

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPGEM

Determinação do Coeficiente de Atrito para as Ligas de Alumínio AA6351 e de Titânio  
Ti6Al4V pelos Métodos do Anel e Tubo Cônico

Alex Fabiano Bueno

Dissertação para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia

Porto Alegre  
2010

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPGEM

Determinação do Coeficiente de Atrito para as Ligas de Alumínio AA6351e de Titânio  
Ti6Al4V pelos Métodos do Anel e Tubo Cônico

Alex Fabiano Bueno  
Tecnólogo em Fabricação Mecânica

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre  
2010

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Processos de fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr Ing. Lírío Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eng<sup>o</sup> Gilmar Ferreira Batalha – USP

Prof. Dr. Eng<sup>o</sup> Renato Mazzini Callegaro – IFSUL

Dr. Eng<sup>o</sup>. Alberto Moreira Guerreiro Brito – UFRGS

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann  
Coordenador do PPGEM

Dedico a minha esposa  
Maria Adriana Bissoloti Bueno.  
Meus filhos  
Matheus Bissoloti Bueno  
e Rafael Bissoloti Bueno  
Aos meus pais  
José Carlos Nunes Bueno  
e Arminda Neli Bueno  
Ao meu sogro e sogra  
Ivo Campagnoni Bissoloti  
e Ana Maria Bissoloti

## AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

Ao professor Dr. Ing. Lirio Shaeffer pelo estímulo, dedicação e esforço pessoal proporcionado.

Aos colegas Vinicius Martins, Alexsandro Moraes, Alberto Brito, Luiz Eduardo, Luis Folle, Paulo Böesch Junior pelas sugestões, auxílios em experimentos e observações valiosas.

A empresa Syndool Industria Química Ltda pelo apoio e doação de materiais para os experimentos.

A empresa Dana Industria – Forjaria Gravataí pelo apoio e doação de materiais para os experimentos.

Ao Professor Dr. Renato Callegaro pelas valiosas contribuições e pelo incentivo.

A minha família por ter estado sempre presente ao meu lado me dando apoio necessário e abrindo mão muitas vezes de horas de lazer para que eu pudesse concluir meus trabalhos.

Não posso deixar de agradecer nem um só momento a Deus, pois sem Ele nada seria possível.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	VIII
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	XII
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	XIV
<b>LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS</b> .....	XV
<b>RESUMO</b> .....	XVII
<b>ABSTRACT</b> .....	XVIII
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	19
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	21
2.1 Forjamento .....	21
2.1.1 Histórico do Processo de Forjamento .....	21
2.1.2 Aspectos do Processo de Forjamento .....	23
2.1.3 Parâmetros de Forjamento .....	24
2.2 Ligas de Alumínio.....	27
2.2.1 Características do Alumínio .....	27
2.2.2 Forjamento de Alumínio.....	36
2.2.3 Tratamento térmico do Alumínio .....	38
2.3 Ligas de Titânio.....	41
2.3.1 Características do Titânio .....	41
2.3.2 Forjamento de Titânio .....	47
2.3.3 Tratamento térmico do Titânio .....	51
2.4 Simulação Numérica Computadorizada.....	55
2.4.1 Curvas de calibração do coeficiente de atrito .....	56
2.5 Tribologia .....	58
2.5.1 Histórico e Definição da tribologia.....	58
2.5.2 Atrito .....	59
2.5.3 Lubrificação.....	62
2.5.4 Métodos para obtenção do coeficiente de atrito .....	70
2.6 Anova .....	77
<b>3. ANÁLISE EXPERIMENTAL</b> .....	79
3.1 Ensaio do Anel em Alumínio .....	79
3.2 Ensaio do Anel em Titânio.....	80
3.3 Ensaio do Tubo cônico em alumínio .....	81
3.4 Ensaio do Tubo cônico em Titânio .....	83

3.6 Curvas de calibração obtidas por simulação .....	88
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>90</b>
4.1 Ensaio do Anel .....	90
4.1.1 Curvas de calibração obtidas por simulação para o ensaio do anel .....	90
4.1.2 Ensaio do Anel em Alumínio .....	91
4.1.3 Ensaio do Anel em Titânio .....	92
4.2 Ensaio do Tubo cônico .....	93
4.2.1 Dados obtidos para ensaio do tubo cônico.....	93
4.2.2 Ensaio do Tubo cônico em alumínio.....	94
4.2.3 Ensaio do Tubo cônico em Titânio .....	98
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>108</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>109</b>
<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>110</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: a) Matriz aberta; b) Matriz fechada; (Web Site UFJF, 2009) .....	21
Figura 2: a) Esquema das partes do martelo; b) Martelo movido à água; (Vián, 2009).....	22
Figura 3: Martelo de Nasmith, (Forging Handbook,1985).....	22
Figura 4 - Fluxograma do processo de forjamento (Web Site Ain Shams Universidade, 2010).....	24
Figura 5 – Microestrutura resultante da extrusão da liga Al 6061.( Lee, Y <i>et. al</i> 2003).....	26
Figura 6 – Microestrutura resultante da do forjamento da liga Al 6061.( Lee, Y <i>et. al</i> 2003) .....	26
Figura 7 – Mudança no tamanho dos grãos em função da velocidade de deformação.( Lee, Y <i>et. al</i> 2003).....	27
Figura 8: Estrutura cúbica de face centrada do alumínio. (Web Site AFSA, 2010).....	28
Figura 9: Diagrama de fase da liga alumínio - silício. (Hatch, 1990) .....	33
Figura 10: Diagrama de fase da liga alumínio - magnésio. (Web Site Infomet, 2010).....	34
Figura 11: Diagrama de fase ternário da liga alumínio – silício - magnésio. (Web Site Infomet,2010) .....	35
Figura 12: Forjabilidade Relativa em função da Temperatura, (ASM Metals Handbook – Forming and Forging, V. 14,1993).....	37
Figura 13: Solubilização do alumínio, (Web Site Dalmolim, 2010).....	39
Figura 14: Envelhecimento do alumínio, (Web Site Dalmolim, 2010).....	40
Figura 15: Supenvelhecimento do alumínio, (Web Site Dalmolin, 2010) .....	40
Figura 16: (a) Estrutura hexagonal; (b) estrutura cúbica de corpo centrado .....	42
Figura 17: Influência de elementos de liga em diagramas de fase das ligas Ti (Lütjering e Williams, 2007) .....	42
Figura 18: Diagramas de fase das ligas Ti – Al. (Web Site Infomet, 2010).....	46
Figura 19: Diagramas de fase das ligas Ti – V. (Obtido do site da Infomet, 2010).....	47

Figura 20: (a) Trem de pouso principal do Boeing 777; (b) Desenho esquemático do trem de pouso principal do Boeing 777, (Peters, 2003) .....	48
Figura 21: Peças forjadas em Titânio e desenho esquemático da sua localização no aparelho Boeing 787 (Web Site Rickard Metals, 2010).....	48
Figura 22: Peça e desenho esquemático da localização do sistema de evacuação da tripulação (Web Site Rickard Metals, 2010) .....	49
Figura 23: Efeito da temperatura da matriz com pressão em diferentes taxas de deformação para Ti-6Al-4V. ( Hu e Dean, 2001) .....	50
Figura 24: Microestrutura com diferentes taxas de resfriamento para Ti-6242, LM. (Lütjering e Williams, 2007) .....	52
Figura 25: Exemplo de simulação numérica computacional, (Hentz <i>et a</i> ,2007).....	55
Figura 26: Exemplo de simulação numérica computacional, (Santos <i>et al</i> ,2001). .....	56
Figura 27: Comparativo de diversas curvas simuladas e curva de experimento prático. (Lenhard Junior, 2007) .....	56
Figura 28: Parâmetros para início realização de simulações. (Lenhard Junior, 2007).....	57
Figura 29: Curvas de calibração de atrito para a liga de alumínio AA6061 (Oliveira, 2001). .....	57
Figura 30: Os valores do coeficiente de atrito e do fator de atrito (Schey,1984 )......	59
Figura 31: Curva de Stribeck (Geier, 2007) .....	63
Figura 32: Efeito do atrito no escoamento do material durante o ensaio do anel. (Martello 2006).....	71
Figura 33: Curvas de calibração do anel. (Brito, 2006).....	72
Figura 34: Curvas de calibração do anel. (Prandtl.) .....	73
Figura 35: Corpo de prova inicial e final no ensaio do tubo cônico. (Phillip, 1992) .....	73
Figura 36: Curvas do ensaio do tubo cônico. (Phillip, 1992).....	74
Figura 37: Representação esquemática dos corpos de prova dos ensaios do tubo cônico e as ferramentas. (Britto, 2006) .....	74
Figura 38: Curvas obtidas por simulação para os corpos de prova dos ensaios do tubo cônico (Britto, 2006). .....	75

Figura 39: Curvas obtidas por simulação para os corpos de prova dos ensaios do tubo cônico (Britto, 2006). .....	75
Figura 40: Corpos de prova dos ensaios do tubo cônico (Britto, 2006). .....	76
Figura 41: (Esq.) Corpo de prova utilizado (Dir.) Dimensões dos corpos de prova .....	79
Figura 42: Matrizes cerâmicas de Zircônia. ....	80
Figura 43: Desenho esquemático do dispositivo em aço ferramenta AISI H13. ....	81
Figura 44: Dispositivo em aço ferramenta AISI H13 para conformação de alumínio. ....	82
Figura 45: Corpo de prova utilizado. ....	83
Figura 46: Dimensões dos corpos de prova. ....	83
Figura 47: Desenho esquemático do dispositivo denominado “Copo-quente”. ....	84
Figura 48: Dispositivo denominado “Copo-quente”. ....	85
Figura 49: Dispositivo final do “Copo-quente”. ....	85
Figura 50: (Esq.) Dispositivo saindo do forno e (Dir.) dispositivo colocado na prensa. ....	86
Figura 51: (Esq.) Dispositivo instalado na prensa e (Dir.) realização do ensaio. ....	86
Figura 52: (Esq.) Dispositivo instalado na prensa e (Dir.) realização do ensaio. ....	87
Figura 53: (Esq.) Retirada do tubo de aço e (Dir.) matrizes e o tubo conformado. ....	87
Figura 54: (Esq.) Retirada da matriz superior e (Dir.) retirada do tubo conformado. ....	88
Figura 55: (Esq.) Matriz inferior sobre a base e (Dir.) Tubo de titânio conformado. ....	88
Figura 56: Análise de elementos finitos para da peça (a) e para análise das matrizes (b). ....	89
Figura 57: Propriedades mecânicas da liga Ti6Al4V do banco de dados do Simufact Materials. ....	89
Figura 58: Curva teórica de calibração da liga de titânio Ti6Al4V a 850°C. ....	90
Figura 59: Curva teórica de calibração da liga de titânio Ti6Al4V a 950°C. ....	91
Figura 60: Pontos obtidos para $\mu$ em temperatura ambiente. ....	91
Figura 61: Pontos obtidos para $\mu$ a 850°C. ....	92

Figura 62: Pontos obtidos para $\mu$ a 950°C.....	92
Figura 63: Curva de resfriamento do copo quente .....	93
Figura 64: Curva de resfriamento do matriz cerâmica. ....	94
Figura 65: Amostras obtidas pelo ensaio do tubo a temperatura ambiente .....	94
Figura 66: Pontos obtidos para $\mu$ a 450°C.....	95
Figura 67: (Esq.) 20 % deformação à 450°C      (Dir.) simulado 20% deformação à 450°C	95
Figura 68: (Esq.) 40 % deformação à 450°C      (Dir.) simulado 40% deformação à 450°C .....	96
Figura 69: (Esq.) 60 % deformação à 450°C      (Dir.) simulado 60% deformação à 450°C .....	96
Figura 70: Curva obtida para $\mu$ a 850°C.....	98
Figura 71: Pontos obtidos para $\mu$ a 950°C.....	99
Figura 72: (Esq.) Ensaio em torno de 20% à 850 °C; (Dir.) Simulação de 20% à 850°C ....	99
Figura 73: (Esq.) Ensaio em torno de 40% à 850 °C; (Dir.) Simulação de 40% à 850 °C ..	100
Figura 74: a) Ensaio em torno de 60% à 850 °C; b) Simulação de 60% à 850 °C.....	100
Figura 75:(Esq.) Ensaio em torno de 20% à 950 °C;(Dir.) Simulação de 20% à 950 °C ....	100
Figura 76: (Esq.) Ensaio em torno de 40% à 950 °C; (Dir.) Simulação de 40% à 950 °C ..	100
Figura 77: (Esq.) Ensaio em torno de 60% à 950 °C; (Dir.) Simulação de 60% à 950 °C ..	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatos marcantes, segundo Börder (2005) e Braga (2009) .....	23
Tabela 2: Propriedades de algumas ligas de Alumínio; (Web Site Centerligas, 2010).....	30
Tabela 3: Grupo / Elementos De Liga / Característica / Aplicações; (Rooy, 1992, Web Site Metal Mundi, 2010 e Web Site Centerligas, 2010). .....	31
Tabela 4 - Temperaturas de solubilização e envelhecimento. (Web Site Infomet, 2010).....	41
Tabela 5: Características e propriedades mecânicas de algumas ligas de titânio, (ASM Committee, 1993) .....	44
Tabela 6: Propriedades mecânicas de ligas de titânio Forjado, (Web Site Infomet, 2010)....	45
Tabela 7: Valores de temperatura recomendados para o forjamento, (Web Site Infomet, 2010).....	51
Tabela 8 - Tratamentos de recozimento para Titânio e suas Ligas, (Web Site Infomet, 2010) .....	53
Tabela 9 – Temperatura e tempo de solubilização para Titânio e suas Ligas, (Web Site Infomet, 2010) .....	54
Tabela 10 - Variação das propriedades de tração da liga Ti-6Al-4V com a temperatura de solubilização, (Web Site Infomet, 2010).....	54
Tabela 11: Modelos de atrito, formulações e princípios (Geier, 2007).....	61
Tabela12: ensaios realizados para determinação do fator de atrito. (Britto, 2006).....	76
Tabela13: Condições dos ensaios realizados para determinação do fator de atrito.....	76
Tabela 14: Valores de $\mu$ para tubo de Alumínio (AA6351) a 450°C .....	96
Tabela 15: Resumo da análise de variância para tubo de Alumínio a 450°C – Lubrificante X Deformação .....	97
Tabela 16: Análise de variância - ANOVA ( $\sigma = 5\%$ ) - Alumínio a 450°C – Lubrificante X Deformação .....	97
Tabela 17: Valores de $\mu$ para tubo de Ti a 850°C .....	102
Tabela 18: Resumo da análise de variância para tubo de Ti a 850°C – Lubrificante X Deformação .....	102

Tabela 19: Análise de variância - ANOVA ( $\sigma = 5\%$ ) - Ti a 850°C – Lubrificante X Deformação .....	103
Tabela 20: Valores de $\mu$ para tubo de Ti a 950°C .....	103
Tabela 21: Resumo da análise de variância para tubo de Ti a 950°C – Lubrificante X Deformação .....	104
Tabela 22: Análise de variância - ANOVA ( $\sigma = 5\%$ ) - Ti a 950°C – Lubrificante X Deformação .....	104
Tabela 23: Valores de $\mu$ para tubo de Ti com lubrificante Grafite.....	105
Tabela 24: Resumo da análise de variância para tubo de Ti com lubrificante Grafite – Temperatura X Deformação .....	105
Tabela 25: Análise de variância - ANOVA ( $\sigma = 5\%$ ) - Ti com lubrificante Grafite – Temperatura X Deformação .....	106
Tabela 26: Valores de $\mu$ para tubo de Ti com lubrificante Sintético.....	106
Tabela 27: Resumo da análise de variância para tubo de Ti com lubrificante Sintético – Temperatura X Deformação .....	107
Tabela 28: Análise de variância - ANOVA ( $\sigma = 5\%$ ) - Ti com lubrificante Sintético – Temperatura X Deformação .....	107

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1: Divisão dos grupos. (Manual de soldagem ALCAN, pg 10) .....	28
Quadro 2: Análise de variância de fator único .....	77
Quadro 3: Valores para $\mu$ obtidos experimentalmente .....	101

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- C - constante da Curva de Escoamento
- $F_N$  - força normal (N)
- $F_{at}$  - força de atrito (N)
- $h$  - coeficiente de transferência de calor convectivo ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
- $h_i$  - altura instantânea da peça (mm)
- $h_m$  - coeficiente convectivo médio ( $W/m^2 K$ )
- $h_0$  - altura inicial do tarugo (mm)
- $k_c$  - limite de escoamento em cisalhamento, pelo critério de Von Misses (MPa)
- $k_f$  - tensão de escoamento (MPa)
- $k_{f0}$  - tensão de escoamento quando  $\phi=0$  (MPa)
- $K$  - coeficiente de transferência de calor condutivo,  $W/m.K$
- $m$  - fator de atrito
- $m_{1,2,3}$  - constantes do material que representam a influência da temperatura, da deformação e da velocidade de deformação, respectivamente;
- $n$  - índice de encruamento (-)
- QME- Quadrados médios entre experimentos
- QMR- Quadrados médios residual
- SQE - soma de quadrados entre experimentos;
- SQR - soma de quadrados residuais;
- SQT - soma dos quadrados total
- $t$  - tempo do processo de conformação (s)
- $T$  - temperatura ( $^\circ C$ )
- $\alpha$  - ângulo do perfil da peça em relação ao eixo das abscissas (rad)
- $\epsilon_h$  - deformação relativa
- $\phi$  - deformação verdadeira (-)
- $\dot{\phi}$  - velocidade de deformação ( $s^{-1}$ )
- $\mu$  - coeficiente de atrito coulombiano
- $\mu_w$  - viscosidade do fluido na temperatura da parede (kg/m.s)
- $\mu_\infty$  - viscosidade do fluido na temperatura da corrente livre (kg/m.s)
- $\rho$  - ângulo de atrito (rad)

- $\sigma$  - índice de significância
- $\sigma_N$  - tensão normal na interface (MPa)
- $\sigma_x$  - tensão na direção do eixo x (MPa)
- $\sigma_y$  - tensão na direção do eixo y (MPa)
- $\tau$  - tensão de cisalhamento na interface (MPa)
- $\Delta h$  - variação da altura (mm)
- $\Delta \phi$  - variação de diâmetro (mm)
- $\Delta x$  - variação da distância entre as tiras (mm)
- $\Delta y$  - variação da altura da peça dentro de cada tira (mm)
- $\Delta \sigma_x$  - variação da tensão no eixo x para cada tira (MPa)

## RESUMO

O presente trabalho apresenta um breve apanhado do processo de forjamento, resultados da investigação experimental e da análise computacional acerca do teste de compressão do anel e ensaio do tubo cônico, ambos visando a determinação do coeficiente de atrito existente na região de contato entre as matrizes e os corpos-de-prova, para as ligas de alumínio AA6351 e de titânio Ti6Al4V. Foram realizadas curvas teóricas de calibração do coeficiente de atrito tanto para o alumínio quanto para o titânio com faixa de temperatura distinta para cada um dos materiais. Após a realização da calibração por meio das curvas foram realizados os ensaios práticos de compressão do anel e do tubo cônico, também foram realizadas as simulações computacionais dos ensaios do tubo. Estas simulações permitiram a verificação teórica do fluxo de material no interior dos corpos de prova comparando-as com o material obtido em ensaios práticos, comprovando a eficiência dos programas de simulação, visto que a geometria do tubo favorece a comparação entre a simulação e os testes experimentais. Os resultados obtidos tanto nos experimentos teóricos como os práticos, efetuou-se uma comparação com os dados das referências bibliográficas descritas neste trabalho. Em que os dois lubrificantes testados apresentaram desempenho satisfatório, devido à redução do contato interfacial da relação matriz/peça. E o ensaio do tubo cônico mostrou-se viável apenas para determinação a quente do coeficiente de atrito, neste caso o comportamento em ambos os ensaios é similar.

**Palavras chave:** teste de compressão do anel, ensaio do tubo cônico, atrito, Ti6Al4V, Al 6351.

## ABSTRACT

This paper presents a brief overview of the forging process and the results of experimental investigation and computational analysis of ring compression testing and conical tube-upsetting test, both aiming to determine the coefficient of friction in the region of contact between die and bodies-of-evidence for the AA6351 aluminum alloy and titanium Ti6Al4V. Theoretical calibration through curves were performed of the coefficient of friction were performed for both aluminum and titanium with different temperature range for each material. After completion of the calibration curves compression ring and the conical tube practical tests were performed, computer simulations of the tube-upsetting test were also performed. These simulations allowed to verify the theoretical flow of material within the samples and comparing them with the material obtained in practical tests, proving the efficiency of simulation programs, since the geometry of the tube facilitates the comparison between the simulation and testing experiments. The results in both theoretical and practical experiments, were a compared with the data from the references described herein. Two oils tested showed a satisfactory performance due to the reduced interfacial contact relationship die/workpiece. And the tube-upsetting test was feasible only to determine the hot coefficient of friction, in this case the behavior in both tests is similar.

**Key words:** ring compression testing, conical tube-upsetting, friction, Ti6Al4V, Al 6351.

## 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.

Para Lange (1997), a primeira revolução industrial iniciou no século XVIII e XIX, baseando-se na formação da indústria do metal, com tecnologia desenvolvida pela primeira vez em séculos ou mesmo milênios de tradição artesanal. Durante 1920-1960 houve um amadurecimento deste desenvolvimento. Schaeffer (2001) relata que entre 1924 e 1925 Siebel e Karman desenvolvem as noções básicas da teoria elementar da plasticidade (TEP), desenvolvida para analisar as forças envolvidas no processo de laminação. Ribeiro (2004) aponta que na década de 1950 foi a introdução dos primeiros computadores digitais que revolucionaram a indústria metal-mecânica.

O atrito excessivo gera dificuldades podendo por vezes até mesmo impedir a conformação, isso reflete em maior proporção quando se deseja 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. Segundo Oliveira, Koller e Schaeffer (2004) os lubrificantes de uma maneira em geral devem apresentar características especiais como resistência ao cisalhamento, capacidade de escoamento, biodegradabilidade, para desempenhar uma boa lubrificação durante o processo de forjamento. Para Martins e Schaeffer (2009) devem-se avaliar os lubrificantes pela quantificação do atrito para se comparar e determinar a eficiência do lubrificante utilizado. Segundo Schaeffer (2001) 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.

Para Börder (2005), o forjamento estende-se a diversos tipos de materiais, na grande maioria 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. Martello (2006) descreve que 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.

Conforme Lütjering e Williams (2007) o custo elevado do titânio tem dificultado a sua aplicação na indústria automotiva. Para minimizar o problema dos custos inerentes e aplicações bem sucedidas devem aproveitar as peculiaridades e características do titânio que o diferenciam de materiais de engenharia concorrentes. Isso requer um maior conhecimento das ligas de titânio em comparação a outros materiais com custo mais acessível, incluindo também, os métodos de processamento, e as propriedades mecânicas.

Este trabalho tem por objetivo, determinar o coeficiente de atrito para as ligas de alumínio AA6351 e de titânio Ti6Al4V, através dos ensaios do anel e do tubo cônico, realizando ainda um comparativo entre os dois experimentos por meio de simulação numérica computacional.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Forjamento

Forjamento é o nome genérico dado as operações de compressão em que um material com geometria simples (perfil circular ou quadrado) é aquecido ou não e colocado sobre uma determinada matriz aberta ou fechada. A matriz aberta, conforme mostra a figura 1a, que é utilizada geralmente para grandes peças com geometrias simples como eixos de navios. A matriz fechada, figura 1b, sendo esta utilizada na maioria dos processos de forjamento consiste em duas matrizes com o perfil que se deseja obter gravado em baixo relevo. As peças obtidas por forjamento apresentam alta resistência mecânica devido ao refino da microestrutura do material. Conforme o tipo de processo utilizado no forjamento, pode-se obter mínima perda de material (seja em rebarba ou em óxidos quando de forjamento a quente) e uma boa precisão dimensional (forjamento a frio e ou a morno).

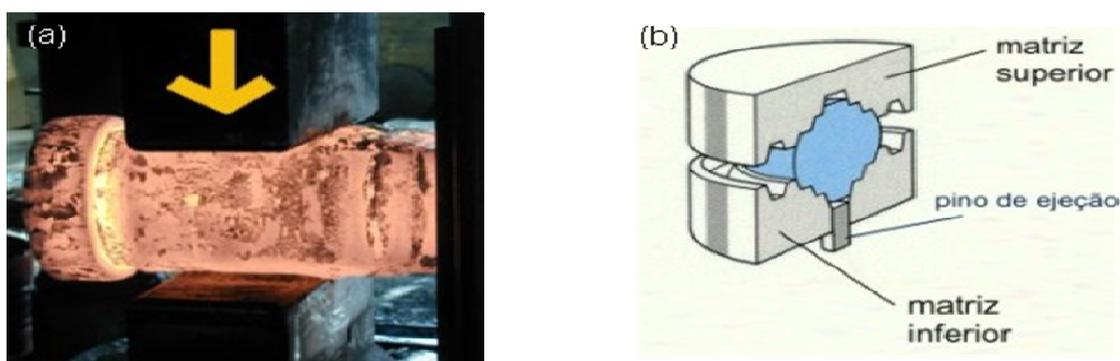


Figura 1: a) Matriz aberta; b) Matriz fechada; (Web Site UFJF, 2009)

#### 2.1.1 Histórico do Processo de Forjamento

Conforme Semiatin (1993) a conformação de metais é uma das três principais tecnologias utilizadas para fabricar produtos de metal, as outras são a fundição e metalurgia pó. Destes processos, a conformação é talvez o mais antigo e mais maduro dos três. Os primeiros registros de metalurgia descrevem o martelamento simples de ouro e cobre em várias regiões do Oriente Médio cerca de 8000 a.C.. A conformação destes metais era realizada com o minério na forma bruta, porque a arte de refino do mesmo por fusão era desconhecida. Com o advento da fundição de cobre em torno de 4000 a.C., tornou-se possível purificar metais através de produtos químicos e reações no estado líquido. Mais tarde, na Idade do Cobre, verificou-se que o martelamento do metal gerava desejável aumento da

resistência (fenômeno conhecido como encruamento). A conformação foi a força que impulsionou a formação de metais mais resistentes e levou à utilização de ligas de cobre e estanho (Idade do Bronze) e ferro e carbono (Idade do Ferro) nos artefatos humanos.

A conformação de metais era toda feita manualmente até o século XIII. Neste período, o martelo de inclinação foi desenvolvido e usado principalmente para a produção de barras e placas. Como pode ser visto na figura 2, o martelo de inclinação era movido por uma roda de água a qual servia para levantar um braço de alavanca e neste havia uma ferramenta de martelar na sua extremidade. Este dispositivo foi utilizado durante alguns séculos e com ele foram forjados equipamentos para lavoura e armas de fogo, como por exemplo, os tubos ocios para canhões.

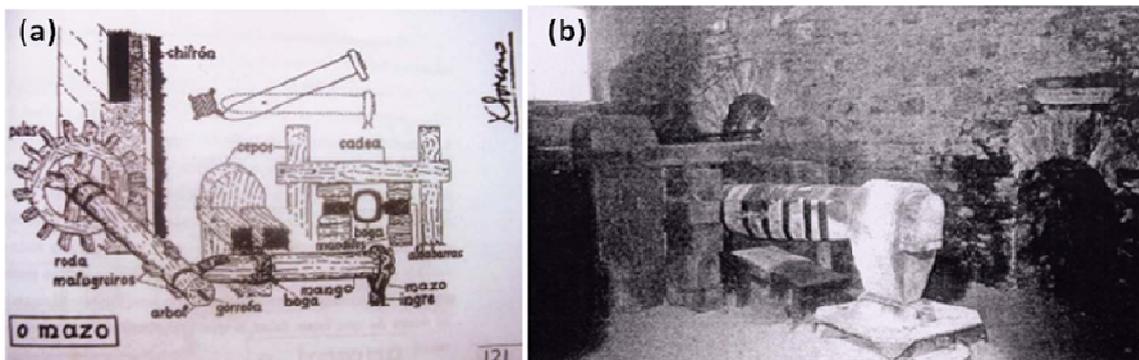


Figura 2: a) Esquema das partes do martelo; b) Martelo movido à água; (Vián, 2009)

Em 1839 o martelo de Nasmith (Figura 3) foi que iniciou uma nova era do forjamento, e em 1860 com o invenção da primeira prensa hidráulica de forjamento livre de Haswell, houve um aprimoramento ainda maior do processo de forjamento.

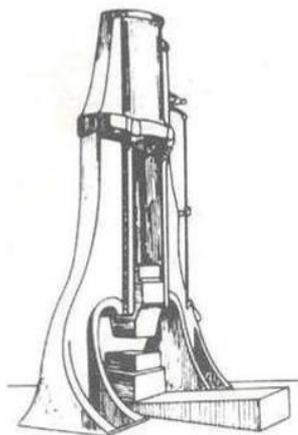


Figura 3: Martelo de Nasmith, (Forging Handbook, 1985)

A Tabela 1 apresenta o uso dos metais ao passar dos séculos e marcos referentes aos processos de conformação desde os primórdios da humanidade.

Tabela 1: Fatos marcantes, segundo Börder (2005) e Braga (2009)

Ano	Local	Marco
2900 a.C.	Egito	Grande Pirâmide de Gizé (objeto forjado em ferro)
2600 a.C.	Egito	Tumba de Abidos (objeto forjado em ferro)
1500 a.C.	Egito	O registro mais antigo de um processo de redução de minério de ferro foi encontrado na parede de uma tumba egípcia
600 a.C.	Antiga Mesopotâmia atual território do Iraque	Nabucodonosor fez construir os portões da Babilônia com pilares e vigas cobertas de cobre e reforçadas com estruturas de ferro
500 a.C.	China	Começaram a fabricar o ferro carburado, mais tarde chamado ferro-gusa
Entre 200 a.C. e 300 d.C.	Índia	Maior peça forjada conhecida foi a coluna de Delhi, com diâmetro de 400mm e altura de 7,25m
1200 d.C.	Europa	Marteletes acionados por água
1839 d.C.	Europa	Martelo de Nasmyth
1860 d.C.	Europa	A primeira prensa hidráulica de forjamento livre de Haswell

### 2.1.2 Aspectos do Processo de Forjamento

Conforme Geier 2007 as forjarias do século XIX trabalharam particularmente com forjamento de ferro em matriz aberta. Com o passar dos anos as capacidades dos martelos utilizados nas forjarias foi aumentando gradualmente de 500 J para até 1000 kJ. Hoje, o forjamento é um processo de fabricação em série de peças metálicas destinadas às mais variadas aplicações. O processo consiste na deformação plástica de um tarugo através de sua compressão entre matrizes para a obtenção de uma determinada forma final, respeitando uma linha de produção contínua, hoje em dia com etapas bem definidas, conforme a Figura 4 apresenta.

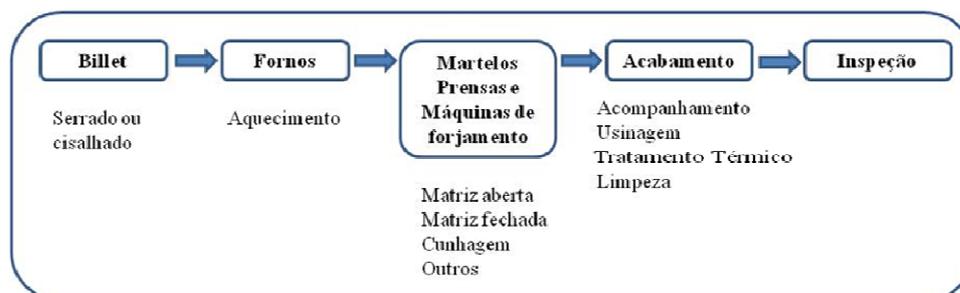


Figura 4 - Fluxograma do processo de forjamento (Web Site Ain Shams Universidade, 2010)

Para Ferreira (2006), a conformação plástica de metais e ligas produzidas por forjamento pode ser executada de dois modos tradicionais, forjamento em matriz aberta ou forjamento livre e forjamento em matriz fechada, com ou sem rebarba. A escolha do modo dependerá da forma (geometria) e pelo nível de precisão requerida pela peça (dimensões finais). Em alguns tipos de forjados se faz necessário a utilização dos dois modos, nestes casos o forjamento em matriz aberta serve de preliminar para o forjamento final em matriz fechada. O forjamento ainda pode ser classificado quanto à temperatura de processamento, em forjamento a frio, a morno e forjamento a quente.

