

Estudo do efeito da rugosidade superficial sobre o coeficiente de atrito no ensaio de compressão do anel

Effect of surface roughness on the coefficient of friction in the ring compression test

Paulo Ricardo Böesch Júnior¹

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
paulo.boesch@ufrgs.br

Daiana Mello Margutti¹

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
daiana.magutti@ufrgs.br

Vinícius Martins²

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense, Brasil
viniciushiper@yahoo.com.br

Alex Fabiano Bueno¹

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
alex.bueno@ufrgs.br

Lírio Schaeffer¹

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
schaefer@ufrgs.br

Resumo. A avaliação das condições tribológicas, dentre elas o atrito por meio de modelos simples é questionável porque a influência da rugosidade superficial e resistência de materiais, entre outros fatores, não é considerada. Este trabalho apresenta uma análise detalhada da influência da rugosidade superficial sobre o atrito na interface peça/matriz. Os estudos estão baseados em dados experimentais obtidos por meio do ensaio de compressão do anel, os quais foram comparados com os resultados de simulações e com as curvas de calibração de atrito modeladas em *software* de elementos finitos. Uma série de ensaios de compressão do anel foi realizada para obter os coeficientes de atrito para diversas faixas de rugosidade superficial do corpo de prova.

Palavras-chave: ensaio de compressão do anel, rugosidade superficial, coeficiente de atrito, simulação numérica.

Abstract. The evaluation of the tribological conditions, among which the friction by means of simple models are questionable because the influence of superficial roughness and strength of materials, among other factors, is not considered. This paper presents a detailed analysis on the influence of surface roughness on friction at the specimen/die interface. The studies are based on experimental data obtained by the ring compression test, which they were compared with results of simulations and the calibration curves of friction modeled in finite element software. A series of ring compression tests was performed to obtain the friction coefficient for various ranges of surface roughness of the specimen.

Key words: ring compression test, surface roughness, friction coefficient, numerical simulation.

¹ Laboratório de Transformação Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil.

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense. Campus de Sapucaia do Sul. Av. Copacabana, 100, 93216-120, Sapucaia do Sul, RS, Brasil.

Introdução

A rugosidade influencia de maneira significativa na determinação do coeficiente de atrito, que desempenha um importante papel na conformação de metais devido ao movimento relativo e à pressão existente na interface de contato entre as ferramentas e peças. O atrito causa características desfavoráveis ao processo como desgaste no ferramental, aumento do consumo de energia associada à deformação, eleva a temperatura de trabalho e altera o estado de tensões presente durante a conformação. Porém, em alguns casos, como na laminação, o atrito é necessário para facilitar o “agarramento” das ferramentas com o metal a ser conformado.

A utilização de ensaios de condições tribológicas para avaliar o atrito é essencial para estimar as tensões locais na ferramenta e com isso evitar o projeto inadequado de matrizes, otimizar a conformabilidade do material de trabalho e garantir a qualidade desejada das peças acabadas (Cristino *et al.*, 2010). Vários ensaios são sugeridos na literatura para modelar as condições tribológicas na interface peça-ferramenta, mas a determinação do atrito é complicada, uma vez que depende da pressão de contato, da expansão da área, velocidade de deslizamento relativa e da temperatura de interface, entre outros fatores (Bay, 2002).

Dentre os métodos para medir o coeficiente de atrito, o ensaio de compressão do anel ganhou ampla aceitação nas últimas duas décadas. Foi originado por Kunogi (1956) e posteriormente aprimorado e apresentado de uma forma utilizável por Male e Cockcroft (1965). Esta técnica utiliza as alterações dimensionais de um corpo de prova para quantificar o coeficiente de atrito. Quando um anel liso é comprimido entre duas placas planas, um alto atrito resulta em um fluxo interno do material, e um baixo atrito resulta em escoamento do material como esquematicamente mostrado na Figura 1. Para uma determinada percentagem de redução da altura durante o ensaio de compressão e a variação do diâmetro interno da amostra, determinam o fator de atrito na interface peça/matriz. O aumento do diâmetro interno durante a deformação resulta em baixo atrito; se o diâmetro interno da amostra diminui durante o ensaio, tem-se um alto atrito. Usando esta relação, os coeficientes de atrito podem ser plotados em curvas específicas (Sofuoglu e Rsty, 1999).

