

## **DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTES DE ATRITO ATRAVÉS DE TESTES DE COMPRESSÃO DE ANÉIS, DE AÇOS PARA CONSTRUÇÃO MECÂNICA**

**Eduardo Luis Schneider, edu.ufrgs@gmail.com<sup>2</sup>**  
**Maiquel Emerson Pfingstag, maiquelx@hotmail.com<sup>1</sup>**  
**Alex Fabiano Bueno, alex.bueno@ufrgs.br<sup>1</sup>**  
**Vinícius Martins, viniushiper@yahoo.com.br<sup>1</sup>**  
**Wilson Corrêa Rodrigues, wilson.rodrigues@ufrgs.br<sup>1</sup>**  
**Lírio Schaeffer, schaefer@ufrgs.br<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500 Bairro Agronomia, CEP: 91501-970 Porto Alegre - RS – Brasil

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Elétrica, Av. Osvaldo Aranha, 103 – Bairro Bom fim, CEP: 90035-190 - Porto Alegre - RS – Brasil

**Resumo:** *O atrito entre as superfícies da ferramenta e peça desempenha um papel importante nos processos de conformação de metais. Este trabalho visa a determinação de coeficientes de atrito de três aços usados na construção mecânica, pelo método da compressão do anel, utilizando dois diferentes lubrificantes e relata as evidências que foram obtidas experimentalmente. Os aços utilizados foram o AISI SAE 4140, o AISI SAE 1141 e o DIN 16MnCr5 e os lubrificantes foram o Synd Forj 100 A e o Synd Forj 331. A temperatura utilizada para os testes foi de 1000°C e a matriz usada foi do aço H13 temperado, pré-aquecida a 250°C. Apesar da alta degradação, o Synd Forj 100 A, apresentou um bom desempenho, ficando com valores de atrito dentro das faixas encontradas na literatura. O Synd Forj 331 apresentou desempenho satisfatório para ambos aços testados. Com este lubrificante o aço AISI SAE 4140, portou-se melhor em relação ao DIN 16MnCr5.*

**Palavras-chave:** *coeficiente de atrito, teste de compressão, lubrificação*

### **1. INTRODUÇÃO**

O atrito entre a relação das superfícies ferramenta-peça desempenha um papel importante nos processos de conformação de metais. A sua diminuição implica em economia em matrizes e peças devido à redução nos níveis de desgaste. A definição de atrito para o ASM Metals Handbook é que o “Atrito é a resistência ao movimento de um corpo sobre o outro”. O valor do coeficiente de atrito é característico de cada par de materiais, e não uma propriedade intrínseca do material. Depende de muitos fatores tais como a velocidade relativa entre as superfícies, acabamento superficial em contato e do lubrificante. É de extrema relevância o conhecimento do coeficiente de atrito para se ter um controle do processo através de uma lubrificação apropriada e melhor indicada para cada material (Wang, 2008)

À medida que são aprimorados os processos de forjamento, principalmente a quente (isotérmico ou não) onde o material sofre grandes deformações e exige-se mais da peça final quanto à precisão dimensional, aumenta a importância do conhecimento do atrito e de seu controle através de uma lubrificação adequada.

Neste trabalho foram avaliados os seguintes aços para construção mecânica: SAE1141; SAE 4140; DIN 16MnCr5. O método utilizado consistiu em avaliar o atrito entre o ferramental e a peça, sendo, que com o formato de anel é possível observar se houve altos valores de atrito, com diminuição do diâmetro interno e/ou baixo atrito com o respectivo aumento deste valor (Schaeffer, 2006).

A relevância deste trabalho está embasada na utilização destes aços em componentes automotivos de alto desempenho como em transmissões (eixo cardã e diferenciais). Estas peças são obtidas pelo processo de forjamento, no qual o conhecimento do atrito é de suma importância para realização de simulação numérica do processo, e trabalhos que visam a redução do desgaste por atrito das matrizes

Ainda é possível de se observar o efeito de altos ou baixos coeficientes de atrito com o curvamento do diâmetro interno conforme mostra a Figura 1.

