

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

“O Forjamento de Ligas de Alumínio -
Um estudo para a Liga ABNT 6061”

Rogério Alves Oliveira

Dissertação para obtenção do título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2001

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

“O Forjamento de Ligas de Alumínio -
Um estudo para a Liga ABNT 6061”

por

Rogério Alves Oliveira
Engenheiro Mecânico

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

Área de Concentração: Metalurgia de Transformação

Porto Alegre
2001

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

Orientador: Prof. Dr. Lirio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Lirio Schaeffer - UFRGS

Prof. Dr. Antônio Eustáquio de Melo Pertence - UFMG

Prof. Dr. Arno Richter – CAPES/UFRGS

Dr. Luis Colembergue Klujszo – Gerdau Piratini

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe
Coordenador do PPGEMMM

Dedico este Trabalho à minha família e à família Britto Da Poian, cujo apoio e compreensão possibilitou realizá-lo e à pequena Dani, exemplo de carinho.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, mais precisamente representada pelo Laboratório de Transformação Mecânica da Escola de Engenharia pela disponibilidade dos recursos materiais e tecnológicos.

Ao CNPq pelo apoio financeiro dos recursos do Banco Mundial, através do Edital III do PADCT, possibilitando a aquisição de materiais, equipamentos e bolsas de pesquisa.

À Dana Divisão de Forjados de Gravataí pelo prestativo apoio e cooperação, em especial dos Engenheiros Rubem Fritsch, Paulo Macagnan e Tiago Alliatti pela possibilidade de um trabalho realmente cooperativo entre a Indústria e a Universidade na busca de novos processos de forjamento de ligas de alumínio.

Ao Professor Lirio Schaeffer pela orientação neste trabalho e à sua diária demonstração de persistência e tenacidade na obtenção de recursos financeiros e estímulo à pesquisa de novas tecnologias.

Ao colega Engenheiro Leopoldo Koller pelo inestimável suporte e paciência nas simulações no programa "SuperForge".

Aos funcionários do Centro de Tecnologia da EEUFRGS, demais colegas e professores do programa de pós-graduação e todos aqueles que de alguma forma contribuíram no esforço da conclusão deste trabalho o meu sincero e efusivo agradecimento.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	X
SIGNIFICADO DOS SÍMBOLOS UTILIZADOS.....	XI
RESUMO.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
1. INTRODUÇÃO.....	14
2. O ESTADO DA ARTE NA CONFORMAÇÃO DE LIGAS DE ALUMÍNIO. 16	
2.1 Sobre a obtenção das Ligas de Alumínio.....	16
2.2 As Ligas de Alumínio.....	18
2.3 Processos de Conformação Mecânica.....	20
2.4 Processos de Conformação de Ligas de Alumínio.....	23
2.5 Melhoria das Propriedades Mecânicas das Ligas de Alumínio... 26	
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	36
3.1 Obtenção de Curvas de Escoamento.....	36
3.2 Determinação da Condição de Atrito.....	43
3.3 O Cálculo da Força de Forjamento	49
3.4 Métodos Computacionais de Análise do Forjamento.....	63
4. ANÁLISE EXPERIMENTAL E RESULTADOS OBTIDOS.....	68
4.1 Obtenção das Curvas de Escoamento para a liga ABNT 6061.. 68	
4.2 Determinação da Condição de Atrito para a liga ABNT 6061... 72	
4.3 Simulação Computacional do Forjamento em Simetria Axial... 78	
4.4 Ensaio Prático do Forjamento em Simetria Axial.....	82
4.5 Simulação do Forjamento de um Componente Automotivo.....	85
4.6 Forjamento Prático do Componente Automotivo.....	91
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	101
5.1 Validade das Curvas de Escoamento obtidas.....	101
5.2 Análise das Condições de Atrito x Lubrificantes.....	105
5.3 Análise Comparativa: Forjamento Prático x Simulação.....	109
6. CONCLUSÕES.....	112
7. SUGESTÕES DE CONTINUIDADE.....	113
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114
9. ANEXOS.....	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Consumo de transformados de alumínio.....	12
Figura 2 Utilização do Alumínio nos EUA.....	13
Figura 3 O processo químico.....	16
Figura 4 O processo eletrolítico.....	17
Figura 5 Obtenção dos produtos transformados.....	17
Figura 6 Componentes diversos conformados.....	20
Figura 7 Componentes Forjados em Liga de Alumínio.....	22
Figura 8 Forjabilidade comparada das ligas de alumínio.....	23
Figura 9 Carga de forjamento de uma liga 6061.....	24
Figura 10 Curvas de Envelhecimento para liga ABNT 6061.....	34
Figura 11 Exemplos de Curvas de Escoamento.....	36
Figura 12 Curva de controle do punção para ensaio de compressão..	39
Figura 13 Dispositivo para ensaio de compressão à quente.....	39
Figura 14 Curvas de escoamento de algumas ligas de alumínio.....	40
Figura 15 Curva de Escoamento Hipotética.....	41
Figura 16 Anéis deformados no ensaio de compressão.....	46
Figura 17 Comparação entre a solução numérica e a analítica.....	47
Figura 18 Corpo de prova para ensaio do tubo cônico.....	47
Figura 19 Curvas de calibração Anel x Tubo cônico.....	48
Figura 20 Fluxo de análise dos modelos analíticos.....	49
Figura 21 Modelo para a Teoria das Tiras.....	50
Figura 22 Distribuição de Tensões pelo Modelo das Tiras.....	52
Figura 23 Modelo de cavidade para o método das tiras simplificado..	53
Figura 24 Tela Inicial de Configuração do ForgePAL.....	56
Figura 25 Tela de Resultados do ForgePAL.....	56
Figura 26 Modelo do Método do Limite Superior.....	57
Figura 27 Modelos em malha da pré-forma e da peça deformada.....	65
Figura 28 Resposta gráfica da distribuição de deformações na peça..	65
Figura 29 Corpo de prova para o Ensaio de Compressão.....	68
Figura 30 Esquema de Controle da Máquina de Ensaios Schenk.....	68
Figura 31 Detalhe da Máquina de Ensaios "Schenk".....	69
Figura 32 Curva de Escoamento – T=450 °C.....	70

Figura 33 Curva de Escoamento – T=300 °C.....	70
Figura 34 Curva de Escoamento – T=200 °C.....	71
Figura 35 Dimensões do corpo de prova para ensaio do anel.....	72
Figura 36 Curvas de Calibração e Resultados de Atrito (T=200 °C, 1 s ⁻¹).....	73
Figura 37 Curvas de Calibração e Resultados de Atrito (T=200 °C, 10 s ⁻¹).....	73
Figura 38 Curvas de Calibração e Resultados de Atrito (T=200 °C, 50 s ⁻¹).....	74
Figura 39 Curvas de Calibração e Resultados de Atrito (T=300 °C, 1 s ⁻¹).....	74
Figura 40 Curvas de Calibração e Resultados de Atrito (T=300 °C, 10 s ⁻¹).....	75
Figura 41 Curvas de Calibração e Resultados de Atrito (T=300 °C, 50 s ⁻¹).....	75
Figura 42 Curvas de Calibração e Resultados de Atrito (T=450 °C, 1 s ⁻¹).....	76
Figura 43 Curvas de Calibração e Resultados de Atrito (T=450 °C, 10 s ⁻¹).....	76
Figura 44 Curvas de Calibração e Resultados de Atrito (T=450 °C, 50 s ⁻¹).....	77
Figura 45 Desenho da Peça Forjada Experimental.....	78
Figura 46 Malha de elementos finitos (a) inicial e (b) atualizada.....	79
Figura 47 Tensão de Escoamento (a) 2 mm/s e (b) 200 mm/s.....	80
Figura 48 Resultado da Simulação QForm – Curva de Força.....	81
Figura 49 Montagem das matrizes para o forjamento prático.....	83
Figura 50 Configuração dos “strain gages” na célula de carga.....	83
Figura 51 Curva de força obtida no forjamento prático.....	84
Figura 52 Peça forjada “F3-28-409” Fonte: Dana DFR.....	85
Figura 53 Malhas de Volumes Finitos da peça “F3-28-409”.....	86
Figura 54 Resultado das deformações equivalentes da peça forjada..	87
Figura 55 Distribuição de velocidades em mm/s da peça.....	88
Figura 56 Resultado da distribuição de temperaturas na peça.....	88
Figura 57 Distribuição da deformação equivalente – 2º simulação....	89
Figura 58 Distribuição de temperaturas – 2º Simulação.....	89
Figura 59 Curva de Força obtida na simulação da peça forjada.....	90
Figura 60 Forno de aquecimento resistivo – Dana DFR.....	92
Figura 61 Aspecto do Garfo forjado em alumínio – Dana DFR.....	92
Figura 62 Detalhes da análise da peça forjada – Dana DFR.....	94

Figura 63 Micrografias da peça forjada após solubilização e envelhecimento. (a) 200x e (b) 500x. Ataque: HF a 0,5%.....	94
Figura 64 Ferramenta de forjamento com rebarba.....	95
Figura 65 Detalhe da (a) simulação e (b) usinagem real da ferramenta.....	96
Figura 66 Esquema de montagem da ferramenta de forjamento sem rebarba– Dana DFR.....	97
Figura 67 Detalhe do ferramental e a 1 ^o peça forjada no teste.....	98
Figura 68 Detalhe da 1 ^o peça forjada no teste.....	99
Figura 69 Curva comparativa para velocidade $\dot{\phi} = 1 \text{ s}^{-1}$	102
Figura 70 Curva comparativa para velocidade $\dot{\phi} = 10 \text{ s}^{-1}$	103
Figura 71 Curva comparativa para velocidade $\dot{\phi} = 50 \text{ s}^{-1}$	103
Figura 72 Metodologia de análise dos anéis deformados.....	105
Figura 73 Gráfico comparativo ensaio experimental x simulação.....	109
Figura 74 Comparativo do garfo (a) simulado e (b) forjado – Dana...	110
Figura 75 Comparativo de Força: Simulação x Medida na Prensa.....	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Designação das Ligas de Alumínio.....	18
Tabela 2 Composição química da liga ABNT 6061.....	19
Tabela 3 Propriedades físicas e mecânicas da Liga ABNT 6061.....	19
Tabela 4 Comparação entre processos de forjamento.....	21
Tabela 5 Temperatura de forjamento para diversas ligas de Al.....	24
Tabela 6 Notação dos tratamentos térmicos aplicáveis.....	26
Tabela 7 Têmperas aplicáveis às ligas de alumínio.....	27
Tabela 8 Temperaturas e tempos recomendados de recozimento.....	28
Tabela 9 Temperaturas de solubilização e resfriamento.....	29
Tabela 10 Tempos de encharque para solubilização.....	30
Tabela 11 Tempo máximo de demora de mergulho.....	31
Tabela 12 Número máximo de ressolubilizações.....	31
Tabela 13 Temperaturas e tempos de encharques.....	33
Tabela 14 Comparação "Larstran" x "SuperForge".....	86
Tabela 15 Análise do material para teste preliminar de forjamento...	91
Tabela 16 Tratamento térmico realizado na peça forjada.....	93
Tabela 17a Dados do lubrificante "Deltaforge 31".....	106
Tabela 17b Tabela ANOVA do lubrificante "Deltaforge 31".....	106
Tabela 18a Dados do lubrificante "Oildag".....	107
Tabela 18b Tabela ANOVA do lubrificante "Oildag".....	107

SIGNIFICADO DOS SÍMBOLOS UTILIZADOS

ΔH - variação de altura

ε - deformação relativa ou percentual

$\dot{\varepsilon}$ - velocidade de deformação relativa ou percentual

φ - deformação verdadeira

$\dot{\varphi}$ - velocidade de deformação

μ - coeficiente de atrito

θ - temperatura

σ_n - tensão normal aplicada

σ_c - tensão de escoamento na cavidade para o modelo de Altan

σ_e - tensão de escoamento na linha de rebarba para o modelo de Altan

σ_f - tensão de escoamento na cavidade da rebarba para o modelo de Altan

τ - tensão de cisalhamento

A_1, A_2, A_3 - coeficientes da equação de Hensel e Spittel

$^{\circ}C$ - temperatura em graus Celsius

D_0 - diâmetro externo inicial

D - diâmetro externo final

d_0 - diâmetro interno inicial

d - diâmetro interno final

F - força aplicada

h_i - altura do corpo de prova ou pré - forma instantânea

h_0 - altura do corpo de prova ou pré - forma inicial

h - altura do corpo de prova ou pré - forma final

K - temperatura absoluta Kelvin

k_w - resistência à deformação

k_{f0} - tensão de escoamento inicial

k_f - tensão de escoamento

L - comprimento linear

MQR - média quadrada do erro na análise de variância

m_1, m_2, m_3 e m_4 - expoentes da equação de Hensel e Spittel

m - fator de cisalhamento do atrito

n - número total de amostras observadas

P - força de forjamento

t - tempo

T - temperatura

V - velocidade

RESUMO

Este trabalho pretende, na visão de novas tecnologias, discutir o processo de forjamento das ligas de alumínio (ABNT 6061), buscando propor uma metodologia baseada na ciência da engenharia.

Deseja-se minimizar os procedimentos de tentativa e erro no desenvolvimento de processos de conformação. Para tanto, novas tecnologias disponíveis atualmente, tais como o Projeto Assistido por Computador (CAD), a Fabricação Assistida por Computador (CAM) e a Simulação do Processo (CAE) são empregadas.

Resultados experimentais mostrando o comportamento da liga ABNT 6061 através das curvas de escoamento bem como o estabelecimento da condição do atrito no processo de conformação, avaliando dois lubrificantes comerciais disponíveis (Deltaforge 31 e Oildag) para aplicações nas ligas de alumínio, são reportados neste trabalho.

A comparação dos resultados obtidos de um experimento prático de forjamento com a simulação pelo "Método dos Elementos Finitos" usando o código "QForm" é apresentada para uma peça de simetria axial em liga de alumínio.

Finalmente, os resultados obtidos no forjamento de um componente automotivo em liga de alumínio (ABNT 6061), desenvolvido em parceria com a empresa Dana, são analisados e comparados com as simulações computacionais realizadas usando o código "Superforge".

ABSTRACT

This work intends, on the view of new technologies, to discuss the forging process of aluminum alloys (ABNT 6061) and aims at proposing a methodology based on the engineering science.

It is desired to minimize trial and error procedures in the development of forming processes. For such, new technologies available today, such as Computer Aided Design (CAD), Computer Aided Manufacturing (CAM) and Computer Aided Engineering (CAE) are employed.

Experimental results showing the behaviour of an ABNT 6061 through flow curves as well as the establishment of friction conditions in the forming process by evaluating two commercially-available lubricants (c.e., Deltaforge 31 and Oildag) for aluminum alloys applications are reported in this work.

A comparison of the results obtained from a forging experiment with finite element method (F.E.M.) simulations using "QForm" code is presented for an axially-symmetric part made of aluminum alloy.

Finally, forging results of an automotive component made of an aluminum alloy (ABNT 6061) developed in partnership with DANA, area analyzed and compared to F.E.M. computational simulations obtained through the SuperForge software.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o sexto maior produtor de alumínio primário do mundo precedido pelos Estados Unidos, Rússia, Canadá, China e Austrália, onde o faturamento somente em 1999 foi de 5,7 US\$ bilhões gerando 48.356 empregos diretos.

A produção média de alumínio primário entre 1997 e 1999 foi de cerca de 1216000 toneladas e a balança comercial no mesmo triênio teve um saldo médio “positivo” de 1173 US\$ milhões.

O mercado interno de transformados de alumínio representou em 1999 um total de 6262000 toneladas sendo que 16% (100,3 mil t) deste total foram fundidos e forjados. O maior mercado interno é dominado pelas chapas e tiras que representam 27,93% (174,9 mil t) de transformados.

O consumo interno teve seu maior volume em 1998 representando um total de 704,1 mil toneladas de produtos onde os fundidos e forjados representaram 82,6 mil t deste total. Entretanto o maior consumo interno destes produtos foi em 1997, representando 91,4 mil toneladas em 645,7 mil toneladas do total do ano (menor consumo interno em 3 anos). A Figura 1 resume o ano de 1999 na indústria de transformados por setor⁽¹⁾.

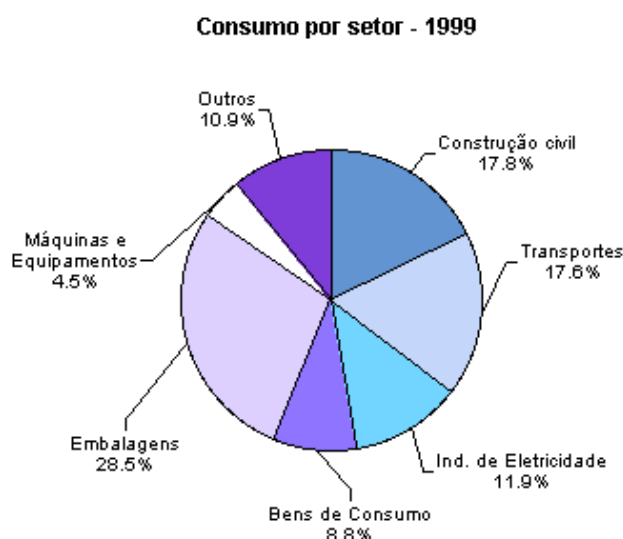


Figura 1 Consumo de transformados de alumínio⁽¹⁾

Atualmente, os fabricantes mundiais de alumínio se voltam para crescente demanda automotiva das ligas de alumínio. A palavra de ordem é reduzir peso, diminuir o consumo e aumentar a eficiência.

O crescimento da demanda por componentes de baixa densidade vem de encontro as necessidades crescentes de melhorar a “performance” dos veículos, aumentar a eficiência dos combustíveis, reduzir a emissão de gases na atmosfera e a facilidade de reciclagem destes materiais⁽²⁾.

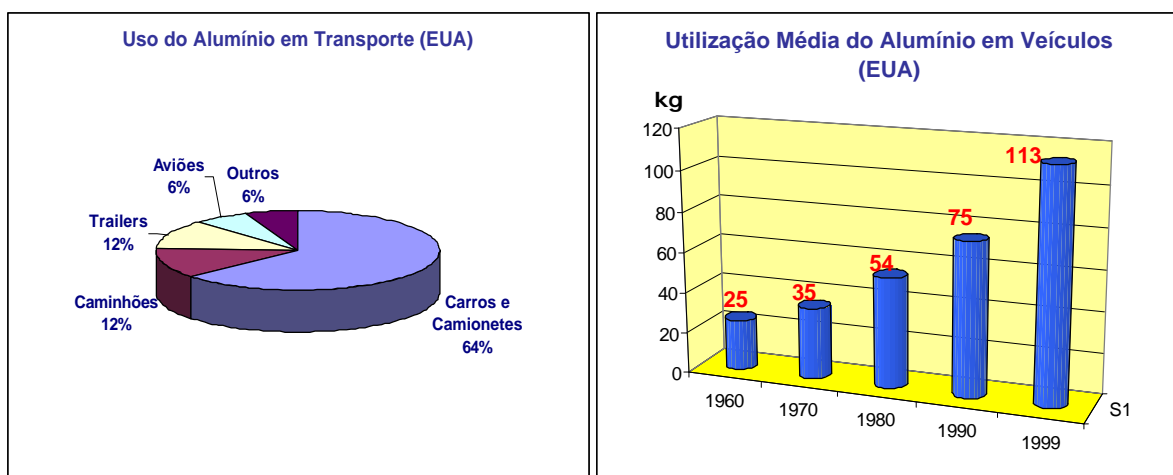


Figura 2 Utilização do Alumínio nos EUA⁽²⁾

Há 40 anos atrás a quantidade de alumínio por veículo era de 25 kg, hoje, tem-se cerca de 113 kg por unidade e a previsão para 2005 é de 160 kg (um crescimento de 41,6%!).

Grandes fabricantes como a Alcoa e Alcan investem toda sua capacidade tecnológica e de produção no sentido de atender as necessidades deste mercado crescente. As indústrias de transformação (fundidos e forjados) devem fazer parte deste esforço.

A motivação para se desenvolver a indústria da transformação das ligas de alumínio alinha-se completamente à necessidade de se agregar valor tecnológico aos componentes, através da pesquisa de novos processos e novas formas de obtenção de melhores propriedades destas ligas. Portanto, este trabalho é uma contribuição neste esforço de desenvolvimento tecnológico.

2 O ESTADO DA ARTE NA CONFORMAÇÃO DE LIGAS DE ALUMÍNIO

2.1 Sobre a obtenção das Ligas de Alumínio

O alumínio primário é obtido da Bauxita⁽³⁾ (minério rico em alumina), através de um processo químico de refino, onde a Bauxita triturada em uma solução de soda cáustica quente passa por processos de decantação e filtragem obtendo-se um fino pó branco conhecido como alumina (Al_2O_3). A figura 3 mostra o processo químico

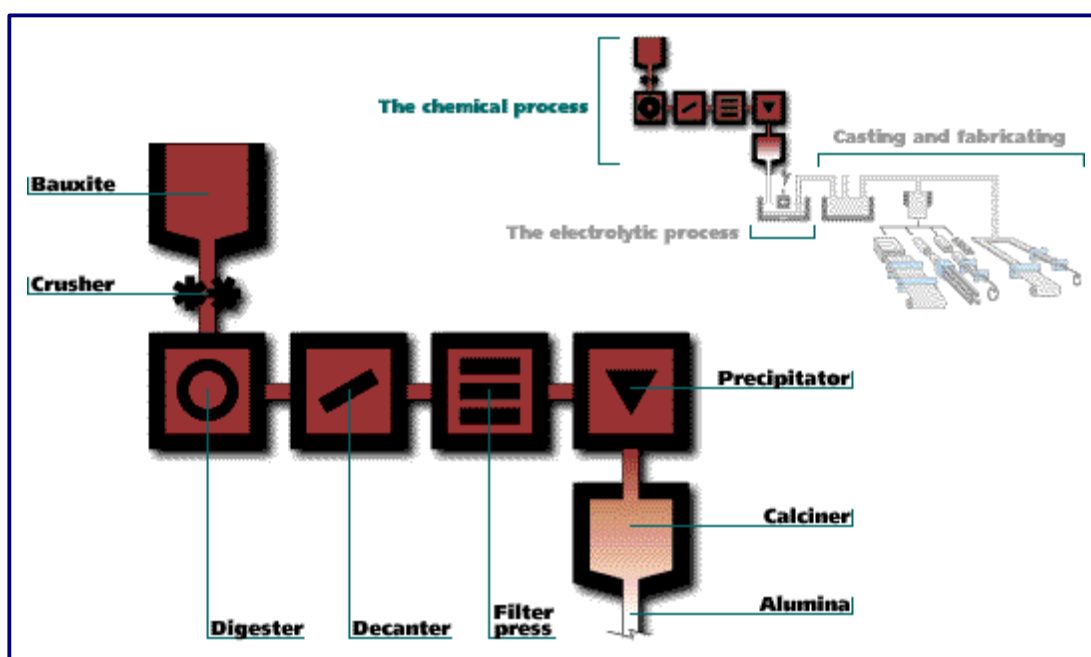
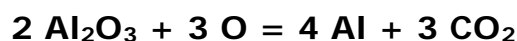


Figura 3 O processo químico⁽³⁾

O processo eletrolítico visa obter o alumínio puro (99,99%) através da seguinte reação química:



O ânodo (+) em forma de blocos de carbono é energizado e colocado em contato com a alumina que está depositada em um tanque que serve de cátodo (-), fazendo o O_2 da alumina reagir com o carbono do eletrodo produzindo CO_2 , então o alumínio puro é sifonado para outro reservatório onde são produzidos os lingotes. A figura 4 mostra o processo eletrolítico.

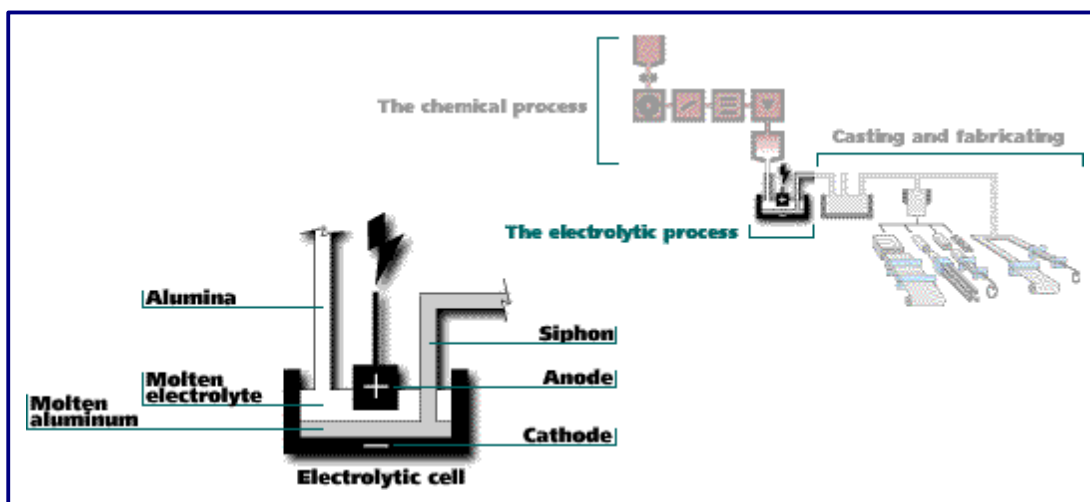


Figura 4 O processo eletrolítico⁽³⁾

Nesta etapa o alumínio puro (99,99%) ou através da adição de componentes para obtenção das ligas de alumínio é transformado por processos de laminação, extrusão e trefilação nos produtos disponíveis para o mercado consumidor. A figura 5 mostra as demais etapas da obtenção de transformados de alumínio.

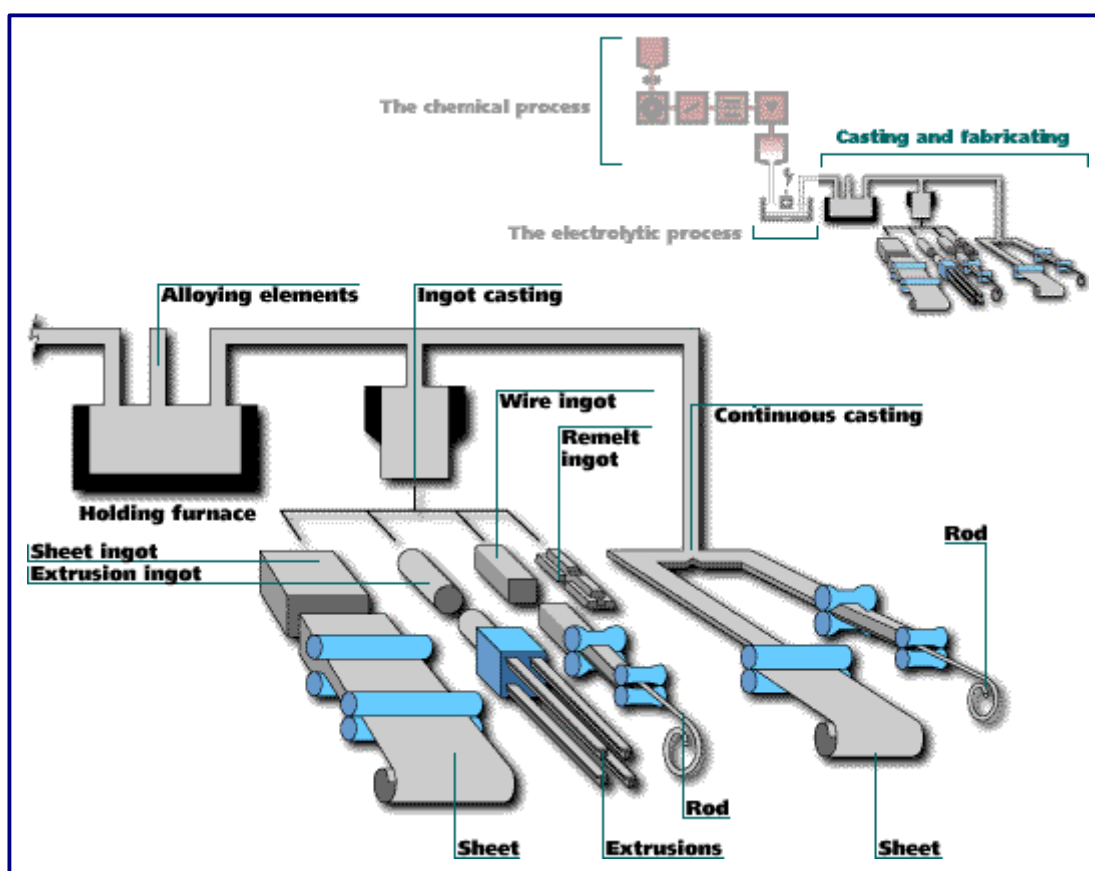


Figura 5 Obtenção dos produtos transformados⁽³⁾

2.2 As Ligas de Alumínio

As ligas de alumínio caracterizam-se por apresentarem o elemento Al associado a outros elementos, tais como: Mn, Cu, Si, Mg, Si, Zn e Li, formando materiais cujas propriedades mecânicas, tais como a resistência mecânica, resistência à fluência e a alta contração volumétrica durante a solidificação são melhoradas mediante a adição de elementos chamados “de liga” ⁽⁴⁾.

A justificativa para a formação destes compostos metálicos deve-se à baixa resistência à tração do alumínio puro (Al 99,99%), que se situa entre 40 a 50 MPa ⁽⁵⁾. A adição de elementos de liga eleva a resistência e a dureza, mesmo no estado recozido ou através de tratamentos térmicos podendo chegar a uma resistência a tração de 500 MPa e dureza 100 HB (Brinnell).

As ligas de alumínio apresentam uma designação padronizada em função dos elementos de liga presentes. Na tabela 1 pode ser observada esta designação ⁽⁶⁾.

Tabela 1 Designação das Ligas de Alumínio ⁽⁶⁾

Designação da Liga/Série	Principais Elementos de liga na Série
1XXX	99% de Al (mínimo)
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outros elementos
9XXX	Série não usada

Neste trabalho, a liga em estudo pertence à série 6XXX, ou seja, Al-Mg-Si, denominada ABNT 6061 (AA 6061 ou DIN AlMgSi1Cu). Esta liga em especial, dentre as suas características, destacam-se: boa resistência mecânica, resistência à corrosão, excelente resposta a anodização e boa soldabilidade⁽⁴⁾. Na Tabela 2 pode ser observada a composição química desta liga.

Tabela 2 Composição química da liga ABNT 6061⁽⁶⁾

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0,4 – 0,8	0,7	0,15–0,40	0,15	0,8–1,2	0,04–0,35	0,25	0,15

A liga ABNT 6061 faz parte da série de ligas temperáveis, ou seja, podem ser submetidas a um tratamento térmico de solubilização e envelhecimento artificial ou natural. Na tabela 3 podem ser vistas, respectivamente, as propriedades físicas e mecânicas da liga ABNT 6061.

Tabela 3 Propriedades físicas e mecânicas da Liga ABNT 6061⁽⁷⁾

Propriedades Físicas da Liga ABNT 6061				
Densidade Nominal (a 20 °C)		2,7 Mg/m ³		
Ponto de Fusão		582 °C – 652 °C		
Calor Específico (a 100 °C)		896 J/kg.K		
Coeficiente de Expansão Térmica Linear (20 °C a 100 °C)		23,6 µm/mK		
Condutividade Térmica (Têmpera "O")		180 W/m.K		
Condutividade Térmica (Têmpera "T6")		167 W/m.K		
Propriedades Mecânicas da Liga ABNT 6061				
Têmpera	Resistência a Tração	Tensão de Ruptura	Elongação	Dureza Brinell
"O"	150 MPa máx.	110 MPa máx.	16%	30 HB
"T4"	180 MPa mín.	95 MPa mín.	16%	65 HB
"T6"	260 MPa mín.	240 MPa mín.	8%	95 HB

2.3 Processos de Conformação Mecânica

Um grande número de componentes, não somente elementos de fixação (parafusos, porcas, arruelas, etc.), mas estruturas para a construção civil e componentes utilizados em aplicações da engenharia (esferas de rolamentos, gaiolas, etc.) são obtidos pela conformação mecânica dos metais⁽⁹⁾. São elementos de alto valor agregado, pois atualmente grande parte destes produtos é praticamente utilizável logo após a sua saída da linha de transformação.

Muitos componentes utilizados na indústria automotiva tais como válvulas, comandos de válvulas de motores, barras de sistemas de direção, componentes de chassi, componentes de transmissão de potência e colunas de direção têm sido obtidos pela conformação sólida ou forjamento. Alguns destes componentes são mostrados na figura 6.

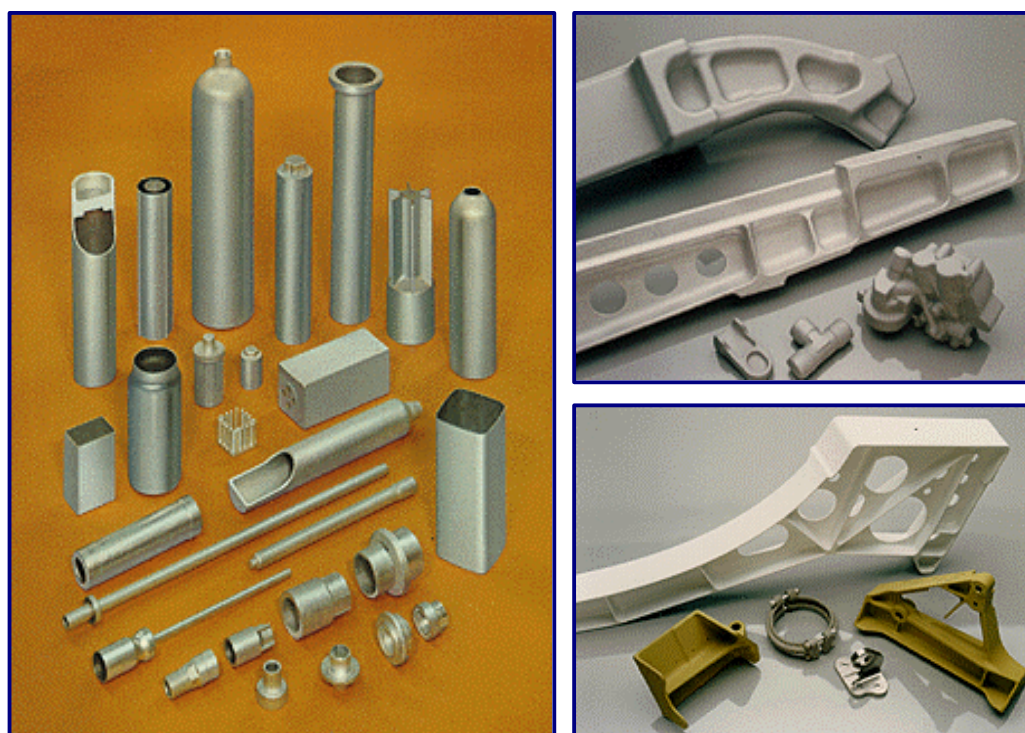


Figura 6 Componentes diversos conformados
(fonte: <http://www.aluminumprecision.com>)

Estes componentes, em face das exigências das suas aplicações, requerem grande precisão dimensional e mínimo beneficiamento (usinagem posterior, tratamentos térmicos ou tratamentos superficiais), portanto, apresentam alto valor tecnológico agregado.

Os processos mais comuns de conformação sólida ou forjamento podem ser classificados quanto à temperatura em que são realizados: forjamento a quente, a morno e frio.

O processo de forjamento a quente caracteriza-se por ser realizado acima da temperatura de recristalização e ainda é o mais utilizado até hoje para uma grande variedade de materiais.

O processo de forjamento a morno e mais recentemente a frio tem produzido peças com precisão dimensional superior com custos menores, desde que as propriedades mecânicas da pré-forma ou "billet" garantam um tensão de escoamento baixa à temperatura ambiente, através do recozimento ou esferoidização. A tabela 4 faz um comparativo destes processos.

Tabela 4 Comparação entre processos de forjamento⁽⁹⁾

Forjamento	Quente	Morno	Frio
massa da peça acabada	0,05 – 1500 kg	0,001 – 50 kg	0,001 – 30 kg
Qualidade dimensional	IT 13 – 16	IT 11 – 14	IT 8 – 11
Qualidade superficial R_z	> 50 – 100 μm	> 30 μm	> 10 μm
Formabilidade	$\phi \leq 6$	$\phi \leq 4$	$\phi \leq 1.6$
Custos de Conformação (1)	Mais que 113%	100%	Mais que 147%
Usinagem requerida	Alta	Baixa	Muito baixa

(1) VDW study 1991, Darmstadt

Na prática, o “processo ideal” seria a combinação destes processos objetivando basicamente as melhores propriedades mecânicas para a peça, em função da sua aplicação, seja resistência à fadiga, resistência à corrosão, soldabilidade, etc. Os benefícios oferecidos pelos processos de forjamento, comparado com outros processos de produção, são caracterizados pela qualidade superior com baixo custo de manufatura⁽⁹⁾.

2.4 Processos de Conformação de Ligas de Alumínio

A procura por materiais de baixo peso específico, tais como as ligas de alumínio e magnésio⁽¹⁰⁾ para a indústria automotiva tem motivado também o desenvolvimento de inúmeros processos de conformação que permitem a obtenção de componentes de baixo peso, objetivando uma economia maior de combustível nos veículos, contribuindo assim, para diminuição da emissão de poluentes na atmosfera.

Componentes para colunas de direção e transmissão tem sido confeccionados em liga de alumínio ABNT 6061 e ABNT 6351 através da extrusão inversa, obtendo peças tubulares com até 1,5 mm de espessura⁽¹¹⁾. Estes componentes, combinando a excelente formabilidade com a possibilidade de melhoria das propriedades mecânicas através dos tratamentos térmicos aplicáveis a estas ligas (Endurecimento por Precipitação), tem permitido obter geometrias bastante complexas com o mínimo de usinagem posterior ao processo de conformação⁽¹¹⁾. Na figura 7 podem ser observados alguns componentes automotivos forjados em liga de alumínio.