No início do processo de conformação, a ferramenta e o corpo de prova estão em contato

apenas pelos picos de asperezas, o que leva a rugosidade ter forte influência no coeficiente de atrito. Conforme a evolução do processo, ocorre a deformação dos picos na peça e na ferramenta, diminuindo a influência da rugosidade no coeficiente de atrito (Dieter, 1981). A rugosidade é o conjunto de irregularidades, pequenas saliências (picos) e reentrâncias (vales) que caracterizam uma superfície, sendo uma maneira de descrever a qualidade superficial de uma peça acabada. Esta também influencia diretamente na força de deslizamento, na resistência à corrosão e ao desgaste (Sahin *et al.*, 2007).

Existem vários métodos de determinar a rugosidade, entre os mais simples estão a inspeção visual a olho nu ou a inspeção por meio da sensação dos dedos. Há métodos baseados na comparação com amostras de superfícies conhecidas. Mas, para avaliar a rugosidade com maior precisão usa-se o rugosímetro digital, aparelho eletrônico de varredura.

Svahn *et al.* (2003) investigaram a influência da rugosidade superficial sobre o atrito e o desgaste por deslizamento de revestimentos de cromo e tungstênio aplicados em elementos de máquina. Sahin *et al.* (2007) estudaram o efeito da rugosidade superficial em corpos de prova de diferentes materiais por intermédio do ensaio de compressão do anel entre matrizes planas.

Neste trabalho, será analisada a influência da rugosidade superficial dos corpos de prova na determinação do coeficiente de atrito por meio

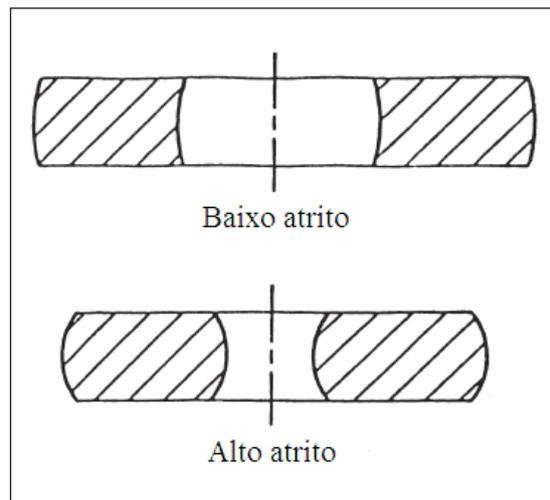


Figura 1. Efeito do atrito sobre o fluxo de metal durante o ensaio de compressão do anel.

Figure 1. Friction effect of the metal flow during ring compression test.

Fonte: Sofuoglu e Rsty (1999).

do ensaio do anel. Estes dados ajudarão a compreender melhor a propriedades do aço AISI 4140 durante o processo de forjamento a quente.

Materiais e métodos

Para o estudo, foram utilizados corpos de prova de aço AISI 4140 (DIN 42CrMo4) conforme as dimensões da Figura 2. Para as matrizes, foi utilizado o aço AISI H13. A composição química dos aços está representada na Tabela 1.

Preparo da superfície dos corpos de prova

Os corpos de prova foram divididos em três faixas de rugosidade devido a dificul-

dade de usiná-los com a mesma rugosidade superficial. A Tabela 2 mostra a rugosidade dos corpos de prova, a qual foi medida com o auxílio de um rugosímetro da marca Mitotoyo, modelo SJ-201P com medições de 5 (cinco) divisões em 0,25mm. A Figura 3 apresenta o rugosímetro digital utilizado nas medições. Foram preparados 27 corpos de prova, sendo utilizados três por faixa de rugosidade conformados com deformação de 20, 40 e 60%.

