



AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO PARA LIGA DE ALUMÍNIO AA6351 PELO MÉTODO DO TUBO CÔNICO EM COMPARAÇÃO COM SIMULAÇÃO NUMÉRICA¹

Alex Fabiano Bueno²

Vinícius Martins³

Paulo Ricardo Böesch Júnior⁴

Alexsandro S. Moraes²

Lírio Schaeffer⁵

Resumo

O presente trabalho apresenta uma breve explanação do processo de forjamento, resultados da investigação experimental e da análise computacional acerca do método de ensaio do tubo cônico, visando à determinação do coeficiente de atrito para a liga de alumínio AA6351. Foram construídas curvas teóricas de calibração do coeficiente de atrito para o alumínio, também foram realizadas as simulações computacionais dos ensaios do tubo, que permitiram a verificação teórica do fluxo de material no interior dos corpos de prova comparando-as com os resultados obtidos em ensaios práticos, comprovando a eficiência do modelo de simulação, visto que a geometria do tubo favorece a comparação entre a simulação e os testes experimentais.

Palavras-chave: Ensaio do tubo cônico; Atrito; Al 6351; Simulação numérica computacional.

EVALUATION OF THE COEFFICIENT OF FRICTION FOR ALUMINUM ALLOY AA6351 BY THE METHOD UP SETING CONICAL TEST COMPARED WITH NUMERICAL SIMULATION

Abstract

This paper presents a brief explanation of the forging process, results of experimental investigation and computational analysis on the method of up seting conical test to determine the coefficient of friction for aluminum alloy AA6351. Theoretical curves were constructed calibration coefficient of friction for aluminum, were also performed computer simulations of the test tube, allowing the verification of the theoretical flow of material within the specimens by comparing them with results obtained in practical tests, proving the efficiency of the simulation model, since the geometry of the tube facilitates the comparison between simulation and experimental tests.

Key words: Method up seting conical test; Friction; Al 6351; Numerical simulation computer.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Doutorandos do PPGEM. Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil. alex.bueno@ufrgs.br alexsandro.moraes@ufrgs.br

³ Professor do Instituto Federal Sul-rio-grandense – IFSul – Campus Sapucaia do Sul. Doutorando do PPGEM. Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. viniushiper@yahoo.com.br

⁴ Mestrando do PPGEM. Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS. . Porto Alegre, RS, Brasil. paulo.boesch@ufrgs.br

⁵ Prof. Dr. -Ing. Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Depto. de Metalurgia, PPGEM, UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil. schaefer@ufrgs.br

1 INTRODUÇÃO

O forjamento é um processo de conformação mecânica que além de obter uma mudança permanente nas dimensões finais e nas características metalúrgicas de uma peça, gera produtos com alta resistência mecânica devido ao refinamento da estrutura do metal. Dependendo do tipo de processo adotado no forjamento, pode-se obter mínima perda de material e precisão dimensional adequada. Com o avanço da tecnologia e o advento da automação, vem se obtendo ganhos em tempo e redução de desperdícios tanto de energia como de material, apoiando-se em programas computacionais complexos como CAD, CAE e CAM.

O atrito excessivo gera dificuldades podendo por vezes até mesmo impedir a conformação, isso reflete em maior proporção quando se desejam forjar novas ligas, peças com maior complexidade ou forjamento de precisão. Para amenizar os efeitos do atrito deve-se estabelecer uma película com baixa tensão de cisalhamento na interface peça-matriz visando a reduzir as tensões que se opõe ao movimento relativo nesta interface. De uma maneira em geral os lubrificantes devem apresentar características especiais como resistência ao cisalhamento, capacidade de escoamento para desempenhar uma boa lubrificação durante o processo de forjamento.⁽¹⁾ Estes devem ser avaliados pela quantificação do atrito para se comparar e determinar a eficiência do lubrificante utilizado.⁽²⁾ Por outro lado a temperatura determina qual o lubrificante deve ser utilizado, devido principalmente pelos efeitos na viscosidade e na formação de óxidos na superfície do material.⁽³⁾

O forjamento estende-se a diversos tipos de materiais, na grande maioria materiais ferrosos e alguns não ferrosos como o alumínio e titânio. Destes o alumínio é o material não ferroso mais consumido mundialmente, com cerca de 24 milhões de toneladas/ano, dos quais 75% são oriundas de extração de minérios e o restante de aproveitamentos de sucatas de transformação.⁽⁴⁾ O alumínio vem ganhando grande interesse comercial ao longo dos anos devido às vantagens inerentes a este metal, entre elas a baixa densidade, boa resistência mecânica, reduzido consumo de energia em sua reciclagem e disponibilidade de minério. Suas principais aplicações são nas indústrias aeronáuticas e de transportes, de um modo geral, por possuírem as características citadas acima.⁽⁵⁾

