

# AVALIAÇÃO DO LUBRIFICANTE ATRAVÉS DO ENSAIO DO ANEL DA LIGA DE ALUMÍNIO AA6051 E O AÇO SAE8640<sup>1</sup>

Vinícius Martins<sup>2</sup>  
Lírio Schaeffer<sup>3</sup>

## Resumo

O presente trabalho mostra a análise da compressão do anel na liga de alumínio AA6051 e do aço SAE8640 para relacionar a variação das dimensões dos dois materiais obtendo o coeficiente de atrito e uma comparação simples e rápida entre dois lubrificantes através dos resultados para os materiais relacionados. Este método do ensaio do anel é um teste quantitativo, aliado as curvas de escoamentos dos materiais, mostrando que o atrito está ligado diretamente na variação da geometria na compressão. O atrito tem um efeito significativo na deformação do material, alterando a força de compressão e no desgaste ferramenta e peça.

**Palavras-chave:** Atrito; Ensaio de compressão; Ensaio do anel; Lubrificantes.

## EVALUATION OF LUBRICANT BY TEST OF RING OF ALUMINUM ALLOY AA6051 AND STEEL SAE8640

## Abstract

This work shows the analysis of the compression ring in AA6051 aluminum alloy and steel SAE8640 to relate the variation of the dimensions of the two materials getting the friction coefficient and a simple and quick comparison between two lubricants through the results to related materials. This method of test ring is a quantitative test, along the curves of flow of materials, showing that the friction is connected directly to the variation in the geometry compression. The friction has a significant effect on the deformation of the material, altering the compressive force and the wear of the tool and workpiece.

**Key words:** Friction; Compression test; Ring test; Lubricants.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> 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. CEP: 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil.

<sup>3</sup> E-mail: [viniciushiper@yahoo.com.br](mailto:viniciushiper@yahoo.com.br)

<sup>4</sup> Professor Dr. Ing. Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Depto. de Metalurgia, PPGEM, UFRGS. Av: Bento Gonçalves, 9500. CEP: 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: [schaefer@ufrgs.br](mailto:schaefer@ufrgs.br)

# 1 INTRODUÇÃO

O conhecimento do coeficiente do atrito é de extrema importância no desenvolvimento do processo de forjamento, transformando este processo mais competitivo e eficiente. Propiciando benefícios quanto ao custo final do forjado, salientamos também a fundamental necessidade de um bom lubrificante que atenda as condições de trabalho. Através dos lubrificantes adequados no forjamento é possível diminuir o desgaste da interface ferramenta-peça.

A definição de atrito para o ASM Metals Handbook<sup>(1)</sup> 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.<sup>(2)</sup>

Os lubrificantes de uma maneira em geral devem apresentar características especiais, para desempenhar uma boa lubrificação durante o processo de forjamento. Estas características ajudam na otimização e evolução do processo. Levando em vista estes aspectos, devem-se avaliar os lubrificantes pela quantificação do atrito para se comparar e determinar a eficiência do lubrificante utilizado. Os estudos mostram que a temperatura determina qual o lubrificante deve ser utilizado, devido principalmente pelos efeitos na viscosidade e na formação de óxidos na superfície do material.

## 1.2. Fundamentação Teórica

O atrito interfacial de dois materiais ou de um material em relação a uma ferramenta de conformação pode ser quantificado em termos de um fator ou coeficiente de atrito. Usualmente o coeficiente é representado com a letra grega  $\mu$  ( $m\mu$ ). A força de atrito cinética ( $F_a$ ) da fundamentação da física através de Newton e Coulomb nos serve de base para fundamentarmos nossos cálculos. Sendo  $N$  a força normal a equação da força de atrito é:<sup>(3)</sup>

$$F_a = \mu_c N \quad (\text{eq. 1})$$

Passando a força de atrito para tensão de cisalhamento de atrito ( $\tau$ ), e a força normal para a tensão normal, a equação é normalmente expressa<sup>(4)</sup>, conforme a Lei do Atrito de Coulomb por:

$$\tau = \sigma_n \mu \quad (\text{eq. 2})$$

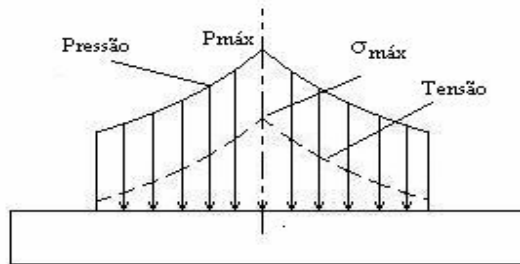
A Equação (eq. 2) nos mostra que a tensão de cisalhamento é proporcional a componente da tensão normal ( $\sigma_n$ ), na interface matriz/material com relação ao "coeficiente" de atrito ( $\mu$  ou  $m$ ). A tensão de cisalhamento do atrito, também pode ser expressa por:

$$\tau = \frac{m}{\sqrt{3}} k_f \quad (\text{eq. 3})$$

A eq.3 expressa  $\tau$  em função da tensão de escoamento do material,  $K_f$  e do "fator de cisalhamento" do atrito  $m$ . A determinação experimental do coeficiente de

