

ANÁLISE DO ENSAIO DE PINO-NO-DISCO NA QUANTIFICAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO NO CORTE ORTOGONAL

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

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



RESUMO

O presente trabalho de investigação propõe uma nova concepção para as máquinas de ensaios do tipo pino-no-disco, e introduz uma metodologia de investigação que tem como principal objectivo promover um novo nível de compreensão da influência da textura e da rugosidade superficial no valor médio do coeficiente de atrito no domínio dos processos tecnológicos de corte por arranque de apara. A nova concepção desta máquina de ensaios de pino-no-disco possibilita a realização de ensaios com carga normal variável. A adição de uma unidade de polimento permitiu gerar e recondicionar a textura superficial dos discos em cada ensaio. A comparação do coeficiente de atrito obtido nos ensaios independentes de pino-no-disco com o obtido nos ensaios de corte ortogonal permitiu concluir que o ensaio de pino-no-disco, quando realizados em condições de textura e de rugosidade superficial controladas, é capaz de oferecer uma boa estimativa do valor médio do coeficiente de atrito para o corte por arranque de apara.

1- INTRODUÇÃO

Os processos tecnológicos de maquinaria sempre possuíram, de entre os processos de fabrico, uma importância significativa para a sociedade económico-industrial devido ao facto de estarem envolvidos na produção directa da generalidade dos bens de consumo, ou indirectamente no fabrico das ferramentas e/ou dos equipamentos utilizados noutros processos produtivos (Armarego e Brown, 1969). No entanto, e apesar da importância económica e tecnológica, os processos de maquinaria continuam a ser dos menos compreendidos, possivelmente devido às dificuldades na compreensão do mecanismo de formação de apara.

Em estudos recentes Bil et al. (2004) compararam as estimativas numéricas obtidas a partir de três programas de elementos finitos com valores experimentais, observando que, embora os parâmetros individuais (tais como a força de corte, a força de penetração e o ângulo do plano de corte) possam convergir com os resultados experimentais, nenhum dos modelos numéricos permitiu uma solução global satisfatória. Em conclusão, consideraram como causas prováveis para esta divergência as lacunas ao nível da compreensão do comportamento mecânico do material e da condição tribológica na interface de contacto, para as condições de velocidade e de temperatura que se verificam nos processos de maquinaria.

Em concordância com as observações anteriores, Astakhov e Outeiro (2008) após analisar diversas simulações do corte por arranque de apara disponíveis na literatura verificaram que todas as estimativas numéricas estavam em boa concordância com a experimentação independentemente do valor do coeficiente de atrito que tinha sido definido. De facto, o coeficiente de atrito na generalidade dos casos não tinha sido pré-determinado experimentalmente, mas sim utilizado como um parâmetro de ajuste da simulação numérica.

De acordo com a análise da literatura da especialidade parece haver alguma dificuldade na quantificação e na modelação do atrito no corte por arranque de apara. No entanto, esta não parece estar relacionada com a ausência de técnicas para a avaliação do atrito, muito pelo contrário (Blau, 1996), mas com alguma falta de precisão e fiabilidade dos valores obtidos (Booser, 1985).

Deste modo, o presente trabalho de investigação procura estabelecer metodologias experimentais adequadas à avaliação do coeficiente de atrito no corte por arranque de apara. É dada ênfase às questões relacionadas com a quantificação do atrito em condições de ensaio semelhantes às encontradas nos processos de corte, assim como, com a necessidade de aplicar ensaios de avaliação independentes. O estudo foi ainda alargado de modo a permitir quantificar a influência das principais variáveis operativas no valor médio do coeficiente de atrito.

2- EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Esta secção apresenta de uma forma resumida o desenvolvimento do aparato experimental e o plano de ensaios, necessários para permitir cumprir com os objectivos da presente investigação.

2.1 - Ensaio de pino-no-disco

A Fig. 1a) apresenta um esquema da máquina de ensaios do tipo pino-no-disco desenvolvida, a qual é constituída por uma estrutura mecânica para montagem dos servo-mecanismos de accionamento, da unidade de polimento e limpeza (UPL) e ainda do sistema de controlo e monitorização.