Este trabalho tem por objetivo, determinar o coeficiente de atrito para a liga de alumínio AA6351, através do ensaio do tubo cônico, realizando ainda um comparativo do experimento por meio de simulação numérica computacional.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Ensaio de Compressão do Tubo Cônico

Kopp e Philipp⁽⁶⁾ apresentaram pela primeira vez o ensaio de compressão do tubo cônico, método relativamente simples para avaliação do atrito semelhante ao ensaio do anel. Neste ensaio o corpo de prova na forma de um cilindro oco com uma das extremidades na forma de um tronco de cone é comprimido entre uma placa plana (ferramenta inferior) e uma plana cônica (ferramenta superior). A Figura 1 mostra o corpo de prova inicial e o corpo de prova conformado no teste do tubo cônico.

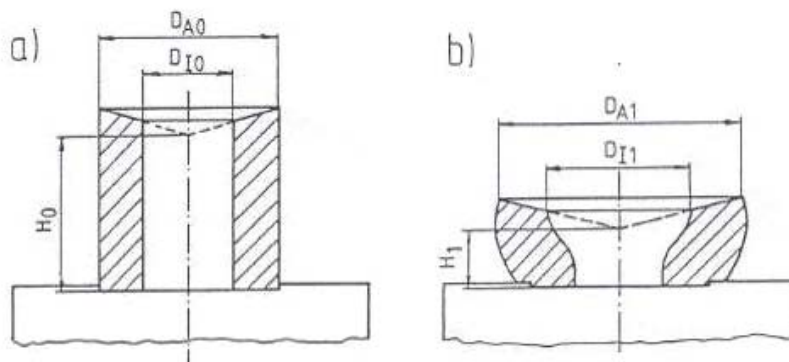


Figura 1. Corpo de prova inicial (a) e final no ensaio do tubo cônico (b).⁽⁶⁾

No ensaio do tubo, comprimiram-se vários corpos de prova em diferentes alturas, medindo-se então o diâmetro externo máximo na zona cônica, simulando paralelamente o ensaio, fazendo-se variar o atrito, construindo as curvas de calibração teóricas tendo na abscissa a deformação em altura e na ordenada a variação do diâmetro externo. Sobrepondo os resultados experimentais nas curvas de calibração são possíveis determinar o coeficiente ou fator de atrito característico do conjunto material-ferramenta-lubrificante.⁽⁷⁾ A Figura 2 mostra as curvas obtidas com a ferramenta com ângulo de 25°C (material: St 37, T= 1000°C) obtidas por simulação através de elementos finitos para o teste do ensaio do tubo cônico.

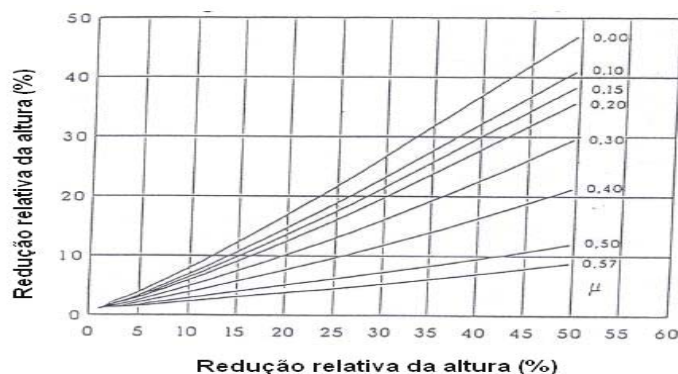


Figura 2. Curvas do ensaio do tubo cônico.⁽⁶⁾

A Figura 3 apresenta esquematicamente os corpos de prova dos ensaios do tubo cônico, com suas dimensões iniciais e as dimensões finais que devem ser medidas para serem comparadas as curvas de calibração, juntamente com as ferramentas.

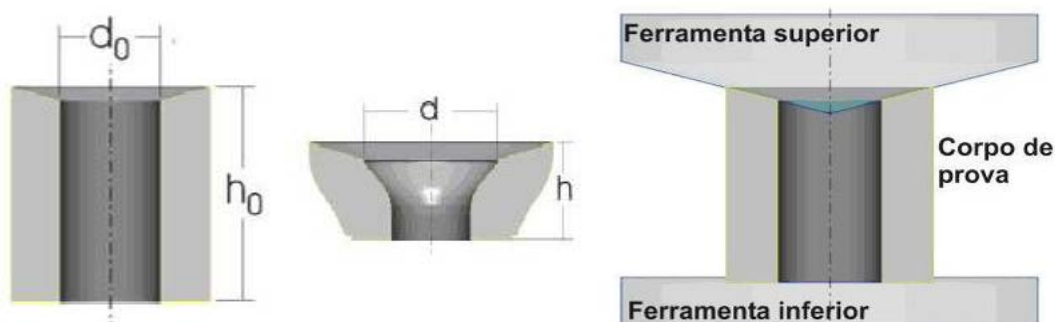


Figura 3. Representação esquemática dos corpos de prova dos ensaios do tubo cônico e as ferramentas.⁽⁸⁾

A Figura 4 mostra os resultados experimentais obtidos por Brito⁽⁸⁾ nos ensaios do tubo e as curvas de calibração próximas a eles para condição recozida dos materiais.

