

## EFEITO DOS FILMES FINOS DE ÓXIDOS NO COEFICIENTE DE ATRITO

**Cristino V.A.M.<sup>1a</sup>, Silva C.M.A.<sup>1b</sup>, Rosa P.A.R.<sup>1c</sup>, Martins P.A.F.<sup>1d</sup>**

1- Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais nº1, 1049-001 Lisboa, Portugal  
email: {valentino.anok, carlos.alves.silva, pedro.rosa, pmartins}@ist.utl.pt

**Palavras chave:** Processos de fabrico, Coeficiente de atrito, Rugosidade, Atmosfera controlada

**Resumo**

O atrito é um fenómeno muito importante que intervém em quase todos os processos de fabrico, surgindo nas interfaces onde exista movimento relativo entre o material e as ferramentas. Na generalidade dos casos o atrito é um fenómeno indesejável, na medida em que exige maior potência para efectuar a operação, afecta o acabamento superficial da peça e provoca desgaste nas ferramentas. A Tribologia recomenda vários tipos de ensaios destinados para medir o valor do coeficiente de atrito, no entanto, a aplicação desses ensaios não diferencia a existência de filmes finos de óxido na superfície dos materiais metálicos a processar, levantando questões quanto à sua contribuição no valor do coeficiente de atrito e quanto à selecção do ensaio tribológico mais adequado.

O presente trabalho apresenta uma nova metodologia que permite avaliar quantitativamente a influência da rugosidade e dos filmes finos de óxido superficial no valor do coeficiente de atrito. Os ensaios experimentais basearam-se no tradicional ensaio de anel, tendo sido realizados com provetes em UNS L51120 e pratos de compressão fabricadas em aço AISI 316L. Os ensaios experimentais foram realizados em condições quasi-estática e de atmosfera controlada. A análise dos resultados permitiu demonstrar que a existência de filmes finos de óxidos promove o aumento do coeficiente de atrito quando as superfícies das ferramentas têm um valor de rugosidade reduzido.

## 1. Introdução

O atrito tem um papel fundamental nos processos tecnológicos de deformação plástica devido à constante interacção entre as superfícies da peça e ferramenta durante o processo. Quando o atrito não é controlado, geralmente leva ao aumento da temperatura, consumo de energia, e como consequência, o aumento do número de defeitos nas peças e desgaste nas ferramentas.

A utilização de ensaios laboratoriais para o estudo e avaliação do atrito é essencial para conseguir obter boas estimativas das tensões locais na ferramenta, de modo a otimizar o seu projecto e assegurar um bom toleranciamento e acabamento das peças obtidas.

Existe um vasto leque de ensaios sugeridos na literatura da especialidade para modelar as condições tribológicas na interface peça-ferramenta [1], mas a sua quantificação é de certa maneira complicada, dado que esta depende da pressão de contacto, a área de expansão, a velocidade relativa, a temperatura da interface entre outros parâmetros [2]. Geralmente, os ensaios tribológicos podem ser organizados em duas categorias: ensaios no processo e ensaios simulativos [3]. Os ensaios no processo são definidos como os ensaios aplicados a operações de deformação plástica sem alterar a cinemática básica do processo (p. ex. compressão uniaxial, anel, entre outros). Os ensaios simulativos são definidos como ensaios para modelar experimentalmente as condições tribológicas na deformação plástica de metais como tentativa para o estudo do atrito numa forma controlada (p. ex., pino-no-disco, contorção e outros). Estes últimos são normalmente caracterizados com um desvio substancial na cinemática com as condições do processo real.

Um dos ensaios mais utilizados na deformação plástica de metais para avaliar o atrito é o ensaio de anel. A revisão histórica da investigação no ensaio de anel (Figura 1) pode ser organizado em três diferentes períodos. O primeiro período (1954-1970) foi marcado pelos estudos experimentais pioneiros do Kunogi [4] e Male e Cockcroft [5] e da modelação matemática iniciada por Kudo [6, 7], Hawkyard e Johnson [8] e Avitzur [9]. Neste período, a investigação focou-se principalmente na geração das primeiras curvas de calibração de forma matemática e no desenvolvimento dos modelos teóricos baseados no método do limite superior e fatia elementar para prever a posição da superfície neutra que faz a divisão do escoamento do material para o exterior e interior.

