

FERNANDO MATUDA

**DETERMINAÇÃO DO FATOR DE ATRITO DE LIGAS DE ALUMÍNIO
CONFORMADAS A TEMPERATURA AMBIENTE E A QUENTE**

Monografia apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção da
conclusão do curso de Engenharia.

São Paulo

2006

FERNANDO MATUDA

**DETERMINAÇÃO DO FATOR DE ATRITO DE LIGAS DE ALUMÍNIO
CONFORMADAS A TEMPERATURA AMBIENTE E A QUENTE**

Monografia apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção da
conclusão do curso de Engenharia.

Área de concentração:
ENGENHARIA METALÚRGICA

Orientador:
Prof. Dr. Ronald Lesley Plaut

São Paulo

2004 5

DEDICATÓRIA

A toda minha família, em especial aos meus pais e aos meus avós pelo apoio e compreensão dedicados durante todos esses anos, cuja força foi essencial para minha formação.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ronald Lesley Plaut pela orientação, dedicação e paciência no desenvolver deste trabalho.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da USP, em especial ao Rubens pelo auxílio nos ensaios experimentais e ao Cláudio pela preparação de amostras.

À Clarice do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise (Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da USP), pelo suporte e paciência nas análises das amostras.

Ao Luiz Carlos (IPEN) pela ajuda e disponibilidade com o equipamento de ataque eletrolítico.

Ao grupo de trabalho “COSMOS”, Alexandre, Douglas, Érica, Fábio, Gustavo e Juliana, pela amizade e cooperação no desenvolver do trabalho.

RESUMO

O atrito no contato matriz / peça em processos de conformação de materiais metálicos influe diretamente na força requerida. Parâmetros como taxa de deformação, temperatura e lubrificação devem ser estudadas em conjunto, verificando os fenômenos que ocorrem durante o processo de deformação do material. No presente trabalho objetiva-se analisar o método de determinação do fator de atrito da interface matriz / peça empregando o ensaio de compressão do anel. O fator de atrito é obtido através de curvas de calibração. Analisa-se em particular a liga AA6351-T4 para as condições sem lubrificação e com lubrificação para diferentes graus de redução e temperatura. Nos programas de elementos finitos Qform2D/3D e COSMOS^{MT} foram realizadas simulações do teste do anel para as ligas AA2024 e AA6114-T4. Comparou-se o resultado experimental com o resultado obtido através do *software* COSMOSTM verificando validação do modelo na condição ideal de atrito e temperatura ambiente. Analisou-se também o ensaio de compressão do anel a quente, estudando os fenômenos que ocorrem durante a deformação em temperaturas elevadas.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	I
AGRADECIMENTOS	II
RESUMO	III
SUMÁRIO	IV
LISTA DE TABELAS	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIV
1. INTRODUÇÃO	01
2. MOTIVAÇÃO	03
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
3.1. Lubrificação	04
3.2. Definição de coeficiente de atrito e fator de atrito	05
3.3. Ensaio de compressão do anel	07
3.4. Curvas de calibração	10
3.4.1. Efeito geométrico	10
3.4.2. Variabilidade de autores	11
3.4.3. Variabilidade de materiais	12
3.5. Curva tensão-deformação de ligas de alumínio	12
3.6. Deformação de ligas de alumínio em altas temperaturas	14
3.7. Texturas cristalográficas	16
4. OBJETIVOS	17
5. MATERIAIS E MÉTODOS	18
5.1. Ensaio experimental	18
5.1.1. Ensaio experimental	18
5.1.2. Equipamentos	19
5.1.3. Procedimento	20
5.1.3.1. Ensaio à temperatura ambiente	20
5.1.3.2. Ensaio à temperatura de 250°C e 350°C	21