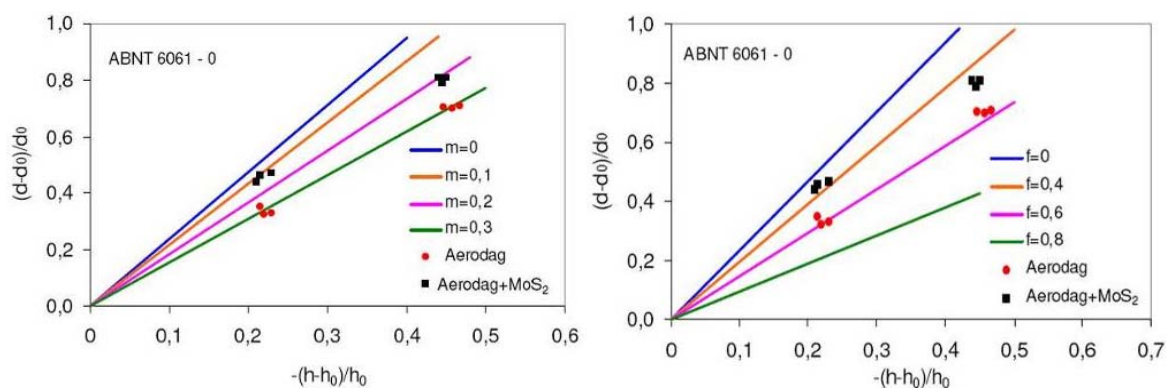


Figura 4. Curvas obtidas por simulação para os corpos de prova dos ensaios do tubo cônico.⁽⁸⁾

Brito⁽⁸⁾ apresenta as curvas de calibração dos modelos de Prandtl (m) e de Wanheim-Bay (f) juntamente com os resultados experimentais obtidos para o ensaio do tubo cônico para o material na condição T6 visto na Figura 5.

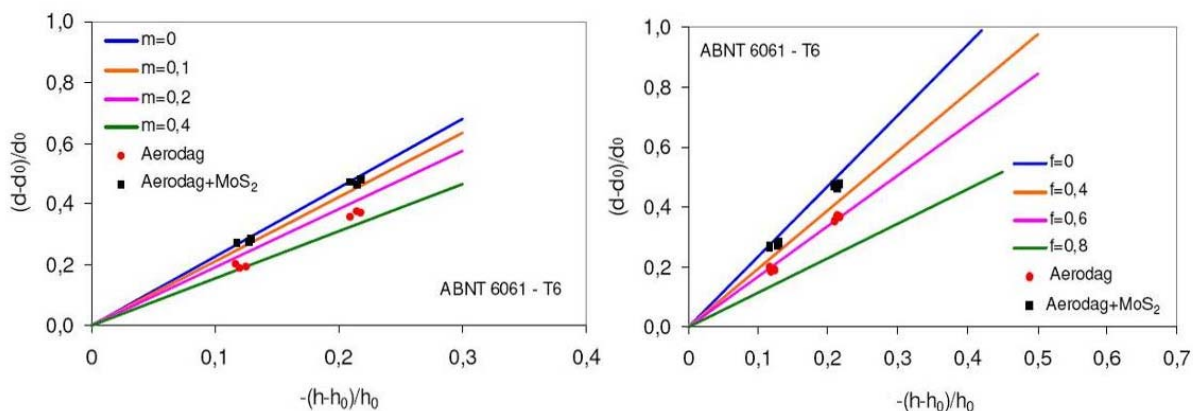


Figura 5. Curvas obtidas por simulação para os corpos de prova dos ensaios do tubo cônico.⁽⁸⁾

2.2 Simulação por Elementos Finitos

O final da década de 1960 foi o marco para a indústria da conformação com os primeiros trabalhos de simulação computacional e método de elementos finitos (FEM), isto viabilizou, com maior confiabilidade, efetivar a análise dos processos de conformação em vários aspectos: A distribuição da deformação, a tensões nas ferramentas, os efeitos das velocidades de deformação, o gradiente de temperatura na peça, e o preenchimento da matriz, entre outros.⁽⁹⁾

O método de elemento finito modela o processo industrial do forjamento e avalia as condições do mesmo ou dos parâmetros de projeto com isso os resultados servem para uma melhor decisão da engenharia, possibilitando ainda ser testados e analisados para diversas situações quantas vezes for necessária num curto espaço de tempo, gerando economia por se tratar de testes computacionais. A Figura 6 apresenta exemplo de simulação por elementos finitos.⁽¹⁰⁾

