

# Ensaio do anel para avaliação do comportamento do coeficiente de atrito da liga de alumínio AA6351

## *Ring test for evaluation of behavior of the friction coefficient of aluminum alloy*

**Alex Fabiano Bueno**

Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM).  
Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS.  
Av. Bento Gonçalves, 9500, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil  
alex.bueno@ufrgs.br

**Vinícius Martins**

Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM).  
Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS.  
Av. Bento Gonçalves, 9500, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil  
vinicius.martins@yahoo.com.br

**Wilson Corrêa Rodrigues**

Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM).  
Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS.  
Av. Bento Gonçalves, 9500, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil  
wilson.rodrigues@ufrgs.br

**Alex Willian Petter**

Graduando em Engenharia Metalúrgica. Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS.  
Av. Bento Gonçalves, 9500, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil  
alex\_petter@yahoo.com.br

**Maiquel Emersom Pffingstag**

Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM).  
Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS.  
Av. Bento Gonçalves, 9500, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil  
maiquelx@hotmail.com

**Lírio Schaeffer**

Professor Dr. -Ing. Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Depto. de Metalurgia, PPGEM, UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil  
schaefer@ufrgs.br

## Resumo

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo comparativo sobre a influência de lubrificantes no coeficiente de atrito da liga de alumínio AA6351. O atrito tem um efeito significativo na deformação do material, alterando a força de compressão e o desgaste da matriz e da peça. A escolha de um lubrificante com eficiência na redução do atrito da interface peça/matriz aumenta a vida útil da ferramenta e, conseqüentemente, melhora a margem de lucro quando em produção industrial. Para o forjamento de ligas de alumínio,

## Abstract

The aim of this paper is a comparative study about the influence of lubricants on the friction coefficient of aluminum alloy AA6351. The friction has a significant effect on the deformation of the material, changing the compression strength and wear of the matrix and the piece. Choosing a lubricant able to reduce friction interface piece/matrix provides tool life gain and consequently improves the manufacturing profit margin. For the forging of aluminum alloys are recommended lubricants based on graphite and water or graphite and oil. On this study, three commercial lubricants were tested: a graphited (Aerodag

recomendam-se lubrificantes à base de grafite e água ou grafite e óleo. Neste estudo, três lubrificantes comerciais foram testados: grafitado (*Aerodag G*), sintético (*Synd Forg 100-A*) e um a base de óleo (*Dechelub 5562*). A metodologia adotada: obtenção de corpos de prova, ensaio do anel em prensa hidráulica variando-se os lubrificantes, simulação em programa computacional para aquisição das curvas de calibração e comparação dos resultados. Comparando os dados experimentais com as curvas obtidas por simulação foi verificado que, entre os três lubrificantes testados, o sintético obteve o melhor desempenho, seguido do lubrificante à base de óleo. O lubrificante à base de grafite obteve um desempenho inferior para essa aplicação.

**Palavras-chave:** *alumínio, atrito, simulação computacional e lubrificação.*

G), a synthetic (*Synd Forg 100-A*) and an oil-based (*Dechelub 5562*). The methodology consists on obtaining specimens ring shaped, ring test in hydraulic press changing the lubricants, computer program simulation for the acquisition of the calibration curves and comparison of results. Comparing the experimental data with the curves obtained by simulation, we found that, among the three lubricants tested, the best performer was the synthetic, followed by oil-based lubricant. The graphite based lubricant had the worst performance.

**Key words:** *aluminum, friction, computer simulation and lubrication.*

## 1. Introdução

O alumínio só passou a ser produzido comercialmente há cerca de 150 anos. Sua produção atual supera a soma de todos os outros metais não ferrosos. O alumínio apresenta vantagens consideráveis em algumas aplicações devido a sua boa condutividade térmica e elétrica, alta resistência à corrosão e aparência estética favorável. Além disso, apresenta baixo peso específico e consegue, em algumas ligas, igualar a resistência mecânica dos aços estruturais. Esses dados já mostram a importância do alumínio para a nossa sociedade. O Brasil, neste contexto, é o sexto maior produtor mundial de alumínio primário, precedido pela China, Rússia, Canadá, Estados Unidos e Austrália. Segundo a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL, 2009), o Brasil, no âmbito global possui a terceira maior jazida de bauxita do planeta, sendo ainda o quarto maior produtor de alumina, ocupando a quinta colocação na exportação de alumínio primário/ligas. Isso demonstra a importância da indústria brasileira do alumínio no cenário mundial.