O sistema de monitorização inclui uma célula de carga bidimensional e um sistema de aquisição de dados. A célula de carga foi projectada de modo a permitir acoplar um dispositivo para fixação do pino. Esta célula é posteriormente ligada a uma unidade de amplificação de sinal (Vishay 2100), por sua vez ligada ao sistema de aquisição de dados (constituído por um computador pessoal (PC) com uma placa de aquisição NI PCI-6025E), de forma a permitir medir directamente os valores experimentais da força normal, F_N , e tangencial, F_T , necessários para o cálculo do coeficiente de atrito (μ):

$$\mu = F_T / F_N \quad (1)$$

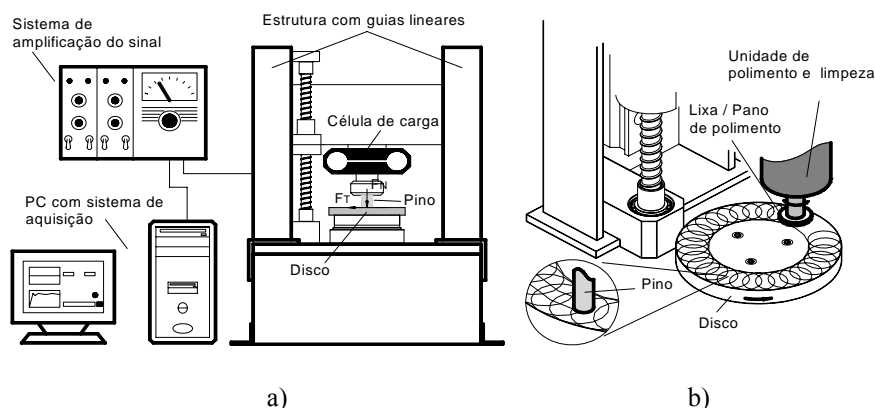


Fig. 1 – Ensaio de pino-no-disco: a) Representação simplificada do aparato experimental, e b) Unidade de

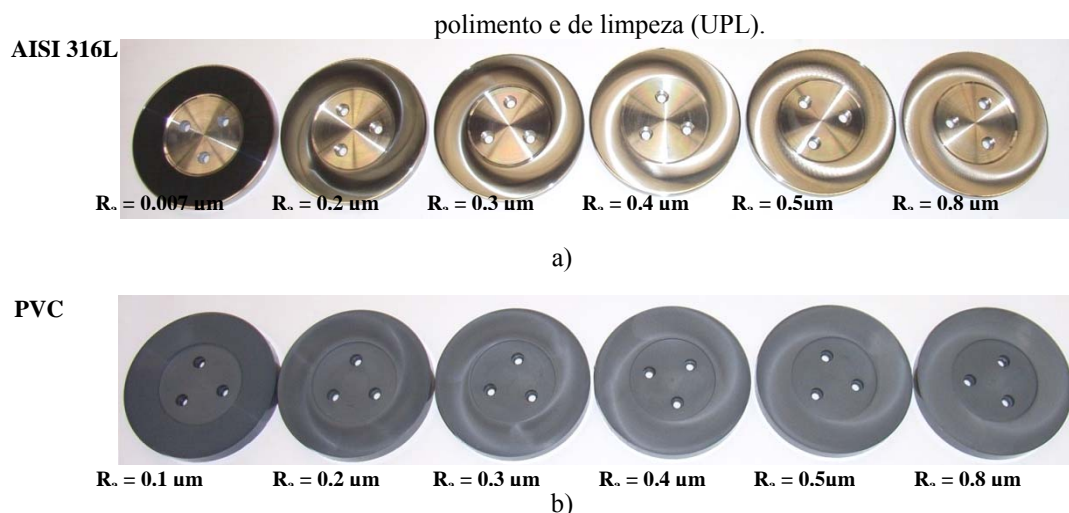


Fig. 2 – Discos dos ensaios de pino-no-disco com diferentes rugosidades e materiais: a) AISI 316L e b) PVC.

A UPL permite produzir a textura desejada, assim como repor as condições superficiais dos discos após ensaio. Conforme ilustrado na Fig.1b), a unidade combina a velocidade de rotação da UPL, a granulometria da lixa/pano de polimento e a rotação do disco para assegurar os valores da rugosidade superficial adequados aos objectivos da investigação. Os valores da rugosidade superficial (R_a) medidos na direcção do deslocamento do pino variam de 0.007 a 0.8 μm conforme o disco utilizado, para diferentes materiais a ensaiar (Fig. 2). Estes foram medidos com recursos a um rugosímetro de contacto Kosaka Lab SE 1200 (estilete de 0.5 μm) para valores de 0.2 a 0.8 μm e um microscópio de força atómica (Dimension 3100 SPM) para rugosidades inferiores a 0.2 μm na direcção do movimento.