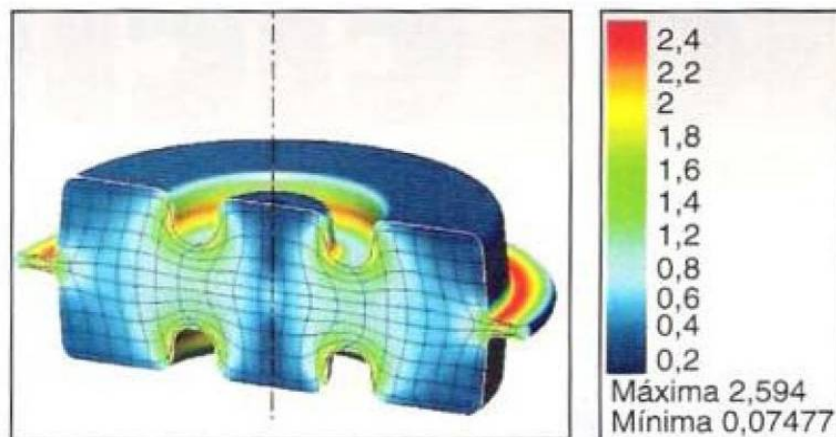


Figura 6. Exemplo de simulação por elementos finitos.⁽¹¹⁾

2.3 Análise de Variância - ANOVA

Em muitas situações experimentais é necessário que a variabilidade provocada por fontes perturbadoras conhecidas seja controlada, com o intuito de melhorar a eficiência da análise a ser realizada para avaliar os efeitos dos fatores de interesse. No modelo de efeitos fixos são testadas hipóteses sobre as médias e as conclusões obtidas são aplicáveis somente aos níveis do fator considerados na análise.⁽¹²⁾ Este procedimento de teste é usualmente resumido em uma tabela de análise de variância semelhante ao Quadro 1.

Quadro 1. Análise de variância de fator único⁽¹²⁾

| Fonte de Variação | Soma de Quadrados | Graus de Liberdade | Quadrado Médio | F0 |
|-------------------|-------------------|--------------------|------------------------------|------------------------|
| Fator | SQFator | a - 1 | $\frac{SQFator}{(a - 1)}$ | $\frac{QM Fator}{QMR}$ |
| Blocos | SQBlocos | b - 1 | $\frac{SQBlocos}{(b - 1)}$ | |
| Residual | SQR | (a - 1)(b - 1) | $\frac{SQR}{(a - 1)(b - 1)}$ | |
| Total | SQT | N - 1 | | |

As formulas mais adequadas para o cálculo das somas de quadrados apresentadas por Werkema e Aguiar⁽¹²⁾ nesta tabela são dadas por:

Soma de quadrados (Equações 1,2 e 3):

$$SQT = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 - \frac{x_{..}^2}{kn} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$SQE = \sum_{i=1}^k \frac{x_{i.}^2}{n} - \frac{x_{..}^2}{kn} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$SQR = SQT - SQE \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde: SQE é a soma de quadrados entre experimentos; é a SQR = soma de quadrados residuais e SQT = soma dos quadrados total.
Quadrados médios (Equações 4 e 5):

$$QME = \frac{SQE}{k - 1} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$QMR = \frac{SQR}{k(n - 1)} \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde: QME são os quadrados médios entre experimentos e QMR os quadrados médios residual.

A análise de variância é geralmente realizada por meio da utilização de um software estatístico ou planilha eletrônica e, nesta situação, o emprego das equações acima para o cálculo das somas de quadrados para a obtenção da razão F_0 é desnecessária.

A confiabilidade do teste é definida por $1 - \sigma$, normalmente sendo empregado o valor 0,05 para σ , gerando uma confiabilidade de 0,95 ou 95%.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Ensaio do Tubo Cônico

As dimensões e formatos corpos de prova utilizados estão conforme a Figura 7, sendo a altura da amostra de 25 mm, o diâmetro externo com 25 mm e o diâmetro interno de 12,5 mm, tendo um ângulo de contato de 15° .

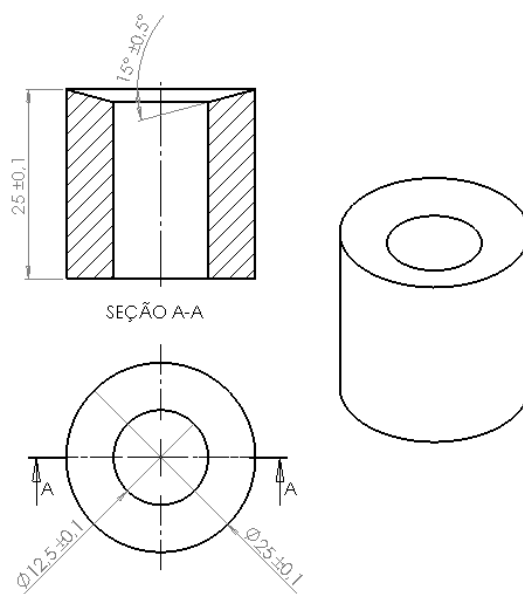


Figura 7. Dimensões dos corpos de prova.