Preparo da superfície das ferramentas

Foram usinados três pares de matrizes com a finalidade de obter rugosidades super-

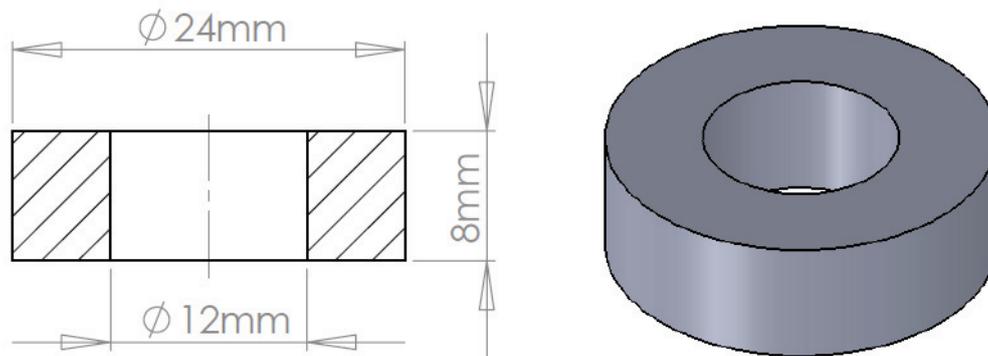


Figura 2. Dimensões do corpo de prova.

Figure 2. Specimen dimensions.

Tabela 1. Composição química do aço AISI 4140 e do aço AISI H13.

Table 1. Chemical composition of AISI 4140 and AISI H13 steel.

	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
AISI 4140	0,40	0,25	0,90	0,95	0,20	-
AISI H13	0,40	1,00	0,35	5,20	1,30	1,90

Fonte: Catálogo Villares Metals (2010).

Tabela 2. Rugosidades obtidas nos corpos de prova de aço AISI 4140.

Table 2. Roughness obtained in specimens of AISI 4140 steel.

	Grupo I	Grupo II	Grupo III
Faixa de Rugosidade Ra (µm)	1,10 – 1,50	1,55 – 1,95	2,00 – 2,7
Nº de corpos de provas total	9	9	9



Figura 3. Rugosímetro da marca Mitutoyo modelo SJ-201P.

Figure 3. Rugosimeter brand Mitutoyo model SJ-201P.

ficiais entre 0,9 - 1,1 μ m com medições de 5 (cinco) divisões em 0,8mm. A cada corpo de prova comprimido, a matriz foi preparada novamente para a mesma faixa de rugosidade. A Figura 4 mostra as matrizes de AISI H13 temperadas e revenidas com dureza de 42HRC. Trabalhou-se com esta dureza para facilitar o retrabalho das matrizes após cada conformação.

Ensaio de compressão

Os ensaios de compressão foram realizados entre matrizes planas na prensa EKA, com velocidade de 3,7mm/s e capacidade de 392,3kN (40ton), a uma temperatura de 1200°C e com deformações aproximadas de 20%, 40% e 60%.

O diâmetro interno e altura dos corpos de prova foram medidos após cada ensaio. Com essas alterações, plotou-se a curva de altura final *versus* diâmetro interno final, na qual se comparou com as curvas simuladas para diversos coeficientes de atrito.

Curvas de calibração

As curvas de calibração foram obtidas no *software* MSC Simufact.forming 9.0, em função do modelo de atrito de Amonton-Coulomb (μ).

Para a construção dessas curvas, foram realizadas séries de simulações nas quais o atrito iniciou em zero, sofrendo incrementos de um em um décimo até 0,50 μ . A curva de 0,45 μ foi plotada para melhor analisar os resultados distinguindo os pontos na curva.

O registro de cada simulação de compressão do anel foi realizado em seis instantes ao longo do curso da prensa. Na definição destes, foi considerado um intervalo de 10% de redução em altura do corpo de prova até 60%, resultando numa altura final de 3,2mm.

Posteriormente, os modelos conformados foram exportados em formato STL para *software* de CAD, com o qual foi medida de forma mais prática a variação do diâmetro interno em função da redução em altura para cada valor de atrito.

Resultados e discussão

As variações percentuais calculadas para o diâmetro interno e para a altura foram plotadas juntamente com as curvas obtidas por meio da simulação numérica para diferentes atritos.

Primeiramente foram conformadas as amostras do Grupo I, sendo que, após cada deformação, as matrizes foram preparadas novamente devido ao fato de a compressão alterar a rugosidade superficial. Posteriormente, foram conformados os corpos de prova do Grupo II e do Grupo III. Os resultados experimentais estão apresentados na Figura 5, em que os corpos de prova do Grupo II e do Grupo III tiveram o coeficiente de atrito de aproximadamente 0,45 μ . Para o Grupo I, o coeficiente de atrito é cerca de 0,5 μ . O interessante é que os corpos de prova do Grupo I possuem valores menores de rugosidade superficial (1,1-1,5 μ m) e apresentaram valores maiores de coeficiente de atrito. Isso ocorre devido à área de contato entre a matriz e o corpo de prova ser maior para rugosidades mais baixas. Quanto maior a rugosidade, os picos são mais elevados e levam mais tempo para aderir na ferramenta, ocasionando melhor escoamento do material, o que leva a uma menor redução do diâmetro interno, ou seja, menor atrito. Esses resultados estão de acordo com os resultados apresentados por Sahin *et al.* (2007).