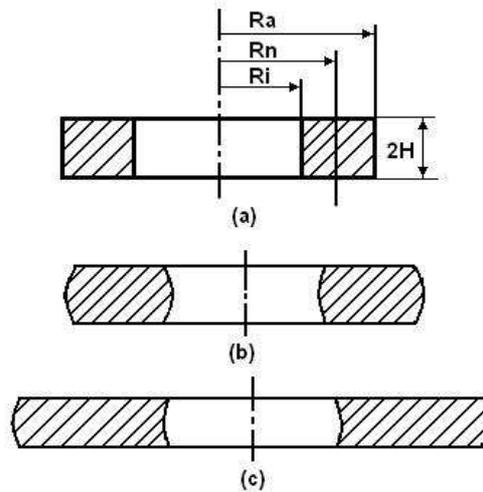


Figura 1. Efeito do Atrito no teste do anel; b) alto atrito c) baixo atrito (obtido de Schaeffer, 2006).

O atrito entre dois materiais pode ser apresentado em termos de um fator ou coeficiente. A tensão de cisalhamento de atrito,  $\tau$ , é comumente expressa (Altan, et al, 1983 e Schaeffer, 1995)., conforme a Lei do Atrito de Coulomb por:

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

Onde a força de atrito “F” é expressa pela tensão de cisalhamento “ $\tau$ ” e, a força normal “P” por “ $\sigma_n$ ” (Bueno et.al, 2009). A equação 1 mostra que  $\tau$  é proporcional a  $\sigma_n$ , na interface matriz / peça em relação ao "coeficiente" de atrito ( $\mu$  ou m), podemos então expressar  $\tau$  por:

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

A equação 2 apresenta  $\tau$  em função da tensão de escoamento  $K_f$  e do fator de cisalhamento do atrito “m”. Deste ponto, portanto, pode-se determinar o coeficiente de atrito  $\mu$  ou o fator de cisalhamento do atrito “m”, experimentalmente por um ensaio de compressão. Este ensaio utiliza corpos de prova cilíndricos do material que se deseja determinar o coeficiente de atrito [7].

Na maioria dos ensaios de compressão utiliza-se corpos de prova em forma de anel com dimensões pré-estabelecidas, respeitando uma proporção, usualmente 6:3:2. Faz-se necessário a utilização de anéis para evitar o cruzamento de tensões (Figura 2), evitando desta forma uma avaliação errônea (Martins e Schaeffer, 2009).

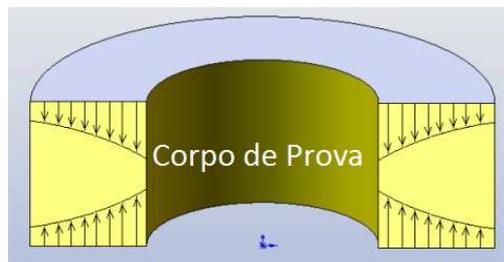


Figura 2. Corpo de prova com formato anelar não cruza regiões de tensão e pressão. (alterada de Martins e Schaeffer, 2009)

O comumente chamado teste do anel apresenta uma característica qualitativa, em relação ao atrito interfacial matriz / peça. Verifica-se um aumento no diâmetro interno do corpo de prova quando exposto a uma situação de baixo atrito e, o oposto é percebido em situações de atrito elevado, ou seja, o diâmetro interno tende a diminuir.

Border em 2005 relata que “com o aumento do atrito, haverá uma redução no diâmetro interno do anel, pois haverá o surgimento de uma região de transição, onde parte do material irá escoar radialmente, no sentido interno do anel e parte do material irá escoar radialmente para fora do anel.” Segundo ele, esta região é chamada de superfície neutra e está indicada na Figura 3 .