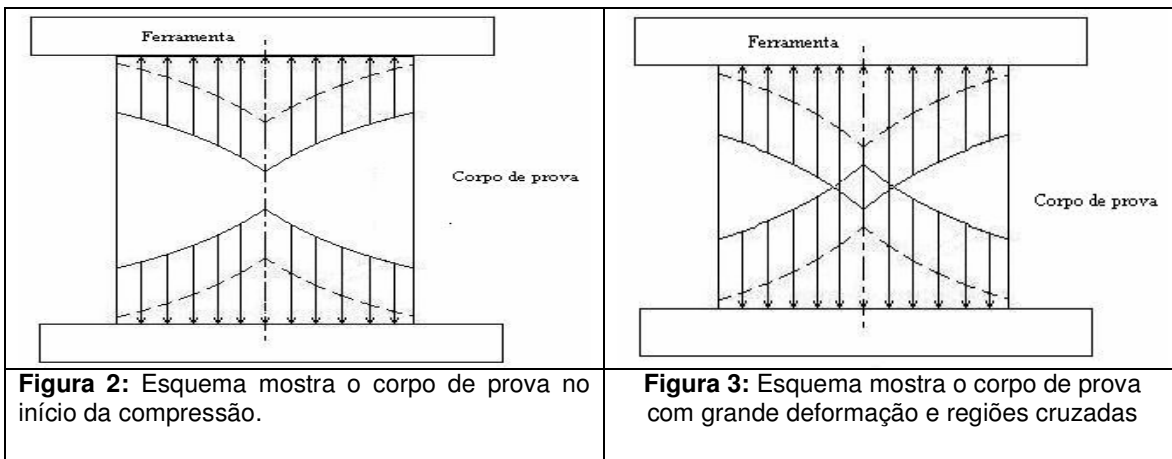
atrito ( $m$ ) ou do fator de cisalhamento do atrito ( $\mu$ ) é realizada através de um ensaio de compressão com um corpo de prova do material que se deseja conhecer.<sup>(4)</sup>

O ensaio de compressão nos mostra, que durante a compressão de um material, este se expandirá na direção radial, entre as placas.<sup>(5)</sup> Considerando um corpo de prova cilíndrico, haverá um contato facial entre o corpo de prova e as placas da máquina sofrendo uma resistência que se opõe ao escoamento do material do centro para as extremidades. A Figura 1<sup>(5)</sup> exibe a distribuição de pressão e de tensão longitudinal, onde se observa que a pressão e a tensão crescem para um valor máximo no centro da amostra.

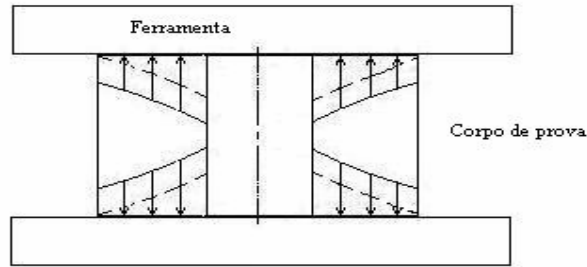


**Figura 1:** Distribuição de pressão e tensão para um corpo de prova comprimida entre placa.<sup>(5)</sup>

Sabendo deste fato, ao comprimirmos um corpo de prova com grandes deformações entre duas placas, estas propriedades se cruzariam, aumentando a força para uma pequena deformação, trazendo um resultado errôneo, como mostram as Figuras 2 e 3.

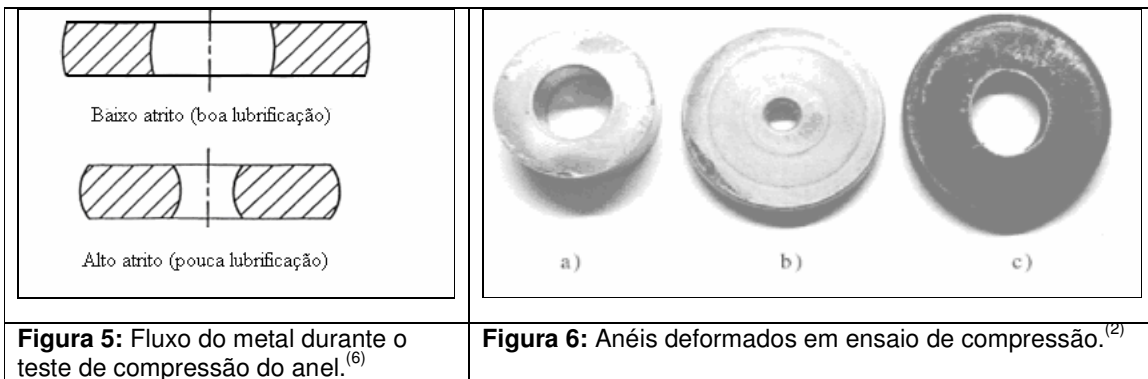


O ensaio na compressão de um anel com as dimensões do diâmetro externo, diâmetro interno e espessura inicialmente conhecidas é chamado "Teste do Anel". Serve para determinar o coeficiente de atrito, e eliminando também a possibilidade de regiões de pressão e tensão se cruzarem, como exibe a Figura 4.



