

# AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA CONDIÇÃO TRIBOLÓGICA NO CORTE ORTOGONAL

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

<sup>1</sup>MSc. Téc. Lab, <sup>2</sup>Prof. Auxiliar, <sup>3</sup>Prof. Catedrático

Departamento de Engenharia Mecânica, IST, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal



## RESUMO

*Este trabalho desenvolve-se no domínio da tribologia e está orientado para a compreensão e para a quantificação do atrito envolvido no escoamento da apara durante o corte ortogonal. Os ensaios experimentais foram realizados em provetes de chumbo tecnicamente-puro com ferramentas de aço AISI 304L, e consistiram na avaliação do atrito por intermédio de medições directas na ferramenta de corte e através de ensaios tribológicos tradicionais e independentes do processo tecnológico. Pretende-se com este procedimento comparativo identificar os ensaios tribológicos que permitam obter as melhores estimativas do atrito durante o mecanismo de formação da apara. Os resultados experimentais mostraram diferenças significativas entre as estimativas dos ensaios tribológicos e as medidas obtidas directamente no processo tecnológico. Esta diferença motivou o desenvolvimento de um equipamento de caracterização tribológica do tipo pino-no-disco alternativo que permitiu consubstanciar os objectivos da investigação.*

## 1- INTRODUÇÃO

O mecanismo de formação de apara envolve um conjunto de fenómenos físico-químicos que ocorrem num volume de material reduzido e de difícil observação. Destes fenómenos, tem especial relevo o do atrito entre a superfície recém-formada e a face de ataque da ferramenta. Astakhov (2006) afirmou que a formação da apara representa entre 30 a 50% da energia total consumida, levando a que os restantes 70 a 50% sejam associados a fenómenos tribológicos. Por outras palavras, a maior parte da energia é consumida para vencer o atrito durante o escoamento da apara conduzindo a aumentos significativos da temperatura das ferramentas. No entanto, e apesar de grande parte desta energia ser dissipada por atrito, verifica-se que a generalidade dos trabalhos de investigação continuam a privilegiar a energia consumida na deformação plástica, dando

menor importância aos aspectos tribológicos do corte por arranque de apara.

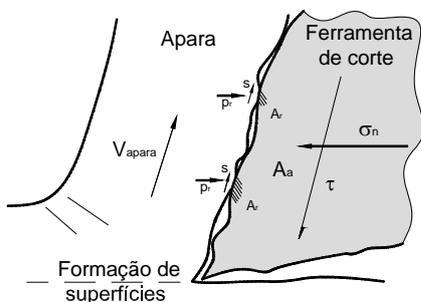
Por outro lado, os trabalhos desenvolvidos no domínio da tribologia no corte por arranque de apara estão, na sua generalidade, relacionados com o desgaste e o tempo de vida das ferramentas. Em face do exposto, existe pouca informação disponível sobre a caracterização das condições tribológicas na interface de contacto entre o material e a ferramenta, onde a utilização do coeficiente de atrito é, infelizmente e quase sempre, interpretada como um parâmetro de afinação da modelação numérica e analítica segundo Tekkaya (2004) e Astakhov (2006).

A modelação do atrito na interface de contacto entre o material e a ferramenta é um aspecto determinante para a qualidade das estimativas obtidas através da simulação numérica do corte por arranque de apara, interessa portanto avaliar quais

os ensaios de caracterização tribológica permitem obter as melhores estimativas independentes do atrito, à semelhança do que acontece com os ensaios de caracterização do comportamento mecânico dos materiais. Neste sentido, o presente trabalho tem por objectivo proceder a uma análise e discussão em torno da possibilidade de aplicação de alguns ensaios tribológicos tradicionais na avaliação do atrito durante o mecanismo de formação de avara.

## 2- FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Vários autores, entre os quais Ernst e Merchant (1941), Green (1952) e Finnie (1956), têm sugerido que o atrito na face de ataque é o resultado de várias contribuições das quais destacam a interferência mecânica das asperezas superficiais (Fig.1). Esta situação tem contribuído para que a modelação do atrito no corte por arranque de avara se baseie quase exclusivamente na utilização de modelos teóricos de deformação plástica de asperezas.