2.2 - Ensaio de anel

Para melhor ilustrar a importância da selecção do ensaio tribológico em função do processo de fabrico, cuja condição na interface de contacto se quer reproduzir, foram realizados adicionalmente ensaios de anel. O procedimento experimental (Male e Cockcroft, 1964) consistiu na realização de compressões incrementais sendo, no final de cada etapa, registados os valores da altura, diâmetro interior e exterior, para subsequente manipulação e aplicação em ábacos de calibração do atrito. Os ensaios foram realizados procurando manter, tanto quanto possível, em condições análogas na presente investigação. Os pratos de compressão foram preparados com lixas e panos de polimento, de forma a obter a textura radial, ilustrada na Fig. 3, cuja rugosidade varia de 0.04 a 0.65 μm .

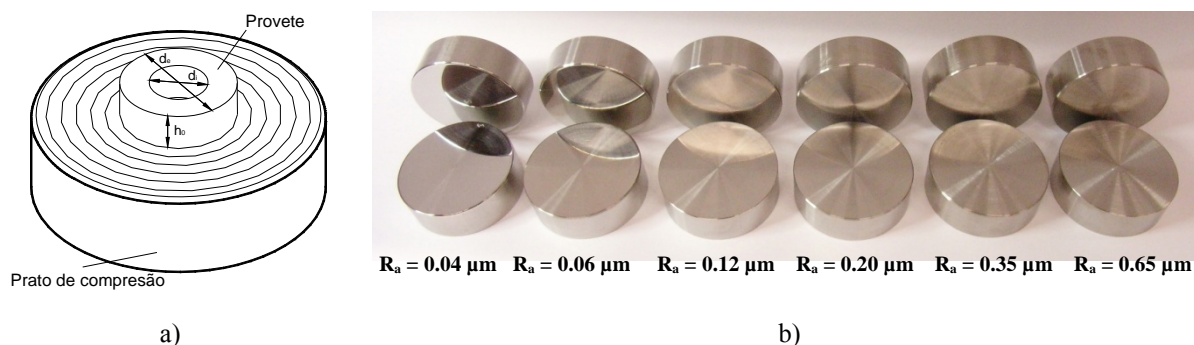


Fig. 3 – Ensaio de anel: a) Esquema elucidativo da textura superficial dos pratos de compressão e b) Conjuntos de pratos com diferentes rugosidades de forma a promover ensaios com diferentes condições de atrito.

2.3 - Ensaio de corte ortogonal

O presente trabalho de investigação procura comparar o coeficiente de atrito obtido através de diferentes ensaios tribológicos com os obtidos no processo de corte por arranque de aparta. Os ensaios de corte foram realizados em condições de corte ortogonal, isto é, estão garantidas as

condições de esbelteza e de obliquidade do escoamento da aparta necessárias. O aparato experimental foi instalado numa fresadora CNC e consiste basicamente na utilização combinada de um conjunto de ferramentas de corte, de um dinamómetro piezoeléctrico 3D, de um sistema de aquisição de dados e de uma UPL (Fig. 4).

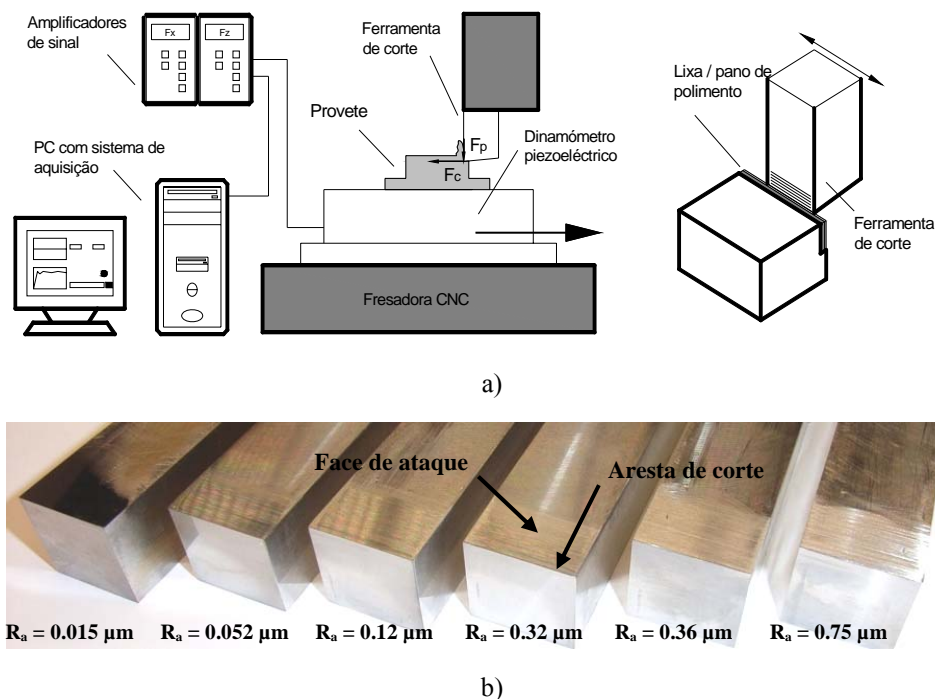


Fig. 4 – Ensaio de corte ortogonal: a) Representação simplificada do aparato experimental com UPL, e b) Conjuntos de ferramentas de corte com diferentes rugosidades na face de ataque.