Segundo Oliveira et. al (2004), normalmente, o forjamento em matriz aberta é realizado a quente e destinado a produção de grandes peças em lotes relativamente pequenos. Em geral as peças produzidas por forjamento sofrem operações de usinagem onde grande quantidade de material é retirada. Para Agostinho, Vilella e Button (2004), o forjamento em matriz fechada com rebarba é o mais indicado para produção de componentes de médio e pequeno porte e pode ser realizado a quente ou a frio. Tradicionalmente o processo de forjamento em matriz fechada sem rebarba é realizado a frio e aplica-se a produção de pequenas peças em grandes lotes. O acabamento superficial e controle dimensional das matrizes durante sua vida útil é fundamental, pois transmite para a peça suas geometrias e imperfeições. As características apresentadas levam à obtenção de produtos com elevada qualidade, que muitas vezes se apresentam quase que totalmente acabados, principalmente no forjamento a frio onde as tolerâncias dimensionais e o acabamento superficial obtidos aproximam-se dos especificados no projeto.

### **2.1.3 Parâmetros de Forjamento**

Conforme Shah (1996) a temperatura de forjamento, a taxa de deformação, a microestrutura dos *billets*, a pressão de forjamento e o tempo de permanência interfacial peça/matriz são fatores importantes na decisão do grau de sofisticação dimensional e microestrutura resultante da peça acabada. Em geral, as baixas taxas de deformação e tempo de maior permanência aumentam o grau de complexidade e forma da peça acabada, mas influenciam na microestrutura, devido à exposição a altas temperaturas por longos períodos de tempo durante e após a deformação. Além disso, as taxas de tensão muito baixa não podem ser utilizadas em forjamento a quente, por causa do potencial de diminuição na

temperatura durante o processamento. A microestrutura da pré-forma tem uma influência direta sobre o fluxo de tensão e superplasticidade do material, por vezes necessitando *billet* extrudado com estrutura de grão fino como material de partida. Shah (1996) ainda menciona que algumas das ligas forjadas atingem as propriedades mecânicas finais através do processamento termomecânico, neste caso, a seleção da temperatura e taxa de deformação é controlada pelas exigências de propriedade. Analisar o controle dos parâmetros mencionados acima e o processo de deformação como um todo é necessário para alcançar um resultado adequado.

Conforme Hentz *et al* (2007), novas ferramentas analíticas, como a simulação computacional do processo de deformação, são importantes para otimização do processo de forjamento, sendo os primeiros trabalhos de simulação computacional e método de elementos finitos (FEM) voltados para a conformação mecânica, pode-se efetivar a análise dos processos de conformação em vários aspectos: distribuição da deformação, tensões nas ferramentas, efeito das velocidades de deformação, gradiente de temperatura na peça, preenchimento da matriz, entre outros.

### **2.1.3.1 Velocidade de deformação do processo de forjamento.**

No caso do processo de forjamento de ligas de alumínio a velocidade de deformação é um parâmetro extremamente importante. Para Adlof (1999) caso o forjamento ocorra em velocidades altas, pode-se originar um excessivo aumento de temperatura em determinados locais na peça. Neste caso, pode ocorrer fusão e, ao se resfriar a peça, tem-se nestes locais estrutura bruta de fusão. Isso implica que deve-se observar que em nenhum local na peça sejam alcançadas fases líquidas.

Segundo Lee, Y *et. al* (2003) o tamanho de grão final de forjamento à quente da liga de alumínio Al 6061-T6 variou muito em relação as suas velocidades de deformação. A extrusão da liga Al 6061 apresentou uma estrutura de grãos parcialmente recristalizado com uma dimensão média de 10-20  $\mu\text{m}$ , como apresentado na Figura 5.

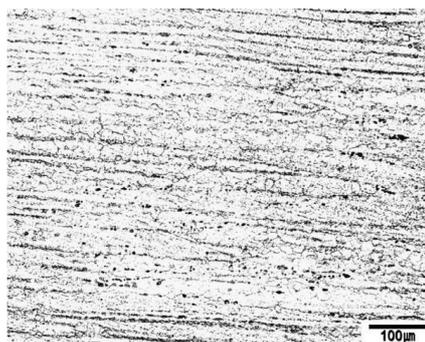


Figura 5 – Microestrutura resultante da extrusão da liga Al 6061.( Lee, Y *et. al* 2003)

Durante o processo de forjamento a quente e tratamento térmico posterior, os grãos recristalizados cresceram substancialmente como mostram as Figuras 6a e 6b que demonstram claramente que o crescimento dos grãos no presente estudo, ficou bastante evidenciado com as maiores velocidades de deformação.

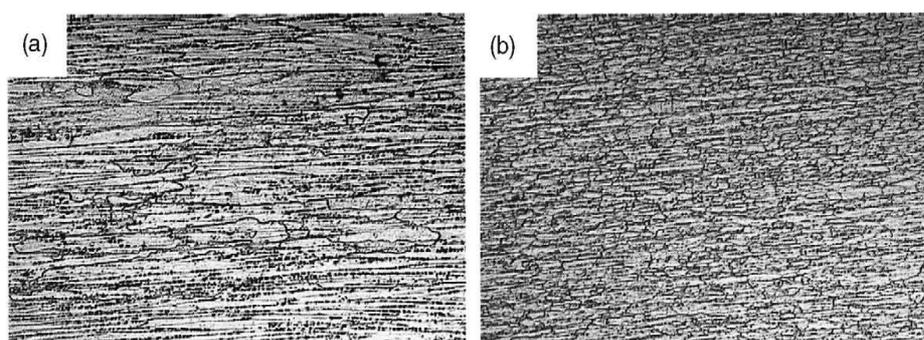


Figura 6 – Microestrutura resultante da do forjamento da liga Al 6061.( Lee, Y *et. al* 2003)

A resistência à tração e alongamento, em geral, foram maior para as amostras forjadas a baixas velocidades de deformação, devido à microestrutura refinada. A Figura 7 mostra a relação dos dois valores de tensão de 0,5 e 0,8 MPa, confirmando que a força de tração foi melhorada devido ao refino de grão Este valor, entretanto, demonstrou que todos os pontos de dados não se encaixam em uma única linha reta, sugerindo que a relação não poderia ser o único responsável pelas tendências observadas no presente estudo, descobriu-se através da microscopia eletrônica que as amostras apresentavam precipitados de  $Mg_2Si$ . A Figura 7 apresenta a mudança no tamanho dos grãos em função da velocidade de deformação.

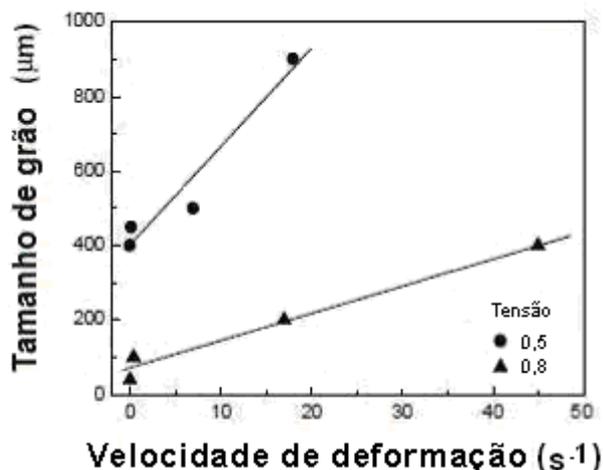


Figura 7 – Mudança no tamanho dos grãos em função da velocidade de deformação.( Lee, Y *et. al* 2003)

Conforme Lima e Schaeffer (2007) No forjamento das ligas de Alumínio, um dos parâmetros mais importante é a velocidade de deformação devido a alta condutividade térmica destes materiais, durante o forjamento em altas velocidades pode originar o aumento da temperatura em determinados locais na peça durante o processo.

## 2.2 Ligas de Alumínio

Gomes Filho *et al* (2007) mencionam que as ligas de alumínio na sua grande maioria apresentam uma boa resistência mecânica quando tratáveis. Por ser um metal leve, cerca de um terço do peso do aço e do cobre com densidade de  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , é amplamente utilizado em vários segmentos como aeroespacial, aeronáutico e indústrias de um modo geral. Apresenta entre outras características a maleabilidade, perdendo neste aspecto somente para o ouro, também alta ductilidade, neste caso é o sexto material mais dúctil.

### 2.2.1 Características do Alumínio

Os átomos dos metais sólidos geométricos assumem um determinado arranjo ou estrutura cristalina. No caso do alumínio, os átomos se arranjam em uma estrutura cúbica de face centrada, conforme mostrado na Figura 8. Esta é uma estrutura cristalina típica de metais muito dúcteis (Web Site AFSA, 2010).

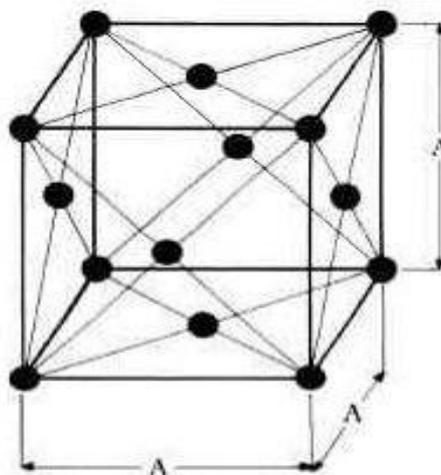


Figura 8: Estrutura cúbica de face centrada do alumínio. (Web Site AFSA, 2010)

De acordo com Hatch (1984), as ligas de alumínio se caracterizam por apresentarem o elemento Al associado com outros elementos, por exemplo, Mn, Cu, Si, Mg, Si, Zn e Li, isto forma materiais cujas propriedades mecânicas, tais como a resistência mecânica, resistência a fluência e a alta contração volumétrica durante a solidificação são melhoradas mediante a adição de elementos “de liga”, criando-se assim as ligas de alumínio ao Mn, Cu, Si, Mg-Si, Zn e Li.

Para Koloski e Filho (1994) se justifica a formação destes compostos metálicos devido a baixa resistência à tração do alumínio puro (Al 99,99%), que se situa entre 40 a 50 MPa. A adição de elementos de liga faz com que a resistência e a dureza se elevem, mesmo no estado recozido ou através de tratamentos térmicos podendo chegar a uma resistência a tração de 500 MPa e dureza 100 HV (VICKERS). As ligas de alumínio são divididas convenientemente em dois grupos: as ligas “tratáveis” termicamente, propiciando-lhes maior resistência, e as ligas “não tratáveis” termicamente, cuja resistência só pode ser aumentada através do trabalho a frio, o quadro 1 apresenta tais grupos.

Tratáveis Termicamente	Não Tratáveis Termicamente
2XXX	1XXX
6XXX	3XXX
7XXX	4XXX
	5XXX

Quadro 1: Divisão dos grupos. (Manual de soldagem ALCAN, pg 10)

Conforme Smith (1993), atualmente o alumínio é um dos metais mais utilizados, ficando somente atrás do ferro e das ligas ferrosas, sendo entre os não-ferrosos o principal metal. Tal consumo se dá pelas propriedades apresentadas por este material exibida na Tabela 2, o qual possui baixo peso específico e consegue, em algumas ligas, igualar a resistência mecânica dos aços estruturais.

Para diversos autores, dentre as propriedades já citadas anteriormente é importante acrescentar, a resistência à corrosão, pois o alumínio reage com o oxigênio do ambiente formando uma película de óxido, que apesar de extremamente fina é densa e protege contra a corrosão. Esta película apresenta ainda uma característica regenerativa, ou seja, se rompida ou deteriorada se forma outra no local. O alumínio também segue uma designação padronizada em função dos elementos de liga presentes, tais elementos determinam características específicas para cada classe de liga, a Tabela 3 apresenta tais características e aplicações para os grupos mais utilizados.

Tabela 2: Propriedades de algumas ligas de Alumínio; (Web Site Centerligas, 2010).

Liga	Peso Específico (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de Elasticidade MPa	Módulo de Rigidez MPa	Temperatura de Fusão (°C)	Calor Específico (0-100 °C) (Cal./g °C)	Coefficiente de Expansão Linear (L/°C)	Condutibilidade Térmica (25 °C) (Cal./cm °C)	Condutibilidade Elétrica (IACS)%
1050	2,70	70000	26500	650-660	0,22	24x10-6	0,50	60,0
1350	2,70	70000	26500	650-660	0,22	23x10-6	0,54	61,8
2011	2,82	72500	27500	535-645	0,23	23x10-6	0,37	40,0
2014	2,80	75000	28500	510-640	0,21	23x10-6	0,37	38,0
2017	2,80	73500	28000	510-640	0,22	24x10-6	0,29	34,0
2024	2,77	74500	28500	500-640	0,22	23x10-6	0,29	30,0
3003	2,73	70000	26500	640-655	0,22	23x10-6	0,38	43,0
5052	2,68	72000	27500	595-650	0,23	23x10-6	0,33	34,0
5356	2,63	72500	27500	570-640	0,23	24x10-6	0,27	26,0
6060 6063 e X6463	2,71	70000	26500	600-650	0,21	23x10-6	0,48	52,0
6061	2,71	70000	26500	580-650	0,22	24x10-6	0,37	40,0
6101	2,71	70000	26500	605-655	0,22	23x10-6	0,49	55,0
6261	2,71	70000	26000	570-655	0,22	23x10-6	0,44	47,0
6262	2,71	70000	26700	582-652	0,21	23x10-6	0,37	44,0
6351	2,71	70000	26500	555-650	0,21	24x10-6	0,44	45,5
7075	2,80	73000	27500	475-630	0,23	24x10-6	0,29	30,0

Tabela 3: Grupo / Elementos De Liga / Característica / Aplicações; (Rooy, 1992, Web Site Metal Mundi, 2010 e Web Site Centerligas, 2010).

Grupo	Liga	Elementos de liga	Características	Aplicações Típicas
1XXX	1050	99% de Al (mínimo)	Baixa resistência mecânica, alta resistência à corrosão, boa conformabilidade, fácil de soldar, apropriada para anodização decorativa.	Indústria química, farmacêutica e alimentícia; utensílios domésticos. Refrigeração (trocadores de calor em geral).
	1350	99% de Al (mínimo)	Alta condutividade elétrica, boa conformabilidade.	Liga especial para condutores elétricos.
2XXX	2011	Cobre	Excelente usinabilidade, alta resistência mecânica, média resistência à corrosão.	Peças usinadas em torno automático. Excelente alternativa para o latão de corte livre.
	2014	Cobre	Elevada resistência mecânica e alta ductilidade, média resistência à corrosão. Boa usinabilidade.	Indústria aeronáutica, transporte, máquinas e equipamentos.
	2017	Cobre	Boa usinabilidade, alta resistência mecânica e elevada ductilidade. Média resistência à corrosão, boa conformabilidade.	Peças usinadas. Indústria aeronáutica, transporte, máquinas e equipamentos.
	2024	Cobre	Elevada resistência mecânica e alta ductilidade, média resistência à corrosão, média conformabilidade. Boa usinabilidade.	Peças usinadas e forjadas. Indústria aeronáutica, transporte, máquinas e equipamentos.
3XXX	3003	Manganês	Média resistência mecânica, alta resistência à corrosão, boa conformabilidade, boa soldabilidade.	Tubos para trocadores de calor (radiadores automotivos). Antenas.
4XXX	4043 e 4047	Silício	Ligas de silício utilizadas em varetas de solda.	Soldagem dos grupos de liga 1000, 3000 e 6000.
5XXX	5052	Magnésio	Boa resistência mecânica, alta resistência à corrosão, boa conformabilidade.	Vergalhões para rebites, transporte e equipamentos.
	5356	Magnésio	Resistência mecânica superior ao 5052, alta resistência à corrosão, boa conformabilidade.	Rebites. Solda, especialmente 5052 e 5083 entre si e com ligas dos grupos 1000, 3000 e 6000.
6XXX	6060 e 6063	Magnésio e Silício	Média resistência mecânica, alta resistência à corrosão, boa conformabilidade. Apropriada para anodização decorativa fosca.	Perfis para construção civil, caixilharia em geral, tubos de irrigação, móveis e iluminação.
	6061	Magnésio e Silício	Boa resistência mecânica, boa resistência à corrosão, boa conformabilidade. Média usinabilidade.	Estruturas, construção naval, veículos e rebites. Indústria moveleira.
	6101	Magnésio e Silício	Alta condutividade elétrica, média resistência mecânica, boa resistência à corrosão.	Liga especial para fins elétricos e barramentos (estruturas).

<b>Grupo</b>	<b>Liga</b>	<b>Elementos de liga</b>	<b>Características</b>	<b>Aplicações Típicas</b>
	6261	Magnésio e Silício	Boa resistência mecânica, boa resistência à corrosão, boa conformabilidade. Média usinabilidade.	Carrocerias de veículos, estruturas e equipamentos.
	6262	Magnésio e Silício	Ótima usinabilidade, alta resistência mecânica, alta resistência à corrosão, apropriada para anodização decorativa.	Peças usinadas em torno automático. Excelente alternativa para o latão de corte livre.
	6351	Magnésio e Silício	Boa resistência mecânica, alta resistência à corrosão, boa conformabilidade, média usinabilidade.	Engenharia estrutural, construção de navios, veículos e equipamentos. Peças usinadas em tornos não automáticos. Forjamento a frio.
	X6463	Magnésio e Silício	Média resistência mecânica, boa resistência à corrosão, boa conformabilidade, apropriada para anodização decorativa de alto brilho.	Painéis e frisos para eletrodomésticos, automóveis e armários.
7XXX	7075	Zinco	Os mais altos valores de resistência mecânica, média resistência à corrosão, boa forjabilidade e usinabilidade.	Peças sujeitas aos mais altos esforços mecânicos em indústria aeronáutica, militar, máquinas e equipamentos. Moldes para injeção de plástico.
	7104	Zinco	Alta resistência mecânica, boa resistência à corrosão, boa conformabilidade, apropriada para anodização decorativa.	Estruturas soldadas.

As ligas do sistema Al-Si (série 4XX.X), são muito mais utilizadas como ligas para a fabricação de peças fundidas, como por exemplo, pistões para motores de automóveis e aviões e também algumas aplicações como produtos trabalhados, como metais de adição para soldagem (caso da liga 4043), embora também em algumas aplicações arquitetônicas. Além do ganho de resistência mecânica, o magnésio permite as ligas Al-Mg (série 5XXX) manterem um elevado nível de ductilidade, assim como excelente resistência à corrosão e soldabilidade, pois, constituem um importante grupo de ligas de alumínio não tratáveis termicamente, ou sejam, que não são endurecíveis por tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, mas sim por encruamento durante o trabalho mecânico.

### 2.2.1.1 Diagrama de fases do Alumínio

Conforme Hatch (1990), o silício é usado em teores entre 12 a 13 % e aumenta a fluidez do alumínio líquido permitindo que o mesmo flua melhor e também propicia a redução da contração durante o resfriamento e a porosidade nas peças fundidas, reduzindo o coeficiente de expansão térmica e melhorando a soldabilidade. O silício em teores maiores que 13%, este dificulta a usinagem destas ligas. A Figura 9 apresenta o diagrama de fase da liga de alumínio com silício, obtida do site da infomet

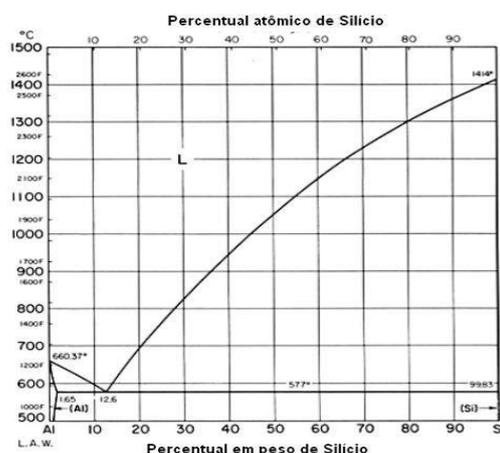


Figura 9: Diagrama de fase da liga alumínio - silício. (Hatch, 1990)

No sistema Al-Si, a fluidez máxima é encontrada na composição hipereutética. A Figura 9 apresenta o diagrama de fase, onde a máxima fluidez ocorre para composição contendo 18% de silício (comparado ao eutético com 12% de silício). A mínima fluidez ocorre aproximadamente com 5 ou 6% de silício.

A temperatura eutética das ligas Al-Mg é 450 °C e o teor de magnésio que corresponde ao ponto eutético é de 35 % como exibe a Figura 10. A fase em equilíbrio com o alumínio é a  $Al_3Mg_2$  (37,3 % de magnésio), embora esta composição esteja um pouco fora da faixa que corresponde a essa estequiometria (34,8 a 37,1 %). A fase  $Al_8Mg_5$  (36% de magnésio) é a composição da fase sólida sendo encontrada muito facilmente nas ligas Al-Mg. A solidificação em equilíbrio termodinâmico somente pode ser alcançada com taxas de resfriamento inferiores a 0,000005 °C/h. A condições de não equilíbrio na solidificação leva à segregação, com a fase  $Al_8Mg_5$  aparecendo em teores de magnésio com 4 ou 5 Abaixo de 330 °C, %. esta fase é frágil, porém em temperaturas mais altas apresenta alguma plasticidade (Hatch, 1990). A Figura 10 exibe o diagrama de fase da liga alumínio – magnésio, obtida do site da infomet.

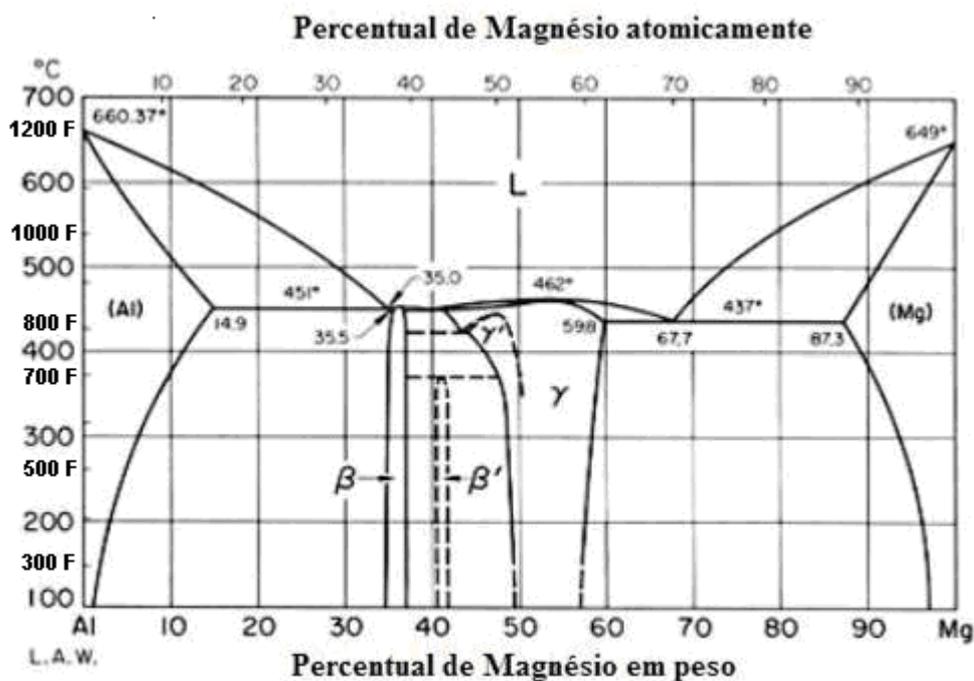


Figura 10: Diagrama de fase da liga alumínio - magnésio. (Web Site Infomet, 2010)

Segundo Martin (1968) menciona que a solubilidade do magnésio no alumínio é elevada, na maioria das vezes o alumínio permanece em solução sólida no magnésio, embora à medida que o teor de magnésio aumenta o mesmo passa a aparecer no eutético contendo  $Al_3Mg_2$ . Quando o teor de silício nas ligas Al-Mg é relativamente alto (cerca de 0,5 %, por exemplo), forma-se a fase  $Mg_2Si$ , a mesma fase responsável pelo endurecimento por precipitação nas ligas Al-Mg-Si.

Conforme Van Horn (1967), as ligas Al-Mg que possuem teor de magnésio acima 3,5 % apresentam a fase  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  que pode precipitar nos contornos de grão ou dentro dos grãos, o que geralmente ocorre mediante aquecimento a temperaturas relativamente baixas. O trabalho a frio de ligas Al-Mg produz acentuadas bandas de deformação, decoradas por precipitados ricos em magnésio.

Barbosa *et al* mencionam que o magnésio e o silício combinam-se para formar o composto intermetálico  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , que antes de atingir o equilíbrio no superenvelhecimento, é o responsável pelo endurecimento ligas da série 6XXX. A solubilidade da fase  $\text{Mg}_2\text{Si}$  (beta) na matriz rica em alumínio (alfa) aumenta com a elevação da temperatura. O tratamento de envelhecimento artificial controlado e solubilização permitem a precipitação da segunda fase (beta) partindo de uma solução sólida supersaturada. Este fator favorece a formação de precipitados finos juntamente com a distribuição uniforme dos mesmos, que acarretam um aumento na dureza do material. A Figura 11 apresenta o diagrama ternário da liga Alumínio-magnésio-silício.

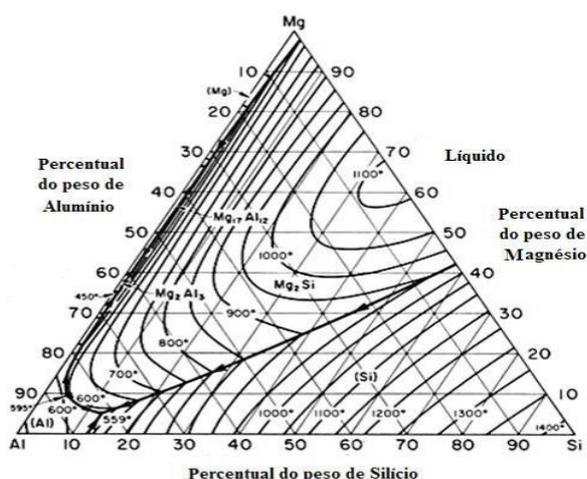


Figura 11: Diagrama de fase ternário da liga alumínio – silício - magnésio. (Web Site Infomet,2010)

Conforme Cordier (1965) menciona que o crescimento das partículas de segunda fase está relacionado com o aumento da dureza com o tempo e a temperatura de envelhecimento com dimensões características de zonas de Guinier-Preston. Segundo Lutts (1961) e Shercliff & ashby (1990). Os longos tempos de envelhecimento e/ou as altas temperaturas que ocorre para tratamentos térmicos proporcionam a queda de dureza e está relacionada com o crescimento excessivo dos precipitados, favorecendo o movimento das discordâncias quando de uma solicitação mecânica, o que possibilita o amolecimento da liga, e que

caracteriza o superenvelhecimento. Conforme os estudos de Ozawa & Kimura (1970) e Kovács *et al* (1974), as temperaturas de envelhecimento de 200°C, fazem a precipitação nas ligas da série 6xxx ter uma cinética relativamente rápida. A solubilidade do silício no alumínio é menor do que a do magnésio, que causa um processo de precipitados através da formação de aglomerados de átomos de silício. A matriz possui estes aglomerados distribuídos homogeneamente. O aumento da difusividade dos átomos de silício ocorre através das lacunas retidas, que com o resfriamento rápido acelera o processo.

### 2.2.2 Forjamento de Alumínio

Para Batalha (2003) peças forjadas em alumínio oferecem vantagens semelhantes se considerarmos a resistência e a economia de peso da peça. Também, possui uma boa resistência a corrosão possibilitando o tratamento superficial de oxidação eletrolítica, gerando uma camada superficial a qual permite o recobrimento da superfície, possibilitando coloração e melhoria das propriedades tribológicas (anodização).

“As ligas de alumínio podem ser forjadas com as mesmas geometrias que as peças em aço baixo carbono, com temperaturas abaixo de 500°C dependendo da liga considerada. Porém, determinadas geometrias, podem obter uma grande variação na força necessária para o forjamento. Relaciona-se esta força principalmente com a composição química da liga e também com a temperatura de forjamento. A liga de alumínio AA1100 serve como exemplo que necessita bem menos pressão de forjamento do que o aço 1020. Já para as ligas como AA7075, de alta resistência mecânica, é necessário maiores pressões de forjamento para conformar a mesma geometria. (Web Site UFRGS, 2010) “

Conforme Kuhlman (1993), as ligas de alumínio apresentam forjabilidade superior quando comparadas com ligas de níquel, ligas a base de cobalto e de ligas de titânio, particularmente na tecnologia empregada no processo convencional de forjamento, onde as matrizes são aquecidas a 540°C ou menos. A forjabilidade relativa é baseada na deformação por unidade de energia absorvida na faixa de temperatura de forjamento de cada liga. Kuhlman considera que esta unidade arbitrária dificulta a obtenção de graus elevados de

deformação sem fraturar o material. A Figura 13 apresenta um comparativo da “Forjabilidade Relativa” entre algumas das ligas de alumínio mais conhecidas em função das respectivas temperaturas de forjamento.

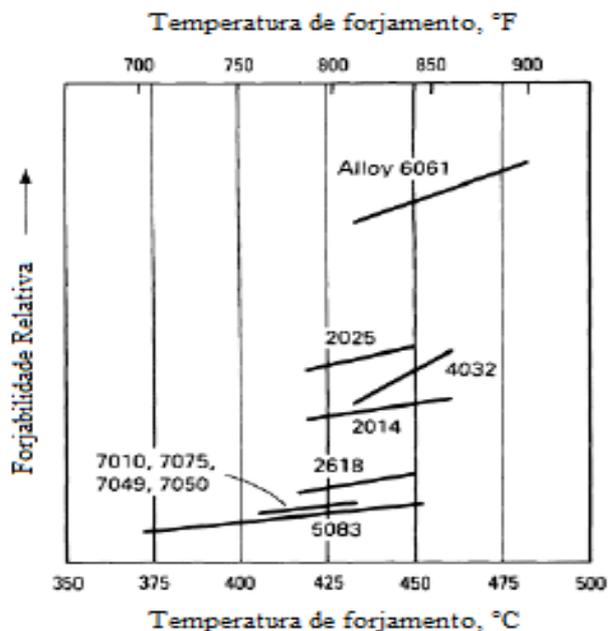


Figura 12: Forjabilidade Relativa em função da Temperatura, (ASM Metals Handbook – Forming and Forging, V. 14,1993)

De acordo com Schaeffer (2001), o forjamento de ligas de alumínio se deu primeiramente em produção de peças para a indústria aeronáutica principalmente pelas qualidades mecânicas oferecidas aliadas ao baixo peso. Para a ABAL (Associação Brasileira do Alumínio) a indústria automobilística, bélica e de máquinas e equipamentos estão também entre as maiores consumidoras de peças forjadas em alumínio. Uma das grandes vantagens do forjamento destas ligas é a baixa temperatura de forjamento à quente, a qual fica entre 400 e 500°C para a maioria das ligas, podendo assim, obter uma redução de energia se comparado com o forjamento de aço. Um fator que deve ser tratado com atenção diz respeito à formação de fase líquida durante a conformação devido ao aquecimento gerado pela deformação do material. Se isto ocorrer durante o resfriamento uma estrutura bruta de fusão pode ser formada gerando falhas estruturais na peça (Lima e Schaeffer, 2007)

Neste trabalho foi utilizado uma liga AlSi1Mg0,5Mn, também conhecida como AA6351. Esta liga se caracteriza por ser tratável termicamente por conter silício e magnésio que formam silicato de magnésio durante o tratamento térmico. Para Horn (1992) as principais características desta liga são boa conformabilidade, soldabilidade, usinabilidade,

resistência à corrosão, com média resistência mecânica. As aplicações desta liga geralmente são em peças que necessitem resistência à corrosão e em peças estruturais de caminhões e automóveis devido ao seu reduzido peso.

### 2.2.3 Tratamento térmico do Alumínio

Segundo Hatch (1990), os tratamentos térmicos das ligas de alumínio, deve-se inicialmente diferenciar as ligas termicamente tratáveis (séries 2XXX, 6XXX, 7XXX e a maioria da série 8XXX), as que podem endurecer por meio de tratamento térmico de solubilização e envelhecimento.