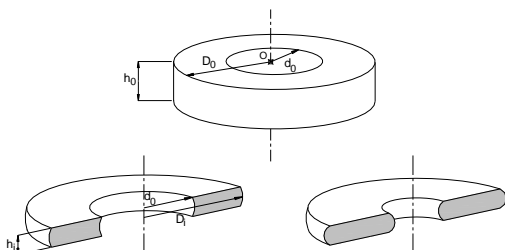


Figura 1: Representação esquemática da cinemática do ensaio de anel: em casos de baixo atrito, os diâmetros interior e exterior do provete aumentam com a compressão do provete, sendo que, estes reduzem com o aumento do atrito.

No segundo período (1970-1990), foram revistas as modelações do ensaio de anel desenvolvidas até à data, de forma a compreender as simplificações e limitações para o desenvolvimento de novos métodos de simulação numérica direccionados para reduzir as diferenças entre a estimativa teórica e os resultados experimentais. A utilização da análise em elementos finitos ajudou os investigadores a compreender a influência dos diferentes parâmetros operativos no processo, tal como o encruamento, velocidade de deformação, temperatura e lubrificação para a geração das curvas de calibração mais realistas. Algumas das contribuições mais significativas deste período estão descritas na revisão bibliográfica realizada por Rao e Sivaram [10].

O terceiro período (1990-até presente) é motivado por diferentes objectivos de estudo: (i) a consolidação do conhecimento com combinação dos meios experimentais e de modelação por elementos finitos, para a geração de curvas de calibração de atrito, para diferentes modelos de atrito e em condições similares no ensaio de anel [11, 12], (ii) desenvolvimento de geometrias complementares para o ensaio de anel de modo a conseguir uma caracterização do atrito a elevadas pressões de contacto [13] e (iii) o melhoramento dos mecanismos de atrito ao considerar a influência da textura da superfície e a rugosidade no atrito [14-16].

Desde o início da investigação experimental no ensaio de anel, foi evidente que o valor do coeficiente de atrito é influenciado por vários parâmetros, sendo os mais estudados os parâmetros operativos relacionados directamente com os de deformação plástica, tal como o encruamento, velocidade de deformação, a temperatura e a lubrificação. No que toca à influência da rugosidade superficial no atrito, que é um dos temas essenciais do presente trabalho, os trabalhos desenvolvidos anteriormente focaram simplesmente no acabamento superficial dos provetes no atrito obtido. Mesmo quando os resultados demonstram que a morfologia da superfície tem influência no atrito, a discussão é orientada para a influência da lubrificação e da variação das condições de contacto devido à deformação dos provetes pelos pratos de compressão (p. ex. Hu e Dean [14] e Sahin e co-autores [16]).

A influência dos filmes de óxidos superficiais é normalmente associado ao efeito da oxidação dos provetes, resultando uma variação do coeficiente de atrito durante o ensaio, embora nem sempre foi claro o papel dos filmes de óxidos superficiais no fenómeno dado à complexidade de realizar ensaios com atmosferas controladas [17].

Deste modo, o presente trabalho de investigação procura estabelecer uma nova metodologia experimental que permite isolar e quantificar a influência da rugosidade e dos filmes finos de óxidos superficiais no coeficiente de atrito, baseado no tradicional ensaio de anel.

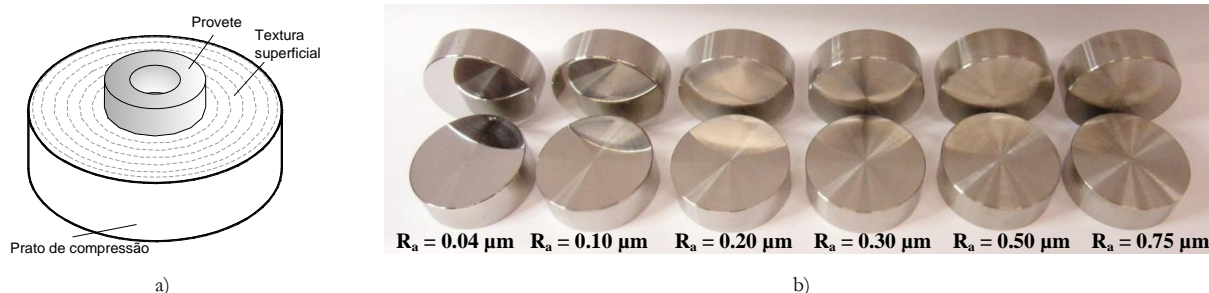


Figura 2: Pratos de compressão utilizados nos ensaios: a) Representação esquemática da textura superficial dos pratos de compressão; b) Conjunto de pratos utilizados com diferentes valores de rugosidade aritmética média ( $R_a$ ).