A geometria das ferramentas de corte permaneceu inalterada durante os ensaios (o ângulo de ataque $\alpha = 0^\circ$ e o ângulo de saída $\sigma = 5^\circ$) e foram fabricadas no mesmo material dos discos nos ensaios de pino-disco e dos pratos de compressão nos ensaios de anel. Por sua vez, os provetes são acoplados directamente no dinamómetro piezoeléctrico. Importa referir que, para todos os ensaios de corte, a rugosidade superficial na face saída foi mantida constante ($R_a \approx 0.05 \mu\text{m}$).

O dinamómetro piezoeléctrico tridimensional (Kistler 9257B) é ligado a um conjunto de amplificadores de sinal (Kistler 5011B), permitindo medir as forças durante o ensaio. O sistema é linear em toda a sua gama de medida, medindo a força com uma precisão de 1% e a sua

resolução permite medir variações da força com grande amplitude. Um PC com sistema de aquisição de dados (NI PCI-6025E) combinado com o software programado em Labview, adquire e armazena os resultados experimentais. O coeficiente de atrito é calculado através da eq. (2):

$$\mu = F_p / F_c \quad (2)$$

onde F_p é a força de penetração, e F_c a força de corte.

É importante realçar que, a UPL foi projectada de forma a assegurar a direcionalidade da textura superficial de acordo com os discos e os pratos de compressão no caso dos ensaios de caracterização independentes, porque a

textura superficial influencia drasticamente o valor médio do coeficiente de atrito (Sedlacek et al., 2009).

2.4 - Plano de ensaios

Os materiais utilizados nas experiências foram seleccionados para permitir avaliar quantitativamente a influência das propriedades mecânicas dos pares tribológicos no coeficiente de atrito. A realização de ensaios a seco (sem lubrificante) combinada com baixas velocidades de actuação permitiu diminuir o número de variáveis do plano de ensaios. De facto, reduzir as influências de fenómenos hidrodinâmicos, térmicos e da taxa de deformação, permitiu focar a investigação numa análise comparativa entre técnicas de avaliação tribológica.

Os discos foram fabricados em aço inoxidável AISI 316L e em cloreto de polivinila (PVC). Os pinos possuem forma cilíndrica com 8 mm de diâmetro. A escolha do chumbo tecnicamente puro 99.7% (Pb) justifica-se pelo facto que o seu comportamento mecânico ser próximo do rígido-perfeitamente plástico utilizado na modelação tradicional do corte por arranque de apara, com baixo valor de tensão de escoamento, bem como pela possibilidade de reproduzir o comportamento viscoplástico do aço à temperatura ambiente (Altan et al., 1970).

A Tabela 1 apresenta o plano de trabalhos para os ensaios de pino-no-disco. O trabalho experimental foi realizado de forma a isolar os parâmetros do processo mais relevantes nomeadamente no valor do coeficiente de atrito. É importante referir que o ensaio é realizado em apenas uma volta do disco, de forma que o pino deslize sobre a superfície do disco apenas uma vez.

Tabela 1 – Plano de ensaios para os ensaios de pino-no-disco.

R_a (μm)	Material do pino	Material do disco	Velocidade (m/s)
<< 0.1	Chumbo	AISI 316L e PVC	0.072, 0.216, 0.432 e 0.72
0.2			
0.3			
0.4			
0.5			
0.8			

Antes de cada ensaio, a superfície dos discos são recondicionadas com a UPL desengorduradas e a rugosidade medida, para garantir as condições iniciais em todos os casos analisados. As forças foram obtidas através da célula de carga bidimensional com uma frequência de aquisição de 300Hz.