As Figuras 6, 7 e 8 apresentam as amostras com aproximadamente 20, 40 e 60% de deformação, sendo que as Figuras (a) são as amostras experimentalmente conformadas e as Figuras (b) são as simuladas.

Na Figura 6, observa-se a similaridade entre o resultado do ensaio prático e o resultado da simulação numérica. Na Figura 7, pode ser vista a homogeneidade da distribuição de tensões no diâmetro interno na amostra física, porém na amostra simulada percebe-se uma distorção no contorno do diâmetro interno.

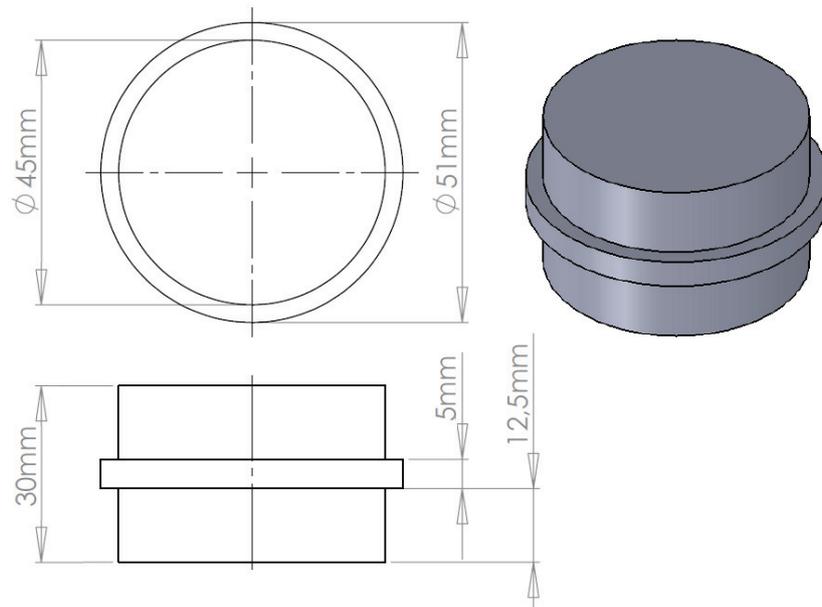


Figura 4. Matrizes de AISI H13.
Figure 4. AISI H13 dies.

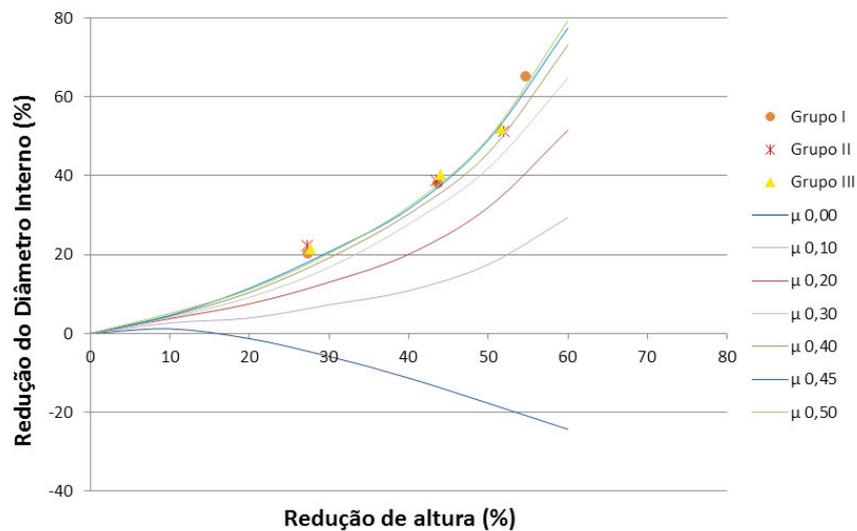


Figura 5. Curvas de coeficiente de atrito com os dados experimentais.
Figure 5. Friction coefficient curves with experimental data.