## 2. Equipamento e Procedimentos Experimentais

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

O trabalho experimental foi realizado na máquina de ensaios universal Instron com capacidade de 1200 kN, onde o provete é comprimido em vários estágios. No final de cada estágio, registados os valores da altura, diâmetro interior e exterior, para subsequente manipulação e aplicação em ábacos de calibração do atrito.

Foram utilizados um conjunto de pratos fabricados em aço AISI 316L com diferentes rugosidades para realizar os ensaios. Estes foram polidos de forma a obter uma textura radial, com o recurso a pano/lixas com diferente granulometria para assegurar os valores da rugosidade superficial adequados aos objectivos da investigação. Os valores da rugosidade superficial ( $R_a$ ) variam de 0.04 a 0.65 (Figura 2) e estes valores foram medidos com recursos a um rugosímetro de contacto Kosaka Lab SE 1200. É importante realçar que a textura dos pratos foi projectada de forma a assegurar a direcionalidade de acordo com o escoamento do material durante o ensaio, porque a textura superficial influencia drasticamente o valor médio do coeficiente de atrito [18].

### 2.1. Plano de Ensaios

Estudos anteriores relativos à geometria e às 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 (Figura 1) são os que apresentaram os melhores resultados para avaliar o factor de atrito [5]. Neste trabalho foram utilizados anéis 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.

A influência do efeito dos filmes finos de óxidos superficiais foi avaliada em vários ensaios com a presença de ar e atmosferas controladas de um gás inerte (árgon) e um outro activo (oxigénio), dentro de uma câmara estanque flexível. Para remover qualquer tipo de óxidos e impurezas superficiais originados pela exposição ao ar livre, os provetes foram polidos dentro da câmara com o respectivo gás utilizado no ensaio, antes de cada ensaio. Os gases são aplicados de uma fonte externa aplicada a uma taxa aproximadamente igual a 5 l/min através duma válvula sobre o aparato ao longo do ensaio, como ilustrado na Figura 3.

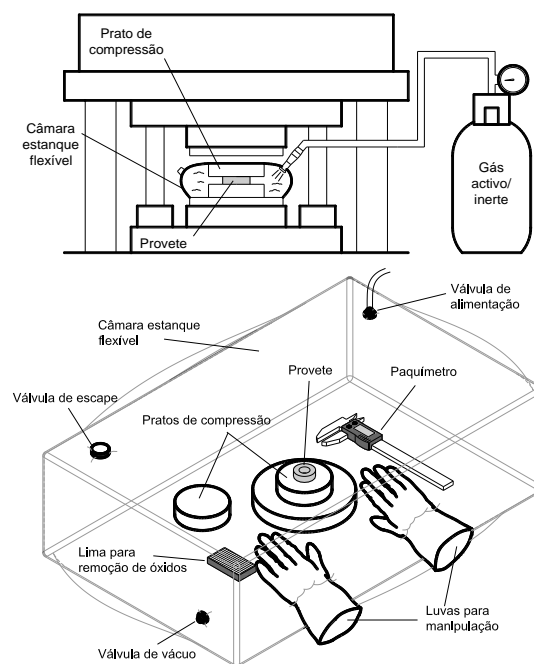


Figura 3: Representação esquemática ensaio de anel com atmosfera controlada.

A liga de chumbo UNS L51120 foi escolhido como o material em estudo devido ao seu comportamento mecânico a baixas velocidades de deformação ser muito próximo do material rígido-perfeitamente plástico, utilizado na generalidade das modelações teóricas dos processos tecnológicos de deformação plástica. Ainda por cima, a sua escolha permite simular à temperatura ambiente e a baixa velocidade, o comportamento de aços em condições de temperatura e velocidade de deformação similares aos processos industriais.