Figura 7 Componentes Forjados em Liga de Alumínio
(fonte: <http://www.aluminumprecision.com>)

As ligas de alumínio podem ser forjadas com as mesmas geometrias que as peças em aço baixo carbono. Entretanto, para determinadas geometrias, pode-se constatar uma grande variação na força necessária para o forjamento.

Essa força está relacionada principalmente com a composição química da liga e com a temperatura de forjamento. Por exemplo, a liga de alumínio ABNT 1100, necessita bem menos pressão de forjamento do que o aço ABNT 1020. Já para as ligas de alumínio tal como a ABNT 7075, de alta resistência mecânica, há necessidade de maiores pressões de forjamento para conformar a mesma geometria.

Na figura 8 é mostrada a “Forjabilidade”, baseada na deformação por unidade de energia absorvida na faixa de temperaturas de forjamento para cada liga. Pode-se observar a liga ABNT 6061 comparada com outras ligas de alumínio⁽¹²⁾. Considera-se ainda, neste parâmetro, a dificuldade de se atingir graus elevados de deformações sem fraturar o material.

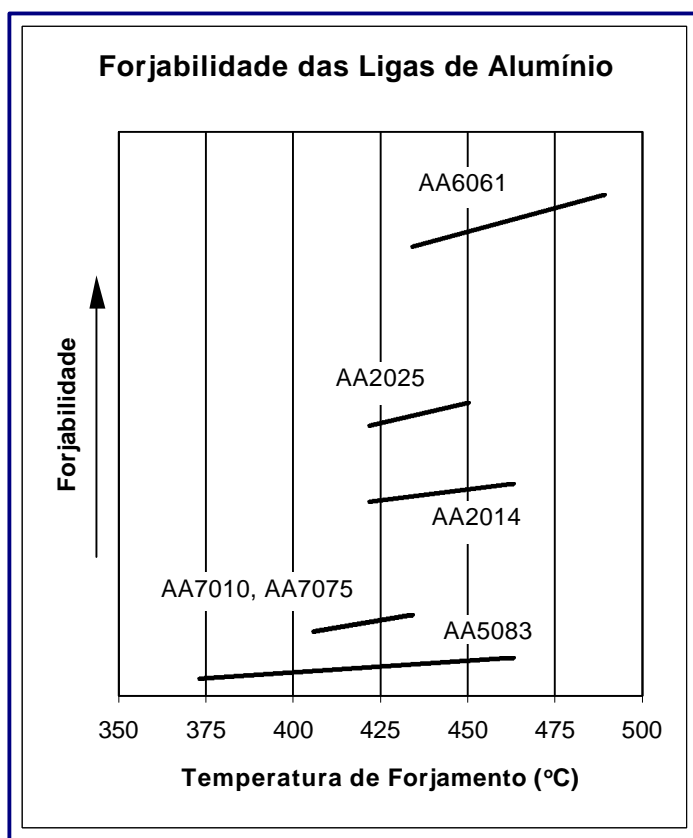


Figura 8 Forjabilidade comparada das ligas de alumínio⁽¹²⁾.

Em termos do efeito da temperatura sobre a Resistência ao Escoamento (tensão necessária para iniciar a deformação plástica, considerando o atrito e a geometria), este parâmetro reduz-se sensivelmente com o aumento da temperatura.

O mesmo efeito da temperatura pode ser visualizado para a liga ABNT 6061 na figura 9, que mostra a influência da temperatura na carga de forjamento.

Percebe-se a grande variação na carga para temperaturas de forjamento de 480 °C a 315 °C, indicando uma das razões para as faixas de temperatura de forjamento serem estreitas. A prática comum recomenda iniciar o forjamento no limite superior de temperatura e finalizá-lo no limite inferior⁽¹²⁾ (ver tabela 5).

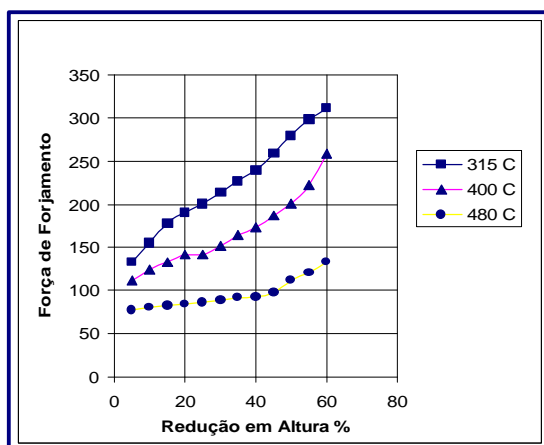


Figura 9 Carga de forjamento de uma liga 6061 ($\dot{\varphi} = 0,6 \text{ s}^{-1}$)⁽¹²⁾.

As temperaturas de forjamento estão representadas na tabela 5 para as principais ligas utilizadas em processos de forjamento⁽¹²⁾.

Tabela 5 Temperatura de forjamento para diversas ligas de Al⁽¹²⁾.

Liga	Temperatura (°C)
1100	315 – 404
2014	418 – 460
2219	425 – 470
6061	430 – 480
7010	370 – 440
7039	380 – 440
7049	360 – 440
4032	415 – 460
5083	405 – 460
7075	380 – 440

As aplicações para peças em liga de alumínio conformadas a frio têm crescido significativamente devido à boa conformabilidade destes materiais e ainda a alta resistência com que podem ser obtidos em sua forma final. Como exemplos de aplicações podem ser citados: tubos, filtros de óleo, cilindros hidráulicos, componentes de transmissão e sistemas de direção de automóveis, refletores de luz e até componentes para indústria bélica.

Dentre as vantagens do forjamento a frio e a morno destacam-se a alta taxa de produção, as excelentes tolerâncias dimensionais e acabamento superficial, significativa economia de material e menor custo de usinagem, alta resistência mecânica e a possibilidade de obtenção de peças pequenas de grande precisão.

Grande parte das ligas de alumínio pode ser conformada a frio, como as ligas da série ABNT 1000, 2000, 3000, 5000, 6000 e 7000. Até o início dos anos 80, grande parte dos estudos do forjamento a frio consistia em tentativas de se obter peças com uma alta relação resistência/peso, de onde se chegou ao grande potencial do alumínio como grande substituto do aço, até mesmo em aplicações de alta resistência⁽¹¹⁾.

O forjamento a frio de ligas de alumínio de alta resistência mecânica através de processos termo-mecânicos tem produzido peças com elevada precisão dimensional e qualidade superficial, incluindo um excelente controle microestrutural necessário em componentes para aplicações automotivas⁽¹³⁾. Estes processos requerem a preparação das pré-formas para que se obtenha uma estrutura homogênea com granulação adequada para evitar a recristalização durante a conformação.

A utilização do processo de forjamento isotérmico (temperatura da pré-forma = temperatura da matriz) tem permitido a produção de componentes com extrema complexidade, amenizando efeitos como a força de forjamento e defeitos micro-estruturais⁽¹⁴⁾, ocorrendo sob excelentes condições de escoamento de material com um alto nível de plasticidade e deformabilidade.

2.5 Melhoria das Propriedades Mecânicas das Ligas de Alumínio

Os componentes conformados em ligas de alumínio podem apresentar tensões residuais oriundas dos processos de fabricação, como laminação, forjamento, soldagem etc.. Estas tensões são prejudiciais e podem afetar a seqüência de fabricação ou mesmo a vida do componente.

Para remover estas tensões residuais total ou parcialmente, melhorando assim as propriedades do material, vários ciclos térmicos são indicados, dependendo do tipo de liga, forma da peça, processo de fabricação e condições de trabalho.

As ligas trabalhadas (extrudadas, forjadas, etc.), que podem ter suas propriedades mecânicas melhoradas são as ligas das séries 2XXX, 6XXX e 7XXX. Para estas ligas, a seguinte notação é estabelecida e em geral é a mesma para várias normas aplicáveis, mostrada na tabela 6.

Tabela 6 Notação dos tratamentos térmicos aplicáveis.

F	Representa as ligas que não sofreram tratamento térmico algum, ou seja estão disponíveis como fornecido.
O	Indica as ligas que sofreram um tratamento térmico de recozimento para eliminar o encruamento sofrido pelos processos de conformação.
H	Indica material que sofreu encruamento.
T	Indica que a liga foi tratada termicamente, sendo o algarismo posterior o indicador das operações de tratamento térmico que são especificadas para a liga.
W	aplicável as ligas solubilizadas passíveis de envelhecerem naturalmente após algum tratamento.

A tabela 7 mostra os principais estados ou têmperas das ligas tratáveis termicamente⁽⁵⁾.

Tabela 7 Têmperas aplicáveis as ligas de alumínio⁽⁵⁾.

Símbolo ⁽¹⁾	Interpreta�o
T1	Trabalhada a quente e seguida de envelhecimento natural
T2	Trabalhada a quente, seguida de trabalho a frio e envelhecimento natural
T3	Solubilizada, trabalhada a frio e envelhecida naturalmente
T4	Solubilizada e envelhecida naturalmente
T5	Trabalhada a quente e envelhecida artificialmente
T6	Solubilizada e envelhecida artificialmente
T7	Solubilizada e superenvelhecida
T8	Solubilizada, trabalhada a frio e envelhecida artificialmente
T9	Solubilizada, envelhecida artificialmente e trabalhada a frio
T10	Trabalhada a quente, a frio e envelhecida artificialmente

(1) Ligas tratáveis termicamente

Os principais tratamentos térmicos aplicáveis às ligas de alumínio são:

a) **Recozimento**

Este tratamento   realizado geralmente em temperaturas entre 300 e 400 C, havendo uma recristaliza o quase instantânea. O resfriamento subsequente   realizado em forno com velocidade de 30 C por hora até 250 C e posterior resfriamento ao ar, obtendo maior ductilidade.

O principal objetivo deste tratamento térmico   anular os efeitos de tratamentos anteriores e do encruamento ocasionado por conforma o ou outro tipo de trabalho mecânico.

Em ligas trabalhadas deve-se empregar faixas de temperaturas menores quando o grau de encruamento for menor.

O aquecimento de muitas ligas deve ser abaixo das temperaturas eutética e peritética (50°C - 100°C), em razão do zoneamento estrutural, de segregação interdendrítica e dos eutéticos e peritéticos, concentrados nas áreas intergranulares, caso contrário pode ocorrer uma fusão parcial (incipiente), podendo haver oxidação, o que tornaria a liga "queimada".

As temperaturas e tempos de recozimento para as principais ligas de alumínio são mostradas na tabela 8.⁽¹⁶⁾

Tabela 8 Temperaturas e tempos recomendados de recozimento⁽¹⁶⁾.

Ligas de Alumínio	Temperatura de Recozimento em °C (variação ±5°C)	Tempo (horas)
1100	329	(1)
1350	329	(1)
2014	407	2 - 3
2024	407	2 - 3
2219	407	2 - 3
5050	329	(1)
5052	329	(1)
6061	407	2 - 3
7050	407	2 - 3
7075	407	2 - 3
7178	407	2 - 3

(1) tempo necessário para a carga atingir a temperatura especificada. A taxa de resfriamento não é importante.

b) Solubilização

Para se obter as melhores propriedades mecânicas no tratamento de envelhecimento (etapa posterior a solubilização) é necessário primeiro a formação de uma solução sólida que é formada através do tratamento térmico de solubilização. Esse tratamento visa dissolver as segundas fases grosseiras presentes na matriz da liga.

O processo consiste em manter a liga a temperaturas relativamente altas por um tempo suficiente para que se obtenha uma solução sólida.

Essa temperatura é determinada pelos limites de composição da liga e a margem de erro da variação da temperatura. Na fase final do tratamento de solubilização, segue-se um resfriamento rápido, mantendo a liga no estado monofásico à temperatura ambiente. Com isso, produz-se uma solução sólida supersaturada, condição ideal para a etapa seguinte no tratamento térmico.

As temperaturas recomendadas para a solubilização das ligas de alumínio mais utilizadas em processos de forjamento são mostradas na tabela 9⁽¹⁶⁾. É importante observar que se o limite máximo de temperatura for excedido, há risco de fusão eutética, o que provoca queda nas propriedades mecânicas. Por outro lado, se o limite não é atingido, não é dada a solubilização por completo e, conseqüentemente, não se desenvolvem ao máximo as propriedades mecânicas.

Tabela 9 Temperaturas de solubilização e resfriamento⁽¹⁶⁾.

Ligas	Formas	Temperatura de solubilização (°C)	Temperatura da água de resfriamento (°C)
2014	Todas (exceto forjados)	501	T. Amb. (máx 37°C)
	Forjados	501	60 – 82
2024	Todas (exceto forjados)	493	T. Amb. (máx 37°C)
	Forjados	493	60 – 82
2219	Todas (exceto forjados)	535	T. amb. (máx 37°C)
	Forjados	535	60 – 70
6061	Todas não clad	548 ± 29	T. amb. (máx 37°C)
	Clad	526 ± 10	
7050	Todas (exceto forjados)	476	60 – 70
	Forjados	476	
7075	Forjados	468 ± 8	60 – 70
	Chapas até 0.051 pol	493	
	Chapas de 0.051 à 1.0 pol	479 ± 18	
	Barras extrudadas e placas de mais de 1.0 pol	465	
7475-0	Chapa não clad	471 (1o estágio) + 513 (2o estágio)	T. amb. (máx 37°C)
	Chapa clad	471 (1o estágio) + 493 (2o estágio)	

Há que considerar os tempos de “encharque”, ou seja, o tempo que a carga deve permanecer na temperatura de solubilização para que o processo se efetive ao longo de todo material⁽¹⁶⁾.

Os tempos de encharque⁽¹⁶⁾ recomendados para as principais ligas de alumínio são mostradas na tabela 10.

Tabela 10 Tempos de encharque para solubilização⁽¹⁶⁾.

Espessura (mm)	Tempo de Encharque (minutos)			
	Banho de Sal		Forno a Ar	
	Min	Máx	Min	Máx
Até 0.41	10	15	20	25
0.42 à 0.51	10	20	20	30
0.52 à 0.81	15	25	25	35
0.82 à 1.60	20	30	30	40
1.61 à 2.29	25	35	35	45
2.30 à 3.17	30	40	40	50
3.18 à 6.35	35	45	50	60
6.36 à 12.7	45	55	60	70
12.8 à 25.4	60	70	90	100
25.5 à 38.1	90	100	120	130
38.2 à 50.8	105	115	150	160
50.9 à 63.5	120	130	180	190
63.6 à 76.2	150	160	210	220
76.3 à 88.9	165	175	240	250
89 à 101.6	180	190	270	280

c) Resfriamento

No caso do resfriamento em água à temperatura ambiente, deve-se tomar cuidado para que a agitação e as dimensões do tanque sejam tais que a água não exceda 37°C após uma operação.

Para resfriamento em água aquecida, o tanque deve ser provido de sistemas de aquecimento e resfriamento de modo a satisfazer as temperaturas da tabela 9.

Outro cuidado que deve ser tomado é com o tempo de retirada da carga do forno até sua imersão para resfriamento, que deve ser pequeno, a fim de garantir a máxima resistência a corrosão do material.

Este intervalo de tempo é conhecido como tempo máximo de mergulho e varia com a espessura das peças conforme a tabela 11 ⁽¹⁶⁾.

Tabela 11 Tempo máximo de demora de mergulho ⁽¹⁶⁾.

Espessura Nominal		Tempo Máximo (segundos)
mm	pol	
Até 0.41	Até 0.016	5
0.42 à 0.79	0.017 à 0.031	7
0.80 à 2.29	0.032 à 0.90	10
2.30 e acima	0.091 e acima	15

d) Ressolubilização

É o tratamento térmico definido como a solubilização de uma liga de alumínio que já tenha sido tratada anteriormente. Qualquer liga de alumínio comprada com tratamento térmico, exceto a condição "O" e que receba um outro tratamento térmico, exceto recozimento e envelhecimento, este tratamento será dito ressolubilização. O número máximo de ressolubilizações é limitado para materiais "Alclad", conforme mostra a tabela 12 ⁽¹⁵⁾.

Tabela 12 Número máximo de ressolubilizações ⁽¹⁵⁾

Espessura		Ressolubilizações (Número Máximo)
mm	Pol	
Abaixo de 0.51	Abaixo de 0.02	0
De 0.51 a 3.175	De 0.02 a 0.125	1
Acima de 3.175	Acima de 0.125	2

Logo após a retirada do banho de resfriamento, o material se encontra na condição "AQ", a qual favorece as operações de conformação. O tempo que o material permanece nesta condição varia com a série a que pertence: 2XXX e 6XXX permanecem por 15 min e 7XXX por 1h, aproximadamente.

Após este período passam para a condição "-W" (instável) e devido a esta instabilidade, ocorre uma transformação espontânea e relativamente lenta, denominada "envelhecimento natural", com exceção da série 7XXX, que pode permanecer indefinidamente na condição "-W".

e) Refrigeração

Quando é necessário reter a liga na condição "AQ", para conformação ou outro tipo de processamento mecânico, devem ser conservadas em refrigeração a -12 °C por até 7 dias ou -23°C por até 30 dias. O tempo de espera máximo para início da refrigeração deve ser de 15 min, após o resfriamento de solubilização⁽¹⁶⁾.

f) Envelhecimento Natural

A decomposição lenta e espontânea, à temperatura ambiente, da estrutura solubilizada do material, leva a um endurecimento dentro de um determinado prazo de tempo, que é denominado envelhecimento natural.

O tempo de envelhecimento das ligas 2014, 2024, 2219 e 6061 é de 96 horas a temperatura ambiente. Após este período, elas estarão na condição de envelhecido natural, condição esta designada pela sigla "T4"⁽¹⁶⁾.

g) Envelhecimento Artificial

Após o tratamento térmico de solubilização e têmpera, a dureza do material pode ser aumentada ou por um tratamento de envelhecimento à temperatura ambiente (envelhecimento natural) ou com um tratamento térmico de precipitação (envelhecimento artificial).

Basicamente o tratamento de envelhecimento artificial consiste em se aquecer a liga a temperaturas relativamente baixas por um determinado tempo a fim de se precipitar partículas e/ou precipitados coerentes, com tamanho controlado e distribuição homogênea.

Esses precipitados sendo coerentes com a matriz, fazem com que ocorra uma distorção elástica no retículo cristalino, aumentando a resistência da liga.

Em algumas ligas, suficiente precipitação ocorre em alguns dias à temperatura ambiente, fornecendo ao material razoáveis propriedades para muitas aplicações. Outras ligas, que possuem baixas reações de precipitação à temperatura ambiente, são sempre tratadas por envelhecimento artificial antes de serem utilizadas.

Infelizmente, o ciclo de tratamento necessário para otimizar uma propriedade, tal como resistência a tração, não é o mesmo para outra, tal como limite de escoamento ou resistência a corrosão, conseqüentemente, os ciclos devem ter um comprometimento para fornecer as melhores combinações de propriedades. A tabela 13 apresenta algumas temperaturas e tempos de encharques. Outras ligas estão disponíveis na mesma referência bibliográfica.

Tabela 13 Temperaturas e tempos de encharques^(15, 16).

Liga	Condição pré-tratamento	Formas	Envelhec. Artificial		Condição pós-tratamento
			Temp. (°C, ± 5)	Tempo (h)	
2014	T3	Chapas	160	18	T62
	T4	Extrudados	160	10	T6
	T42				T62
	T4510				T6510
	T4	Forjados	170	10	T6
6061	T4	Chapas	160	18	T6
	T4	Extrudados	175	8	T6
	T4510				T6510
	T4511				T6511
	T42				T62
	T4	Forjados	175	8	T6
7075	W	Chapa	120	24	T6,T62
	W51	Extrudados			T6,T62,T73
	W	Forjados			T651,T7351
					T6,T73

A figura 10 apresenta curvas típicas obtidas por ensaios de envelhecimento. Neste caso, são mostradas as variações de propriedades obtidas para a liga ABNT 6061 após o tratamento de envelhecimento artificial (ou precipitação) em diferentes temperaturas e tempos de tratamento.

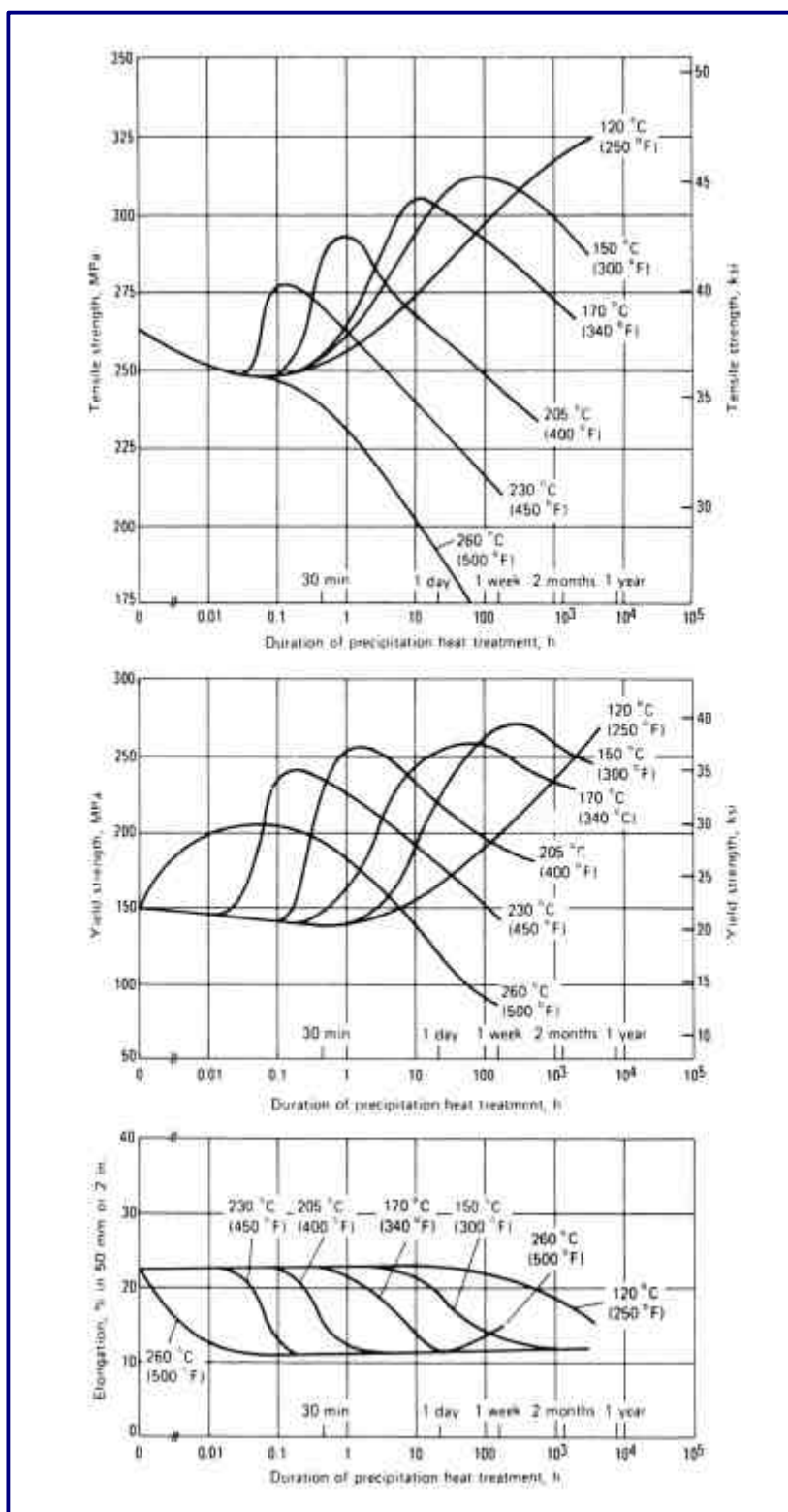


Figura 10 Curvas de Envelhecimento para liga ABNT 6061⁽¹⁵⁾.

Alguns trabalhos desenvolvidos recentemente, voltam-se basicamente à melhoria das propriedades mecânicas através do envelhecimento artificial. Dentre os trabalhos consultados, destacam-se:

- **Lee et al, 1998.**⁽¹⁷⁾ Apresentam um estudo da influência do pré-envelhecimento através de um interessante processo que consiste em: a) solubilização à 542 ± 2 °C, durante 10 h, b) resfriamento em água à 25, 60 e 95 °C, durante vários intervalos de tempo entre 10 a 360 min e adicionalmente envelhecimento natural à temperatura ambiente e c) envelhecimento artificial à 161, 181 e 201 °C (± 1 °C) durante 0,5 a 12 h. Os resultados obtidos revelam que resfriando em água à 95 °C por 60 min de envelhecimento natural seguido de um envelhecimento artificial à 160 °C por 2 h, obtém-se uma dureza de 63 Brinnell e resistência ao escoamento de 290 MPa para os corpos de prova em liga ABNT 6061.
- **Qureshi, Sheikh, Rashid, 1998.**⁽¹⁸⁾ Neste trabalho são apresentados modelos matemáticos preditivos da resistência à tração e ao escoamento em função do tempo de envelhecimento artificial para diferentes faixas de temperatura recomendada para este processo. A extensa aplicabilidade destes modelos apoiam a estimativa de tratamentos adequados para estas ligas visando a obtenção de determinadas características mecânicas exigidas para as peças nas ligas ABNT 6063, 6061 e 6069.
- **Dorward, Bouvier, 1998.**⁽¹⁹⁾ Este trabalho apresenta um estudo da influência da racionalização do Mg_2Si dissolvido na matriz de alumínio e o excesso de Si para as ligas ABNT 6061. Dentre as conclusões obtidas destaca-se que para um excesso de 0,1% de Si tem-se um pico de 10 a 15 MPa na resistência à ruptura com uma redução na elongação em torno de 0,25%. Uma composição balanceada e que garante uma combinação ideal entre resistência e tenacidade situa-se em 0,2% de excesso de Si com 1,2% Mg_2Si .

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Obtenção de Curvas de Escoamento

O levantamento das Curvas de Escoamento permite determinar as tensões a partir das quais um material terá um comportamento plástico, ou seja, ao deformá-lo este não retorna a forma original.

Define-se Tensão de Escoamento^(20, 21, 22, 23), k_f como sendo a tensão, obtida em um ensaio uniaxial de tensões, que propicia o escoamento plástico do material. A tensão k_f depende de:

- Fatores relativos ao material: composição química (CQ), tamanho de grão (TG) e microestrutura;
- Fatores relativos ao processo: temperatura da deformação (θ), deformação (ϕ) e velocidade de deformação ($\dot{\phi}$) .

Desta forma, pode-se resumir:

$$k_f = f(\theta, \phi, \dot{\phi}, CQ, TG, \text{microestrutura})$$

A figura 11 mostra comparativamente um grupo de curvas de escoamento de alguns materiais.

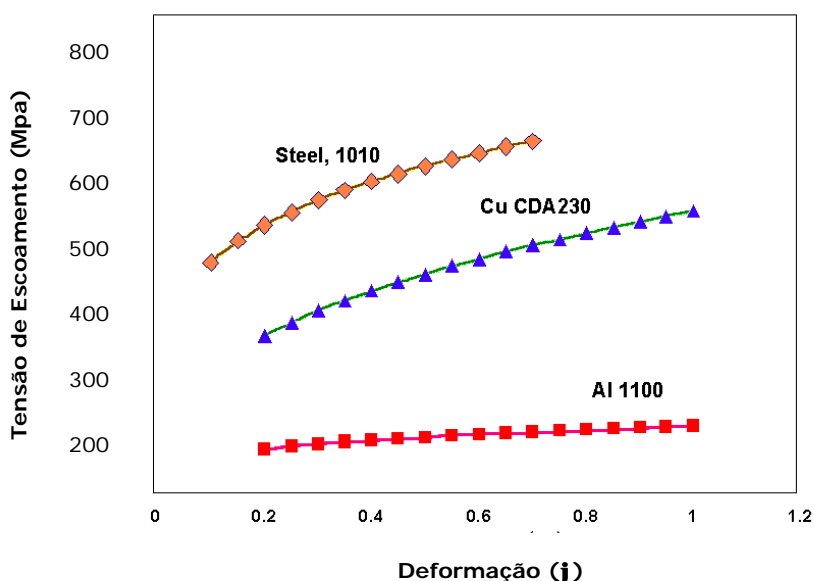


Figura 11 Exemplos de Curvas de Escoamento⁽²³⁾

A obtenção das Curvas de Escoamento pode ser feita a frio ou a quente, conforme a condição imposta pelo processo de conformação escolhido. No caso específico dos processos de forjamento, seja a frio ou a quente, deseja-se testar o comportamento do material sujeito a altas deformações, portanto neste caso, o ensaio de compressão é o ensaio mais apropriado⁽²²⁾.

Na conformação a frio (ou temperatura ambiente), apenas a deformação afeta a tensão de escoamento, provocando um aumento na mesma e na dureza do material. Ainda hoje, o mecanismo deste fenômeno, chamado de "encruamento", não foi esclarecido (Schaeffer, 1995). Alguns trabalhos procuram explicar o aumento da resistência pelo deslocamento das discordâncias na microestrutura⁽²¹⁾.

Na conformação à quente dos metais e nas temperaturas acima da temperatura de recristalização, a influência da deformação na tensão de escoamento é insignificante, entretanto, a velocidade de deformação afeta sensivelmente a mesma.

O problema experimental consiste em adquirir os valores de força F aplicada pelo punção em função do seu deslocamento relativo ΔH durante a conformação do corpo de prova em uma máquina de ensaios mecânicos.

Os dados de força são obtidos através de uma célula de carga com extensores de força ligados a um sistema de aquisição de dados. O deslocamento do punção é medido por um transdutor potenciométrico ligado ao mesmo sistema.

A partir destes dados (F e ΔH), pode-se construir a Curva de Escoamento: $k_f \times \varphi$, onde estes valores são calculados da seguinte forma:

a) Deformação Verdadeira (φ) – É obtida do logaritmo da razão entre a altura instantânea $h_i = h_o - \Delta H$ e a altura inicial h_o do corpo de prova.

$$\varphi = \ln \frac{h_i}{h_o}$$

b) Tensão de Escoamento (k_f) – É obtida pela razão entre a força F medida na célula de carga da máquina de ensaios e a área instantânea A_i do corpo de prova. A área instantânea do corpo de prova é calculada no ensaio de compressão pela lei de constância do volume. A expressão final para o cálculo do k_f é:

$$k_f = \frac{4.F.(h_o - \Delta H)}{\pi.D_o.h_o}$$

Na realidade este valor de k_f é calculado considerando a existência da deformação elástica do punção.

Os efeitos do atrito são minimizados fazendo com que a relação h_i / r_i seja maior possível. Entretanto, devido aos efeitos da flambagem esta relação fica limitada a certos valores, usualmente utiliza-se a relação $h_o/2r_o < 1,5$ ^(20, 23). Portanto levando-se em conta estas considerações pode-se dizer que:

$$k_f \approx k_w$$

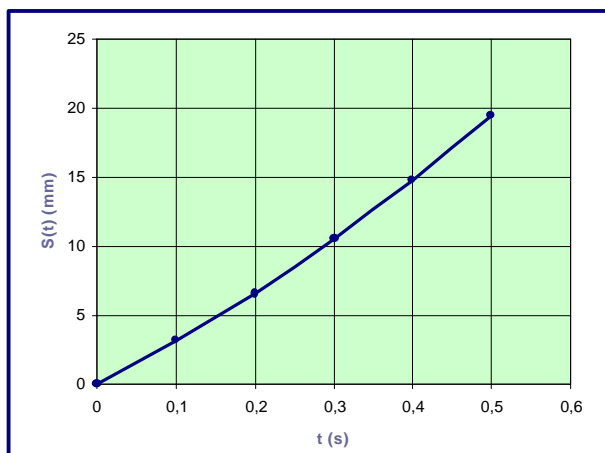
Em geral, pode ser utilizada qualquer máquina de ensaio, entretanto, em máquinas hidráulicas (figura 13 à direita) é possível manter a velocidade de deformação constante através do controle de velocidade da mesa de forma que:

$$V_{\text{prensa}} / h_i = \text{constante} = \dot{\phi} \quad (1)$$

Um sistema computadorizado de controle/atuador que permita impor a curva de controle de deslocamento da prensa mostrada na figura 12 é requerido para atender a equação (1):

$$\text{Deslocamento} = h_o(1 - e^{-\dot{\phi}t}), \text{ para } 0 \leq t \leq \frac{\dot{a}_{\text{total}}}{\dot{\phi}} \quad (2)$$

Por exemplo: Para um corpo de prova de altura 30 mm, onde se deseja obter a curva de escoamento com velocidade de deformação constante de 1 s^{-1} e deformação relativa em altura de 50%, tem-se que:



A curva de controle do punção deve obedecer à função:

$$\text{Deslocamento} = 30(1 - e^{-1t})$$

para $0 \leq t \leq 0,5$

Figura 12 Curva de controle do punção para ensaio de compressão

Para o ensaio de compressão à quente, utiliza-se o dispositivo mostrado na figura 13 e considera-se o ensaio isotérmico.

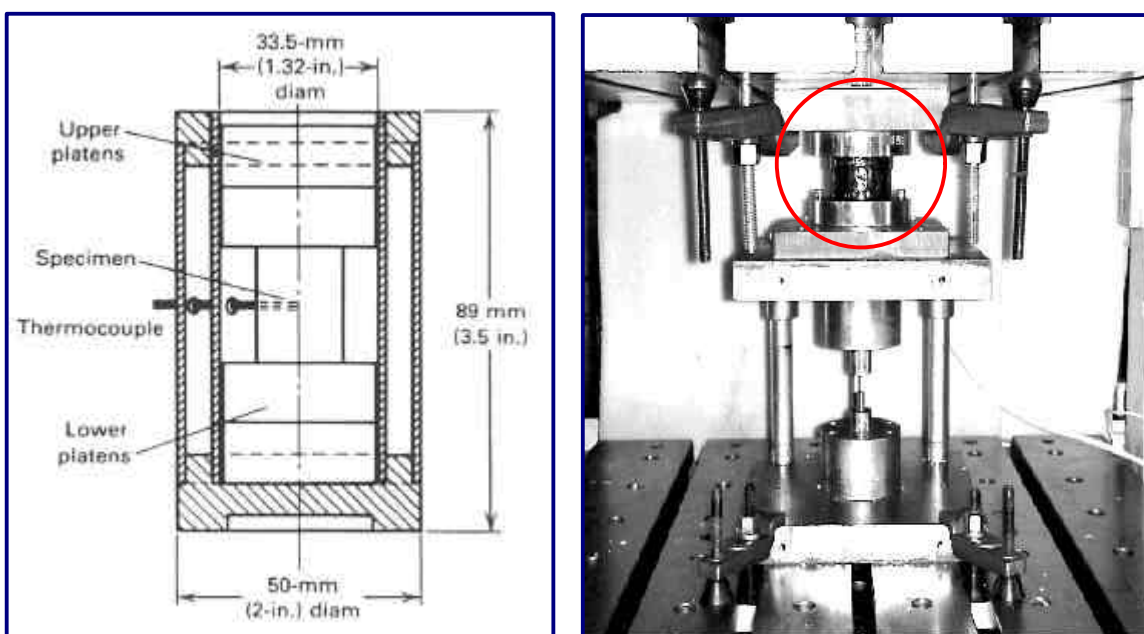


Figura 13 Dispositivo para ensaio de compressão à quente ^(23, 24).

Um sistema de aquecimento elétrico garante a temperatura constante durante o ensaio. Adicionalmente, é usada uma célula de carga para medir a força F e um transdutor para medir o deslocamento (ΔH) do punção ligados a um sistema de aquisição de dados com velocidade de leitura adequada aos ensaios.

Em geral, para facilitar os cálculos analíticos de força e trabalho de conformação, bem como a análise do processo de forjamento pelo métodos dos elementos finitos, a partir dos dados adquiridos para três velocidades de deformação e para três temperaturas de ensaio, ajustam-se os dados em uma função conforme proposta no trabalho de Hensel e Spittel⁽²⁵⁾:

$$k_f = k_{f_0} \cdot A_1 \cdot e^{-m_1 T} \cdot A_2 \cdot \dot{\varphi}^{m_2} \cdot A_3 \cdot \dot{\varphi}^{m_3} \cdot e^{\frac{m_4}{\varphi}}$$

Onde A_1 , A_2 , A_3 , m_1 , m_2 , m_3 e m_4 são os coeficientes termodinâmicos determinados pelo ajuste desta função aos pontos da curva adquirida, considerando o critério dos mínimos quadrados.

A figura 14 mostra um conjunto de curvas de escoamento de algumas ligas de alumínio comparadas com um aço ABNT 1025.

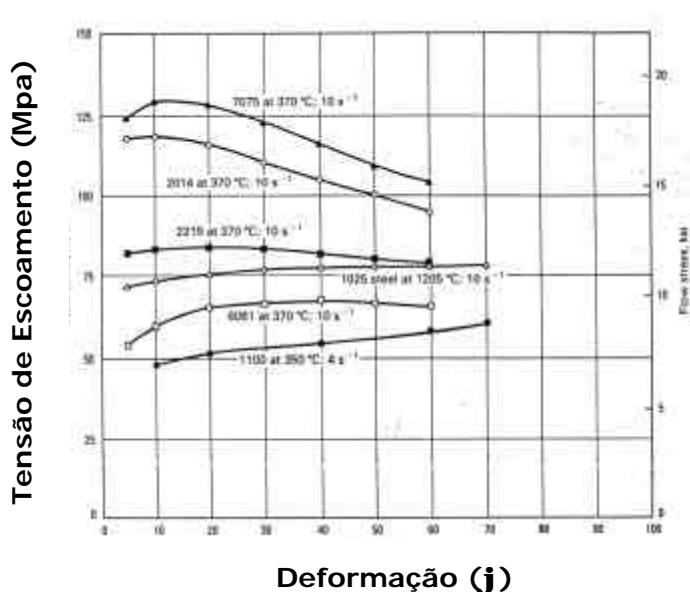


Figura 14 Curvas de escoamento de algumas ligas de alumínio⁽¹²⁾.