A Figura 8b não apresenta compatibilidade com os resultados experimentais, devido à capacidade da prensa impossibilitar a deformação até o nível definido de 60%, chegando ao máximo de 54%. Devido a esse fato, não é possível visualizar as dobras na amostra Figura 8a, presentes nas simulações.

Os coeficientes de atrito do Grupo II e do Grupo III mostraram similaridades; isso ocorreu devido à faixa de rugosidade usada estar muito próxima. Para quantificar precisamente a influência da rugosidade superficial do corpo de prova no coeficiente de atrito, melhores resultados seriam obtidos com rugosidades

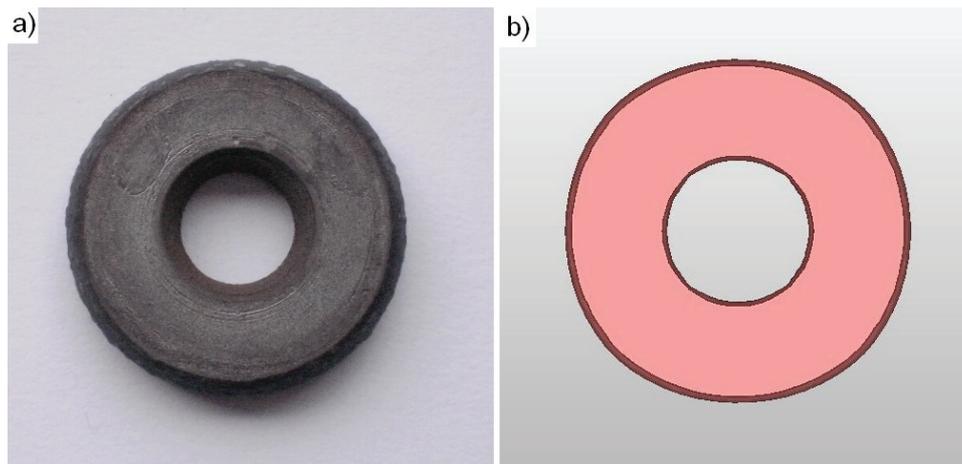


Figura 6. Amostras com 20% de deformação.
Figure 6. Specimens with 20% deformation.

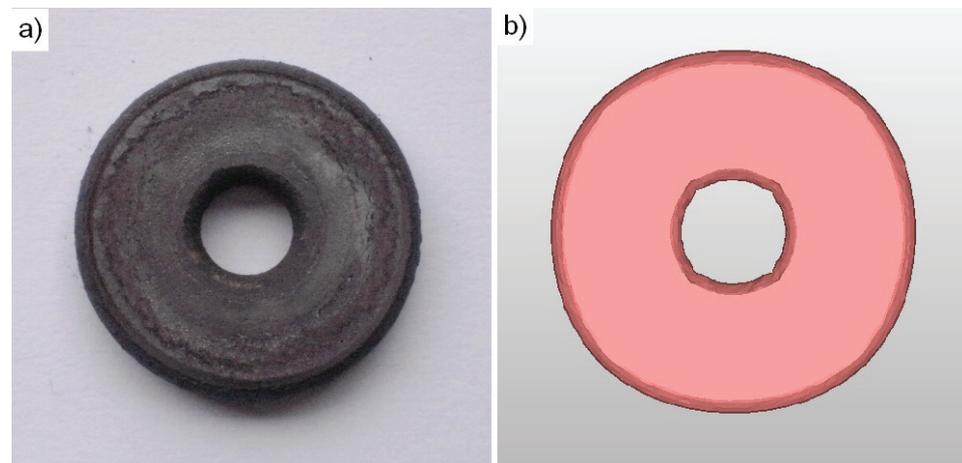


Figura 7. Amostras com 40% de deformação.
Figure 7. Specimens with 40% deformation.