A Tabela 1 resume o plano de ensaios projectado de forma a correlacionar a influência da rugosidade superficial dos pratos de compressão e dos filmes finos de óxidos superficiais com o atrito. A eliminação da utilização do lubrificante, temperatura e encruamento no plano de ensaios é crucial para reduzir o número de parâmetros que influenciam a condição tribológica do processo.

Tabela 1: Plano de ensaios

Caso	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Incremento (mm)	Atmosfera
1-12	0.04, 0.10,	0.5	Árgon
13-24	0.20, 0.30,		Ar
25-36	0.50, 0.75		Oxigénio

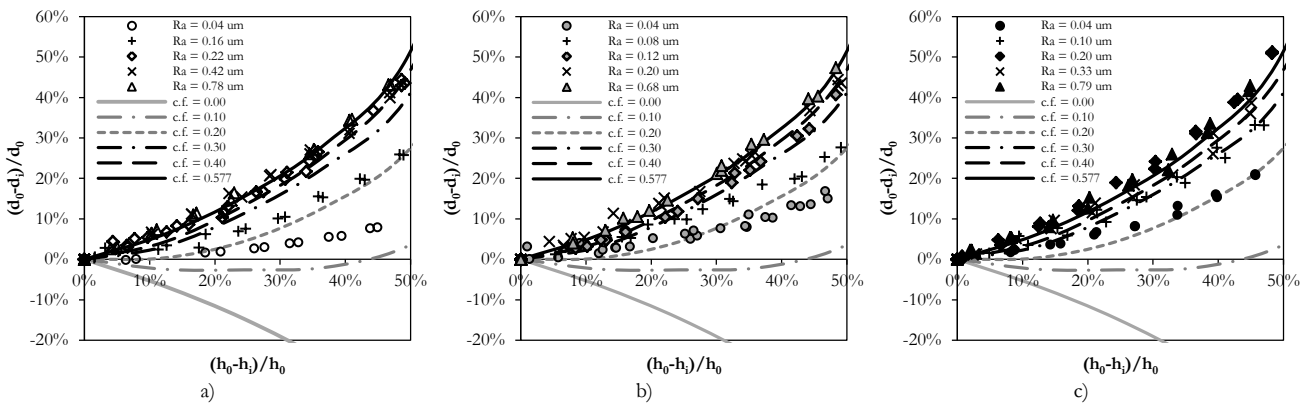


Figura 4: Resultados experimentais e curvas de calibração obtidas pelo método de elementos finitos com diferentes tipos de atmosferas controladas: a) Árgon, b) Ar e c) Oxigénio

### 3. Resultados e Discussão

Esta secção foi estruturada de forma a identificar a influência da presença dos filmes de óxidos superficiais no coeficiente de atrito: começa com a apresentação dos resultados experimentais, e depois será feita uma avaliação comparativa da presença de diferentes tipos de atmosferas no valor de atrito obtido pelo ensaio de anel. As curvas de calibração foram determinadas a partir do método de elementos finitos, através do software I-FORM2.

A Figura 4 apresenta as curvas de calibração e os resultados experimentais obtidos para diferentes tipos de atmosferas controladas apresentadas na Tabela 1. A geometria final dos provetes depois do ensaio, para os diferentes tipos de atmosferas controladas é apresentada na Figura 5.

Uma breve observação nas Figuras 4 e 5 permite concluir 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. Também pode verificar que o valor da rugosidade em que inicia o efeito de saturação da geometria do provete dependente da atmosfera presente, sendo que a presença do oxigénio promove um valor de coeficiente de atrito maior.

Também se verifica que a curva de calibração para  $\mu = 0.4$  se encontra muito próximo da curva para o atrito máximo teórico  $\mu = 0.577$ , indicando que existe alguma dificuldade em reproduzir valores de atrito elevados com este tipo de ensaio.

Para uma melhor compreensão da influência dos filmes de óxidos superficiais no valor final do coeficiente de atrito no ensaio de anel, a evolução do coeficiente de atrito em função do valor de  $R_a$  dos pratos de compressão é representada graficamente na Figura 6.