**Figura 4:** Um corpo de prova com formato anelar não cruza regiões de tensões e pressões.

Existe uma característica qualitativa muito clara no Teste do anel, em relação ao atrito interfacial matriz/peças. Se o atrito for alto, o diâmetro interno diminui em relação ao raio neutro à medida que o anel é deformado. Se o atrito for baixo, o diâmetro interno aumenta em relação ao raio neutro à medida que o anel é deformado. A Figura 5 mostra como o fluxo do material se comporta durante a compressão do anel no ensaio, com a relação atrito/ lubrificação.<sup>(6)</sup> A Figura 6 exibe a característica mencionada acima, onde mostra primeiramente o anel inicial (a), e em segundo mostra o anel deformado com atrito alto (b) e por último o anel deformado com atrito baixo (c).



Nas últimas quatro décadas o ensaio do anel vem se tornando cada vez mais importante para a quantificação do coeficiente de atrito para de diversos materiais com o auxílio da simulação computadorizada baseada nas malhas de elementos finitos.<sup>(7,8)</sup> Para se obter o valor do atrito, a redução percentual do raio interno em relação à redução percentual de espessura deve ser comparada com "curvas de calibração". Estas curvas traçadas para determinados valores de atrito e obtidas através de análises teóricas que simulam o fluxo de material durante a compressão descrevendo o abaulamento do corpo de prova para determinados valores de atrito.<sup>(9,10)</sup>

O ensaio do anel mostra uma característica visual da relação anel/atrito, pois quando maior o atrito interfacial maior o efeito de embarrilhamento na secção transversal do anel, independente da compressão do material.<sup>(11)</sup> 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.<sup>(12)</sup>

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Fizeram-se corpos de prova de liga de alumínio ABNT 6061F e aço SAE 8640 como mostram na Figura 7 e com as dimensões conforme mostra a Figura 8, determinando um anel de **proporções 6:3:2** em número suficiente para ensaiar duas condições de contato: a) lubrificante em fita de "Teflon<sup>®</sup>" e b) lubrificante em *Spray* "Aerodag", da empresa Acheson do Brasil, como mostram as Figura 9 e 10.

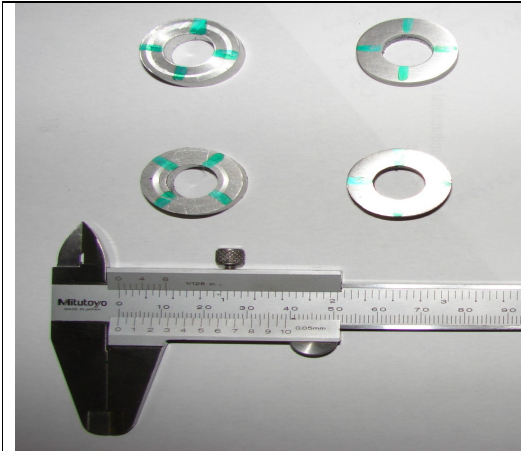


Figura 7: Corpos de Prova utilizados.

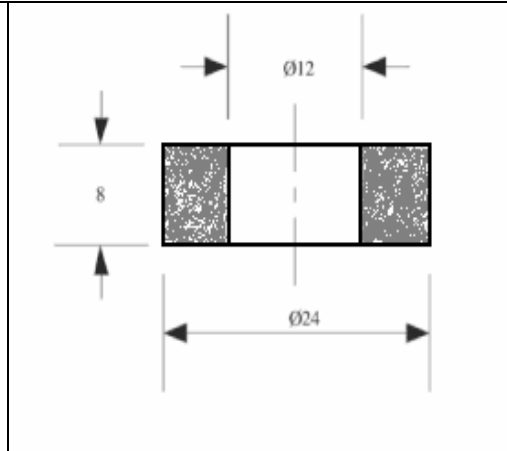


Figura 8: Dimensões dos corpos de prova.



Figura 9: Lubrificante *Spray* Aerodag.



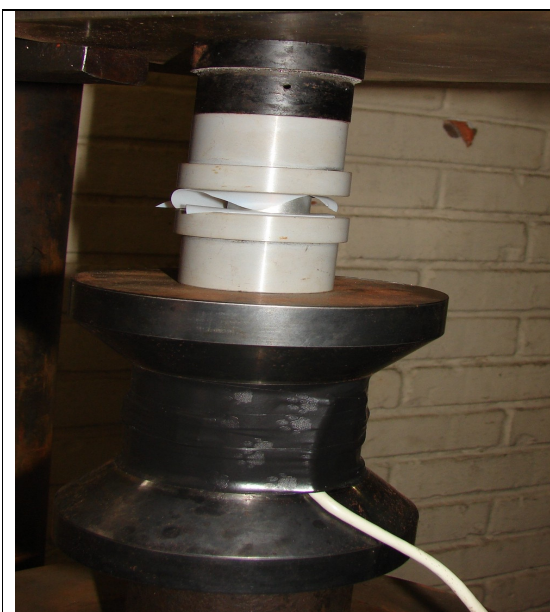
Figura 10: Lubrificante em fita de Teflon<sup>®</sup>.