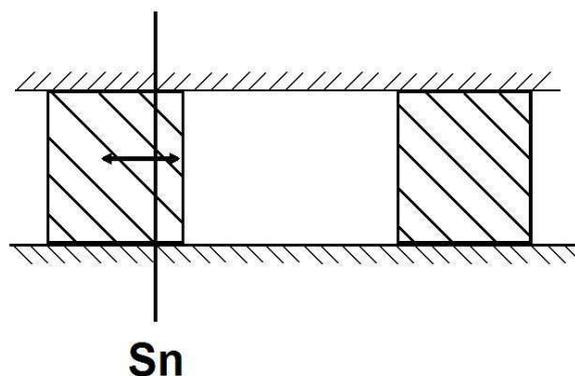


Figura 3. Indicação de superfície neutra no ensaio do anel.

O fato de não ser considerada a força necessária para deformar o corpo de prova é uma vantagem que apresenta o “Teste do Anel” quando aplicado ao estudo do atrito (Oliveira, 2003)

Para a determinação do coeficiente de atrito, o percentual de redução do diâmetro interno em relação à espessura, devem ser comparados com “curvas de calibração” (Figura 4). Estas curvas são traçadas para valores determinados de atrito por meio de análises teóricas simulando assim o fluxo do material durante a conformação, descrevendo ainda, o abaulamento do corpo de prova para os referidos valores de atrito (Sofuoglu, 1999).

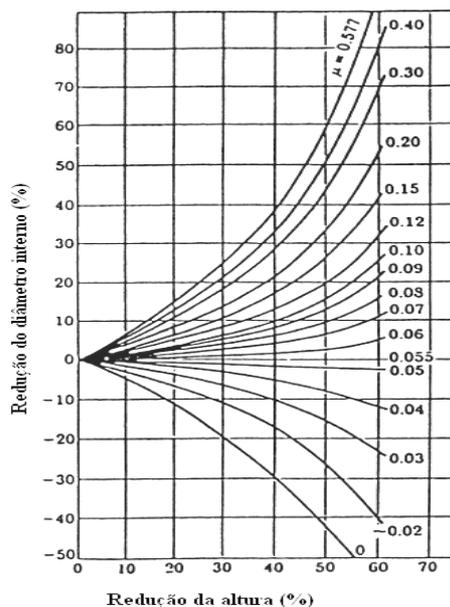


Figura 4. Curvas de calibração retirada de literatura (obtida de Martins e Schaeffer, 2009)

Avitzur (1968) propõe equações analíticas para a compressão do anel considerando os efeitos do atrito, utilizando o Método do Limite Superior / Inferior, aplicando as seguintes hipóteses:

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

Os programas de simulação computadorizada que se baseiam nas malhas de elementos finitos juntamente com o ensaio do anel têm tido importante participação para a quantificação do coeficiente de atrito e determinação da melhor lubrificação para diversos materiais. 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 da relação material/ferramenta (Altan, et al, 1983).

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Foram usados 9 corpos de prova de cada um dos aços, AISI SAE 1141, AISI SAE 4140 e DIN 16MnCr5 (Figura 5), determinando um anel de proporções 6:3:2 ( $\varnothing$  externo:  $\varnothing$  interno: altura) sendo um número suficiente para ensaiar as condições de contato.



Figura 5. Corpo de prova usinado.

Os ensaios foram realizados com temperaturas de 1000 °C para os corpos de prova e inicialmente 250/C para as matrizes em uma prensa hidráulica de 50 Toneladas no LdTM/UFRGS. Para a compressão utilizou-se duas bases de Aço Ferramenta AISI H13 (figura 6) de faces polidas, (cujos valores de rugosidade Ra, Rz e R<sub>máx</sub> são apresentados na tabela 1) criando uma interface entre o material que está sendo conformado e as bases bem próximas da realidade de trabalho. Para o experimento com o Aço AISI SAE 1141 foi utilizado o desmoldante sintético Synd Forj 100 A da empresa Syndool Indústria Química Ltda. Para os demais, optou-se pelo desmoldante Synd Forj 331 fabricado pela mesma empresa. Foi utilizada a concentração de 10% para os dois desmoldantes, ou seja, para 900ml de água e 100ml de desmoldante. A Figura 6 mostra as ferramentas polidas utilizadas no ensaio de compressão de anel.