**Fig 1** - Representação esquemática da interface de contacto entre a avara e ferramenta no corte ortogonal.

Como nos processos de corte por arranque de avara, a área de contacto real  $A_r$ , entre a avara e a ferramenta de corte, é inferior à área de contacto aparente  $A_a$ , pode-se calcular o valor da força de atrito total  $F_a$  por intermédio da aproximação clássica proposta por Coulomb (1875),

$$F_a = \mu \cdot F_N \quad (1)$$

Esta aproximação faz intervir uma proporcionalidade directa entre o valor da força de atrito  $F_a$ , exercida no sentido oposto ao do movimento, e o valor da força normal à superfície de contacto,  $F_N$ . A constante de proporcionalidade  $\mu$  é designada de coeficiente de atrito e pode, alternativamente, ser expressa em termos das tensões de corte  $\tau$  e normal  $\sigma_n$  que se encontram aplicadas na interface de contacto,

$$\tau = \mu \cdot \sigma_n \quad (2)$$

Quando o valor da pressão aplicada na interface é elevada, as asperezas deformam-se, entram em contacto umas com as outras e podem até misturar-se em resultado dos mecanismos de deformação plástica em que incorrem. Nestas circunstâncias a interacção entre asperezas vizinhas não deverá ser vista isoladamente na medida em que a área real de contacto  $A_r$  se aproxima da área aparente  $A_a$ . Esta situação leva a que a modelação do atrito se passe a efectuar por intermédio de um mecanismo alternativo em que se assume que o valor da tensão de corte  $\tau$  devida ao atrito é independente do valor da pressão normal na interface de contacto material/ferramenta e proporcional ao valor da tensão de corte máxima  $k$  do material,

$$\tau = m \tau_{\max} = mk \quad (3)$$

em que  $m$  se designa por factor de atrito e varia entre 0 (condições de atrito nulo) e 1 (quando ocorre o fenómeno da adesão). O valor de  $m$  deverá ser calibrado para o par material/ferramenta em condições operativas específicas.

Para permitir modelar as baixas e altas pressões de contacto que existem ao longo da superfície da ferramenta, Shaw (1984), Shirakashi e Usui (1982) propuseram uma solução mista (Eq. 4) baseada nos dois modelos referidos anteriormente,

$$\tau = mk \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\mu \sigma_n}{mk}\right) \right] \quad (4)$$

Estudos posteriores confirmaram a necessidade de ajustar a taxa de variação de  $\tau$  e  $\sigma_n$ , em termos médios, através da equação 5.

$$\tau = mk \left[ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\mu \sigma_n}{mk} \right)^{n^*} \right] \right]^{1/n^*} \quad (5)$$

em que o termo  $n^*$  pode variar de 1 a 3 e é calibrado por intermédio de ensaios experimentais. No limite, é possível obter-se um coeficiente de atrito teórico máximo igual a 0.577. Esta equação tem sido amplamente utilizada na modelação numérica do corte por arranque de apara através do método dos elementos finitos.

### 3- TÉCNICAS DE QUANTIFICAÇÃO DO ATRITO

Desde o plano inclinado de Leonardo da Vinci que muitas metodologias têm vindo a ser desenvolvidas para caracterizar e quantificar o atrito, na medida em que o seu comportamento depende, não só das propriedades dos materiais, mas também do modo de aproximação, do contacto e da interacção entre as superfícies (Blau 1996). Algumas destas metodologias de caracterização e quantificação do atrito constam das normas ASTM e do comité D-2, (Booser 1985) casos por exemplo dos ensaios de anel (ASTM D 2714) e de pino-no-disco (ASTM G99-95a).

No corte por arranque de apara, as técnicas experimentais utilizadas para avaliar o atrito têm igualmente vindo a evoluir ao longo do tempo. Merecem destaque os modelos de plasticina utilizados por Green (1952), as ferramentas com comprimento de contacto controlado (nas faces de ataque e de saída) desenvolvidas por Kobayashi (1959) e as técnicas que fazem intervir ferramentas em material fotoelástico propostas por Chandrasekeran (1965). De entre os métodos descritos nas normas ASTM, é habitual considerar que os mais utilizados para recriar as condições de atrito na

maquinagem são o ensaio de pino-no-disco e o ensaio de anel (Male 1964).