5.2. Simulação no QFORM2D/3D	24
5.2.1. Comparação de dados de entrada	26
5.3. Simulação no COSMOSM™ GeoStar	28
6. RESULTADOS	31
6.1. Experimental	31
6.1.1. Temperatura ambiente – Condição de lubrificação: Seco	31
6.1.2. Temperatura ambiente – Condição de lubrificação: TEFLON	32
6.1.3. Temperatura 250°C e 350°C – Condição de lubrificação: Seco	33
6.1.4. Curva Força (kN) x Redução (%).....	35
6.1.5. Taxa de deformação	38
6.1.6. Aproximação à temperatura ambiente	42
6.1.7. Determinação do fator de atrito	42
6.1.8. Microestrutura do anel não deformado	44
6.2. Simulação QFORM2D/3D	47
6.2.1. Evolução do diâmetro interno	48
6.2.2. Fluxo do material	49
6.2.3. Linha de fluxo	49
6.2.4. Malha de elementos finitos	50
6.2.5. Distribuição de tensões	50
6.2.6. Tensão média	51
6.2.7. Temperatura	52
6.2.8. Taxa de deformação efetiva	53
6.3. Simulação COSMOSM™ GeoStar	55
6.3.1. Simulação para liga AA2024	55
6.3.2. Simulação para liga AA6111-T4	56
6.3.3. Curva de calibração COSMOS para condição ideal	58
7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	60
7.1. Relação entre força e fator de atrito	60
7.2. Fator de atrito x Taxa de deformação verdadeira	61
7.3. Comparação de resultados: QForm2D/3D e COSMOSM™	62
7.4. Comparação de resultados: Experimental e COSMOSM™	63

8. CONCLUSÃO	65
9. CONTINUIDADE DO TRABALHO	66
ANEXO A - LIGAS DE ALUMÍNIO	67
ANEXO B - MÉTODO DE ENSAIO E EXECUÇÃO DA MÁQUINA DE ENSAIO EMIC.....	71
ANEXO C - MÉTODO QFORM2D/3D	77
ANEXO D - RESULTADO EXPERIMENTAL.....	83
ANEXO E - DADOS DE ENTRADA NO COSMOSMTM.....	87
ANEXO F - RESULTADOS QFORM2D/3D	88
LISTA DE REFERÊNCIAS	92

LISTA DE TABELAS**5 – MATERIAIS E MÉTODOS**

Tabela 5.1.	18
Tabela 5.2.	20
Tabela 5.3.	26
Tabela 5.4.	26

6 - RESULTADOS

Tabela 6.1.	38
Tabela 6.2.1.	39
Tabela 6.2.2.	40
Tabela 6.3.	43
Tabela 6.4.	54

8 – CONCLUSÃO

Tabela 8.1.	65
------------------	----

ANEXO A - LIGAS DE ALUMÍNIO

Tabela A1.	67
Tabela A2.	69
Tabela A3.	69

ANEXO D - RESULTADO EXPERIMENTAL

Tabela D1.	82
-----------------	----

LISTA DE FIGURAS

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Figura 3.1 – Lei de Coulomb	05
Figura 3.2 – Tensões principais e equivalente	06
Figura 3.3 – Estado plano de tensão: Círculo de Mohr e valores de tensões principais	06
Figura 3.4 - Critério de Von Mises	07
Figura 3.5 - Evolução do anel no ensaio de compressão	08
Figura 3.6 - Parâmetros utilizados na determinação do fator de atrito	08
Figura 3.7 - Geometria do anel	10
Figura 3.8 - Efeito geométrico na determinação do fator de atrito	11
Figura 3.9 - Variabilidade de autores (curva de calibração 6:3:2 – AA1100)	11
Figura 3.10 - Variabilidade de materiais (curva de calibração 6:3:2 – HASAN) ⁽¹⁾ ...	12
Figura 3.11 - Curvas $\sigma \times \epsilon$ para ligas de alumínio (T_{amb}).....	13
Figura 3.12 - Curva $\sigma \times \epsilon$ para altas temperaturas (Suzuki) ⁽⁶⁾	14

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Figura 5.1 – Matéria-prima do corpo de prova	18
Figura 5.2 – Liga AA6351-T4.....	18
Figura 5.3 - Usinagem do material bruto	19
Figura 5.4 – Anel 6:3:1 (AA6351-T4).....	19
Figura 5.5 - Máquina de Ensaio EMIC e forno BRASIMET	20
Figura 5.6 - Fita TEFLON	20
Figura 5.7 - Conjunto de matrizes para ensaio a quente	22
Figura 5.8 - Aquecimento do ferramental	23
Figura 5.9 – Pré-aquecimento do CP	23
Figura 5.10 – Transferir para o ensaio	23
Figura 5.11 - Execução do ensaio	24
Figura 5.12 – Separação do anel deformado	24

