

MODELAÇÃO EXPERIMENTAL DA CONDIÇÃO TRIBOLÓGICA NO CORTE ORTOGONAL

Valentino A.M. Cristino, valentino.anok@ist.utl.pt¹
Pedro A.R. Rosa, pedro.rosa@ist.utl.pt¹
Paulo A.F. Martins, pmartins@ist.utl.pt¹

¹IDMEC, Instituto Superior Técnico, TULisbon, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

Resumo: *Este trabalho apresenta um estudo experimental orientado para a quantificação e a compreensão das forças de atrito que estão envolvidas no mecanismo de formação da apara em condições de corte ortogonal. Os ensaios experimentais foram realizados em provetes de chumbo tecnicamente-puro utilizando ferramentas fabricadas em aço AISI 304L e consistiram na determinação das forças de atrito através de medições efectuadas directamente na ferramenta de corte e por intermédio de ensaios tribológicos convencionais e independentes do processo de corte por arranque de apara. A metodologia utilizada permitiu identificar os ensaios que melhor se adaptam à caracterização experimental do atrito durante a formação da apara. As diferenças obtidas entre os valores de calibração e os valores reais das forças e coeficientes de atrito estimularam o desenvolvimento de um novo tipo de ensaio, de características inovadoras, que permite aproximar o ensaio de 'pino-no-disco' das condições tribológicas reais que se verificam no corte por arranque de apara.*

Palavras-chave: *Corte ortogonal, Tribologia, Coeficiente de atrito, Pino-no-disco*

1. INTRODUÇÃO

O mecanismo de formação de apara envolve um conjunto de fenómenos físicos e químicos que ocorrem num volume de material muito reduzido e de difícil observação. De entre estes fenómenos merecem destaque aqueles que promovem a ocorrência de atrito entre a superfície recém-formada da apara e a face de ataque da ferramenta. Astakhov (2006) admitiu recentemente que a separação da apara do bruto de maquinagem deverá representar entre 30 a 50% da energia total consumida, levando a que a energia remanescente (50% a 70%) deva estar associada a fenómenos de natureza tribológica. Em termos práticos isto significa que a maior parte da energia é consumida para vencer o atrito durante o escoamento da apara e, desta forma, fazer aumentar a temperatura das ferramentas. No entanto, e apesar da maior parcela de energia consumida no corte estar associada ao atrito, verifica-se que a generalidade dos trabalhos de investigação publicados no âmbito dos mecanismos de formação da apara continuam a privilegiar o estudo da deformação plástica do material em detrimento dos aspectos tribológicos do processo. De facto, os trabalhos que têm vindo a ser publicados no domínio da tribologia do corte por arranque de apara têm estado, na sua quase generalidade, relacionados com o desgaste e o tempo de vida das ferramentas.

Em face do exposto, é compreensível que exista pouca informação científica disponível sobre os mecanismos físicos que estão na origem dos fenómenos tribológicos na interface de contacto entre o material e a ferramenta. Um exemplo ilustrativo da actual falta de conhecimento nesta área pode ser facilmente encontrado ao nível da simulação numérica e da modelação analítica do corte por arranque de apara. De facto, a consulta detalhada da literatura da especialidade permite concluir que o coeficiente de atrito e as condições tribológicas são muitas vezes utilizados como parâmetros de afinação dos resultados computacionais relativamente aos experimentais, Tekkaya (2004) e Astakhov (2006). O actual estado-da-arte leva a concluir que os modelos de caracterização física das condições tribológicas do corte por arranque de apara que se encontram disponíveis na literatura não são adequados para prever o comportamento do material durante a formação da apara.

Nestas condições, e perante a necessidade de se efectuar uma reexaminação dos fenómenos físicos que são intrínsecos à tribologia do corte por arranque de apara, torna-se fundamental proceder a uma avaliação dos ensaios experimentais que podem ser utilizados na caracterização e calibração do atrito. Este trabalho tem por objectivo proceder a este tipo avaliação e recorre aos ensaios experimentais que são habitualmente utilizados para o efeito e a um novo tipo de ensaio, de características inovadoras e realizado num equipamento especialmente concebido pelos autores, que permite aproximar as condições do ensaio de pino-no-disco das que se verificam no corte por arranque de apara.