Resultados experimentais obtidos por vários investigadores dos quais se destacam Kato e colaboradores (1972), Shirakashi e Usui (1973) e Childs (1990), mostram que o coeficiente de atrito no corte por arranque de apara para ângulos de ataque reduzidos pode facilmente atingir valores entre 0.5 e 1.0 ou, até mesmo, valores superiores. Esta é uma questão interessante, pois com base na teoria da plasticidade clássica o coeficiente de atrito máximo deveria ser inferior a 0.577 (valor correspondente à tensão de corte crítica determinada a partir do critério de plasticidade de von Mises). Poucas tentativas têm vindo a ser realizadas para explicar esta falta de consistência na teoria, excepção feita a Bay e Wanheim (1976) que indicaram o fenómeno de adesão como uma possível explicação para a origem do problema.

### 4- DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

O trabalho experimental consistiu na avaliação do coeficiente de atrito durante os ensaios de corte ortogonal e na correlação do valor obtido com os que resultam da utilização de técnicas tradicionais de caracterização tribológica (ensaio de anel e ensaio de pino-no-disco). Os ensaios experimentais foram realizados em condições ‘quasi-estáticas’ de modo a minimizar o efeito da velocidade de deformação e do aumento de temperatura, permitindo focar a investigação exclusivamente no fenómeno de atrito. Os ensaios foram realizados com atrito seco (sem lubrificação) em condições próximas da realidade industrial devido à dificuldade que existe em lubrificar a área de contacto entre o material e a ferramenta de corte durante os processos de corte por arranque de apara.

Para realizar os ensaios foi utilizada uma prensa hidráulica, instrumentada com sensores piezo-eléctricos, na qual foram montadas ferramentas especificamente

construídas para assegurar os objectivos do trabalho. O trabalho envolveu igualmente a concepção e fabrico de uma máquina de ensaios pino-no-disco de características específicas para a avaliação do coeficiente de atrito no corte por arranque de apara.

Os provetes utilizados nos ensaios experimentais foram fabricados em chumbo tecnicamente-puro, devido ao seu comportamento mecânico ser próximo ao rígido-perfeitamente plástico, utilizado nos modelos teóricos do corte ortogonal. As ferramentas foram fabricadas em aço AISI 304L com acabamento superficial bem controlado ( $R_a \leq 8 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ ).

Os ensaios de corte ortogonal (Fig.2.a) foram realizados com uma ferramenta de corte com um ângulo de ataque ( $\alpha$ ) nulo e com um ângulo de saída igual a  $5^\circ$ , de modo a permitir medir directamente a força normal e tangencial à face de ataque da ferramenta. A velocidade de corte foi mantida constante a 0.05 m/min.

Os provetes utilizados nos ensaios foram dimensionados de modo a garantir que o corte se processava em condições de deformação plana em regime estacionário. Os provetes utilizados tinham uma geometria paralelepípedica com dimensões de 90x24x50mm e a espessura de corte variou entre 0.025mm e 0.1mm. Os provetes foram montados sobre um sensor piezoeléctrico tridimensional (Kistler 9257B), que permitiu avaliar as forças de penetração e de corte, permitindo assim obter o respectivo coeficiente de atrito:

$$\mu = F_p / F_c \quad (6)$$

O sistema de pino-no-disco (Fig.2.b) desenvolvido pelos autores permitiu obter a evolução do atrito para valores de carga normal entre 10 e 1000 N. Os provetes utilizados neste tipo de ensaio têm geometria cilíndrica com diâmetro igual a 8 mm. As forças desenvolvidas são adquiridas a partir de uma célula de carga bidimensional projectada especificamente para esta máquina de ensaios.

Nos ensaios de anel (Fig.2.c) as dimensões iniciais do provete foram

especificadas de modo a seguir a proporção sugerida na literatura da especialidade (Male 1964) indicando uma relação de  $D_0; d_0; h_0$  com 12; 6; 8 mm, respectivamente.