Atualmente, vários centros de pesquisa possuem bancos de dados de curvas de escoamento para uma enorme variedade de materiais metálicos já ensaiados.

O “US Navy’s Manufacturing Technology”, através do Programa “National Center for Excellence in Metalworking Technology – NCEM”⁽²⁶⁾ disponibiliza acesso completo a informações tais como: composição química, microestrutura (micrografias), dados de escoamento, etc.

O custo para acesso completo aos dados de apenas um tipo de material é de US\$350 para o primeiro ano e US\$175 pela renovação do acesso. Para ter acesso completo a mais de 100 tipos diferentes de materiais metálicos os custos passam para US\$30,000 para o primeiro ano e US\$15,000 pela renovação do acesso.

Quando se deseja apenas os dados de escoamento (curvas de escoamento) é possível o “download” destas informações ao custo de US\$ 250 por material para o primeiro ano e US\$ 125 na renovação anual e US\$ 20,000 para o acesso inicial a mais de 100 tipos diferentes de materiais e US\$ 10,000 para a renovação anual. A figura 15 mostra uma curva de escoamento hipotética de um material “X” disponibilizada em um “download” demonstrativo efetuado no site da “NCEM”.

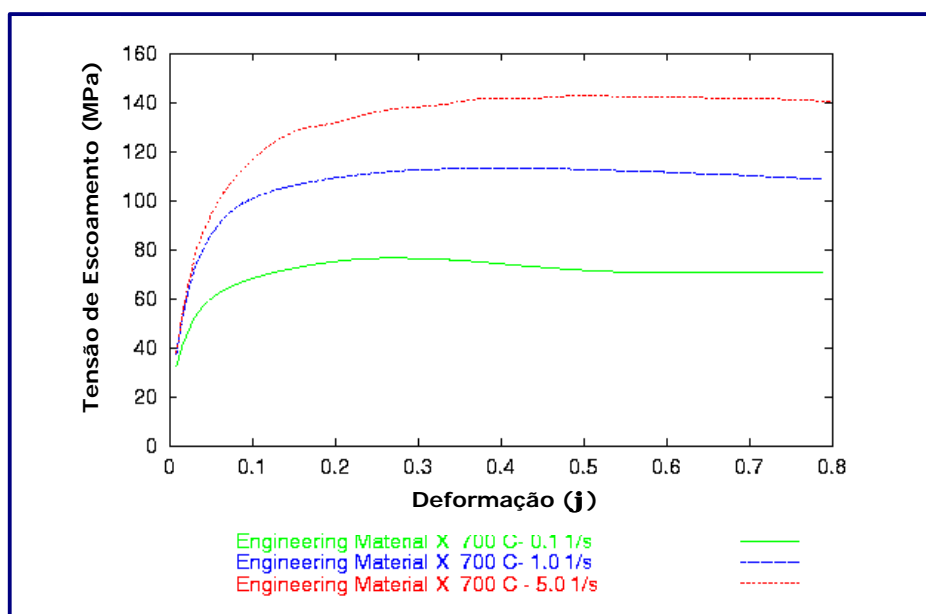


Figura 15 Curva de Escoamento Hipotética⁽²⁶⁾

3.2 Determinação da Condição de Atrito

À medida que são aprimorados os processos de forjamento, como as técnicas de forjar a morno, a frio e isotermicamente, onde o material sofre grandes deformações, da mesma forma quando se exige mais do produto quanto à precisão dimensional, aumenta a importância do conhecimento do atrito e de seu controle através de uma lubrificação adequada.

O conhecimento do atrito pode proporcionar importantes subsídios no desenvolvimento do processo de forjamento e propiciar benefícios quanto ao custo final do forjado e sua competitividade comercial.

Até mesmo os métodos mais avançados, baseados em modelos matemáticos como a teoria das tiras, do limite superior, elementos finitos, etc. e auxílio computacional exigem que se conheçam as variáveis que regem o processo, dentre as quais o atrito se destaca fortemente para a obtenção de resultados coerentes e satisfatórios.

A importância de uma adequada condição de atrito peça-matriz ganha ainda mais destaque quando se deseja forjar novas ligas, peças complexas ou realizar forjamento de precisão, pois o atrito excessivo pode dificultar ou até mesmo impedir a realização do processo de conformação.

A idéia básica de amenizar os efeitos do atrito consiste em estabelecer um filme com baixa tensão de cisalhamento na interface peça-matriz para reduzir as tensões que se opõe ao movimento relativo nesta interface.

A lubrificação nos processos de conformação⁽²⁷⁾ pode ser classificada nos seguintes tipos básicos:

- a) condições fluidas ou hidrodinâmicas: quando existe um filme de lubrificante suficientemente espesso para separar as duas superfícies;

- b) condições de contorno ou de fronteira: quando existe um filme de espessura molecular separando as superfícies e zonas onde há contato entre rugosidades;
- c) condições de lubrificação mista: que é a combinação das anteriores;
- d) condição seca: quando não há lubrificante na interface.

Os lubrificantes, de uma maneira geral, devem apresentar as seguintes características e desempenhar algumas funções que em geral podem ser⁽²⁸⁾:

- a) Agir como um agente na prevenção da aderência e soldagem da peça na matriz;
- b) Possuir boas propriedades de isolamento evitando perdas de calor, especialmente no forjamento a quente;
- c) Ser inerte para prevenir ou reduzir reações entre a matriz e a peça nas temperaturas de forjamento empregadas;
- d) Não ser abrasivo, reduzindo a erosão na superfície da matriz evitando o excessivo desgaste;
- e) Ser livre de componentes poluidores ou venenos, não produzindo gases que ponham em risco a saúde dos operadores ou o meio ambiente;
- f) Ser facilmente aplicável e removível da peça e da matriz;
- g) Ser comercialmente disponível a um custo acessível.

Em geral, é difícil que sejam atendidas todas estas exigências e não existe método que possa avaliar todas elas⁽²⁸⁾. Entretanto, pode-se quantificar a condição de lubricidade de um determinado lubrificante sob determinadas condições, de forma que estes valores obtidos sejam empregados na otimização do processo de conformação aplicado.

A avaliação de lubrificantes pela quantificação do atrito associado é uma das formas de se comparar e determinar o valor de um lubrificante.

As questões relacionadas à emissão de gases tóxicos e o perigo que os mesmos oferecem ao pessoal de fábrica devem ser pesados adequadamente inclusive atendendo os procedimentos próprios de cada empresa quanto ao recebimento, manuseio, utilização e o descarte do resíduo originado⁽²⁸⁾.

Entretanto, é importante a análise do comportamento destes lubrificantes no que concerne às variações nos parâmetros tecnológicos típicos de um processo de conformação a quente.

Sabe-se que a temperatura determina a natureza do lubrificante a ser utilizado, principalmente pelos seus efeitos na viscosidade e na formação de óxidos na superfície do material, assim como a velocidade de deformação e o grau de deformação podem apresentar variações que definem a condição mais econômica ou a de melhor qualidade no processo produtivo.

Portanto, é mandatório que os lubrificantes permitam obter uma condição de baixo atrito independente destes parâmetros típicos dos processos de conformação a quente de forma a propiciar um número menor de fatores controláveis em um processo produtivo.

Dentre os fatores que influenciam o atrito, destacam-se⁽²⁷⁾:

- a) Viscosidade do lubrificante e a velocidade de deformação;
- b) Temperatura;
- c) Rugosidade da ferramenta;
- d) Deformação;

Aspectos relativos a estes fatores serão discutidos na parte experimental deste trabalho.

O atrito na interface de dois materiais pode ser quantificado em termos de um fator ou coeficiente. A tensão de cisalhamento de atrito, \mathbf{t} , é normalmente expressa ^(21, 28), conforme a Lei do Atrito de Coulomb por

$$\mathbf{t} = \mathbf{s}_n \mathbf{m} \quad (1)$$

A equação (1) indica que a tensão de cisalhamento é proporcional a \mathbf{s}_n , componente da tensão normal na interface matriz/material e \mathbf{m} é o “coeficiente” de atrito. A tensão de cisalhamento do atrito, também pode ser expressa por ^(21, 28):

$$\mathbf{t} = \frac{\mathbf{m}}{\sqrt{3}} \mathbf{k}_f \quad (2)$$

A equação (2) expressa \mathbf{t} em função da tensão de escoamento do material, \mathbf{K}_f e do “fator de cisalhamento” do atrito \mathbf{m} .

A determinação experimental do coeficiente de atrito (\mathbf{m}) ou do fator de cisalhamento do atrito (\mathbf{m}) é realizada com ajuda do chamado “Teste do Anel”, que consiste na compressão de um anel com as dimensões do diâmetro externo, diâmetro interno e espessura inicialmente conhecidas.

Uma condição de atrito alto faz o diâmetro interno diminuir a medida que o anel é deformado e uma condição de atrito baixo faz o diâmetro interno aumentar em relação ao raio neutro à medida que o anel é deformado.

A figura 16 mostra anéis deformados e a respectiva condição de atrito interfacial entre matriz e peça, ou seja, (a) anel inicial, (b) anel deformado com atrito alto e (c) anel deformado com atrito baixo.

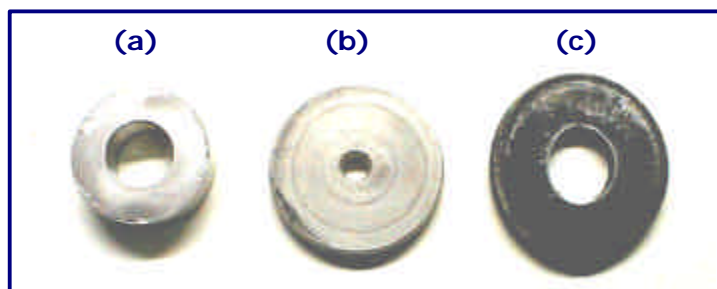


Figura 16 Anéis deformados no ensaio de compressão

O “Teste do Anel” apresenta uma vantagem quando aplicado ao estudo do atrito que é o fato de não ser considerada a força necessária para deformar o anel. É necessário que a máquina de ensaios permita deformar e seja possível controlar esta deformação para que o aumento ou a diminuição relativa do diâmetro interno do anel seja comparado com a diminuição relativa da espessura do anel.

Para se obter o valor do atrito, a redução percentual do raio interno em relação à redução percentual de espessura deve ser comparada com “curvas de calibração”, traçadas para determinados valores de atrito e obtidas através de análises teóricas que simulam o fluxo de material durante a compressão e descrevam o abaulamento do corpo de prova para determinados valores de atrito.

Avitzur (1968) propôs equações analíticas⁽²⁹⁾ para a compressão de um anel considerando os efeitos do atrito, através da análise pelo Método do Limite Superior/Inferior, onde as seguintes hipóteses são aplicadas:

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

Os programas de simulação numérica pelo método dos elementos finitos permitem obter as dimensões teóricas do corpo de prova deformado sob cada condição de atrito e assim é possível traçar as “curvas teóricas de calibração”.

Marcon et al (2000) apresentam um método⁽³⁰⁾ que permite determinar no mesmo ensaio de compressão a curva tensão-deformação e o coeficiente de atrito (μ), utilizando o "Teste do Anel". Na figura 17 é mostrada a curva de calibração obtida pelo código "METAFOR", originalmente desenvolvido na Universidade de Liège na Bélgica, comparada com a solução aproximada de Avitzur (1968).

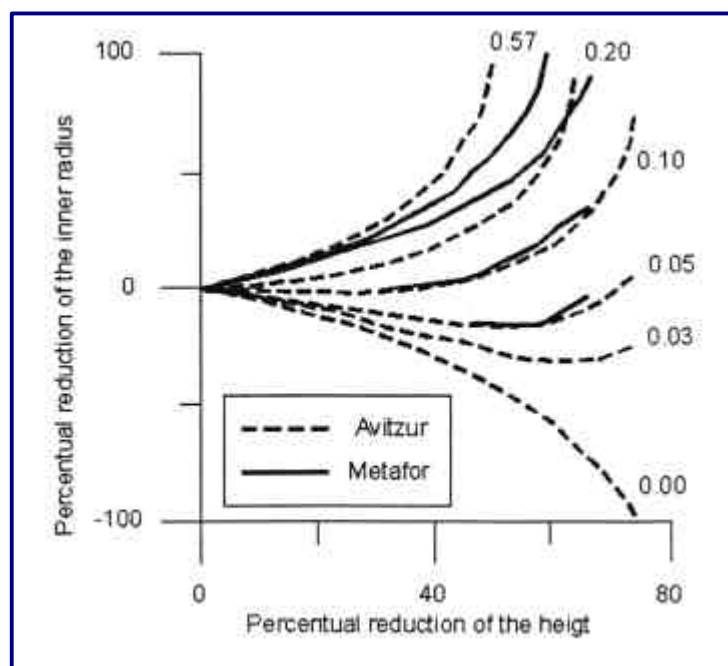


Figura 17 Comparação entre a solução numérica e a analítica⁽³⁰⁾

Kopp e Wiegels (1998) descrevem um modelo⁽³¹⁾ de ensaio do tubo cônico proposto por Philipp (1993), onde as curvas de calibração também são obtidas por simulação numérica (Elementos Finitos). A figura 18 mostra o corpo de prova proposto para este ensaio.

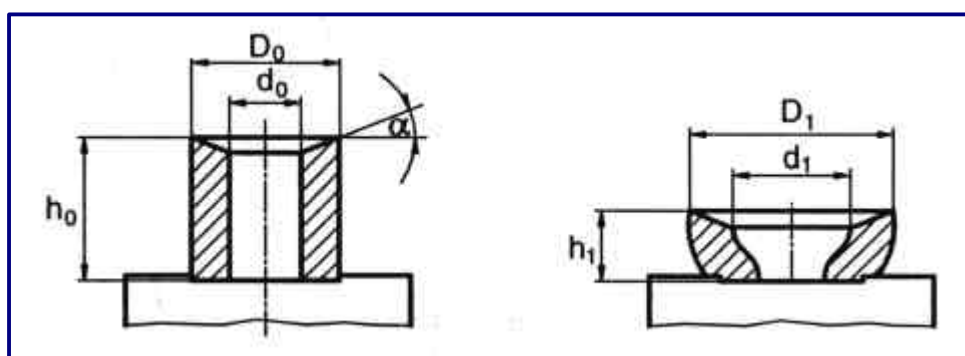


Figura 18 Corpo de prova para ensaio do tubo cônico⁽³¹⁾.

As curvas de calibração obtidas por simulação numérica para o modelo de tubo cônico e o anel são mostradas na figura 19.

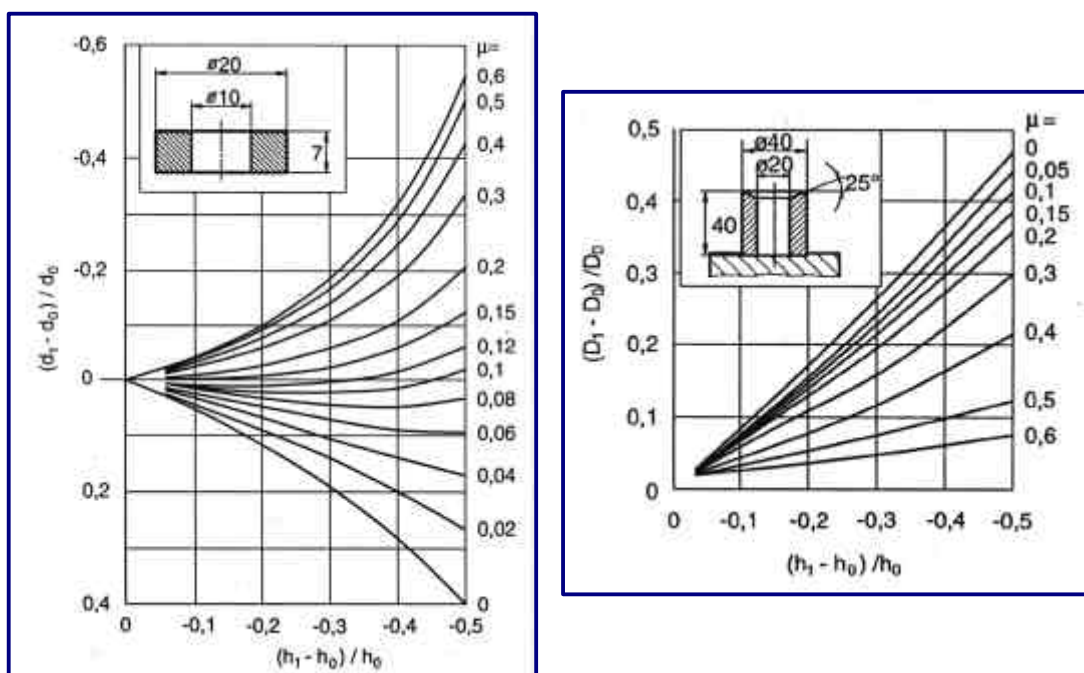


Figura 19 Curvas de calibração Anel x Tubo cônico⁽³¹⁾.

3.3 O Cálculo da Força de Forjamento

3.3.1 Introdução

Uma das etapas do desenvolvimento do processo de forjamento requer a estimativa do equipamento necessário e o ferramental que será utilizado em função de peça especificada pelo cliente.

A utilização de modelos analíticos que permitam estimar a força necessária para forjar uma peça foi no começo dos primeiros desenvolvimentos de processo a única ferramenta disponível para os engenheiros determinar qual o tipo de equipamento necessário para cada tipo de peça. Ainda hoje, algumas forjarias de pequenos recursos se valem destes modelos antes de produzir um lote piloto das peças, pelo menos para determinar qual prensa deve ser usada. A figura 20 sintetiza o fluxo de análise utilizado nos modelos analíticos.

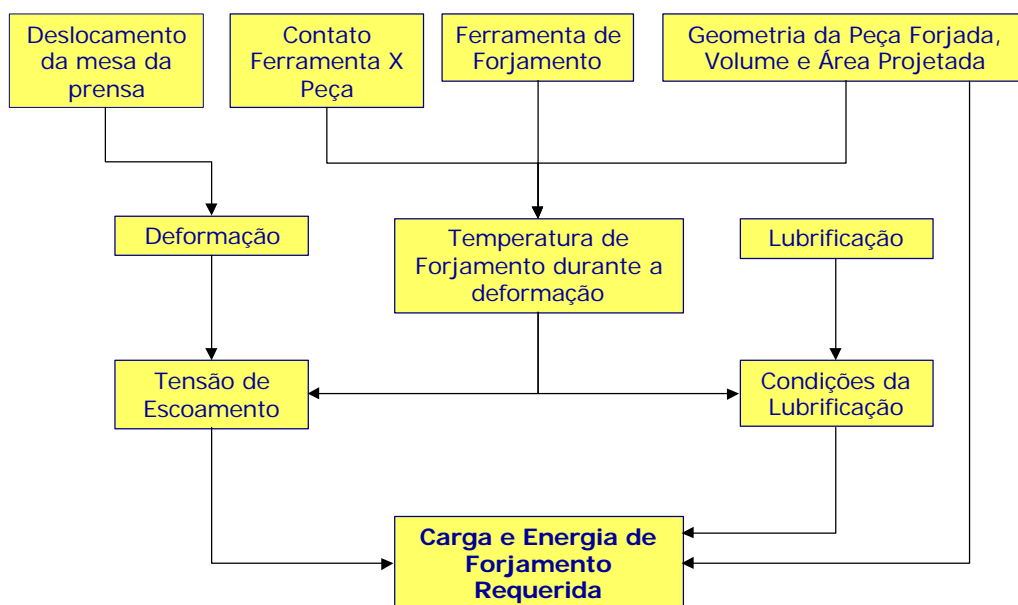


Figura 20 Fluxo de análise dos modelos analíticos

Nos capítulos seguintes serão abordados alguns modelos muito utilizados e ainda hoje aplicados na simulação numérica pelo Método dos Elementos Finitos.

3.3.2 Teoria Elementar da Plasticidade

As noções básicas para a Teoria Elementar da Plasticidade surgiram nos anos de 1924 e 1925 com Siebel e Karman, objetivando solucionar problemas de laminação. Nos anos seguintes, Sachs estendeu a teoria para trefilação e Siebel e Pomp estenderam para a compressão plana⁽³²⁾.

O desenvolvimento desta teoria para um sistema simétrico e axial levou a chamada "Teoria das Tiras". Considerando um estado plano de tensões, as seguintes condições devem ser observadas:

- Ferramentas de conformação com simetria;
- As massas e forças de inércia podem ser desprezadas;
- Na interface entre a ferramenta e o material a ser conformado vale a Lei de Atrito de Coulomb, expressa pela constante " μ ";
- A tensão de escoamento k_f é uma função dada por:

$$k_f = f(\varphi, \dot{\varphi}, T)$$

Para a análise das tensões em uma tira, considera-se o sistema mostrado na figura 21.

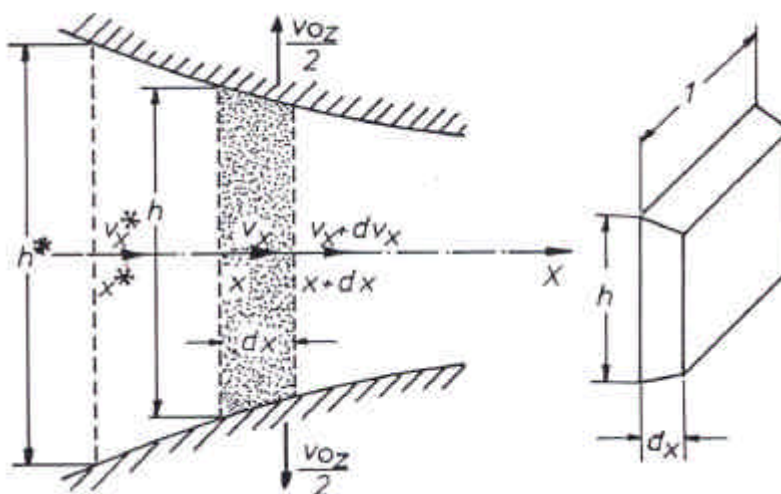


Figura 21 Modelo para a Teoria das Tiras⁽³²⁾

A partir da análise das tensões em uma tira (Figura 21) tem-se a resultante das forças na direção "z":

$$dF_{z(\text{result.})} = dF_z - dF_n \cdot \text{sen} \alpha$$

$$dF_{z(\text{result.})} = dF_n \cdot \text{cos} \alpha - dF_n \cdot \text{sen} \alpha \quad (1)$$

A condição de equilíbrio na direção "x" será:

$$F_x - (F_x + dF_x) - 2\mu dF_n \cdot \text{cos} \alpha - 2dF_n \cdot \text{sen} \alpha = 0$$

$$-dF_x = 2dF_n (\text{sen} \alpha + \mu \text{cos} \alpha) \quad (2)$$

Da composição e substituição de valores nas equações de equilíbrio (1) e (2), resulta a equação diferencial da "Teoria das Tiras":

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{2}{h} [\tan(\alpha + \rho) - \tan \alpha] \sigma_x - \frac{2}{h} k_f \tan(\alpha + \rho) = 0 \quad (3)$$

Sendo \mathbf{s}_x uma tensão conhecida em qualquer posição "x", a equação (3) somente pode ser usada para os casos onde a integração seja possível. Caso não seja possível, processos numéricos são requeridos para resolvê-la. Os caso particulares são:

a) Compressão sem atrito: $\alpha = 0$, $\rho = 0$

$\mathbf{s}_x = 0$, sendo a hipótese de Tresca da máxima tensão de cisalhamento, tem-se que $k_f = \mathbf{s}_x - \mathbf{s}_z$, portanto: $\mathbf{s}_z = -k_f$.

b) Compressão com atrito: $\alpha = 0$, quando $x = b/2$, $\mathbf{s}_x = 0$ ("x" conhecido)

$$\sigma_x = k_f \left[1 - e^{\frac{2\mu}{h} \left(\frac{b}{2} - x \right)} \right] \therefore \sigma_z = -k_f \cdot e^{\frac{2\mu}{h} \left(\frac{b}{2} - x \right)} \quad (4)$$

Por aproximação: $e^{\frac{2\mu}{h} \left(\frac{b}{2} - x \right)} \approx 1 + \frac{2\mu}{h} \left(\frac{b}{2} - x \right)$

Portanto a equação (4) fica: $\sigma_z \approx -k_f \left[1 + \frac{2\mu}{h} \left(\frac{b}{2} - x \right) \right] \quad (5)$

Na condição de Compressão com Atrito para o caso de uma placa plana de dimensões $B \times L \times H$, a figura 22 mostra a distribuição de tensões conforme o modelo da equação (5).

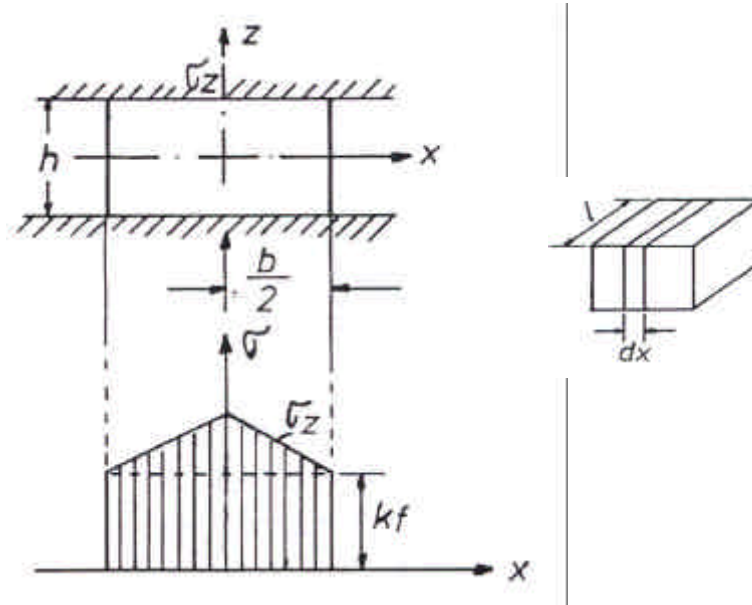


Figura 22 Distribuição de Tensões pelo Modelo das Tiras⁽³²⁾

A resistência à deformação k_w é:

$$k_w = \frac{F_z}{A} = \frac{2l \int \sigma_z dx}{b.l}$$

$$k_w \approx \bar{k}_f \left(1 + \frac{1}{2} \mu \frac{b}{h} \right), \text{ sendo válido para pequenos } \frac{\bar{\epsilon} \cdot b}{h}$$

Portanto tem-se que:

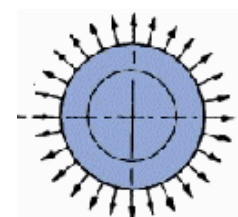
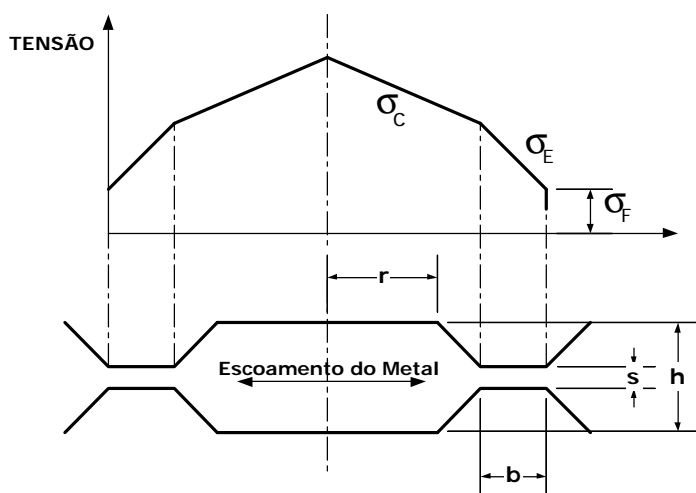
$$k_w = \bar{k}_f \left(1 + \frac{1}{3} \mu \frac{d}{h} \right), \text{ para: } \begin{array}{l} 0,25 \leq \bar{\epsilon} \leq 0,50 \text{ (forjamento a quente)} \\ 0,05 \leq \bar{\epsilon} \leq 0,15 \text{ (forjamento a frio)} \end{array}$$

3.3.3 Método das Tiras Simplificado

Uma simplificação do “Método das Tiras” é proposto por Altan (1983), sendo utilizado com razoável precisão na previsão das cargas e tensões necessárias no forjamento de uma peça⁽²⁸⁾.

Para este propósito, a peça é dividida em seções planas e com simetria axial onde são utilizadas equações simples para prever as cargas de forjamento.

Neste processo utiliza-se um modelo de cavidade onde são definidos alguns elementos básicos e assume-se que esta cavidade apresenta formato retangular e uma geometria de rebarba simplificada conforme mostra a figura 23⁽²⁸⁾.



Seção de
deformação axissimétrica



Seção de
deformação plana

Figura 23 Modelo de cavidade para o método das tiras simplificado

Os elementos da figura 23 são:

- h: altura da seção definida pela cavidade;
- r: distância do centro da cavidade até a largura máxima da seção;
- s: espessura da rebarba;
- b: largura da rebarba.

Considerando a tensão de escoamento na região da rebarba por σ_F , fator de cisalhamento do atrito m , a tensão na entrada da cavidade até a rebarba de uma seção de deformação axissimétrica, σ_{EA} , é dada por:

$$\sigma_{EA} = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} m \frac{b}{s} + 1 \right) \sigma_F \quad (1)$$

Integrando a equação (1), obtém-se a carga de forjamento na região da rebarba, P_{EA} , dada por:

$$P_{EA} = 2\pi\sigma_F \left[-\frac{2}{3\sqrt{3}} m \frac{1}{s} (R^3 - r^3) + \left(1 + \frac{2}{\sqrt{3}} m \frac{R}{s} \right) \left(\frac{R^2 - r^2}{2} \right) \right] \quad (2)$$

Quando $R = r + b$, similar cálculo é feito para obter a carga de forjamento na cavidade, P_{CA} , sendo σ_C a tensão de escoamento na cavidade, obtém-se:

$$P_{CA} = 2\pi r^2 \left(\frac{m}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sigma_C}{3} \cdot \frac{r}{h} + \frac{\sigma_{EA}}{2} \right) \quad (3)$$

Como na região da rebarba ocorre rápido resfriamento do material e altas deformações as tensões de escoamento na cavidade e na rebarba são diferentes, portanto a carga total de forjamento é a soma das cargas nas duas regiões, dada por:

$$P_{total} = P_{EA} + P_{CA} \quad (4)$$

Para a região de deformação plana, as equações correspondentes a (2) e (3), são:

$$\sigma_{EP} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_F \left(1 + m \frac{b}{s} \right) \quad (5)$$

$$P_{FP} = \frac{2}{\sqrt{3}} b \sigma_F \left(2 + m \frac{b}{s} \right) \quad (6)$$

$$P_{CP} = \left(\sigma_{EP} + m \frac{L}{2h} \frac{m}{\sqrt{3}} \sigma_C \right) \quad (7)$$

onde L é o comprimento da cavidade dado por $L = 2r$ (figura 23). As equações (6) e (7) estimam a carga na rebarba e na cavidade por unidade de seção de deformação plana. A carga total na região submetida a deformação plana é a soma das cargas em cada seção calculada separadamente.

As tensões de escoamento (k_f) na região da cavidade e na rebarba (\mathbf{s}_c e \mathbf{s}_f , respectivamente para o modelo de Altan), devem ser determinadas separadamente em função da diferença de temperaturas e deformações das duas regiões durante a conformação da peça.

As equações definidas anteriormente são bastante simples e práticas podendo ser utilizadas em máquinas de calcular programáveis, entretanto é importante que se conheça (a) a geometria da peça, (b) as tensões de escoamento na cavidade e na saída de rebarba durante o estágio final do forjamento e (c) o fator de atrito entre a peça e a ferramenta.

Este modelo, proposto por Altan, atualmente está na forma de um programa de cálculo desenvolvido para interface "windows" disponível em <http://nsmwww.eng.ohio-state.edu/forgopal> chamado "ForgePAL"⁽⁴²⁾.

Inicialmente, ele apresenta uma série de janelas que permitem configurar a geometria da peça, a geometria da cavidade (comprimento e espessura de rebarba), tipo de prensa desejada, material da peça e as condições na fronteira peça-ferramenta (atrito, transferência de calor, temperaturas da peça e ferramenta, etc.). A figura 24 mostra a tela inicial de configuração do problema a ser calculado.

Imediatamente após a solicitação de cálculo, o programa apresenta um gráfico de resultados mostrando os valores de tensão na cavidade da matriz, na entrada da rebarba e na saída da rebarba, as estimativas de temperatura na cavidade e na rebarba e, finalmente, a carga total necessária para forjar a peça. A figura 25 mostra a tela final com os resultados calculados.

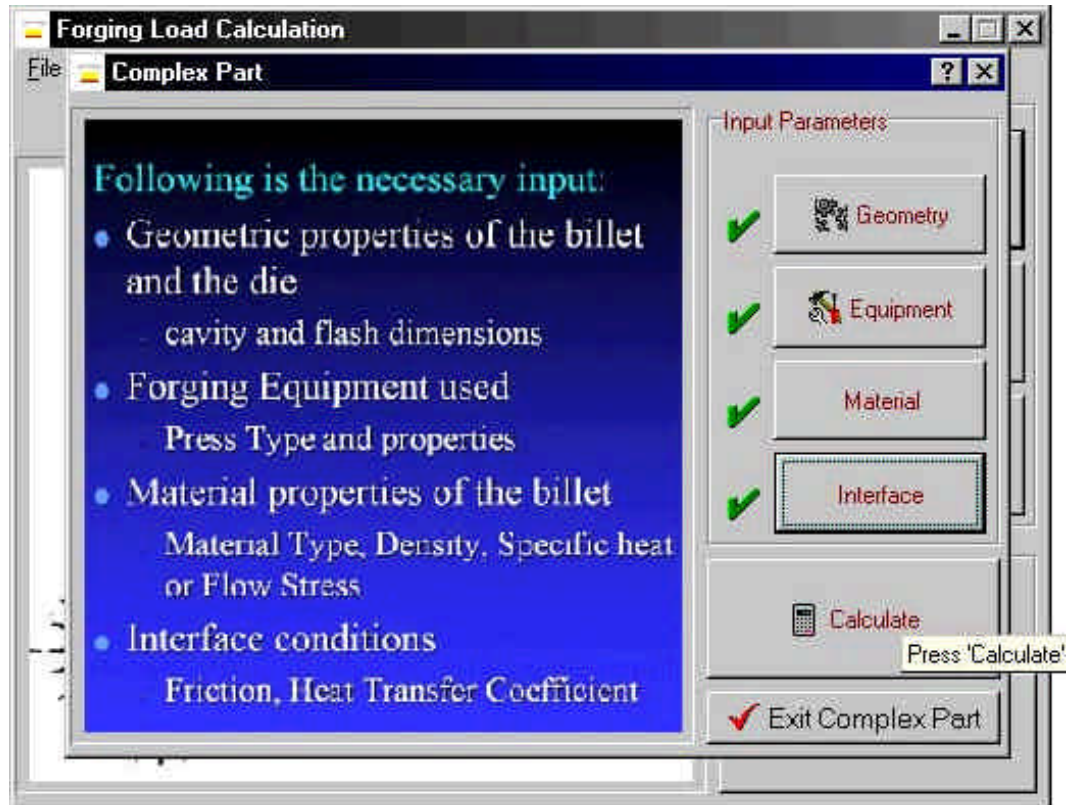


Figura 24 Tela Inicial de Configuração do ForgePAL⁽⁴²⁾

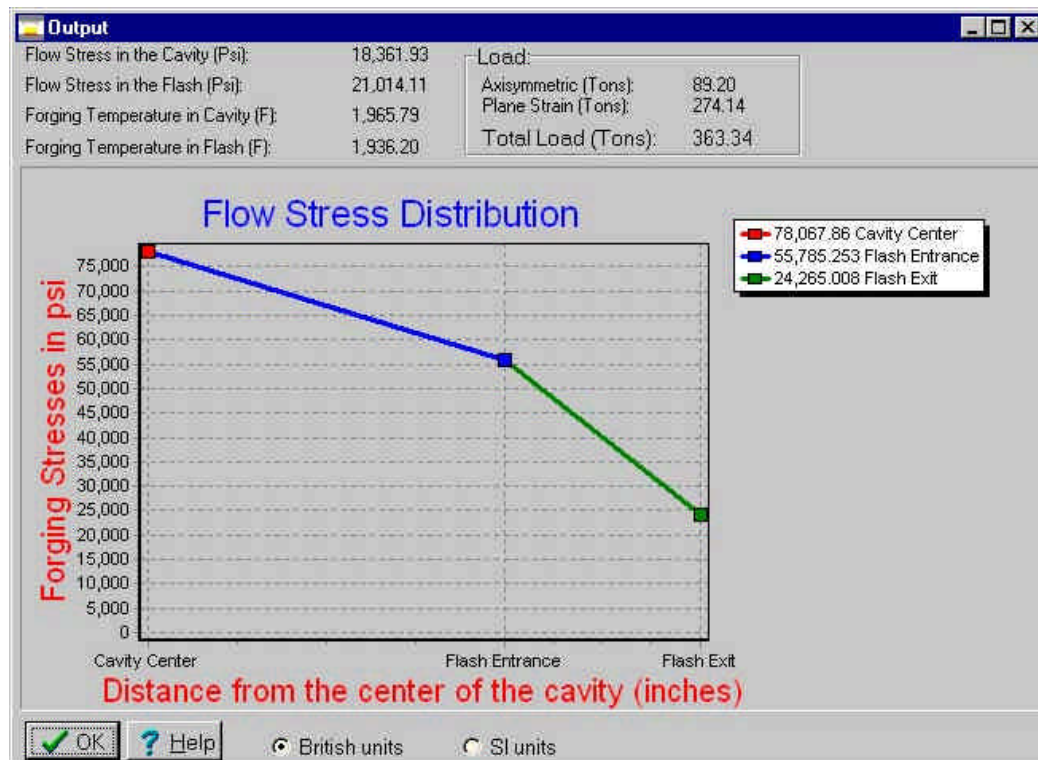


Figura 25 Tela de Resultados do ForgePAL⁽⁴²⁾

3.3.4 Método do Limite Superior

Este modelo, proposto por Avitzur (1968), baseia-se no modelo de compressão de um cilindro⁽²⁹⁾, conforme mostra a figura 26.