Börder (2005, p. 7) aponta que, "a indústria de forjados é um elo importante na cadeia industrial. Representando um grande segmento na cadeia de fornecedores da indústria automotiva, suas características garantem uma condição ideal para determinados tipos de peças, que necessitam de alta resistência e possuem geometrias complexas".

Para Oliveira *et al.* (2003, p. 591-597), "o crescimento da indústria de alumínio gera a necessidade de aprimoramento dos processos de forjamento, em especial a quente, onde grandes deformações são aplicadas, com a exigência de um produto com alta precisão dimensional. Portanto, aumenta a importância de se conhecer o atrito e seu controle através do lubrificante adequado". Martins e Schaeffer (2009, p. 44-63) complementam que "uma boa estratégia neste sentido é a escolha de um lubrificante que tenha capacidade de reduzir o atrito sem causar alterações na peça final ou no ferramental, proporcionando benefícios quanto ao custo final do forjado".

Outros aliados na determinação do coeficiente de atrito são os programas de simulação numérica baseados em elementos finitos. As curvas de calibração geradas na simulação servem de referência para ensaios como o método do anel ou o do tubo cônico, criados com a finalidade de se determinar com maior exatidão o coeficiente de atrito.

## 2. Revisão de literatura

Conforme Oliveira *et al.* (2003, p. 591-597), para o forjamento de ligas de alumínio, os fabricantes recomendam lubrificantes constituídos de uma solução à base de grafite e água ou grafite e óleo, que são diluídos em proporções adequadas para facilitar a sua aplicação. Na realização do ensaio do anel, três lubrificantes comerciais foram utilizados para avaliação do comportamento do coeficiente de atrito: um grafitado (Aerodag G), um sintético (Synd Forg 100-A) e um a base de óleo (Dechelub 5562).

Para autores como Schaeffer (1995, p. 56-59) e Altan *et al.* (1983 p. 353), o atrito interfacial entre dois materiais pode ser quantificado na forma de um fator ou coeficiente. A Lei do Atrito de Coulomb utiliza tensão de cisalhamento ao invés de força de atrito e tensão normal em lugar de força normal, ficando então expressa pela Equação 1 obtida de Schaeffer (1995):

$$\mu = \tau / \sigma_n \quad (1)$$

Onde:

$\mu$  = Coeficiente de atrito       $\tau$  = tensão de cisalhamento       $\sigma_n$  = tensão normal

Na equação 1, é visto que a  $\tau$  é proporcional a  $\sigma_n$ , na interface matriz/peça em relação ao "coeficiente" de atrito ( $\mu$  ou  $m$ ). Pode-se expressar  $\tau_{\text{atrito}}$  pela Equação 2 obtida de Schaeffer (1995):

$$\tau = m * K_f / \sqrt{3} \quad (2)$$

Onde:

$K_f$  = Tensão de escoamento       $m$  = Fator de cisalhamento

Na Equação 2,  $\tau$  apresenta-se em função da tensão de escoamento do material,  $K_f$  e do "fator de cisalhamento" do atrito  $m$ . A determinação experimental do coeficiente de atrito ( $\mu$ ) ou do fator de cisalhamento do atrito ( $m$ ) realiza-se através de um ensaio de compressão com um corpo de prova do material que se deseja conhecer, o qual apresenta uma distribuição de pressões e tensões como pode ser visto na Figura 1.