Os ensaios foram realizados em temperatura ambiente, numa prensa hidráulica de 2940KN no LdTM/UFRGS, controlada por uma bomba manual e com calibre de deformação nos valores de 20%, 40%, 55%. O punção inferior está ligado a uma célula de carga calibrada que envia o sinal de força para o sistema de aquisição de dados, modelo Spyder 8. O software Catman Express 3.1 adquire os dados, juntamente com o tempo, como mostra a Figura 10.



**Figura 10:** Sistema de aquisição de dados, Spider 8 com o software Catman Express 3.1.

A compressão foi realizada com duas bases de Carbetto de silício, material que são utilizáveis em ferramentas de extrusão, criando uma interface entre o material que está sendo conformado e o material cerâmico próxima da realidade de trabalho. Estas bases cerâmicas ficaram entre a base superior da prensa hidráulica manual e a célula de carga para 80tonf, como aparece nas Figuras 11 e 12, que foram tiradas no primeiro ensaio com o alumínio e o Teflon®.



**Figura 11:** Bases cerâmicas sobre a célula de carga



**Figura 12:** Corpo de prova entre as bases.

Esta relação deve ser comparada com "curvas de calibração" (Figura 13), traçadas para determinados valores de atrito em análises teóricas que simulam o fluxo de material durante a compressão. Através da (Figura 13) podemos verificar o valor para o atrito estabelecendo uma relação com a variação do diâmetro interno e da altura do anel. Os dados foram medidos em duas direções, uma perpendicular a

outra para tentar minimizar a possibilidade de erro, sobre estes valores foi tirado uma média simples. Esta variação de altura (h) e diâmetro ( $\phi$ ) encontrados na Tabela 1 é obtida através das equações (4) e (5). Para verificar a variação do diâmetro interno, utiliza-se a eq. (4).

$$\Delta\phi = -100 \cdot \left( \frac{D - D_o}{D_o} \right) \quad (\text{eq. 4})$$

Onde  $\Delta\phi, D, D_o$  são respectivamente variação do diâmetro, diâmetro final e diâmetro inicial. Para a verificação a variação da altura (h), utiliza-se a Eq. (5).

$$\Delta h = -100 \cdot \left( \frac{h - h_o}{h_o} \right) \quad (\text{eq. 5})$$

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

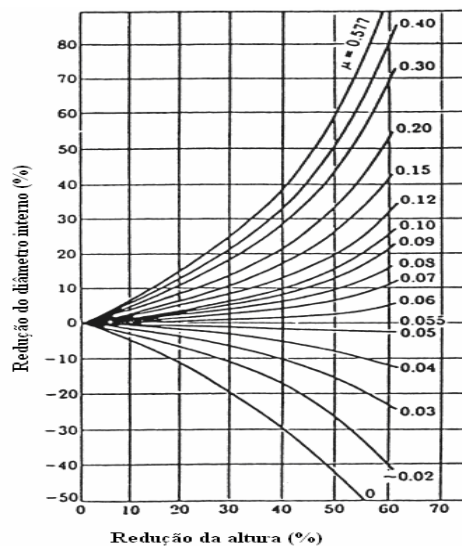


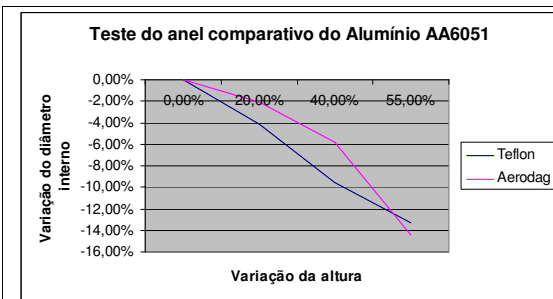
Figura 13: Curvas de calibração do atrito em função de  $\mu$ .<sup>(9)</sup>

### 3 RESULTADOS

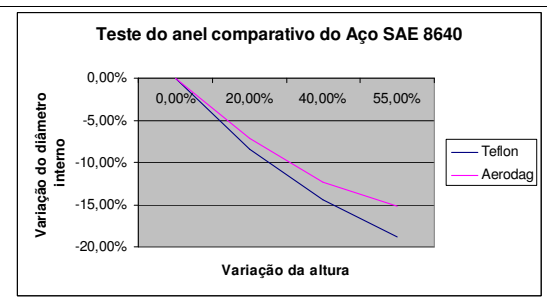
Os dados das dimensões e valores obtidos no teste do anel estão na Tabela 1 para os anéis de aço SAE 8640 e de liga de Alumínio AA6051 com lubrificação do aerodag e do Teflon<sup>®</sup>. As curvas obtidas no ensaio foram traçadas com mostram as Figuras 14 até 17. Obtiveram-se dois gráficos comparando o desempenho do aerodag e do teflon<sup>®</sup> em relação à liga de Alumínio AA6051 e ao aço SAE 8640. Outros dois gráficos serviram para mostrar a diferença do comportamento do material em relação aos lubrificantes, visando determinar o valor de atrito por comparação com as curvas calibradas. Os dados medidos de força estão em KN.