Adotada pela *Aluminum Association*, a classificação dos tratamentos térmicos de ligas de alumínio é representados por letras conforme exibido abaixo:

**F = Fabricado** - aplica-se aos produtos resultantes de conformação mecânica.

**O = recozido** - aplica-se aos produtos inicialmente trabalhados por conformação mecânica e depois recozidos para obter a resistência mecânica desejada, e também aos produtos fundidos que são recozidos com o objetivo de aumentar a ductilidade e a estabilidade dimensional após usinagem das peças.

**W = solubilizado** - uma têmpera instável aplicável somente às ligas que envelhecem espontaneamente na temperatura ambiente (envelhecimento natural) após solubilização.

**T = termicamente tratado** - aplica-se aos produtos que são termicamente tratados, com ou sem deformação suplementar, para produzir têmperas estáveis. Um período de envelhecimento natural pode ocorrer entre as operações relacionadas para as têmperas. Sempre que for necessário do ponto de vista metalúrgico, deve haver um controle rigoroso desse período. Números de 1 a 10 indicam seqüências de tratamentos específicos: T6 = solubilizado e envelhecido artificialmente. Aplica-se a produtos que não são trabalhados a frio após solubilização, ou o efeito da conformação a frio no desempenho ou a planificação pode não é evidenciado nos limites de propriedades mecânicas.

Conforme Hatch (1990), o objetivo do tratamento de solubilização é realizado por um solução sólida, sendo a maior quantidade possível de átomos de soluto, como cobre, magnésio, silício ou zinco, na matriz rica em alumínio. Para algumas ligas a temperatura eutética é quando a temperatura na qual a máxima quantidade de soluto pode estar dissolvida. Sendo assim, as temperaturas de solubilização devem ser limitadas a um nível seguro sem que o superaquecimento ou a fusão parcial aconteçam. O resfriamento rápido que se segue à têmpera é uma etapa crítica do tratamento, porque é fundamental para obter a

microestrutura desejada e permite manter à temperatura ambiente a mesma concentração de lacunas existente em alta temperatura, e estas são muito importantes para acelerar o processo de difusão dos átomos de soluto que ocorre no tratamento posterior de envelhecimento (endurecimento por precipitação). O meio de resfriamento rápido mais usado é a água, embora, caso seja necessária uma taxa de resfriamento mais baixa, possam ser usados diversos líquidos orgânicos como meios de resfriamento rápido. O resfriamento ao ar é muito lento para a maioria das ligas de alumínio, permitindo o prosseguimento do processo de precipitação, embora não seja tão lento como o resfriamento ao forno. A Figura 13 apresenta a curva de solubilização.

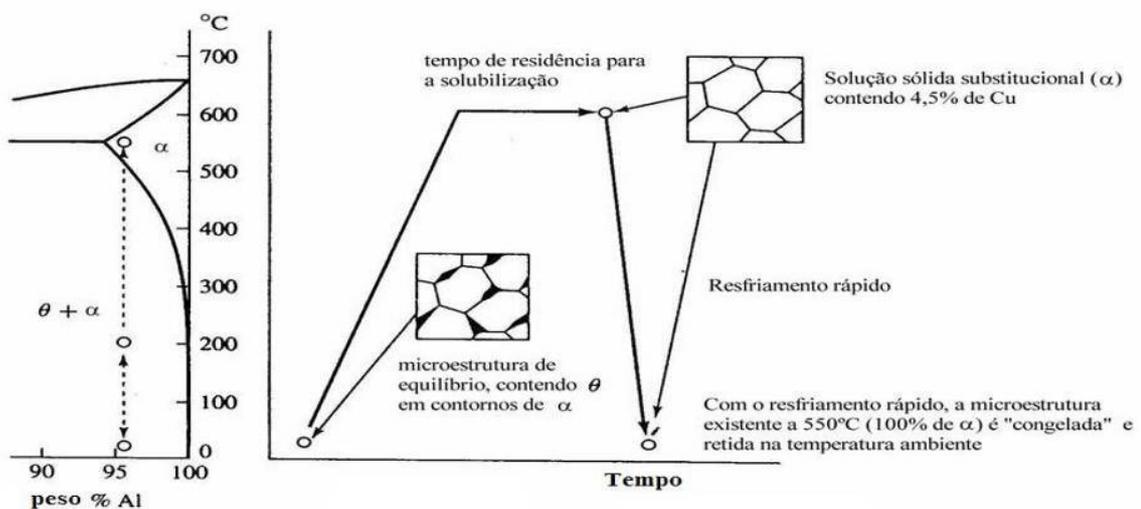


Figura 13: Solubilização do alumínio, (Web Site Dalmolim, 2010)

Endurecimento por precipitação também chamado por envelhecimento artificial, é acelerado mediante aquecimento em temperaturas na faixa de 95 a 205°C, suficiente para a obtenção de energia térmica necessária para a difusão dos átomos de soluto, pois permite a formação dos precipitados duros. Embora, o máximo de dureza atingido por uma liga através de tratamento térmico (T6) também corresponde a uma considerável queda de ductilidade e tenacidade. A Figura 14 apresenta a curva de solubilização juntamente com o envelhecimento artificial.

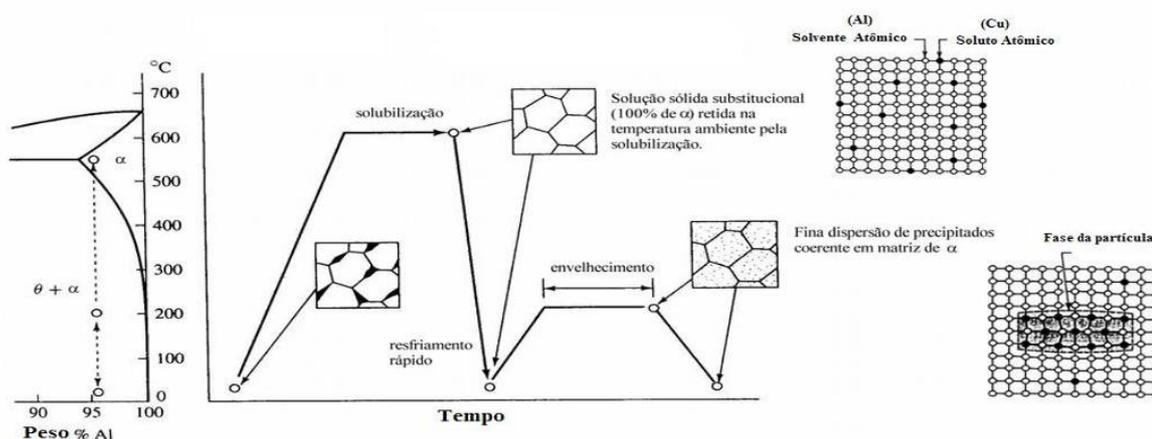


Figura 14: Envelhecimento do alumínio, (Web Site Dalmolin, 2010)

Por outro lado, o superenvelhecimento, resultante do envelhecimento por longos períodos ou envelhecimento em altas temperaturas, que provoca a queda de dureza, porém simultaneamente aumento de ductilidade e tenacidade em comparação com a condição T6 (máximo de dureza). As séries 2XXX, 6XXX, 7XXX e 8XXX tem a sua faixa de temperaturas de envelhecimento artificial (em forno) assim como sua faixa de temperaturas de solubilização (Hatch,1990). A Figura 15 apresenta o ciclo do superenvelhecimento

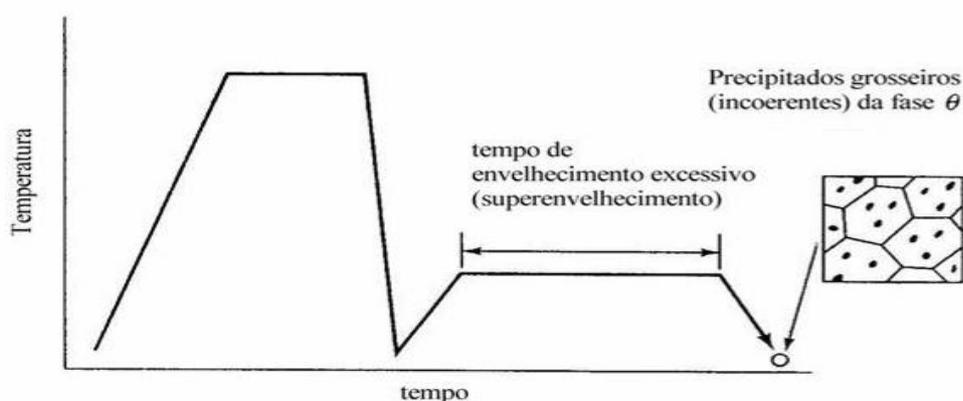


Figura 15: Superenvelhecimento do alumínio, (Web Site Dalmolin, 2010)

Utiliza-se o termo envelhecimento natural para designar os processos de precipitação que ocorrem com o tratamento térmico da liga de alumínio à temperatura ambiente, evidentemente muito mais lento e com níveis de dureza resultante bem mais baixo do que os que ocorrem no envelhecimento artificial. A Tabela 4 apresenta as temperaturas de solubilização e envelhecimento da série 6XXX.

Tabela 4 - Temperaturas de solubilização e envelhecimento. (Web Site Infomet, 2010)

Liga	T solubilização (°C)	T envelhecimento (°C)
6005	530	175
6009	555	205
6010	565	205
6053	520	170
6061	530	175
6063	520	175
6013	570	190
6066	530	175
6070	545	160
6111	560	175
6151	515	170
6262	540	175
6463	520	175
6951	530	160

## 2.3 Ligas de Titânio

Entre as ligas metálicas o titânio é conhecido por sua excelente resistência a corrosão, quase tão alta quanto a da Platina, também pela sua leveza e alta resistência mecânica. Por se tratar de um material com alto ponto de fusão é bastante utilizado como refratário, tão resistente quanto o aço só que com 40% de sua densidade o que o torna 45% mais leve (aproximadamente).

### 2.3.1 Características do Titânio

De acordo com Maia (2001) o titânio (Ti) é o nono elemento mais abundante da terra. Apresenta uma forte afinidade por oxigênio, isso faz com que a maior parte deste elemento seja encontrado na litosfera na forma de óxido. É um metal de brilho prateado, mais leve do que o ferro, quase tão forte quanto o aço, e quase tão resistente à corrosão como a platina. Peters *et. al.* (2003), descrevem que o titânio entre os metais é o quarto mais abundante na crosta terrestre, ficando atrás somente do alumínio, ferro e magnésio, apesar deste dado é raramente encontrado em concentrações elevadas e nunca em estado puro.

Para Knoll e Schaeffer (2006) as ligas de titânio são classificadas de acordo com as fases presentes em sua microestrutura em temperatura ambiente. Segundo Lütjering e Williams (2007) o titânio puro exibe uma fase de transformação alotrópica a 882°C, passando de uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (fase  $\beta$ ) em temperaturas mais elevadas para uma estrutura cristalina hexagonal compacta (fase  $\alpha$ ) com temperaturas mais baixas. A

temperatura de transformação é fortemente influenciada pelos interstícios e elementos substitucionais, portanto, depende da pureza do metal. A unidade de célula hexagonal da fase  $\alpha$  é mostrada na figura 16 (a). A célula da unidade cúbica de corpo centrado  $\beta$  (CCC) é ilustrado na figura 16 (b).

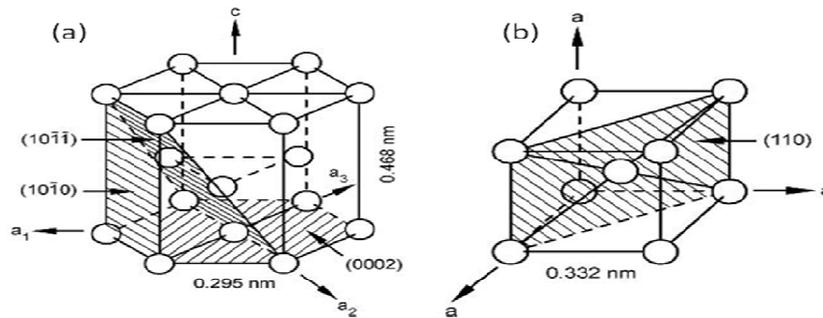


Figura 16: (a) Estrutura hexagonal; (b) estrutura cúbica de corpo centrado

Peters et. al. (2003) descrevem também que o titânio pode combinar com vários materiais como, por exemplo, o Al, V, Cr, Fe, Mn, Ca, Co, Zr, Sn, Ce, e HF, com tais elementos o titânio pode formar estruturas cristalinas diferentes. No entanto, cada modificação é apenas estável nas faixas de temperatura específica. Podemos verificar na Figura 14 a influência de elementos de liga em diagramas de fase das ligas Ti (esquemáticamente).

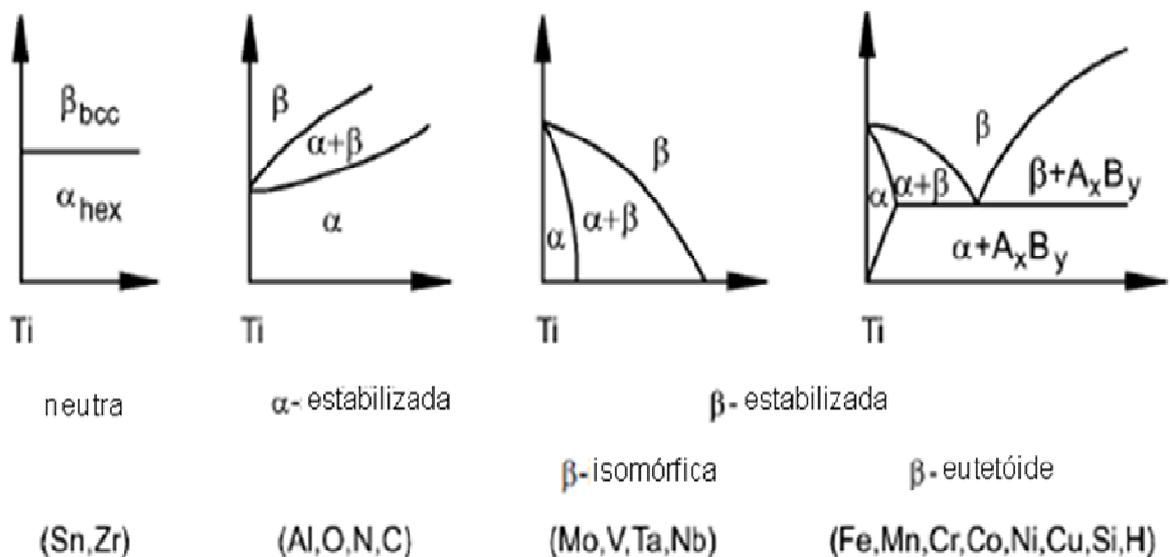


Figura 17: Influência de elementos de liga em diagramas de fase das ligas Ti (Lütjering e Williams, 2007)

As propriedades mecânicas desejadas nas ligas de Titânio dependem da relação quantitativa e qualitativa das fases presentes. Essa relação por sua vez dependerá da temperatura de tratamento térmico, da temperatura de laminação ou forjamento e da composição química da liga. (Web Site Spectru, 2010). A Tabela 5 apresenta as composições químicas de algumas ligas de titânio, nela podemos verificar também o tipo de fase e propriedades mecânicas.

Tabela 5: Características e propriedades mecânicas de algumas ligas de titânio, (ASM Committee, 1993)

Designação comum da liga	Composição nominal, %	Tipo de liga	Mínima resistência a tração		Mínimo 0,2% de elasticidade		Alongamento, %
			MPa	Ksi	MPa	Ksi	
ASTM 1	Titânio não ligado	$\alpha$	240	35	170	25	24
ASTM 2	Titânio não ligado	$\alpha$	345	50	280	40	20
ASTM 3	Titânio não ligado	$\alpha$	450	65	380	55	18
ASTM 4	Titânio não ligado	$\alpha$	550	80	480	70	15
Ti-Pd (ASTM classe 7, 11)	Ti-0.15Pd	$\alpha$	345 / 240	50 / 35	275 / 170	40 / 25	20 / 24
ASTM 12	Ti-0.3Mo-0.8Ni	Próximo $\alpha$	480	70	380	55	18
Ti-3-2.5 (ASTM classe 9)	Ti-3Al-2.5V	Próximo $\alpha$	620	90	520	75	22
Ti-64 (ASTM classe 5)	Ti-6Al-4V	$\alpha$ <sup><math>\beta</math></sup>	900	130	830	120	17
Ti-5Ta	Ti-5Ta	Próximo $\alpha$	-	-	-	-	-
Ti-5-2.5	Ti-5Al-2.5Sn	$\alpha$	790	115	760	110	22
Ti-8-1-1	Ti-8Al-1V-1Mo	Próximo $\alpha$	900	130	830	120	12
Ti-6-2-4-2	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	Próximo $\alpha$	900	130	830	120	15
Ti-550	Ti-4Al-2Sn-4Mo-0.5Si	$\alpha$ <sup><math>\beta</math></sup>	-	-	-	-	-
Ti-6-6-2	Ti-6Al-6V-2Sn-0.6Fe-0.6Cu	$\alpha$ <sup><math>\beta</math></sup>	1030	150	970	140	14
Corona 5	Ti4.5Al-1.5Cr-5Mo	$\alpha$ <sup><math>\beta</math></sup>	965	140	900	130	12 / 15
Ti-6-2-4-6	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	$\alpha$ <sup><math>\beta</math></sup>	1170	170	1100	160	11
Ti-10-2-3	Ti-10V-2Fe-3Al	Próximo $\alpha$	1170	170	1100	160	9
Ti-15-3-3-3	Ti-15V-3Sn-3Cr-3Al	$\beta$	790	115	770	112	20 - 25
Ti-3-8-6-4-4	Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo	$\beta$	900	130	830	120	10 - 15
Ti-13-11-3	Ti-13V-11Cr-3Al	$\beta$	1170	170	1100	160	18

A Tabela 6 apresenta valores de propriedades mecânicas em produtos forjados de algumas ligas de titânio.

Tabela 6: Propriedades mecânicas de ligas de titânio Forjado, (Web Site Infomet, 2010)

Liga/Seção(mm)	Resistência à tração (MPa)	Resistência ao Escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Redução em Área %
Ti-6Al-4V				
25 – 50	1015	965	14	36
102	1000	930	12	25
205	965	895	11	23
330	930	860	10	20
Ti-6Al-V ELI				
25 – 50	950	885	14	36
102	885	827	12	28
205	885	820	10	27
330	870	795	10	22
Ti-6Al-6V-2Sn				
25 – 50	1105	1038	15	40
102	1070	965	13	38
205	1000	930	12	23
Ti-8Al-1Mo-1V				
25 – 50	985	905	15	36
102	910	840	17	38
205	1000	895	12	23
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo+Si				
25 – 50	1000	930	14	33
102	1000	930	12	30
205	1038	940	12	28
330	1000	825	11	21

As ligas de titânio podem atingir a tensão limite de resistência à tração superior a 1370 MPa com ductilidade satisfatória (alongamento de até 15 %). As ligas fundidas em forno de indução e depois trabalhadas mecanicamente possuem ductilidade satisfatória (alongamento de 10 a 20 %). O módulo de cisalhamento do titânio e de suas ligas, atinge valores intermediários entre os do alumínio e do aço, variando entre 34 e 48 GPa. A dureza Vickers do titânio comercialmente puro varia entre 90 e 160 HV, enquanto a dureza de ligas de titânio termicamente tratadas variam entre 250 e 500 HV. Uma liga de titânio comercial típica, com tensão limite de resistência ao escoamento de 895 MPa atinge dureza da ordem de 320 HV ou 34 HRC (dureza Rockwell C). (Donachie Jr., 1988)

### 2.3.1.1 Diagrama de fases do Titânio

Em geral, as ligas alfa de titânio apresentam elevados teores de alumínio, que contribuem para aumentar a resistência à oxidação em altas temperaturas. Os elevados teores

de alumínio nas ligas bifásicas alfa-beta têm como sua principal função estabilizar a fase alfa. As ligas alfa monofásicas não podem ser tratadas termicamente com o objetivo de aumentar a resistência mecânica ou dureza. As ligas bifásicas (alfa-beta) em temperaturas mais altas podem ser tratadas termicamente e processadas com a adição de determinados teores de certos elementos, também certa quantidade de fase beta residual temporariamente em temperaturas mais baixas permite o refino dos grãos, e, favorece um controle otimizado de microestrutura durante a transformação subsequente. Quando as ligas bifásicas são adequadamente tratadas, apresentam uma excelente combinação de resistência mecânica e ductilidade, sendo mais resistentes do que as ligas monofásicas alfa e beta. A característica mais interessante destas ligas beta é a sua maior conformabilidade em comparação com as ligas monofásicas alfa e as ligas bifásicas (alfa+beta) (Donachie Jr., 1988).

Segundo Lütjering e Williams (2007) o alumínio é o mais importante estabilizador da fase alfa ( $\alpha$ ) e está presentes em muitas ligas de titânio. O diagrama de fase binário Ti-Al (Fig. 18) mostra que com o aumento do teor de alumínio ( $Ti_3Al$ ), a fase alfa será formada e que a região de duas fases ( $\alpha + Ti_3Al$ ) começa em cerca de 5% de Alumínio com temperatura em torno de 500°C. Para evitar uma quantidade consideravelmente grande de  $Ti_3Al$  precipitado na fase  $\alpha$ , o teor de alumínio em ligas de titânio é mais limitado em torno de 6%. A Figura 18 mostra que o nível de 6% alumínio da temperatura de transformação  $\alpha / \beta$  de 882°C para o titânio puro é aumentada em torno de 1000°C para a região de fase ( $\alpha + \beta$  dois). Além das ligas de titânio convencionais, o diagrama de fases Ti-Al é também a base para o chamado titânio Aluminetos, que foram recentemente desenvolvidos com base nos dois intermetálicos  $Ti_3Al$  compostos (Alfa-2 + ligas e a variante ortorrômbica,  $Ti_2AlNb$  + ligas). A Figura 18 apresenta o diagrama de fase das ligas Titânio-alumínio.

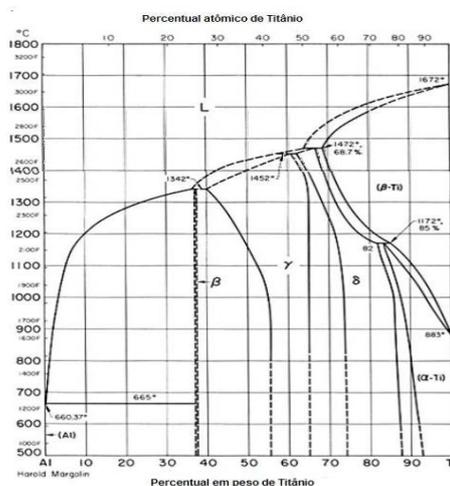


Figura 18: Diagramas de fase das ligas Ti – Al. (Web Site Infomet, 2010)

Conforme Lütjering e Williams (2007), o diagrama de fase V-Ti informam que ao adicionar 15% de V, que é também sobre o teor máximo de vanádio em ligas de titânio convencional, a fase  $\beta$  para a fase  $\alpha$  + temperatura de transformação  $\beta$  é reduzida para cerca de 700°C. O valor máximo solubilidade sólida de Vanádio na fase  $\alpha$  é 680°C com cerca de 3%. A Figura 19 apresenta o diagrama de fase das ligas Titânio-Vanádio.

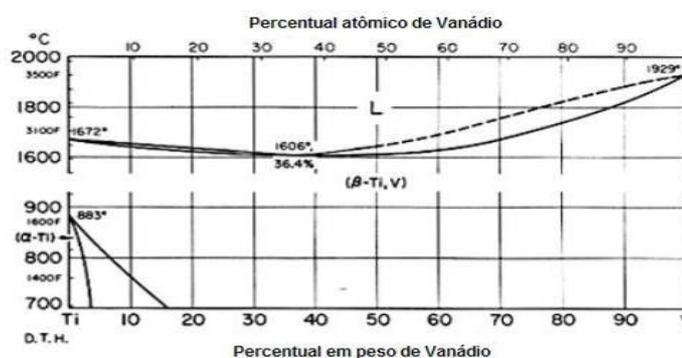


Figura 19: Diagramas de fase das ligas Ti – V. (Obtido do site da Infomet, 2010)

### 2.3.2 Forjamento de Titânio

Para Hentz, Schaeffer e Knoll (2007) o titânio e suas ligas vêm sendo utilizados em larga escala devido à combinação de sua alta resistência mecânica com baixa densidade e, ainda, excelente resistência à corrosão, sendo empregado, principalmente, nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, petrolífero, materiais biomédicos e em competições automotivas como a Fórmula-1.

Para Terlinde, Witulski e Fischer (1993) o forjamento é o processo mais utilizado para a fabricação de peças em titânio, superando em muito a fundição e metalurgia do pó, pois apresenta propriedades mecânicas e microestrutura facilmente controladas por meio de temperatura de processo e força de prensagem. Estes autores ainda ressaltam que para a obtenção de peças com precisão é necessário o forjamento isotérmico o que eleva o custo de produção. A princípio todos os equipamentos de forja podem ser utilizados para o processo com titânio, entretanto, prensas mecânicas rápidas (excêntricas) e martelos são menos adequados devido à alta taxa de deformação, o que eleva o risco de romper o material. Portanto, prensas hidráulicas são muitas vezes utilizadas, devido à facilidade de se controlar a taxa de deformação para peças de difícil conformação ou com geometrias complexas.

De acordo com Peters et. al. (2003) apesar do custo elevado, os principais componentes do trem de pouso de aeronaves são cada vez mais substituídos por peças

forjadas em titânio, segundo eles o custo se paga em longo prazo, pois as peças convencionais em aço sofrem com estresse e corrosão e são substituídas pelo menos uma vez durante a vida útil da aeronave, fato que não ocorre com peças forjadas em titânio.

O Boeing 777 fixou tendência na utilização do titânio, pois o trem de pouso principal como mostra a Figura 20, é quase totalmente fabricado a partir de componentes forjados em titânio, isso reduziu o peso da aeronave em 270 kg aproximadamente.

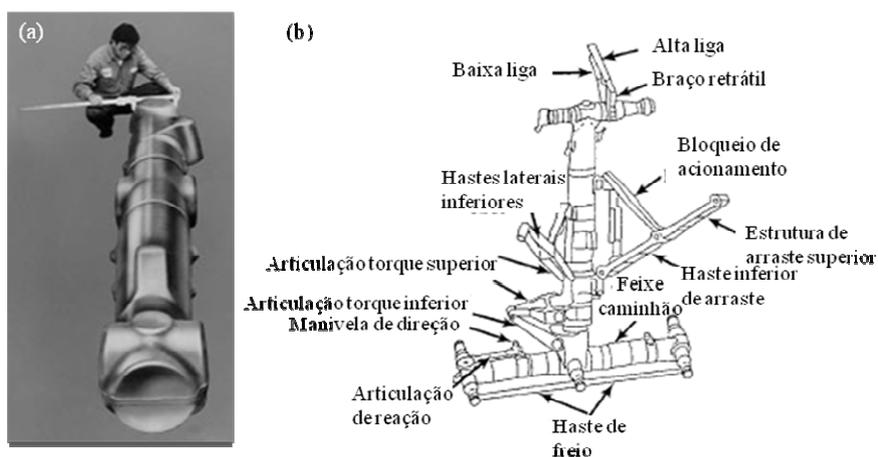


Figura 20: (a) Trem de pouso principal do Boeing 777; (b) Desenho esquemático do trem de pouso principal do Boeing 777, (Peters, 2003)

Conforme a Rickard (2010) o Boeing 787 apresentado na Figura 21 é o avião comercial que contém a maior quantidade de titânio forjado em sua fabricação.



Figura 21: Peças forjadas em Titânio e desenho esquemático da sua localização no aparelho Boeing 787 (Web Site Rickard Metals, 2010)

Na área aeroespacial um exemplo de utilização seria no sistema de evacuação da tripulação de foguetes da NASA Orion Ares com exibe a Figura 22.



Figura 22: Peça e desenho esquemático da localização do sistema de evacuação da tripulação (Web Site Rickard Metals, 2010)

Conforme Melo (2007) a temperatura beta transus é o segredo para se alcançar um forjamento bem sucedido das ligas de titânio juntamente com o tamanho da seção da peça e o número de operações de trabalho mecânico que podem ser significativo. Uma condição básica e fundamental para um processamento bem sucedido das ligas de titânio é o controle da microestrutura. O processamento das ligas beta, apesar de seus efeitos adversos em algumas propriedades mecânicas, pode reduzir os custos do processo. O forjamento isotérmico oferece um modo de reduzir as pressões de forjamento e/ou melhorar o preenchimento da cavidade da matriz também tem sido crescentemente utilizado na produção de componentes de ligas de titânio de fase beta que apresentam maior resistência à fluência.

Segundo Espinoza (2004), o forjamento isotérmico é um processo no qual o material é mantido a uma temperatura essencialmente constante não sofrendo variações térmicas de aquecimento e resfriamento, também os mesmos tipos de prensas utilizadas no forjamento convencional podem ser usados, embora existam prensas projetadas especificamente para esse tipo especial de forjamento. Entretanto, existem enormes diferenças entre as matrizes usadas em cada tipo de processo, pois o tipo de material utilizado na fabricação de matrizes para forjamento isotérmico é um dos aspectos mais relevantes nesse tipo de processo. Com o

surgimento de ligas quase beta mais facilmente forjáveis como, por exemplo, Ti-10V-2Fe-3Al, acredita-se que o forjamento isotérmico pode se tornar um processo mais comum para a fabricação de produtos com forma próxima da final (“*near net shape*”).

O conceito de “*near net shape*” é a principal razão para a utilização do processo de forjamento isotérmico, que visa reduzir custos de usinagem. Sendo este tecnicamente viável para as ligas beta, porém, este processo exige altos custos do ferramental, somando as falhas catastróficas nas mesmas, juntamente com outros problemas associados com ao forjamento em elevadas temperaturas. As microestruturas podem ser controladas com muita precisão fazendo com que a uniformidade de propriedades seja maior através do forjamento isotérmico, que pode ser utilizado no campo beta e alfa-beta das ligas de titânio em comparação dos materiais similares forjadas convencionalmente (Schaeffer, 2005).

### 2.3.2.1 Temperatura do processo de forjamento

Segundo Hu e Dean (2001) a escolha adequada da temperatura da matriz é um dos fatores críticos no processo para forjamento isotérmico a quente. O efeito da temperatura sobre a pressão da matriz pode ser verificado na Figura 18 para Ti-6Al-4V. A redução da temperatura da matriz de 955 para 730°C pode resultar na duplicação da pressão de forjamento e com isso afetar a capacidade disponível da prensa. Também terá um impacto sobre a seleção de materiais da matriz. Além disso, para algumas ligas metálicas, a microestrutura de superfície é afetada pela temperatura forjamento. A Figura 23 apresenta o efeito da temperatura da matriz com pressão em diferentes taxas de deformação para Ti-6Al-4V.

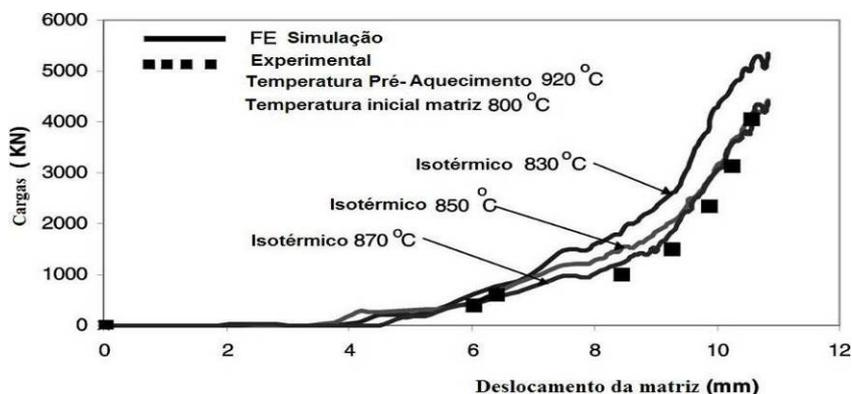


Figura 23: Efeito da temperatura da matriz com pressão em diferentes taxas de deformação para Ti-6Al-4V. ( Hu e Dean, 2001)

A Tabela 7 apresenta valores de temperatura recomendados para o forjamento de alguns tipos de titânio comercialmente puro (CP) e de ligas de titânio.

