \quad (3)$$

#### 4 – APLICABILIDADE DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

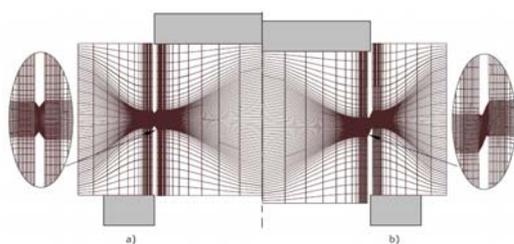
A simulação numérica dos ensaios de fractura dúctil foi baseada na aplicação do método dos elementos finitos desenvolvido em torno da teoria da plasticidade. O

trabalho teve por objectivo principal proceder a uma avaliação da forma como a interpretação clássica do mecanismo de corte pode ser utilizado na modelação de processos de fabrico onde intervêm a abertura de novas superfícies.

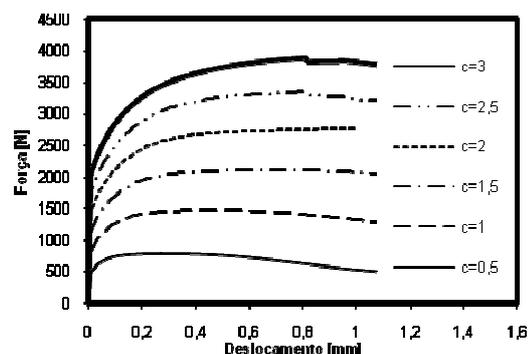
A simulação numérica foi efectuada no programa de elementos finitos I-FORM2 onde foi introduzido o comportamento mecânico do chumbo tecnicamente-puro (Eq 1). A axissimetria dos provetes de fractura permitiu utilizar um modelo computacional 2D da secção de revolução (Fig 7), com benefício no tempo de cálculo. A geometria dos provetes foi discretização em malha estruturada com elementos quadriláteros de quatro nós e a interface de contacto com a ferramenta através de elementos de contacto-atrito.

As estimativas numéricas foram obtidas fazendo variar os principais parâmetros do ensaio (espessura da ligação entre entalhes  $c$  e velocidade do ensaio  $v$ ) de uma forma análoga ao que tinha sido estipulado no plano experimental facilitando, desta forma, a comparação entre valores teóricos e experimentais.

Embora fosse espectável uma diminuição abrupta da estimativa numérica da evolução da força com o deslocamento a partir do instante de carga máxima, este facto não se verifica em virtude do programa de elementos finitos não possuir um algoritmo de abertura automática de malhas que permita viabilizar a propagação das fissuras (Fig 8). Este facto, embora impeça a simulação completa do ensaio experimental, não apresenta qualquer



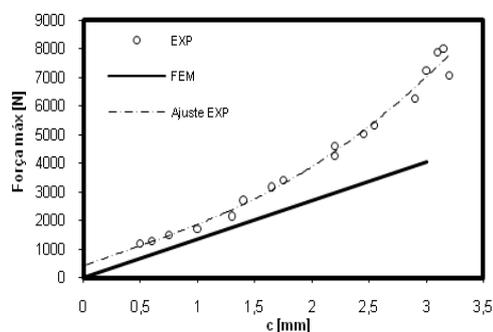
**Fig 7** – Modelo de elementos finitos utilizado na simulação numérica dos provetes entalhados ( $c = 1$  mm) com uma velocidade de ensaio de 0,001 m/s; a) instante inicial; e b) após uma compressão equivalente a um deslocamento de 0.6 mm e correspondente ao pico de carga máxima experimental.



**Fig 8** – Simulação numérica da força vs deslocamento para os diferentes valores de  $c$  utilizados no ensaio de corte para uma velocidade de ensaio igual a 10 m/s.

problema para os objectivos que se pretendem alcançar na medida em que apenas interessa efectuar a simulação numérica até ao instante correspondente ao início da fissuração (valor de força máxima).

Apesar da correlação entre os resultados teóricos e experimentais ser aceitável para a maioria das variáveis, regista-se uma diferença significativa relativamente ao valor das forças, confirmada para os diferentes níveis de velocidade do ensaio, (ex. Fig 9 para 10m/s). Esta subestimativa da evolução da força com o deslocamento da ferramenta por parte do programa de elementos finitos fica a dever-se à inexistência de um procedimento numérico que permita contabilizar a energia associada à formação de novas superfícies na formulação de elementos finitos que serve de suporte ao programa.