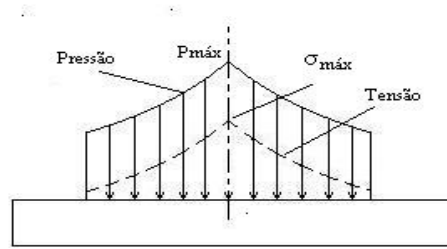


Figura 1: Distribuição de pressão e tensão para um corpo de prova comprimido entre placas (Garcia et al.,2000).

Durante a compressão entre placas, ocorre o cruzamento das regiões de tensão e pressão quando o corpo de prova é submetido a grandes deformações, o que torna o resultado final incorreto, como apresentado nas Figuras 2 e 3.

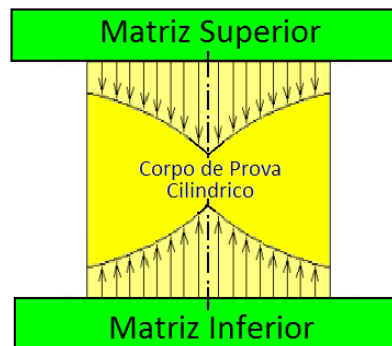


Figura 2: Esquema mostra o corpo de prova no início da compressão (adaptado de Martins e Schaeffer, 2009).

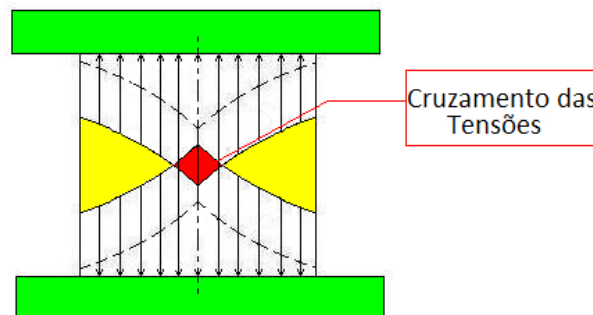


Figura 3: Esquema mostra o corpo de prova com grandes deformações e regiões cruzadas (adaptado de Martins e Schaeffer, 2009).

No ensaio de compressão do anel ou "Teste do Anel", como é comumente chamado, a altura e o diâmetro externo e interno são conhecidos e utilizados para determinar o coeficiente de atrito, eliminando também a possibilidade de cruzamento de regiões tanto de tensão quanto de pressão, como é apresentado na Figura 4.

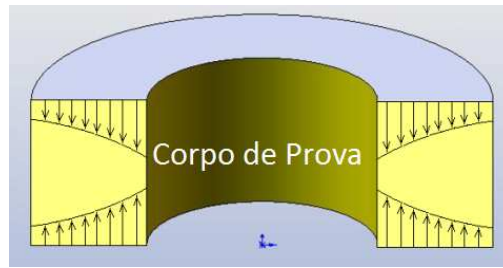


Figura 4: Corpo de prova com formato anelar não cruza regiões de tensão e pressão (adaptado de Martins e Schaeffer, 2009).

Bueno *et al.* (2009, 305-312), apontam que o ensaio do anel apresenta uma característica quantitativa em relação ao atrito na interface matriz/peça. Durante a compressão, uma redução do diâmetro interno representa o aumento do atrito, ou seja, quanto maior for o atrito interfacial, menor será o diâmetro interno do corpo de prova ao final do ensaio.

Este efeito também é visto quando analisamos o diâmetro externo. Com o aumento do atrito há uma redução da expansão (neste caso escoamento) radial quando comparado com um corpo de prova de baixo atrito. Este efeito é facilmente entendido se lembrarmos do princípio de constância de volume.

Na Figura 5, pode-se verificar o fluxo de material durante o ensaio de compressão do anel quando submetido ou não a lubrificação. A Figura 6 exibe as características mencionadas anteriormente: (a) anel antes do ensaio, (b) anel deformado com alto atrito, apresentando redução do diâmetro interno e (c) anel deformado com baixo atrito, apresentando aumento do diâmetro interno.