No caso dos ensaios de anel, os pratos de compressão foram fabricados em aço inoxidável AISI 316L. Estudos anteriores relativos à geometria e dimensões usadas para determinar o factor de atrito no ensaio de anel concluíram que os anéis com a razão geométrica $D_0:d_0:h_0$ de 6:3:2 (Fig. 3) são os que apresentaram os melhores resultados para avaliar o factor de atrito (Male e Cockcroft, 1964). Neste trabalho foram utilizados anéis de chumbo com dimensões de 24:12:8 mm. Para evitar depósitos de material dos provetes sobre os pratos de compressão, influenciando os resultados finais, os pratos são limpos e desengordurados com álcool etílico entre estágios de compressão. Depois de cada caso de ensaio, a superfície dos pratos é recondicionada através de polimento e a sua rugosidade medida.

Nos ensaios de corte ortogonal, a zona de ensaio do provete tem dimensões de 19x25 mm (l_{xp}) para assegurar que o corte decorre em condições estacionárias, e em deformação plana. O plano de ensaios para o corte ortogonal foi projectado para conseguir reproduzir as condições dos ensaios de pino-no-disco e anel, realizados a seco. A espessura de corte e a velocidade de corte, que é mantida constante, com o valor da espessura de corte de 0.2 mm e a velocidade de corte “quasi-estáticas” para todos os ensaios.

3- RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta secção foi estruturada de forma a identificar as principais variáveis operativas e quantificar a sua influência no coeficiente de atrito: começa com a avaliação do atrito nos diferentes métodos de ensaios independentes, e por fim, será feita uma avaliação comparativa das estimativas independentes com os

resultados obtidos experimentalmente no processo de corte por arranque de apara.

3.1 - Atrito no ensaio de pino-no-disco

A nova concepção da máquina de pino-no-disco desenvolvida permitiu a realização de ensaios combinados com carga e velocidade variáveis. A Fig. 5 mostra os resultados típicos obtidos para a evolução da força normal/tangencial (F_N/F_T) em função do tempo de ensaio, para o par tribológico Pb/AISI 316L, e na Fig. 6 a influência da velocidade relativa na interface de contacto, em condições a seco para o mesmo par tribológico.

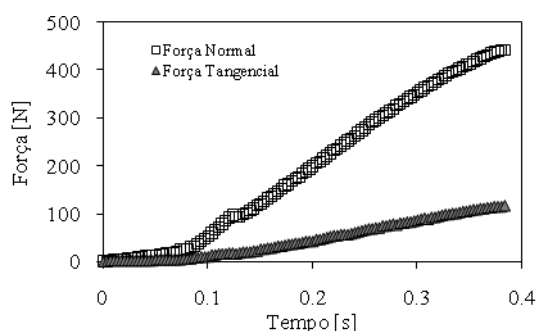


Fig. 5 – Evolução da F_N e F_T com o tempo durante um ensaio, para Pb/AISI 316L, $v=0.072\text{m/s}$ e $R_a = 0.007\ \mu\text{m}$.

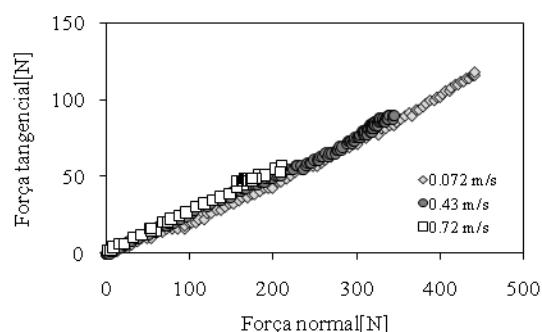


Fig. 6 – Relação entre a F_N e F_T para Pb/AISI 316L a várias velocidades com $R_a = 0.007\ \mu\text{m}$.

A partir das Fig. 5 e 6 é possível retirar duas conclusões principais: 1) a primeira, as figuras demonstram que a força de atrito é directamente proporcional à força normal aplicada sobre o pino, logo, o coeficiente de atrito não é afectado pela pressão de contacto existente entre o pino e o disco; 2) o coeficiente de atrito, em condições de atrito seco, não é influenciado, de uma forma significativa, pela velocidade relativa na interface de

contacto. Resultados semelhantes foram obtidos para o par Pb/PVC.

A primeira conclusão está em concordância com as leis fundamentais de atrito e, para os ensaios do par tribológico Pb/PVC, resultados semelhantes foram obtidos previamente por Bowers et al. (1953).

A segunda conclusão é surpreendente quando analisado com base em muitos trabalhos publicados na área da tribologia, mas encontra-se em concordância com os resultados experimentais publicado por Shooter e Thomas (1952) no caso do par de material aço-polímero. A independência do coeficiente de atrito em relação à velocidade também foi relatada recentemente por Sedlacek et al. (2009), recorrendo a ensaios com pinos de alumínio (Al_2O_3) e discos de aço 100Cr6.