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 apara se baseie quase exclusivamente na utilização de modelos teóricos baseados na deformação plástica de asperezas.

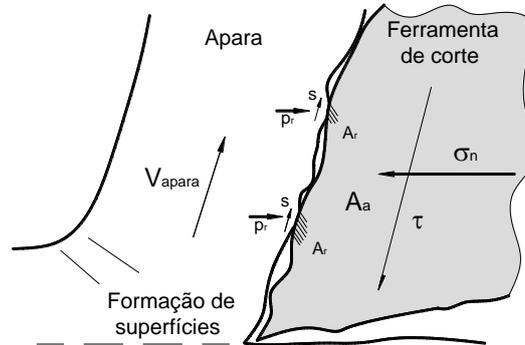


Figura 1. Representação esquemática da interface de contacto entre a apara e ferramenta no corte ortogonal.

Como nos processos de corte por arranque de apara, a área de contacto real A_r entre a apara e a ferramenta 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),

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

O modelo de Coulomb (também designado por Amonton-Coulomb) 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 μ é designada de coeficiente de atrito e pode, alternativamente, ser expressa em termos das tensões de corte τ e normal σ_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 deva passar a efectuar por intermédio de um mecanismo alternativo em que se assume que o valor da tensão de corte τ 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 (modelo de Prandtl),

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

em que m é o factor de atrito que varia entre 0 (condições de atrito nulo) e 1 (quando ocorre o fenómeno da adesão). Os valores de μ e de m deverão ser calibrados para o par material/ferramenta em condições operativas específicas.

Para permitir caracterizar analiticamente as baixas e altas pressões de contacto que existem ao longo da superfície da ferramenta, Shaw (1984), Shirakashi e Usui (1982) propuseram um modelo misto baseado nos dois modelos clássicos que foram 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 τ e σ_n , em termos médios, através da equação,

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

em que o termo n^* pode variar entre 1 e 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 de processos de corte por arranque de avara e em alguns estudos relacionados com processos de deformação plástica (forjamento e estampagem, por exemplo).

2.1. Técnicas de quantificação de atrito

Desde o plano inclinado de Leonardo da Vinci que têm vindo a ser desenvolvidas muitas metodologias 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 avara, 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-se que os mais utilizados para recriar as condições de atrito intrínsecas ao corte por arranque de avara são o ensaio de anel (Male 1964) e o ensaio de pino-no-disco.

Resultados experimentais obtidos por vários investigadores dos quais se destacam Kato e colaboradores (1972), Shirakashi e Usui (1973) e Childs (1990), vieram mostrar que o coeficiente de atrito no corte por arranque de avara para ângulos de ataque reduzidos pode facilmente atingir valores entre 0.5 e 1.0 ou, até mesmo 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). Contudo, excepção feita a Bay e Wanheim (1976) que indicaram o fenómeno de adesão como possível explicação para os elevados valores do coeficiente de atrito, poucos estudos têm vindo a ser desenvolvidos para explicar esta aparente falta de consistência na teoria da plasticidade clássica.

3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

O trabalho experimental consistiu na avaliação do coeficiente de atrito durante os ensaios de corte ortogonal e na correlação desse valor com os que resultaram da utilização de técnicas experimentais convencionais de caracterização tribológica baseadas no ensaio de anel e no 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 avara.

O trabalho experimental envolveu a utilização de uma prensa hidráulica, instrumentada com sensores piezo-eléctricos, na qual foram montadas ferramentas especificamente construídas para assegurar os objectivos do trabalho. O trabalho experimental envolveu igualmente a concepção e fabrico de uma máquina de ensaios de pino-no-disco com características inovadoras que a tornam particularmente apropriada para a avaliação do coeficiente de atrito no corte por arranque de avara.