Os corpos de prova conformados foram medidos em duas direções uma perpendicular a outra no diâmetro (\emptyset) externo e de igual forma na altura para minimizar a possibilidade de erro. Após a obtenção destes valores realizou-se uma média simples. Estas variações de altura (h) e diâmetro (\emptyset) são obtidas através das Equações 6 e 7. Para verificar a variação do diâmetro interno, utiliza-se a Eq. 6.

$$\Delta\phi = \left(\frac{D - D_0}{D_0} \right) \quad (\text{Eq. 6})$$

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 Equação 7.

$$\Delta h = - \left(\frac{h - h_0}{h_0} \right) \quad (\text{Eq. 7})$$

Os ensaios foram realizados em temperatura ambiente e a 450°C em uma prensa hidráulica com capacidade de 40 Toneladas no LdTM/FRGS. Para a compressão utilizou-se duas bases de aço ferramenta com faces polidas e taxas de deformação variando de 20, 40 e 60%. Foram utilizados dois diferentes lubrificantes para os testes - lubrificante de grafite a base de água e lubrificante sintético a base de poliamida.

Na segunda parte dos ensaios, os corpos de prova foram submetidos à temperatura de 450°C . Visando obter menor perda térmica utilizou-se um dispositivo confeccionado em aço ferramenta AISI H13, como está apresentando na Figura 8 denominado "copo quente". Ao todo se realizaram 9 conformações para a faixa de temperatura de 450°C , sendo três para cada taxa de deformação.



Figura 8. Dispositivo em aço ferramenta AISI H13 para conformação de alumínio.

Foram utilizados para os ensaios dois diferentes lubrificantes, um grafite diluído em água e outro sintético a base de poliamida.

3.2 Curvas de Calibração Obtidas por Simulação

O processo de conformação do tubo foi modelado no programa comercial Simufact Forming 9.0.1, utilizando o método dos elementos finitos. Visando reduzir o tempo computacional, foi realizada uma análise axissimétrica do processo, possibilitado pelas matrizes e o tarugo apresentarem geometria de revolução em torno do mesmo eixo. A malha de elementos finitos foi gerada automaticamente pelo programa, calculando o tamanho de elementos mais adequado para a simulação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaios do Tubo Cônico

Os ensaios do tubo foram realizados à temperatura de 450°C, com reduções em altura de aproximadamente 20%, 40% e 60%, para cada uma das condições tribológicas propostas. Os pontos obtidos no ensaio foram dispostos na Figura 9, sobre curvas simuladas para as situações propostas.