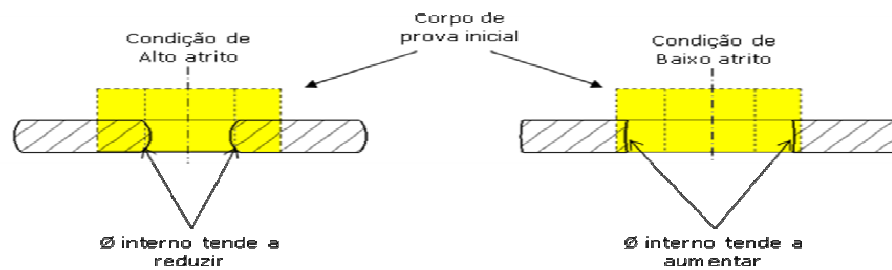


Figura 5: Efeito do atrito no ensaio do anel (adaptado de Geier, 2007).



Figura 6: Anéis deformados em ensaio de compressão.

Não considerar a força necessária para deformação é outra vantagem que o teste do anel apresenta quando utilizado para determinação do coeficiente de atrito. Para Oliveira *et al.* (2003, p. 591-597), o valor do

coeficiente de atrito é obtido através da redução percentual do raio interno em relação à redução percentual de altura. Estes dados de redução devem ser comparados com curvas de calibração (Figura 7), as quais são traçadas para determinados valores de atrito obtidos através de análises teóricas que simulam o fluxo de material durante a compressão, descrevendo o abaulamento do corpo de prova para tais valores.

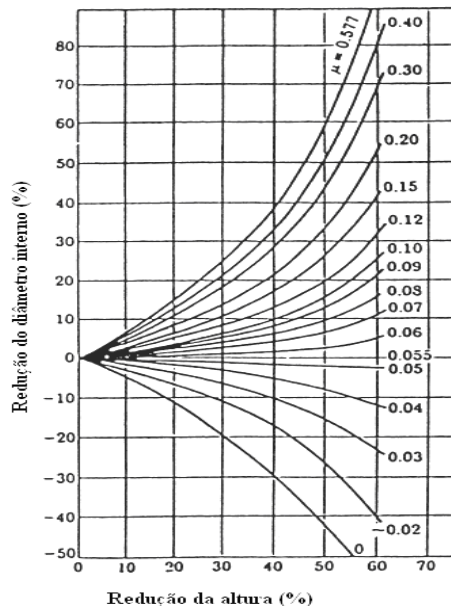


Figura 7: Curvas teóricas de calibração (Bueno et al., 2009).

As curvas de calibração apresentadas na Figura 7 são obtidas por software de simulação onde são informados os valores de temperatura de trabalho, tensão de escoamento do material entre outras propriedades do mesmo. Além das informações referentes ao material também é informado os valores de atrito que se deseja obter, então o software realiza as curvas conforme mostrado na referida figura.

Han (2002, p. 11-39) menciona que Avitzur em 1968 propõe equações analíticas para a compressão do anel considerando os efeitos do atrito e utilizando o Método dos Limites Superior/Inferior, através das seguintes hipóteses:

- (a) A deformação é homogênea e ocorre na direção axial (não ocorre o embarrilamento);
- (b) A distribuição das forças de atrito de contato entre as superfícies é uniforme;
- (c) O material apresenta comportamento rígido-plástico perfeito.

De acordo com Altan *et al.* (1983, p. 85-90) e Geier (2007, 55 p.), a utilização do ensaio do anel juntamente com os programas de simulação numérica, baseados em malhas de elementos finitos, está sendo determinante para a avaliação de lubrificantes e sua real eficiência em relação à redução do coeficiente de atrito. É fundamental que os lubrificantes permitam obter uma situação de atrito baixo, que não dependa dos parâmetros típicos dos processos de conformação. Uma lubrificação eficiente tem um papel direto na medição do coeficiente de atrito na interface material/ferramenta.