Figura 6. Bases em aço AISI H13.

Os corpos de prova conformados foram medidos com um paquímetro digital “0 – 150 mm” marca Starret, em duas direções uma perpendicular a outra no diâmetro ( $\emptyset$ ) interno e de igual forma na altura para minimizar a possibilidade de erro. Após a obtenção destes valores realizou-se uma média simples. As variações de altura ( $h$ ) e diâmetro ( $\emptyset$ ) foram obtidas através das equações. (3) e (4). O diâmetro interno foi verificado através da eq. (4) (Martins e Schaeffer, 2009).

$$\Delta\phi = -100 \cdot \left( \frac{D - D_0}{D_0} \right) \quad (3)$$

Onde  $\Delta\emptyset$ ,  $D$  e  $D_0$  são respectivamente variação do diâmetro, diâmetro final e diâmetro inicial. Para a verificação a variação da altura ( $h$ ), utiliza-se a Eq. (4).

$$\Delta h = -100 \cdot \left( \frac{h - h_0}{h_0} \right) \quad (4)$$

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

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 1 apresenta a rugosidade mensurada na matriz utilizada no ensaio, sendo que o polimento ferramental influência intimamente no ensaio e no processo de forjamento.

Tabela 1. Verificação de rugosidade da matriz.

Matriz Polida - Cutoff 0,25			
Medições	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Rmax ( $\mu\text{m}$ )
1	0,09	1,4	1,3
2	0,07	1,2	1,6
3	0,07	1,4	1,3
4	0,07	1,2	0,9
5	0,06	1,2	1,3
6	0,08	1,2	1,3
7	0,06	1,2	1,4
8	0,08	1,3	1,5
9	0,07	1,3	1,4
10	0,07	1,4	1,4
Média	0,07	1,25	1,35

Os pontos obtidos no ensaio foram dispostos nas Figuras 7, 8, 9 e 10 “a” respectivamente sobre curvas simuladas da literatura para as situações propostas nas Figuras 7, 8, 9 e 10 “b”. A Figura 7 apresenta os resultados do coeficiente de atrito do aço SAE 1141.

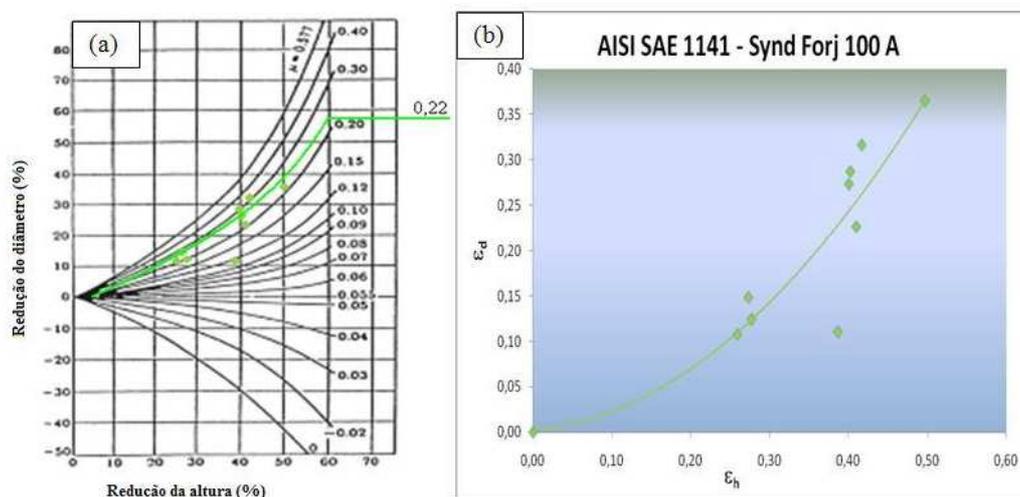


Figura 7. (a) Pontos obtidos para o aço AISI SAE 1141. (b) Curva de tendência.