Tabela 7: Valores de temperatura recomendados para o forjamento, (Web Site Infomet, 2010)

Liga	Temperatura beta transus (°C)	Temperatura de Desbaste (°C)	Temperatura de Processamento Intermediário (°C)	Temperatura de Acabamento (°C)
Ti CP Graus 1 a 4	900 - 955	955 - 980	900 - 925	815 - 900
Ti-5Al-2,5Sn	1030	1120 - 1175	1065 - 1095	1010 - 1040
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0,08Si	995	1095 - 1150	1010 - 1065	55 - 980
Ti-8Al-1Mo-1V	1040	1120 - 1175	1065 - 1095	010 - 1040
Ti-8Mn	800	925 - 980	845 - 900	15 - 845
Ti-6Al-4V	995	1095 - 1150	980 - 1040	925 - 980
Ti-6Al-6V-2Sn	945	1040 - 1095	955 - 1010	870 - 940
Ti-7Al-4Mo	1005	1120 - 1175	1010 - 1065	955 - 98
Ti-13V-11Cr-3Al	720	1120 - 1175	1010 - 1065	925 - 98

### 2.3.3 Tratamento térmico do Titânio

Segundo Gilbert, (1985), as ligas de titânio são termicamente tratadas com os seguintes propósitos: a) Reduzir as tensões residuais desenvolvidas durante a fabricação; b) Resultar numa adequada combinação de ductilidade, usinabilidade, estabilidade dimensional e estrutural, tratamento denominado recozimento; c) Aumentar a resistência mecânica por solubilização e envelhecimento (endurecimento por precipitação); d) Otimizar certas propriedades especiais como tenacidade á fratura, resistência á fadiga e à fluência, neste caso em elevadas temperaturas. Para Ivanira (2002) o tratamento térmico do titânio e de suas ligas depende da composição química do material bem como da presença das diferentes constituintes ou fases na microestrutura (fases alfa, beta ou alfa-beta). Cada tipo de tratamento térmicos das ligas de titânio é utilizado em diferentes tipos de aplicações:

- Elevada resistência mecânica em peças pesadas (Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr, Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo);
- Resistência à fluência (Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo);

- Resistência à corrosão sob tensão em soluções salinas aquosas;
- Alta tenacidade à fratura (Ti-6Al-2Nb-1Ta-1Mo e Ti-6Al-4V-ELI);
- Soldabilidade (Ti-5Al-2,5Sn);
- Alta resistência mecânica em temperaturas de moderadas para baixas (Ti-6Al-6V-2Sn, Ti-6Al-4V e Ti-10V-2Fe-3Al).

Qualquer tratamento térmico nas ligas de titânio em temperaturas igual ou acima de 427°C deve ser realizado em uma atmosfera protetora para evitar a absorção de oxigênio ou nitrogênio e a formação de camadas de óxidos indesejáveis. O termo “recozimento” é muito genérico, sendo muitas vezes usado no caso de alívio de tensões, no caso de solubilização, assim como no caso de recozimento para recristalização, geralmente após operações de conformação mecânica (Azevedo, 2003 p. 445-447). A Figura 24 apresenta o efeito da taxa de resfriamento da fase com microestrutura lamela da liga Ti-6242, LM.

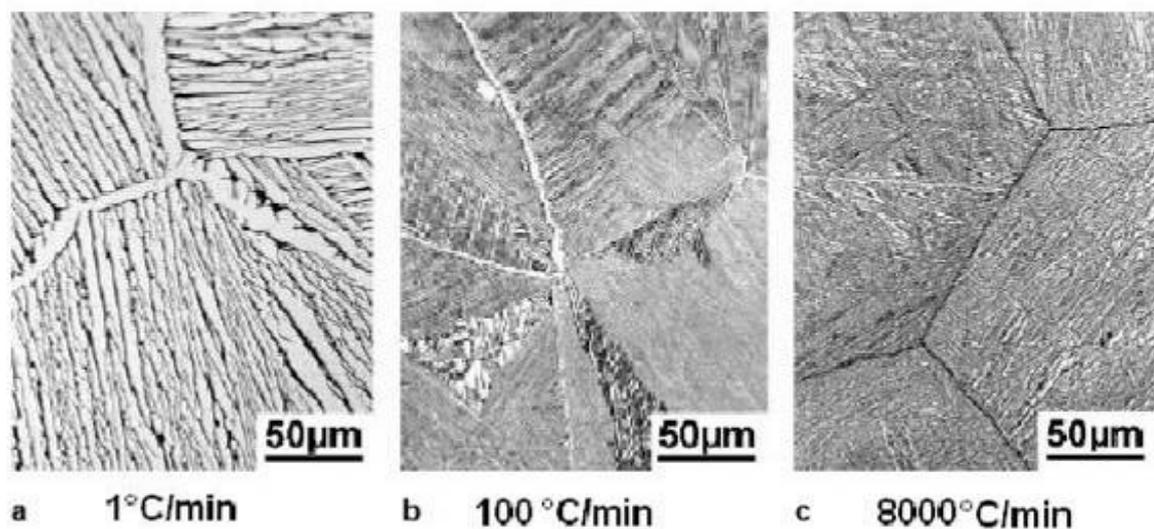


Figura 24: Microestrutura com diferentes taxas de resfriamento para Ti-6242, LM.  
(Lütjering e Williams, 2007)

Tratamento térmico de recozimento representativo de titânio e suas ligas são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Tratamentos de recozimento para Titânio e suas Ligas, (Web Site Infomet, 2010)

Liga	Temperatura (°C)	Tempo (h)	Meio de Resfriamento
Ti Comercialmente puro (Todos os graus)	650 - 760	1/10 - 2	Ar
Ti-5Al-2,5Sn	720 - 845	1/6 - 4	Ar
Ti-8Al-1Mo-1V	790	1 - 8	Ar ou forno
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	900	1/2 - 1	Ar
Ti-6Al-2Nb-1Ta-0,8Mo	790 - 900	1 - 4	Ar
Ti-6Al-4V	705 - 790	1 - 4	Ar ou forno
Ti-6Al-6V-2Sn (Cu + Fe)	705 - 815	3/4 - 4	Ar ou forno
Ti-3Al-2,5V	650 - 750	1/2 - 2	Ar
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	Geralmente não recozido	Geralmente não recozido	Geralmente não recozido
Ti-5Al-2Sn-4Mo-2Zr-4Cr (Ti-17)	Geralmente não recozido	Geralmente não recozido	Geralmente não recozido
Ti-7Al-4Mo	705 - 790	1 - 8	Ar
Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0,25Si	705 - 815	1 - 2	Ar
Ti-8Mn	650 - 760	1/2 - 1	Forno até 540° e depois ar
Ti-13V-11Cr-3Al	705 - 790	1/6 - 1	Ar ou água
Ti-11,5Mo-6Zr-4,5Sn (Beta III)	690 - 760	1/6 - 1	Ar ou água
Ti-3Al-8V-Cr-4Zr-4Mo (Beta C)	790 - 815	1/4 - 1	Ar ou água
Ti-10V-2Fe-3Al	Geralmente não recozido	Geralmente não recozido	Geralmente não recozido
Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn	790 - 815	1/12 - 1/4	Ar

Aquecendo-se uma liga alfa-beta à temperatura de solubilização, produz-se uma maior fração de fase beta. Esta partição de fases é mantida pelo resfriamento rápido pós-solubilização, quando é realizado o envelhecimento subsequente, a decomposição de fase beta instável e da martensita (caso esta exista) acontece. As ligas comerciais beta, geralmente fornecidas na condição solubilizada, precisam somente de envelhecimento para atingir as propriedades desejadas. A Tabela 9 apresenta a temperatura e tempo de solubilização e envelhecimento para titânio e suas principais ligas ou as mais utilizadas na indústria.

Tabela 9 – Temperatura e tempo de solubilização para Titânio e suas Ligas, (Web Site Infomet, 2010)

Liga	Temp de Solub(°C)	Tempo de Solub(h)
Ti-8Al-1Mo-1V	980 – 1010	1
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	955 – 980	1
Ti-6Al-4V	955 – 970	1
Ti-6Al-6V-2Sn (Cu+Fe)	885 – 910	1
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	845 – 890	1
Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	845 – 870	1
Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0, 25Si	870 - 925	1
Ti-13V-11Cr-3Al	775 – 800	1/4 – 1
Ti-11,5Mo-6Zr-4,5Sn (Beta III)	690 – 790	1/8 – 1
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (Beta C)	815 – 925	1
Ti-10V-2Fe-3Al	760 – 780	1
Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn	790 - 815	1/4

Qualquer mudança na temperatura de solubilização das ligas alfa-beta altera o percentual de fase beta modificando a resposta ao envelhecimento. As temperaturas de solubilização são baseadas em considerações obtidas a partir de ensaios práticos com o objetivo de alcançar um nível desejado de propriedades de ductilidade e de resistência à tração a ser alcançados após o envelhecimento. A Tabela 10 apresenta a variação das propriedades de tração de uma barra de liga Ti-6Al-4V com a temperatura de solubilização.

Tabela 10 - Variação das propriedades de tração da liga Ti-6Al-4V com a temperatura de solubilização, (Web Site Infomet, 2010)

Temperatura de Solubilização (°C)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Limite de Resistência ao Escoamento (MPa)	Alongamento (%)
845	1025	980	18
870	1060	985	17
900	1095	995	16
925	1110	1000	16
940	1140	1055	16

## 2.4 Simulação Numérica Computadorizada

Segundo Ribeiro (2004), os métodos matriciais para análise estrutural tiveram um grande desenvolvimento, caracterizado pela introdução dos primeiros computadores digitais na década de 1950, com isso houve uma revolução a quase todos os aspectos de conformação de metais, entre eles: A análise de processos e design otimizado, a tecnologia dos materiais e da ciência, a tecnologia de processo de ferramenta orientada, a metrologia e controle de processos, o **Controle Numérico Computadorizado (CNC)** e modernos conceitos de máquinas-ferramenta com sistemas de automação flexível com consequência na qualidade do produto, a produtividade, flexibilidade e a economia.

Para Hentz, Schaeffer e Knoll (2007) o final da década de 60 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.

Segundo Lee e Lin (1998) 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 25 e 26 apresenta exemplos de simulação numérica computacional.

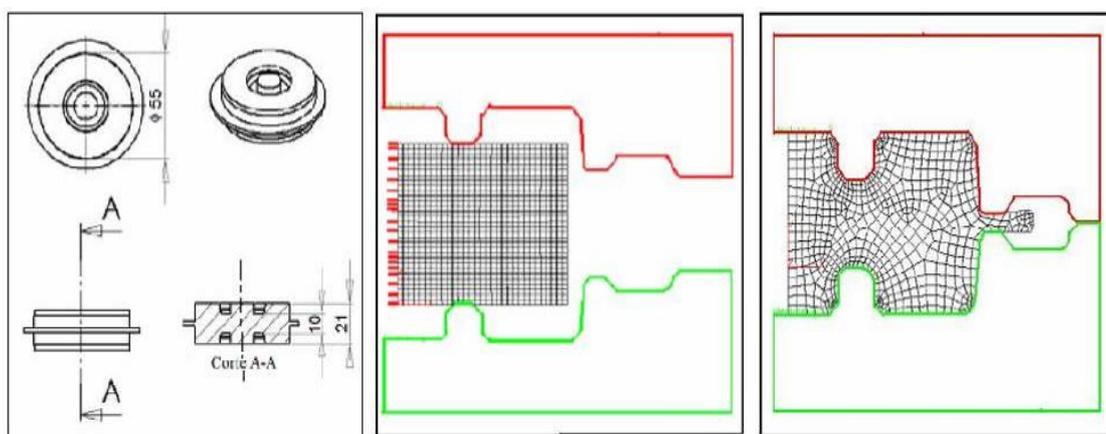


Figura 25: Exemplo de simulação numérica computacional, (Hentz *et al* ,2007).

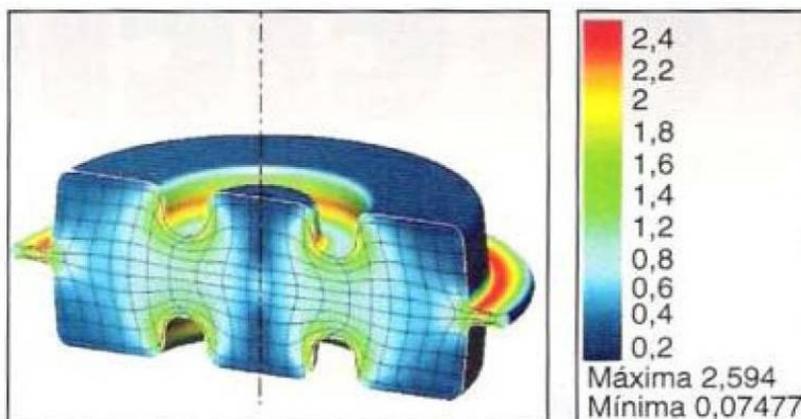


Figura 26: Exemplo de simulação numérica computacional, (Santos *et al*,2001).

#### 2.4.1 Curvas de calibração do coeficiente de atrito

Lenhard Junior, (2007) apresenta um comparativo de entre curvas simuladas para o coeficiente de atrito em comparação com a curva obtida do abaulamento dos corpos de prova ensaiados, também apresenta um diagrama, onde lista os principais parâmetros utilizados para a preparação de uma simulação, conforme mostra a Figura 27.

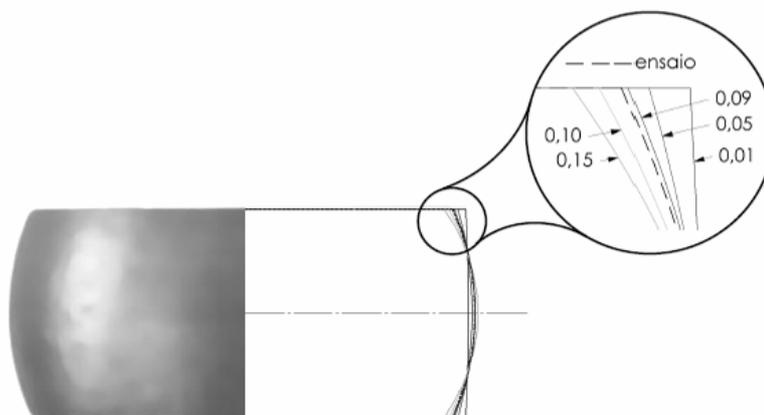


Figura 27: Comparativo de diversas curvas simuladas e curva de experimento prático.

(Lenhard Junior, 2007)

A Figura 28 apresenta os parâmetros para início realização de simulações, onde é possível observar vários fatores como análise, tipo de análise, importação do CAD e tratamento de geometrias, contato, propriedades do material, geração de malha e condições iniciais.

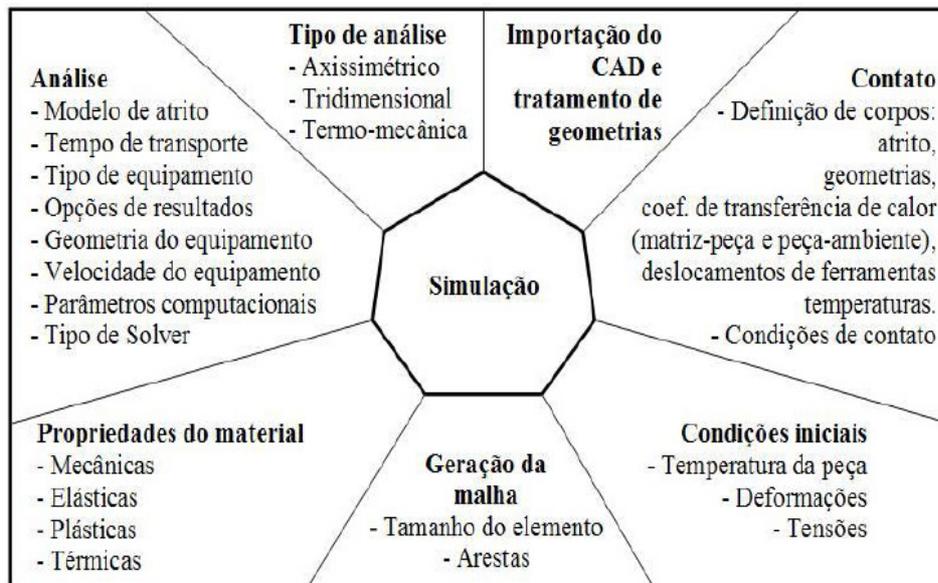


Figura 28: Parâmetros para início realização de simulações. (Lenhard Junior, 2007)

Braga (2005) descreve que podemos avaliar separadamente tensões principais ou de cisalhamento de acordo com algum critério de escoamento (Tresca ou Von Mises), isso irá depender basicamente do programa que escolhermos para trabalhar. A Figura 29 apresenta as curvas de calibração de atrito obtidas a partir do software Q-form para temperaturas de 300°C, para a liga de alumínio AA6061, sendo utilizado por Oliveira, Koller e Schaeffer em ensaios para análise do coeficiente de atrito.

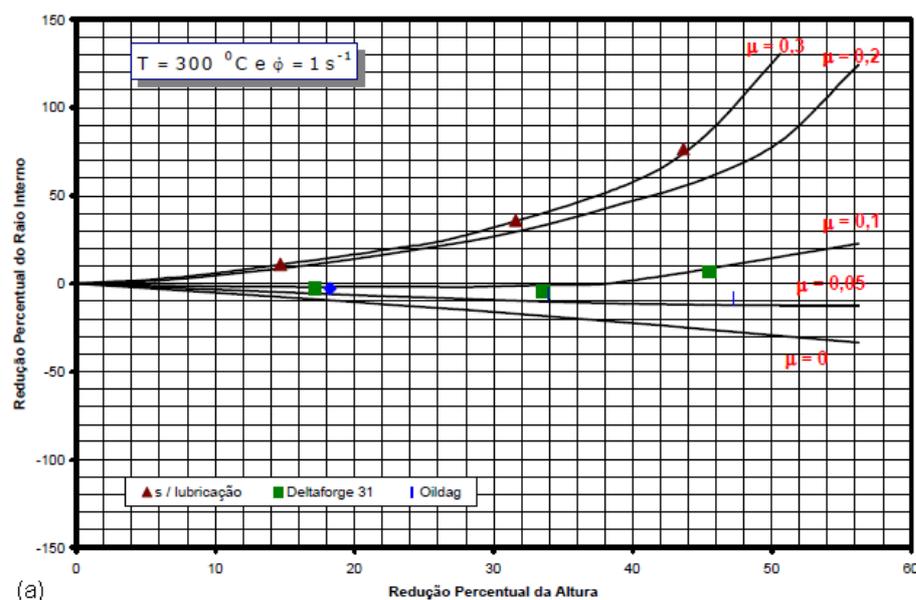


Figura 29: Curvas de calibração de atrito para a liga de alumínio AA6061 (Oliveira, 2001).

## 2.5 Tribologia

Os custos de um produto provem de vários outros valores que somados entre si e adicionados porcentagens de lucro e segurança geram o custo final. Um dos valores deste cálculo é o do ferramental, nele encontram-se as maiores dificuldades para determinação de um valor mais preciso e menos impactante no produto, pois fatores tribológicos e ou erros de projeto fazem com que as ferramentas e até mesmo o maquinário utilizado tenha sua vida útil reduzida. Estudos relacionados ao atrito e o desgaste bem como uma forma mais eficaz de se minimizá-los, fazem com que o custo da peça final baixe gerando margem para obtenção de maior lucro em alguns casos, essa redução serve para garantir que o fabricante continue o fornecimento frente a grande concorrência do mercado metal mecânico. (Stoeterau, 2004)

### 2.5.1 Histórico e Definição da tribologia

Conforme Stoeterau (2004) a palavra tribologia é derivada das palavras grega TRIBOS que significa atrito, e LOGOS que significa estudo, em uma tradução literal significa 'Estudo do Atrito', ou a ciência que estuda o Atrito. Para Sinatora (2005) podemos definir tribologia como “A ciência e a tecnologia da interação entre superfícies com movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionadas”, foi ouvida pela primeira vez nos meados de 1966, em um relatório do Departamento de Educação e Ciência. A tribologia como ciência se dedica, ao estudo do desgaste e do atrito e, por conseguinte, da lubrificação a qual é forma tradicional de minimizar os dois fenômenos citados.

Peter Jost (1966) coordenou um comitê formado basicamente por pesquisadores em uma investigação para o Departamento Britânico de Educação e Ciência sobre problemas relacionados com atrito, desgaste e lubrificação, voltados mais para a área industrial, visando reduzir com isso custos de produtos e o crescimento da indústria britânica. Em março do corrente ano é lançado oficialmente a palavra tribologia, sendo definido como “a ciência da interação entre superfícies em movimento relativo”. Marinescu *et al.*, (2004) coloca a tribologia, como uma “nova ciência” que estuda o atrito, desgaste e lubrificação e as suas interações. Winer (1990) descreve que o que se fez em 1966 foi conferir um foco, um fator unificador, o qual é a aplicação dos conhecimentos básicos para poder prever o comportamento de sistemas físicos, ou seja, de triboelementos utilizados em sistemas mecânicos.

## 2.5.2 Atrito

Para Helman e Cetlin (1983) o atrito é uma força natural e o mecanismo pelo qual se desenvolvem as forças de resistência superficiais do deslizamento de dois corpos em contato. O contato entre as pequenas regiões ao longo das superfícies deslizantes correlaciona-se o atrito entre materiais metálicos. Estes autores apontam que a origem na resistência ao cisalhamento é um tipo de força de atrito, podendo também se originar como resultado de um processo de “arar” o metal mais duro sobre a superfície do metal mais tenaz. Para Schey (1984), os processos de conformação de metais se aplica uma pressão nas matrizes e esta é transmitida para o material deformando-o. Realizando tal deformação obtemos um movimento relativo entre o ferramental e o material, é nesta interface que se observa o atrito. Nos processos de forjamento o atrito tem influência direta na vida das matrizes e na força necessária para a operação, com isso tem influencia na qualidade superficial da peça na microestrutura e no fluxo do material nas cavidades das matrizes. Podemos verificar três tipos básicos de pressões que regem a condição de atrito em conformação mecânica para metais, são elas:

- condições a seco, não existe lubrificação na interface;
- condições hidrodinâmicas, quando uma espessa camada de lubrificante está presente entre as superfícies;
- lubrificação de contorno, condição de lubrificação intermediária entre atrito seco e lubrificação hidrodinâmica.

A Figura 30 exibe a tensão tangencial em função da pressão normal. Os valores do coeficiente de atrito ( $\mu$ ), bem como valores do fator de atrito ( $m$ ).

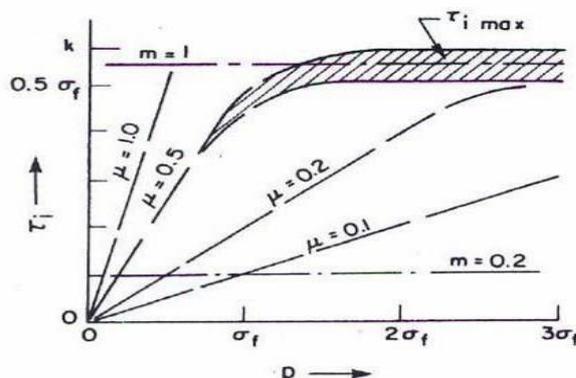


Figura 30: Os valores do coeficiente de atrito e do fator de atrito (Schey,1984 ).

### **2.5.2.1 Modelos de Atrito para deformação plástica**

Nos processos de conformação mecânica de um modo geral, a determinação do atrito irá depender de vários parâmetros, tais como, a rugosidade superficial dos corpos em contato, a temperatura de processo, os materiais tanto da ferramenta quanto da peça, a velocidade de deformação e a pressão de contato. Para tal podemos realizar a determinação do atrito seguindo algum modelo já existente. A Tabela 11 apresenta de maneira resumida os modelos de atrito.

Tabela 11: Modelos de atrito, formulações e princípios (Geier, 2007)

Modelo	Formulação	Princípio / descrição
Leonardo Da Vinci (1452-1519)	$\mu = \frac{F}{P}$	O atrito independe dos tipos de materiais envolvidos no contato é proporcional ao seu peso, portanto: O coeficiente de atrito entre duas superfícies independe da área de contato entre elas; O atrito de um objeto sobre uma superfície é proporcional ao seu peso. Entendia ter valor 0,25
Guillaume Amontons (1663 -1705) Charles Augustin Coulomb (1736-1806)	$\tau = \mu * \sigma_n$	O atrito entre duas superfícies independe da área, mas depende da pressão entre as mesmas; O atrito entre duas superfícies é menor se as mesmas forem lubrificadas. Amontons entendia ter valor 0,33 (atrito estático).
Leonhard Euler (1707-1783)	$F_{at} = m.N$	O coeficiente de atrito estático ( <i>me</i> ) é maior do que o coeficiente de atrito cinético ( <i>mc</i> ). Também conclui que a velocidade desenvolvida pelo objeto ao longo do plano inclinado independe do coeficiente de atrito cinético.
Charles Augustin Coulomb (1736-1806)	$F_{at} = \frac{C_1 + C_2 t^s}{C_3 + t^s}$	A força de atrito estática é proporcional à reação da superfície do plano para com a superfície do objeto; A força de atrito independe da velocidade, a força de atrito cinética é muito menor do que a força de atrito estática para longos períodos de repouso; A força de atrito cinética entre duas superfícies metálicas lubrificadas é proporcional a reação entre ambas, onde o coeficiente de atrito estático é igual ao coeficiente de atrito cinético; No deslizamento de metais sobre a madeira, o atrito estático irá aparecer com o passar do tempo (4 ou mais dias). No deslizamento de metais com metais, o atrito estático é imediato, já no deslizamento de madeira com madeira o atrito estático ocorre após um ou dois minutos, para deslizamento de madeira com madeira e metais com metais, o atrito cinético em ambos não é imediato, mas no caso de deslizamento de madeira com metal, o atrito cinético ocorre naturalmente.
Fator de atrito interfacial	$m = \frac{\tau}{k}$	Modelo é útil para estados de elevada pressão normal. Forma alternativa conhecida como lei de Prandtl, a tensão de cisalhamento devida ao atrito é independente da tensão de contato entre as partes. Valores limites: m=0 quando não existe atrito m=1 para condições de aderência. Recomenda-se aplicar a lei de Prandtl (lei do atrito constante) para tensões de contato elevadas, caso em que o coeficiente de atrito ( $\mu$ ) deixa de ter significado.
Levanov	$\frac{\tau}{k} = f * \left[ 1 - \exp\left(-1,25 * \left(\frac{p}{\sigma_0}\right)\right)\right]$	Trata de forças de atrito lineares e se baseia na relação de áreas de contato real e aparente
Wanheim e Bay (1997)	$\tau = f * \alpha * k$	O atrito é linearmente proporcional a tensão normal a baixas pressões

### 2.5.3 Lubrificação

Segundo Mang (1983), a lubrificação com filme fluido é a atividade industrial mais difundida. Os primeiros estudos científicos sobre atrito e lubrificação foram realizados pelo cientista italiano Leonardo D'Vinci. Em 1687 Isaac Newton cria o conceito de viscosidade. No Século XIX, vários pesquisadores estudaram o assunto devido as necessidades criadas pela revolução industrial. Renomados pesquisadores como Navier em 1823 e Stokes em 1845 desenvolveram as equações para fluidos viscosos.

Em 1879, Thruston determina a relação entre carga e o coeficiente de atrito viscoso, concluindo que o mesmo depende da velocidade, comprovando fisicamente à terceira lei do atrito, postulada por Coulomb, mencionando que o atrito entre duas superfícies sólidas, sofrendo escorregamento, independe da velocidade, exceto para velocidades extremamente altas. Petrov em 1883 foi o primeiro a postular sobre a natureza hidrodinâmica do atrito viscoso, e obteve a expressão para determinação do mesmo, também denominada de Lei de Petrov. Em 1883 Beauchamp Tower, durante seus experimentos para observar a melhor forma de lubrificação de um eixo, conseguiu validar experimentalmente a equação de Reynolds. (Hutchings,1992),

Osborne Reynolds em 1886, apresentou soluções adicionais para o mancal de Beauchamps Tower, em situações que envolvem o problema de filme espremido (*squeeze film*). Reynolds explicou e formulou matematicamente o problema da lubrificação hidrodinâmica, mostrou a noção de que mancais radiais têm folga, mesmo que micrométricas, apresentou preocupação com o problema de cavitação em mancais e demonstrou a dependência da viscosidade com a temperatura. De forma geral a lubrificação é dividida em cinco grandes áreas de estudo, as quais são:

- **Lubrificação hidrodinâmica** – onde a força de sustentação, no filme de lubrificante, é gerada pelo movimento relativo entre as superfícies, ou também chamado separação total é atingida quando está sendo formado um filme líquido que separa totalmente os componentes de deslizamento. (<http://www.lubrificantes.net/lub-002.htm> ) Para Geier (2007) os desgastes que venham a ocorrer nas ferramentas é devido a erosão ou cavitação por partículas sólidas oriundas do lubrificante. Por este motivo, este tipo de lubrificação é restrita a casos de extrusão hidrostática e estampagem hidrodinâmica, conforme visto na curva de Stribeck, Figura 31.

- **Lubrificação Elastohidrodinâmica** – Segundo Campanha e Sinatora, (2010), uma análise detalhada sobre a lubrificação elastohidrodinâmica foi realizada por Hamrock e Dowson onde se pode verificar a mais importante informação sobre a lubrificação EHD. Como base,

para a formulação da espessura mínima e da espessura central do filme lubrificante, utilizou-se a equação de Reynolds. Além disso, pode-se verificar grande importância dada à deformação elástica na região de contato, assim como, a característica de piezoviscosidade do lubrificante como descrito anteriormente. Vale ressaltar que a equação é válida para condições de contato bidimensionais e sob condições onde o contato está plenamente preenchido pelo lubrificante. Este tipo de lubrificação ocorre na presença de contato de rolamento entre as partes (atrito de rolamento)

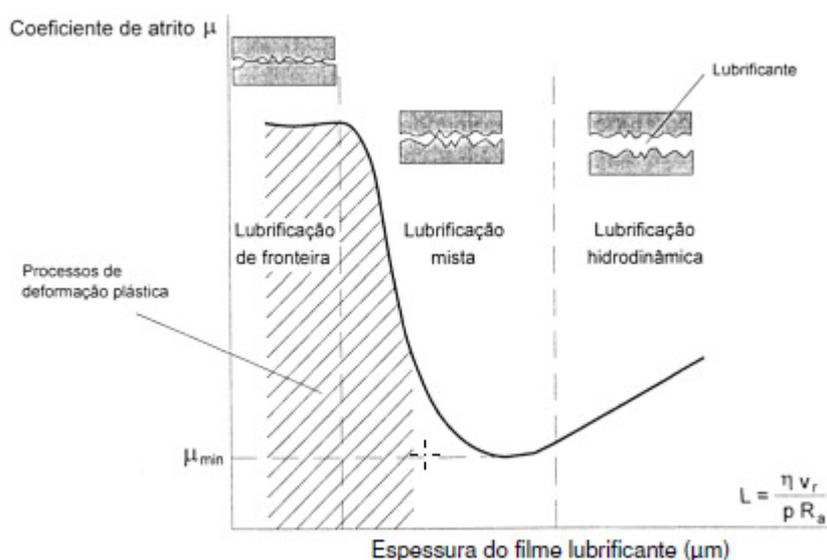


Figura 31: Curva de Stribeck (Geier, 2007)

- **Lubrificação Limite** – Segundo Hutchings (1992), quando a espessura do filme lubrificante é na ordem molecular, em geral depositados a partir de um óleo ou graxa contendo um aditivo adequado para extrema pressão. Pode ocorrer contato apreciável entre asperezas, com formação de junção e posterior quebras das mesmas
- **Lubrificação Sólida** – Tem a finalidade de substituir a película fluída por uma película sólida, principalmente onde houver casos de lubrificação limite. Dos minerais mais usados destacam-se o grafite, o bissulfeto de molibdênio, a mica e o talco. (Web Site Interlubri, 2010)
- **Lubrificação hidrostática** – O objetivo é formar um filme de lubrificante entre as partes em fricção (por exemplo, peças deslizantes e guias) para evitar o desgaste e movimentos abruptos durante os golpes (referidos como “agarra-desliza”). Para conseguir isso, bombeia-se óleo pressurizado entre as superfícies de fricção. Isso separa as partes em fricção, mesmo durante as paralisações das máquinas. (Web Site SKF, 2010). Segundo Geier (2007), a

característica mais importante da lubrificação na conformação de metais é a possibilidade de associá-la a um dado processo em função dos diferentes regimes de lubrificação, diferentes fatores físico-químicos que controlam a lubrificação, e podem ocorrer como resultado de pequenas mudanças nas propriedades do lubrificante e do material de trabalho, velocidade, temperatura, geometria ou rugosidade superficial. Diversos regimes de lubrificação podem coexistir em diferentes localizações na interface peça-ferramenta ou se sucederem em certa região na medida em que o processo ocorre.