**Tabela 1.** Dados do ensaio do teste do anel.

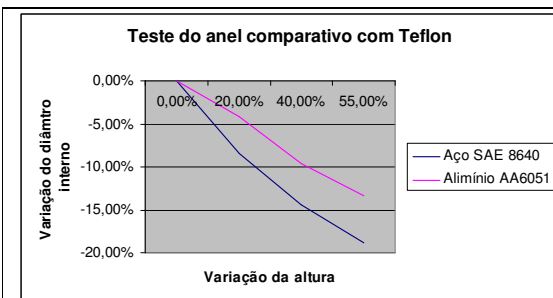
Alumínio AA6051 com Teflon									
ho	dint.	dint.	média dint.	dext.	dext.	média dext.	Força	Var. dint.	Var h
8,0	12,0	12,0	12,0	24,0	24,0	24,0	0	0,00%	0,00%
6,4	12,5	12,5	12,5	27,0	27,0	27,0	266	-4,17%	20,00%
4,8	13,0	13,3	13,1	30,8	30,5	30,6	419	-9,58%	40,00%
3,6	13,3	13,9	13,6	34,5	35,3	34,9	552	-13,33%	55,00%
Alumínio AA6051 com Aerodag									
ho	dint.	dint.	média dint.	dext.	dext.	média dext.	Força	Var. dint.	Var h
8,0	12,0	12,0	12,0	24,0	24,0	24,0	0	0,00%	0,00%
6,6	12,3	12,4	12,3	25,8	26,0	25,9	258	-2,07%	17,50%
5,2	12,6	13,0	12,8	28,8	29,0	28,9	363	-5,79%	35,00%
3,9	13,0	14,7	13,8	32,6	34,0	33,3	603	-14,46%	51,25%
Aço SAE 8640 com Teflon									
ho	dint.	dint.	média dint.	dext.	dext.	média dext.	Força	Var. dint.	Var h
8,0	12,0	12,0	12,0	24,0	24,0	24,0	0	0,00%	0,00%
6,6	13,6	13,5	13,5	26,4	26,4	26,4	911	-8,40%	17,50%
5,2	14,3	14,3	14,3	29,2	29,5	29,3	1279	-14,40%	35,00%
4,0	14,9	14,8	14,8	32,0	33,4	32,7	5236	-18,80%	50,00%
Aço SAE 8640 com Aerodag									
ho	dint.	dint.	média dint.	dext.	dext.	média dext.	Força	Var. dint.	Var h
8,0	12,0	12,0	12,0	23,9	23,9	23,9	0	0,00%	0,00%
6,9	13,4	13,4	13,4	25,7	26,0	25,8	850	-7,20%	13,75%
5,4	13,6	14,5	14,0	28,5	28,8	28,6	1206	-12,40%	32,50%
3,6	13,6	15,2	14,4	34,8	36,0	35,4	5236	-15,20%	55,00%



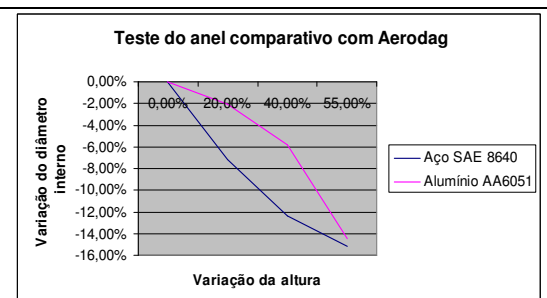
**Figura 14** Resultados do teste do anel para variação do diâmetro X altura



**Figura 15:** Resultados do teste do anel para variação do diâmetro X altura.



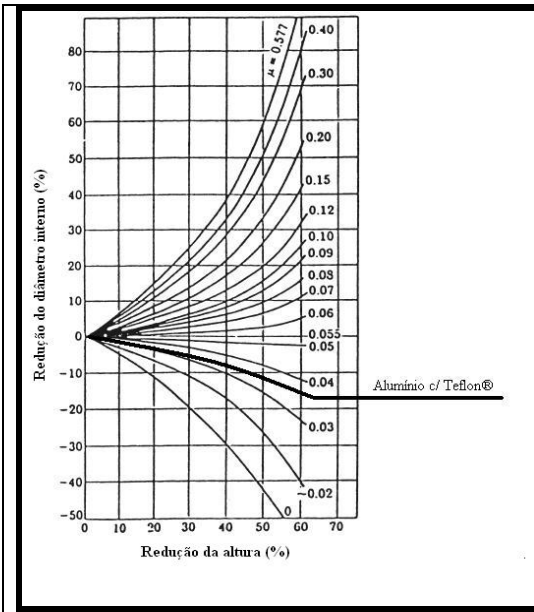
**Figura 16:** Resultados do teste do anel para variação do diâmetro X altura