A Figura 8 apresenta os resultados do coeficiente de atrito do aço SAE 1141 e o lubrificante Synd Forj 331.

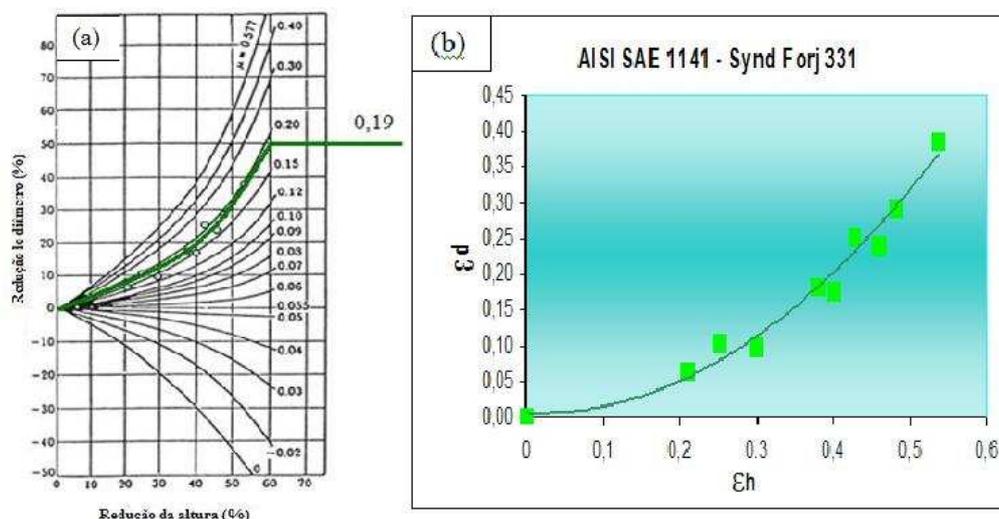


Figura 8. (a) Pontos obtidos para o aço AISI SAE 1141. (b) Curva de tendência.

A Figura 9 apresenta os resultados do coeficiente de atrito do aço SAE 4140 e o lubrificante Synd Forj 331.

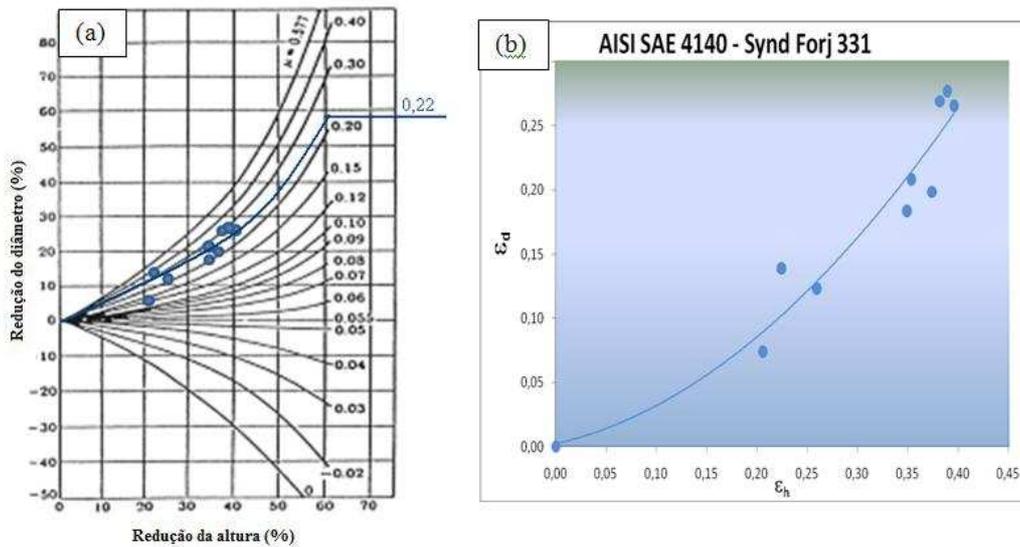


Figura 9. (a) Pontos obtidos para o aço AISI SAE 4140. (b) Curva de tendência.