### **2.5.3.1 Lubrificantes**

Segundo Mang (1983), a aplicação e a seleção de lubrificantes são determinadas pelas funções que eles devem executar. Em nenhuma outra área da lubrificação, existe uma variedade tão grande de tipos de lubrificante como na área de conformação de metais. Os lubrificantes variam dependendo das diferentes funções que devem desempenhar. Sendo que as principais funções dos lubrificantes são: Controle de atrito; Controle do desgaste; Controle de temperatura; Controle de corrosão; Isolante (elétrico); Transmissão de potência (hidráulica); Amortecimento de choques (amortecedores, engrenagens); Remoção de contaminante (ação de lavagem por jato); Formação de vedação (graxa).

Segundo Mang (1983), Stachowiak e Batchelor (2005), é difícil apontar lubrificantes que satisfaçam todos os requisitos exigidos para uma dada operação até porque as funções e atributos que lhe são exigidos constituem um conjunto exigente de especificações.

#### **2.5.3.1.1 Óleos minerais**

Segundo Stachowiak e Batchelor (2005), os óleos minerais são os lubrificantes mais usados. Eles são fabricados a partir de óleo cru que é extraído em várias partes do mundo, isto é, derivados do petróleo. Existem algumas vantagens e desvantagens da aplicação do óleo mineral para lubrificação de máquinas específicas, e estas devem ser cuidadosamente consideradas ao selecionar um lubrificante e projetar um sistema de lubrificação. O custo de óleos minerais é baixo e mesmo com o rápido desenvolvimento de óleos sintéticos, lubrificantes sólidos e de polímeros resistentes ao desgaste, seu uso continuado em muitas indústrias parece certo. Introduz na superfície uma oleosidade característica, proporcionando regimes de lubrificação do tipo de fronteira. Quando puros, a sua utilização é limitada, sendo geralmente melhoradas as propriedades com a introdução de aditivos.

### **2.5.3.1.2 Lubrificantes naturais e derivados**

Segundo Mang (1983), os materiais graxos naturais de origem vegetal e animal são geralmente triglicérides, que são ésteres de glicerina e ácidos graxos, foram sem dúvida os primeiros lubrificantes a ser usados para o uso no trabalho em metais, mas tem baixa qualidade tribológica, seus derivados incluem ceras, ácidos graxos e sabões, todos estes usados na conformação de metais, porém, a formação de resíduos nos tratamentos térmicos, e um comportamento de proteção contra corrosão nos os metais não ferrosos são evidenciados.

### **2.5.3.1.3 Lubrificantes sintéticos**

Conforme Stachowiak e Batchelor (2005), os lubrificantes sintéticos foram desenvolvidos originalmente no início deste século por países sem um suprimento confiável de óleo mineral. Estes lubrificantes eram caros e, inicialmente, não tinham aceitação geral. O uso de óleos sintéticos aumentou gradualmente, especialmente em mais aplicações especializadas para que os óleos minerais fossem insuficientes. Apesar de muitas características positivas tais como a disponibilidade e custo relativamente baixo, óleos minerais têm também vários grave defeitos, tais como a oxidação e a perda de viscosidade em altas temperaturas de combustão ou de explosão em a presença de agentes oxidantes fortes e solidificação em baixas temperaturas. Estes efeitos são proibitivos em algumas aplicações especializadas, tais como turbinas a gás, onde uma alta temperatura é necessária, mas as temperaturas muito baixas, ocasionalmente, onde deve ser mantida sua característica lubrificante. Em outras aplicações, como bombas de vácuo e motores a jato, lubrificantes de baixa pressão de vapor são necessários.

No processamento de alimentos e na indústria farmacêutica é utilizado lubrificante de baixa toxicidade, etc. Nos últimos anos, a maior procura foi dos lubrificantes de alto desempenho, especialmente para aplicações na indústria da aviação com turbina a gás de alto desempenho motores. Isto levou ao desenvolvimento de lubrificantes sintéticos que podem suportar altas temperaturas sem se decompor e, ao mesmo tempo, proporcionará um risco de incêndio reduzido. A tendência recente de altas temperaturas de operação de máquinas criou um segundo e provavelmente mais duradouro período de interesse nestes lubrificantes. Tem sido desenvolvido em grande variedade para utilização nos processos de

conformação mecânica. Alguns apresentam características semelhantes aos óleos naturais, enquanto que outro não tem os equivalentes naturais, mas incluem aditivos que os tornam estáveis a elevadas temperaturas e composto de silício, permitindo ao lubrificante trabalhar em regimes hidrodinâmicos.

#### **2.5.3.1.4 Lubrificantes compostos**

Para Geier (2007), os lubrificantes mais comuns desta categoria são os óleos minerais melhorados com aditivos: (i) aditivos para regime de lubrificação de fronteira; óleos naturais, graxas e sabões, (ii) aditivos para regime de extrema pressão (EP); composto de fósforo, cloro e enxofre, (iii) aditivos sólido como o grafite e o dissulfeto de molibdênio ( $\text{MoS}_2$ ), (iv) inibidores da oxidação e da corrosão, (v) agente anti-espuma e (vi) agentes germicidas para prevenir o desenvolvimento de bactérias e outros organismo.

#### **2.5.3.1.5 Lubrificantes aquosos e emulsões**

Para Stachowiak e Batchelor (2005), a água é um atrativo extensor de óleos lubrificantes; barato, boa transferência de calor e de inflamabilidade são todos os atributos úteis. Embora seja a água um mau lubrificante, devido sua baixa viscosidade, pode ser usada como base para agregar substancias com propriedades lubrificantes e, assim, pode combinar o seu excelente poder refrigerante com características com óleos para formar emulsões ou, quando misturada com hidrocarbonetos solúveis em água para produzir uma solução aquosa. Esses líquidos são utilizados como refrigerantes em metalurgia, onde a combinação de lubrificação do óleo, de alta condutividade e calor latente da água fornece o fluido ideal para esta aplicação. Em máquinas de mineração também é lubrificado por fluidos à base de água para minimizar o risco de fogo durante os vazamentos deste lubrificante. Foi observado que durante o processo de lubrificação por emulsões, água é excluída dos contactos carregado e, como resultado do desempenho de uma emulsão é próximo ao de um óleo mineral puro. A limitação mais grave destes lubrificantes é a intervalo de temperatura, que podem ser aplicadas com êxito. Eles estão limitados ao faixa de temperatura de água que fica entre o ponto de fusão do gelo e o ponto de ebulição da água. Isto exclui estes lubrificantes de muitas aplicações, por exemplo, óleos, motores. Estes fluidos lubrificantes classificam-se em: (i) emulsões ou suspensão de gotículas de óleo misturadas com água, (ii) fluidos ou substancia química dissolvidas em água que adicionem propriedades lubrificantes e (iii)

fluidos semi químicos, que não são mais do que combinações de emulsões e fluidos químicos Geier (2007).

#### **2.5.3.1.6 Graxas**

Segundo Stachowiak e Batchelor (2005), Graxas são simplesmente óleos lubrificantes muito viscosos. Elas estão em misturas fato de óleos lubrificantes e espessantes. Estes são dispersos em óleos lubrificantes, a fim de produzir uma estrutura coloidal estável ou em gel. A aplicação mais generalizada é a de graxas de baixa manutenção, lubrificantes semi-permanentes em mancais de rolamento de contato e algumas engrenagens. Os itens de manutenção de baixo valor também são candidatos apropriados para a lubrificação de graxa. O desempenho de graxas lubrificantes é inferior aos óleos minerais, exceto em baixas velocidades de deslizamento em algumas graxas pode ser superior. Graxas têm de cumprir os mesmos requisitos que os óleos lubrificantes, mas com uma condição extra, a graxa deve permanecer como uma massa semi-sólida, apesar das temperaturas de serviço elevado. Se a graxa liquefaz e escoar a partir do contato, em seguida, a probabilidade de falha de lubrificação aumenta rapidamente. Além disso, a graxa é incapaz de remover o calor por convecção como o óleo, assim é ineficaz como um agente de arrefecimento. A duração de uma graxa de serviço é muitas vezes determinado pela eventual perda de consistência semi-sólida para se tornar um líquido ou um depósito rígido.

#### **2.5.3.1.7 Revestimento**

Usar revestimentos resistentes composto de camadas cuidadosamente aplicadas geralmente de materiais duros, que são destina-se a dar proteção prolongada contra o desgaste abrasivo, desgaste adesivo que são freqüentemente reduzidas pelo uso destes revestimentos. Existem vários métodos de aplicação de materiais duros. Por exemplo, aspersão térmica (sputtering), deposição física de vapor (PVD – Physical vapor deposition) e deposição química de vapor (CVD – *Chemical vapor deposition*) são usados de forma semelhante para formar com a deposição revestimentos finos para gerar lubrificação sólida. Outros métodos são utilizado para depositar camadas muito espessas de material rígido. Aplicações de revestimentos resistentes encontrados em todos os setores, por exemplo, incluem nas pás escavadeiras e britadeiras de mineração, em ferramentas de conformação e

corde para as indústrias de fabricação, em rolamentos em bombas de gás natural liquefeito. Estes são produtos sólidos ou líquidos aplicados geralmente ao material de trabalho incluem: (i) revestimento metálicos, por exemplo: zinco, chumbo e outros metais que permitam a formação de uma película resistente ao deslizamento, (ii) revestimento com polímero, como teflon e (iii) vidro, o qual é usado na lubrificação da extrusão a quente do aço. (Stachowiak e Batchelor, 2005, p.765).

#### **2.5.3.1.8 Grafite e dissulfeto de molibdênio**

Para Geier (2007), a explicação mais antiga para as propriedades do grafite sugere que a resistência ao cisalhamento paralelo às camadas de átomos é muito pequena. Isto permitiria que as camadas de átomos deslizassem uma sobre as outras como cartas em um baralho, e faria com que o grafite atuasse como um lubrificante limite. Essa explicação foi aceita até a 2ª Guerra Mundial, quando se verificou que os carvões de grafite em geradores elétricos usados em aviões desgastavam-se muito rapidamente. Uma investigação sobre esse efeito, feita por Savage, mostrou que o grafite tem propriedades tribológicas muito pobres na ausência de vapores condensáveis. Esse efeito é muito marcante e a quantidade de vapor necessário para uma lubrificação efetiva pode ser muito baixa: por exemplo, expondo o grafite seco a uma pressão de  $400\text{N/m}^2$  de vapor d'água diminui o volume de desgaste de três ordens de grandeza, e o coeficiente de atrito por um fator igual a cinco. Segundo Stachowiak e Batchelor, (2005), as características tribológicas de filmes lubrificantes de grafite e bissulfeto de molibdênio são muito semelhantes. Isto é em parte devido à sua semelhança considerável na estrutura cristalina. As camadas de dissulfeto de molibdênio são bastante flexíveis e podem deslizar uns sobre os outros repetidamente sem danos. Apurou-se que, sob repetidas deslizamento, filmes de dissulfeto de molibdênio pode mover distâncias significativas sobre a superfície desgastada. O mecanismo de lubrificação de grafite e dissulfeto de molibdênio são acreditados para ser um resultado de o movimento relativamente livre de camadas adjacentes destas substâncias.

#### **2.5.3.2 Característica para lubrificantes de conformação mecânica**

Segundo Mang (1983), a grande diversidade de condições na conformação mecânica faz com que os lubrificantes devam funcionar perfeitamente. Vários aspectos devem ser levado em conta para traçar um método sistemáticos de seleção de lubrificantes, alguns

atributos são geralmente desejáveis como a separação de ferramenta do material de trabalho, o atrito controlado, prevenção de soldagem fria, controle do acabamento superficial, reatividade com o material de trabalho e/ou superfície da ferramenta, estabilidade controlada, fácil aplicação e remoção, facilidade no manuseio, segurança e baixo custo.

#### **2.5.3.2.1 Separação de ferramenta do material**

Conforme Geier (2007), sempre é desejável a redução do desgaste do ferramental, por isso um filme contínuo não necessita apresentar espessura constante, mas deve proteger a superfície de matrizes. Pois, várias partículas oriundas do desgaste possam ocorrer, estas não devem ser abrasivas e devem sair com o lubrificante.

#### **2.5.3.2.2 Atrito controlado**

Segundo Mang (1983), o atrito deve ser controlado desejando sempre o menor valor possível para atrito é desejável em diversas situações, mas um valor mínimo é necessário em alguns processos que dependam de tração para assegurar o movimento do metal, como em laminação. Estes aspectos mencionados mostram que o atrito em muitos casos se faz necessário para execução de alguns processos de conformação. Mas este atrito deve ser controlado para minimizar o desgaste das ferramentas de conformação e o menor custo de processo. Um dos pontos-chaves de controle do atrito é o acabamento superficial da ferramenta, que deve ser uniforme por toda a superfície do material de trabalho.

#### **2.5.3.2.3 Controle da temperatura superficial.**

Segundo Schaeffer (2005) o forjamento a quente exige um lubrificante que atue como isolante térmico, pois, há retenção da temperatura do material de trabalho. Os lubrificantes para trabalho a frio (alguns casos trabalho a quente), atuam para esfriar as ferramentas de trabalho controlando a temperatura superficial e diminuindo o desgaste por abrasão do processo de conformação.

#### **2.5.3.2.4 Reatividade do material e/ou a superfície da ferramenta**

De acordo com Schaeffer (2005), a alta reatividade durante sua passagem ao longo da zona de deformação geralmente é desejável, particularmente se as reações ocorrerem no

material de trabalho. Se este for basicamente não reativo, o material da ferramenta deve apresentar filmes de proteção para as tais reações, pois, qualquer dano causado aos filmes deve ser rapidamente reparado. O lubrificante deve ser anti-corrosivo para as ferramentas, equipamento ou produto acabado.

#### **2.5.3.2.5 Estabilidade controlada, fácil aplicação e remoção**

Para Mang (1983), o lubrificante deve manter suas propriedades durante estocagem e na medida do possível, durante o uso, sendo que algumas alterações podem ocorrer, mas devem ser controladas sem maiores danos ao lubrificante. O lubrificante não deve causar irritação à pele, não deve conter substâncias tóxicas, muito menos gerar gases tóxicos e seu descarte não deve apresentar problemas. Finalmente, seu custo deve ser proporcional aos seus benefícios com facilidade de aplicação e remoção durante o processo de conformação..

#### **2.5.4 Métodos para obtenção do coeficiente de atrito**

De acordo com Brito (2006) e Geier (2007), vários métodos para obtenção do coeficiente de atrito durante o forjamento foram estudados. Os dois métodos mais pesquisados é o ensaio de compressão do anel e ensaio do tubo cônico.

##### **2.5.4.1 Ensaio de compressão do anel**

De acordo com Martelo (2007), o estudo do comportamento do atrito através do teste de compressão do anel (figura 32) é a combinação de experimentos físicos com o método dos elementos finitos fornecendo uma medida aproximada. O ensaio é a compressão de um corpo de prova em forma de anel entre matrizes planas, enquanto sua variação percentual da altura e o diâmetro interno são controlados. A variação do diâmetro interno do anel verificado após o ensaio é determinada pelo atrito interfacial. A condição ideal seria o atrito for nulo, onde o anel deformaria como um disco sólido, com cada ponto superficial fluindo radialmente para fora em uma velocidade proporcional a sua distancia ao centro. Se o atrito for maior que zero o anel sofre um “efeito de barril” em suas paredes, isto se deve pela resistência ao escorregamento interfacial da relação peça-matriz. Concluído o ensaio utiliza-se a simulação numérica da conformação do anel com as mesmas condições utilizadas experimentalmente para gerar as curvas conhecidas como “curvas teóricas de calibração” (Altan, 1999).

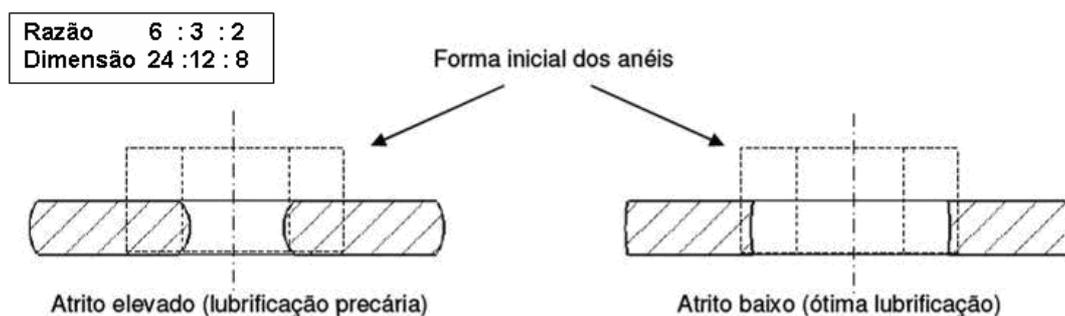


Figura 32: Efeito do atrito no escoamento do material durante o ensaio do anel. (Martello 2006)

Conforme Martello (2006) citando Male e Cockcroft (1964), os resultados obtidos experimentalmente são traçados nas curvas de calibração que descreve a variação do raio interno do anel ( $\Delta r$ ) em função de sua redução na altura ( $\Delta h$ ). As curvas simuladas que mais se aproximarem dos pontos experimentais indicam o valor do coeficiente de atrito do processo. As dimensões do anel devem respeitar uma relação que pode ser a 6:3:2 para diâmetro externo:diâmetro interno: altura. O ensaio do anel deve ser realizado entre as matrizes da peça em estudo que será conformada com o acabamento superficial similar das cavidades de forjamento para reduzir as discrepâncias entre o valor encontrado e o real. O ensaio do anel é realizado na maior parte plana da matriz.

Segundo Geier (2007), cada geometria de anel tem seu conjunto específico de curvas de calibração. A geometria mais usual é a que respeita a proporção 6:3:2. Em temperatura ambiente as dimensões do anel não são relevantes, entretanto, quando se faz necessário um maior controle de temperatura, recomenda-se utilizar anéis maiores para evitar perdas térmicas. A grande escala de deformação do material de trabalho somando não haver necessidade das medições de força são vantagens do ensaio de compressão do anel, que serve também para classificar diferentes tipos de lubrificantes para o processo de forjamento. Para isto é de costume a construção das curvas de calibração do atrito num gráfico obtido com auxílio de cálculos teóricos para diferentes valores de atrito. Com estas análises é possível perceber quaisquer alterações no comportamento do lubrificante utilizado.

Brito (2006) menciona que os primeiros testes com anéis são atribuídos a Kunogi. O método foi desenvolvido posteriormente por Male e Cockcroft que introduziram uma calibração experimental para determinar o coeficiente de atrito ( $\mu$ ). A utilização do método do limite superior foi usada por Male e Depierre como tratamento matemático para

determinação do fator de atrito  $m$  no ensaio do anel. Avitzur foi o primeiro que apresentou de maneira satisfatória análise do problema em 1968 do ensaio do anel. A Figura 33 apresenta as curvas de calibração obtidas pelo ensaio do anel por Brito (2006) para o material nas três condições de tratamento térmico (0, T4 e T6) para diferentes valores do fator de atrito  $m$  (Prandtl)

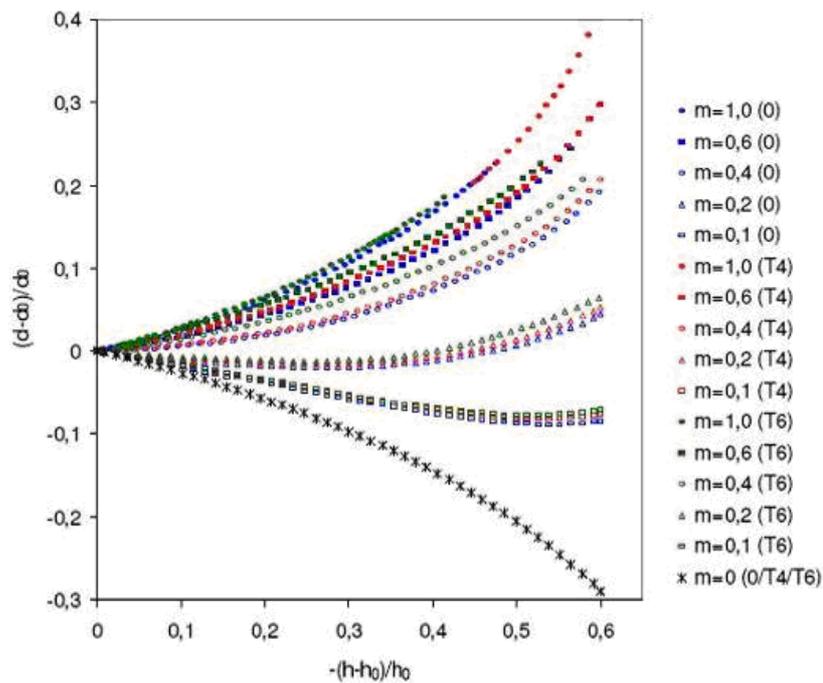


Figura 33: Curvas de calibração do anel. (Brito, 2006)

A Figura 34 apresenta os resultados experimentais obtidos nos ensaios de anel e as curvas de calibração (Prandtl) próximas a eles para cada condição de material.

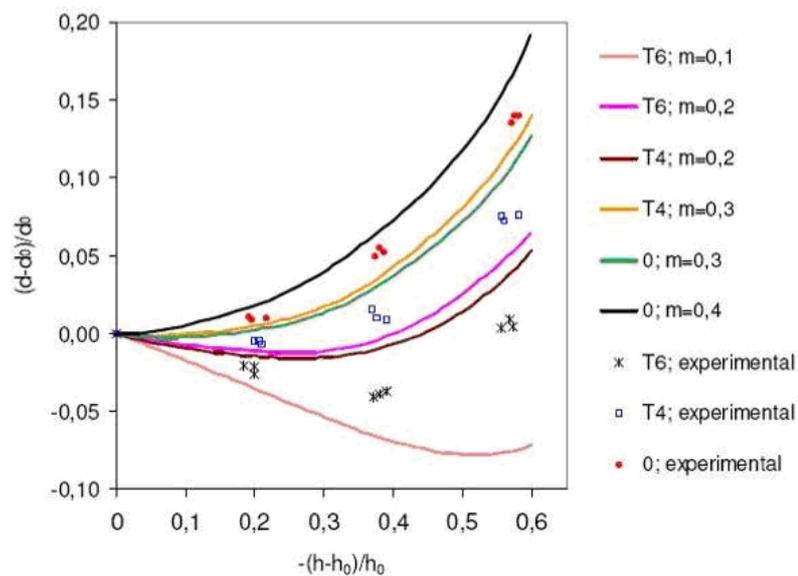


Figura 34: Curvas de calibração do anel. (Prandtl,)

#### 2.5.4.2 Ensaio de compressão do tubo cônico.

Kopp e Phillip (1992) 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) (Brito, 2006). A Figura 35 mostra o corpo de prova inicial e o corpo de prova conformado no teste do tubo cônico.

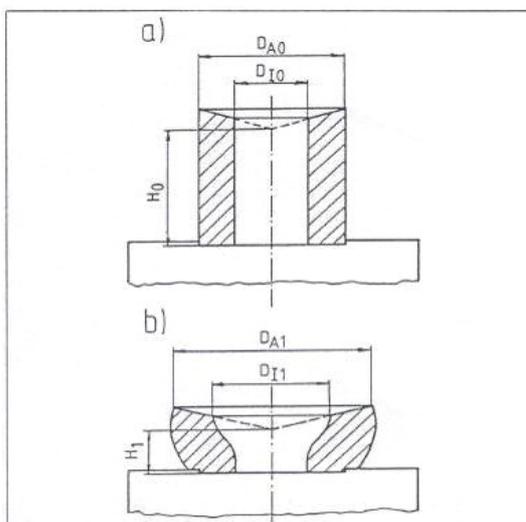


Figura 35: Corpo de prova inicial e final no ensaio do tubo cônico. (Phillip, 1992)

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 à 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 (Schaeffer, 2005). A Figura 36 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.

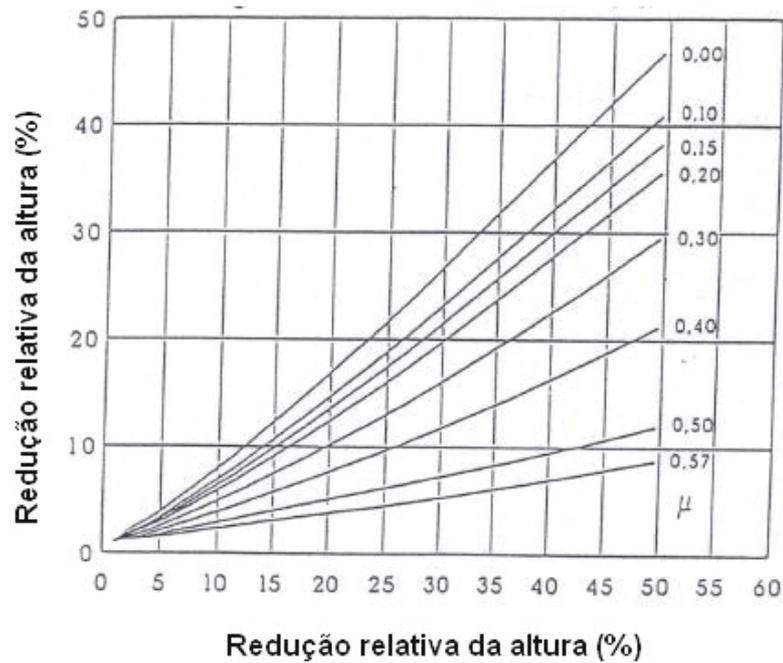


Figura 36: Curvas do ensaio do tubo cônico. (Phillip, 1992)

A Figura 37 mostra 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.

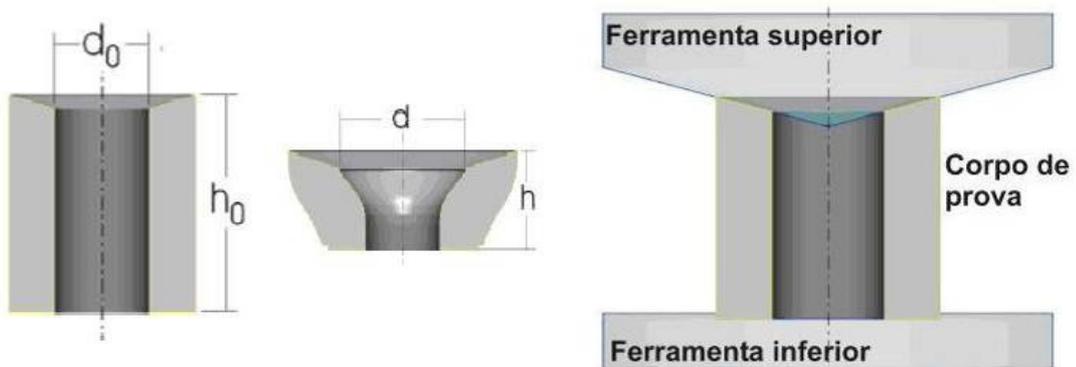


Figura 37: Representação esquemática dos corpos de prova dos ensaios do tubo cônico e as ferramentas. (Britto, 2006)

A Figura 38 mostra os resultados experimentais obtidos por Britto (2006) nos ensaios do tubo e as curvas de calibração próximas a eles para condição recozida dos materiais.

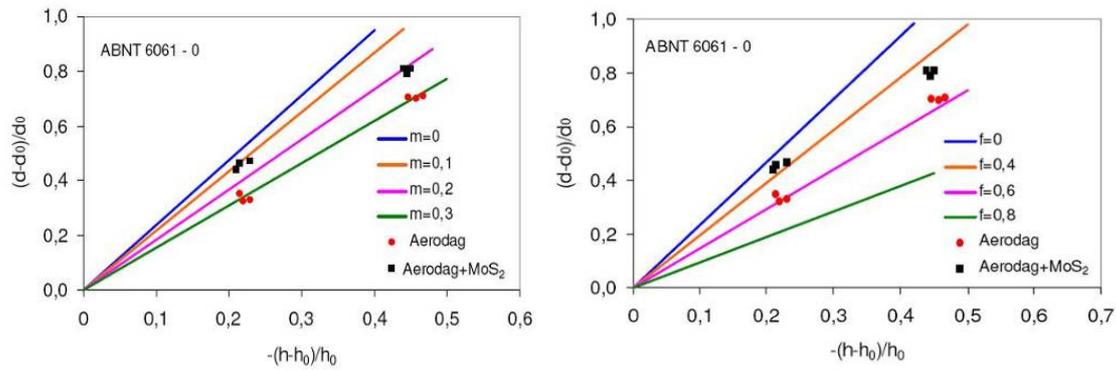


Figura 38: Curvas obtidas por simulação para os corpos de prova dos ensaios do tubo cônico (Britto, 2006).

Britto (2006) 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 39.

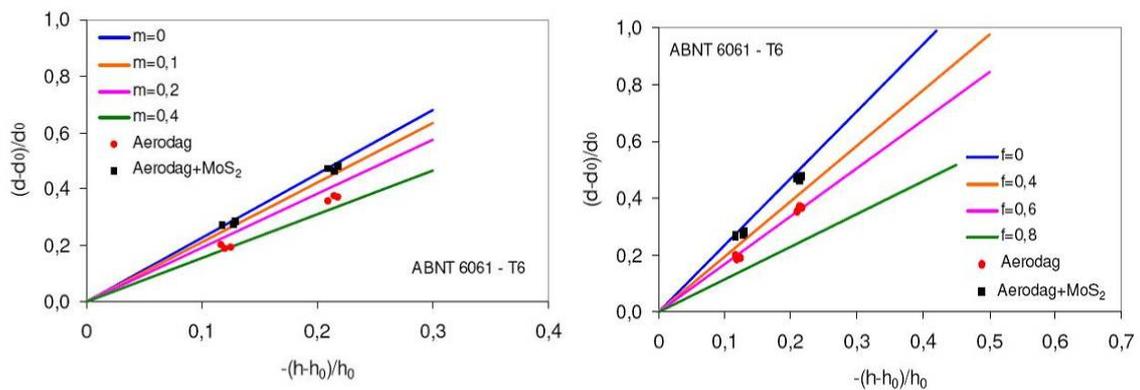


Figura 39: Curvas obtidas por simulação para os corpos de prova dos ensaios do tubo cônico (Britto, 2006).

A Tabela 12 apresenta as condições dos ensaios realizados por Britto em 2006 para determinação do fator de atrito para  $m$  e  $f$  da liga de alumínio.

Tabela12: ensaios realizados para determinação do fator de atrito. (Britto, 2006)

Lubrificação	Condição do material	$m$	$f$
Aerodag na matriz	0	0,3	0,6
	T4	0,3	0,5
	T6	0,3	0,6
Aerodag na matriz + MoS <sub>2</sub> no corpo de prova	0	0,1 → 0,2	0,3 → 0,5
	T4	≅ 0,05	≅ 0,2
	T6	≅ 0,05	≅ 0,2

A Figura 40 mostra corpos de prova de alumínio submetidos ao ensaio do tubo cônico com diferentes deformações realizadas por Britto em 2006.