## 2. Materiais e Métodos

A partir de barras comerciais da liga de alumínio AA6351 foram confeccionados corpos de prova em formato anelar (Figura 8) com dimensões conforme mostra a Figura 9. Estabeleceu-se a relação diâmetro externo x diâmetro interno x altura em 6:3:2, em quantidade suficiente para ensaiar as seguintes condições de contato: (a) lubrificante em *Spray Aerodag G*, da empresa Acheson do Brasil, (b) lubrificante para forjamento de alumínio DECHELUB 5562, da empresa ZWEZ – Chemie GmbH e (c) lubrificante sintético SYND FORG 100-A, da empresa Syndool Indústria Química Ltda.



Figura 8: Corpo de prova utilizado.

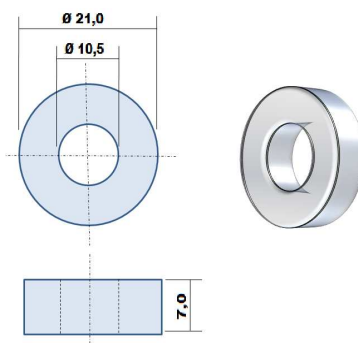


Figura 9: Dimensões dos corpos de prova.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500, Bairro Agronomia, Porto Alegre, RS, Brasil, utilizando-se de uma prensa hidráulica com capacidade de 40 toneladas, a temperatura de 15°C. A prensa foi controlada por um limitador de altura por fim de curso e com calibre de deformação nos valores de 20%, 40% e 60%.

A compressão foi realizada com duas bases de material cerâmico de faces polidas (Figura 10), criando uma interface material/base próxima da realidade de trabalho. A pressão foi verificada diretamente no manômetro da prensa para cada corpo de prova conformado.



Figura 10: Bases cerâmicas de Zircônia.

Sem a utilização de lubrificante foi conformado um corpo de prova para cada redução. Para os demais corpos de prova, antes de sua colocação, foi aplicada uma fina película de lubrificante nas faces das bases, visando reduzir o atrito interfacial com o mesmo. Ao todo, 30 ensaios foram realizados, sendo três sem lubrificação, nove com o lubrificante (a), nove com o lubrificante (b) e nove com o lubrificante (c).

Os corpos de prova conformados foram medidos em duas direções: uma perpendicular a outra no diâmetro interno e de igual forma na altura para minimizar a possibilidade de erro. Após a obtenção destes valores, calculou-se a média. Estas variações de altura (h) e diâmetro ( $\emptyset$ ) são obtidas através das Equações 4 e 5.

Para verificar a variação do diâmetro interno, utiliza-se a Equação 4.

$$\Delta\emptyset = -100 * ((D - D_0) / D_0) \quad (4)$$

Onde  $\Delta\emptyset$ , D,  $D_0$  correspondem, respectivamente, a variação do diâmetro interno, diâmetro final e diâmetro inicial. Para a verificação a variação da altura (h), utiliza-se a Equação 5.

$$\Delta h = -100 * ((h - h_0) / h_0) \quad (5)$$

Onde  $\Delta h$ , h e  $h_0$  correspondem, respectivamente, a variação da altura, altura final e altura inicial.

### 3. Resultados e Discussão

Utilizou-se o programa *Simufact Forming* para simulação das curvas de calibração (Figura 11). Os dados obtidos no ensaio do anel são apresentados na mesma figura, onde se determina o valor do coeficiente de atrito diretamente na curva simulada e compara-se o desempenho dos lubrificantes para a liga AA6351.

O lubrificante SYND FORGE 100-A apresenta bom desempenho quando submetido a deformações próximas a 40%. Acima disso, há um decréscimo do rendimento do lubrificante, ocasionando aumento do coeficiente de atrito. Este fato pode ter sido constatado devido à degradação do material sintético.

Os corpos de prova sem lubrificação apresentaram o valor mais elevado de coeficiente de atrito, como esperado, obtendo  $\mu \cong 0,065$  quando submetido a uma deformação de 20%. Ainda sem lubrificação foram obtidos  $\mu \cong 0,075$  e  $\mu \cong 0,093$  para deformações de 40 e 60%, respectivamente.