A Figura 10 apresenta os resultados do coeficiente de atrito do aço DIN 16MnCr5 e o lubrificante Synd Forj 331.

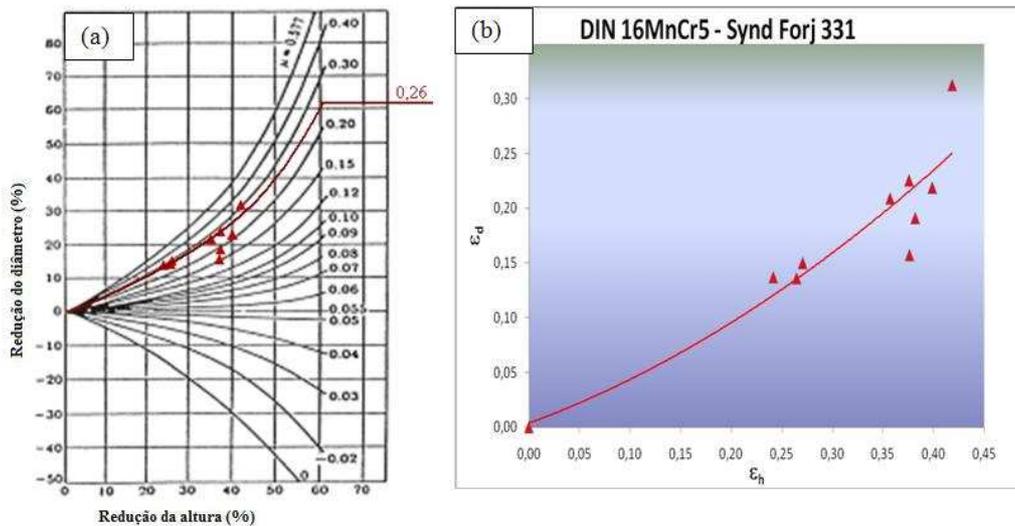


Figura 10. (a) Pontos obtidos para o aço DIN 16MnCr5. (b) Curva de tendência

Os coeficientes de atrito encontrados através das curvas de calibração são em função da variação percentual do diâmetro interno e da altura, conforme verificado nas curvas de tendência.

Pelas curvas de tendência observam-se pontos dispersos que foram considerados erros de medição. O menor coeficiente de atrito obtido foi  $\mu=0,30$  para os aços testados, com taxas de deformação entre 25 e 40% para o AISI SAE 1141, 25 e 36% para o AISI SAE 4140 e 36 e 40% para o DIN 16MnCr5.

O lubrificante sintético a base de poliamida ensaiado na temperatura de 1000°C para o aço SAE 1141, apresentou uma alta degradação com grande formação de óxido, o que ocasionou desgaste prematuro da matriz, sendo a mesma recuperada com nova usinagem e polimento, para serem obtidos, assim, os mesmos valores de rugosidade para o restante dos ensaios. Este fato conduziu pela escolha do desmoldante à base de grafite.

## 5. CONCLUSÕES

Apesar da alta degradação, o desmoldante Synd Forj 100A, apresentou um bom desempenho, ficando com valores de atrito de 0.22 sendo esta a faixa encontrada na literatura.

O desmoldante Synd Forj 331 obteve coeficiente de atrito de 0.19 para o aço AISI SAE 1141, que portou-se melhor em relação aos demais, os quais apresentaram  $\mu = 0,22$  para o aço SAE 4140 e  $\mu = 0.26$  para o aço DIN 16MnCr5. Dentre os dois lubrificantes utilizados, em forjamento de matriz aberta (Aço H13) para aços da construção mecânica seria mais indicado o de menor degradação, pois esta é uma área onde necessitamos precisão dimensional, logo o Synd Forj 331 é o mais indicado.