Consegue-se observar através da Figura 6 que a evolução do coeficiente de atrito com  $R_a$  segue uma função do tipo sigmóide, destacando com três regiões distintas: (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. Na região à esquerda do gráfico, a rugosidade superficial dos discos é muito reduzida ( $R_a < 0.1 \mu\text{m}$ ), sendo que nesta zona o mecanismo de atrito é originado basicamente pelo fenómeno de adesão. Contrariamente a este caso, 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 do prato (material com dureza superior em relação ao provete) penetram no interior do provete produzindo aparas resultantes do micro-corte ao nível das asperezas, resultando uma forte resistência ao escoamento e explica o aumento observado do valor do coeficiente de atrito na interacção de materiais com rugosidade superficial elevada [19].

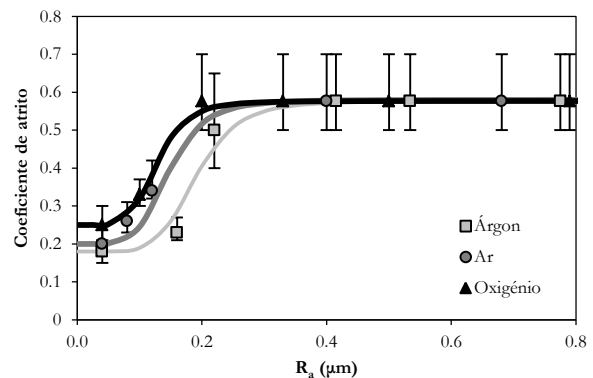


Figura 6: Coeficiente de atrito em função do  $R_a$  para os diferentes tipos de atmosfera apresentadas na Tabela 1.

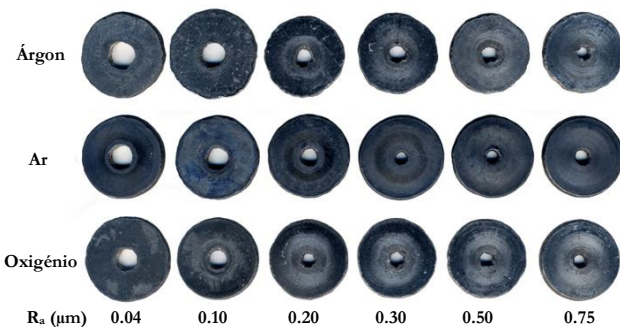


Figura 5: Influência dos filmes finos de óxidos na geometria final do provete.

As diferentes formas de interacção entre as superfícies material dúctil/óxido/material da ferramenta, para o par tribológico em estudo, encontra-se ilustrada na Figura 7.

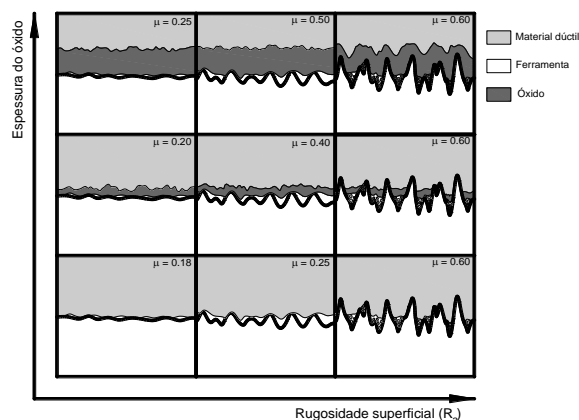


Figura 7: Ilustração representando a interação entre as superfícies do prato de compressão e provete para diferentes espessuras de filmes de óxidos.

A Figura 6 também demonstra que a influência da propriedade activa/inerte do meio envolvente é mais evidente nos casos em que os pratos de compressão apresentam uma baixa rugosidade ( $R_a < 0.3 \mu\text{m}$ ), aumento do coeficiente de atrito que pode atingir uma diferença de cerca de 25%. Mas, nos casos das rugosidades elevadas, a forte resistência ao escoamento do material e a subsequente geração de micro-aparas reduz o efeito dos filmes de óxidos no valor final do coeficiente de atrito. Mas é de notar que se perde sensibilidade no ensaio para reproduzir valores de coeficiente de atrito elevados no ensaio de anel, já que ocorre um fenómeno de saturação da geometria do provete para  $\mu > 0.3$ .

#### 4. Conclusões

A avaliação do coeficiente de atrito nos processos tecnológicos de deformação plástica, além de complexa, é uma tarefa morosa. No entanto, a realização dos ensaios laboratoriais permite agilizar a quantificação do atrito e das influências dos seus principais parâmetros operativos, mas é necessário seguir procedimentos adequados de modo a permitir reproduzir as condições tribológicas representativas do caso em estudo, de uma forma realista. Na literatura da especialidade, a oxidação foi sempre um parâmetro difícil de controlar e a avaliação da sua influência de uma forma isolada nos ensaios tribológicos não é tarefa simples, o que faz com o seu papel no fenómeno nunca foi devidamente esclarecido.