Os provetes utilizados nos ensaios experimentais foram fabricados em chumbo tecnicamente-puro, devido ao seu comportamento mecânico ser muito aproximado das condições ‘perfeitamente-plásticas’ utilizadas nos modelos teóricos do corte ortogonal. As ferramentas foram fabricadas em aço AISI 304L com acabamento superficial bem controlado ($R_a \leq 8 \times 10^{-2} \mu\text{m}$).

Os ensaios de corte ortogonal (Fig. (2.a)) foram realizados com uma ferramenta de corte que possui um ângulo de ataque (α) nulo e um ângulo de saída igual a 5° , de modo a permitir medir directamente a força normal e tangencial à face de ataque da ferramenta. Os provetes utilizados nos ensaios foram dimensionados de modo a garantir que o corte se processava em condições de deformação plástica plana em regime estacionário. Os provetes utilizados tinham uma geometria paralelepípedica com dimensões de 90 x 24 x 50 mm e a espessura de corte variou entre 0.025 mm e 0.1 mm. Os provetes foram montados sobre um sensor piezoeléctrico tridimensional (Kistler 9257B), de modo a permitir obter os valores experimentais das forças de penetração e de corte.

O equipamento de pino-no-disco (Fig. (2.b)) desenvolvido pelos autores permitiu obter a evolução do atrito para valores de carga normal entre 10 e 2000 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 e fabricada especificamente para este tipo de equipamento.

Nos ensaios de anel (Fig. (2.c)) as dimensões iniciais do provete foram especificadas de acordo com aquilo que é habitualmente indicado nos estudos teóricos de determinação do factor de atrito, (a relação entre as dimensões $d_e; d_i; h_0$ foi 12; 6 e 8 mm, respectivamente).

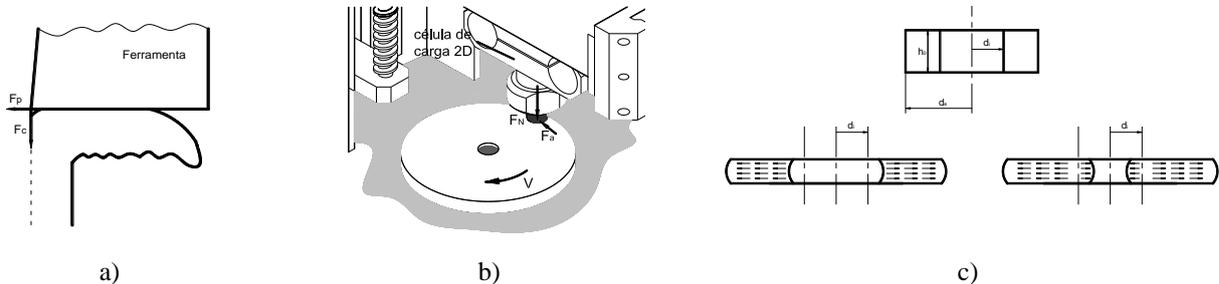


Figura 2. Avaliação do atrito através de a) medição directa no processo de corte, b) pino-no-disco e c) anel.

O trabalho experimental envolveu ainda a realização de um novo tipo de ensaios realizados num equipamento de pino-no-disco modificado pela introdução de uma ferramenta de corte (Fig. (3)). Esta montagem experimental, de características inovadoras, foi especificamente desenvolvida para possibilitar avaliar a variação da força de atrito antes e após a presença de superfícies recém-formadas, não-oxidadas (referente ao pedido de patente PT 103935).