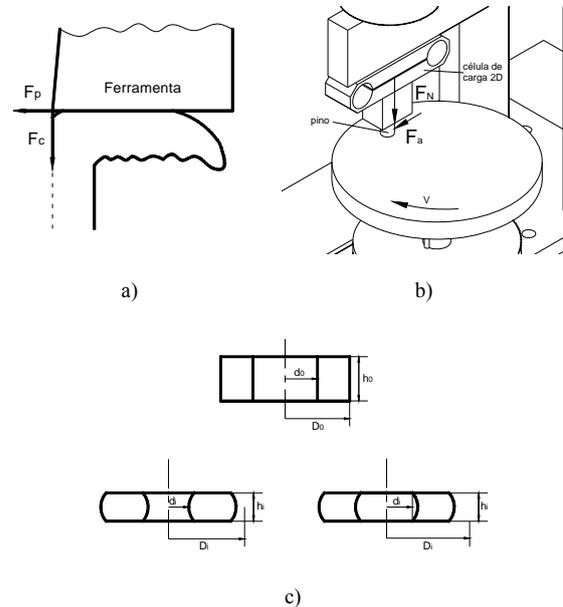


Fig 2- Tipos de ensaios realizados: a) medição directa no processo de corte; b) pino-no-disco; c) anel.

O trabalho experimental envolveu ainda a realização de ensaios alternativos realizados num sistema de pino-no-disco modificado através da introdução de uma ferramenta de corte (Fig.3). Esta montagem, de cariz inédito, possibilita a avaliação da variação da força de atrito antes e após a presença de superfícies recém-formadas, não-oxidadas.

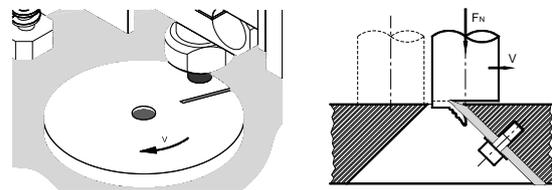


Fig 3- Detalhe da alteração da máquina de ensaio do pino-no-disco.

A rugosidade superficial do disco foi controlada através de um rugosímetro de contacto Kosaka Lab. SE-1200, medido na direcção do movimento do pino, obtendo o valor para a rugosidade média aritmética

( $R_a$ ) de  $0.1 \mu\text{m}$ . A velocidade linear também foi mantida constante, com o valor de  $0.1 \text{ m/min}$ .

A célula de carga bidimensional projectada e fabricada especificamente para os ensaios, é fixa no suporte do pino e ligada à unidade de amplificação de sinal (Vishay 2100). Um computador pessoal permite fazer a aquisição de dados através de uma placa NI PCI-6025E e de um programa desenvolvido em Labview. Durante os ensaios foram monitorizados os valores experimentais da força normal e da força tangencial, cuja relação permite obter o valor do coeficiente de atrito (Eq.1).

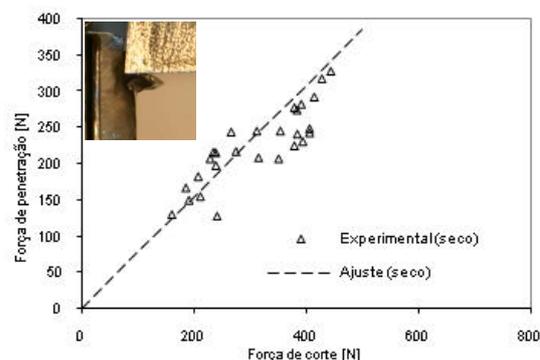
O plano de ensaios foi estruturado de forma a permitir a avaliação comparativa das estimativas obtidas dos diferentes ensaios tribológicos tradicionais com o processo de corte por arranque de aparas.

### Resultados e discussão

A avaliação directa do coeficiente de atrito no corte ortogonal, através da medição das forças normal e tangencial à face de ataque da ferramenta (Fig.4), permitiu obter um valor igual a  $0.77$  (Tab.1). Este valor situa-se acima do limite teórico ( $0.577$ ) previsto pelos modelos de atrito baseados na interferência mecânica de asperezas que são correntemente utilizados na modelação do corte por arranque de aparas. Esta constatação é partilhada por diversos autores na literatura da especialidade (Astakov, 2006).