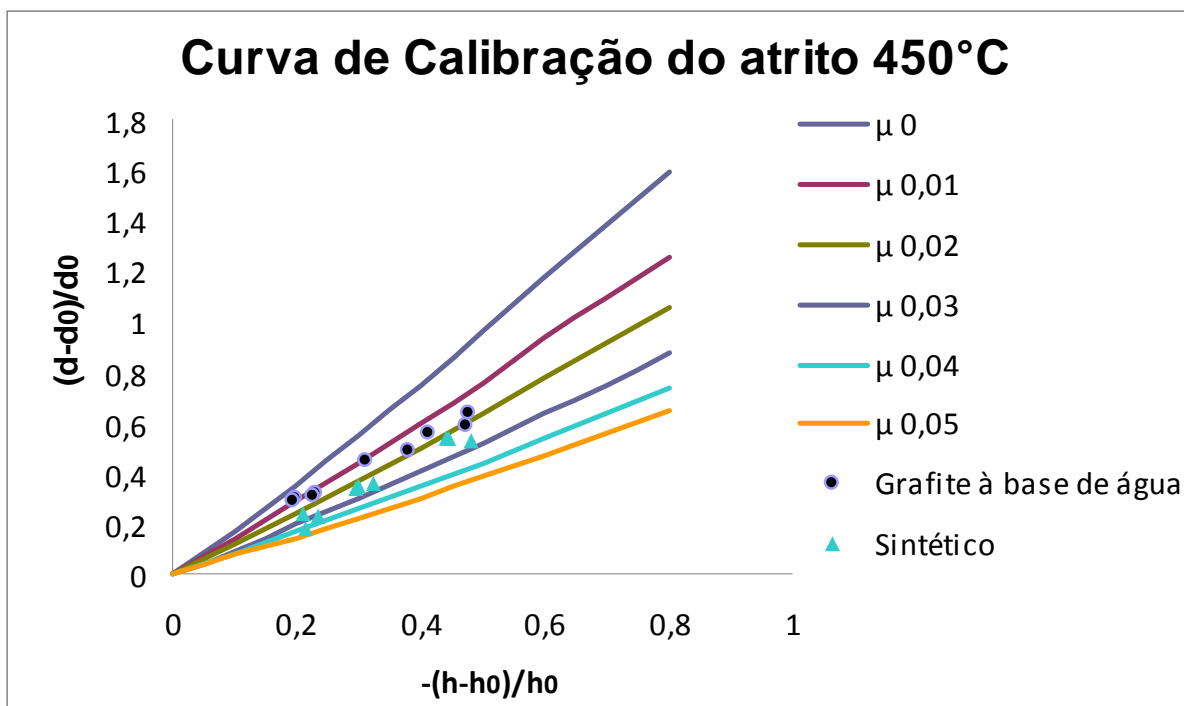


Figura 9. Pontos obtidos para μ a 450°C

Os corpos de prova ensaiados foram recortados transversalmente ao diâmetro visando comparar a geometria final com os corpos simulados a 450°C (Figuras 10 a 12).

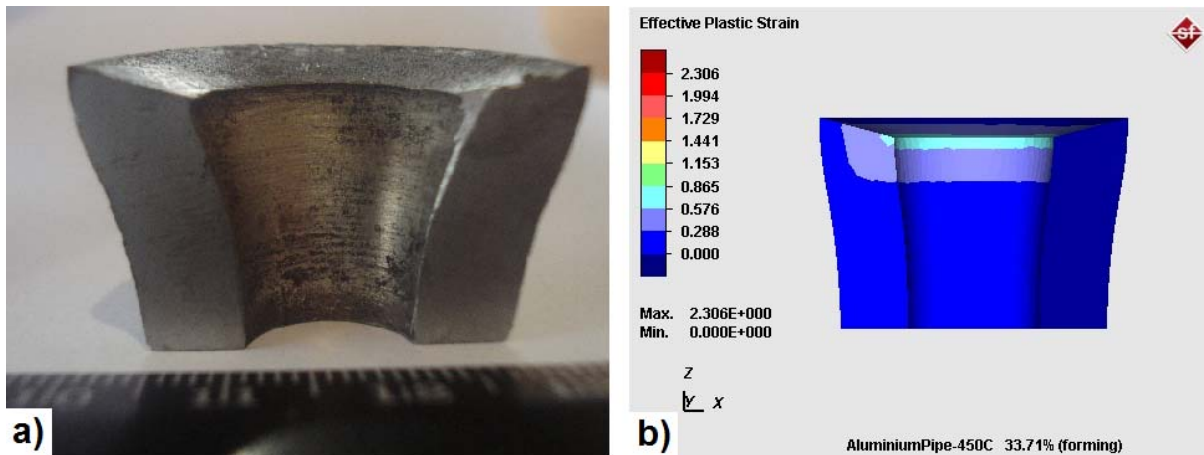


Figura 10. (a) 20 % deformação à 450°C (b) simulado 20% deformação à 450°C.

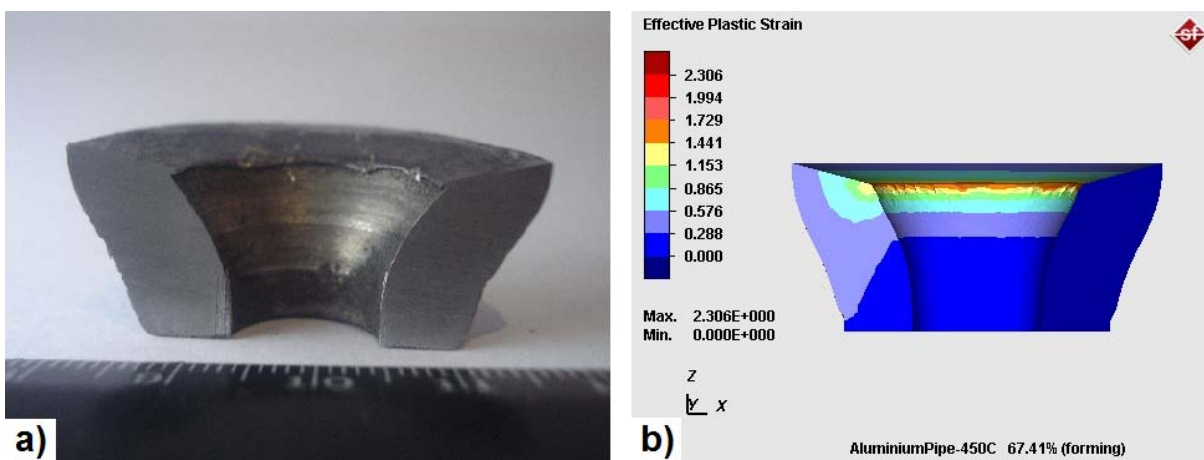


Figura 11. (a) 40 % deformação à 450°C (b) simulado 40% deformação à 450°C.