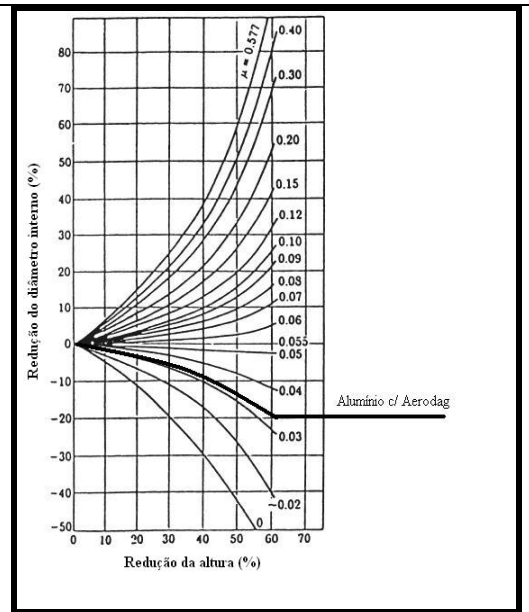
**Figura 17** Resultados do teste do anel para variação do diâmetro X altura



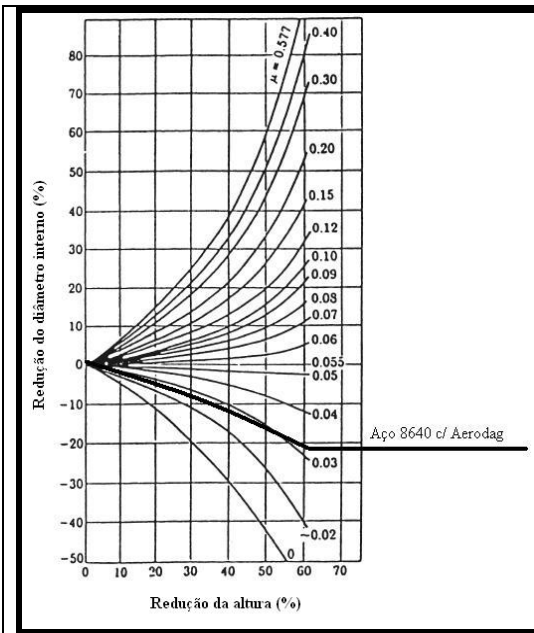
Com os gráficos comparativos traçados, foi feita a relação com as curvas de calibração dos materiais e os lubrificantes conforme as Figuras 18 a 21:



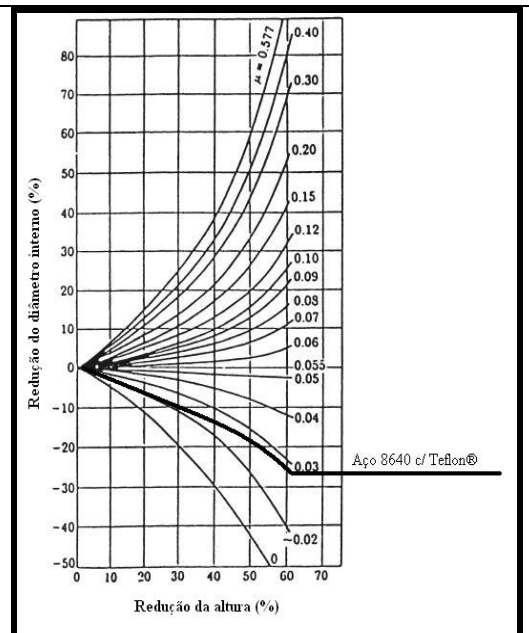
**Figura 18:** coeficiente de atrito de 0,037