As estimativas do coeficiente de atrito obtidas através dos ensaios de caracterização tribológica referidas anteriormente (ensaio de anel (Fig.5) e de pino-no-disco (Fig.6)) apresentam valores concordantes (Tab.1) mas ambos os ensaios parecem subestimar (abaixo de  $0.2$ ) significativamente o valor real do coeficiente de atrito obtido nos ensaios de corte ortogonal.

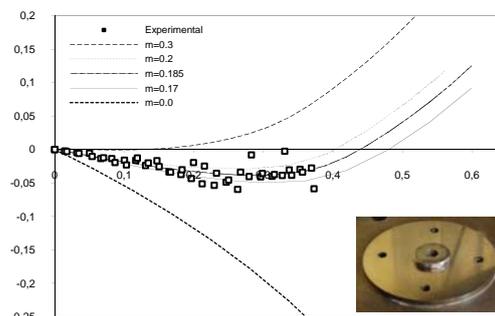
As diferenças encontradas entre a medição directa no processo e as estimativas obtidas a partir de técnicas independentes ficam a dever-se, no essen-



**Fig 4** - Relação entre a força de corte e a força de penetração ao longo da face de ataque da ferramenta de corte ( $\alpha = 0^\circ$ ).

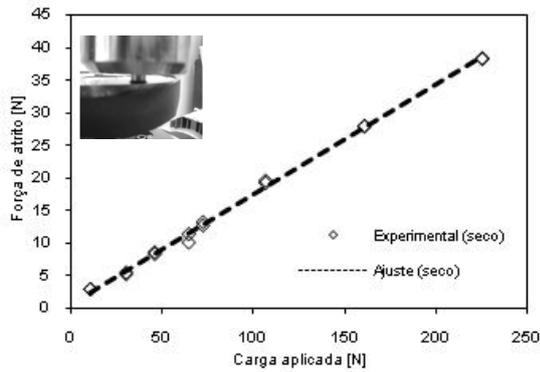
cial, a alterações nas condições tribológicas na interface de contacto. No entanto, é entendimento dos autores que uma das principais diferenças estará muito provavelmente relacionada com o estado da superfície recém-formada, ainda não-oxidada, limpa e quimicamente activa, junto da aresta de corte. Esta condição, associada às elevadas pressões típicas da zona de contacto, promove a existência de fenómenos de adesão, elevando o valor do coeficiente de atrito.

A verificação desta hipótese foi consubstanciada através das modificações no equipamento experimental de pino-no-disco que foram referidas na secção anterior e que permitem avaliar a influências das superfícies recém-geradas.



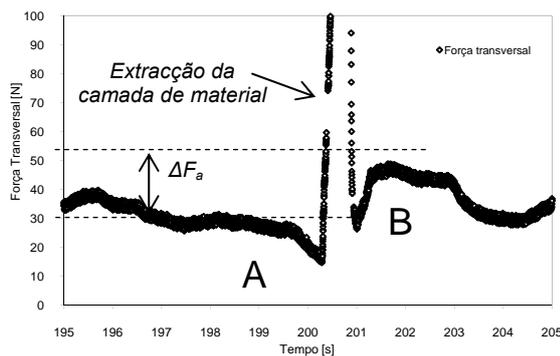
**Fig 5** - Curvas de calibração do factor de atrito ( $m$ ) e resultados experimentais do ensaio de anel.

A introdução de uma lâmina de corte no disco permite remover a fina camada de material oxidada e expor uma superfície recém-formada e não-oxidada do material.



**Fig 6-** Relação entre a carga aplicada e a força de atrito nos ensaios de pino-no-disco.

Observa-se que nestas condições (Fig.7), o valor do coeficiente de atrito aumenta para mais do dobro (0.47 na Tab.2), aproximando-se um pouco mais dos valores que tinham sido observados nos ensaios de corte ortogonal (Tab.1). No entanto, apesar da estimativa obtida ter melhorado significativamente, ainda se verificam divergências substanciais relativamente ao valor absoluto do coeficiente de atrito. Mesmo em condições controladas de atrito seco, existem outras contribuições não contabilizadas, como por exemplo o meio envolvente, composto por uma mistura de gases que formam a atmosfera terrestre, que pode influenciar o valor do coeficiente de atrito.