O presente trabalho demonstrou que é possível isolar e quantificar a influência dos filmes de óxidos superficiais no coeficiente de atrito, através da realização do tradicional ensaio de anel numa câmara estanque flexível, combinado com um controlo adequado da morfologia e da rugosidade superficial. Os resultados obtidos também permitiram concluir que o ensaio de anel, embora sendo um ensaio muito utilizado, é necessário conciliar uma boa caracterização mecânica do material em estudo e condições superficiais do conjunto provete/pratos de compressão, para obter resultados fiáveis.

#### 5. Agradecimentos

Os autores querem agradecer ao POCI-2010 e SFRH/BD/46798/2008 o suporte financeiro.

#### Referências

- [1] Schey J. A., *Tribology in metalworking: friction, lubrication and wear*, American Society for Metals, Metals Park, Russell Township, USA, 1983.
- [2] Bay N., “Modelling of friction in cold metal forming processes”, *Proceedings of the 2nd Workshop on Process Simulation in Metal Forming Industry*, DIMEG, Padova, Italy, 2002.
- [3] Bay N., Wibom O., Martins P. A. F., “Testing of friction and lubrication in bulk metal forming”, *Proceedings of the IMECE98 - International Mechanical Engineering Conference and Exhibition*, Anaheim, USA, 1998.
- [4] Kunogi M., “On plastic deformation of hollow cylinders under axial compressive loading”, *Journal Science Research Institute (Tokyo)*, 1954; **2**: 63-92.
- [5] Male A. T., Cockcroft, M. G., “A method for the determination of the coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation”, *Journal of the Institute of Metals*, 1965; **93**: 38-46.
- [6] Kudo H., “An analysis of plastic compressive deformation of lamella between rough plates by energy method”, *Proceedings of the 5th. Japan National Congress Applied Mechanics*, Japan, 1995.
- [7] Kudo H., “Some analytical and experimental studies of axisymmetric cold forging and extrusion”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 1960; **2**: 102-127.
- [8] Hawkyard J. B., Johnson W., “An analysis of the changes in geometry of a short hollow cylinder during axial compression”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 1967; **9**: 163-182.
- [9] Avitzur B., *Metal forming: processes and analysis*, McGraw-Hill, New York, 1968.
- [10] Rao K. P., Sivaram K., “A review of ring-compression testing and applicability of the calibration curves”, *Journal of Materials Processing Technology*, 1993; **37**: 295-318.
- [11] Petersen S. B., Martins P. A. F., Bay N., “Friction in bulk metal forming: a general friction model vs. the law of constant friction”, *Journal of Materials Processing Technology*, **66**: 186-194, 1997.
- [12] Tan X. “Comparisons of friction models in bulk metal forming”, *Tribology International*, **35**: 385-393, 2002.
- [13] Petersen S. B., Martins P. A. F., Bay N., “An alternative ring-test geometry for the evaluation of friction under low normal pressure”, *Journal of Materials Processing Technology*, **79**: 14-24, 1998.
- [14] Hu Z. M. and Dean T. A., “A study of surface topography, friction and lubricants in metal forming”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **40**: 1637-1649, 2000.
- [15] Mahrenholtz O., Bontcheva N., Iankov R., “Influence of surface roughness on friction during metal forming processes”, *Journal of Materials Processing Technology*, **159**: 9-16, 2005.
- [16] Sahin M., Çetinarslan C. S., Akata H. E., “Effect of surface roughness on friction coefficients during

upsetting processes for different materials”, *Materials and Design*, **28**: 633-640, 2007.

- [17] Male A.T., “Variations in friction coefficients of metals during compressive deformation”, *Journal of Institute of Metals*, **94**: 121–125, 1966.
- [18] M. Sedlacek, B. Podgornik and J. Vizintin, “Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear”, *Wear*, **266**: 482–487, 2009.
- [19] F.P. Bowden e D. Tabor, *Friction and lubrication of solids*, Oxford Clarendon Press, Oxford, 1964.