**Figura 19:** coeficiente de atrito de 0,033

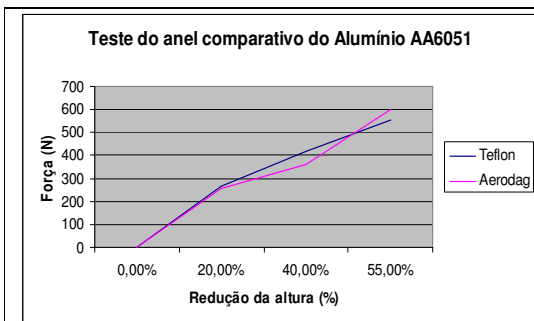


**Figura 20:** coeficiente de atrito de 0,028

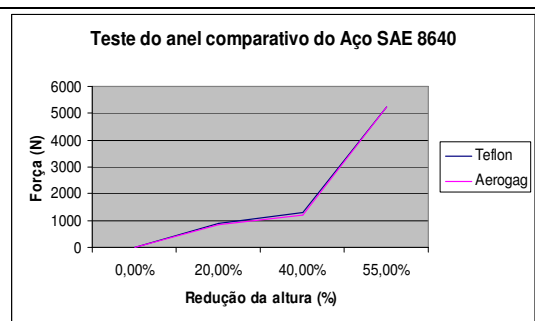


**Figura 21:** coeficiente de atrito de 0,032

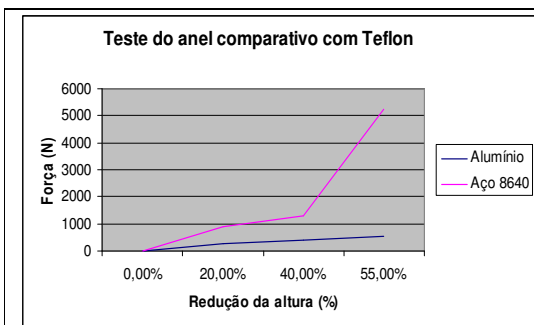
As Figuras 22 a 25 mostram um comparativo de força utilizada no ensaio.



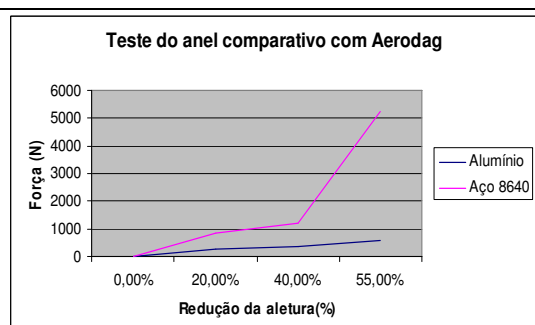
**Figura 22:** Resultados do teste do anel para variação da força X altura



**Figura 23:** Resultados do teste do anel para variação da força X altura.



**Figura 24:** Resultados do teste do anel para variação da força X altura



**Figura 25:** Resultados do teste do anel para variação da força X altura.

## 4 DISCUSSÃO

Os coeficientes de atrito encontrados através das curvas de calibração são em função da variação percentual do diâmetro interno e da altura. O anel de aço SAE 8640 lubrificado com teflon® e o Aerodag variaram de aproximadamente 0,028 e 0,032 respectivamente. O anel da liga de alumínio AA6051 lubrificado com teflon® e o Aerodag variaram de aproximadamente 0,037 e 0,033 respectivamente.

Utilizando os valores obtidos com a equação (3) saberemos qual é a tensão de cisalhamento do atrito para o aço SAE 8640 e a liga de alumínio AA6051 com os respectivos coeficientes em função dos dois lubrificantes. Considerando que a tensão de escoamento ( $k_f$ ) do alumínio a frio é  $180\text{N/mm}^2$ ,<sup>(6)</sup> e o coeficiente de atrito é de 0,037, este lubrificado com teflon®, então o valor será de  $3,8452\text{ N/mm}^2$ .

Utilizando a mesma metodologia acima, descobrimos que a tensão de cisalhamento do atrito da liga de alumínio AA6051 para o lubrificante Aerodag é de  $3,4295\text{ N/mm}^2$ . Isto nos mostra que se conhecermos o coeficiente de atrito de um material pode descobrir qual é a força de atrito.

Os gráficos anteriores mostram que a força está diretamente ligada as propriedades físicas do material e não sofre influência do lubrificante durante sua conformação sendo uma propriedade à parte no ensaio do anel. Com o objetivo de comparar duas qualidades de lubrificantes comerciais disponíveis e recomendados para o forjamento em dois materiais, foi realizada a análise de variância dos parâmetros (diâmetro interno e altura) do ensaio do anel, observando a sua influência sobre o aumento do raio interno.

O ensaio do anel mostra um significativo aumento no raio interno do anel (valor negativo) nos dois materiais indicando que o atrito é baixo, portanto, o lubrificante apresenta um desempenho satisfatório (redução do atrito interfacial entre a matriz e a peça ensaiada), e na deformação linear da altura estudada.

O coeficiente de atrito obtido é baixo devido às bases de cerâmicas serem lisas e polidas, e os anéis de corpo de prova estavam com bom acabamento superficial conseguido na usinagem. Somando estas duas características em um baixo índice de rugosidade, auxiliando assim na determinação do melhor lubrificante para trabalho de conformação a frio do aço SAE8640 e da liga de alumínio AA6051.

A melhor condição de atrito foi do aço SAE 8640 que obteve o melhor coeficiente de atrito de 0,028 lubrificado com o Teflon<sup>®</sup>, seguindo do mesmo material com lubrificação de Aerodag (0,032). No alumínio os lubrificantes se portaram de maneira inversa, sendo que o corpo de prova lubrificado com Aerodag obteve o melhor coeficiente (0,033) do que o Teflon<sup>®</sup> (0,037), e como mostra o alumínio ficou com o terceiro e quarto lugar em relação ao aço SAE 8640 no quesito do coeficiente de atrito.