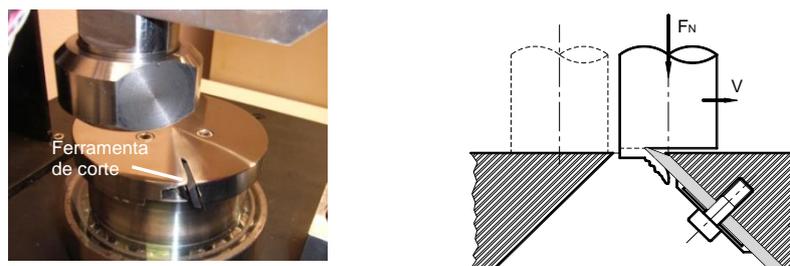


Figura 3. Detalhe das características inovadoras do equipamento de pino-no-disco que foi desenvolvido pelos autores (referente ao pedido de patente PT 103935).

O plano de ensaios foi estruturado de forma a permitir avaliar e comparar as estimativas obtidas através das diferentes técnicas experimentais de caracterização tribológica que foram referidas anteriormente.

4. 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 pela teoria clássica da plasticidade e pelos modelos de atrito baseados na interferência mecânica de asperezas que são correntemente utilizados na modelação do corte por arranque de aparas. Outros autores da literatura da especialidade têm vindo a obter valores experimentais do coeficiente de atrito superiores ao limite teórico.

As estimativas do coeficiente de atrito obtidas através das técnicas de caracterização tribológica referidas anteriormente (ensaio de anel (Fig. (5)) e de pino-no-disco convencional (Fig. (6)) apresentam valores concordantes (Tab. (1)) mas que subestimam de uma forma muito significativa o valor real do coeficiente de atrito obtido com base nos ensaios de corte ortogonal.

Tabela 1. Coeficientes de atrito μ obtidos por intermédio dos diferentes tipos de ensaios.

| | Ensaio de corte | Pino-no-disco (convencional) | Ensaio do anel | Pino-no-disco (desenvolvido pelos autores) |
|-------|-----------------|------------------------------|----------------|--|
| μ | 0.77 | 0.17 | 0.19 | 0.47 |

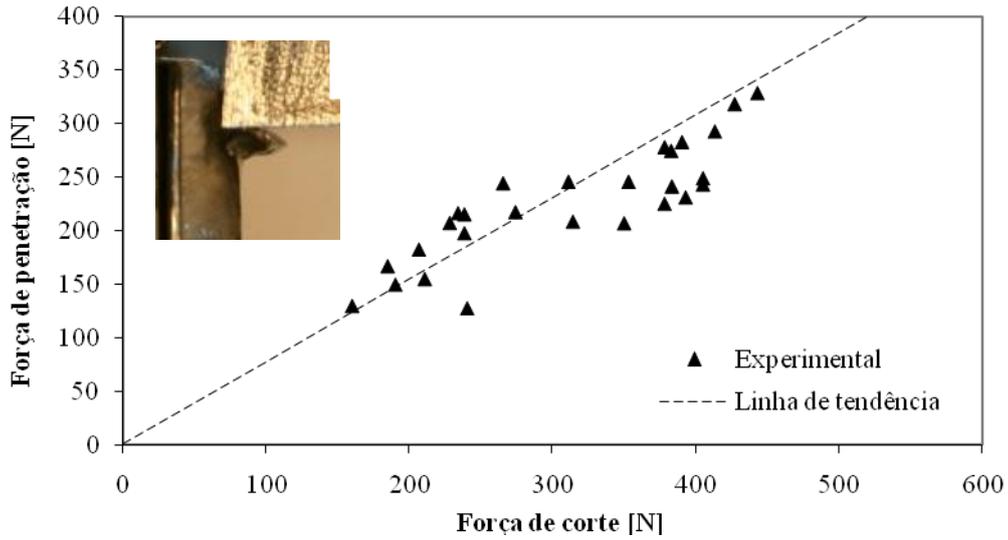


Figura 4. Força de penetração em função da força de corte no corte ortogonal com uma ferramenta com ângulo de ataque $\alpha = 0^\circ$ sem lubrificação.