No entanto, para a gama de velocidades ensaiadas, relativamente baixas, pode não ser suficiente para suportar a segunda conclusão mencionada anteriormente. No entanto, é de salientar que o objectivo do presente trabalho de investigação consiste em procurar estabelecer metodologias experimentais adequadas para avaliar o coeficiente de atrito no corte por arranque de apara, e não explorar de uma forma exaustiva a influência de todos os parâmetros operativos, sendo a velocidade relativa na interface de contacto limitada pelo equipamento desenvolvido.

3.2 - Atrito no ensaio de anel

As curvas de calibração para o ensaio de anel foram determinadas a partir do método de elementos finitos. A simulação numérica foi obtida com o uso do software I-FORM2. A Fig. 7 apresenta as curvas de calibração e os resultados experimentais obtidos na compressão dos provetes. Também se encontra representada na Fig. 7 a geometria final dos provetes depois do ensaio, obtidos a partir dos discos mais polidos para os discos mais rugosos (da esquerda à direita), referentes à Fig. 3b).

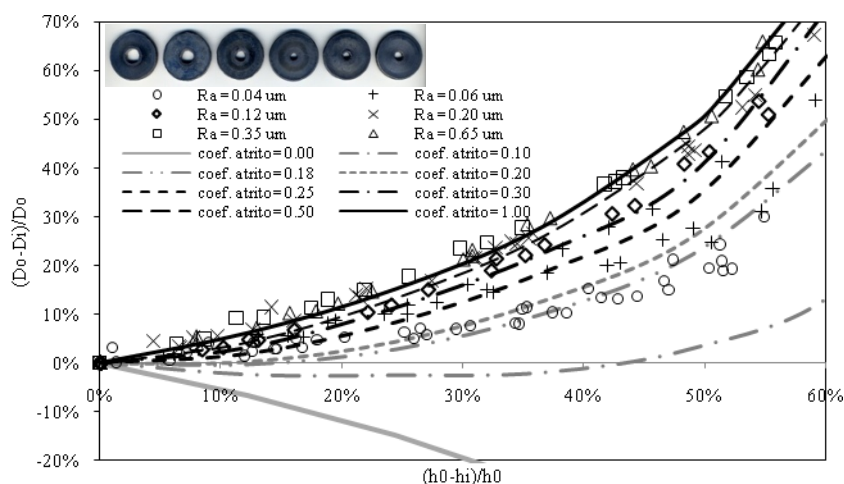


Fig. 7 – Ensaio do anel: Resultados experimentais e curvas de calibração resultante do modelo de atrito de Coulomb.

Através dos resultados experimentais para o par tribológico ensaiado, verificou-se que, o diâmetro interior do provete reduz com o aumento da rugosidade dos pratos, no entanto, o diâmetro interior final tende a manter-se constante a partir de um certo valor da rugosidade. Este efeito de saturação da geometria do provete verifica-se para o par tribológico a partir de $R_a=0.15 \mu\text{m}$. Também se pode verificar que a curva de calibração para $\mu = 0.5$ se encontra muito próximo da curva para o atrito máximo $\mu = 1$, indicando que existe alguma dificuldade em reproduzir valores de atrito elevados com este ensaio.

3.3 - Avaliação comparativa dos ensaios

A Fig. 8 mostra a evolução do coeficiente de atrito obtido nos diferentes tipos de ensaios descritos no plano de ensaios e os pares tribológicos em estudo. Analisando a evolução do coeficiente de atrito com a rugosidade, o par tribológico Pb/AISI 316L apresenta três regiões diferentes; (i) a região esquerda ($R_a < 0.1 \mu\text{m}$), no qual o coeficiente de atrito é constante e assume o menor valor de todos os casos analisados, (ii) a direita ($R_a > 0.5 \mu\text{m}$) onde o coeficiente de atrito é constante e apresenta o máximo valor de todos os casos analisados e (iii) a região central ($0.1 < R_a < 0.5$) onde o valor do coeficiente de atrito aumenta de uma

forma progressiva do valor mais baixo para o valor mais alto. A diferença entre a Fig. 8a) e b) reside no facto que, a Fig. 8b) tem o eixo horizontal apresentado em escala logarítmica para facilitar a leitura da zona de baixas rugosidades ($R_a < 0.1 \mu\text{m}$).