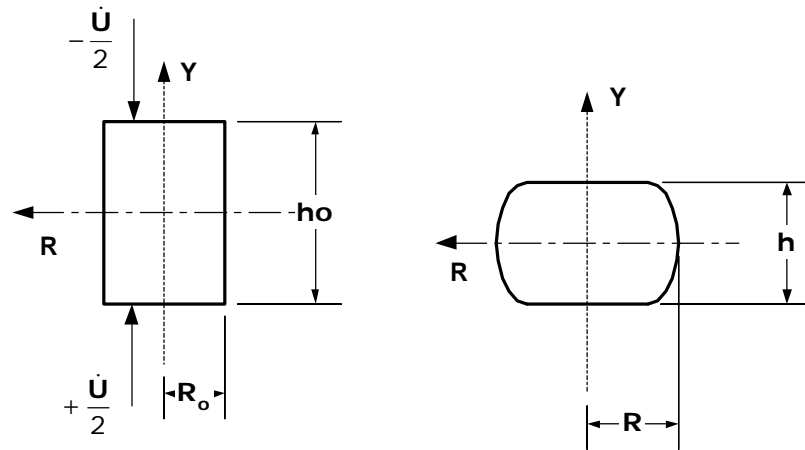


Figura 26 Modelo do Método do Limite Superior⁽²⁹⁾

Avitzur estudou o caso da compressão de cilindros entre duas placas, levando em consideração o fator de cisalhamento do atrito "m", variando em uma faixa de zero a um. Quando $m=0$ não há atrito e quando $m=1$ há atrito colante^(29, 33, 34).

A existência de atrito entre a peça e as placas paralelas provoca um "abaulamento" do cilindro, conforme observado na figura 26, fenômeno este comprovado na prática.

A definição de um sistema de eixos com origem no centro do cilindro, sabendo que as placas paralelas movem-se com velocidade $\frac{\dot{U}}{2}$, e que devido a simetria, utiliza-se para os cálculos somente a metade superior do modelo.

Para levar em consideração o fenômeno do "abaulamento" do cilindro, propõem-se os seguintes campos de velocidade válidos no intervalo $0 \leq y \leq h/2$ ⁽²⁹⁾:

$$\begin{aligned} \dot{U}_\theta &= 0 \\ \dot{U}_R &= A\dot{U} \frac{R}{h} e^{-\frac{by}{h}} \\ \dot{U}_y &= \dot{U}_y(R, y) \end{aligned} \quad (1)$$

onde o parâmetro “b” determina a intensidade do “abaulamento” imposto no cilindro. Com o campo de velocidades proposto e a condição de incompressibilidade imposta, determina-se o campo de taxas de deformação, com o parâmetro “b” a ser determinado, como:

$$\dot{\epsilon}_{\theta\theta} = \dot{\epsilon}_{RR} = -\frac{1}{2}\dot{\epsilon}_{yy} = \frac{1}{4} \frac{-b}{e^{-\frac{b}{2}} - 1} \frac{\dot{U}}{h} e^{-\frac{by}{h}}$$

$$\dot{\epsilon}_{Ry} = \frac{1}{8} \frac{b^2}{e^{-\frac{b}{2}} - 1} \dot{U} \frac{R}{h^2} e^{-\frac{by}{h}} \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_{Ry} = \dot{\epsilon}_{\theta y} = 0$$

As equações (1) e (2) são utilizadas para calcular a Potência Interna de Deformação:

$$\dot{W}_i = \frac{2}{\sqrt{3}} k_f \int_V \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} dV \quad (3)$$

e substituindo as expressões das taxas de deformação (2) resultantes do campo de deformações proposto na equação (3), a Potência Interna de Deformação fica:

$$\dot{W}_i = \frac{2}{3\sqrt{3}} k_f \pi \frac{\dot{U}}{h} b R_0^3 \left[\left(1 + \frac{12 h^2}{R_0^2 b^2} \right)^{3/2} - \left(\frac{12 h^2}{R_0^2 b^2} \right)^{3/2} \right] \quad (4)$$

Considerando o campo de velocidades proposta nas equações (1) calcula-se a Potência Interna Perdida pelo Atrito, substituindo na equação:

$$\dot{W}_f = \int_V \tau |\Delta v| ds \quad (5)$$

onde $\tau = \frac{mk_f}{\sqrt{3}}$, tensão de cisalhamento do atrito e Δv , a diferença de velocidades entre as superfícies em atrito.

$$\dot{W}_f = -\frac{k_f}{3\sqrt{3}} \pi m \frac{\dot{U}}{h} b R_0^3 \frac{e^{-b/2}}{e^{-b/2} - 1} \quad (6)$$

Calcula-se a Potência Externa fornecida pelo movimento das matrizes aplicando uma força sobre o cilindro, dada por:

$$J^* = -2F \frac{\dot{U}}{2} = -F\dot{U} \quad (7)$$

onde, F é a força realizada pela prensa e $\dot{U}/2$ é a velocidade de cada matriz (superior e inferior).

Igualando as Potências Internas dadas pelas equações (4) e (6) com a Potência Externa dada pela equação (7) pela condição de equilíbrio de forças no sistema ($\Sigma F = 0$), obtém-se:

$$-F\dot{U} = \frac{-k_f}{3\sqrt{3}} \frac{\pi}{h} \dot{U} b R_0^3 \left[\left(1 + \frac{12 h^2}{R_0^2 b^2} \right)^{3/2} - \left(\frac{12 h^2}{R_0^2 b^2} \right)^{3/2} \right] - \frac{k_f}{3\sqrt{3}} \pi m \frac{\dot{U}}{h} b R_0^3 \frac{e^{-b/2}}{e^{-b/2} - 1}$$

Nesta equação, observa-se que a velocidade das matrizes \dot{U} aparece em todos os termos da expressão, portanto pode ser simplificada. A força estimada pelo modelo de Avitzur é dada por:

$$F = \frac{k_f}{3\sqrt{3}} \frac{\pi}{h} b R_0^3 \left[\left(1 + \frac{12 h^2}{R_0^2 b^2} \right)^{3/2} - \left(\frac{12 h^2}{R_0^2 b^2} \right)^{3/2} \right] + \frac{k_f}{3\sqrt{3}} \frac{\pi m}{h} b R_0^3 \frac{e^{-b/2}}{e^{-b/2} - 1} \quad (8)$$

A equação (8) apresenta agora uma incógnita a ser determinada, o parâmetro "b" que define o índice de "abaulamento" do cilindro (figura 26). A 2ª Lei da Termodinâmica define que a configuração de equilíbrio de um sistema qualquer é aquela que possui energia mínima associada. Baseando-se neste princípio, pode-se determinar o parâmetro "b" identificando um campo de velocidades tal que minimize a Potência Interna associada ao sistema. Este valor é dado por:

$$b = \frac{4 \left(\frac{m}{\sqrt{3}} \right) \left(\frac{h}{R_0} \right)}{1 + \frac{2}{3} \left(\frac{m}{\sqrt{3}} \right) \left(\frac{h}{R_0} \right)} \quad (9)$$

Adicionalmente ao cálculo da força, utilizando as equações (8) e (9), é importante satisfazer a condição de volume constante durante a deformação, portanto:

$$\begin{aligned}V_{\text{inicial}} &= V_{\text{final}} \\ \pi R_0^2 h_0 &= \pi R^2 h \\ R &= R_0 \sqrt{\frac{h}{h_0}}\end{aligned}\tag{10}$$

Da mesma forma que as expressões anteriores para o cálculo da força, as equações propostas por Avitzur podem ser utilizadas em máquinas de calcular programáveis com bastante praticidade e em geral com maior concordância com a deformação real de um corpo de prova cilíndrico em face da utilização de um campo de velocidades mais realístico em relação às equações da "Teoria Elementar da Plasticidade".

3.3.5 Tensão de Escoamento e Temperatura no Cálculo da Força

Conforme visto anteriormente, as expressões definidas nos diferentes modelos de cálculo de força de forjamento são equações dependentes da tensão de escoamento (k_f).

No capítulo 3.1 definiu-se que a tensão de escoamento é uma função do tipo $k_f = f(\theta, \phi, \dot{\phi})$, ou seja, depende da temperatura, deformação e velocidade de deformação. Estas variáveis, por sua vez, variam a cada instante durante o processo de compressão do material, portanto, a cada passo de variação da altura de matriz teremos um valor atualizado de k_f e conseqüentemente, um valor atualizado da força até a situação da máxima força necessária no final do forjamento.

Vários autores propõem modelos de equações que se ajustam a curva de escoamento ($k_f \times \phi$) de um material com razoável R^2 , permitindo assim melhor precisão no cálculo analítico e numérico da força de forjamento:

a) Altan⁽²⁸⁾:
$$\bar{\sigma} = C.(\bar{\dot{\epsilon}})^m$$

b) Hensel e Spittel⁽²⁵⁾:
$$k_f = k_{f_0} \cdot A_1 \cdot e^{-m_1 \theta} \cdot A_2 \cdot \phi^{m_2} \cdot A_3 \cdot \dot{\phi}^{m_3} \cdot e^{\frac{m_4}{\phi}}$$

c) Tschätsch⁽³⁶⁾:
$$k_f = k_{f_1} \cdot \dot{\phi}^m$$

Dentre este modelos, o modelo de Hensel e Spittel apresenta melhor ajuste com a curva de escoamento, grande parte em função da maior quantidade de termos que são considerados (temperatura θ , por exemplo), que os outros modelos não possuem.

Ajustar uma curva ao modelo de Hensel e Spittel não é uma tarefa fácil, conforme Brito e Prediger (1998), ensaiando corpos de prova de Alumínio ABNT 6061, obtiveram⁽²²⁾:

$$k_f = 494,2555 \cdot e^{-0,004611\theta} \cdot \phi^{0,072735} \cdot \dot{\phi}^{0,051503}$$

$$400^\circ\text{C} \leq \theta \leq 500^\circ\text{C}$$

$$0,1 \leq \dot{\phi} \leq 10 \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

$$\phi_{\text{máx.}} = 1,2$$

Adicionalmente, em virtude da tensão de escoamento ser uma função dependente da temperatura, é importante a sua determinação durante a operação de conformação do material.

O aumento de temperatura durante a conformação dos metais se dá devido a⁽³²⁾:

a) O movimento relativo entre o material e a matriz, que para um volume discreto pode ser calculado por:

$$\Delta\theta_A = \frac{v_{rel} \cdot m \cdot k_f \cdot \Delta A \cdot \Delta t}{V(c_f \cdot \rho_f + c_M \cdot \rho_M) / 2} \quad (1)$$

b) A transformação do trabalho de deformação em calor, dado por:

$$\theta_T = \frac{k_f \cdot \phi}{c_M \cdot \rho_M} \quad (2)$$

Deve ser observado que os valores de temperatura são calculados em função do valor da tensão de escoamento (k_f).

Na fase final da conformação quando o material preenche completamente a cavidade da matriz, tem-se uma situação de maior contato peça-matriz de forma que há uma decréscimo da temperatura.

Este decréscimo de temperatura pode ser calculado, considerando somente as perdas de calor convectivas. Com auxílio da equação de balanço da energia na transformação de calor, tem-se que:

$$hF(\theta - \theta_1)dt = -c\rho V_A d\theta \quad (3)$$

A solução da equação (3), fica:

θ = temp. da cavidade

θ_1 = temp. inicial da matriz

θ_0 = temp. inicial da peça

h = coeficiente de transferência de calor

c = calor específico

ρ = peso específico da peça

δ = espessura de contato da peça

t = tempo de contato matriz - peça

$$\theta = \theta_1 + (\theta_0 - \theta_1)e^{-\frac{h}{c\rho\delta}t} \quad (4)$$

Utiliza-se a equação (4) para o cálculo da temperatura média da cavidade da matriz durante o processo de conformação.

3.4 Métodos Computacionais de Análise do Forjamento

O contínuo desenvolvimento dos computadores, melhorando o desempenho e baixando o custo a cada dia, tem permitido aumentar significativamente a sua aplicação em tarefas repetitivas deixando espaço para os engenheiros trabalharem na análise do fenômeno e o seu entendimento⁽³⁷⁾.

Seguindo esta tendência, os métodos de cálculo e análise dos processos de conformação e, em especial, o forjamento tem sido realizados utilizando, mais recentemente, computadores pessoais com grande capacidade de processamento e armazenagem de arquivos, através do Métodos dos Elementos Finitos ("Finite Element Method, FEM").

O Método dos Elementos Finitos⁽³⁵⁾ é uma ferramenta de simulação numérica de processos onde o problema a ser analisado é discretizado em pequenos elementos. Para obtenção das características globais do modelo, as características de cada parte são calculadas separadamente e consecutivamente e através da definição das restrições do contorno. A resposta de cada elemento descreve o comportamento do todo.

No modelamento matemático do processo de forjamento surgem algumas dificuldades que acarretam em soluções não muito triviais. Os problemas mais significativos observados são: o contato, o atrito, grandes deformações, mudanças nas propriedades mecânicas dos metais, necessidade da constância de volume, geração de calor devido ao trabalho mecânico e a troca térmica entre a peça e o meio⁽³⁸⁾.

Estas dificuldades acarretam uma série de não-linearidades que dificultam a solução do problema através do modelamento matemático. Estas não-linearidades são contornadas⁽³⁸⁾ dividindo-se a aplicação da carga em pequenos incrementos de deslocamento, efetuando-se os cálculos até se atingir o equilíbrio entre forças internas e externas, para então, aplicar-se novamente um incremento de deslocamento e assim sucessivamente.

Um dos maiores problemas envolvidos no modelamento é causado pela grande mudança de forma que geralmente ocorre entre o tarugo ou pré-forma inicial e a peça final em um típico estágio de forjamento.

Além disso, há a necessidade de se manter o volume praticamente constante. Para minimizar estes fatores, atualmente, existem três principais métodos de tratamento para a malha de elementos que efetua os cálculos. São eles: 1) formulação lagrangiana (ou material) atualizada, onde a malha é fixa no material que sofre deformação e é atualizada após cada incremento de deslocamento; 2) formulação euleriana (ou espacial), onde a malha é fixa no tempo e no espaço e os cálculos são efetuados a medida que o material flui por essa malha e; 3) formulação lagrangiana-euleriana arbitrária (ALE), onde se pode prescrever um movimento para a malha ou arbitrar regiões com malha euleriana e regiões com malha lagrangiana⁽³⁸⁾.

Nos casos em que a malha é fixa ou acoplada ao material, a mudança de forma envolvida em processos de forjamento geralmente causa grandes deformações em seus elementos, que se tomam muito distorcidos para continuar os cálculos. Assim, é necessário fazer a troca desta malha distorcida por uma nova, que possa continuar os cálculos com precisão aceitável. Este procedimento denomina-se remalhamento e pode tornar-se complexo devido à geometria da peça e/ou se a malha anterior estiver muito distorcida.

É importante comentar os dois modos como as variáveis podem ser atualizadas. No método de integração implícito, a cada passo de tempo, há a necessidade de se resolver um sistema de equações lineares, que envolve a matriz de rigidez, e encontra-se a solução fazendo-se iterações até se atingir algum critério de convergência.

Assim, é o método que garante a solução correta, porém necessita de mais requisitos de "hardware" para isso. No método de integração explícita, o cálculo é direto e não há a necessidade de resolver um sistema de equações lineares a cada passo de tempo.

Porém, este passo de tempo deve ser muito menor que no método anterior e pode não garantir totalmente a solução correta. Assim, o método explícito necessita de menos requisitos de "hardware" e fornece menor tempo de cálculo na maioria dos problemas de conformação mecânica. As figuras 27 e 28 mostram os modelos virtuais da pré-forma e da peça deformada e a resposta gráfica do programa de simulação numérica da distribuição das deformações na peça final.

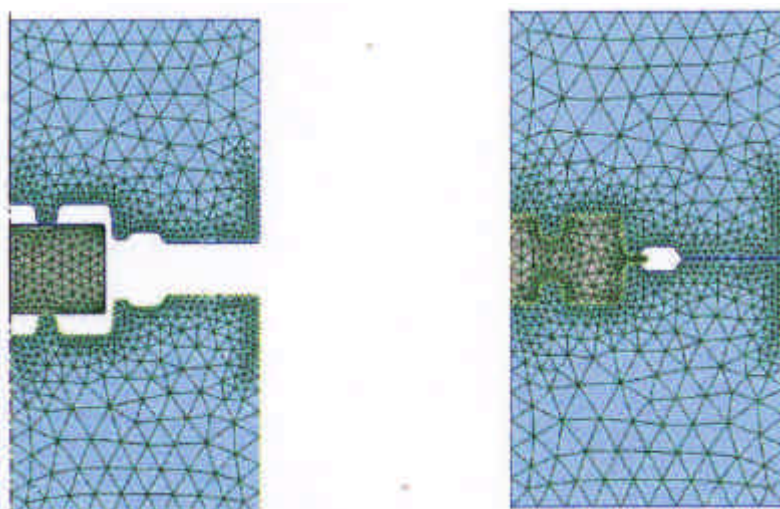


Figura 27 Modelos em malha da pré-forma e da peça deformada⁽³⁸⁾

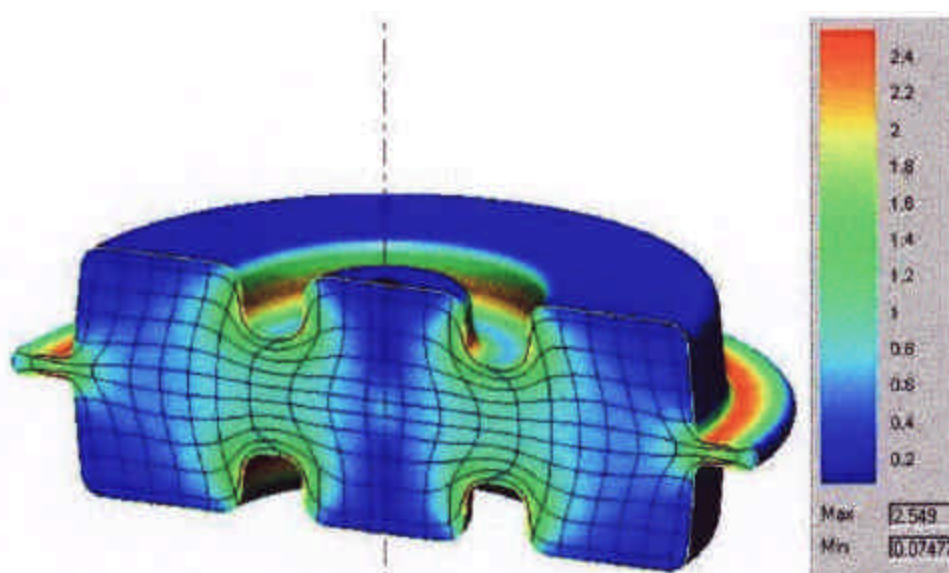


Figura 28 Resposta gráfica da distribuição de deformações na peça⁽³⁸⁾

Dentre os programas comerciais utilizados neste trabalho destaca-se o programa Qform, o qual é específico para efetuar simulações de forjamento. Possui, atualmente, uma versão bidimensional onde se utiliza simetria axial ou plana e também uma versão tridimensional. É baseado no método dos elementos finitos com formulação lagrangiana atualizada e utiliza integração implícita para encontrar a solução. Ao contrário da maioria dos programas, possui a vantagem de utilizar-se de funções de interpolação lineares e quadráticas com elementos triangulares de seis nós e lados curvos para aproximar a solução. Além disso, a malha é trocada a cada passo de tempo. Assim, a malha é otimizada para a aproximação da solução corrente, fazendo com que a precisão aumente consideravelmente, mantendo o número total de elementos dentro dos limites

Este programa roda em microcomputadores com sistema operacional "windows" e possui interface gráfica própria, para pré e pós-processamento, que torna a simulação realmente muito simples. Por ser um programa muito específico, apresenta diversas implementações que facilitam a análise de um processo de forjamento. Assim, pode-se facilmente fazer uma análise elasto-plástica de tensões e deformações nas ferramentas, inclusive pré-tensionadas (encamisadas e com insertos) imprescindível para uma análise de desgaste ou quebra prematura das mesmas. Além disso, o material a ser conformado possui linhas de fluxo, totalmente independentes da malha de elementos, que acompanham a peça durante toda a simulação, fornecendo uma análise precisa do fluxo do material, prevendo o possível surgimento de defeitos, e fornecendo uma noção sobre a orientação das fibras da peça final.

A principal desvantagem destes programas é o seu custo elevado, atualmente na faixa de US\$ 20,000 a US\$ 40,000 anuais pela sua utilização. Portanto devem produzir um real retorno financeiro, justificado pela economia resultante da melhoria dos processos de forjamento.

Vários trabalhos na literatura internacional tem sido realizados com base em simulações numéricas, procurando comparar os resultados computacionais com os ensaios na prática de operações de forjamento com resultados bastante significativos^(39, 40, 41):

- a) **Sinczak et al (1998)** utilizam um modelo numérico para analisar a evolução microestrutural de lingotes de aço (SAE 1045), buscando otimizar a necessidade de passes de forjamento e temperaturas adequadas que permitam garantir as melhores propriedades neste material prevendo a melhor programação de forjamento em matriz aberta para estes materiais;
- b) **Snape, Clift e Bramley (1998)** analisaram a sensibilidade dos parâmetros iniciais informados aos programas de simulação numérica através de seis parâmetros que definem a resistência ao escoamento do material e dois parâmetros que definem as condições de contorno matriz-peça. Através de um experimento fatorial 2⁶ buscando quantificar o nível de variações nos resultados das simulações numéricas em função das variações dos parâmetros iniciais informados;
- c) **Geiger e Engel (1999)** utilizam um modelo numérico para análise do dano em fadiga ocasionado em ferramentas para a forjamento a frio, objetivando otimizar o processo através da determinação dos parâmetros que podem ser melhorados para aumentar a vida em fadiga destas ferramentas.

4 ANÁLISE EXPERIMENTAL E RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Obtenção das Curvas de Escoamento para liga ABNT 6061

A fim de caracterizar as propriedades da liga ABNT 6061 no regime elástico, foram realizados os ensaios para a obtenção da curva de escoamento através da compressão de um corpo de prova com as dimensões mostradas na figura 29.

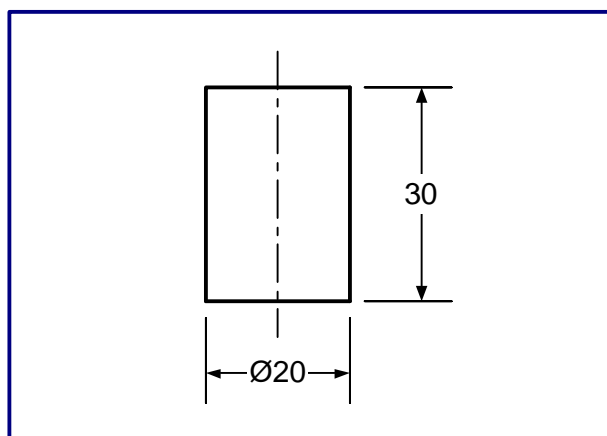


Figura 29 Corpo de Prova para Ensaio de Compressão

Os ensaios foram realizados em uma máquina servo-hidráulica controlada por um microcomputador e dotada de um forno de resistência elétrica ao redor dos punções. Esta construção permite manter o ensaio na condição isotérmica para as temperaturas 200 °C, 300 °C e 450 °C com uma tolerância de ± 5 °C. A figura 30 mostra o esquema de controle da máquina.

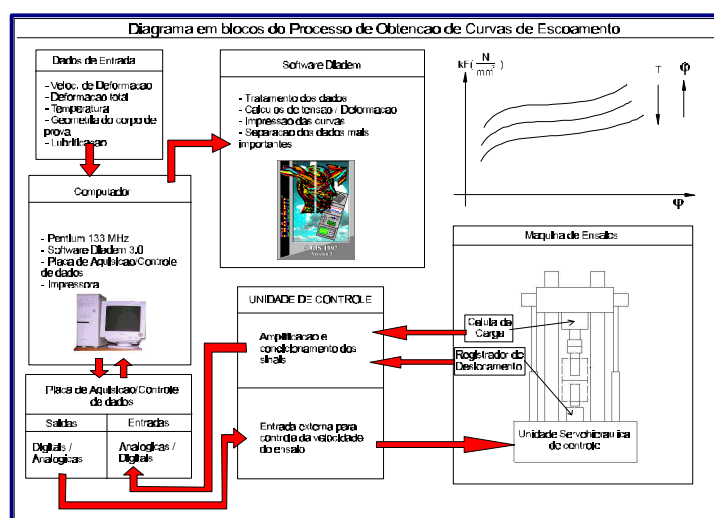


Figura 30 Esquema de Controle da Máquina de Ensaios Schenck

O punção superior está ligado a uma célula de carga calibrada que envia o sinal de força para o sistema de aquisição de dados. O punção inferior realiza o movimento de compressão e o sinal deste movimento é medido por um transdutor potenciométrico, cujo sinal, também é enviado para o mesmo sistema de aquisição de dados da célula de carga.

O movimento do punção inferior é controlado por um programa desenvolvido no LdTM, especialmente para a máquina de ensaios, o qual permite garantir a velocidade de deformação constante durante o ensaio.

Portanto, para realizar o ensaio, deve-se informar a altura real do corpo de prova, velocidade de deformação desejada para o ensaio e a máxima deformação linear na altura, de forma que o programa calcule a curva de deslocamento do punção (conforme visto no capítulo 3.1). A figura 31 mostra a máquina de ensaios "Schlenck" e os equipamentos de controle dos ensaios.



Figura 31 Detalhe da Máquina de Ensaios "Schlenck"

Ao final do ensaio, o programa de controle da máquina fornece um arquivo ASCII com os dados adquiridos de força e deslocamento do punção, e então são construídas as curvas de escoamento, conforme mostram as figuras 32, 33 e 34.

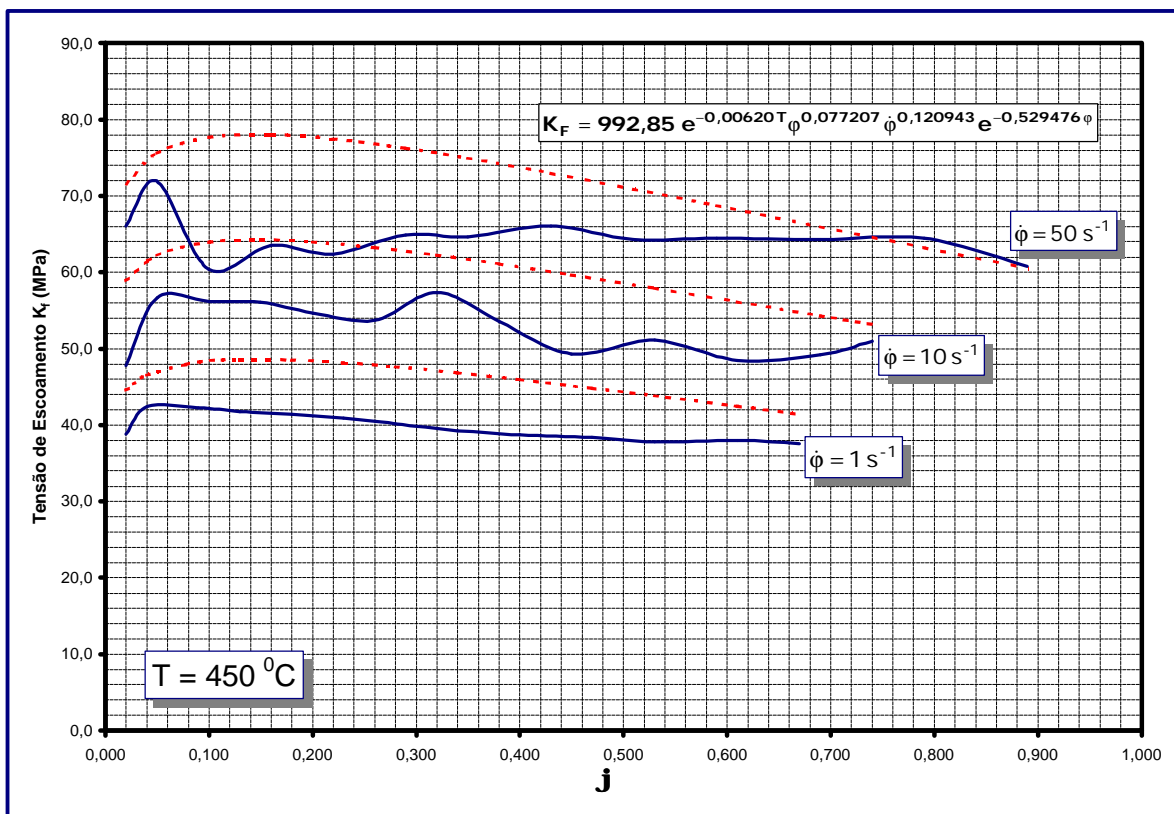


Figura 32 Curva de Escoamento – $T=450\text{ }^\circ\text{C}$

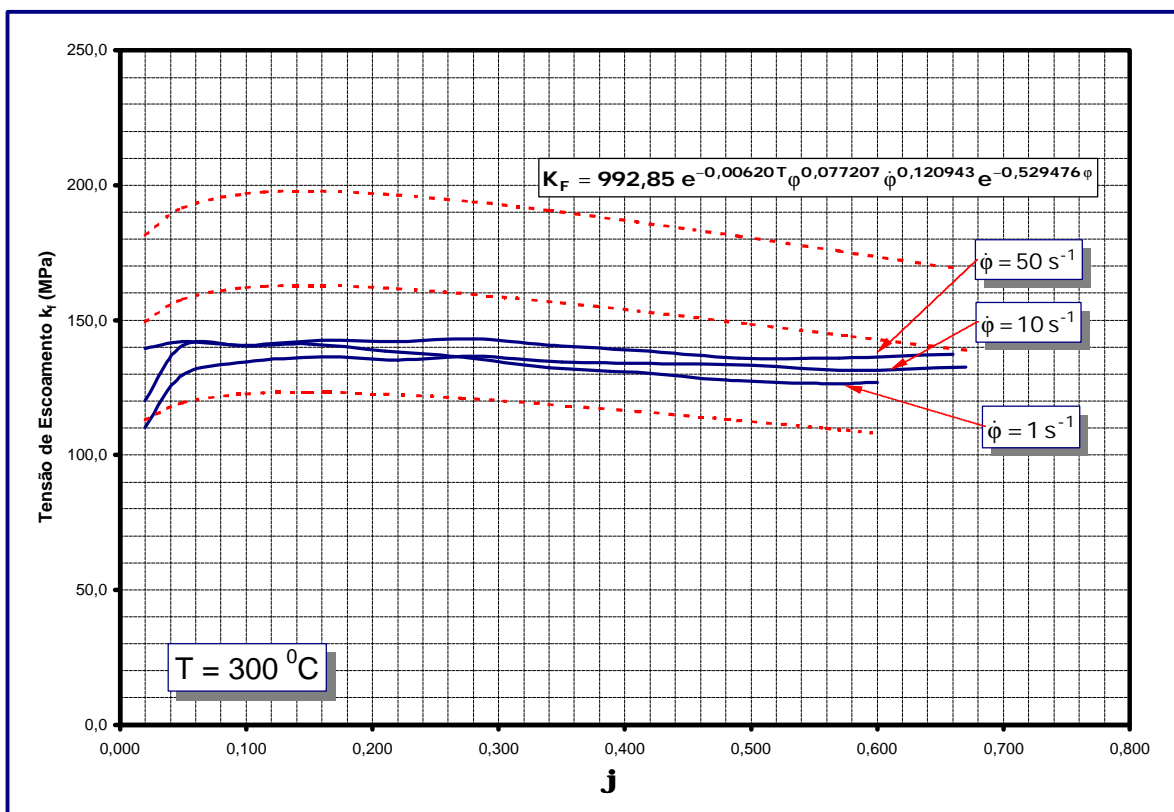


Figura 33 Curva de Escoamento – $T=300\text{ }^\circ\text{C}$

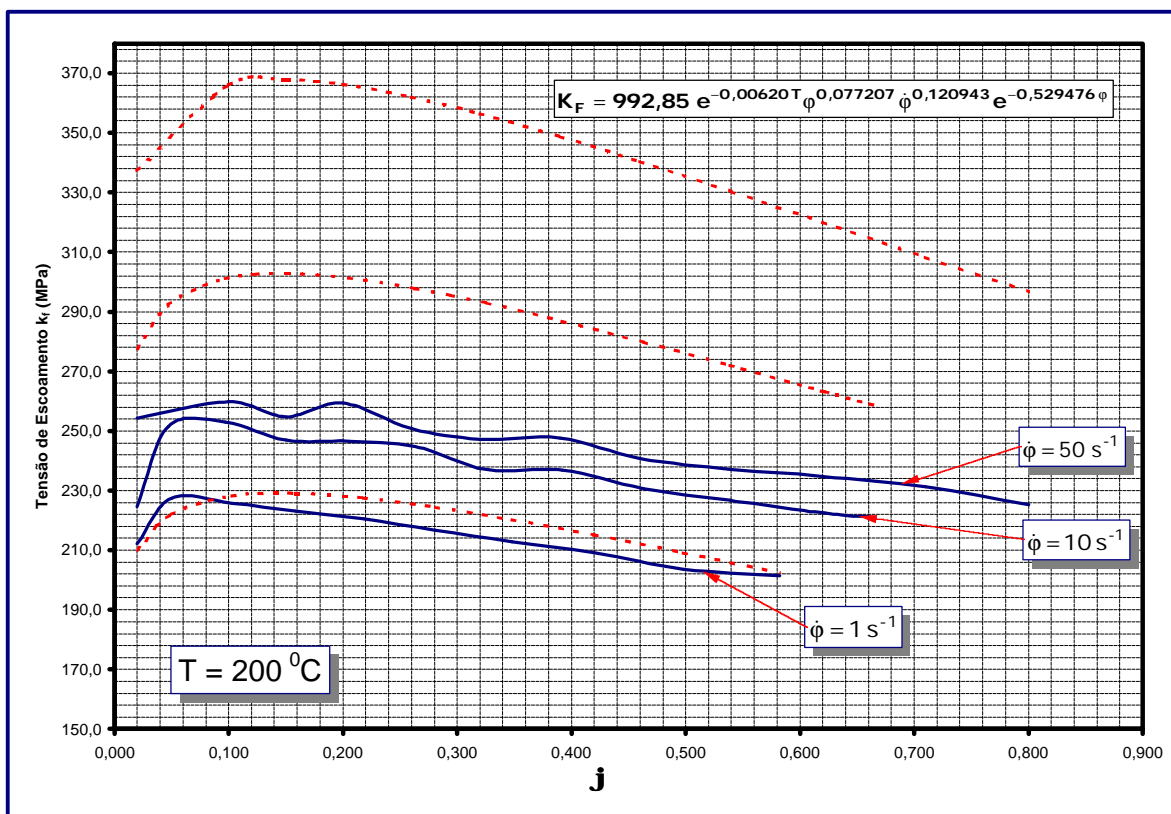


Figura 34 Curva de Escoamento – $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$

Adicionalmente aos dados obtidos, foi ajustada uma equação com auxílio do programa "Wedabas" da empresa CPM GmbH, disponível no pacote original de aquisição e tratamento de dados da máquina de ensaios Schenck.

Este programa faz o ajuste a uma equação semelhante a equação de Hensel e Spittel (capítulo 3) a partir do arquivo ASCII gerado pelo sistema de aquisição de dados da máquina de ensaios (3 velocidades, 3 temperaturas e deformação máxima atingida nos ensaios).

Observa-se um melhor resultado (e mais homogêneo) entre as velocidades de deformação ($1, 10$ e 50 s^{-1}) na temperatura de $450\text{ }^{\circ}\text{C}$, associado principalmente ao fato da dependência da tensão de escoamento pela velocidade de deformação em altas temperaturas.

4.2 Determinação da Condição de Atrito para a liga ABNT 6061

Foram preparados corpos de prova de liga de alumínio ABNT 6061 F com as dimensões conforme mostrado na figura 35, determinando um anel de proporções 6:3:2 em número suficiente para ensaiar três condições de contato: a) sem lubrificante b) lubrificante “Deltaforge 31” e c) lubrificante “Oildag”, ambos da empresa Acheson do Brasil.

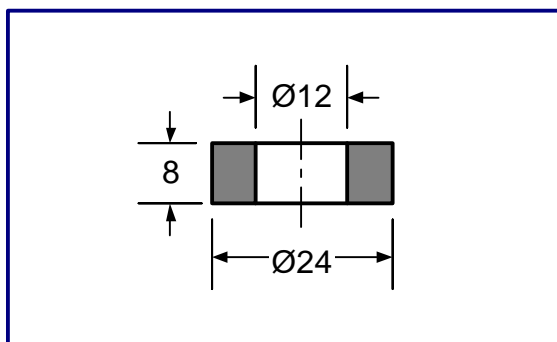


Figura 35 Dimensões do corpo de prova para ensaio do anel

Os ensaios foram realizados na mesma máquina utilizada para o levantamento das curvas de escoamento na condição isotérmica para as temperaturas 200, 300 e 450 °C.