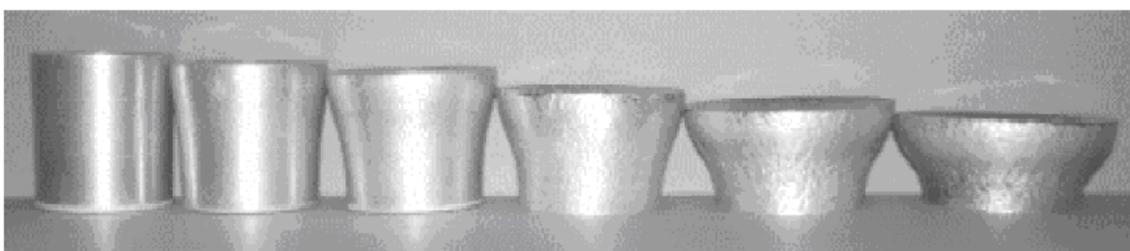


Figura 40: Corpos de prova dos ensaios do tubo cônico (Britto, 2006).

A Tabela 13 apresenta as condições dos ensaios realizados por Britto em 2006 para determinação do fator de atrito através do ensaio do anel e do tubo cônico.

Tabela13: Condições dos ensaios realizados para determinação do fator de atrito.

Tipo de ensaio	Lubrificação nas ferramentas	Lubrificação no corpo de prova	Condição do material	Deformação aplicada: $-\left(\frac{h-h_0}{h_0}\right)$
Anel	Aerodag G	não	Recozido	0,18 0,37 0,56 *
			T4	0,18 0,37 0,56 *
			T6	0,18 0,37 0,56 *
Tubo cônico	Aerodag G	não	Recozido	0,22 0,44 *
			T4	0,14 0,27 *
			T6	0,11 0,22 *
Tubo cônico	Aerodag G	MoS <sub>2</sub>	Recozido	0,22 0,44 *
		T4	0,14 0,27 *	
		T6	0,11 0,22 *	

\* Deformação máxima onde o material começa a apresentar fissuras.

## 2.6 Anova

Conforme Werkema e Aguiar (1996), 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.

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

Quadro 2: Análise de variância de fator único

Este procedimento de teste é usualmente sumarizado em uma tabela de análise de variância semelhante ao quadro 2. As formulas mais adequadas para o cálculo das somas de quadrados apresentadas por Werkema e Aguiar (1996) nesta tabela são dadas por:

Soma de quadrados:

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

$$SQE = \sum_{i=1}^k \frac{x_{i.}^2}{n} - \frac{x_{..}^2}{kn}$$

$$SQR = SQT - SQE$$

Onde:

SQE = soma de quadrados entre experimentos;

SQR = soma de quadrados residuais;

SQT = soma dos quadrados total

Quadrados médios:

$$QME = \frac{SQE}{k - 1}$$

$$QMR = \frac{SQR}{k(n - 1)}$$

Onde:

QME = Quadrados médios entre experimentos

QMR = 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  $\sigma$ , gerando uma confiabilidade de 0,95 ou 95%.

### 3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

#### 3.1 Ensaio do Anel em Alumínio

A partir de barras comerciais da liga de alumínio AA6351, foram confeccionados corpos de prova em formato anelar com dimensões conforme mostra a Figura 41.

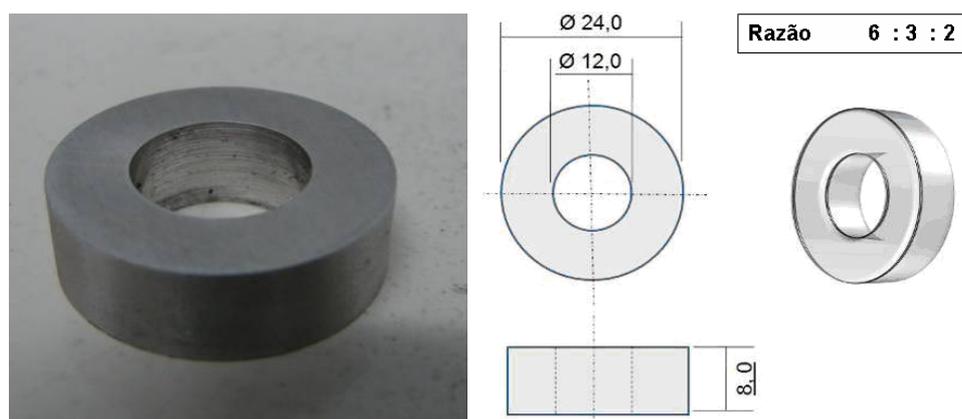


Figura 41: (Esq.) Corpo de prova utilizado (Dir.) Dimensões dos corpos de prova

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 grafitado diluído em água e (b) lubrificante sintético a base de poliamida.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM)/UFRGS, utilizando-se uma prensa hidráulica com capacidade de 40 toneladas, com velocidade de deformação de 7 mm/s, a temperatura ambiente. A prensa foi controlada por um limitador de altura por fim de curso e com calibre de deformação nos valores de 20%, 40%, 60%. A compressão foi realizada com duas matrizes cerâmicas de faces polidas, como mostra a Figura 42. A pressão foi verificada diretamente no manômetro da prensa para cada corpo de prova conformado.



Figura 42: Matrizes cerâmicas de Zircônia.

Foi aplicada uma fina película de lubrificante nas faces das bases, visando reduzir o atrito interfacial com o mesmo. Ao todo, 36 ensaios foram realizados, sendo dezoito com o lubrificante (a) grafite a base de água e dezoito com o lubrificante (b) sintético a base de poliamida. 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. (1) e (2). Para verificar a variação do diâmetro interno, utiliza-se a eq. (1).

$$\Delta\phi = -100 \cdot \left( \frac{D - D_0}{D_0} \right) \quad (\text{eq. 1})$$

Onde  $\Delta\emptyset$ , D, D0 correspondem, respectivamente, a variação do diâmetro interno, diâmetro final e inicial. Para a verificação a variação da altura (h), utiliza-se a eq. (2).

$$\Delta h = -100 \cdot \left( \frac{h - h_0}{h_0} \right) \quad (\text{eq. 2})$$

Onde  $\Delta h$ , h e h0 correspondem, respectivamente, a variação da altura, altura final e inicial.

### 3.2 Ensaio do Anel em Titânio

Fizeram-se corpos de prova de liga de titânio Ti-6Al-4V com dimensões conforme mostra a (Figura 40), determinando um anel de **proporções 6:3:2** em número suficiente para ensaiar as condições de contato. Os ensaios foram realizados com temperaturas de 850°C e 950°C em uma prensa hidráulica de 40 KN no LdTM/UFRGS.

Para a compressão utilizou-se duas matrizes de material cerâmico de faces polidas, criando uma interface entre o material que está sendo conformado e as matrizes bem próximas da realidade de trabalho. Foram utilizados dois diferentes lubrificantes para os testes, sendo: (a) lubrificante grafitado diluído em água e (b) lubrificante sintético a base de poliamida.

Visando obter menor perda térmica utilizou-se um dispositivo confeccionado em aço ferramenta H13 denominado “copo quente”. O conjunto do dispositivo e o corpo de prova foram aquecidos a 850°C no primeiro ensaio e 950°C em um segundo ensaio. Ao todo foram realizados 18 ensaios, sendo nove com o lubrificante (a) e nove com o lubrificante (b) das quais nove com o lubrificante (a) e nove com o lubrificante (b). A Figura 43 mostra o dispositivo chamado de “Copo-quente”.

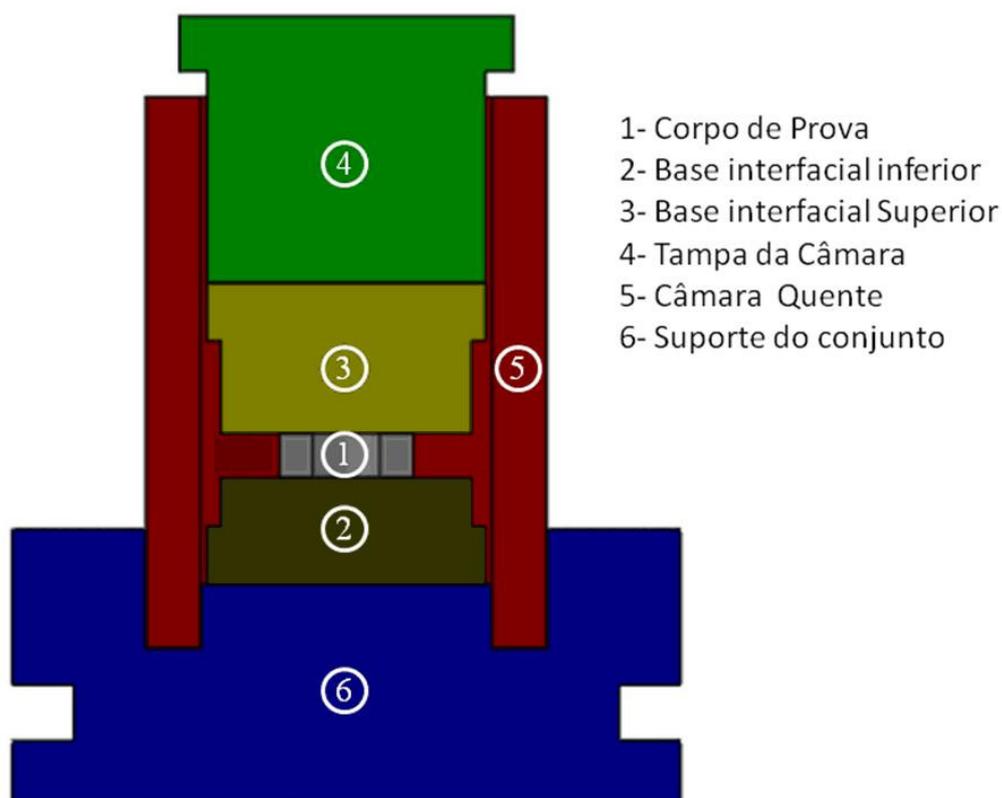


Figura 43: Desenho esquemático do dispositivo em aço ferramenta AISI H13

Os corpos de prova conformados foram medidos 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. Estas variações de altura ( $h$ ) e diâmetro ( $\emptyset$ ) são obtidas através das equações (1) e (2), igualmente ao ensaio do anel do alumínio.

### 3.3 Ensaios do Tubo cônico em alumínio

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. (3) e (4). Para verificar a variação do diâmetro interno, utiliza-se a Eq. (4).

$$\Delta\phi = \left( \frac{D - D_0}{D_0} \right) \quad (\text{eq. 3})$$

Onde  $\Delta\emptyset$ , D e D0 são respectivamente variação do diâmetro interno, diâmetro final e diâmetro inicial. Para a verificação a variação da altura (h), utiliza-se a Eq. (4).

$$\Delta h = - \left( \frac{h - h_0}{h_0} \right) \quad (\text{eq. 4})$$

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

Visando obter menor perda térmica utilizou-se um dispositivo confeccionado em aço ferramenta AISI H13, como está apresentando na Figura 44 denominado “copo quente”. O conjunto composto de dispositivo e corpo de prova foram no primeiro ensaio foi conformado uma amostra frio, que rompeu e o resto do ensaio foi a 450°C. Ao todo foram realizadas 9 conformações para a faixa de temperatura.



Figura 44: Dispositivo em aço ferramenta AISI H13 para conformação de alumínio.

### 3.4 Ensaios do Tubo cônico em Titânio

Fizeram-se corpos de prova de liga de titânio Ti-6Al-4V através do processo de torneamento como mostrado na Figura 45.



Figura 45: Corpo de prova utilizado

As dimensões utilizadas conforme mostra a Figura 46, em número suficiente para ensaiar as condições de contato, sendo a altura da amostra de 25mm, o diâmetro externo com 25mm e o diâmetro interno de 12,5mm, tendo um ângulo de contato de 15°.

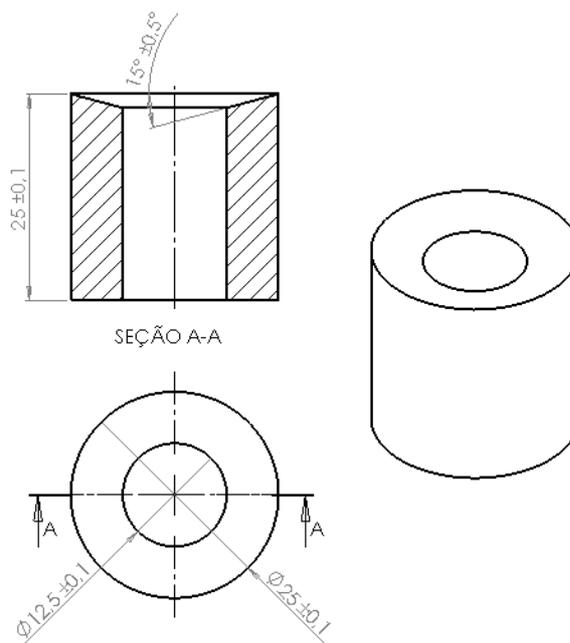


Figura 46: Dimensões dos corpos de prova

Os ensaios foram realizados com temperaturas de 850°C e 950°C em uma prensa hidráulica de 40 Toneladas no LdTM/UFRGS. Para a compressão utilizou-se duas matrizes de material cerâmico de faces polidas. Foram utilizados dois diferentes lubrificantes para os testes - lubrificante de grafite a base de água e lubrificante sintético a base de poliamida.

Visando obter menor perda térmica utilizou-se um dispositivo confeccionado em aço ferramenta H13, como está apresentando na Figura 47 denominado “copo quente” com inserto de metal duro na base inferior para suportar os esforços de compressão. O conjunto dispositivo/corpo de prova foram aquecidos a 850°C no primeiro ensaio e 950°C em um segundo ensaio. Ao todo foram realizadas 18 conformações para cada faixa de temperatura, das quais 50% com cada um dos lubrificantes.

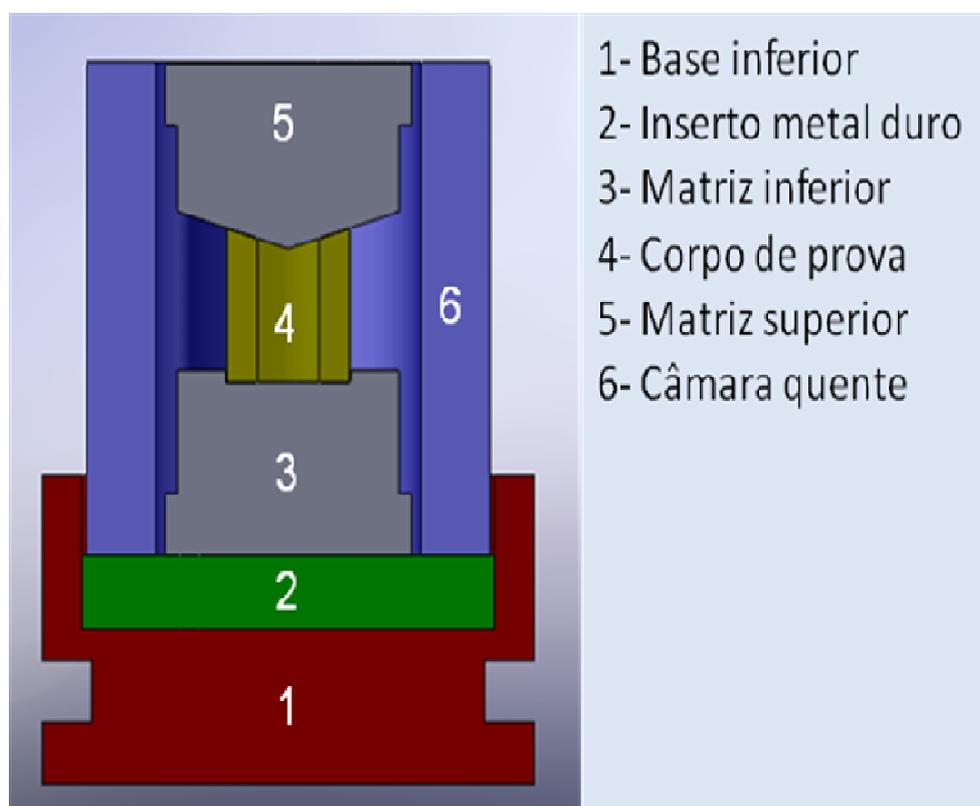


Figura 47: Desenho esquemático do dispositivo denominado “Copo-quente”.

A Figura 48 apresenta o dispositivo para o ensaio do tubo cônico utilizados nas deformações do tubo de titânio para determinar o coeficiente de atrito, onde é possível visualizar a primeira versão do “copo-quente” com as matrizes de cerâmicas o tubo metálico e as tampas que calibram o percentual de deformação do tubo de titânio.



Figura 48: Dispositivo denominado “Copo-quente”.

A Figura 49 mostra o novo dispositivo para o ensaio do tubo cônico utilizados nas deformações do tubo de titânio para determinar o coeficiente de atrito, onde é possível visualizar o inserto de metal duro inserido na matriz de aço ferramenta AISI H13.



Figura 49: Dispositivo final do “Copo-quente”.

A Figura 50 (esquerda) exibe o dispositivo aquecido saindo do forno e sendo direcionado para a realização do ensaio do tubo cônico utilizados nas deformações do tubo de titânio para determinar o coeficiente de atrito. A Figura 50 (direita) mostra o dispositivo instalado na prensa, sendo posto a tampa de calibração para a realização do ensaio.



Figura 50: (Esq.) Dispositivo saindo do forno e (Dir.) dispositivo colocado na prensa.

A Figura 51 (esquerda) exibe o dispositivo aquecido instalado na prensa pronto para a realização do ensaio. A Figura 51 (direita) mostra o dispositivo instalado na prensa durante a realização do ensaio de conformação do tubo cônico de titânio.

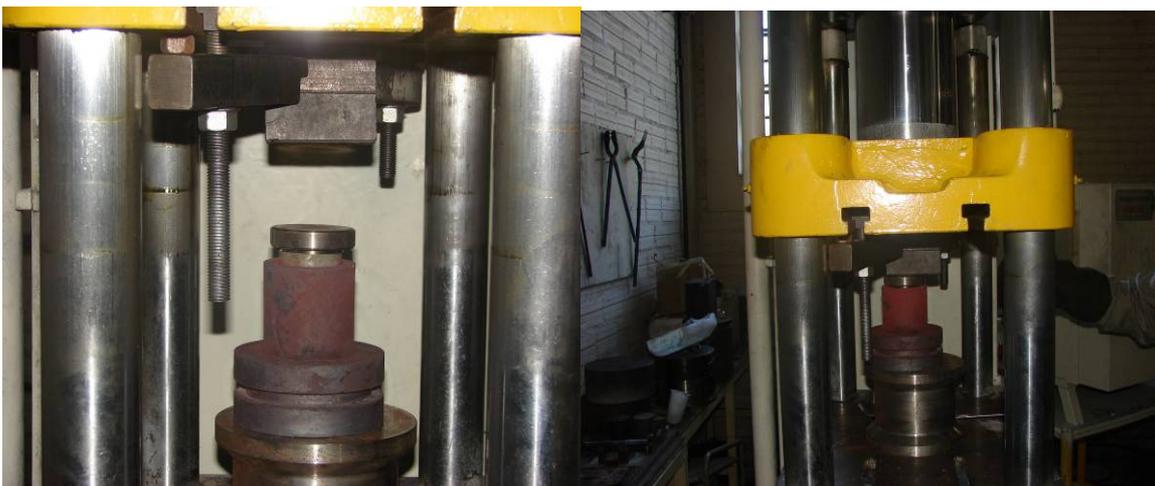


Figura 51: (Esq.) Dispositivo instalado na prensa e (Dir.) realização do ensaio.

A Figura 52 (esquerda) exibe a retirada da tampa de calibração do dispositivo aquecido após a realização do ensaio. A Figura 52 (direita) mostra a retirada do tubo metálico de aço AISI H13 do dispositivo após a realização do ensaio de conformação do tubo cônico de titânio.



Figura 52: (Esq.) Dispositivo instalado na prensa e (Dir.) realização do ensaio.

A Figura 53 (esquerda) apresenta, em um ângulo lateral, a retirada do tubo metálico de aço AISI H13 do dispositivo aquecido após a realização do ensaio do tubo cônico. A Figura 53 (direita) exhibe a matriz superior de cerâmica sobre o tubo de titânio conformado sobre a ferramenta inferior de cerâmica que está sobre o inserto de metal duro inserido na base inferior.



Figura 53: (Esq.) Retirada do tubo de aço e (Dir.) matrizes e o tubo conformado.

A Figura 54 (esquerda) apresenta a retirada da matriz superior de cerâmica do dispositivo após a realização do ensaio do tubo cônico de titânio. A Figura 54 (direita) exhibe a retirada do tubo cônico de titânio conformado.



Figura 54: (Esq.) Retirada da matriz superior e (Dir.) retirada do tubo conformado.

A Figura 55 (esquerda) apresenta a matriz inferior de cerâmica do dispositivo após a realização do ensaio do tubo cônico de titânio. A Figura 55 (direita) exhibe o tubo de titânio conformado.



Figura 55: (Esq.) Matriz inferior sobre a base e (Dir.) Tubo de titânio conformado.

### 3.6 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. A Figura 56a ilustra os modelos geométricos em 2D do processo e a Figura 56b mostra a malha de elementos gerada.

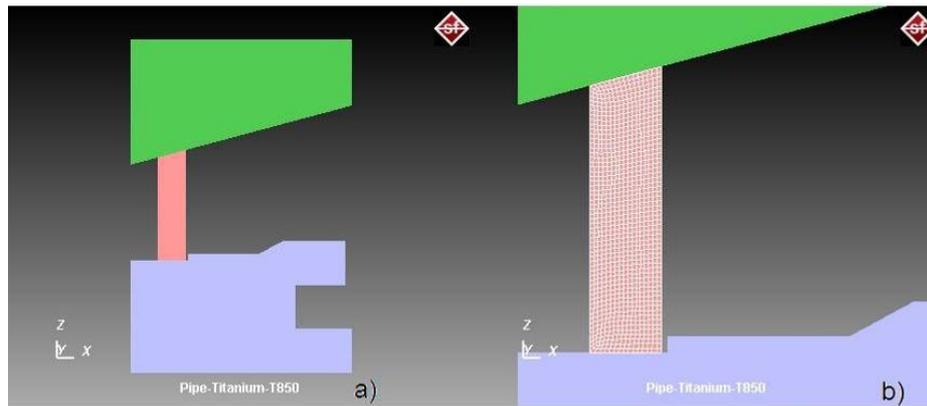


Figura 56: Análise de elementos finitos para da peça (a) e para análise das matrizes (b).

As propriedades da liga de titânio Ti6Al4V foram inseridas no modelo de simulação utilizando o material disponível no banco de dados do Simufact Materials, conforme pode ser visto na Figura 57. As matrizes foram configuradas rígidas, assim, não é necessário especificar material para as ferramentas.

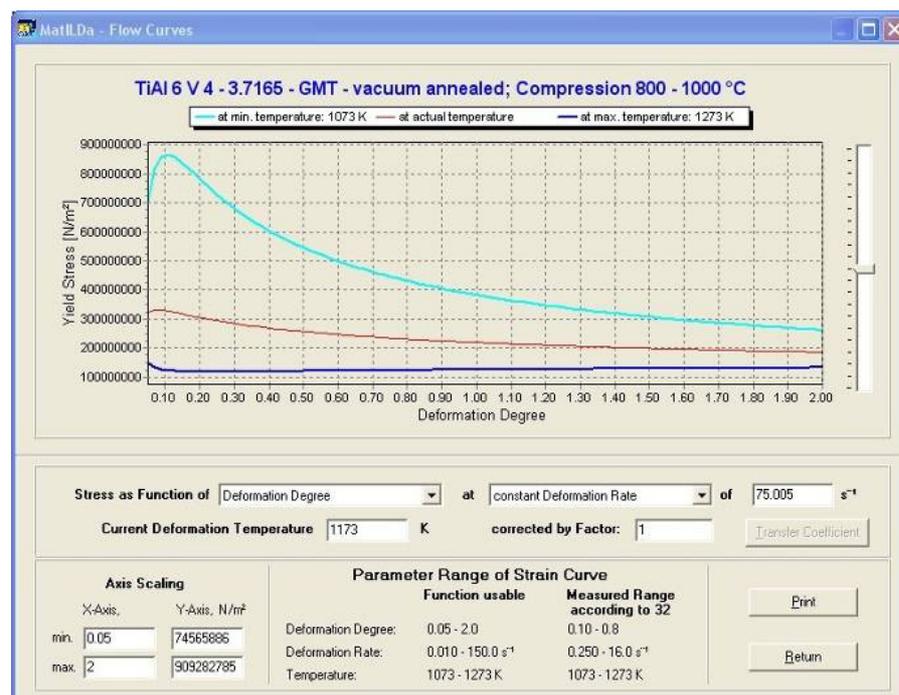


Figura 57: Propriedades mecânicas da liga Ti6Al4V do banco de dados do Simufact Materials.

Foram criados dois modelos com temperaturas diferentes: 850 °C e 950 °C. As matrizes e o tubo foram configurados com a mesma temperatura. Em ambos os modelos a matriz inferior é fixa e a superior movimenta-se com velocidade constante de 3,5 mm/s. O valor do coeficiente de atrito para cada modelo foi determinado no procedimento experimental, sendo de 0,05 para ambas as faixas de temperatura.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Ensaio do Anel

Para a avaliação o ensaio do anel é de extrema importância a obtenção de curvas de calibração, que tem a função de quantificar em valores numéricos o atrito.

#### 4.1.1 Curvas de calibração obtidas por simulação para o ensaio do anel

A partir de software de simulação por análise de elementos finitos estipulam-se valores de atrito e realiza-se a simulação e traçam-se as curvas de calibração como pode ser vista na Figura 58, que exibe a curva de calibração teórica para a liga de titânio Ti6Al4V para a temperatura de 850°C.

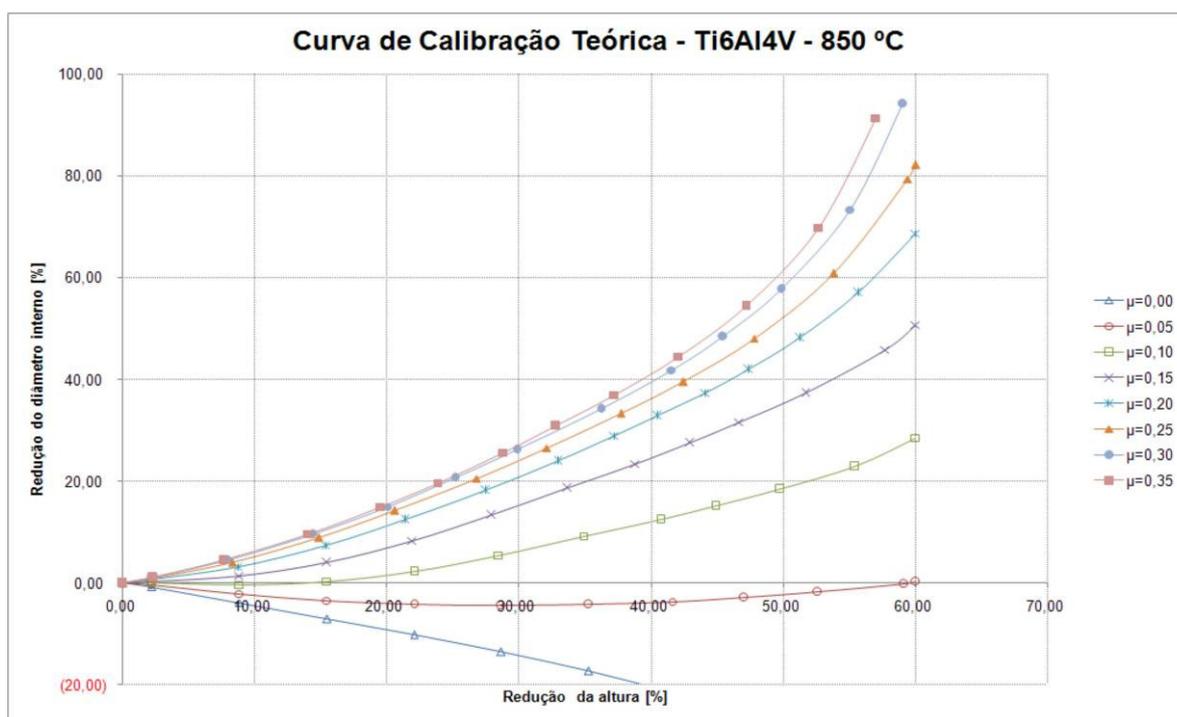


Figura 58: Curva teórica de calibração da liga de titânio Ti6Al4V a 850°C.

Na Figura 58 é possível observar que a primeira curva inicia com atrito de  $\mu=0,0$ , e que o atrito e a relação da deformação do diâmetro interno em função da redução da altura. Na Figura 59 temos as curvas de calibração que mostra a curva de calibração teórica para a liga de titânio Ti6Al4V para a temperatura de 950°C.

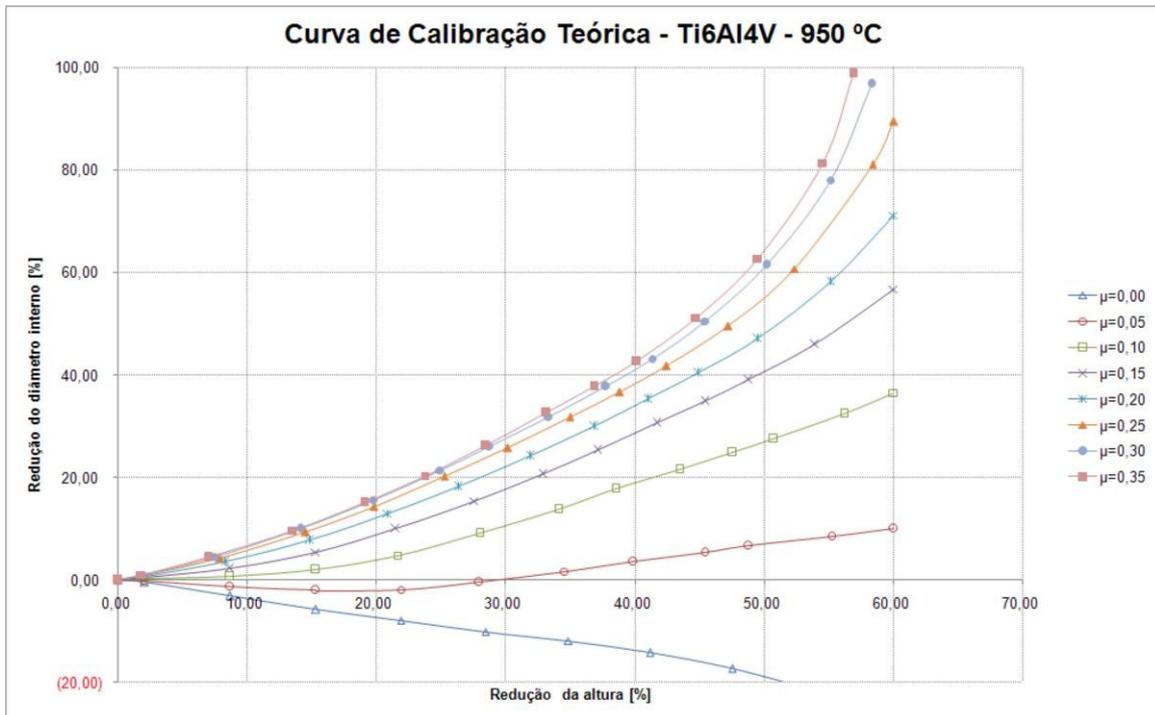


Figura 59: Curva teórica de calibração da liga de titânio Ti6Al4V a 950°C.