Figura 5.13- Layout da tela de abertura do programa QForm	25
Figura 5.14- Curvas σ x ϵ para AA2024 – 250°C.....	27
Figura 5.15- Curvas σ x ϵ para AA2024 – 350°C.....	27
Figura 5.16- Curvas σ x ϵ para AA2024 – 450°C.....	27
Figura 5.17- Curvas σ x ϵ para AA2024 – 500°C.....	28
Figura 5.18 - Desenho inicial de $\frac{1}{4}$ do anel.....	30

6. RESULTADOS

Figura 6.1 - Anéis deformados – Sem lubrificação (T_{amb}).....	32
Figura 6.2 - Variação dos diâmetros internos e externos com aumento da redução (Seco).....	32
Figura 6.3 - Anéis deformados – Lubrificante: TEFLON (T_{amb})	33
Figura 6.4 - Variação dos diâmetros internos e externos com aumento da redução (TEFLON).....	33
Figura 6.5 - Anéis deformados – Sem lubrificação (250°C).....	34
Figura 6.6 - Anéis deformados – Sem lubrificação (250°C e 350°C).....	35
Figura 6.7 - Curva F (kN) x R_h (%) – Seco (T_{amb}).....	36
Figura 6.8 - Curva F (kN) x R_h (%) – TEFLON (T_{amb})	36
Figura 6.9 - Curva F (kN) x R_h (%) – Seco (250°C).....	37
Figura 6.10 - Curva F (kN) x R_h (%) – Seco (350°C).....	37
Figura 6.11 - Curva Deformação x tempo (s) – Seco (T_{amb}).....	40
Figura 6.12 - Curva Deformação x tempo (s) – TEFLON (T_{amb}).....	41
Figura 6.13 - Curva Deformação x tempo (s) – Seco (250°C).....	41
Figura 6.14 - Curva Deformação x tempo (s) – Seco (350°C).....	41
Figura 6.15 – Gráfico de aproximação da força experimental à condição ideal	42
Figura 6.16 - Determinação do fator de atrito.....	43
Figura 6.17 - Aparelho de ataque eletrolítico e amostras.....	45
Figura 6.18 - IQ – Índice de Qualidade (Anel não deformado)	45
Figura 6.19 - ODF para liga AA6351-T4 – Anel não deformado	46
Figura 6.20 - OIM para liga AA6351-T4 – Anel não deformado	46
Figura 6.21 - Dimensão inicial do anel	48

Figura 6.22 - Dimensão final do anel.....	48
Figura 6.23 - Fluxo do material (Ideal)	49
Figura 6.24 - Fluxo do material ($\mu = 0.6$).....	49
Figura 6.25 - Linhas de fluxo (Ideal)	49
Figura 6.26 - Linhas de fluxo ($\mu = 0.6$)	49
Figura 6.27 - Malha de elementos finitos (Ideal)	50
Figura 6.28 - Malha de elementos finitos ($\mu = 0.6$)	50
Figura 6.29 - Distribuição de tensões (Ideal)	50
Figura 6.30 - Distribuição de tensões ($\mu = 0.6$).....	51
Figura 6.31 - Tensões médias (Ideal)	51
Figura 6.32 - Tensões médias ($\mu = 0.6$)	52
Figura 6.33 - Temperatura (Ideal)	52
Figura 6.34 - Temperatura ($\mu = 0.6$)	53
Figura 6.35 - Taxa de deformação efetiva (Ideal)	53
Figura 6.36 - Taxa de deformação efetiva ($\mu = 0.6$)	54
Figura 6.37 - Extrapolação da força QForm para T_{amb}	55
Figura 6.38 - Resultado da força COSMOS para a liga AA2024.....	56
Figura 6.39 - Resultado da força COSMOS para a liga AA6111-T4.....	57
Figura 6.40 – Curva de calibração COSMOS – Ideal (T_{amb})	57
Figura 6.41 - Distribuição de força na superfície de contato anel – matriz	58

7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Figura 7.1 - Gráfico da força experimental em função do fator de atrito	60
Figura 7.2 - Fator de atrito x Taxa de deformação verdadeira	61
Figura 7.3 - Comparação da força QForm e COSMOS (T_{amb} – AA2024).....	62
Figura 7.4 - Gráfico da força QForm e COSMOS (T_{amb} – AA2024)	63
Figura 7.5 - Comparação da força COSMOS e experimental (T_{amb} – AA6111-T4 e AA6351-T4)	64
Figura 7.6 – Gráfico da força COSMOS e experimental (T_{amb} – AA6111-T4 e AA6351-T4).....	64