## **6. REFERÊNCIAS**

- ASM Metals Handbook, V.18 : Friction, Lubrication, and Wear Technology, 9<sup>o</sup> edition, 1989.
- WANG, J.; et al. A new experimental approach to evaluate friction in ring test. Journal of Materials Processing Technology, 2008.
- SCHAEFFER, L. Forjamento Introdução ao Processo. Editora Imprensa Livre Ltda., p. 26-59, Porto Alegre, 2006 2<sup>a</sup> Edição Brasil.
- ALTAN, T. et al. Metal Forming – Fundamentals and Applications, Ed. Carnes Publications Services, Inc., p. 85-90, USA, 1983.
- SCHAEFFER, L. Conformação do Metais., Ed. Rígel, p. 56-59, Porto Alegre, 1995.
- BUENO, A. F. et. al. Avaliação do comportamento do coeficiente de atrito da liga  $\text{Ti6Al4V}$  pelo teste de compressão do anel com diferentes lubrificantes. XXIX SENAFOR, 13<sup>a</sup> Conferência Internacional de Forjamento. LdTM/UFRGS – Porto Alegre/RS, 2009.
- MARTINS, V.; SCHAEFFER, L.. Avaliação do lubrificante através do ensaio do anel da liga de alumínio AA6051 e o aço SAE 8640. Corte e Conformação dos Metais, 2009.
- BÖRDER, C. – Análise do coeficiente de atrito no ensaio do anel para o forjamento a quente. Trabalho de curso do Mestrado Profissionalizante em Engenharia Automotiva da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.
- OLIVEIRA, R. A.; KOLLER, L. A.; SCHAEFFER, L.. Evaluation of Two Commercially-Available Lubricants by Means of Ring Test to AA 6061 F Aluminum Alloys. Materials Research, v. 6, p. 591-597, 2003.
- SOFUOGLU, HASAN; RASTY, JAHAN. On the measurement of friction coefficient utilizing the ring compression test. Tribology International, Elsevier, 1999.
- AVITZUR, B.M. Metal Forming: Process and analysis, Ed. McGraw Hill Book Company, USA, 1968.

## **7. DIREITOS AUTORAIS**

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

## COEFFICIENTS FRICTION DETERMINATION BY RING COMPRESSION TESTS FOR MECHANICAL CONSTRUCTION STEELS

Eduardo Luis Schneider, edu.ufrgs@gmail.com<sup>2</sup>

Maiquel Emerson Pfingstag, maiquelx@hotmail.com<sup>1</sup>

Alex Fabiano Bueno, alex.bueno@ufrgs.br<sup>1</sup>

Vinicius Martins, viniciushiper@yahoo.com.br<sup>1</sup>

Wilson Corrêa Rodrigues, wilson.rodrigues@ufrgs.br<sup>1</sup>

Lírio Schaeffer, schaefer@ufrgs.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500 Bairro Agronomia, CEP: 91501-970 Porto Alegre - RS - Brasil

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Elétrica, Av. Osvaldo Aranha, 103 - Bairro Bom fim, CEP: 90035-190 - Porto Alegre - RS - Brasil

**Abstract:** *The friction between the surfaces of the tool and presents an important paper in the processes of metal forming. This study aims to determine friction coefficients of three steels used in mechanical construction, the method of ring compression test, using two different lubricant and reports the evidence that was obtained experimentally. The steels used were AISI SAE 4140, SAE 1141 AISI and DIN 16MnCr5 and lubricants were Synd Synd Forge Forge 100 A and 331. The temperature used for the tests was 1000 ° C and the die used was tempered H13 steel, preheated to 250 ° C presented the high degradation, Synd Forge 100 A showed a good performance, getting values of friction within the ranges found in literature. Synd The Forge 331 showed satisfactory performance for both tested steels. With this lubricant SAE AISI 4140 steel, better behaved in relation to DIN 16MnCr5.*

**key-words:** *friction coefficients, compression test and lubrication*