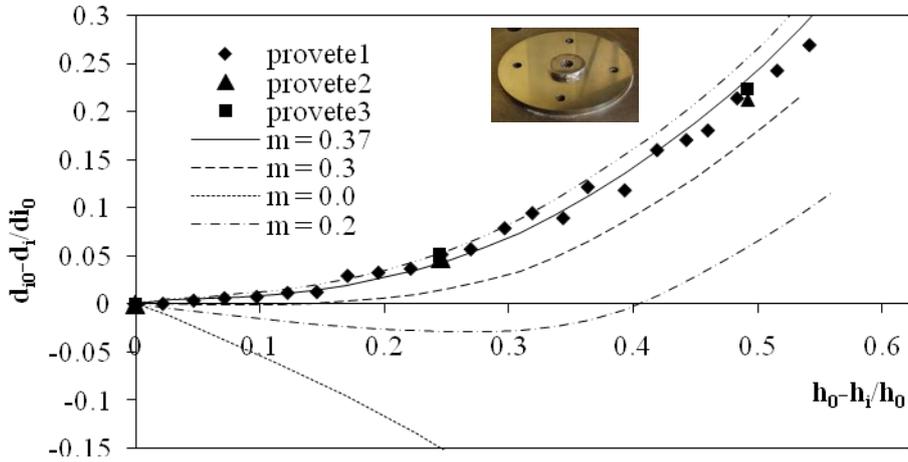


Figura 5. Ensaio de anel: curvas de calibração do factor de atrito (m) e resultados experimentais.

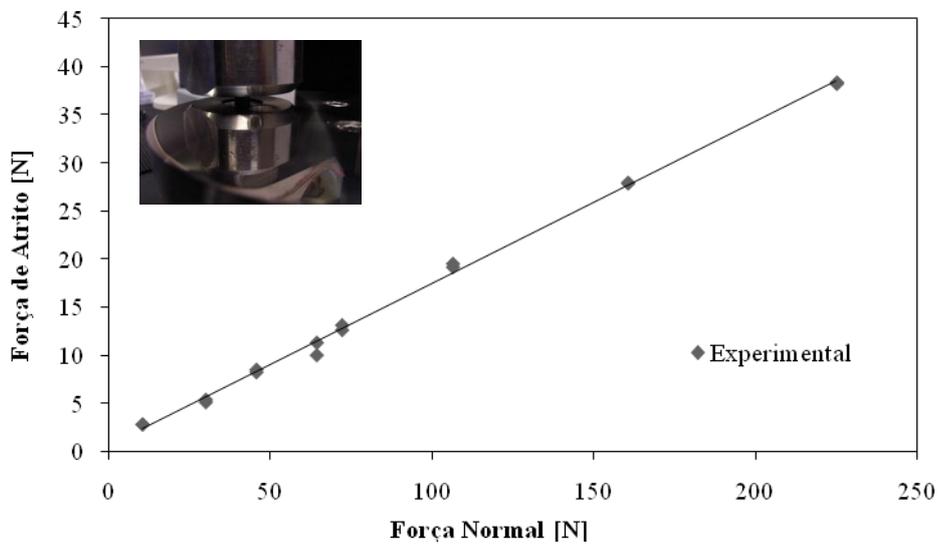


Figura 6. Força de atrito em função da força normal no ensaio de pino-no-disco convencional.

As diferenças encontradas entre o valor do coeficiente de atrito medido directamente no processo de corte por intermédio do registo experimental das forças de penetração e de corte (Fig. (4)) e os valores obtidos a partir de técnicas independentes ficam a dever-se, no essencial, a alterações nas condições operativas dos ensaios. No entanto, é entendimento dos autores que uma das principais diferenças está muito provavelmente relacionada com o estado da superfície recém-formada, ainda não-oxidada, limpa e quimicamente activa, junto da aresta de corte. Esta condição da superfície da apara, associada às elevadas pressões características da zona de contacto, promove a existência de fenómenos de adesão e eleva muito significativamente o valor do coeficiente de atrito.