**Fig 9** – Comparação das forças máximas obtidas nos ensaios experimentais de fractura com as verificadas na simulação numérica (10m/s)

## 5 – CONCLUSÕES

A investigação realizada no âmbito deste trabalho permitiu efectuar uma análise do comportamento à fractura do chumbo tecnicamente puro e, em particular, permitiu quantificar a evolução da tenacidade à fractura com a velocidade do ensaio de caracterização experimental (equivalente à velocidade no plano de corte no corte ortogonal).

O trabalho efectuado permitiu igualmente comparar as previsões teóricas fornecidas pelas formulações clássicas de elementos finitos, exclusivamente construídas com base na teoria da plasticidade, com os resultados obtidos experimentalmente. Conseguiu-se, desta forma, demonstrar a importância que a energia de formação de novas superfícies tem na modelação de processos tecnológicos onde a fissuração faz parte integrante do processo. Este facto, releva a importância de estender as actuais formulações de elementos finitos de forma a integrar os aspectos fenomenológicos relacionados com a tenacidade à fractura. Este aspecto vai ser objecto de atenção e de investigação no âmbito do trabalho que está perspectivado no curto-médio prazo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores querem agradecer o apoio financeiro do POCI-2010 e do projecto PTDC/EME-TME/64575/2006, FCT Portugal.

## REFERÊNCIAS

Atkins A. G., Toughness and oblique machining, *J. Manuf. Sci. & Tech.*, Trans. ASME, May 2006.

Shaw M. C., *Metal cutting principles*, Clarendon Press, Oxford, 1984.

Piispanen V., *Teknillinen Aikakaushetti*, 27, 315-322, 1937.

Ernst H. and Merchant M. E., Chip formation, friction and high quality machined surfaces, *Trans. ASME*, 29, 299-378, 1941.

Lee E. H. and Shaffer B. W., The theory of plasticity applied to a problem of machining, *J.App. Mech. Trans.*, ASME, 73, 405-413, 1951.

Zorev N., *Metal cutting mechanics*, Pergamon Press, Oxford, 1966.

Oxley P.L. B., *Mechanics of machining: An analytical approach to assessing machinability*, John Wiley & Sons, New York, 1989.

Atkins A. G., Modelling metal cutting using modern ductile fracture mechanics: quantitative explanations for some longstanding problems, *Int. J. Mech. Sci.*, 45, 373-396, 2003.

Watkins M.T. and Wilkinson P., Plasticity report No. 125, *Mech. Engng. Res. Lab.*, 1957.

Chisholm A.J. and McDougall W.M., Plasticity report No. 61, *Mech. Engng. Res. Lab.*, 1952.

Pugh H., Li D., “Mechanics of metal cutting process”, *Proc. IME Conf. Tech. Eng.Manufacture*, London, 237-254, 1958.

Creveling J.H., Jordan T. and Thomsen E.G., “Some studies on angle relationship in metal cutting”, *Trans. ASME*, vol.79, No.1 (section 1), 127-138, 1957.

Astakhov V., On the inadequacy of the single-shear plane model of chip formation, *Int.J. Mech. Sci.*, 47 1649-1672, 2005.

Bil H., Kiliç S. E. And Tekkaya A. E., A comparison of orthogonal cutting data from experiments with three different finite element models, *Int. J. Mach. Tools & Manuf.*, 44, 933-944, 2004.

Rosa P. A. R., Martins P. A. F. and Atkins A. G., Revisiting the fundamentals of metal cutting by means of finite elements and ductile fracture mechanics, *Int. J. Mach. Tools & Manuf.*, 47, 607–617, 2007.

Rosa P.A.R., “Theoretical and Experimental Modelling of Orthogonal Metal Cutting”, PhD Dissertation, Technical University of Lisbon, June, 2007.

Rodrigues J.M.C., Martins P.A.F., “Tecnologia da deformação plástica, Vol. I. Fundamentos teóricos”, Escolar Editora, Portugal, 2005.