Na região à esquerda do gráfico, a rugosidade superficial dos discos de aço AISI 316L é muito reduzida ($R_a < 0.1 \mu\text{m}$) e por esta razão o deslizamento entre o pino e o disco é bastante suave. Nesta zona o mecanismo de atrito é originado basicamente pelo fenómeno de adesão, a força de atrito resultante do movimento relativo entre o pino e o disco deve ser aproximadamente igual à força necessária para romper as ligações resultantes da elevada pressão local (soldadura a frio), que actua entre as asperezas.

Contrariamente, na região à direita do gráfico ($R_a > 0.5 \mu\text{m}$) o nível de interacção entre as asperezas é maior. As pontas das asperezas dos discos (material com dureza superior em relação ao do pino) penetram no interior do pino produzindo aparas resultantes do micro-corte ao nível das asperezas. Este resulta da forte resistência ao deslizamento descrito por Bowden e Tabor (1964) e explica o aumento observado do valor do coeficiente de atrito na interacção de materiais com rugosidade superficial elevada.

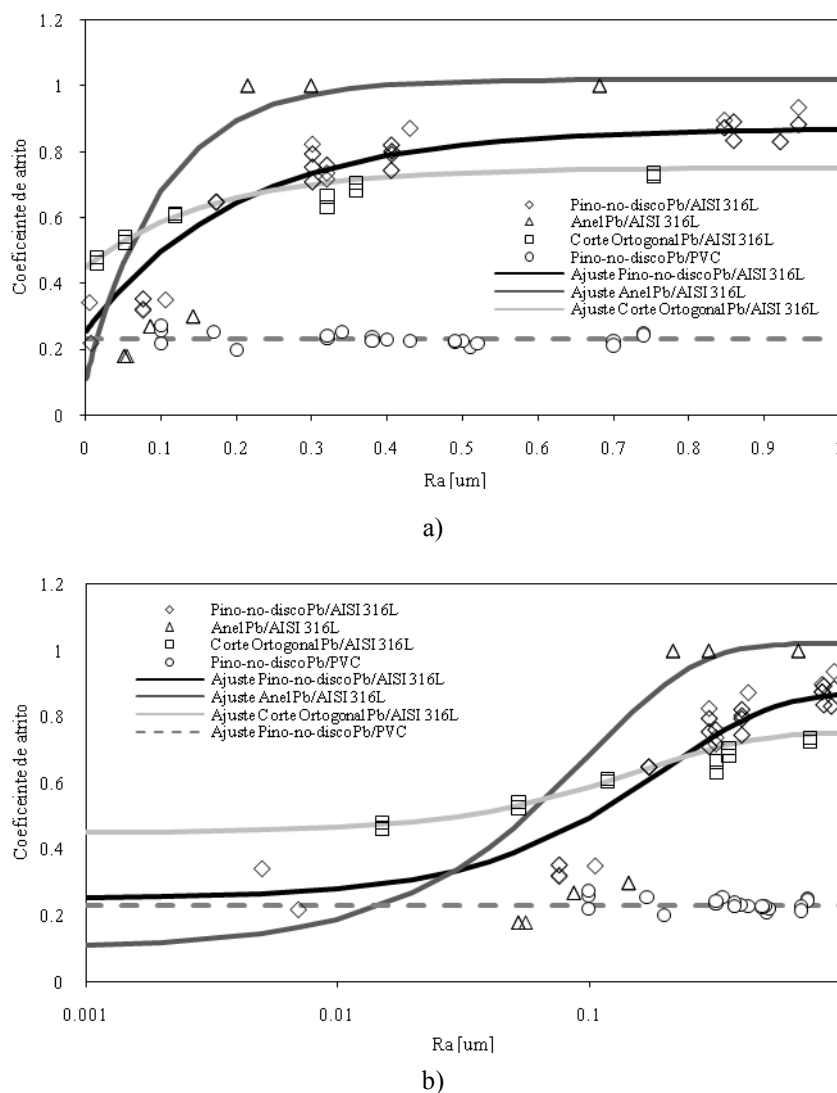


Fig. 8 – a) Evolução do coeficiente de atrito com R_a ; b) com escala logarítmica no eixo horizontal.