A verificação desta hipótese foi consubstanciada através da utilização do equipamento experimental de pino-no-disco de características inovadoras que foi apresentado na secção anterior e que permite avaliar a influência das superfícies recém-geradas no valor da força e do coeficiente de atrito. De facto, a introdução de uma lâmina de corte no disco permite remover uma fina camada de material e expor uma superfície recém-formada e não-oxidada do material. Observa-se, após a passagem da lâmina de corte (Fig. (7)), que o valor do coeficiente de atrito aumenta para mais do dobro ($\mu=0.47$ na Tab.(2)) aproximando-se um pouco mais dos valores que tinham sido obtidos directamente no processo de corte ortogonal ($\mu=0.77$ na Tab. (1)).

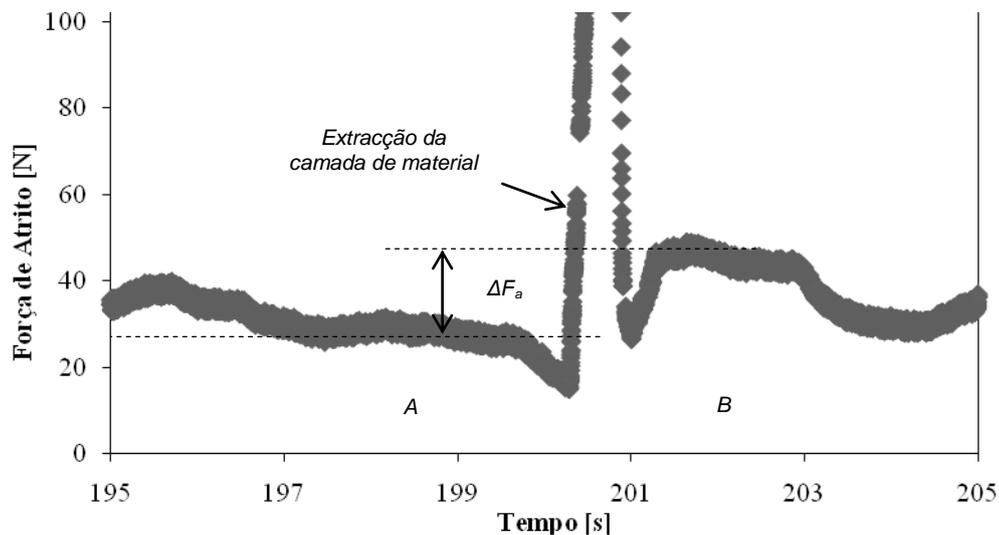


Figura 7. Resultados do ensaio do pino no disco (ciclo) antes (A) e depois (B) da presença de superfícies recém-formadas para uma carga normal de 106.4 N.

Tabela 2. Forças e coeficientes de atrito obtidos antes e depois da presença de superfícies recém-formadas.

| | Antes do corte | Após o corte | Varição |
|-----------|----------------|--------------|----------------------------|
| F_a (N) | ≈ 20 | ≈ 50 | $\Delta F_a \approx 30$ |
| μ | 0.189 | 0.472 | $\Delta \mu \approx 0.283$ |

No entanto, apesar do equipamento de pino-no-disco de características inovadoras que foi desenvolvido pelos autores ter permitido melhorar substancialmente o valor de calibração experimental independente do coeficiente de atrito ainda se verificam divergências relativamente ao valor real medido directamente no processo de corte. Este assunto encontra-se actualmente na agenda de investigação dos autores.

5. CONCLUSÕES

A simulação numérica e a modelação analítica do corte ortogonal exigem modelos de atrito que permitam caracterizar eficazmente os fenómenos tribológicos na interface de contacto entre a apara e a ferramenta. Esta exigência determina que sejam identificados, a partir da literatura da especialidade, os modelos de atrito e as técnicas experimentais de calibração que melhor consigam reproduzir o fenómeno de atrito e que se proponham soluções inovadoras de natureza teórica e experimental que permitam ultrapassar algumas das limitações actualmente existentes.