A máquina foi programada para obter anéis com deformações percentuais iguais a 0,25, 0,50 e 0,75, nas velocidades de deformação ($\dot{\phi}$) iguais a 1, 10 e 50 s⁻¹. Os corpos de prova atingiram deformações maiores que os valores programados, sem, contudo, comprometer a validade dos resultados.

As curvas de calibração foram obtidas através da simulação numérica por elementos finitos no programa LARSTRAN (UT Aachen – Alemanha) da deformação de um anel com as mesmas dimensões da figura 35.

A partir das dimensões do modelo virtual deformado, as curvas de calibração foram traçadas em planilha “Excel”, onde os dados do ensaio prático também foram analisados. Os resultados são mostrados nas figuras 36 a 44.

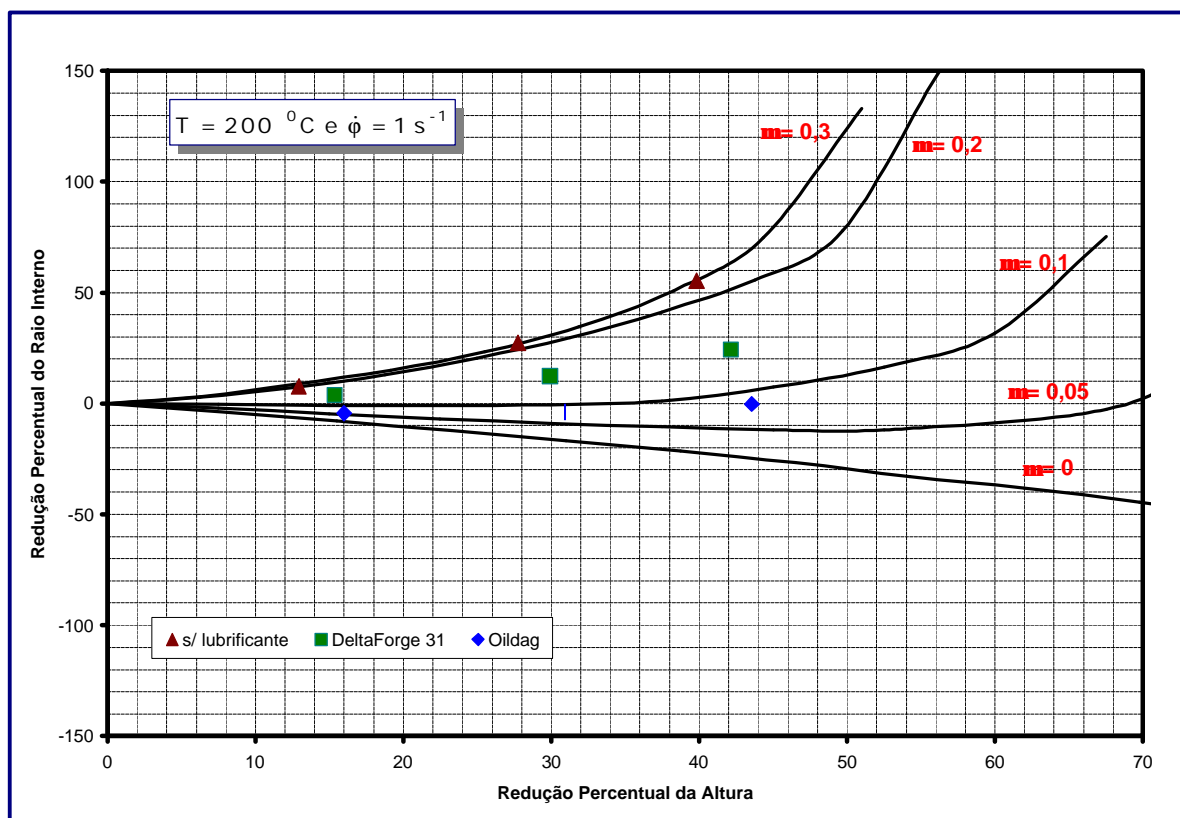


Figura 36 Curvas de Calibração e Resultados de Atrito ($T=200 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 s^{-1})

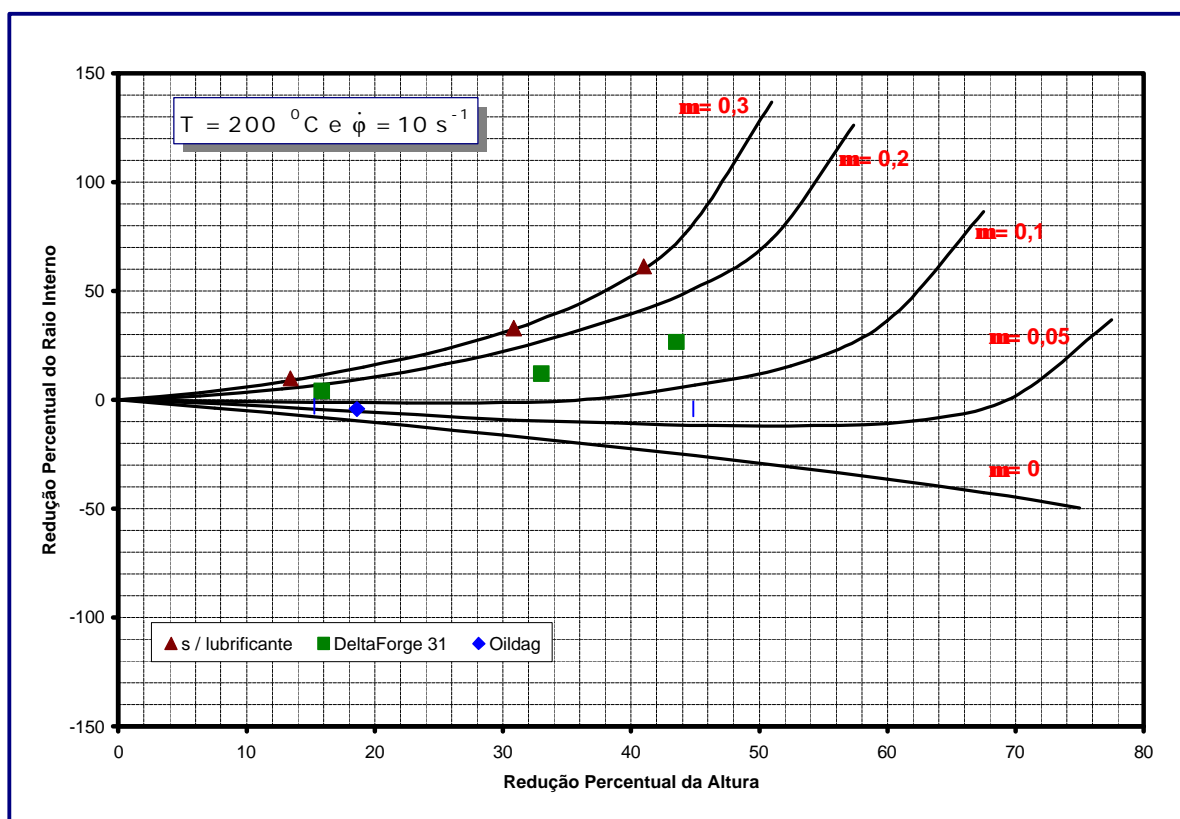


Figura 37 Curvas de Calibração e Resultados de Atrito ($T=200 \text{ }^\circ\text{C}$, 10 s^{-1})

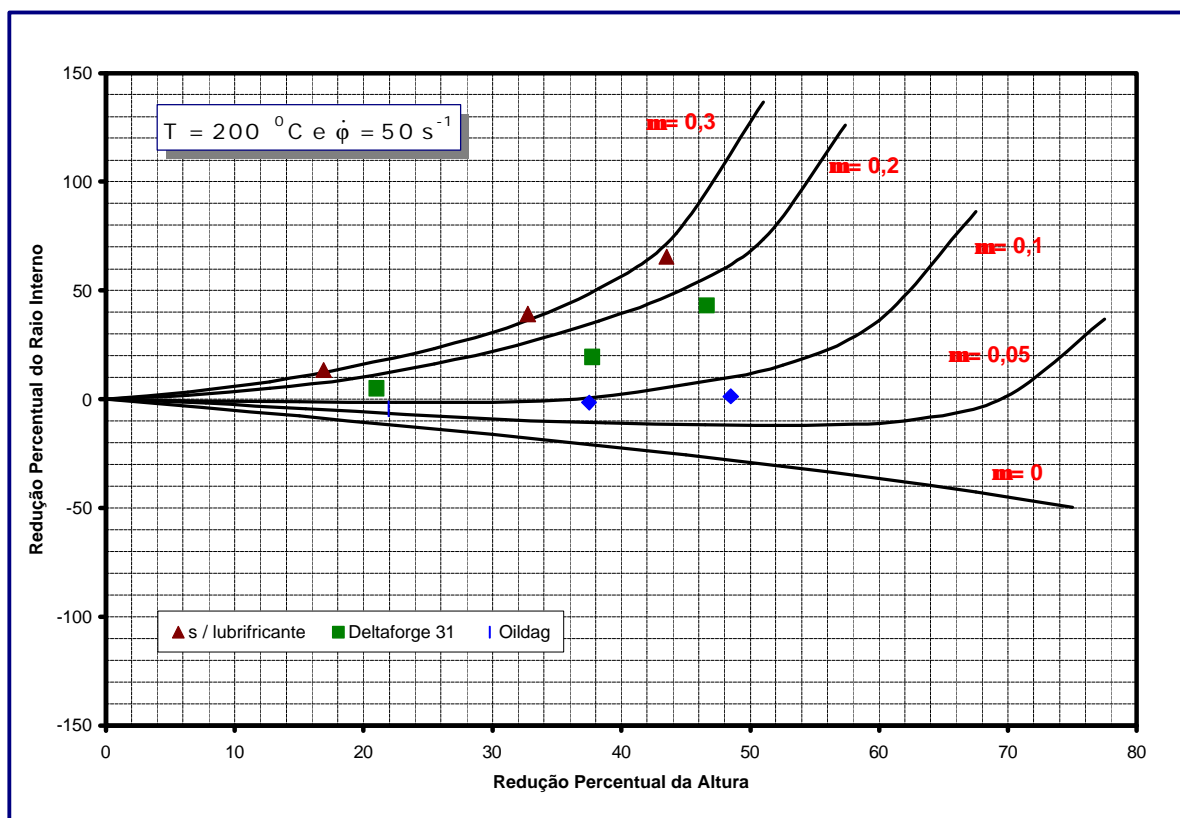


Figura 38 Curvas de Calibração e Resultados de Atrito ($T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 50 s^{-1})

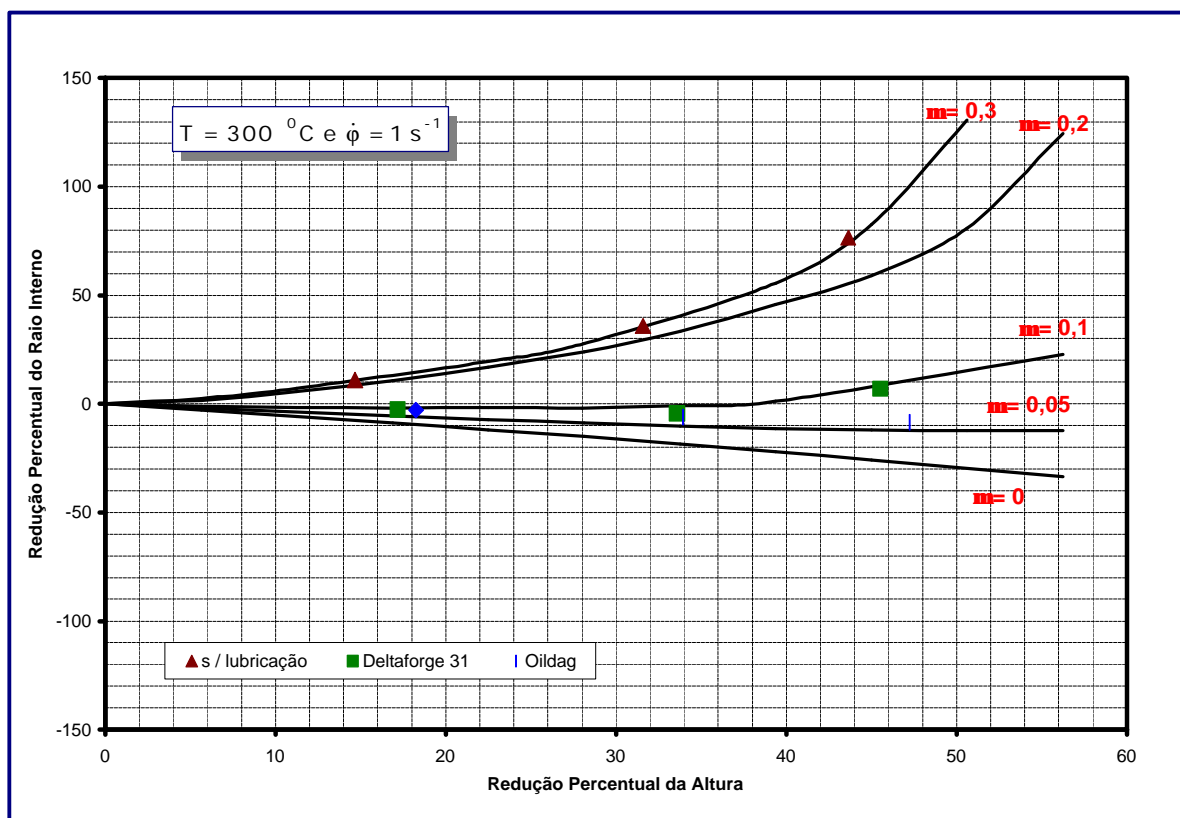


Figura 39 Curvas de Calibração e Resultados de Atrito ($T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 s^{-1})

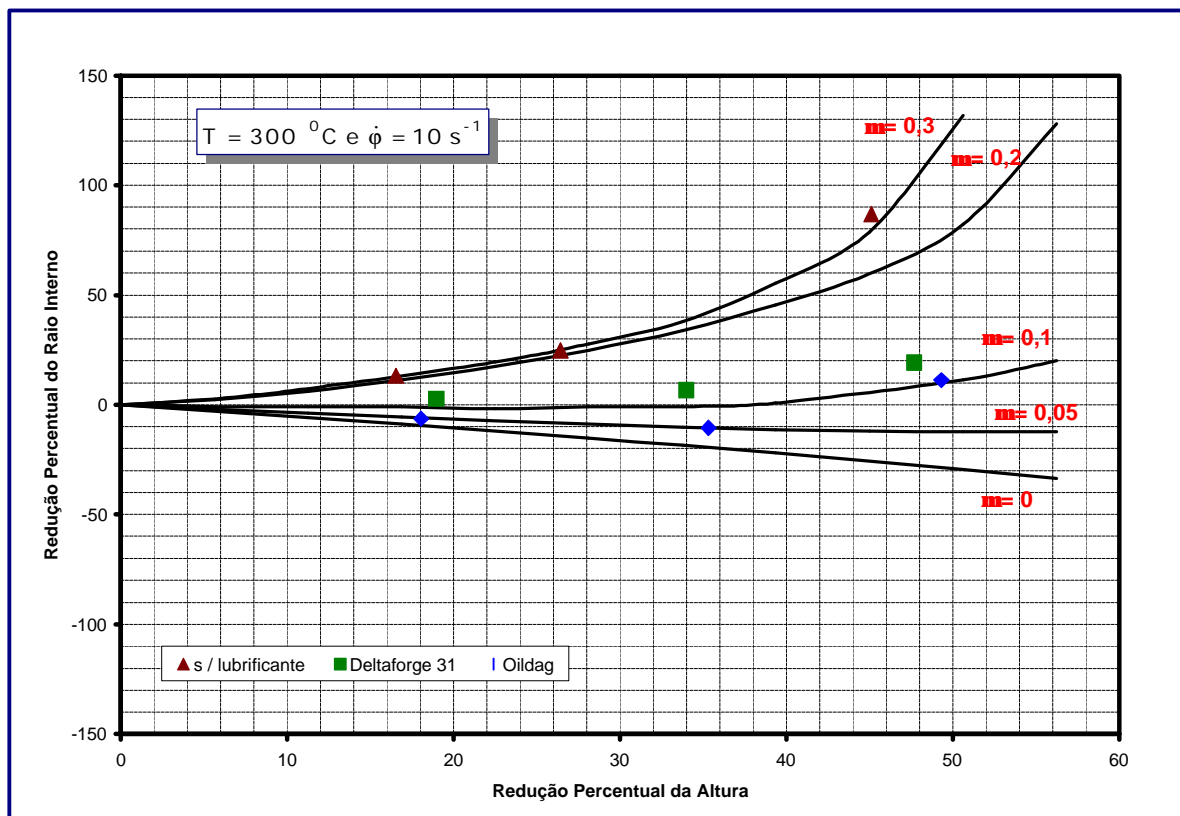


Figura 40 Curvas de Calibração e Resultados de Atrito ($T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 s^{-1})

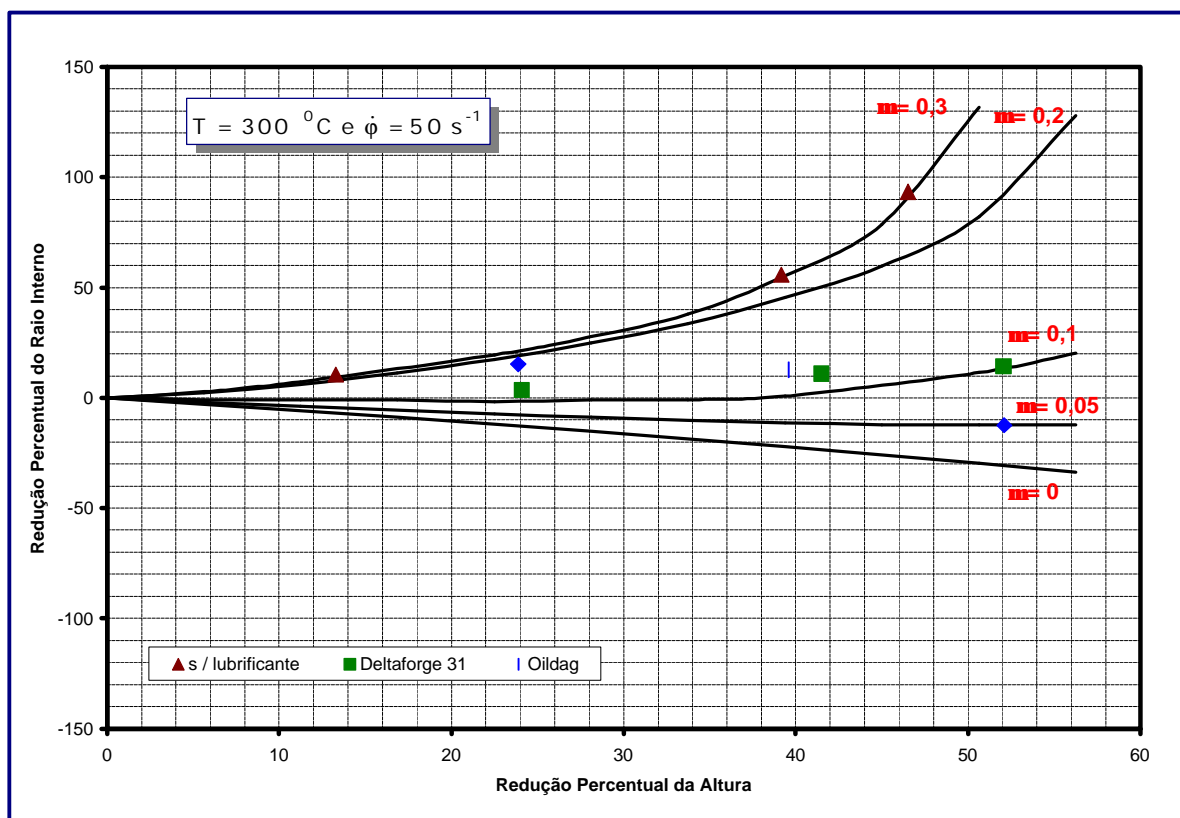


Figura 41 Curvas de Calibração e Resultados de Atrito ($T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 50 s^{-1})

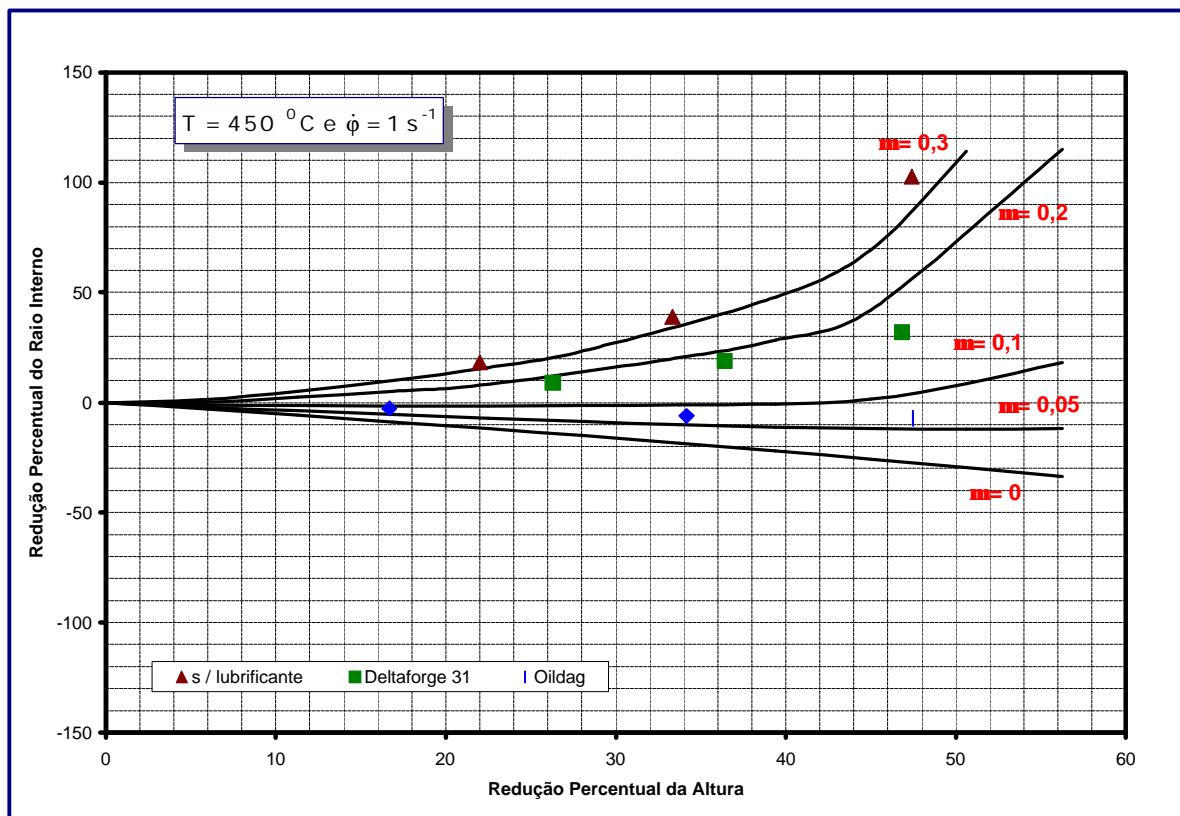


Figura 42 Curvas de Calibração e Resultados de Atrito ($T=450\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 s^{-1})

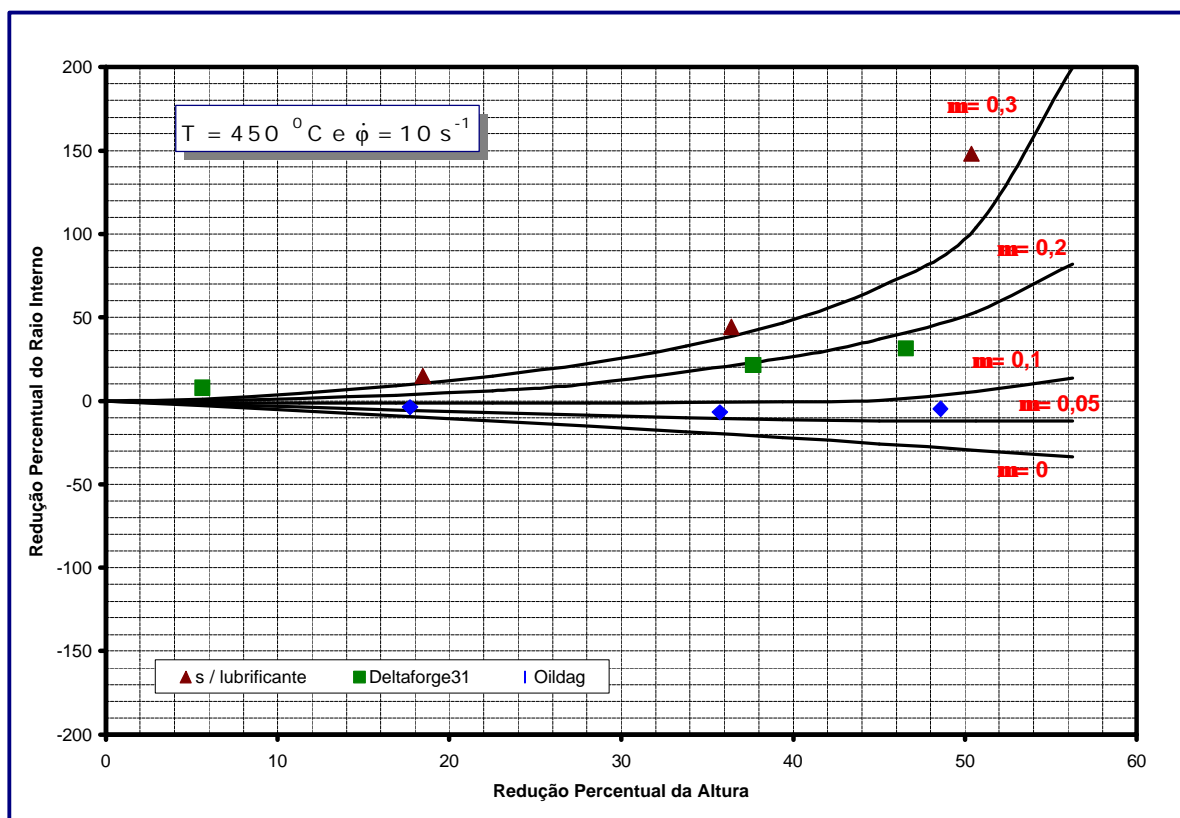


Figura 43 Curvas de Calibração e Resultados de Atrito ($T=450\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 s^{-1})

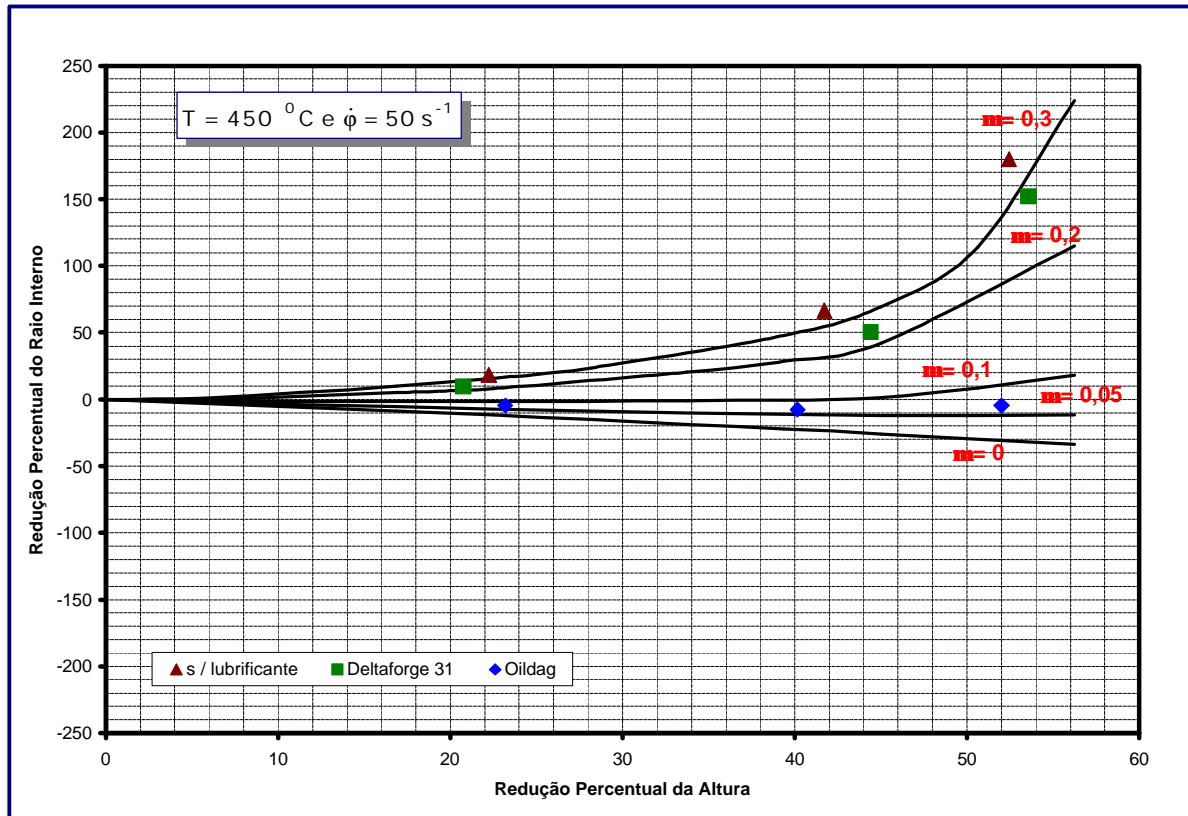


Figura 44 Curvas de Calibração e Resultados de Atrito ($T=450 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 50 s^{-1})

4.3 Simulação Computacional do Forjamento em Simetria Axial

Objetivando estudar a deformabilidade das ligas de alumínio e analisar a viabilidade de um processo de forjamento foi realizada a simulação computacional do processo, utilizando um modelo de simetria axial, conforme mostra a figura 45.

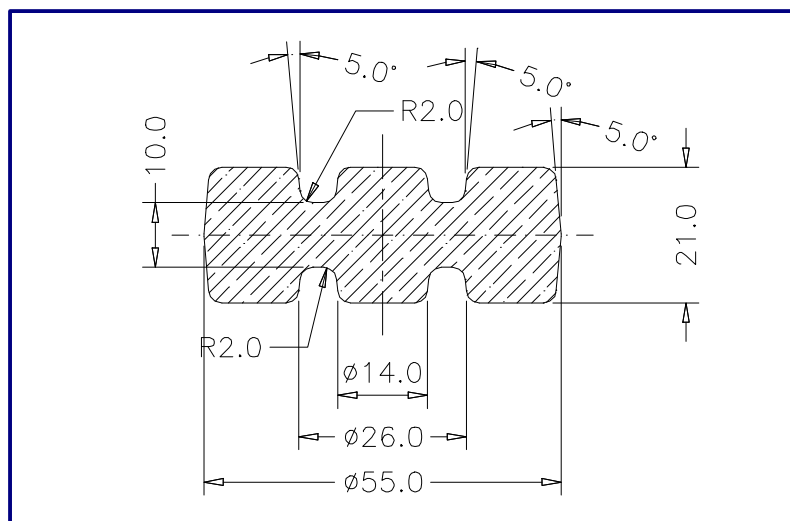


Figura 45 Desenho da Peça Forjada Experimental

A peça da figura 45 foi desenvolvida em AutoCad R14, criando-se um modelo em 3D de forma a obter o volume da mesma para o cálculo da pré-forma e o projeto das matrizes. Deste modelo virtual foi possível gerar um perfil em CAD, a partir do qual foi feito o programa de usinagem das ferramentas e também as geometrias da peça e ferramentas para o programa de simulação Qform, utilizado nesta etapa. Os desenhos mecânicos da peça e das ferramentas podem ser vistos no ANEXO 1, 2 e 3, respectivamente, no final deste trabalho.

No projeto da cavidade da ferramenta, considerou-se uma contração do material em torno de 1% calculado a partir do coeficiente de expansão térmica da liga ABNT 6061 quando a peça forjada é resfriada de 450 °C até a temperatura ambiente (~25 °C).

Portanto, as dimensões internas da cavidade da ferramenta tiveram um acréscimo de forma que, o seu volume seja 1% maior que o volume da peça desejada para garantir as dimensões finais da peça resfriada.

Para a realização das simulações computacionais foram consideradas as variáveis de maior influência no processo de forjamento: velocidade da prensa, temperatura da geratriz e matrizes, atrito e tempo de resfriamento.

O “software” Qform é um programa de análise bidimensional específico para forjamento que trabalha com simetria axial ou plana, utilizando computadores com sistema operacional “windows” e de fácil manuseio, quando utilizado conforme as orientações do manual do usuário.

Utiliza o método dos elementos finitos (MEF) com formulação lagrangiana e integração implícita para encontrar a solução. Seu código trabalha com funções de interpolação lineares e quadráticas com elementos triangulares de 6 nós e lados curvos para aproximar a solução, conforme mostra a figura 46.

O remalhamento ocorre cada passo de cálculo, aumentando a precisão e mantendo o número total de elementos dentro de valores aceitáveis

Esta troca da malha pode ser visualizada na figura 46, onde estão representadas as configurações (a) iniciais e (b) atualizadas da malha de elementos finitos, mostrando claramente o refino da mesma nas regiões de maior deformação.

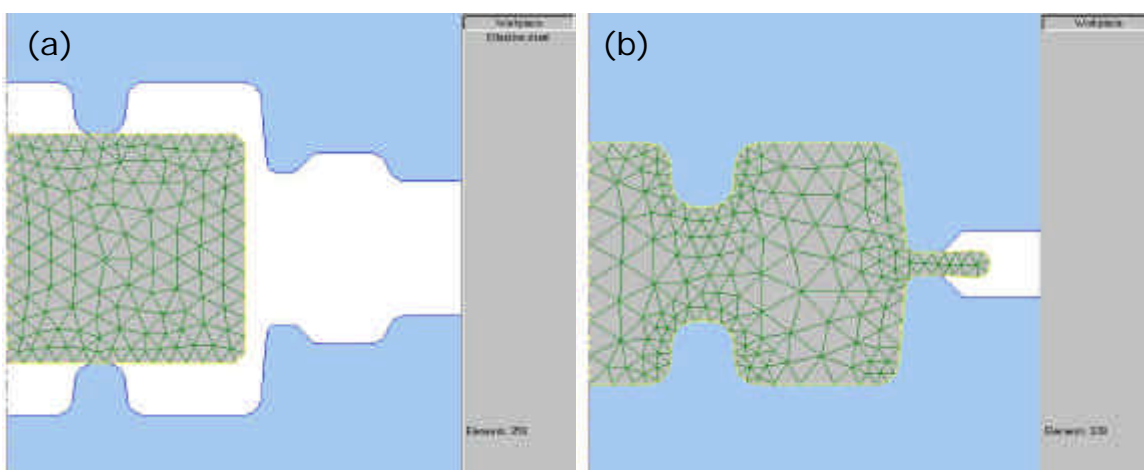


Figura 46 Malha de elementos finitos (a) inicial e (b) atualizada

Foram utilizadas as seguintes propriedades para efeito da simulação do processo:

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Propriedades térmicas do material			
Densidade	ρ	2700	kg/m ³
Calor específico	c	980	J/kg K
Condutividade térmica	k	172	W/m K
Efeitos térmicos das superfícies livres			
transferência de calor	h	4000	W/m ² K
Emissividade	e	0,6	-
Temperaturas			
Matriz	T_m	200	°C
Pré-forma	T_p	450	°C
Dados da Prensa			
Velocidade da mesa	V	20	mm/s
Curso da mesa	h_m	13,85	mm
Coefficientes de atrito			
1° Simulação	μ	0,1	-
2° Simulação	μ	0,3	-

As curvas de escoamento obtidas nos ensaios de compressão foram definidas na forma de tabela, conforme o sistema de configuração de materiais do programa QForm. Este faz as devidas interpolações conforme as temperaturas calculadas para cada passo de simulação.

A figura 47 apresenta a diferença de resultados na aplicação de uma velocidade da matriz de (a) 2 mm/s e (b) 200 mm/s.

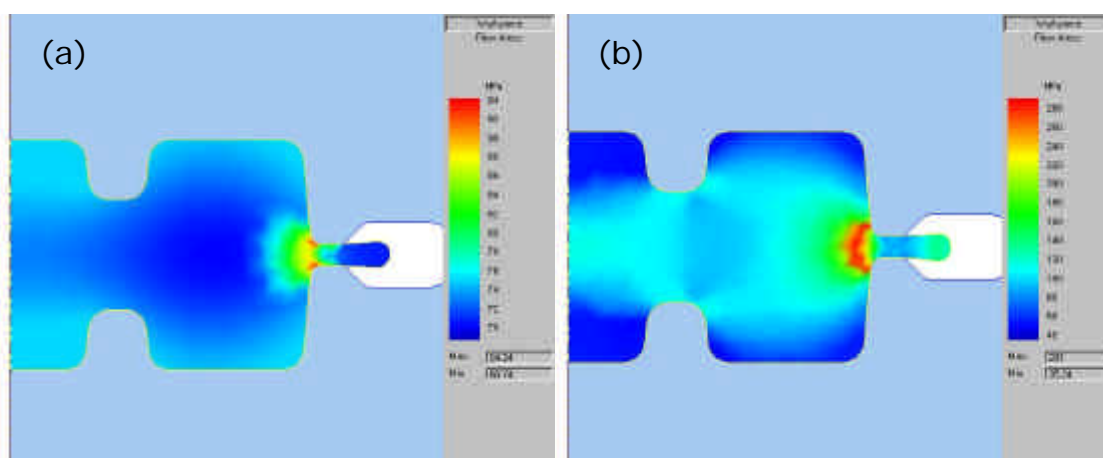


Figura 47 Tensão de Escoamento (a) 2 mm/s e (b) 200 mm/s

Portanto, foi definida uma velocidade de 20 mm/s para a simulação objetivando obter tensões de escoamento mais brandas e também em função da velocidade real da prensa para o ensaio prático.