A variação do coeficiente se deu devido à qualidade do acabamento superficial da face de contato do anel da liga de alumínio AA6051 ser inferior ao acabamento da face respectiva do anel de aço SAE 8640 como a figura 7 exibe. Os anéis do lado esquerdo são de alumínio e mostram risco da usinagem no sentido radial da face diferentemente da face dos anéis de aço que refletem a luz plenamente. Este resultado mostrou que independente do lubrificante o acabamento superficial é de extrema e fundamental importância comprovando novamente o trabalho realizado por Sahin, Etinarslan, Akata [10].

As figuras 22, 23, 24 e 25 mostram que a força é uma propriedade independente para determinar o coeficiente de atrito, e estão ligadas diretamente às propriedades do material, e no ensaio a força é importante apenas para deformar o material, mas não influencia o ensaio.

## **5 CONCLUSÃO**

Com base nos aspectos discutidos, conclui-se que o lubrificante Teflon<sup>®</sup> apresentou uma maior estabilidade em relação ao lubrificante Aerodag com um bom acabamento superficial na função de reduzir o atrito interfacial peça-ferramenta no material de aço. Porém o lubrificante Aerodag apresentou uma boa estabilidade frente ao Teflon<sup>®</sup> no alumínio, mas o acabamento superficial da peça ensaiada estava com uma alta rugosidade. Se levarmos em conta que devemos ter uma condição o mais ideal possível, então o lubrificante Teflon<sup>®</sup> se saiu melhor.

Os acabamentos superficiais das bases do ensaio e das peças influenciam 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, barato e extremamente eficaz da determinação do atrito de um material.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao LdTM e a Escola de Engenharia da UFRGS, pelo uso dos laboratórios e da infra-estrutura da universidade. Agradecem também ao CNPq, CAPES, FINEP e a empresa IMER Usinagem Ind. com. LTda- Porto Alegre-

RS, pelo apoio financeiro e investimento na área de pesquisa e ao Eng<sup>o</sup> Fábio Luiz Knewitz pelo auxílio aos experimentos.

## REFERÊNCIAS

- 1 ASM Metals Handbook – Volume 18 - Friction, Lubrication, and Wear Technology, pg 12
- 2 SCHAEFFER, LÍRIO Forjamento Introdução ao Processo. Editora Imprensa Livre Ltda., p. 26-59, Porto Alegre, 2006 2ª Edição Brasil.
- 3 Paraná, Djalma Nunes Física Volume1 Mecânica, Ed Ática S.A, p. 201-203, São Paulo, 1993. 2ª Edição. Brasil
- 4 Schaeffer, Lírío Conformação do Metais., Ed. Rígel, p. 56-59, Porto Alegre, 1995.
- 5 GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C. A.Ensaio dos Materiais LTC Editora p. 49-53 São Paulo, 2000. Brasil.
- 6 HASAN SOFUOGF (a), JAHAN RASTY(b). On the measurement of friction coefficient utilizing the ring compression test. (a)Department of Mechanical Engineering, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey.(b) Department of Mechanical Engineering, Texas Tech University, Lubbock, USA. Tribology International.accepted 19 August 1999.
- 7 RIBEIRO, J.D. Avaliação do Atrito no Forjamento. dissertação de mestrado, Escola de Engenharia PPGEMM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.Brasil
- 8 T. ROBINSON, H. OU, C.G. ARMSTRONG. Study on ring compression test using physical modelling and FE simulation. School of Mechanical and Manufacturing Engineering, The Queen's University of Belfast, UK. Journal of Materials Processing Technology 153–154 (2004) 54–59.
- 9 HAN HAN. Determination of Flow Stress and Coefficient of Friction for Extruded Anisotropic Materials under Cold Forming Conditions. Division of Materials Forming Department of Production Engineering, Royal Institute of Technology S-100 44 Stockholm, January 2002, Sweden.
- 10 MUMIN SAHIN, CEM S. C., ETINARSLAN, H. EROL AKATA. Effect of surface roughness on friction coefficients during upsetting processes for different materials. Department of Mechanical Engineering, Trakya University, 22030 Edirne, Turkey, Received 1 April 2005; accepted 20 July 2005. Materials and Design.
- 11 K. MANISEKAR (a), R. NARAYANASAMY ( b), S. MALAYAPPAN (a) Effect of friction on barrelling in square billets of aluminium during cold upset forging. (a) Department of Mechanical Engineering, National Engineering College, Kovilpatti, Tamil Nadu, India (b) Department of Production Engineering, National Institute of Technology, Tiruchirapalli Tamil Nadu, India. accepted 27 September 2004 Materials and Design.
- 12 ALTAN, T. et al. Metal Forming Fundamentals and Applications, Ed. Carnes Publications Services, Inc., p. 85-90, USA, 1983.