O desempenho do lubrificante Aerodag G foi inferior ao dos outros lubrificantes avaliados, obtendo  $\mu \approx 0,03$  quando submetido a uma deformação de 18,5%. Os valores obtidos para deformações de 36 e 55 % foram  $\mu \approx 0,051$  e  $\mu \approx 0,069$ , respectivamente.

Com deformações de 19, 33 e 49% foram obtidos  $\mu \approx 0,02$ ,  $\mu \approx 0,025$  e  $\mu \approx 0,042$  respectivamente, para os corpos de prova lubrificadas com Dechelub 5562.

Por fim, o melhor desempenho foi obtido com o lubrificante Synd Forj 100 A, o qual apresentou  $\mu \approx 0,02$ ,  $\mu \approx 0,022$  e  $\mu \approx 0,04$  para deformações de 19,5, 38 e 53%, respectivamente.

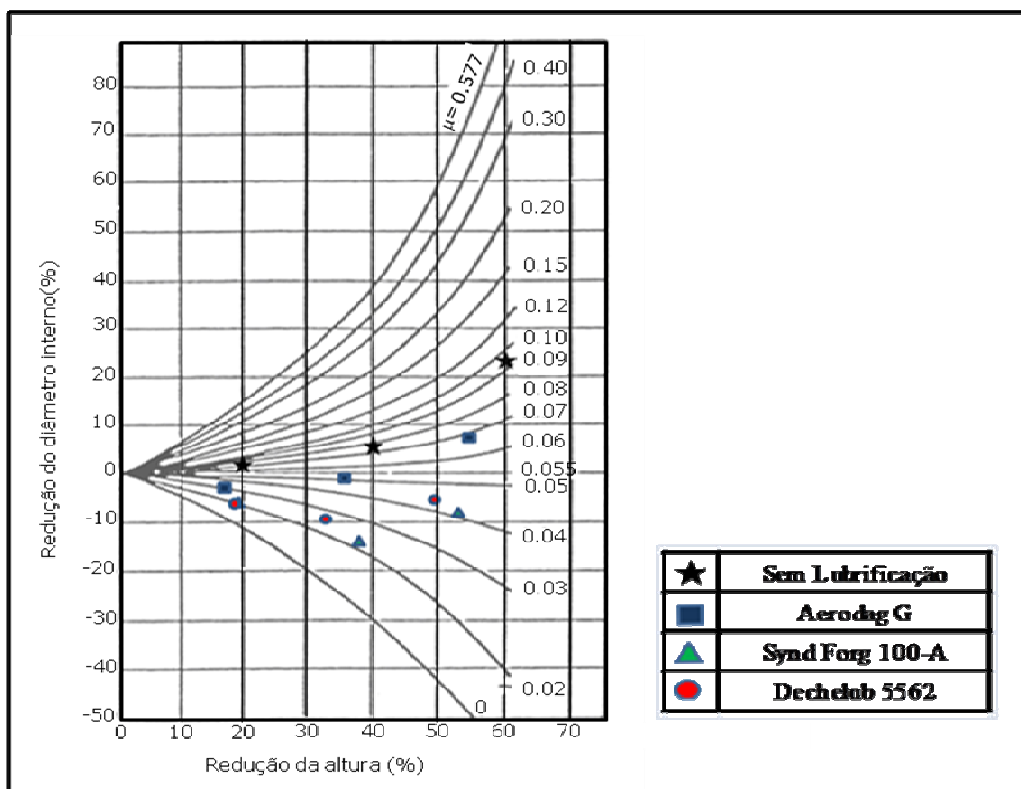


Figura 11: Plotagem dos dados obtidos no ensaio do anel nas curvas.

Tabela 1: Resultados obtidos.