A figura 48 mostra o resultado da Força de Forjamento do disco forjado obtida para duas situações de atrito ($\mu = 0,1$ e $0,3$).

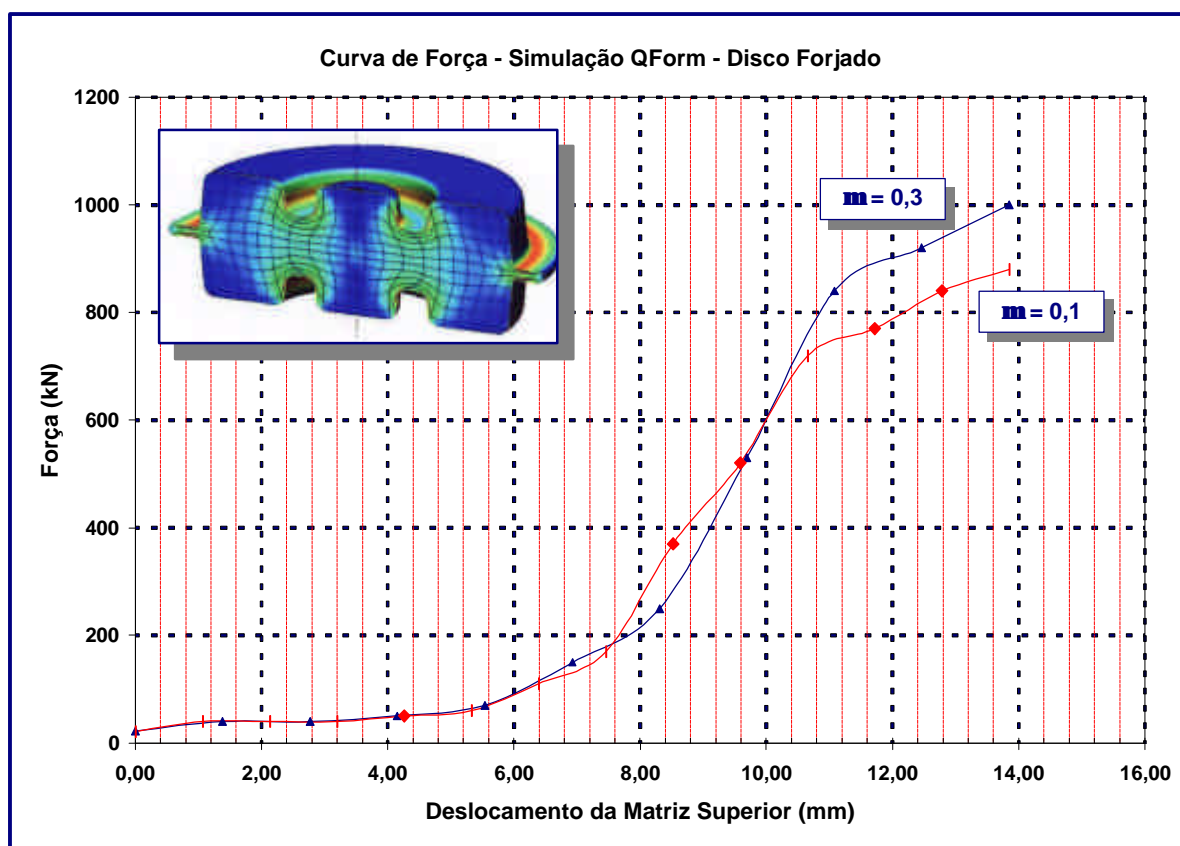


Figura 48 Resultado da Simulação QForm – Curva de Força

Observa-se no gráfico a diferença na fase final da conformação quando começa a surgir a resistência ao escoamento na região da rebarba e a força aumenta sensivelmente, indicando necessidade de um projeto adequado da saída da rebarba. Os valores finais obtidos para força de forjamento foram:

- a) Para $\mu = 0,1$ Força = 880 kN
- b) Para $\mu = 0,3$ Força = 1000 kN

4.4 Ensaio Prático do Forjamento em Simetria Axial

Para realizar o experimento, foi utilizada uma pré-forma com as mesmas dimensões determinadas para a simulação computacional. Esta pré-forma foi aquecida até 450 °C em um forno elétrico resistivo marca Sanchis, com temperatura máxima de 1200 °C.

O lubrificante utilizado foi grafite e água e as matrizes foram aquecidas com tocha a gás até a temperatura de 200 °C. Estes mesmos dados foram utilizados na simulação computacional do processo.

A temperatura da pré-forma e das matrizes foi controlada com termopar tipo "K" inserido na peça e matrizes inferior e superior, sendo que o tempo de encharque utilizado para a pré-forma foi de 20 min.

Como a precisão necessária na medição de temperatura não foi objeto deste experimento (a recomendação é de que a variação não ultrapasse $\pm 5^{\circ}\text{C}$), foi utilizado um multímetro com terminal de entrada para o termopar tipo "K".

Foram utilizados, ainda, dois termopares na área vizinha a peça, no interior do forno, para verificar o momento em que a temperatura da peça estaria homogênea, ou seja, em equilíbrio com a temperatura do forno.

Foi utilizada uma prensa hidráulica de 750 t, com velocidade de mesa de 20 mm/s a alta pressão. As matrizes foram montadas conforme esquema da figura 48, onde pode ser observada a célula de carga usada no procedimento experimental e na figura 49 a montagem em série de "strain gages", utilizados para amplificação do sinal de deformação de célula.

A célula de carga foi calibrada utilizando-se um anel dinamométrico de 300 t, aferido com 0,15 t de erro em toda faixa. Foi traçada a curva de calibração relacionando o sinal obtido no sistema de aquisição de dados a cada 30 t de força medida no anel.

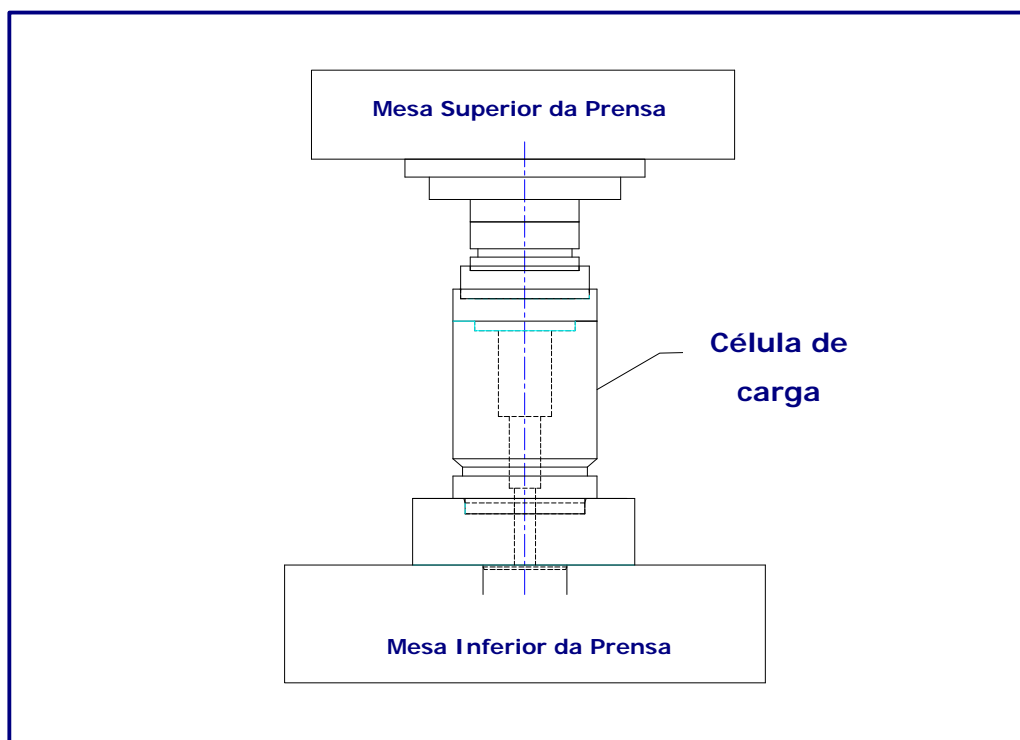


Figura 49 Montagem das matrizes para o forjamento prático

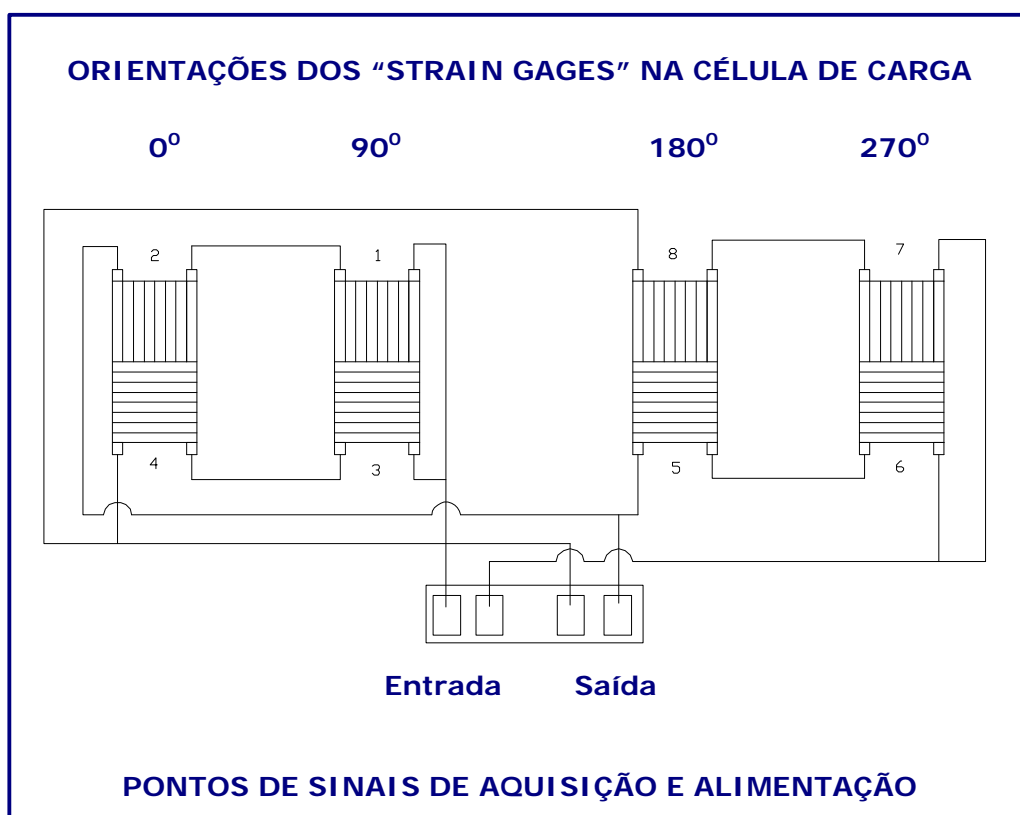


Figura 50 Configuração dos "strain gages" na célula de carga

Para aquisição dos dados de deformação, foi utilizado um sistema de supervisão de máquinas "Pro Control" com capacidade de medição de sinais até 0,01 mV, com processador próprio e placa de aquisição de 14 bits e possibilidade de conexão da célula com ponte completa ou ½ponte.

A equação de equivalência entre a força medida na célula de carga e o sinal elétrico obtido é configurada no sistema, o qual permite interromper o ensaio quando se extrapola determinado intervalo configurado no sistema. Com, isto evita-se o colapso das ferramentas ou da própria célula de carga.

O sistema foi configurado para aquisição de 100 pontos/s e estes dados foram transferidos na forma de um arquivo ASCII para planilha Excel para tratamento dos mesmos. A figura 51 mostra a curva de força obtida neste ensaio experimental.

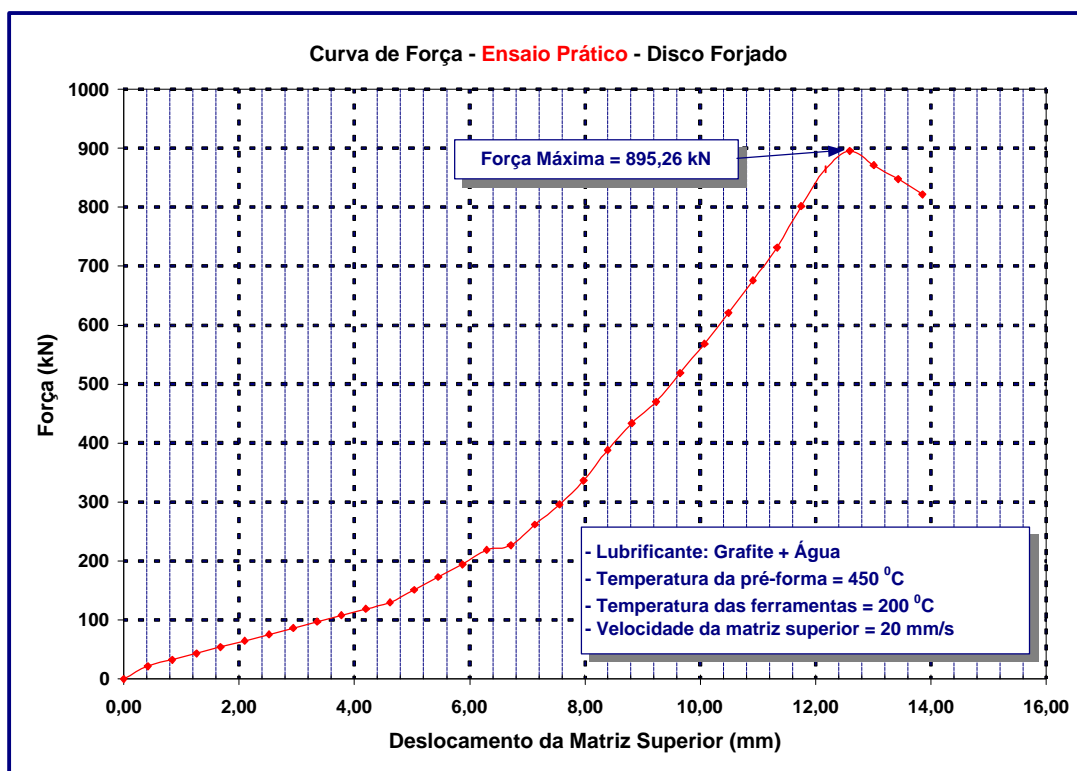


Figura 51 Curva de força obtida no forjamento prático

Observa-se um aumento gradual da força até atingir o seu máximo valor durante a saída da rebarba, devido à resistência ao escoamento maior, resultado de um resfriamento mais rápido na região da rebarba.

4.5 Simulação do Forjamento de um Componente Automotivo

Como parte do projeto de desenvolvimento de forjados em liga de alumínio UFRGS e DANA Divisão de Forjados (Gravataí), foi escolhida a peça proposta pela empresa: "TUBE YOKE IMPACT EXTRUSION", código da peça forjada "F3-28-409" (ANEXO 4) e parte da peça final usinada "TUBE YOKE", código "2-28-3317" (ANEXO 5). Esta peça nada mais é que a ponta de um eixo tipo "cardan" para um veículo automotor, fabricado em liga de alumínio ABNT 6061.

A especificação de material da peça estabelece que deve ser confeccionada em liga ABNT 6061-T6 com dureza definida pelo diâmetro máximo da impressão "Brinell" de 2,70 mm, o que equivale a 85 HB para uma carga de 500 kgF aplicada por uma esfera de 10 mm de diâmetro. Esta dureza deve ser obtida pela solubilização e envelhecimento artificial da peça forjada conforme define a designação "T6" para esta série de ligas. Na figura 52, pode-se ter uma idéia da geometria da peça, modelada em 3D (CAD), a partir dos desenhos fornecidos pela empresa.



Figura 52 peça forjada "F3-28-409" Fonte: Dana

Foi decidido o forjamento desta peça em uma etapa apenas e respeitando-se os ângulos de extração e os raios estabelecidos no desenho da peça ("draft angles: 5°" e "radii: 3.0"), os quais podem ser observados no ANEXO 4 deste trabalho.

Após a definição da geometria da peça proposta e a primeira idéia da ferramenta, partindo-se de um modelo feito em CAD, foram desenhadas as matrizes para a simulação do processo. Para simular o processo de forjamento, foram utilizados dois programas: o "Larstran" e o "SuperForge".

Os programas de simulação de processo por elementos finitos diferenciam-se basicamente pelo algoritmo de "solver" (programa de cálculo inserido no pacote), apresentando cada um, formulações características e modos específicos de definição da malha de elementos finitos. Os resultados da simulação do processo de forjamento da peça "F3-28-409", foram obtidos com a ajuda do programa "SuperForge", rodando em uma estação de trabalho Octane da Silicon Graphics com processador RISC/10000, no Centro de Supercomputação da UFRGS (CESUP).

Em termos, gerais as etapas de preparação e execução da simulação do processo são as mesmas para os dois programas, diferindo apenas algumas características próprias de cada um.

Inicialmente, foram definidas as malhas de volumes finitos da matriz superior e da matriz inferior e a pré-forma da peça calculada a partir do volume obtido no modelo em CAD da peça. Na figura 53 podem ser observados estes volumes.

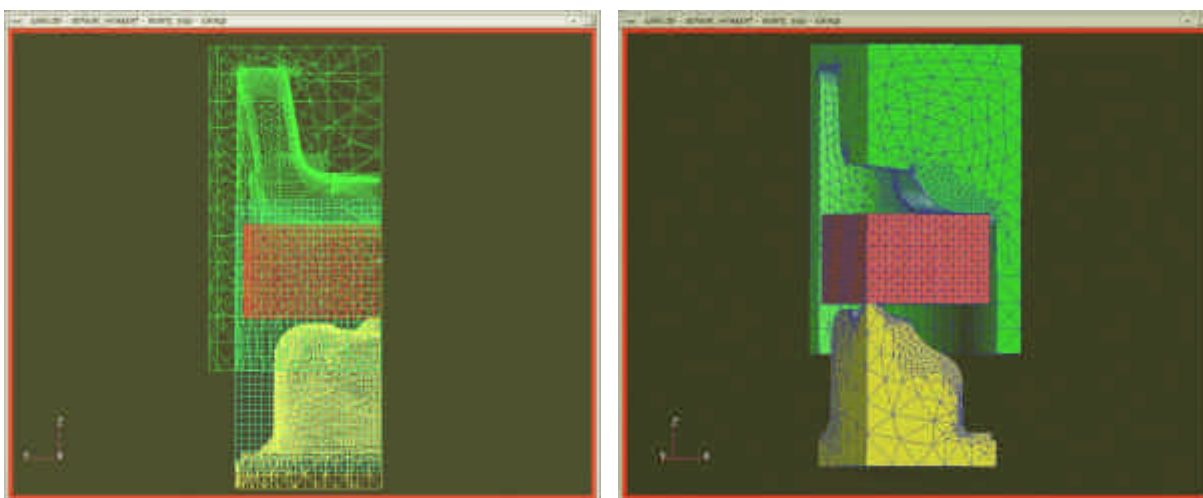


Figura 53 Malhas de Volumes Finitos da peça "F3-28-409"

Posteriormente, foi realizada a simulação assumindo as propriedades da liga ABNT 6061, tais como: curva de escoamento (tabela de dados, obtida no ensaio de compressão) e dados térmicos do material, obtidos na literatura. Os resultados são mostrados a seguir na forma de gráficos.

A deformação equivalente da peça durante o processo de conformação é obtida do cálculo das deformações nas três direções ortogonais e descrevem a deformação global sofrida pela peça segundo a equação: $\varphi_E = \sqrt{\frac{2}{3}(\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_3^2)}$. Na figura 54 é mostrado o resultado das deformações equivalentes da peça no final do processo.

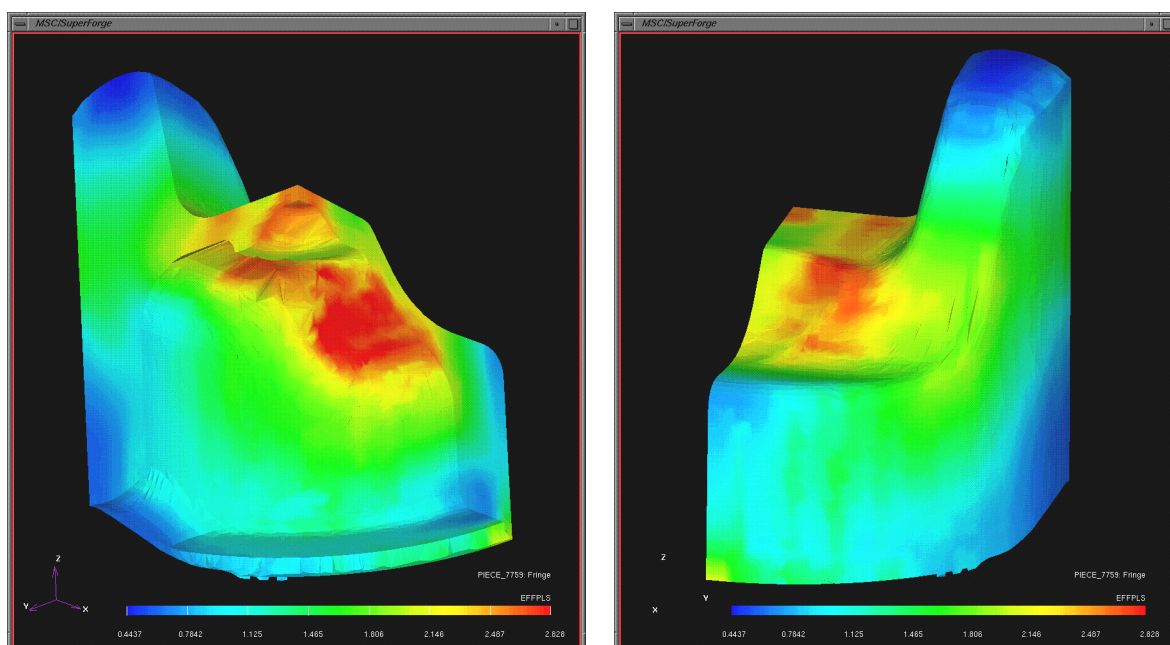


Figura 54 Resultado das deformações equivalentes da peça forjada

A distribuição de velocidades foi calculada no centro de cada volume finito descrevendo seu movimento relativo durante a deformação. Este resultado mostra a tendência ao preenchimento da cavidade em vermelho no sentido das “orelhas” da peça (eixo “z” positivo) e na parte inferior em azul com velocidade no sentido descendente (eixo “z” negativo), comprovando a viabilidade do processo de conformação. A figura 55 mostra a distribuição das velocidades em mm/s.

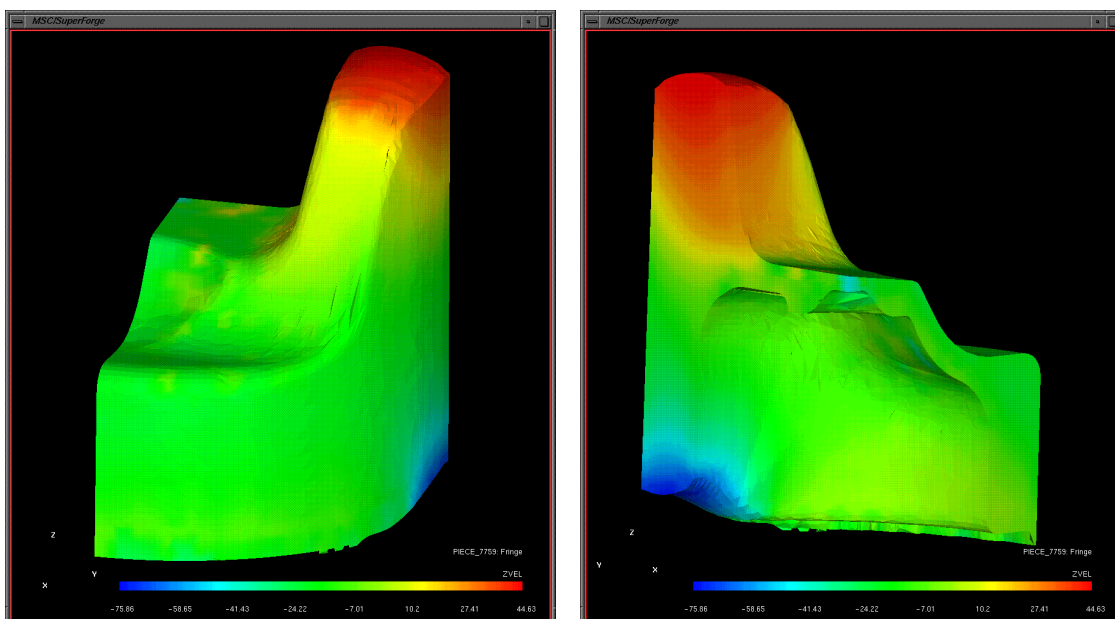


Figura 55 Distribuição de velocidades em mm/s da peça

O resultado gráfico da distribuição das temperaturas mostra os valores na escala absoluta (Kelvin) da temperatura da peça no final do processo. Pode-se observar na figura 56 que a temperatura da peça variou de 458 °C nas áreas azuis, transitando por 472 °C nas áreas verdes e atingiu uma temperatura máxima de 491 °C nas áreas vermelhas, considerando-se que a pré-forma iniciou a simulação com a temperatura inicial de 450 °C, conforme estabelece a literatura.

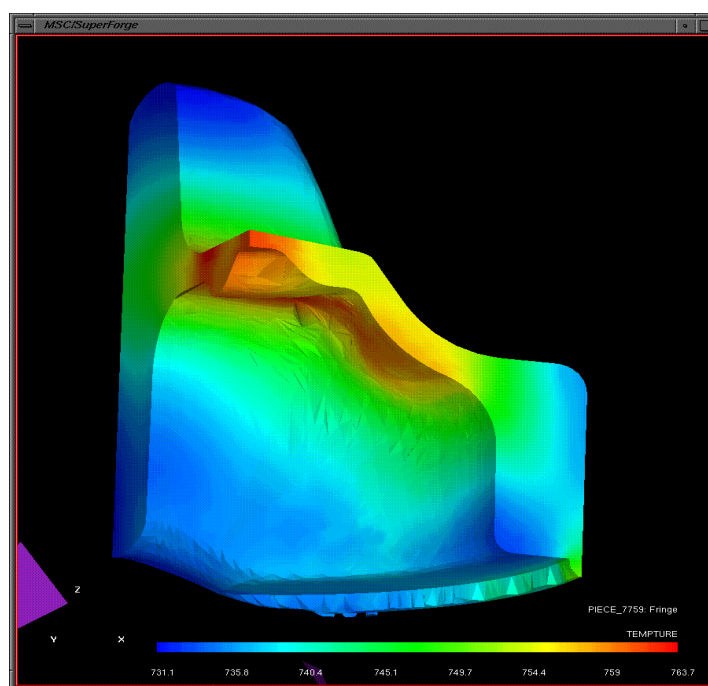


Figura 56 Resultado da distribuição de temperaturas na peça

Em função da falta de preenchimento das primeiras simulações, buscou-se reavaliar o volume da pré-forma escolhida e realizou-se nova simulação em uma nova versão do programa "SuperForge", agora rodando em um computador convencional em plataforma "Windows NT".

Os resultados obtidos revelam uma melhoria no preenchimento associado a uma distribuição mais homogênea da deformação equivalente, conforme mostra a figura 57.

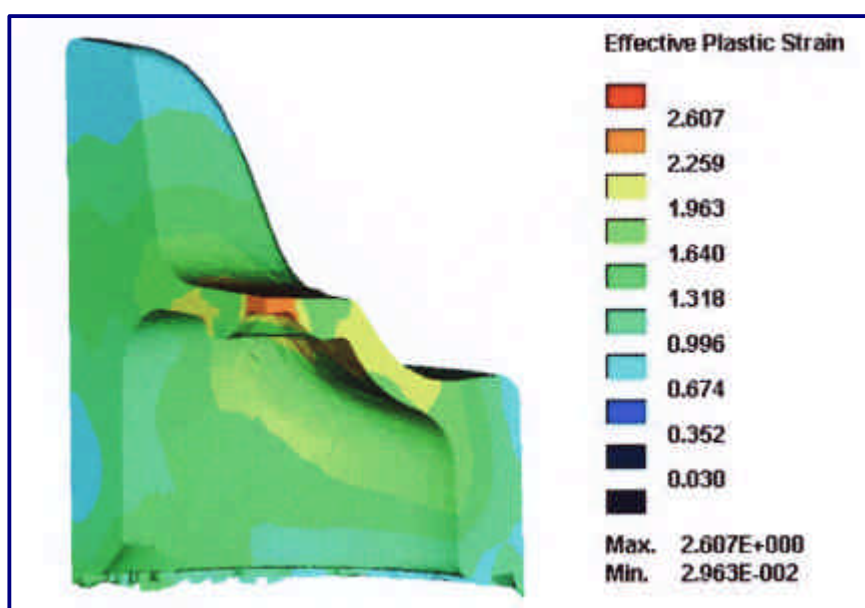


Figura 57 Distribuição da deformação equivalente – 2^o simulação

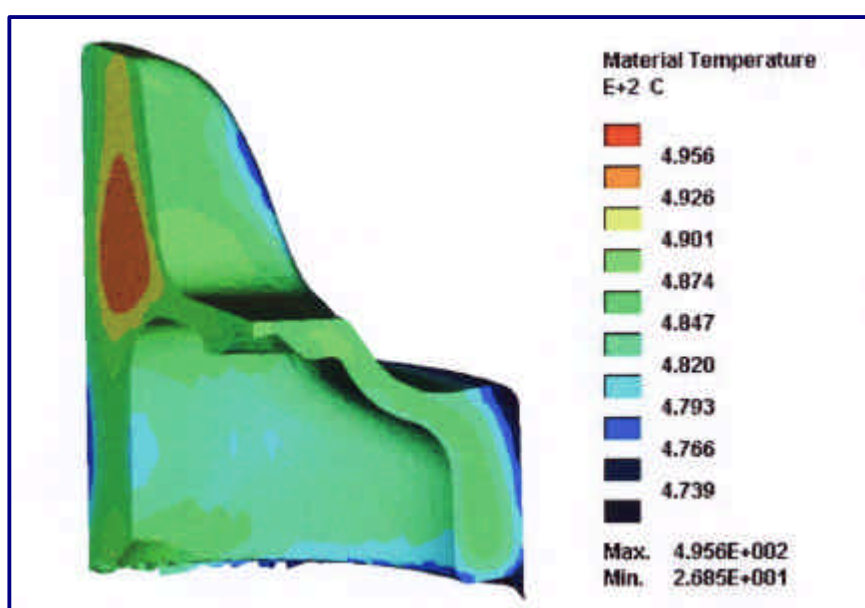


Figura 58 Distribuição de temperaturas – 2^o Simulação

O resultado da distribuição de temperaturas, mostrado na figura 57, revela pontos críticos onde a temperatura chega a 495 °C. A distribuição de deformações equivalentes revela a severidade da deformação sofrida pela peça, destacando-se o ponto central entre as "orelhas" onde o valor calculado chega a 2,6 e onde a temperatura final chega em torno 485 °C, podendo ocorrer rompimento da peça durante a extração, caso ela se fixe na matriz inferior.

A curva de força em função do tempo de deslocamento da matriz superior foi obtida a partir de um arquivo ASCII gerado pelo "SuperForge" e traçada em um gráfico do "Excel", conforme mostra a figura 59.

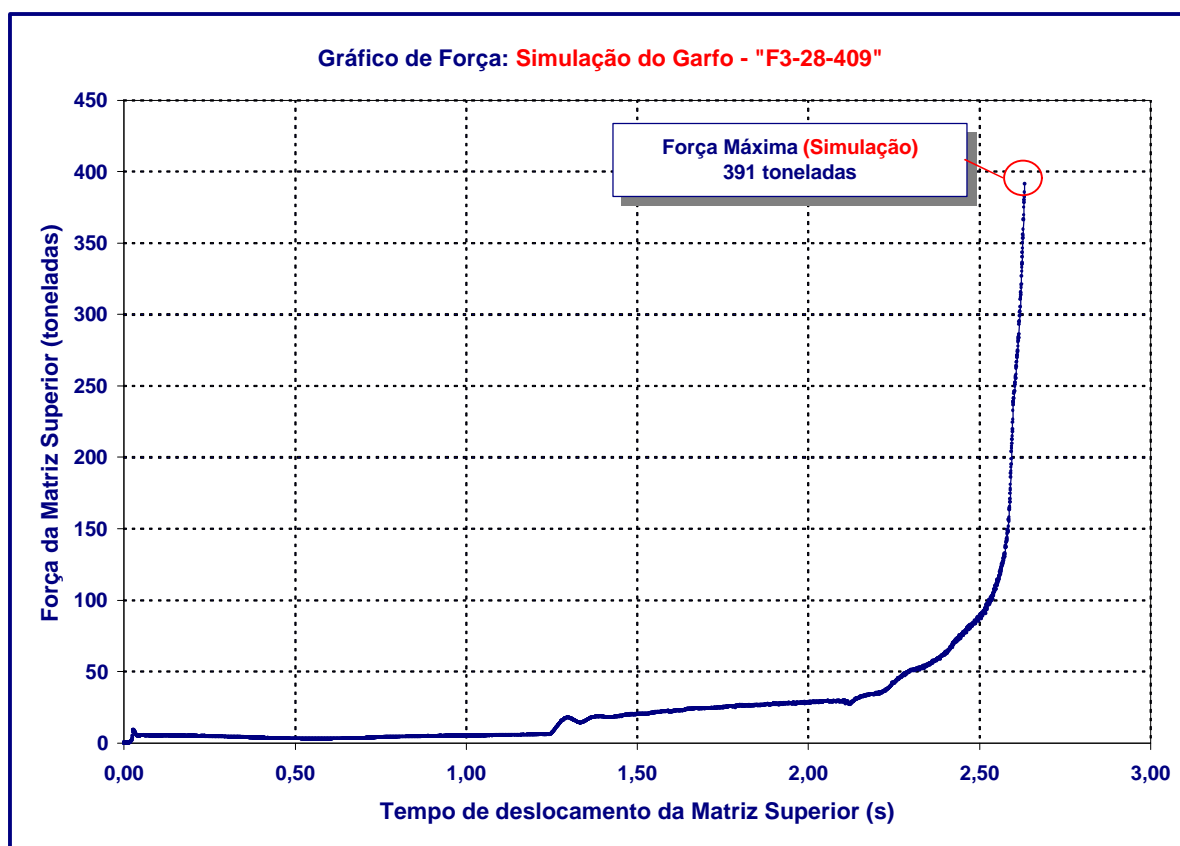


Figura 59 Curva de Força obtida na simulação da peça forjada

4.6 Forjamento Prático de um Componente Automotivo

4.6.1 Teste Preliminar de Forjamento do Garfo

Objetivando avaliar a possibilidade de forjamento em liga de alumínio, foi realizado inicialmente um teste preliminar, utilizando uma peça similar à peça F3-28-409, forjada em aço com o auxílio de uma ferramenta disponível na linha de produção da Dana.

Os resultados obtidos não refletiram a situação ideal para o forjamento de ligas de alumínio, entretanto este ensaio propiciou um excelente aprendizado quanto à cultura de um processo de forjamento adequado, ou seja, a experiência de forjar aço não serve para forjar alumínio.

Utilizou-se como matéria-prima a liga ABNT 6061 no estado extrudado e após recozido, fornecido pela empresa Alumisul. A tabela 15 mostra a análise de composição do material fornecido.

Tabela 15 Análise do material para teste preliminar de forjamento

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Ti	Al	Res.
Valor medido	0,58	0,80	0,35	0,13	0,94	0,16	0,01	0,017	0,045	96,95	0,041
Espec. mín.	0,40	-	0,15	-	0,80	-	-	0,04	-	-	-
Espec. máx.	0,80	0,70	0,40	0,15	1,20	0,25	-	0,35	0,15	-	-

Observa-se que os teores de **Fe** e **Cr** estão fora da especificação. A influência do Fe ocorre como elemento formador de compostos intermetálicos frágeis, comprometendo a microestrutura. Já o Cr evita a precipitação do magnésio e do silício nos contornos de grão, reduzindo a probabilidade de fratura intergranular e aumentando a resistência a tenacidade da liga. Adicionalmente, Mg e Si formam o precipitado Mg_2Si , o qual confere o endurecimento a esta liga.

É interessante observar que a prática comum é de se utilizar a matéria-prima no estado como fabricado, ou seja, somente extrudado, mas para efeito de facilitar o escoamento do material optou-se pelo estado recozido.

O material foi aquecido em um forno resistivo até a temperatura de 480 °C por 120 minutos, mostrado na figura 60, instalado próximo a prensa de forjamento.



Figura 60 Forno de aquecimento resistivo – Dana DFR

Para o teste, foi utilizada uma prensa excêntrica de 1300 toneladas, sendo as matrizes aquecidas com tarugos de aço, mantendo a temperatura entre 150 e 250 °C, medida com pirômetro ótico.



Figura 61 Aspecto do Garfo forjado em alumínio – Dana DFR

Observa-se que o extrator perfurou a peça (figura 60), associado a pequena espessura da peça na região (seta vermelha), confirmada como crítica nas simulações realizadas.