A Fig. 8 também revela diferenças significativas entre a variação do coeficiente de atrito em função da rugosidade para os pares Pb/ AISI 316L, e Pb/ PVC. De facto, os ensaios realizados com os discos de PVC forneceram um coeficiente de atrito $\mu \approx 0.24$ que é aproximadamente constante e independente da rugosidade superficial em toda a gama dos ensaios realizados. Este comportamento pode ser explicado pelo facto de que as propriedades mecânicas do PVC e do chumbo serem muito similares em comparação com o par Pb/AISI 316L. Por outras palavras, o contacto entre superfícies com propriedades mecânicas muito próximas reduz (ou elimina) a interação entre as asperezas, pois o grau

de penetração e deformação das asperezas nos discos é relativamente pequeno. Contudo em resultado da interação dos pares Pb/AISI 316L e Pb/PVC, ajudam a entender as diferenças básicas existente no comportamento do atrito entre os processos de deformação e de corte. No caso dos processos de deformação as diferenças existentes nas propriedades mecânicas da peça a trabalhar e da ferramenta é menor quando comparado com as diferenças verificadas nos processos de corte e esta é a razão pelo que o comportamento do atrito nos processos de deformação em condições de atrito seco é pouco sensível à influência da rugosidade superficial em relação aos processos de corte.

Quando comparados os resultados obtidos no ensaio pino-no-disco com os obtidos no processo de corte, verifica-se que, para $R_a < 0.25 \mu\text{m}$, o coeficiente de atrito obtido no processo de corte é superior em relação ao do pino-no-disco. A presença de superfícies recém-formadas no processo de corte de metais, não é recriada na sua totalidade recorrendo aos ensaios de pino-no-disco e de anel, mesmo assim, apresentam uma boa correlação qualitativa. Mas, ao aumentar a rugosidade do prato de compressão, no ensaio de anel, o valor do coeficiente de atrito atinge rapidamente o valor máximo. Este efeito de saturação da geometria do provete, torna este ensaio menos indicado para descrever o atrito no corte.

4- CONCLUSÕES

A avaliação do coeficiente de atrito nos processos reais de corte e de deformação, além de complexa, é uma tarefa morosa. No entanto, a realização dos ensaios tribológicos em equipamentos do tipo pino-no-disco permite agilizar a quantificação do atrito e das influências das suas principais variáveis operativas, mas é necessário seguir procedimentos adequados de modo a permitir reproduzir as condições tribológicas representativas do caso de estudo real.

Este trabalho permitiu mostrar que com o pino-no-disco, é possível avaliar o coeficiente de atrito no corte por arranque de apara, quando combinado com um controlo adequado da morfologia e da rugosidade superficial. Os resultados obtidos também permitem concluir que a diferença existente nas propriedades mecânicas do material dos pinos e discos faz com que existam variações significativas do coeficiente de atrito com a rugosidade superficial, enquanto para materiais com propriedades mecânicas similares, o coeficiente de atrito é praticamente constante e independente da rugosidade superficial, em condições de atrito seco.

5- AGRADECIMENTOS

Os autores querem agradecer ao POCI-2010 o suporte financeiro.

6- REFERÊNCIAS

- Armarego E.J., Brown R.H., 1969. The Machining of Metals, Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Altan T., Henning H. J. e Sabroff A. M. , 1970. The use of model materials in predicting forming loads in metalworking, Journal Engineering for Industry, Trans. ASME, Vol. 92, pp. 444-452.
- Astakhov V.P. e Outeiro J.C. , 2008. Metal cutting mechanics, finite element modelling, Machining Fundamentals and Recent Advances, Davim J. P., Springer, London, pp. 1-27.
- Bil H., Kiliç S.E. e Tekkaya A.E. , 2004. A comparison of orthogonal cutting data from experiments with three different finite element models, International Journal of MachineTools & Manufacture, Vol. 44, pp. 933-944.
- Blau, P.J., 2009. Friction science and technology, Taylor & Francis Group, EUA.
- Booser, R., 1985. CRC Handbook of Lubrication, Vol 1-3, CRC Press, Inc.
- Bowden F.P. e Tabor D., 1964., Friction and lubrication of solids'. Oxford Clarendon Press, Oxford.
- Bowers R.C., Clinton W.C. e Zisman W.A., 1953. Frictional behavior of polyethylene, polytetrafluorethylene and halogenated derivatives, Lubrication Engineering, Vol. 9 pp 204-209.
- Male A.T. e 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.
- Menezes P.L., Kishore e Kailas S.V., 2009. Role of surface texture of harder surface on subsurface deformation, Wear, Vol. 266, pp. 103-109.
- Schey J.A., 1983. Tribology in metal working: friction lubrication and Wear, ASM.
- Sedlacek M., Podgornik B. e Vizintin J., 2009. Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear, Wear, Vol. 266, pp. 482-487.
- Shooter K. e Thomas R.H., 1952. Frictional properties of some plastics, Research, Vol. 2, pp. 533-539.

Cristino V.A.M., Silva C.M.A., Rosa P.A.R. e Martins P.A.F.