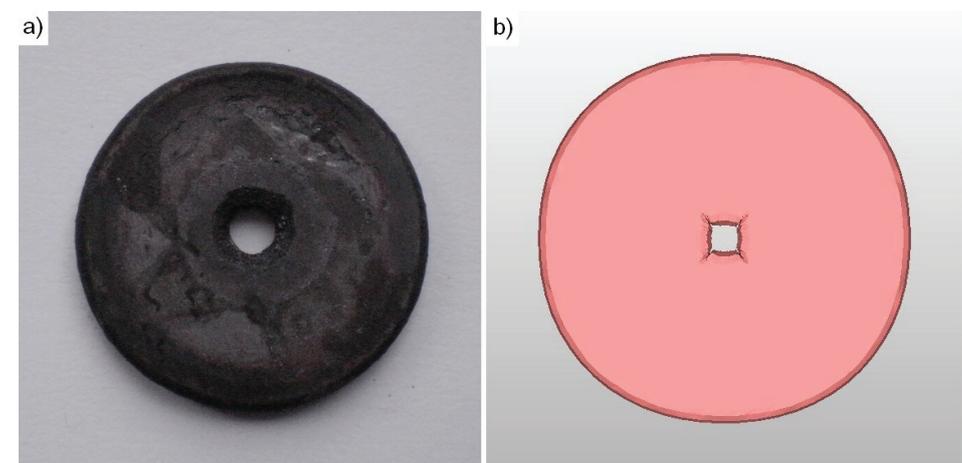


Figura 8. Amostras com 60% de deformação.
Figure 8. Specimens with 60% deformation.

específicas e não classificados por faixas, como ocorreu neste trabalho. Além de preparar as matrizes para compressão com rugosidade menor, por meio do processo de lixamento.

Conclusão

Neste estudo, o efeito do atrito foi examinado para diferentes condições de rugosidades superficiais dos corpos de prova. Os resultados do ensaio do anel mostraram que o coeficiente de atrito depende da rugosidade superficial. Para o aço AISI 4140, quanto maior a rugosidade da amostra, menor será o coeficiente de atrito do material. Esta relação deve-se à área de contato entre a matriz e a peça ser menor quando a rugosidade é elevada. O *software* de simulação MSC Simufact.forming 9.0 mostrou-se uma ferramenta adequada para a obtenção das curvas de calibração na verificação do atrito pelo método de compressão do anel. As deformações simuladas diferenciaram das amostras físicas devido à falta de capacidade da prensa e também pela formação de óxidos na superfície das peças.

Agradecimentos

Os autores agradecem o Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), o Instituto Federal Sul-rio-grandense (IFSul) e as instituições de apoio financeiro como CNPq e CAPES pelo projeto "Brazilian German Collaborative Reserch Initiative in Manufacturing Technology" (BRAGECRIM).

Referências

- BAY, N. 2002. Modelling of friction in cold metal forming processes. *In: WORKSHOP ON PROCESS SIMULATION IN METAL FORMING INDUSTRY*, 2, Padova, 2002. *Anais...* Padova, DIMEG.
- CATÁLOGO VILLARES METALS. 2010. Disponível em: http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/996_PTB_HTML.htm. Acesso em: 10/12/2010.
- CRISTINO, V.A.M.; ROSA, P.A.R.; MARTINS, P.A.F. 2010. Surface roughness and material strength of tribo-pairs in ring compression tests. *Tribology International*, **44(2)**:134-143. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2010.10.002>
- DIETER, G.E. 1981. *Metallurgia Mecânica*. 2ª ed., Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 653 p.
- KUNOGI, M. 1956. A new method of cold extrusion. *Journal of the Scientific Research Institute Tokyo*, **50**:215-246.
- MALE, A.T.; COCKCROFT, M.G. 1965. A method for the determination of the coefficient of friction of metals under condition of bulk plastic deformation. *Journal Institute of Metals*, **93**:38-46.
- SAHIN, M.; ÇETINARSLAN, C.S.C.; AKATA, H.E. 2007. Effect of surface roughness on friction coefficients during upsetting processes for different materials. *Materials and Design*, **28**:633-640. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2005.07.019>
- SOFUOGLU, H.; RSTY, J. 1999. On the measurement of friction coefficient utilizing the ring compression test. *Tribology International*, **32**:327-335. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X\(99\)00055-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X(99)00055-9)
- SVAHN, F.; RUDOLPHI, A.K.; WALLÉN, E. 2003. The influence of surface roughness on friction and wear of machine element coatings. *Wear*, **254**:1092-1093. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00341-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00341-7)

Submetido: 04/07/2011

Aceito: 26/04/2012