#### 4.1.2 Ensaio do Anel em Alumínio

Os pontos obtidos no ensaio foram dispostos na Figura 60, sobre curvas simuladas para as situações propostas com os dois lubrificantes. É possível identificar os resultados encontrados nos experimentos com a utilização do lubrificante sintético e do grafite a base de água para o alumínio em temperatura ambiente

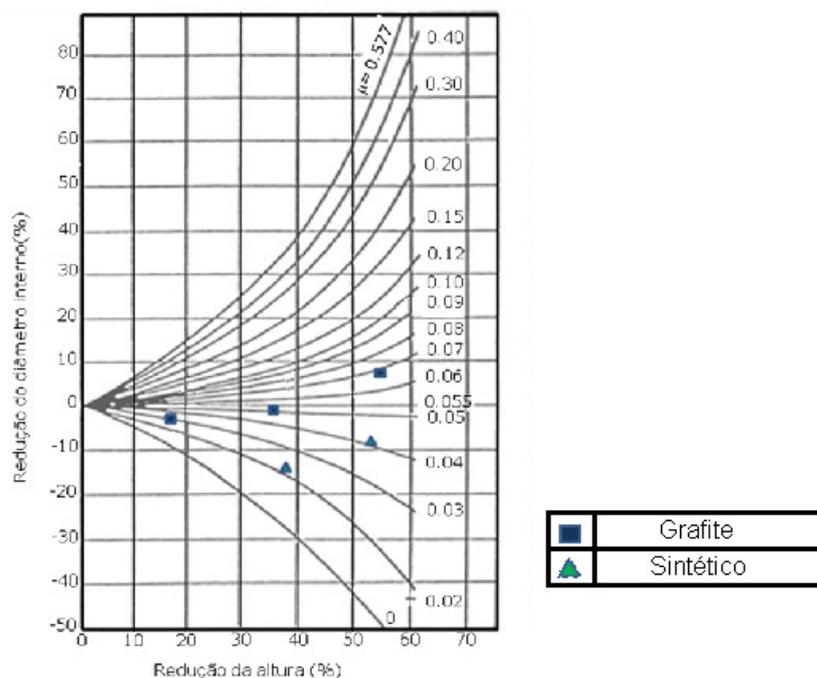


Figura 60: Pontos obtidos para  $\mu$  em temperatura ambiente.

A Figura 60 apresenta o lubrificante de grafite a base de água apresentou a condição inferior em relação a lubrificação durante o processo de conformação. A melhor lubrificação foi obtida pelo lubrificante sintético. As características de cada lubrificante, como a composição química e densidade em função das condições de trabalho influenciam diretamente nos resultados obtidos.

#### 4.1.3 Ensaio do Anel em Titânio

Os pontos obtidos no ensaio foram dispostos nas Figuras 61 e 62, sobre curvas simuladas para as situações propostas com os três lubrificantes.

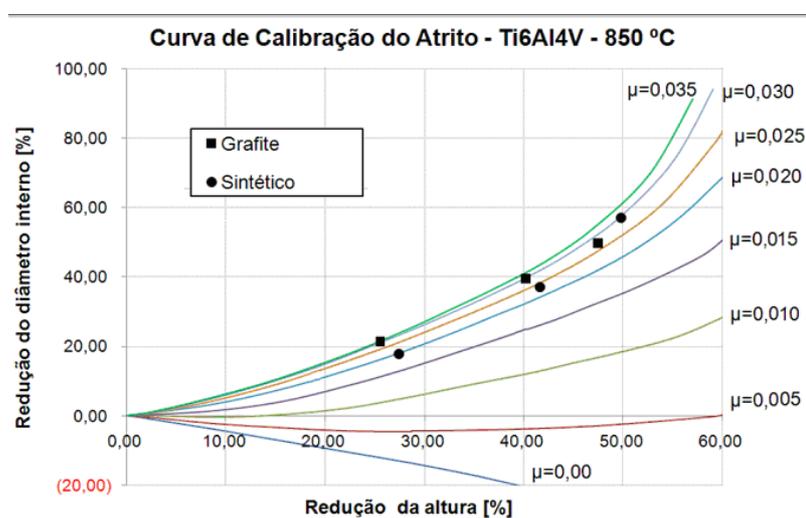


Figura 61: Pontos obtidos para  $\mu$  a 850°C

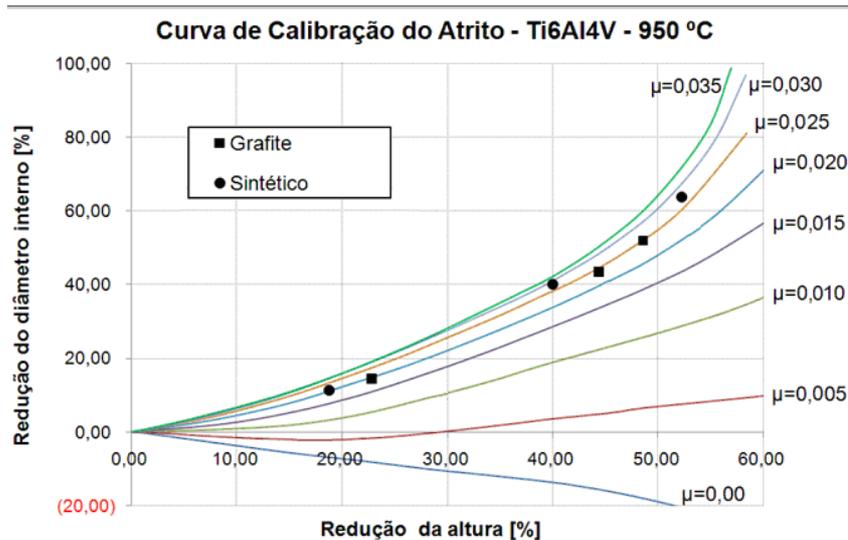


Figura 62: Pontos obtidos para  $\mu$  a 950°C

Os coeficientes de atrito encontrados através das curvas de calibração são em função da variação percentual do diâmetro interno e da altura. O ensaio do anel mostra que os

lubrificantes testados em ambas as faixas de temperatura apresentaram-se dentro do esperado conforme as curvas simuladas para deformações com redução entre 20 e 60%.

O lubrificante sintético a base de poliamida ensaiado a temperatura de 850°C, apresentou um elevação crescente no coeficiente de atrito, obtendo-se:  $\mu=0,020$  ;  $\mu=0,024$  e  $\mu=0,030$  para deformações de 27, 42 e 50% respectivamente. Quando ensaiado à 950°C, o comportamento foi pouco diferente, obtendo-se  $\mu=0,020$ ;  $\mu=0,027$  e  $\mu=0,028$  para deformações de 18, 40 e 53% respectivamente.

O lubrificante grafite a base de água ensaiado à 850°C, apresentou uma redução no coeficiente de atrito com o aumento da taxa de deformação, obtendo-se  $\mu=0,032$  ;  $\mu=0,030$  e  $\mu=0,027$  para deformações de 26, 41 e 47% respectivamente. Quando ensaiado à 950°C, o comportamento foi inverso, obtendo-se  $\mu=0,020$  ;  $\mu=0,024$  e  $\mu=0,025$  para deformações de 23, 44 e 49% respectivamente.

## 4.2 Ensaio do Tubo cônico

O ensaio do tubo cônico é outro método para avaliar o coeficiente de atrito e quantificar numericamente o mesmo para auxiliar nas simulações por análise de elementos finitos.

### 4.2.1 Dados obtidos para ensaio do tubo cônico

Para conhecer o comportamento do copo quente e a perda de temperatura descobrindo a viabilidade do ensaio determinou-se a curva de resfriamento do mesmo com está apresentado na Figura 63.

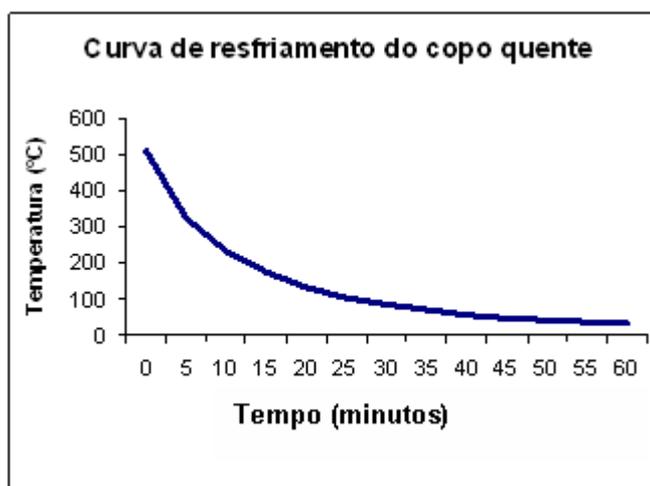


Figura 63: Curva de resfriamento do copo quente

Esta curva permite identificar que se o ensaio demorar cinco minutos haverá uma perda de 150°C, isto mostra uma taxa de resfriamento do conjunto de 30°C/min. A Figura 64 apresenta o comportamento do copo quente e a perda de temperatura para descobrir a viabilidade do ensaio determinando-se a curva de resfriamento do mesmo.

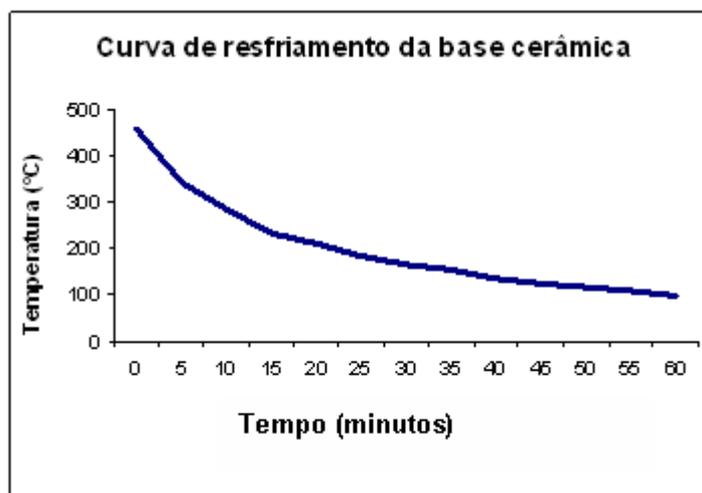


Figura 64: Curva de resfriamento do matriz cerâmica.

A Figura 64 apresenta a de resfriamento da matriz cerâmica, que permite identificar a taxa de resfriamento do conjunto de 10°C/min. apresentando uma condição mais favorável para o ensaio do titânio ser isotérmico.

#### 4.2.2 Ensaio do Tubo cônico em alumínio

O objetivo inicial era repetir o ensaio do tubo nas mesmas condições do anel para comparar o melhor método para determinação do coeficiente de atrito, porém o tubo cônico de alumínio em temperatura rompeu, foi realizado recozimento no amostra e ensaiado novamente, a qual continuou rompendo como mostra na Figura 65.



Figura 65: Amostras obtidas pelo ensaio do tubo a temperatura ambiente

Os pontos obtidos no ensaio foram dispostos na Figura 66, sobre curvas simuladas para as situações propostas.

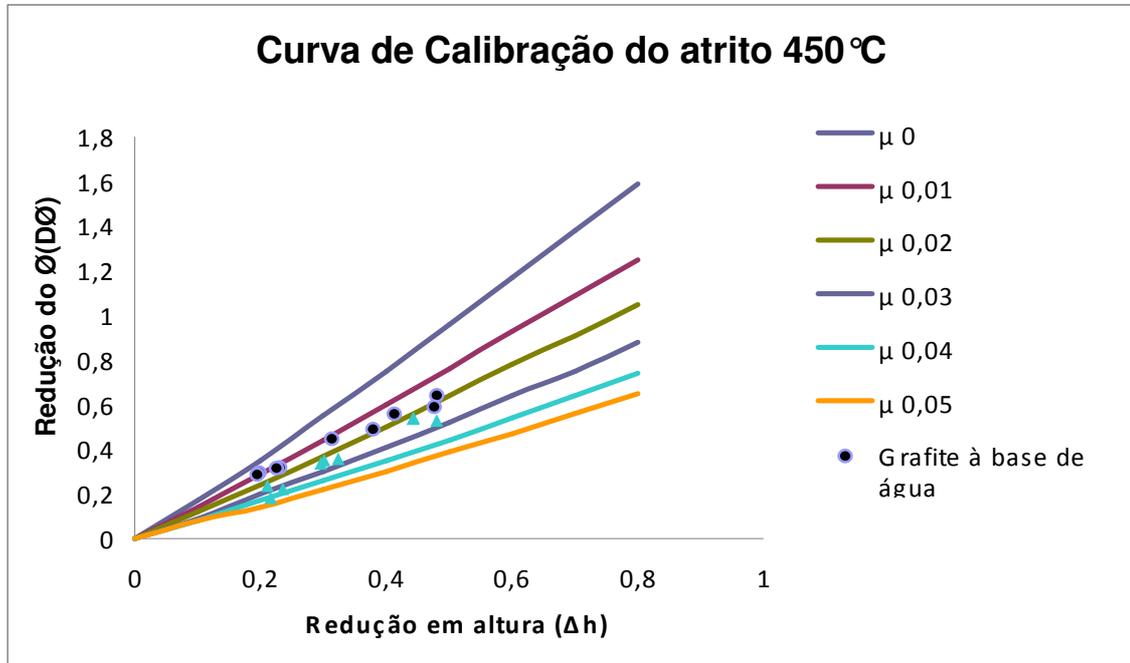


Figura 66: Pontos obtidos para  $\mu$  a 450 °C

Os corpos de prova ensaiados foram recortados transversalmente ao diâmetro visando comparar a geometria final com os corpos simulados a 450 °C (Figuras 67 a 69).

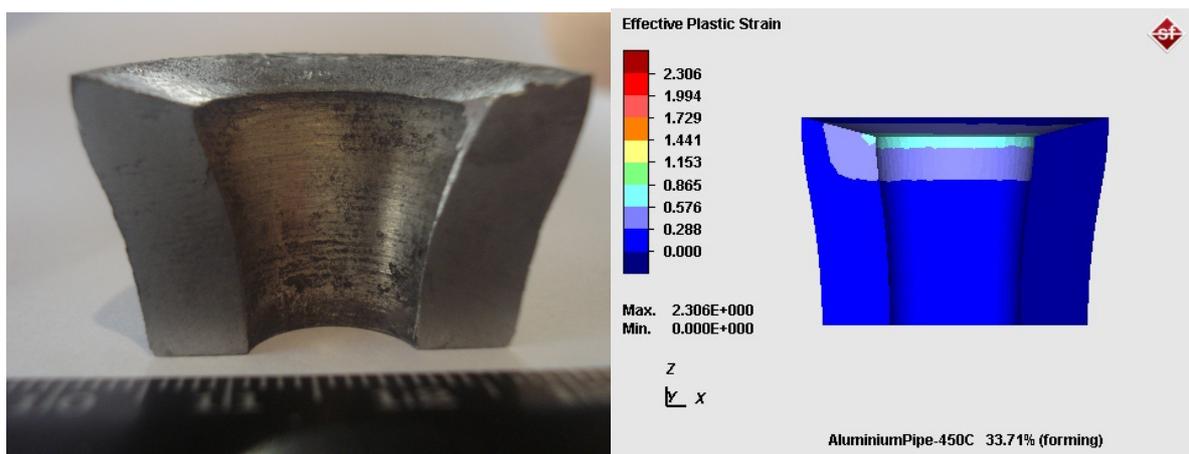


Figura 67: (Esq.) 20 % deformação à 450 °C (Dir.) simulado 20% deformação à 450 °C

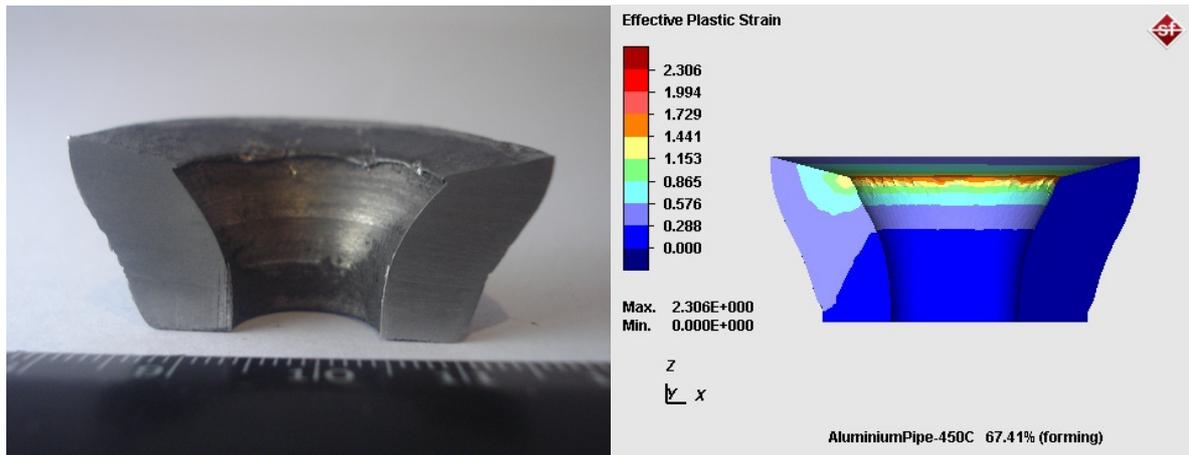


Figura 68: (Esq.) 40 % deformação à 450°C (Dir.) simulado 40% deformação à 450°C

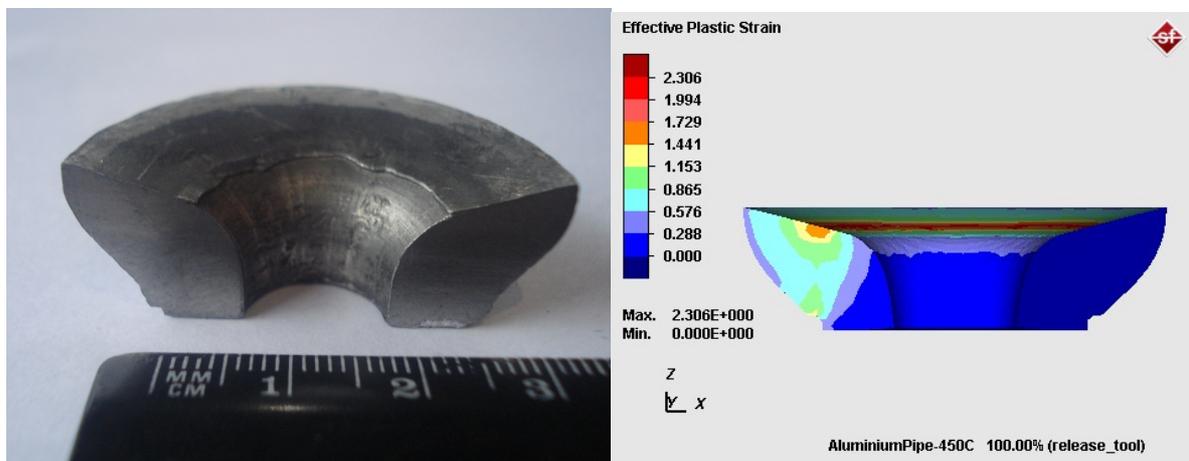


Figura 69: (Esq.) 60 % deformação à 450°C (Dir.) simulado 60% deformação à 450°C

#### 4.2.2.1 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 14 a 16, logo abaixo.

Tabela 14: Valores de  $\mu$  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 15: 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 16: 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”.

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

#### 4.2.3 Ensaio do Tubo cônico em Titânio

Os pontos obtidos no ensaio foram dispostos nas Figuras 70 e 71, sobre curvas simuladas para as situações propostas.

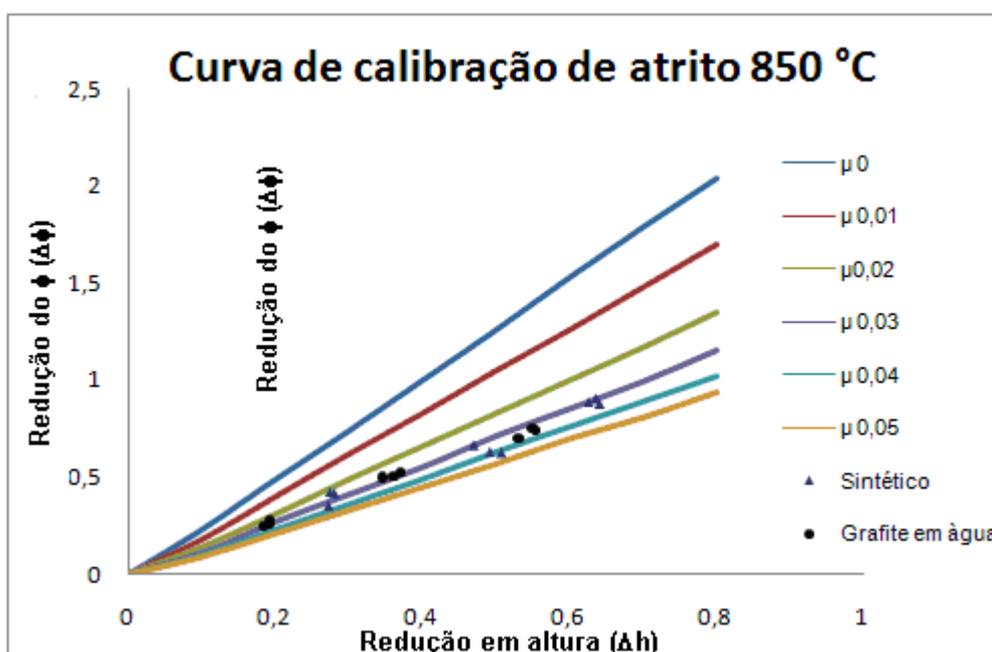


Figura 70: Curva obtida para  $\mu$  a 850°C

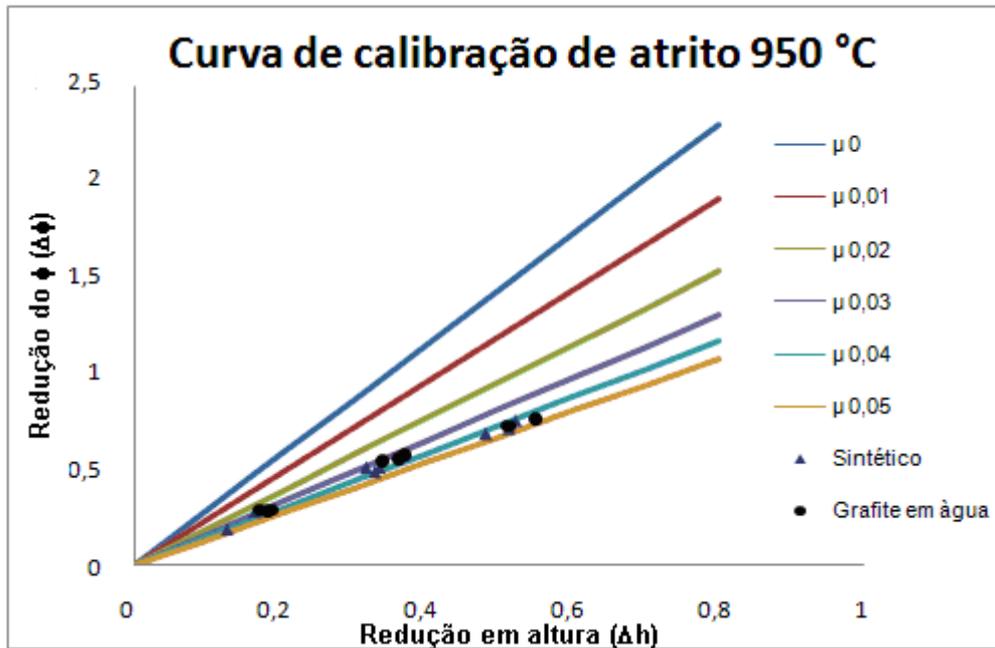


Figura 71: Pontos obtidos para  $\mu$  a 950°C

Os corpos de prova ensaiados foram recortados transversalmente ao diâmetro visando comparar a geometria final com os corpos simulados a 850°C (Figuras 72 a 74).

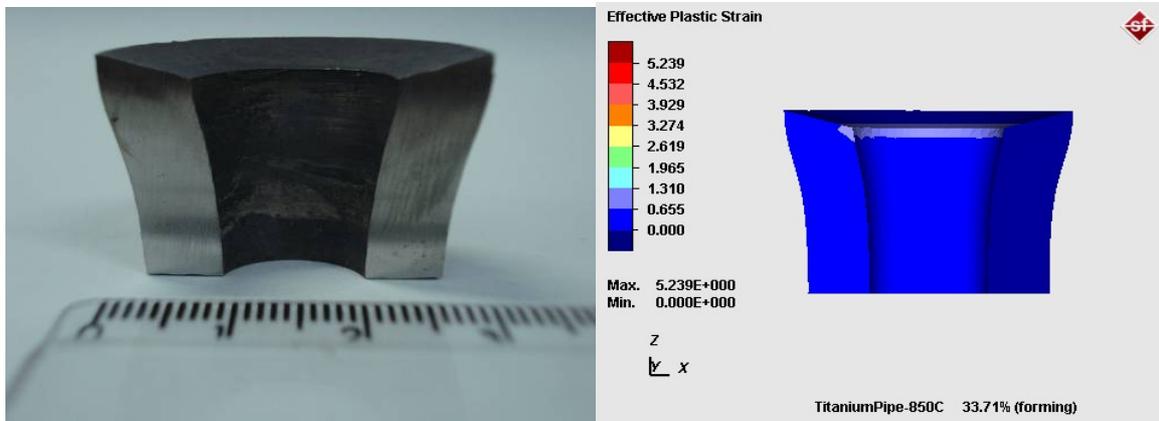


Figura 72: (Esq.) Ensaio em torno de 20% à 850 °C; (Dir.) Simulação de 20% à 850°C

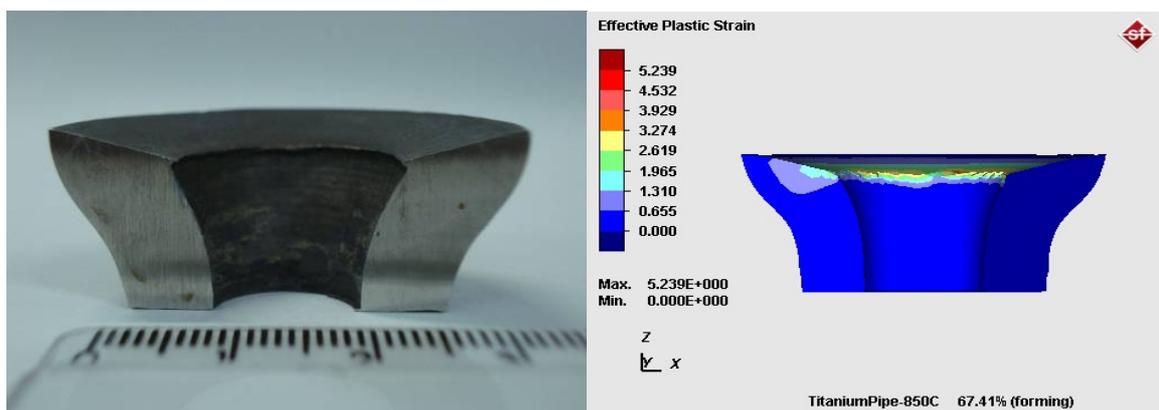


Figura 73: (Esq.) Ensaio em torno de 40% à 850 °C; (Dir.) Simulação de 40% à 850 °C

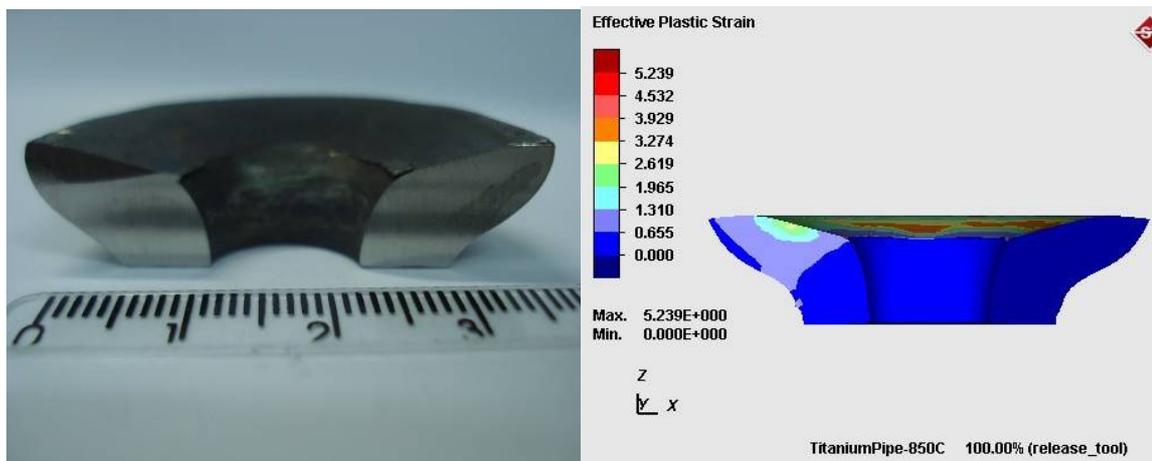


Figura 74: a) Ensaio em torno de 60% à 850 °C; b) Simulação de 60% à 850 °C

Os corpos de prova ensaiados foram recortados transversalmente ao diâmetro visando comparar a geometria final com os corpos simulados a 950°C (Figuras 75 a 77).

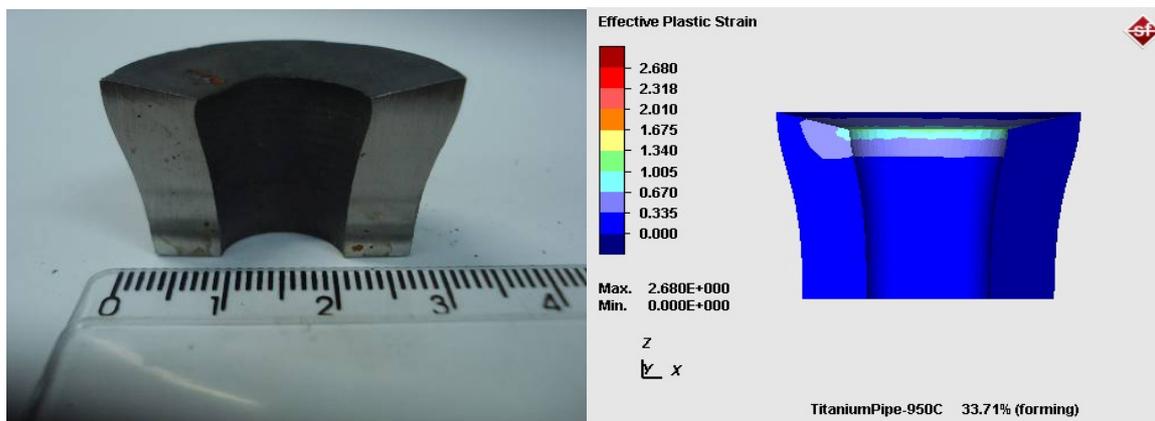


Figura 75:(Esq.) Ensaio em torno de 20% à 950 °C;(Dir.) Simulação de 20% à 950 °C

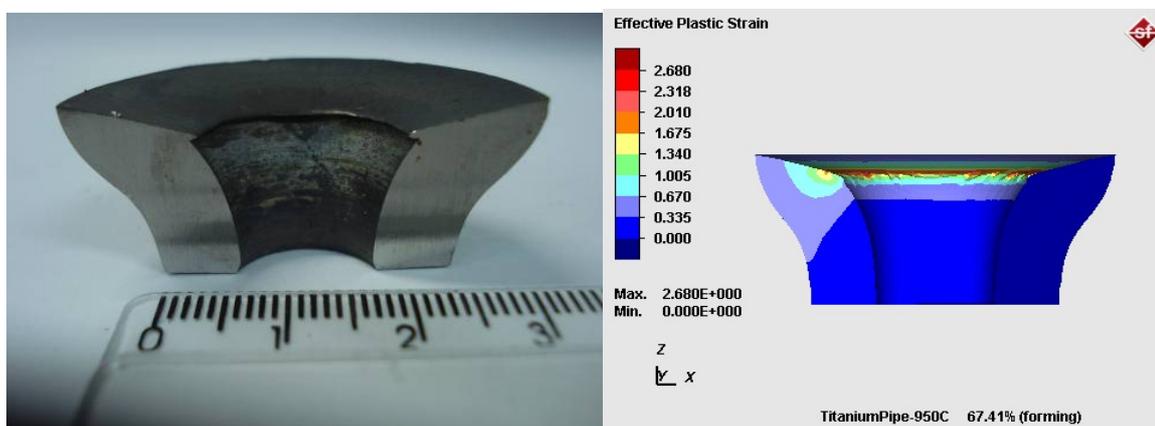


Figura 76: (Esq.) Ensaio em torno de 40% à 950 °C; (Dir.) Simulação de 40% à 950 °C

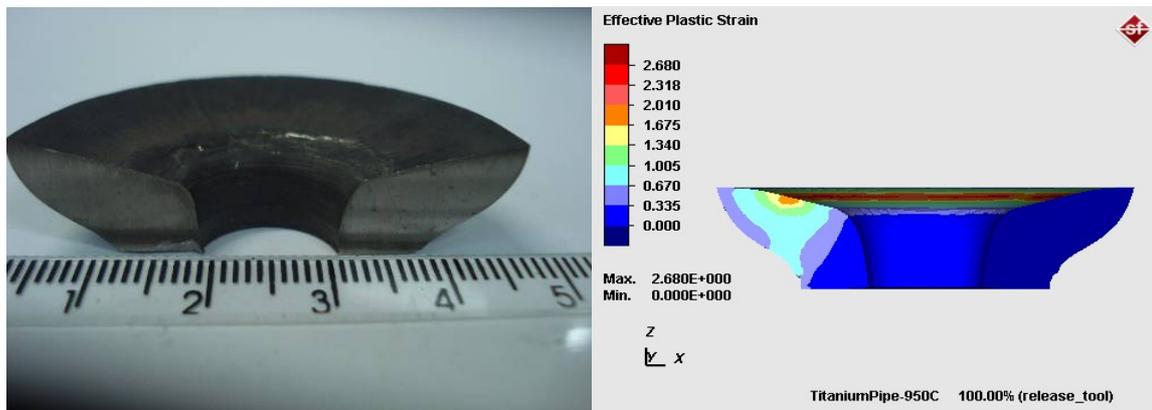


Figura 77: (Esq.) Ensaio em torno de 60% à 950 °C; (Dir.) Simulação de 60% à 950 °C

Os coeficientes de atrito encontrados através das curvas de calibração são em função da variação do diâmetro externo e da altura. O ensaio do tubo cônico mostra que os lubrificantes testados em ambas as faixas de temperatura apresentaram-se dentro do esperado conforme as curvas simuladas para deformações com redução entre 20 e 60%, verificam-se no Quadro 3 os valores obtidos experimentalmente.