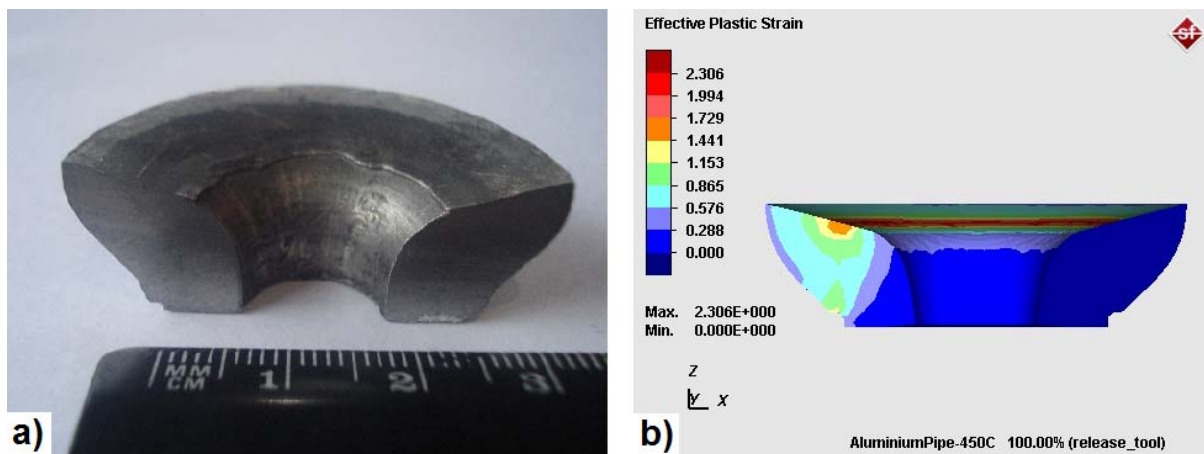


Figura 12. (a) 60 % deformação à 450°C (b) simulado 60% deformação à 450°C.

4.2 Análise Estatística

Após realizar os ensaios e plotar os valores obtidos nas curvas de calibração, foi executada a análise de variância em planilha eletrônica, utilizando uma ANOVA de fator duplo com repetição, com $\sigma = 0,05$ atribuindo 95% de confiabilidade ao teste, conforme pode ser verificado nas tabelas 1 a 3, logo abaixo.

Tabela 1: Valores de σ para tubo de Alumínio (AA6351) a 450°C

| % Deformação | Grafite | Sintético |
|--------------|---------|-----------|
| 60 | 0,018 | 0,029 |
| | 0,021 | 0,022 |
| | 0,017 | 0,023 |
| 40 | 0,018 | 0,029 |
| | 0,011 | 0,024 |
| | 0,013 | 0,024 |
| % Deformação | Grafite | Sintético |
| 20 | 0,014 | 0,037 |
| | 0,010 | 0,042 |
| | 0,010 | 0,029 |

Tabela 2: Resumo da análise de variância para tubo de Alumínio a 450°C – Lubrificante X Deformação

| RESUMO | Grafite | Sintético | Total |
|-----------|----------|-----------|----------|
| 60 | | | |
| Contagem | 3 | 3 | 6 |
| Soma | 0,056 | 0,074 | 0,13 |
| Média | 0,018667 | 0,024667 | 0,021667 |
| Variância | 4,33E-06 | 1,43E-05 | 1,83E-05 |
| 40 | | | |
| Contagem | 3 | 3 | 6 |
| Soma | 0,042 | 0,077 | 0,119 |
| Média | 0,014 | 0,025667 | 0,019833 |
| Variância | 0,000013 | 8,33E-06 | 4,94E-05 |
| 20 | | | |
| Contagem | 3 | 3 | 6 |
| Soma | 0,034 | 0,108 | 0,142 |
| Média | 0,011333 | 0,036 | 0,023667 |
| Variância | 5,33E-06 | 4,3E-05 | 0,000202 |
| Total | | | |
| Contagem | 9 | 9 | |
| Soma | 0,132 | 0,259 | |
| Média | 0,014667 | 0,028778 | |
| Variância | 0,000016 | 4,59E-05 | |

Tabela 3: Análise de variância - ANOVA ($\sigma = 5\%$) - Alumínio a 450°C – Lubrificante X Deformação

| Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
|-------------------|----------|----|----------|----------|----------|-----------|
| Amostra | 4,41E-05 | 2 | 2,21E-05 | 1,498113 | 0,26254 | 3,885294 |
| Colunas | 0,000896 | 1 | 0,000896 | 60,86415 | 4,86E-06 | 4,747225 |
| Interações | 0,000275 | 2 | 0,000137 | 9,332075 | 0,003592 | 3,885294 |
| Dentro | 0,000177 | 12 | 1,47E-05 | | | |
| Total | 0,001392 | 17 | | | | |

Observando os resultados obtidos através da ANOVA, pode-se concluir que a variação do valor de deformação, na linha “Amostra”, não apresentou, por si só, uma



variação estatisticamente significativa, visto que o resultado de “F” ficou menor que “F crítico”. Porém, ao observar a variação entre a utilização de um lubrificante e outro, na linha “Colunas” encontram-se variações significativas, visto que “F” ficou maior que “F crítico”. Da mesma forma, pode-se ainda observar que existe uma variação significativa ao realizar uma avaliação global, na linha “Interações”.