Posteriormente ao teste de forjamento, a peça obtida foi submetida a um tratamento de solubilização em um forno tipo “poço” Sanchis com circulação forçada de ar e controle de temperatura (± 5 °C), sendo resfriado em um tanque de água com agitação manual.

Após a solubilização, a peça foi colocada novamente no forno para realizar o tratamento de precipitação (envelhecimento artificial). A tabela 16 resume os tratamentos realizados e os resultados obtidos.

Tabela 16 Tratamento térmico realizado na peça forjada

Tratamento	Temperatura	Tempo	Dureza obtida
Solubilização	530 °C	95 min	não medido
Precipitação	205 °C	60 min	85 HB

Observa-se que a dureza obtida após 1 h de tratamento na temperatura especificada foi bastante satisfatória, entretanto é possível atingir durezas até 95 HB após tratamentos de 8 h à 175 °C.

Após o resfriamento da peça, foi realizada uma análise metalográfica, objetivando os seguintes aspectos:

- Análise de escoamento do material;
- Análise de fases presentes, distribuição e homogeneidade;
- Avaliar prováveis defeitos de matéria-prima e/ou no forjado;
- Avaliar a prática do tratamento térmico.

Para a análise do escoamento do material cortou-se a peça e realizou-se o lixamento, polimento e ataque em solução aquosa de NaOH por 1 minuto a 70°C. A Figura 62 mostra o macroataque efetuado no garfo forjado em alumínio e três pontos na peça cortada.

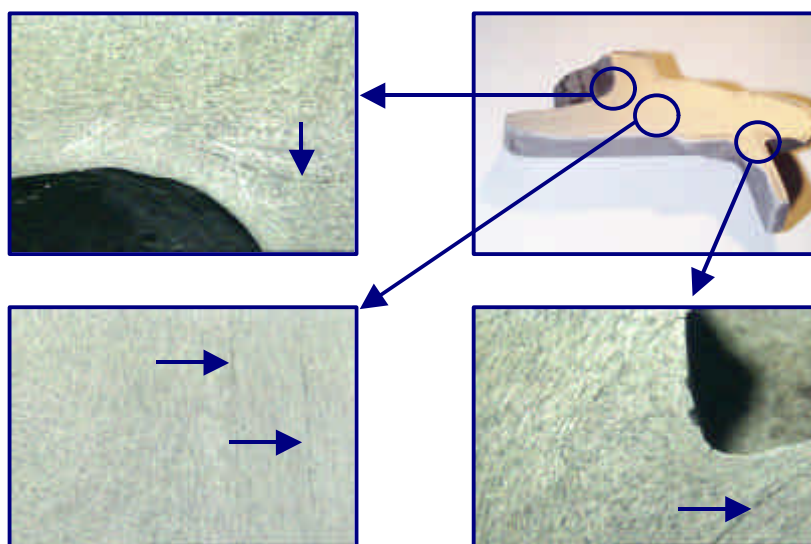


Figura 62 Detalhes da análise da peça forjada – Dana DFR

Observa-se que o material escoou bem, sem pontos de dobra ou outro tipo de defeito de forjamento. Algumas discontinuidades foram observadas (setas azuis) associadas provavelmente à porosidades na matéria-prima.

A análise da microestrutura revela a existência de microprecipitados identificados como Mg_2Si (pretos) e provavelmente Fe_3SiAl_{12} (cinzas), mostrados na figura 63.

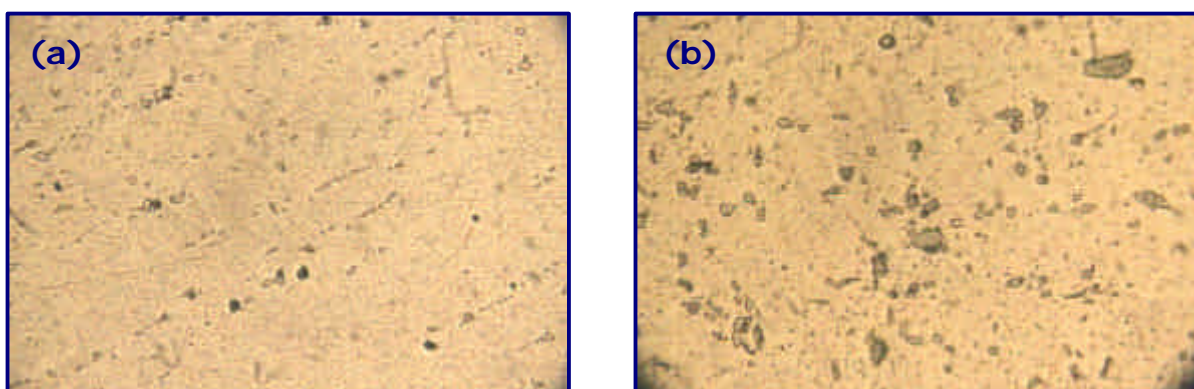


Figura 63 Micrografias da peça forjada após solubilização e envelhecimento. (a) 200x e (b) 500x. Ataque: HF a 0,5%

4.6.2 Construção de Ferramentas para Forjamento

Durante o desenvolvimento do processo de forjamento de ligas de alumínio foi estabelecida a necessidade de construção de ferramentas de forjamento para testes e homologação dos componentes.

Foram construídos dois conjuntos de ferramentas para forjar: (a) com rebarba e (b) sem rebarba, conforme as especificações iniciais do projeto conjunto entre a Dana e a UFRGS. A ferramenta de forjar com rebarba foi projetada na UFRGS, objetivando a sua utilização em ensaios relativos a este desenvolvimento e posteriormente em atividades de ensino na Escola de Engenharia. A figura 64 mostra o desenho de conjunto desta ferramenta.

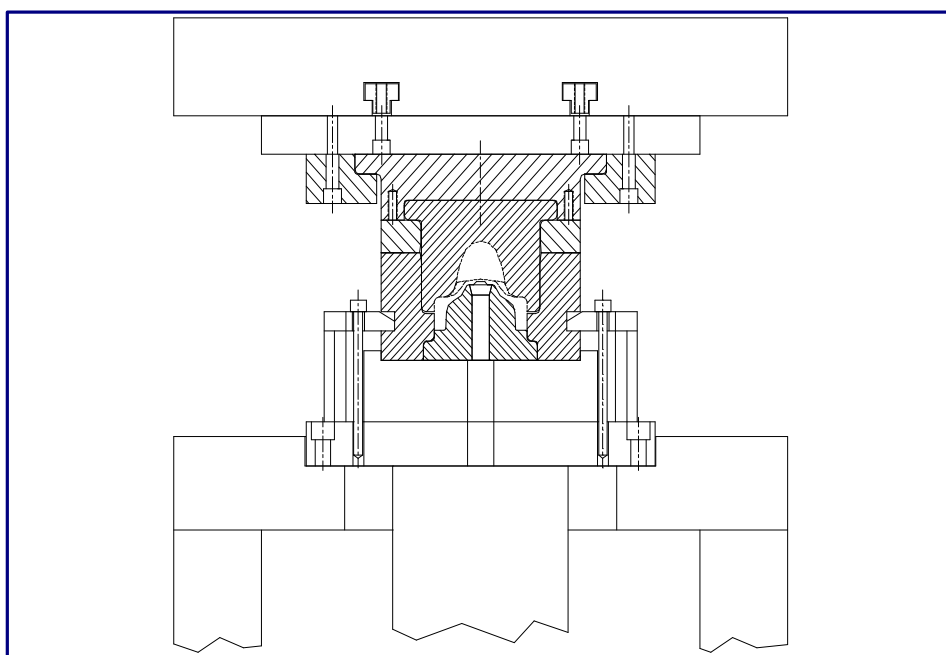


Figura 64 Ferramenta de forjamento com rebarba

Nesta ferramenta em especial, utilizou-se uma metodologia diferente na confecção das cavidades internas (Punção Superior, Matriz e Punção Inferior). Esta técnica baseia-se na usinagem direta das cavidades a partir do modelo gerado no CAD, eliminando a necessidade da eletroerosão por penetração, comumente usada neste tipo de construção mecânica.

Em conjunto com a unidade de ensino do SENAI, Escola Visconde de Mauá, em Porto Alegre, foram gerados as superfícies das matrizes e importados para um programa de CAM ("PowerMill" da Delcam), disponível na escola do SENAI, onde se gerou os programas de usinagem CNC.

Estes programas foram inseridos em um centro de usinagem Romi, onde as cavidades das ferramentas foram usinadas. Na figura 64 pode ser observado a (a) simulação do processo de usinagem e após, (b) a usinagem real da mesma peça na máquina, de um dos componentes do conjunto mostrado na figura 65.

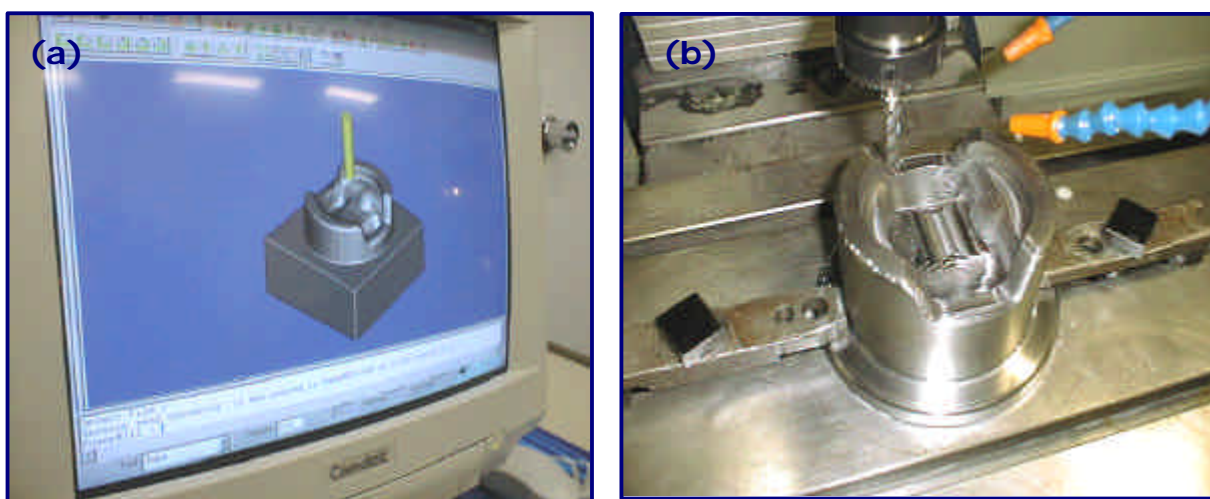


Figura 65 Detalhe da (a) simulação e (b) usinagem real da ferramenta

As cavidades das ferramentas foram usinadas até o limite de sobre-metal em torno de 0,3 mm em desbaste e pré-acabamento, após então, foram tratadas termicamente através de têmpera e revenido para uma dureza entre 40 a 44 HRc, para assim, posteriormente, sofrerem uma usinagem final de acabamento e polimento geral para se obter a rugosidade adequada nas cavidades internas para o forjamento de ligas de alumínio ($R_a = 0,15 \mu\text{m}$, recomendável).

Esta técnica é pouco utilizada pelas empresas, provavelmente pelo alto custo da usinagem em CNC e também devido a pouca potência destas máquinas no desbaste mais pesado. Elas são mais utilizadas para construção dos eletrodos em cobre ou grafite para eletro-erosão posterior das cavidades.

Após o polimento final e limpeza das matrizes, estas foram montadas no porta-ferramentas, conforme mostrado na figura 64 e instaladas em uma prensa hidráulica de 750 toneladas.

Foram preparadas as pré-formas cortadas em serra e aquecidas em um forno elétrico até a temperatura de 480 °C. As matrizes foram aquecidas com tocha à gás GLP e lubrificadas com Oildag diluído em água na proporção de 10:1. A figura 66 mostra o resultado da peça forjada com rebarba.



Figura 66 Peça forjada com rebarba – LdTM-UFRGS

Observa-se falta de preenchimento nas “orelhas” e na parte inferior do garfo, provavelmente relacionado ao pouco volume de material na pré-forma.

O conjunto da matriz de forjamento foi montado em um porta-ferramenta disponível na prensa e posteriormente alinhado para garantir o encaixe da matriz superior e a matriz inferior.

As pré-formas foram cortadas e aquecidas no mesmo forno resistivo do forjamento preliminar (figura 60) e aquecidas até a temperatura de 480 °C por 120 min, similar ao procedimento já adotado.

As ferramentas foram pré-aquecidas em forno resistivo e sua temperatura mantida com tarugos de aço aquecidos por indução, disponíveis de outra linha de produção próxima. A temperatura foi mantida em torno de 200 °C, medido com pirômetro ótico.

Foi utilizado como lubrificante uma solução de grafite e água na proporção 10:1, aplicada com dispositivo de aspensão pneumático existente na instalação da prensa.

Neste teste de forjamento foi utilizada uma prensa mecânica de 1600 tonelada (85 golpes/min) com controle programável. A figura 67 mostra duas vistas do ferramental e a primeira peça forjada no teste.



Figura 68 Detalhe do ferramental e a 1^o peça forjada no teste

A cavidade das ferramentas se apresentou bem lubrificada, pois desgrudou-se facilmente na matriz inferior (sem a necessidade de uso do extrator) e ficou presa por alguns segundos na matriz superior, soltando-se com a saída do vapor do interior da mesma.

Após a retirada da peça com o devido cuidado, observou-se os mesmos defeitos de preenchimento mostrados na simulação, visto que foi utilizado os mesmo tamanho de pré-forma. A saída da rebarba na parte inferior se mostrou bastante satisfatória e em concordância com os resultados da simulação. A figura 68 mostra duas vistas observadas da primeira peça forjada no teste na Dana.

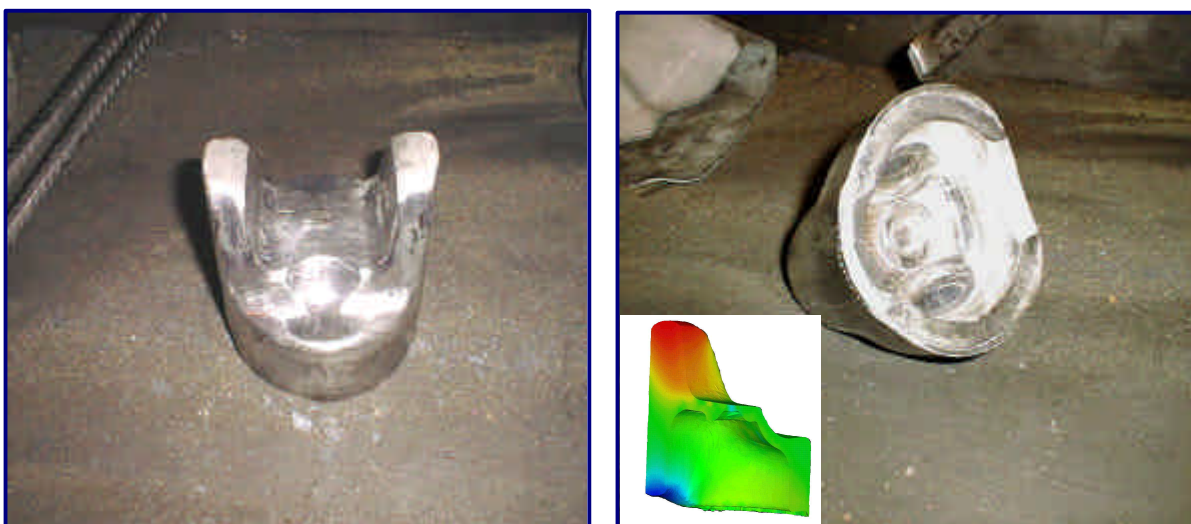


Figura 69 Detalhe da 1^o peça forjada no teste

A força necessária para a conformação do garfo foi de 370 toneladas em um só golpe, medida com célula de carga acoplada na prensa.

Observa-se que não houve preenchimento total nas orelhas, devido ao fechamento da saída de ar durante o escoamento do material. A solução encontrada será colocar a saída de ar no canto interno da orelha, onde há o final de preenchimento, evitando dessa forma que o material feche o orifício de saída de ar.

Outro problema observado foi que na parte interna da parede do garfo não houve preenchimento total, mas isso está ligado ao fato do teste ter sido realizado com tarugos de menor massa.

Foram forjadas 4 peças variando o volume das pré-formas desde as dimensões $\varnothing 101,3$ mm x 33,1 mm (720 g) até $\varnothing 101,6$ mm x 34,7 mm (759,4 g). A última peça apresentou o melhor resultado de preenchimento.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Validade das Curvas de Escoamento

O levantamento das Curvas de Escoamento requer alguns cuidados a serem observados no dimensionamento e na preparação dos corpos de prova a serem utilizados no ensaio de compressão.

Inicialmente, é importante observar a correta relação entre a altura e o diâmetro do corpo de prova, objetivando amenizar os efeitos do atrito baseando-se na relação $h_0/2r_0 < 1,5$ e adicionalmente, observar o efeito do embarrilamento do corpo de prova, que neste caso irá limitar a máxima deformação admissível, devido ao aparecimento das tensões de tração circunferenciais⁽²²⁾, as quais são da mesma ordem de grandeza da tensão axial de compressão.

Outro fator muito importante relacionado com a escolha das dimensões do corpo de prova relaciona-se com a capacidade da máquina de ensaios garantir uma velocidade de deformação constante ($\dot{\varphi} = \text{cte}$).

Conforme foi discutido no capítulo 3, para que um ensaio de compressão se dê a velocidade de deformação constante é necessário que a ferramenta de compressão siga uma curva de controle na qual a razão $V/H(t)$ (onde V é a velocidade da ferramenta em mm/s e $H(t)$ é a altura instantânea do corpo de prova em mm) seja sempre constante e igual à velocidade de deformação desejada.

No caso de um corpo de prova de altura inicial 30 mm a velocidade inicial da ferramenta deve ser 300 mm/s, no transcorrer do ensaio a altura do corpo de prova vai diminuindo e a velocidade da ferramenta deve diminuir na mesma razão.

Este comportamento não foi avaliado antes da preparação dos ensaios e dimensionamento dos corpos de prova, quando da escolha das velocidades de deformação 1, 10 e 50 s⁻¹.

Havia sim, a preocupação de se conhecer o comportamento nestas velocidades, objetivando um processo de alta produtividade.

Em função desta negligência, buscou-se determinar na prática a condição em que foram obtidas as curvas de escoamento deste trabalho, comparando o deslocamento real do punção, registrado no sistema de aquisição de dados e a curva de controle da máquina de ensaios, buscando responder a simples pergunta: "A máquina realmente fez o que foi mandada fazer?".

A partir dos resultados dos ensaios de compressão, foram traçadas as curvas comparativas mostradas nas figuras 70, 71 e 72.

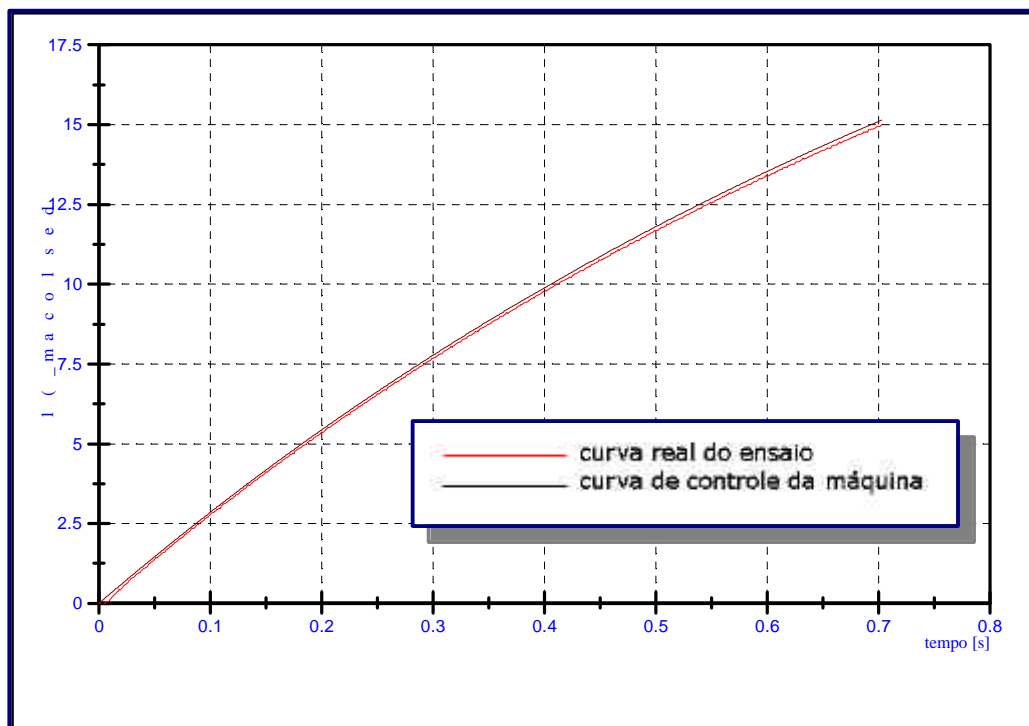


Figura 70 Curva comparativa para velocidade $\dot{\phi} = 1 \text{ s}^{-1}$.

Observa-se que para a velocidade de 1 s^{-1} , houve uma boa concordância entre o sinal de controle e a resposta do ensaio. A distância entre as curvas se deve à defasagem de tempo entre a ordem dada pelo computador a realização do ensaio (aproximadamente $3,75 \text{ ms}$).

Neste segundo caso, onde a velocidade de deformação pretendida era de 10 s^{-1} , nota-se que a curva real (preta) não segue com boa precisão a curva de controle (cinza), pois no início do ensaio, por motivo de inércia, a ferramenta de compressão demora até atingir a velocidade pretendida.

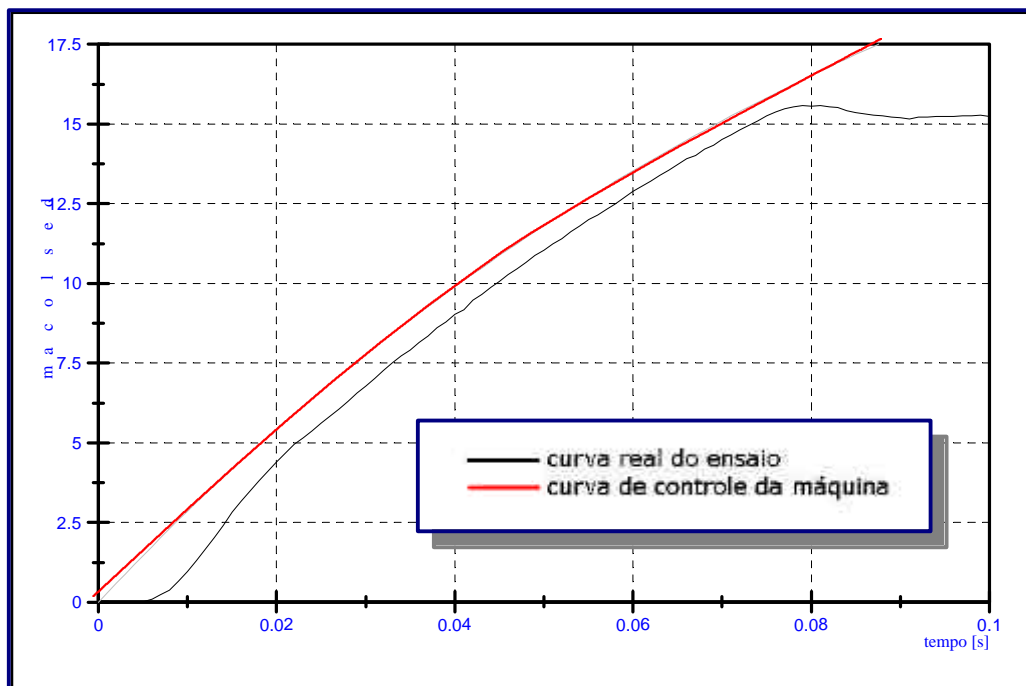


Figura 71 Curva comparativa para velocidade $\dot{\phi} = 10 \text{ s}^{-1}$.

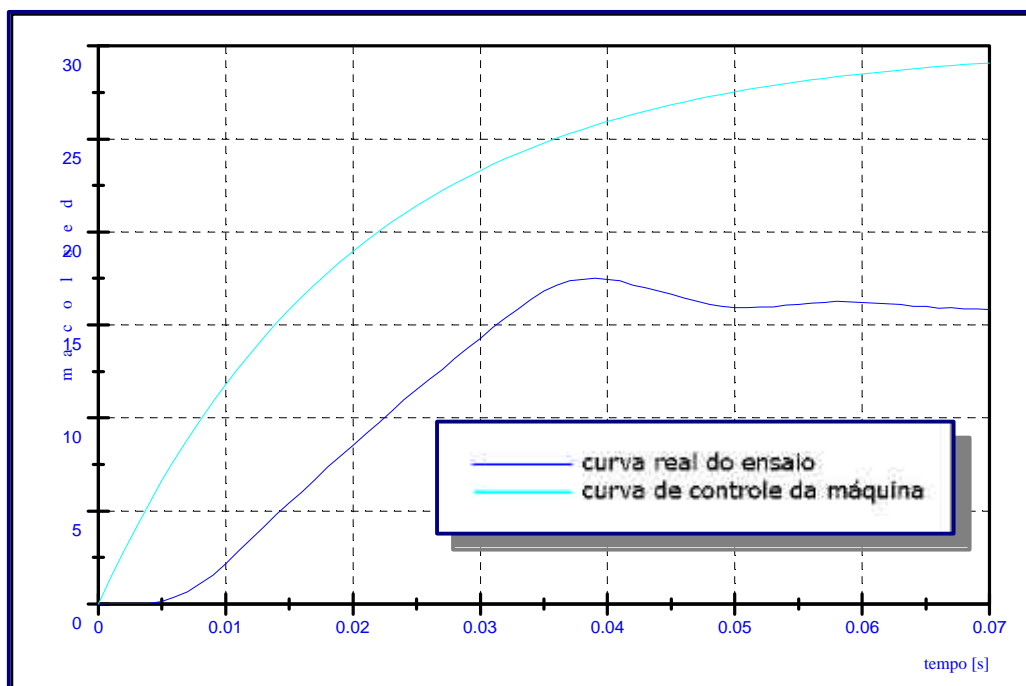


Figura 72 Curva comparativa para velocidade $\dot{\phi} = 50 \text{ s}^{-1}$.

E, neste terceiro caso, para a velocidade 50 s^{-1} , a curva real está bem distante da curva de controle, pois o limite físico da máquina de ensaios é de 500 mm/s e a curva de controle (para isso basta ver o coeficiente de inclinação da reta tangente à curva) começa com velocidade de 1500 mm/s e termina ($\sim 15 \text{ mm}$) com velocidade de 750 mm/s .

Portanto, conclui-se que para se realizar o ensaio de compressão nas velocidades de 10 e 50 s^{-1} , o corpo de prova de $\text{Ø}20 \times 30 \text{ mm}$ não foi o mais adequado em função da dificuldade física da máquina em garantir a velocidade de deformação constante.

Para estas velocidades, deve-se utilizar um corpo de prova com dimensões menores, por exemplo, $\text{Ø}10 \times 15 \text{ mm}$. O fator limitante será a dificuldade de se garantir as tolerâncias dimensionais na usinagem do corpo de prova e o estado de fornecimento do material (recozido ou como fabricado).

O impacto da negligência das dimensões do corpo de prova em função da capacidade da máquina de ensaios se dá na forma de uma diferença maior entre os valores de força obtidos nas simulações e os valores obtidos no experimento prático.

Segundo Snape⁽⁴⁰⁾ et al (1998), analisando as alterações nos parâmetros utilizados na simulação de um processo de forjamento, uma alteração da ordem de 1% na tensão de escoamento provocaria uma alteração de $0,07 \%$ no valor obtido do trabalho de deformação, baseando suas afirmações na estimativa de correlação linear entre os parâmetros.

Portanto, as curvas obtidas nas velocidades de 1 e 10 s^{-1} , a rigor, poderiam ser utilizadas para a simulação do processo para pequenas deformações. As curvas obtidas na velocidade de 50 s^{-1} deveriam ser expurgadas e novo ensaio de compressão deveria ser feito com corpos de prova menores.

5.2 Análise das Condições de Atrito x Lubrificantes

Objetivando comparar duas qualidades de lubrificantes comerciais disponíveis e recomendados para o forjamento de ligas de alumínio (ver ANEXO 6) foi realizada a análise de variância dos parâmetros do ensaio do anel, observando a sua influência sobre o aumento do raio interno (variável de resposta). A figura 72 esquematiza o método de análise.

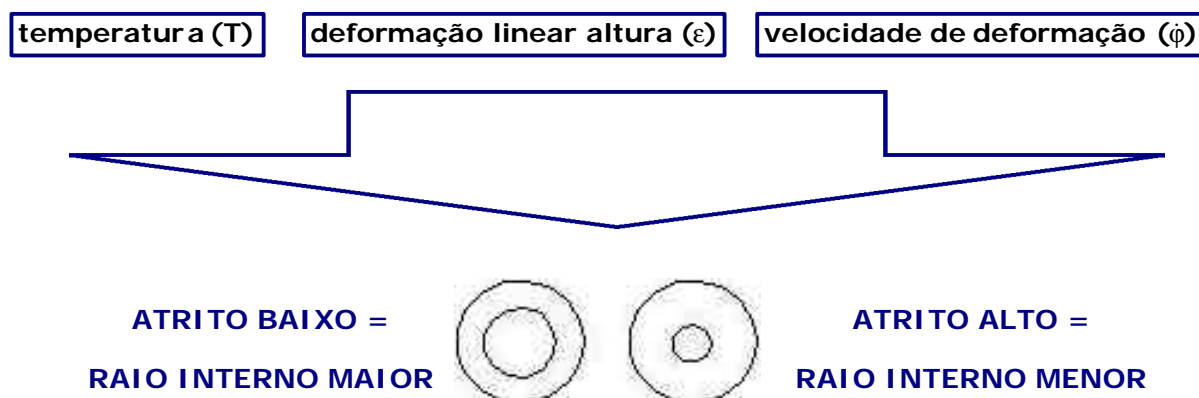


Figura 73 Metodologia de análise dos anéis deformados

Um aumento significativo no raio interno do anel (valor negativo) vai indicar que o atrito é baixo, portanto, o lubrificante apresenta um desempenho satisfatório (redução do atrito interfacial).

Na análise estatística, foram considerados os seguintes níveis de cada parâmetro, para cada tipo de lubrificante (“Deltaforge 31” e “Oildag”):

- (i) Temperatura: 3 níveis (200 °C, 300 °C e 450 °C);
- (ii) Velocidade de deformação: 3 níveis (1, 10 e 50 s⁻¹);
- (iii) Deformação Percentual na Altura: 3 níveis (0,25; 0,50 e 0,75).

Foi definido um intervalo de confiança de 95% ($p < 0.05$) para o teste de significância dos parâmetros isolados e suas interações e a análise múltipla de médias foi realizada, objetivando determinar a faixa de variação do parâmetro que apresenta a condição de atrito baixo, ou seja maior raio interno possível (representado por um valor negativo).

Os dados tabelados para o lubrificante “Deltaforge 31” podem ser observados na tabela 17a e a respectiva tabela ANOVA na tabela 17b.

Tabela 17a Dados do lubrificante “Deltaforge 31”

FATOR A	FATOR B - VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO								
	1 s ⁻¹ (B1)			10 s ⁻¹ (B2)			50 s ⁻¹ (B3)		
	FATOR C - DEFORMAÇÃO RELATIVA								
TEMPERATURA	ε = 0,25 (C1)	ε = 0,50 (C2)	ε = 0,75 (C3)	ε = 0,25 (C1)	ε = 0,50 (C2)	ε = 0,75 (C3)	ε = 0,25 (C1)	ε = 0,50 (C2)	ε = 0,75 (C3)
T= 200 °C (A1)	3,73	12,27	24,22	4,01	11,99	26,43	5,12	19,50	43,17
	3,73	12,27	24,22	4,01	11,99	26,43	5,12	19,50	43,17
T= 300 °C (A2)	-2,60	-4,24	7,05	2,75	6,68	19,16	3,55	11,06	14,31
	-2,60	-4,24	7,05	2,75	6,68	19,16	3,55	11,06	14,31
T= 450 °C (A3)	8,92	18,89	31,97	7,95	21,44	31,51	9,79	50,63	152,32
	8,92	18,89	31,97	7,95	21,44	31,51	9,79	50,63	152,32

Tabela 17b Tabela ANOVA do lubrificante “Deltaforge 31”

VARIÁVEL	Soma de Quadrados	GDL	Médias Quadradas	TESTE F	F TABELADO
A	4373,67	2	2186,84	9,82	4,46
B	2826,07	2	1413,03	6,35	4,46
C	5407,28	2	2703,64	12,15	4,46
AB	2672,97	4	668,24	3,00	3,84
AC	2113,90	4	528,47	2,37	3,84
BC	3509,98	4	877,49	3,94	3,84
ABC	1780,70	8	222,59	1,00	3,44
Erro	0,00	0			
Total	22684,57	26			

Observa-se, no teste da tabela ANOVA, que as influências dos parâmetros temperatura (A), velocidade de deformação (B) e deformação linear na altura (C) são bastante significativas.

Em função destes resultados, partiu-se para a análise múltipla de médias objetivando concluir a influência dos parâmetros. Nesta análise, fixam-se 2 parâmetros em relação a um 3º parâmetro. Será aceita a hipótese de significância quando a diferença entre as médias for maior que o valor calculado de $3.S_x$, onde S_x é o desvio padrão das médias calculado por: $S_x = \frac{\sqrt{MQR}}{\sqrt{n}}$.

Desta comparação conclui-se que:

(a) Para o lubrificante “Deltaforge 31” houve uma diminuição significativa do raio interno dos anéis deformados, ou seja, aumento do atrito na variação de temperatura de 200 °C até 450 °C, deformação linear na altura 0,75 e velocidade de deformação 50 s⁻¹.

(b) Para o lubrificante “Deltaforge 31” houve diminuição significativa do raio interno dos anéis deformados, ou seja, aumento do atrito quando da variação da deformação linear na altura de 0.50 até 0.75, na temperatura de 450 °C e velocidade de deformação 50 s⁻¹.

Da mesma forma, foram tabelados os dados para o lubrificante “Oildag” mostrados na tabela 18a e a respectiva tabela ANOVA na tabela 18b.

Tabela 18a Dados do lubrificante “Oildag”

FATOR A	FATOR B - VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO								
	1 s ⁻¹ (B1)			10 s ⁻¹ (B2)			50 s ⁻¹ (B3)		
	FATOR C - DEFORMAÇÃO RELATIVA								
TEMPERATURA	ε = 0.25 (C1)	ε = 0.50 (C2)	ε = 0.75 (C3)	ε = 0.25 (C1)	ε = 0.50 (C2)	ε = 0.75 (C3)	ε = 0.25 (C1)	ε = 0.50 (C2)	ε = 0.75 (C3)
T= 200 °C (A1)	-4,31	-3,85	-0,33	-4,24	-3,00	-4,15	-4,39	-1,48	1,44
	-4,31	-3,85	-0,33	-4,24	-3,00	-4,15	-4,39	-1,48	1,44
T= 300 °C (A2)	-2,85	-6,05	-8,43	-6,32	-10,51	11,27	15,22	12,74	-12,42
	-2,85	-6,05	-8,43	-6,32	-10,51	11,27	15,22	12,74	-12,42
T= 450 °C (A3)	-2,67	-6,08	-7,22	-3,79	-6,79	-4,86	-4,69	-7,51	-4,55
	-2,67	-6,08	-7,22	-3,79	-6,79	-4,86	-4,69	-7,51	-4,55

Tabela 18b Tabela ANOVA do lubrificante “Oildag”

VARIÁVEL	Soma de Quadrados	GDL	Médias Quadradas	TESTE F	F TABELADO
A	93,40	2	46,70	2,12	4,46
B	78,18	2	39,09	1,78	4,46
C	12,83	2	6,41	0,29	4,46
AB	115,17	4	28,79	1,31	3,84
AC	59,55	4	14,89	0,68	3,84
BC	550,93	4	137,73	6,26	3,84
ABC	176,04	8	22,00	1,00	3,44
Erro	0,00	0			
Total	1086,10	26			

Observa-se no teste da tabela ANOVA que as influências dos parâmetros temperatura (A), velocidade de deformação (B) e deformação linear na altura (C) NÃO são significativas para o lubrificante “Oildag”. A interação entre a velocidade de deformação e a deformação linear na altura apresenta sim, uma considerável significância.

Na análise múltipla de médias realizada da mesma forma que na tabela anterior, conclui-se que:

Para o lubrificante “Oildag” houve aumento do raio interno dos anéis deformados, ou seja, redução do atrito quando das variações de temperatura, velocidade de deformação e deformação linear em altura estudadas nos ensaios.

Portanto, conclui-se que o lubrificante "Oildag" apresenta uma estabilidade melhor em relação ao lubrificante "Deltaforge 31" frente as variações de temperatura, deformação e velocidade de deformação na função de reduzir o atrito interfacial peça-ferramenta.

Adicionalmente à análise estatística, analisando os lubrificantes quanto ao coeficiente de atrito obtido na comparação com as curvas de calibração (figuras 36 a 44) obtidas pelo método dos elementos finitos, pode-se observar que o lubrificante "Oildag" apresenta coeficientes menores ($0,05 < \mu < 0,1$) que o lubrificante "Deltaforge 31".

Quanto às características⁽²⁸⁾ abordadas por Altan (1983), o lubrificante "Oildag" peca em duas:

- (a) Durante o aquecimento do experimento foi sentido um forte cheiro de amônia, e verificando-se a sua formulação, constatou-se a presença da substância na composição;
- (b) Houve uma extrema dificuldade em se fazer a limpeza dos corpos de prova deformados no teste do "Oildag".