Lubrificante	Sintético		Grafite	
	850°C	950°C	850°C	950°C
Faixa de deformação $\epsilon_h$ (%) 55 – 65	0,033	0,044	0,037	0,046
	0,030	0,048	0,032	0,045
	0,031	0,045	0,038	0,042
35 - 45	0,043	0,040	0,029	0,034
	0,040	0,043	0,030	0,036
	0,030	0,033	0,028	0,031
15 - 25	0,028	0,030	0,025	0,040
	0,024	0,035	0,030	0,040
	0,036	0,048	0,030	0,030

Quadro 3: Valores para  $\mu$  obtidos experimentalmente

De acordo com os resultados obtidos nos experimentos, foi possível validar o modelo de simulação numérica dos ensaios, visto que as geometrias possuem a mesma forma, para os valores e faixas de temperatura testados.

### 4.2.3.1 Análise estatística

Após realizar os ensaios e plotar os valores obtidos nas curvas de calibração no Quadro 3, visando objetivar o trabalho foi realizada a análise estatística dos dados em grupos distintos, mantendo um valor fixo a fim de simplificar a avaliação.

#### 4.2.3.1.1 Análise do tubo de Ti a 850°C

Abaixo apresentam-se as tabelas 17 a 19, com as observações do ensaio de tubo de Ti a 850°C, variando Lubrificante e Deformação.

Tabela 17: Valores de  $\mu$  para tubo de Ti a 850°C

% Deformação	Grafite	Sintético
60	0,037	0,033
	0,032	0,030
	0,038	0,031
40	0,029	0,043
	0,030	0,040
	0,028	0,030
20	0,025	0,028
	0,030	0,024
	0,030	0,036

Tabela 18: Resumo da análise de variância para tubo de Ti a 850°C – Lubrificante X

	Deformação		
RESUMO	Grafite	Sintético	Total
60			
Contagem	3	3	6
Soma	0,107	0,094	0,201
Média	0,035667	0,031333	0,0335
Variância	1,03E-05	2,33E-06	1,07E-05
40			
Contagem	3	3	6
Soma	0,087	0,113	0,2
Média	0,029	0,037667	0,033333
Variância	1E-06	4,63E-05	4,15E-05
20			
Contagem	3	3	6
Soma	0,085	0,088	0,173
Média	0,028333	0,029333	0,028833

Variância	8,33E-06	3,73E-05	1,86E-05
Total			
Contagem	9	9	
Soma	0,279	0,295	
Média	0,031	0,032778	
Variância	1,73E-05	3,57E-05	

Tabela 19: Análise de variância - ANOVA ( $\sigma = 5\%$ ) - Ti a 850°C – Lubrificante X  
Deformação

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	8,41E-05	2	4,21E-05	2,388013	0,133953	3,885294
Colunas	1,42E-05	1	1,42E-05	0,807571	0,386516	4,747225
Interações	0,000128	2	6,41E-05	3,637224	0,058237	3,885294
Dentro	0,000211	12	1,76E-05			
Total	0,000438	17				

Observando os resultados obtidos através da ANOVA, pode-se concluir que as variações dos valores de deformação e lubrificante não impõem uma alteração estatisticamente significativa em toda a distribuição para Ti a 850°C, pois em todas as linhas o Valor de “F” ficou menor que “F crítico”. Em resumo, nesta faixa de temperatura, não pode-se considerar significativo as alterações dos valores de  $\mu$  obtidos nos experimentos.

#### 4.2.3.1.2 Análise do tubo de Ti a 950°C

Abaixo apresentam-se as tabelas 20 a 22, com as observações do ensaio de tubo de Ti a 950°C, variando Lubrificante e Deformação.

Tabela 20: Valores de  $\mu$  para tubo de Ti a 950°C

% Deformação	Grafite	Sintético
60	0,046	0,044
	0,045	0,048
	0,042	0,045
40	0,034	0,040
	0,036	0,043
	0,031	0,033

	0,040	0,030
20	0,040	0,035
	0,030	0,048

Tabela 21: Resumo da análise de variância para tubo de Ti a 950°C – Lubrificante X

Deformação			
RESUMO	Grafite	Sintético	Total
60			
Contagem	3	3	6
Soma	0,133	0,137	0,27
Média	0,044333	0,045667	0,045
Variância	4,33E-06	4,33E-06	0,000004
40			
Contagem	3	3	6
Soma	0,101	0,116	0,217
Média	0,033667	0,038667	0,036167
Variância	6,33E-06	2,63E-05	2,06E-05
20			
Contagem	3	3	6
Soma	0,11	0,113	0,223
Média	0,036667	0,037667	0,037167
Variância	3,33E-05	8,63E-05	4,82E-05
Total			
Contagem	9	9	
Soma	0,344	0,366	
Média	0,038222	0,040667	
Variância	3,37E-05	4,35E-05	

Tabela 22: Análise de variância - ANOVA ( $\sigma = 5\%$ ) - Ti a 950°C – Lubrificante X

Deformação						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	0,000281	2	0,00014	5,231884	0,023238	3,885294
Colunas	2,69E-05	1	2,69E-05	1,00207	0,336569	4,747225
Interações	1,48E-05	2	7,39E-06	0,275362	0,763967	3,885294
Dentro	0,000322	12	2,68E-05			
Total	0,000644	17				

Observando os resultados obtidos através da ANOVA, podemos concluir que somente a alteração do valor de Deformação, linha “Amostra”, apresentou uma variação

estatisticamente significativa para os grupos, não tendo o lubrificante influenciado no teste. Neste caso o valor de deformação 40% obteve os menores valores para  $\mu$ .

#### 4.2.3.1.3 Análise do tubo de Ti com lubrificante Grafite

Abaixo apresentam-se as tabelas 23 a 25, com as observações do ensaio de tubo de Ti com lubrificante Grafite, variando Temperatura e Deformação.

Tabela 23: Valores de  $\mu$  para tubo de Ti com lubrificante Grafite

% Deformação	850°C	950°C
60	0,037	0,046
	0,032	0,045
	0,038	0,042
40	0,029	0,034
	0,030	0,036
	0,028	0,031
20	0,025	0,040
	0,030	0,040
	0,030	0,030

Tabela 24: Resumo da análise de variância para tubo de Ti com lubrificante Grafite –

Temperatura X Deformação

RESUMO	850°C	950°C	Total
60			
Contagem	3	3	6
Soma	0,107	0,133	0,24
Média	0,035667	0,044333	0,04
Variância	1,03E-05	4,33E-06	2,84E-05
40			
Contagem	3	3	6
Soma	0,087	0,101	0,188
Média	0,029	0,033667	0,031333
Variância	1E-06	6,33E-06	9,47E-06
20			
Contagem	3	3	6
Soma	0,085	0,11	0,195
Média	0,028333	0,036667	0,0325
Variância	8,33E-06	3,33E-05	3,75E-05

Total		
Contagem	9	9
Soma	0,279	0,344
Média	0,031	0,038222
Variância	1,73E-05	3,37E-05

Tabela 25: Análise de variância - ANOVA ( $\sigma = 5\%$ ) - Ti com lubrificante Grafite –  
Temperatura X Deformação

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	0,000265	2	0,000133	12,50785	0,001161	3,885294
Colunas	0,000235	1	0,000235	22,12042	0,000511	4,747225
Interações	1,48E-05	2	7,39E-06	0,696335	0,517469	3,885294
Dentro	0,000127	12	1,06E-05			
Total	0,000642	17				

Após analisar a Tabela 25 Pode-se concluir que tanto a alteração de Temperatura quanto a de Deformação, linhas “Amostra” e “Colunas”, respectivamente, possuem diferenças estatisticamente significativas, visto o valor de “F” ser maior que “F crítico”. Novamente a deformação de 40% apresentou os menores valores para  $\mu$ .

#### 4.2.3.1.4 Análise do tubo de Ti com lubrificante Sintético

Abaixo apresentam-se as tabelas 26 a 28 com as observações do ensaio de tubo de Ti com lubrificante Sintético, variando Temperatura e Deformação.

Tabela 26: Valores de  $\mu$  para tubo de Ti com lubrificante Sintético

% Deformação	850°C	950°C
60	0,033	0,044
	0,030	0,048
	0,031	0,045
40	0,043	0,040
	0,040	0,043
	0,030	0,033
20	0,028	0,030
	0,024	0,035
	0,036	0,048

Tabela 27: Resumo da análise de variância para tubo de Ti com lubrificante Sintético –  
Temperatura X Deformação

RESUMO	850°C	950°C	Total
60			
Contagem	3	3	6
Soma	0,094	0,137	0,231
Média	0,031333	0,045667	0,0385
Variância	2,33E-06	4,33E-06	6,43E-05
40			
Contagem	3	3	6
Soma	0,113	0,116	0,229
Média	0,037667	0,038667	0,038167
Variância	4,63E-05	2,63E-05	2,94E-05
20			
Contagem	3	3	6
Soma	0,088	0,113	0,201
Média	0,029333	0,037667	0,0335
Variância	3,73E-05	8,63E-05	7,03E-05
Total			
Contagem	9	9	
Soma	0,295	0,366	
Média	0,032778	0,040667	
Variância	3,57E-05	4,35E-05	

Tabela 28: Análise de variância - ANOVA ( $\sigma = 5\%$ ) - Ti com lubrificante Sintético –  
Temperatura X Deformação

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	9,38E-05	2	4,69E-05	1,385878	0,287405	3,885294
Colunas	0,00028	1	0,00028	8,277504	0,013906	4,747225
Interações	0,000134	2	6,69E-05	1,977011	0,181078	3,885294
Dentro	0,000406	12	3,38E-05			
Total	0,000914	17				

Observando o a Tabela 28 pode-se concluir que apenas a variação de temperatura, linha “Colunas”, apresenta resultados estatisticamente significativos, visto o valor de “F” ser maior que “F crítico”. Nesta análise pode-se conferir que a temperatura de 850°C apresentou os menores valores para  $\mu$ .

## 5. CONCLUSÕES

Diante os resultados obtidos e discutidos neste trabalho pode-se concluir que os procedimentos experimentais do ensaio de compressão do anel e do ensaio de compressão do tubo cônico mostraram-se eficientes para a determinação do coeficiente de atrito  $\mu$ .

È de suma importância a correta adição dos dados e de propriedades dos materiais para a alimentação do software de simulação numérica computacional para obter dados confiáveis.

Com base nos experimentos realizados constata-se que o ensaio do anel tem o custo inferior ao ensaio do tubo cônico, visto que utiliza menor volume de material. Outra vantagem do ensaio do anel, quando comparado com o do tubo é a possibilidade de realização do mesmo a frio para caracterização de diversos materiais.

Em comparação aos dois métodos de ensaio para a obtenção do coeficiente de atrito da liga de alumínio AA6351 pode-se notar que os valores obtidos para  $\mu$  em temperatura ambiente e a 450°C mantiveram-se menores de que  $\mu=0,1$  abaixo do valor indicado em literatura que fica na faixa entre  $\mu=0,2$  e  $\mu=0,3$ .

Em ambos os ensaios para a determinação do coeficiente de atrito da liga de titânio Ti6Al4V, na temperatura de 850°C os valores de  $\mu$  para as deformações de 20 a 60% com lubrificante de grafite a base de água apresentaram similares em torno de  $\mu=0,03 \pm 0,005$ . Nesta mesma faixa de temperatura nota-se que o lubrificante sintético apresentou  $\pm 0,01$  de variabilidade para o coeficiente de atrito.

Para a faixa de 950°C o comportamento do grafite mostrou variação de + 0,02 no ensaio do tubo em relação ao ensaio do anel. Tendo este ultimo apresentando o valor de  $\mu=0,02$ . O comportamento do lubrificante sintético apresentou-se com a mesma variação dos valores de atrito descritos para o lubrificante de grafite.

A conclusão final deste trabalho é que os dois lubrificantes testados apresentaram desempenho satisfatório, devido à redução do contato interfacial da relação matriz/peça. E o ensaio do tubo cônico mostrou-se viável apenas para determinação a quente do coeficiente de atrito, neste caso o comportamento em ambos os ensaios é similar.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- 1- Avaliar o método do tubo cônico para as ligas de alumínio a partir de 200° até a temperatura de estado semi-sólido das ligas.
- 2- Estudar o comportamento de ensaio do anel e do tubo cônico em ligas ferrosas.
- 3- Determinar o coeficiente de atrito pelo método do ensaio do anel e do tubo cônico nas ligas de magnésio.
- 4- Avaliar o efeito da velocidade de deformação durante os ensaios do tubo cônico e do anel.
- 5- Realizar ensaios com a matriz em temperatura ambiente.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ADLOF, W. W., **Schmiedeteile aus Aluminium Legierungen**, Schimiede Journal, Março/1999, pg 16-20.

AGOSTINHO, O. L.; VILELLA, R. C.; BUTTON, S. T.. **Processos de Fabricação e Planejamento de Processos**. Faculdade de Engenharia Mecânica: Departamento de Engenharia de Fabricação e Departamento de Engenharia de Materiais. Universidade Estadual de Campinas, 2004. 98 p.

ALCAN - Alumínio do Brasil S/A. **Manual de Soldagem**. p. 10. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/manual-de-soldagem-pdf-a17648.html> Acesso em: 27/06/2009.145 p.

ALTAN, T.; OH, SI.; GEGEL, H. **Conformação de metais; Fundamentos e aplicações**. Tradução de Reginaldo Teixeira Coelho. São Carlos; EESC-USP. 1999. 350 p

ASM COMMITTEE ON FORMING OF TITANIUM ALLOYS. **Forming of Titanium and Titanium Alloys**. Asm Metals Handbook, V. 14: Forming And Forging, 9th Edition, 1989 p. 1836 - 1993.

AVITZUR, B.M. **Metal Forming: Process and analysis**, Ed. McGraw Hill Book Company, USA, 1968. p. 85-90

AZEVEDO, C. R. F. **Microestrutura do titânio e suas ligas para implantes cirúrgico**. Revista metalurgia e materiais, julho de 2003 p. 445 – 447.

BARBOSA, C., BASTIAN, F., ACSELRAD, O - **Efeito do Tratamento Térmico na Microestrutura e Dureza da Liga 6063 (Al-Mg-Si)**, Anais do 46 ° Congresso Anual da ABM, v.3, Setembro, 1991, p.177-188.

BATALHA, G. F. **Introdução a Manufatura Mecânica**, p. 10. 2003 Disponível em: <http://www.youblisher.com/p/77843-Forjamento-01/> Acesso em: 16/03/2010.

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.

BRAGA, L. F. **Simulação Computacional por Elementos Finitos do Processo de Forjamento em Matriz Fechada de Rodas SAE 4140 de Utilização em Pontes Rolantes**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. 2005. 128 p.

BRAGA, T. M. G. **Cronologia do uso dos metais**. Disponível em: <<http://www.metallica.com.br>>. Acesso em: 16/03/2010.

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.

CAMPANHA, M. V.; SINATORA, A. **Estudo sobre a vida útil de rolamentos fixos de uma carreira de esferas**. Disponível em: [www.mecanica-poliusp.org.br/05pesq/cont/pdf/809.pdf](http://www.mecanica-poliusp.org.br/05pesq/cont/pdf/809.pdf). Acesso em 27/06/2010.

CORDIER, H.; GRUHL, W. - **Beitrag zur Frage der Entmischung bei Al-Mg-Si Legierungen aufgrund Elektronmikroskopischer Beobachtungen**, Zeitschrift für Metallkunde, v.56, 1965, nº 10, p.669-674.

DONACHIE Jr., M.J.; **Titanium A Technical Guide**; ASM International, Metals Park, Ohio, USA, 1988, 469 p.

ESPINOZA, M. y SCHAEFFER, L.; **Utilización del cad/cae/cam en la fabricación de matrices para los nuevos procesos de conformación mecánica**. Rev. Inst. investig. Fac. minas metal cienc. geogr, jul./dic. 2004, vol.7, no.14, p.84-91. ISSN 1561-0888.

FERREIRA, R. A. S.; **Conformação Plástica: Fundamentos Metalúrgicos e Mecânicos**. Recife. Editora Universitária da UFPE, 2006. p 20-80.

FORGING HANDBOOK. Introduction and applications. In: BYRER, T. G. **Forging Handbook**. Cleveland: Forging Industry Association, 1985. p. 1-24.

GEIER, M. **Considerações sobre o Atrito para Processos de Forjamento a Frio através do Ensaio de Compressão do Anel**. Dissertação para Obtenção de Título de Mestre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – 2007. 82 p.

GILBERT, J.R.B. **The Uses of Titanium**, Materials Science and Technology, v.1, April, 1985, p. 257-262.

GOMES FILHO, T. S.; CARVALHO R. G.; e SILVA, C. L. M. **Alumínio fundido e ferro fundido. o que usar?** II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica João Pessoa - PB - Brasil 2007

GOMES, M. R. E BRESCIANI FILHO, E. **Propriedades e Usos de Metais Não-Ferrosos**, ABM, São Paulo, 1987.

HATCH, J. E. **Aluminum: Properties and Physical Metallurgy**. ASM, USA, 1984. p. 148-149.

HATCH, J.E., **Aluminum: Properties and Physical Metallurgy**. ASM, Metals Park, USA, 1990. ch. 9, 351-78

HELMAN, H.; CETLIN, P.R. **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**. Editora Guanabara Dois, 1983. 245 p.

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.

HORN, K.R.V. **Aluminum: Vol. III - fabrication and finishing**, 3. ed. Ohio: American Society for Metals, 1967.

HU, Z. M.; DEAN, T. A. **Aspects of forging of titanium alloys and the production of blade forms**. Journal of Materials Processing Technology, 2001. pg. 10 – 19.

HUTCHINGS, I.M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. 1992 273 p.

IVANIRA A. P., AGUIAR, F. E.C.; CODARO, E. N. E NAKAZATO, R. Z. **Influência do tratamento térmico e do pH no comportamento eletroquímico do Ti c.p. e da liga Ti - 6Al-4V**. 6° COTEQ - Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, 22° CONBRASCORR – Congresso Brasileiro de Corrosão Salvador – Bahia 19 a 21 de agosto de 2002.

JOST, H.P.. **Lubrication (Tribology) – A Report of the Present Position and Industry's Needs**, Department of Education and Science, H. M Stationary Office, London. 1966. 769 p.

KNOLL, P. K; SCHAEFFER, L.. **Análise analítica, numérica e experimental do forjamento a quente da liga Ti-6Al-4V**. XXVI SENAFOR – Porto Alegre – 2006.

KOLOSOSKI, J., FILHO, F.A. **Curso de Metalografia do Alumínio e Suas Ligas**. São Bernardo do Campo, FEI, 1994.

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,

KOVÁCS, J. et al. **The Effect of Preaging at Room Temperature on the Ageing Process of Al-Mg-Si Alloys**, Aluminium, v.50, 1974, n° 9, p.578-581.

KUHLMAN, G.W. **Aluminum Company of America**. ASM Metals Handbook, V. 14: Forming And Forging, 9th Edition. USA, 1993, p 531.

LANGE, K. **Modern Metal Forming Technology for industrial Production**. Journal of Materials Processing Technology, v. 71, n° 1, p.2 – 13, November 1997.

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.

LEE, Y.; KWON, Y.; LEE, J.; PARK, C. AND KIM, S. **Effects of strain and strain rate on tensile behavior of hot-forged Al 6061-T6**. Materials Science and Engineering A362 2003. p. 187–191 South Korea.

LENHARD JÚNIOR, A. L. **Análise da influência das propriedades do material e parâmetros do processo na simulação numérica do processo de forjamento**. Dissertação para Obtenção de Título de Mestre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – 2007. 78 p.

LIMA, D. R. S. de; SCHAEFFER, L. **Avaliação da Pré-forma para forjamento em liga de alumínio**. Revista Ferramental, p. 13 – 19. 2007.

LÜTJERING, G.; WILLIAMS, J. C. Titanium. **Engineering Materials and Processes**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg , 2007 - 2nd edition. Pg 1; 26; 27.

LÜTJERING, G.; WILLIAMS, J. C. Titanium. **Engineering Materials and Processes**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg , 2007 - 2nd edition. Pg 205.

LUTTS, A. **Pre-precipitation in Al-Mg-Ge and Al-Mg-Si**, Acta Metallurgica, v.9, 1961, June, p.577-586.

MAIA, A. **Balanco Mineral Brasileiro**, 2001. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/balancomineral2001/titanio.pdf> Acesso em 23/01/2010

MANG. T. **Die Schmierung in der Metallbearbeitung**, Vogel-Buchverlag Würzburg, 1983 Deutschland. p. 100–107.

MARINESCU, I. D.; ROWE, W.B.; DIMITROV, B.; INASAKI, I., “**Tribology of abrasive machining processes**”, Norwich, William Andrew Inc, 2004, 1 ed. p 23–44

MARTIN, J. W. **Precipitation Hardening**, Pergamon Press, Oxford, UK, 1976, first edition. Cambridge, p.148-152.

MARTINS, V.; SCHAEFFER, L. **Comparação entre lubrificantes pela verificação do atrito em alumínio e aço** - Revista Corte e Conformação de Metais - Março/2009 - Páginas: 44 – 63

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. 93 p.

MELO, A. L. V. **Análise das propriedades de chapas de ti ASTM grau 5 (Ti6Al4v) soldadas por laser nd:yag**. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais. 2007. 118 p.

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.

OZAWA, E. & KIMURA, H. - **Excess Vacancies and the Nucleation of Precipitates in Aluminum-Silicon**, Acta Metallurgica, v.18, 1970, September, p.995-1004.

PETERS, M.; HEMPTENMACHER, J.; KUMPFERT, J.; LEYENS, C. **Structure and Properties of Titanium and Titanium Alloys. Titanium and Titanium Alloys Fundamentals and applications**. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003. p. 4 – 9.

PETERS, M.; KUMPFERT, J.; WARD, C. H.; LEYENS, C. **Titanium Alloys for Aerospace Applications. Titanium and Titanium Alloys Fundamentals and applications**. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003. p. 336 – 337.

PETERSEN, S. B.; MARTINS, P. A. F.; BAY, N. **Friction in Bulk Metal Forming: a General Friction Model vs. the Law of Constant Friction**. Journal of Materials Processing Technology, abril 1997. v. 66, n. 1/3, p. 186–194,

RIBEIRO, F. L. B. **Introdução ao Método dos Elementos Finitos**. COPPE / UFRJ. 2004. Notas de Aula do PEC.

ROOY, E. L. **Aluminum Company of America. ASM Metals Handbook, V. 02: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.** 10th Edition. Cidade: Asm Internatonal, 1992, p 22.

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.

SCHAEFFER, L. **Conformação mecânica.** Editora Imprensa, Porto Alegre, 2005. 167p.

SCHAEFFER, L. **Forjamento: Introdução ao processo.** Editora Imprensa, Porto Alegre, 2001. 202 p.

SCHEY, A.; J. **Tribology in metalworking: friction, lubrication and wear.** Ohio: 2ª edição, 1984, p. 1-130.

SEMIATIN, S. L.. **ASM Metals Handbook, v. 14: Forming and forging,** 9th edition. publishing: Asm International, 1993. pg. 10,

SHAH, S. **Isothermal and Hot-Die Forging. Forging parameters.** ASM COMMITTEE. Forming of Titanium and Titanium Alloys. Asm Metals Handbook, V. 14: Forming And Forging, 9th Edition, 1993. p. 326 - 327.

SHERCLIFF, H.R. & ASHBY, M.F. **A Process for Age Hardening of Aluminum Alloys - I the Model,** Acta Metallurgica et Materialia, v.38, 1990, nº 10, p.1789-1802.

SILVEIRA JÚNIOR, R. N. da; TEDESCO, J. C. G.; QUEIROZ, G. P. **A dependência da área real de contato no atrito entre superfícies sólidas.** XVI simpósio nacional de ensino de física. Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ. 2005.

SMITH, W. **Structure and properties of engineering alloys.** New York, 1993. 630 p.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology.** Publishing ButterWorth Heinemann, 2005. 3ª edição p. 765.

STOETERAU, R. L. **Tribologia- EMC 5315** -. Apostila para uso didático na disciplina de Tribologia do curso de Graduação. Universidade Federal de Santa Catarina Centro Tecnológico Departamento de Engenharia Mecânica. 2004. Disponível em: <http://www.scribd.com/doc/19271358/StoeterauTribologia> Acesso em 23/05/2010

TERLINDE, G.; WITULSKI, T.; FISCHER, G. **Forging of Titanium**. OTTO FUCHS Metallwerke, Meinerzhagen, Germany. 1993 449 p.

VAN HORN, K.R. - **Aluminum**, v.1, ASM, 1 st printing, Metals Park, Ohio, 1967, p.324-327.

VIÁN, J. G. **Seguindo a pegada dos ferreiros desde as súas orixes ata hoxe**. III Feira da Artesanía de Riotorto. 2009. Disponível em: <http://www.ferreirosderiotorto.com/pregon-iii-feira-ferro-riotorto-GL.pdf> em 16/03/2010

WEB SITE AFSA. Disponível em: <http://www.afsa.org.za/Portals/0/Documents/aluminium%20and%20its%20alloys/Intro-second-edition.pdf>. Acesso em 23/05/2010.

WEB SITE CENTERLIGAS. Disponível em: <http://www.centerligas.com.br>. Acesso em 05/12/2009.

WEB SITE CIÊNCIA HOJE. Disponível em: <http://www.cienciahoje.pt/index>. Acesso em 16/03/2010

WEB SITE DALMOLIN. Disponível em: <http://www.dalmolim.com.br/EDUCACAO/MATERIAIS/Biblimat/aluminioconf.pdf>. Acesso em 04/06/2010.

WEB SITE INFOMET. Disponível em: [http://www.infomet.com.br/diagramas/fasesver.php?e=mostrar&id\\_diagrama=46&btn\\_filtrar=Ok](http://www.infomet.com.br/diagramas/fasesver.php?e=mostrar&id_diagrama=46&btn_filtrar=Ok). Acesso em 23/05/2010.

WEB SITE INFOMET. Disponível em: [http://www.infomet.com.br/metais-e-ligas-conteudos.php?cod\\_tema=10&cod\\_secao=14&cod\\_assunto=94](http://www.infomet.com.br/metais-e-ligas-conteudos.php?cod_tema=10&cod_secao=14&cod_assunto=94) Acesso em: 09/07/2010

WEB SITE INFOMET. Diagrama da Liga Alumínio – Silício. Disponível em: [http://www.infomet.com.br/diagramasfasesver.php?e=mostrar&id\\_diagrama=53&btn\\_filtrar=Ok](http://www.infomet.com.br/diagramasfasesver.php?e=mostrar&id_diagrama=53&btn_filtrar=Ok). Acesso em 23/05/2010.

WEB SITE INFOMET. Disponível em: [http://www.infomet.com.br/diagramas-fases-ver.php?e=mostrar&id\\_diagrama=56&btn\\_filtrar=Ok](http://www.infomet.com.br/diagramas-fases-ver.php?e=mostrar&id_diagrama=56&btn_filtrar=Ok) Acesso em 04-06-2010.

WEB SITE INFOMET. Disponível em: [http://www.infomet.com.br/diagramas-fases-ver.php?e=mostrar&id\\_diagrama=425&btn\\_filtrar=Ok](http://www.infomet.com.br/diagramas-fases-ver.php?e=mostrar&id_diagrama=425&btn_filtrar=Ok). Acesso em 04-06-2010.

WEB SITE INFOMET. Disponível em: [http://www.infomet.com.br/metais-e-ligas-conteudos.php?cod\\_tema=10&cod\\_secao=11&cod\\_assunto=54](http://www.infomet.com.br/metais-e-ligas-conteudos.php?cod_tema=10&cod_secao=11&cod_assunto=54). Acesso em: 23/05/2010.

WEB SITE INFOMET. Disponível em: [http://www.infomet.com.br/metais-e-ligasconteudos.php?cod\\_tema=10&cod\\_secao=11&cod\\_assunto=57](http://www.infomet.com.br/metais-e-ligasconteudos.php?cod_tema=10&cod_secao=11&cod_assunto=57). Acesso em: 09/07/2010.

WEB SITE INFOMET. Disponível em: [http://www.infomet.com.br/metais-e-ligasconteudos.php?cod\\_tema=&cod\\_secao=14&cod\\_assunto=94](http://www.infomet.com.br/metais-e-ligasconteudos.php?cod_tema=&cod_secao=14&cod_assunto=94). Acesso em: 23/05/2010.

WEB SITE INTERLUBRI. Disponível em: [http://www.interlubri.com.br/ups\\_manuallub8.htm](http://www.interlubri.com.br/ups_manuallub8.htm). Acesso em 27/06/2010.

WEB SITE METALMUNDI. Disponível em: <http://www.metalmundi.com>. Acesso em: 10/12/2009.

WEB SITE METALMUNDI. Disponível em: <http://www.metalmundi.com/site/1108?idioma=português>. Acesso em: 29/12/2009.

WEB SITE RICKARDMETALS. Disponível em: <http://www.rickardmetals.com>. Acesso em 15/01/2010.

WEB SITE RICKARDMETALS. Disponível em: [http://www.rickardmetals.com/ares\\_launch\\_abort\\_system.html](http://www.rickardmetals.com/ares_launch_abort_system.html). Acesso em 25/05/2010.

WEB SITE RICKARDMETALS. Disponível em: [http://www.rickardmetals.com/boeing\\_b787.html](http://www.rickardmetals.com/boeing_b787.html). Acesso em 23/05/2010.

WEB SITE SAPAGROUP. Disponível em: <http://www.sapagroup.com/pt>, acesso em 20/01/2010.

WEB SITE SKF. Disponível em: [http://www.skf.com/portal/skf\\_lub/home/products?paf\\_dm=shared&paf\\_gear\\_id=27900640&contentId=873446&action=viewDetail&lang=PT](http://www.skf.com/portal/skf_lub/home/products?paf_dm=shared&paf_gear_id=27900640&contentId=873446&action=viewDetail&lang=PT) Acesso em: 23/06/2010.

WEB SITE SPECTRU. Disponível em: <http://www.spectru.com.br/>. Acesso em 17/01/2010.

WEB SITE UFJF. Disponível em: <http://www.engprod.ufjf.br/processos/Conformacao/cont>. Acesso em 10/12/2009.

WEB SITE UFRGS. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/ldtm/pesquisa>. Acesso em: 28/12/2009.

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. 294 p.

WINER, W. O. **Future trends in tribology**. Wear, v. 136, p. 19-27, 1990.