O trabalho de investigação apresentado foi orientado para a compreensão e quantificação experimental das forças de atrito e do coeficiente de atrito no 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 para aumentos significativos (em alguns casos superiores a 100%) dos valores do coeficiente de atrito caracterizados 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 ensaios e os valores reais medidos directamente no processo de corte. Este facto indica a necessidade de se continuar a trabalhar no desenvolvimento de ensaios de caracterização e quantificação do atrito no corte por arranque de apara.

6. AGRADECIMENTOS

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

7. REFERÊNCIAS

- Astakhov, V.P., 2006, "Tribology of Metal Cutting", Elsevier, London.
- Bil H., Kiliç S. E. and Tekkaya A. E., 2004, "A comparison of orthogonal cutting data from experiments with three different finite element models", Int. J. Mach. Tools & Manuf., 44, pp. 933-944.
- Ernst, H., Merchant, M.E., 1941, "Chip formation, friction and high quality machined surfaces", Surface Treatment of Metals, Vol. 29. ASM, New York, 299.
- Green, A.P., 1952, "The Plastic Yielding of Metal Junction due to combined shear and pressure", Journal of Mechanical Physics, Solids, p. 197.
- Finnie, I., 1956, "Review of the metal cutting analyses of the past hundred years", Mech. Eng., vol 78, n.º.8, 715.
- Shaw M. C., 1984, "Metal cutting principles", Clarendon Press, Oxford.
- Shirakashi, T. e Usui, E., 1982, "Friction characteristics on tool face in metal machining", J. JSPE 39, pp. 966-972.
- Blau P.J., 1996, "Friction science and technology", Marcel Dekker, Inc..
- Booser R., 1985, "CRC Handbook of Lubrication", Vol 1-3, CRC Press, Inc.
- Kobayashi, S., Thomsen, E.G., 1959, "Some observations on the shearing process in metal cutting", Journal of Engineering for Industry, 81 pp. 251-262.
- Chandrasekeran, H., Kapoor, D.V., 1965, "Photoelastic analysis of tool-chip interface stresses", Trans ASME J, Eng. Ind. 878, pp. 495-502.
- Male A. T., Cockcroft M. G., 1964, "A method for the determination of the coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation", J. Inst. Metals, 93, 38.
- Kato, S., Yamaguchi, Y. e Yamada, M., 1972, Stress distribution at the interface between chip and tool in machining. Trans ASME J. Eng. Ind. 948, pp. 683-689.
- Childs, T.H.C. e Maekawa, K., 1990, "Computer aided simulation of chip flow and tool wear". Wear 139, pp. 235-250.
- Bay, N., Wanheim, T., 1976, "Real area of contact and friction stress at high pressure sliding contact", Wear p. 38; 201.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF TRIBOLOGICAL CONDITIONS IN ORTHOGONAL METAL CUTTING

Valentino A.M. Cristino, valentino.anok@ist.utl.pt¹

Pedro A.R. Rosa, pedro.rosa@ist.utl.pt¹

Paulo A.F. Martins, pmartins@ist.utl.pt¹

¹IDMEC, Instituto Superior Técnico, TULisbon, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

Abstract: *The aim of the present work is twofold:(i) to understand the physics behind the friction forces along the tool-workpiece contact interface and (ii) to identify the best experimental procedure for calibrating the coefficient of friction in orthogonal metal cutting. The overall methodology involved experimental determination of the cutting and thrust forces during the cutting process and independent measurements of the friction forces by means of conventional tribological testing procedures. Tests were performed with technically pure Lead and cutting tools were made of stainless Steel. The results obtained from the entire set of tests and the differences found between the independent measurements and the actual values of the friction factor stimulated the development of an innovative testing procedure based on a special purpose equipment developed by the authors. The new procedure allows to perform pin-on-disk tests under tribological conditions that are similar to those currently found in metal cutting.*

Keywords: *Orthogonal cutting, Tribology, Friction Coefficient, Pin-on-disc*