5.3 Análise Comparativa: Forjamento Prático x Simulação

Com o objetivo de validar as simulações computacionais do processo de forjamento, uma análise comparativa entre os valores obtidos no ensaio prático e na simulação de uma peça de simetria axial é feita.

A partir dos dados obtidos na forma de arquivo ASCII, do ensaio prático e da simulação foi construído um gráfico com as duas curvas, conforme pode ser observado na figura 73.

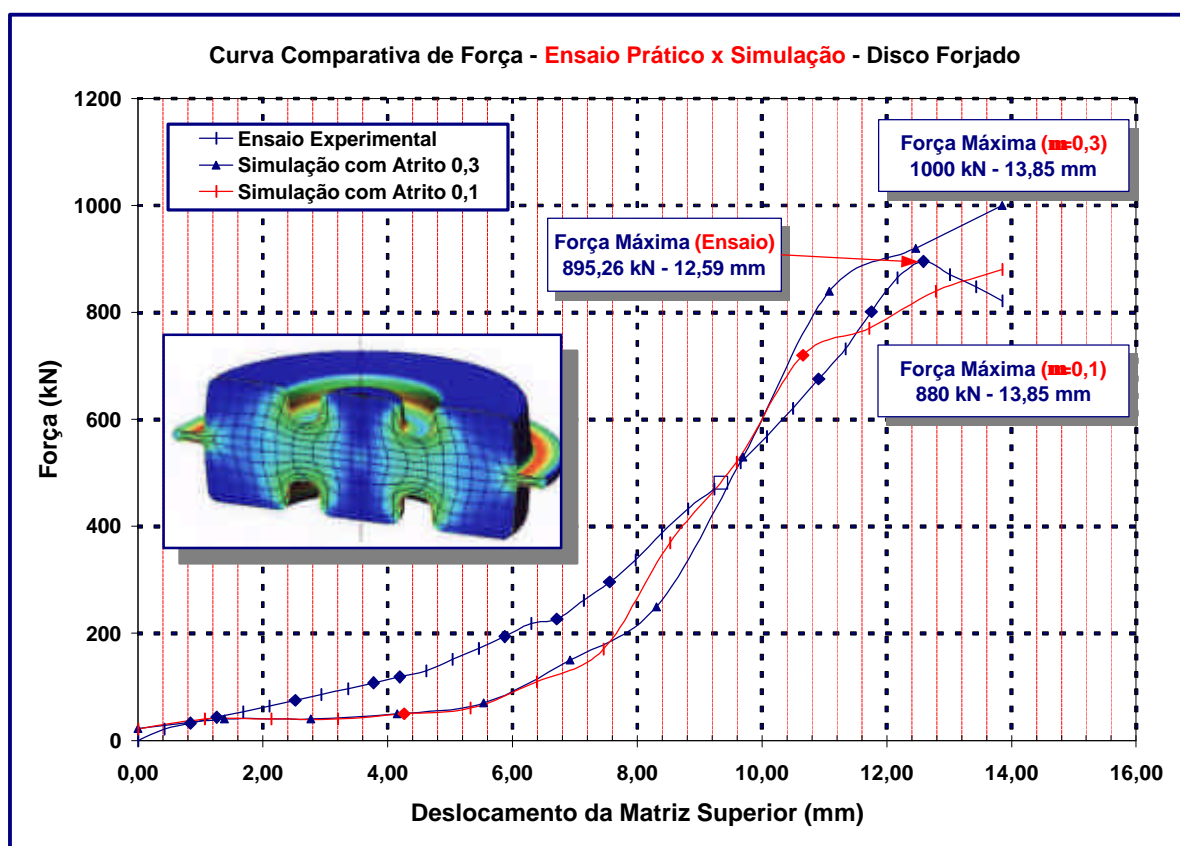


Figura 73 Gráfico comparativo ensaio experimental x Simulação

Observa-se pouca diferença no estágio inicial da deformação entre as duas simulações (atrito 0,1 e 0,3) e uma separação na parte final quando existe o efeito de contato da rebarba com matriz a uma temperatura mais baixa, por consequência, uma necessidade maior de força para fechamento da matriz.

Comparando com os dados obtidos na prática, os valores são maiores do que na simulação, durante o estágio inicial, provavelmente devido à diferença de contato. No estágio final, o valor de força obtido na prática situa-se entre os valores simulados com atrito 0,1 e 0,3, revelando que o atrito real se encontra entre estes valores.

Quanto à simulação do garfo "F3-28-409" comparada com as peças obtidas no forjamento experimental, observa-se uma grande similaridade de forma, mostrando que a simulação aproxima-se bastante do que ocorre na prática. A figura 74 mostra o garfo (a) simulado e o garfo (b) forjado.

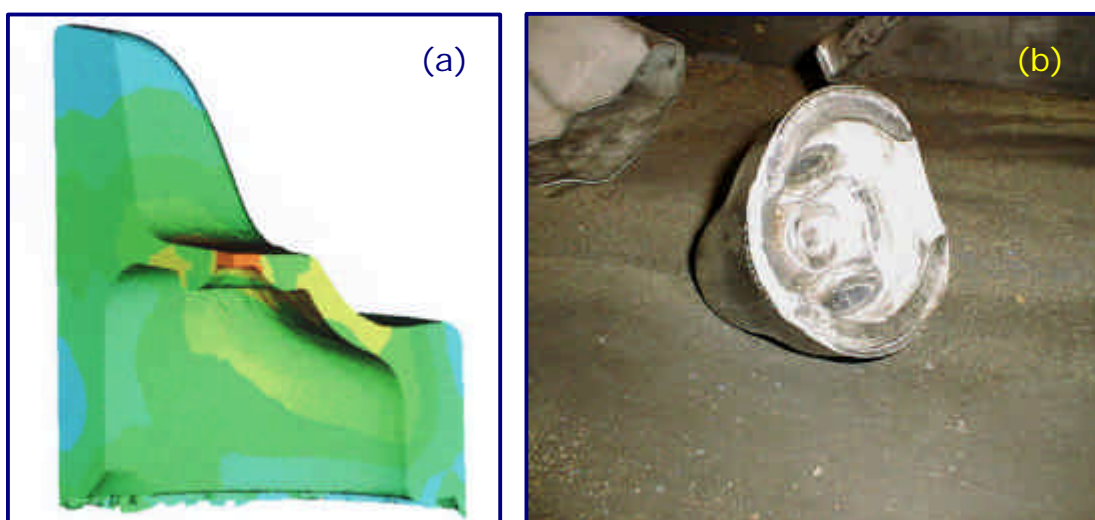


Figura 74 Comparativo do garfo (a) simulado e (b) forjado – Dana

Observa-se a rebarba formada na simulação se repetir na peça forjada, conforme previsto e a falta de preenchimento na "orelha" e na parte inferior do garfo.

Pode-se concluir que as simulações obtidas, fornecem no primeiro momento, uma idéia bem realística do escoamento e do preenchimento da cavidade, permitindo se otimizar a pré-forma até se atingir o melhor resultado de preenchimento e ausência de defeitos associados a pontos com temperatura mais alta ou dobras de material durante o escoamento.

Em um segundo momento, devem ser otimizados os parâmetros de temperatura das matrizes e da pré-forma e da condição de atrito a partir dos coeficientes obtidos no ensaio do anel, utilizando os lubrificantes disponíveis na fábrica.

Esta otimização de parâmetros visa obter as tensões mais brandas possíveis que não comprometam o desgaste das ferramentas e da prensa, esta por sua vez, será escolhida com mais precisão em face da peça ou grupo de peças que serão forjadas na mesma.

Da mesma forma que foi obtido o gráfico de força a partir da simulação do "SuperForge", a figura 75 mostra um comparativo da curva de força da simulação com o valor da força fornecido pela prensa, durante o forjamento prático do garfo.

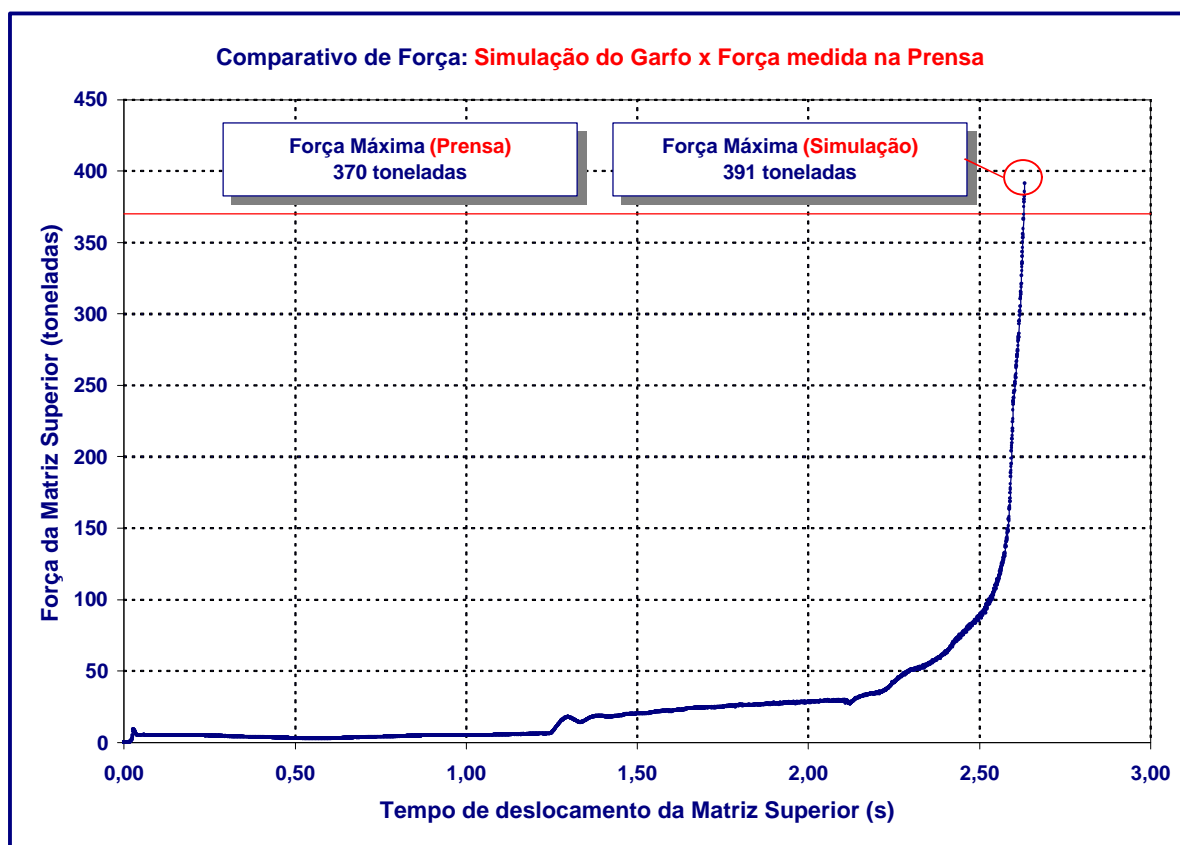


Figura 75 Comparativo de Força: Simulação x Medida na Prensa

6 CONCLUSÕES

A partir da proposta inicial de forjamento de componentes automotivos em liga de alumínio, resultado de um projeto cooperativo entre a UFRGS e a empresa Dana, buscou-se estudar e caracterizar as ligas de alumínio quanto às suas características físicas, químicas e propriedades mecânicas, principalmente para a liga ABNT 6061.

Em face da especificação da peça forjada "F3-28-409" exigir uma dureza de 85 HB, mediante um tratamento térmico de solubilização e envelhecimento artificial (T6), procurou-se estudar os tratamentos térmicos das ligas de alumínio e realizar experimentos com as peças forjadas, no sentido de obter as propriedades especificadas. Os resultados obtidos mostram que é possível obter durezas superiores a 85 HB, podendo-se atingir até 95 HB para a liga ABNT 6061.

A caracterização das ligas de alumínio quanto à sua deformação plástica em altas temperaturas (430 e 480 °C) e condição de atrito em face de dois lubrificantes comerciais foi realizada através de procedimentos experimentais e os seus resultados foram utilizados como parâmetros importantes da simulação computacional do forjamento.

Os resultados obtidos, comparando a simulação e o forjamento prático, permitem concluir que esta é uma poderosa ferramenta de desenvolvimento de processos de conformação, desde que os parâmetros fornecidos aos programas sejam precisos o mais próximo possível com a realidade do processo na fábrica.

O forjamento experimental de peças em liga de alumínio e os tratamentos térmicos realizados permitem concluir que o processo é viável tecnologicamente e que sua utilização vem a contribuir com a necessidade crescente do mercado por componentes de baixa densidade.

7 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

Adicionalmente às conclusões obtidas, em face da necessidade de mais conhecimento à respeito do forjamento de ligas de alumínio, sugere-se a continuidade deste trabalho, através dos seguintes temas:

- I) Avaliar experimentalmente a relação entre a força de forjamento do garfo com rebarba (ferramenta LdTM) e o forjamento sem rebarba (Dana) com base nos mesmos parâmetros de processo;
- II) Avaliar as otimizações de processo que podem ser realizadas nos programas de simulação computacional, verificando se ocorrem realmente na prática;
- III) Desenvolver processos de tratamento termo-mecânico, objetivando propor formas mais produtivas de conformação das ligas de alumínio, aproveitando a temperatura de forjamento para solubilizar imediatamente as peças e em seguida partir para o envelhecimento;
- IV) Fabricar um lote piloto, objetivando aprofundar a análise do componente a esforços de fadiga, procurando determinar o ciclo de trabalho até a ruptura;
- V) Desenvolver processos de conformação a frio de componentes em liga de alumínio, avaliando o comportamento das ferramentas frente a severidade do escoamento do alumínio no desgaste das mesmas;
- VI) Aplicar a simulação computacional na otimização de ferramentas, buscando aumentar a resistência ao desgaste, identificando pontos críticos de tensões antes da construção das mesmas.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABAL. **Números da Indústria Brasileira do Alumínio**. Brasil: ABAL, 2000. Disponível em: <<http://www.abal.org.br>>
- [2] MACMILLAN, D. W. **Building Partnerships for Process in the Automotive Industry**. In: Metal Bulletin Conference, 2000, Cologno, Germany. Disponível em: <<http://www.former.alcan.com>>
- [3] ALCAN. **How Aluminum is made**. USA: Alcan, 1999. Disponível em: <<http://www.former.alcan.com/markets.nsf/Topics-E/Making>>
- [4] HATCH, J.E. **Aluminum: Properties and Physical Metallurgy**. EUA: ASM, 1984
- [5] KOLOSOSKI, J., FILHO, F.A. **Curso de Metalografia do Alumínio e Suas Ligas**. São Bernardo do Campo: FEI, 1994.
- [6] ABNT. **Alumínio e suas Ligas: Classificação: NBR 6834**. Rio de Janeiro, 1981.
- [7] ASM. **Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials**, In: Metals Handbook – Vol. 2, USA: ASM, 1995
- [8] ASTM. **Standard Especification for Aluminum and Aluminum-Alloy Die Forgings, Hand Forgings and Rolled Ring Forgings [Metric]: B 247M - 90**. USA, 1990.
- [9] SCHULER, **Metal Forming Handbook**, Springer-Verlag, Heidelberg: 1998

- [10] SIEGERT, K.; et al. Recent Developments on High Precision Forging of Aluminum and Steel. **Journal of Materials Processing Technology** Elsevier, n° 71, p. 91-99, 1997
- [11] BAY, N. Cold Foming of Aluminum – State of the Art. **Journal of Materials Processing Technology** Elsevier, n° 71, p. 76-90, 1997
- [12] ASM. **Forging of Aluminum Alloys**, In: Forming and Forging. V.14 Metals Handbook, USA: ASM, 1973, p. 242.
- [13] JENSRUD, O., PEDERSEN, K. Cold Forming of high strength aluminum alloys and the development of new thermomechanical processing. **Journal of Materials Processing Technology Elsevier**, n° 80 -81, p. 156-160, 1998.
- [14] SHAN, D., et al. Study on isothermal precision forging technology for a cylindrical aluminium-alloy housing. **Journal of Materials Processing Technology**. Elsevier, n° 72, p. 403-406, 1997.
- [15] ASM. **Heat Treating of Aluminum Alloys**, In: Heat Treating. v.8 Metals Handbook, USA: ASM, 1991, p. 841-879.
- [16] ASTM. **Standard Practice for Heat Treatment of Aluminum Alloys: B 597 - 90**. USA, 1990.
- [17] LEE, et al. Effect of Pre-aging on Precipitation Hardenig in Al-Si-Mg Alloys. **Scandinavian Journal of Mettallurgy**. Munksgaard, n° 27, p. 112-115, 1998.

[18] QURESHI F. S., SHEIKH A. K., RASHID M. A Mathematical Model to Predict the Strength of Aluminum Alloys Subjected to Precipitation Hardening. **Journal of Materials Engineering and Performance** JMEPEG, nº 8, p. 353-360, 1999.

[19] DORWARD R. C., BOUVIER C. A Rationalization of Factors affecting Strength, Ductility and Toughness of AA 6061 Type Al-Mg-Si-(Cu) Alloys. **Materials Science and Engineering** Elsevier, nº A254, p. 33-44, 1998.

[20] SCHAEFFER, L.. **Conformação Mecânica**. Porto Alegre: Imprensa Livre, p. 38-41, 1999.

[21] SCHAEFFER, L.. **Conformação do Metais**. Porto Alegre: Ed. Rígel, p. 56-59, 1995.

[22] BRITO, A., PREDIGER, S.. Aspectos do Levantamento de Curvas de Escoamento. In:II Congresso Internacional de Forjamento/Brasil, 1998, Porto Alegre. **Anais**. Porto Alegre: LdTM – EEUFRGS, 1998, p. 189-210.

[23] ERC/NSM. **Determination of Flow Stress by Compression Test at Room Temperature (F-1)**. In: Interactive Educational Multimedia Modules in Net Shape Manufacturing. Columbus(OH): ERC/NSM, 2001. Disponível em: <<http://nsmwww.eng.ohio-state.edu/FlowStressModule>>.

[24] ASM. **Workability Tests**, In: Forming and Forging. V.14 Metals Handbook, USA: ASM, 1989, p. 375-376.

[25] HENSEL, A., SPITTEL, T.. **Kraft-und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren**, Leipzig: VEB Deustscher Verlag, 1978.

[26] NCEMT. **Atlas of Formability**. USA: NCEMT, 2000. Disponível em: <<http://www.ncemt.ctc.com/ekb/index.html>>

- [27] RIBEIRO, J. D. ; **Avaliação do Atrito no Forjamento**. Porto Alegre: UFRGS, 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola de Engenharia – PPGEMM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1993.
- [28] ALTAN, T. et al. **Metal Forming – Fundamentals and Applications**, USA: Carnes Publications Services, Inc., p. 85-90, 1983.
- [29] AVITZUR, B.M. **Metal Forming: Process and analysis**, USA: McGraw Hill Book Company, 1968.
- [30] MARCON, A.F., BITTENCOURT, E., CREUS, G.J. Simple test determination of friction coefficient and stress-strain curve for application in metal forming analyses. In: **Experimental Mechanichs**, 2000
- [31] KOPP, R., WIEGELS, H. **Einführung in Die Umformtechnik**, Verlag der Angustinus Buchhadlung, 1998.
- [32] SCHAEFFER, L. **Introdução à Conformação Mecânica dos Metais**, Porto Alegre: Editora da Universidade, p. 57-62, 1983.
- [33] MIELNIK, E. M.. **Metalworking Science and Engineering**, USA: McGraw-Hill, 1991.
- [34] TALBERT, S. H.; AVITZUR, B.. **Elementary Mechanics of Plastic Flow in Metal Forming**, USA: John Wiley & Sons, 1996.
- [35] KOBAYASHI, S.; OH, S.; ALTAN T. **Metal Forming and The Finite-Element Method**, New York: Oxford University Press, 1989.
- [36] TSCHÄTSCH, H. **Praxiswissen Umformtechnik**, Deutch: Vieweg, 1997.

[37] ALMEIDA, F.J. O Projetista pode tirar mais proveito do Método de Elementos Finitos. In **Máquinas em Metais**, Brasil: Ed. Aranda, 2000.

[38] KOLLER, L., SCHAEFFER, L.. Características de três diferentes programas de simulação numérica do forjamento. In: IV Conferência Internacional de Forjamento/Brasil, 2000, Porto Alegre. **Anais**. Porto Alegre: LdTM – EEUFRGS, 2000.

[39] SINCZAK, J. et al. Prediction of mechanical properties of heavy forgings. **Journal of Materials Processing Technology** Elsevier, nº 80-81, p. 166-173, 1998.


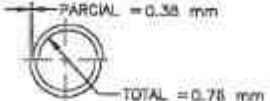
[40] SNAPE, R., CLIFT, S., BRAMLEY, A.. Sensitivity of finite element analysis of forging to input parameters. **Journal of Materials Processing Technology** Elsevier, nº 82, p. 21-26, 1998.

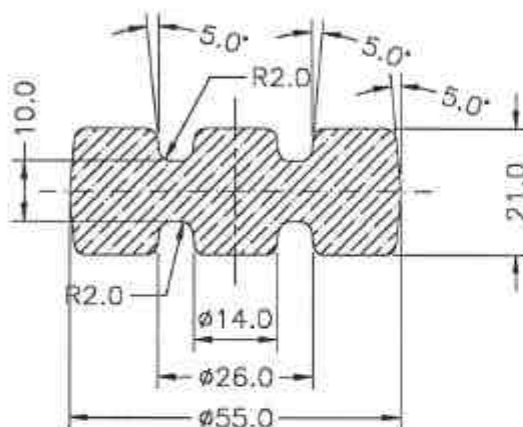
[41] GEIGER M., FALK, B., ENGEL, U.. Prediction of service life of cold forging tools failuring by fatigue. **Production Engineering** Institute for Manufacturing Science, vol. VI/2, p. 83-88, 1999.

[42] ERC-NSM. **What is ForgePAL?**. USA: ERC-NSM, 2001. Disponível em: <<http://nsmwww.eng.ohio-state.edu/forgepal>>

9 Anexos

ANEXO 1

ESPECIFICAÇÕES DE FORJADO	
ÂNGULO DE SAÍDA	RAIOS NÃO-COTADOS
5°	R3.0
	Todas as dimensões tomadas no ponto de intersecção
DESENCONTRO ENTRE CUNHOS	
	

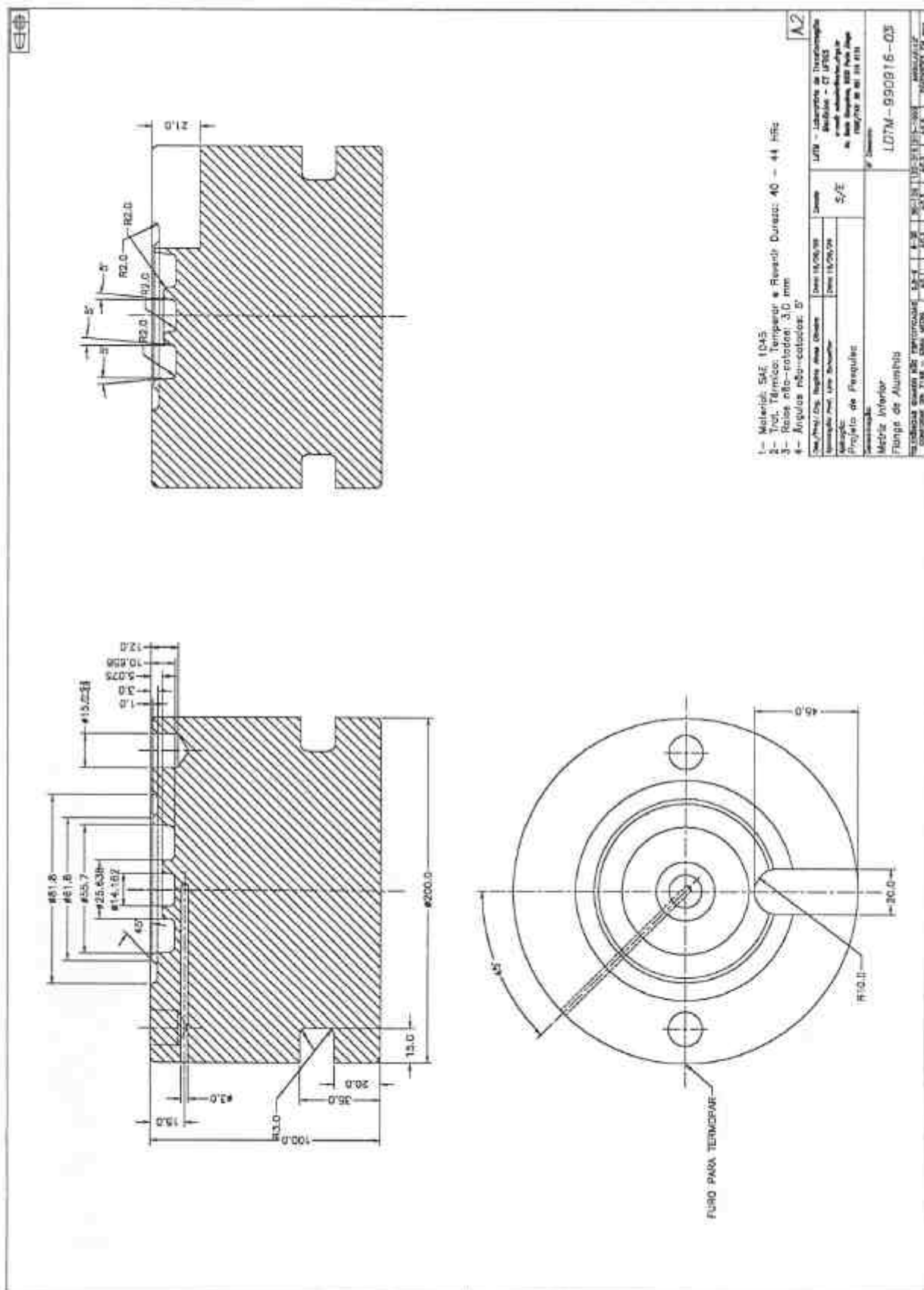


- 1- Material: Alumínio AA 6061
- 2- Trat. Térmico: Solubilizado e Envelhecido Dureza: 85 HB
- 3- Rebarba: Esp. Máx.= 2.0 mm, larg. Máx.= 3.0 mm
- 4- Raios não-cotados: 3.0 mm
- 5- Ângulos não-cotados: 5°

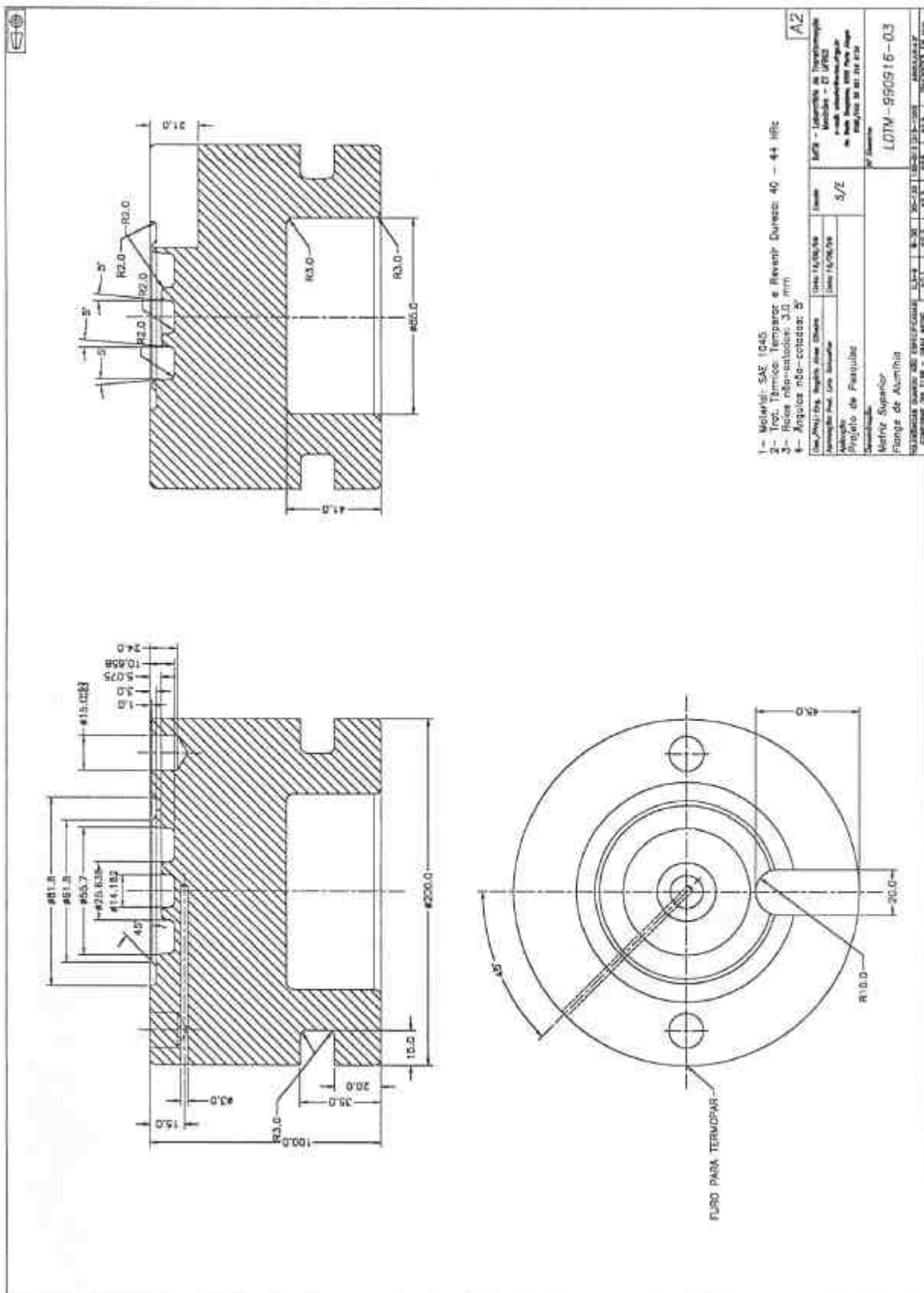
A4

Des./Proj.: Eng. Rogério Alves Oliveira	Data: 16/09/99	Escala 1:1	LdTM - Laboratório de Transformação Mecânica - CT UFRGS e-mail: schaefer@vortex.ufrgs.br Av. Bento Gonçalves, 9500 Porto Alegre FONE/FAX: 55 051 316 6134			
Aprovação: Prof. Lirio Schaeffer	Data: 16/09/99					
Aplicação: Projetos de Pesquisa						
Denominação: Peça Forjada em Alumínio		N° Desenho LDTM-990916-00				
TOLERÂNCIAS QUANDO NÃO ESPECIFICADAS CONFORME DIN 7168 - GRAU MEDIO	0,5-6 ±0,1	6-30 ±0,2	30-120 ±0,3	120-315 ±0,5	315-1000 ±0,8	ANGULAR: ±2° DIMENSÕES EM mm

ANEXO 2

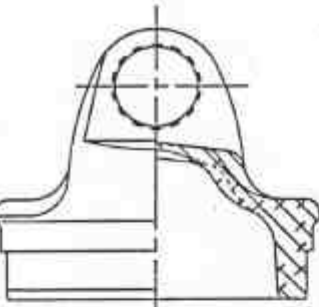


ANEXO 3



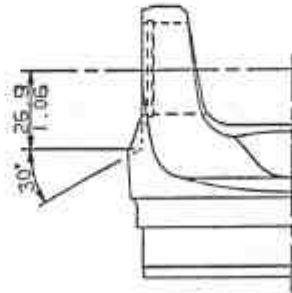
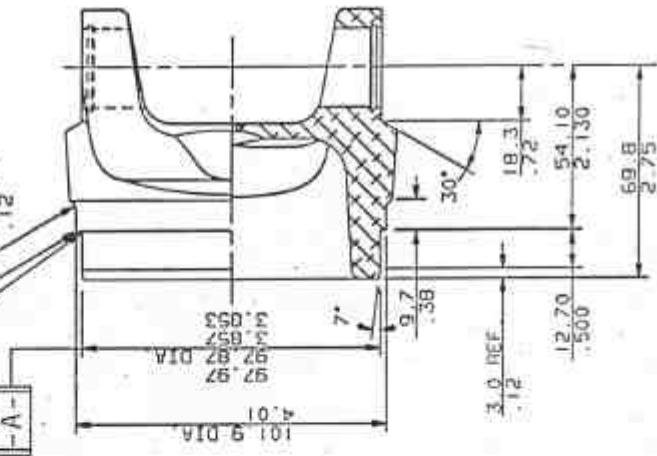
ANEXO 5

REV.	DATE	BY	CHKD.

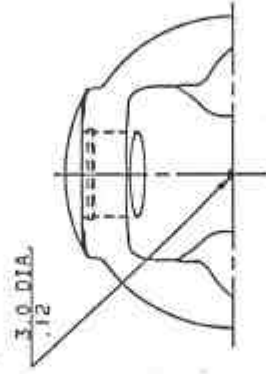


3
0.51 R
.020 MAX.

-A-
3.0 R
.12



OPTIONAL VIEW



RECEBIDO
0 2 SET 1993
ENQ. PRODUITO
Divisão de Justiça Multicelular

NOTE: MILLIMETERS
INCHES

MAKE THE FOLLOWING SPECIFICATIONS: <input type="checkbox"/> ALUMINUM <input type="checkbox"/> BRASS <input type="checkbox"/> COPPER <input type="checkbox"/> INCONEL <input type="checkbox"/> MONEL <input type="checkbox"/> NICKEL <input type="checkbox"/> STEEL <input type="checkbox"/> TITANIUM FINISH: <input type="checkbox"/> POLISHED <input type="checkbox"/> ANNEAL <input type="checkbox"/> BURNISHED <input type="checkbox"/> MACHINED TOLERANCES: <input type="checkbox"/> UNLESS OTHERWISE SPECIFIED <input type="checkbox"/> UNLESS OTHERWISE SPECIFIED SURFACE: <input type="checkbox"/> UNLESS OTHERWISE SPECIFIED <input type="checkbox"/> UNLESS OTHERWISE SPECIFIED THREADS: <input type="checkbox"/> UNLESS OTHERWISE SPECIFIED <input type="checkbox"/> UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS: <input type="checkbox"/> UNLESS OTHERWISE SPECIFIED <input type="checkbox"/> UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	PART NO. F3-28-109 MATERIAL ALUM. 6061-T6 QUANTITY 4.00 DATE 7-15-92 DESIGNED BY F10/H03 CHECKED BY H01/H03	TUBE YOKES 101.5 DIA X 2.11 4.00 0.083 1330 7-15-92 2-28-3317
--	--	---

SUPERSEDES SKU-1220550

ANEXO 6

FROM: ACHESON DO BRASIL LTDA PHONE NO.: 0511-4925433 May. 05 1999 11:16AM PS

PARA: SR. Rogério Alves - UFRGS FAX 306.6134
De: Luis R. Wallau

9635093

acheson
a National Search & Chemical Company

Phone: (011) 7822-4000
Fax: (011) 492-5433

ACHESON DO BRASIL LTDA.
Cotia, São Paulo, Brazil
5 de maio de 1999

PAGES: 1
FAX TO: J. A. WALLAU JR. & CIA. LTDA.
ATTN.: LUÍS R. WALLAU
FROM: H.E. STRASSER
SUBJECT: Indicação de produto para forjamento de peças de alumínio UFRGS
REF.: Seu Fax nº 1207/99 de 04.05.99
COPY: J. DYLEWSKI

Em São Paulo temos clientes forjando alumínio com Dellaforge 31 (31 H) e outros usam Dag 3. Temos um também que prefere usar Oildag. O denominador comum aos três produtos é o processo de aplicação que é por pulverização.

Acho melhor recomendarmos Dag 3 para a Universidade Federal do Rio Grande do Sul mas existem alguns pontos que são importantes frisar:

- Como já falei, obrigatoriamente aplicação por pulverização. Na Universidade, a nível experimental, recomendo aplicar o produto diluído (1:10 ↔ 1:20) de tal forma que possa ser aplicado com pistola de pintura, estas de caneca, por exemplo da DeVilbiss. Aplicar só até formar a camada de grafite e não deixar escorrer.
- Para a melhor formação de camada no início do forjamento seria interessante que a superfície de trabalho da matriz estivesse no mínimo a 80°C, ou seja, pré-aquecida, para garantir que toda a água se evapore depois da aplicação. Quanto mais fina a pulverização menor pode ser a temperatura inicial.
- É importante verificar antes de cada forjamento se há uma camada de grafite totalmente seca sobre a superfície de trabalho da matriz.
- Aplicando o produto adequadamente através da pistola de pintura deverá haver total evaporação da água e a formação de uma camada preta e fosca de grafite de aproximadamente 20 µm de espessura, totalmente suficiente para um excelente molde e proteção contra o desgaste da matriz até 1.200°C de temperatura da peça. Não há necessidade de se tentar engrossar a camada mesmo para temperaturas maiores. É jogar produto e tempo fora e poderia causar acúmulos de grafite na matriz.
- Se houver necessidade de refrigerar mais a matriz, aumentar a diluição e aumentar o tempo de aplicação, ou seja, aplicar durante mais tempo. Só há retirada de calor enquanto houver desprendimento de vapor.

Atenciosamente
HE Strasser

ANEXO 7

Especificação da Máquina de Ensaios "Schenck"



- Máquina Servo-hidráulica de ensaios modelo PC-400 com capacidade máxima de 400 kN e velocidade máxima de punção de 500 mm/s.
- Forno Elétrico Resistivo acoplado aos punções com temperatura máxima de 1200 °C e controle de temperatura tiristorizado com precisão de ± 1 °C em toda a faixa;
- Computador Pentium 133 Mhz e 32 MB de RAM com Software de Controle DIADEM 3.0 e Programa de Controle desenvolvido no LdTM em Visual Basic.