Deformação (%)	20	40	60
Coefficiente de atrito sem lubrificante	0,07	0,08	0,09
Deformação (%)	18,5	36	55
Coefficiente de atrito AERODAG G	0,03	0,05	0,07
Deformação (%)	19	33	49
Coefficiente de atrito DECHELUB 5562	0,02	0,03	0,04
Deformação (%)	19,5	38	53
Coefficiente de atrito Synd Forj 100-A	0,023	0,022	0,041

O gráfico da Figura 11 apresenta os dados de atrito sem lubrificação, que indica o maior atrito da relação matriz/material para conformar, ou seja, a pior condição para trabalho. O Lubrificante Aerodag G apresentou condição inferior relação de lubrificação durante o processo de conformação. A melhor lubrificação foi obtida pelo lubrificante Synd Forg 100A, seguida do lubrificante Dechulub 5562 em relação as outras condições. As características de cada lubrificante, como a composição química e densidade em função das condições de trabalho influenciam diretamente nos resultados obtidos.

#### 4. Conclusão

Com base nos aspectos discutidos, conclui-se que o lubrificante DECHELUB 5562 apresentou uma maior estabilidade em relação ao lubrificante Aerodag G. Entretanto, obteve um desempenho inferior ao lubrificante Synd Forg 100-A.

Apesar dos resultados apresentarem um desempenho inferior para o lubrificante grafitado, ainda assim nota-se que a redução do efeito de atrito sobre a conformação foi considerável, quando comparado com os anéis não lubrificados.

A qualidade do acabamento superficial das bases cerâmicas e dos corpos de prova utilizados no ensaio influencia diretamente na obtenção do coeficiente de atrito.

A força é uma propriedade necessária apenas para deformar o material, mas não influencia no coeficiente de atrito, conforme descrito na literatura.

O ensaio do anel é um método prático, de baixo custo e extremamente eficaz para determinação do coeficiente de atrito de um material.

#### Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (ABAL). 2009. Acessado em: 26/10/2009, disponível em: <http://www.abal.org.br/industria/introducao.asp>.
- ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, G. 1983. *Metal Forming Fundamentals and Applications*. Columbus, Ed. Carnes Publications Services, Inc.
- BÖRDER, C. 2005. *Análise do coeficiente de atrito no ensaio do anel para o forjamento a quente*. São Paulo, SP. Trabalho de curso do Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, p. 7.
- BUENO, A.F.; MARTINS, V.; RODRIGUES, W.C.; MORAES, A.S.; LIMA, D.R.S.; SCHAEFFER, L. 2009. Avaliação do comportamento do coeficiente de atrito da liga Ti6Al4V pelo teste de compressão do anel com diferentes lubrificantes. In: XXIX SEMINÁRIO NACIONAL DE FORJAMENTO - SENAFOR, 13 Conferência Internacional de Forjamento, Porto Alegre, 2009. *Anais...* LdTM/UFRGS, Porto Alegre, p. 305-312.
- GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C.A. 2000. *Ensaio dos Materiais*. São Paulo, LTC Editora.

- GEIER, M. 2007. *Considerações sobre o atrito para processos de forjamento a frio através do ensaio de compressão do anel*. Porto Alegre, RS. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 55 p.
- HAN, H. 2002. *Determination of flow stress and coefficient of friction for extruded anisotropic materials under cold forming conditions*. Division of Materials Forming Department of Production Engineering. Suécia, Royal Institute of Technology, p. 11-39.
- MARTINS, V.; SCHAEFFER, L. 2009. Avaliação do lubrificante através do ensaio do anel da liga de alumínio AA6051 e o aço SAE 8640. *In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS, 64*, Belo Horizonte, 2009. *Anais...* Belo Horizonte, p. 44-63.
- OLIVEIRA, R.A.; KOLLER, L.A.; SCHAEFFER, L. 2003. Evaluation of two commercially-available lubricants by means of ring test to AA 6061 F aluminum alloys. *Material Research*, **6**:591-597. <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392003000400028>
- SCHAEFFER, L. 1995. *Conformação dos Metais*. Porto Alegre, Ed. Rigel.

Submissão: 08/03/2010  
Aceite: 28/03/2010