**Fig 7-** Ensaio do pino no disco (ciclo) antes (A) e depois (B) da presença de superfícies recém-gerada, limpa e não oxidadas para uma carga normal de 106.4 N.

**Tabela 1-** Tabela resumo comparativa dos resultados obtidos nos diferentes tipos de ensaios.

	Pino-no-disco	Ensaio do anel	Pino-no-disco com corte	Ensaio corte
$\mu$	0.17	0.19	0.47	0.77

**Tabela 2-** Tabela resumo comparativa dos resultados obtidos antes e depois da presença de superfícies recém-geradas não-oxidadas.

	Antes do corte	Após o corte	Variacão
$F_a$ (N)	$\approx 20$	$\approx 50$	$\Delta F_a \approx 30$
$\mu$	0.189	0.472	$\Delta\mu \approx 0.283$

## CONCLUSÕES

A modelação numérica do corte ortogonal por intermédio do método dos elementos finitos exige modelos teóricos de atrito que permitam caracterizar eficazmente os fenómenos tribológicos entre a apara e a ferramenta de corte.

A investigação que tem vindo a ser efectuada foi orientada para a compreensão e quantificação das forças de atrito durante o corte ortogonal. Os resultados obtidos permitem concluir que o atrito não deve ser apenas caracterizado com base nas propriedades dos materiais envolvidos em virtude de existirem fenómenos de superfície que também devem ser tidos em consideração. De facto, a presença de superfícies recém-formadas e não-oxidadas parece contribuir no aumento significativo (em alguns casos superiores a 100%) do valor do coeficiente de atrito obtido por intermédio de ensaios de pino-no-disco convencionais. No entanto, ainda se verificam desvios significativos entre os valores calibrados através deste novo tipo de ensaio e os valores absolutos reais. A realização futura de ensaios de atmosfera controlada permitirá quantificar o impacto da presença das superfícies recém-formadas e não-oxidadas sobre o coeficiente de atrito.

## AGRADECIMENTOS

Os autores querem agradecer o apoio financeiro do POCI-2010.

## REFERÊNCIAS

- Astakhov, V.P., Tribology of Metal Cutting, Elsevier, London, 2006.
- 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, (2004), 933-944.
- Ernst, H., Merchant, M.E., Chip formation, friction and high quality machined surfaces, *Surface Treatment of Metals*, Vol. 29. ASM, New York, 299, 1941.
- Green, A.P., The Plastic Yielding of Metal Junction due to combined shear and pressure, *Journal of Mechanical Physics, Solids*, p. 197, 1952.
- Finnie, I., Review of the metal cutting analyses of the past hundred years, *Mech. Eng.*, vol 78, n° 8, 715, 1956.
- Shaw M. C., *Metal cutting principles*, Clarendon Press, Oxford, 1984.
- Shirakashi, T. e Usui, E., Friction characteristics on tool face in metal machining. *J. JSPE* 39,966-972, 1982.
- Blau P.J., *Friction science and technology*, Marcel Dekker, Inc., 1996.
- Booser R., Ed., *CRC Handbook of Lubrication*, Vol 1-3, CRC Press, Inc, 1985.
- Kobayashi, S., Thomsen, E.G., Some observations on the shearing process in metal cutting, *Journal of Engineering for Industry*, 81 251-62, 1959.
- Chandrasekeran, H., Kapoor, D.V., Photoelastic analysis of tool-chip interface stresses, *Trans ASME J, Eng. Ind.* 878, 495-502, 1965.
- Male A. T., Cockcroft M. G., A method for the determination of the coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation, *J. Inst. Metals*, 93, 38, 1964.
- Kato, S., Yamaguchi, Y. e Yamada, M., Stress distribution at the interface between chip and tool in machining. *Trans ASME J. Eng. Ind.* 948, 683-689, 1972.
- Childs, T.H.C. e Maekawa, K., Computer aided simulation of chip flow and tool wear. *Wear* 139, 235-250, 1990.
- Bay, N., Wanheim, T., Real area of contact and friction stress at high pressure sliding contact, *Wear* p. 38; 201, 1976.