De acordo com a avaliação estatística, pode-se considerar a utilização de grafite, como a melhor opção, visto que se obtiveram os menores valores do coeficiente de atrito com a utilização deste.

5 CONCLUSÕES

O lubrificante grafite a base de água utilizados no ensaio à 450°C, apresentou uma redução no coeficiente de atrito com o aumento da taxa de deformação, obtendo entre $\mu=0,01$ e $\mu=0,02$ para grandes deformações. E com deformações em torno de 20% apresentou o menor coeficiente de atrito na faixa entre $\mu=0,005$ e $\mu=0,01$. Com base nos dados descritos, o grafite apresenta melhores resultados na redução do atrito para o método ensaiado.

O lubrificante sintético a base de poliamida nos ensaios a temperatura de 450°C, apresentou um elevação crescente no coeficiente de atrito, obtendo-se: $\mu=0,02$ e $\mu=0,03$ para grandes deformações e com deformação em torno de 20% apresentou $\mu=0,035$. Apesar de ter apresentado rendimento pouco abaixo do grafite para os ensaios em alumínio o lubrificante sintético a base de poliamida obteve rendimento satisfatório quando comparado com dados de literatura.

A simulação numérica computadorizada apresentou um excelente resultado em comparação com os corpos de prova ensaiados, mostrando-se como alternativa viável para determinação de parâmetros de processo sendo possível, em alguns casos, descartar a necessidade de realização prática de ensaios.

A avaliação estatística ANOVA é de fundamental importância, pois apresenta a confiabilidade dos experimentos, sendo uma ferramenta que ajuda na avaliação dos resultados de maneira efetiva com a menor chance de erro respondendo as expectativas e confirmando análises do ensaio do tubo cônico.

Agradecimentos

Os autores agradecem o Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e as instituições de apoio financeiro como CNPq e CAPES.

REFERÊNCIAS

- 1 OLIVEIRA, R. A.; KOLLER, L.A.; SCHAEFFER, L. Evaluation of two commercially-available lubricants by means of ring test to AA6061 F aluminum alloys. *Materials research*, v. 6, n. 4, 2004, p. 591-597.
- 2 MARTINS, V.; SCHAEFFER, L. Comparação entre lubrificantes pela verificação do atrito em alumínio e aço - *Revista Corte e Conformação de Metais* - Março/2009 – p. 44-63
- 3 SCHAEFFER, L. *Forjamento: Introdução ao processo*. Editora Imprensa, Porto Alegre, 2001. 202 p.



- 4 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.
- 5 MARTELLO, L. Análise da Influência de Parâmetros no Forjamento da Liga de Alumínio AA6351. Dissertação para Obtenção de Título de Mestre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. p. 93
- 6 KOPP, R.; PHILLIP, F. Physical parameters and boundary conditions for the numerical simulation of hot forming process. *Steel Research*, 1992. v. 63, n. 9, p. 392-398.
- 7 SCHAEFFER, L. *Conformação mecânica*. Editora Imprensa, Porto Alegre, 2005. 167p.
- 8 BRITO, A. M. G. Análise Teórico-Experimental dos processos de escansão e inversão de extremidades de tubo de parede fina em matriz. Tese para Obtenção de Título de Doutor. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. p 20-139.
- 9 HENTZ, E. A.; SCHAEFFER, L.; KNOLL, K. P. Influência de Diferentes Curvas de Escoamento no Forjamento à Quente da Liga de Titânio Ti-6Al-4V. *Ciência & Engenharia*, v. 16, n. 1/2, p. 53 - 59. 2007.
- 10 LEE, R. S.; LIN, H. C. Process design based on the deformation mechanism for the non-isothermal forging of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, n. 79, 1998, p. 224-235.
- 11 SANTOS, J.W.S., MULLER, D., GLUFKE, L.A., SCHAEFFER, L., Recursos informáticos agilizam o processo de conformação, *Revista Metalúrgica e Materiais*, Setembro. 2001. p. 146-157.
- 12 WERKEMA, Maria C.C. & AGUIAR, Sílvio. Planejamento e análise de experimentos: como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo. Belo Horizonte, MG: Fundação Cristiano Ottoni, 1996. p. 294