ANEXO B - MÉTODO DE ENSAIO E EXECUÇÃO DA MÁQUINA EMIC

Figura B1 - Salvar método Tesc	72
Figura B2 Montar método de Ensaio de Compressão	73
Figura B3 - Entrada de dados	73
Figura B4 - Resultado desejado (força máxima)	74
Figura B5 - Parâmetro de parada da máquina (limite da força máxima)	75
Figura B6 - Método Transdutores (ensaio de compressão)	75
Figura B7 - Escala e unidade do gráfico força x deslocamento	76
Figura B8 - Relatório de Ensaio e Indicador Digital do Ensaio	76

ANEXO C - MÉTODO QFORM2D/3D

Figura C1 - Layout do QDraft – Anel 6:3:1 (6 mm de espessura)	77
Figura C2 - Layout do Qform – Tela de trabalho	78
Figura C3 - Prensa hidráulica	78
Figura C4 - Escolha de prensa hidráulica, corpo axissimétrico e problema térmico ..	79
Figura C5 - Selecionando desenho do Qdraft e operações intermediárias	79
Figura C6 - Características do equipamento e parâmetro de parada da máquina	80
Figura C7 - Liga de trabalho: AA2024 (QForm)	81

ANEXO E - DADOS DE ENTRADA NO COSMOSM™

Figura E1 - Geometria de 1/4 do anel	84
Figura E2 - Criando gráfico através da seleção de nós	86
Figura E3 - Número de nós e elementos para a análise	87

ANEXO F - RESULTADOS QFORM2D/3D

Figura F1 - Resultado na forma gráfica	88
Figura F2 - Ferramenta de medição das dimensões finais do corpo de prova	88

Figura F3 - Medida dos diâmetro do anel após simulação para condição ideal (350°C)	89
Figura F4 - Ferramenta “Value in Point”	89
Figura F5 - Força x deslocamento (Ideal)	90
Figura F6 - Força x deslocamento ($\mu = 0.3$).....	90
Figura F7 - Força x deslocamento ($\mu = 0.6$).....	90
Figura F8 - Trabalho x deslocamento (Ideal)	91
Figura F9 - Trabalho x deslocamento ($\mu = 0.3$).....	91
Figura F10 - Trabalho x deslocamento ($\mu = 0.6$).....	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

FEM – *Finite Element Method*

D – diâmetro externo

d – diâmetro interno

D_o – diâmetro externo inicial

d_o – diâmetro interno inicial

D_f – diâmetro externo final

d_f – diâmetro interno final

F – Força

h_o – altura inicial

h_f – altura final

kN - kilo-Newton

kgf – Kilograma-força

ln – Logaritmo neperiano

l – comprimento final do corpo de prova

l_o – comprimento inicial do corpo de prova

R_h – redução da altura

R_i – redução do diâmetro interno

R_e – raio externo

r_i – raio interno

2D – Duas dimensões

3D – Três dimensões

T_{amb} – Temperatura ambiente

LISTA DE SÍMBOLOS

σ – Tensão

σ_n – Tensão normal

τ – Tensão de cisalhamento

ϵ - Deformação

μ – Coeficiente de atrito

m – Fator de atrito

π - Constante pi

1. INTRODUÇÃO

O atrito na interface matriz / peça é uma importante variável que afeta diretamente o fluxo do material, a qualidade da superfície, defeitos internos, tensões aplicadas nas matrizes e força requerida em processos de conformação de metais. ⁽¹⁾

Para o controle efetivo do atrito, variáveis como velocidade de deformação, tipo do material, temperatura e lubrificação devem ser estudados em conjunto. ⁽¹⁾

A análise quantitativa da condição de atrito no contato da peça com a matriz se baseia na lei de Coulumb ⁽⁴⁾. Este método será adotado neste trabalho para a análise de elementos finitos. Para se medir o fator de atrito o método a ser utilizado será o ensaio de compressão do anel.

Quando um anel é recalcado na direção axial há, em resultado, uma mudança da forma dependente das condições de atrito entre o anel e a matriz. Se o atrito for nulo, o anel se deformará na direção radial apenas no sentido crescente do raio com uma taxa proporcional à distância do centro. Se as condições forem pequenas o diâmetro externo do anel será menor do que na condição de atrito zero. Aumentando-se ainda mais as condições de atrito o fluxo de material passa a ser também no sentido decrescente do raio. Ou seja, quando as condições de atrito são baixas o anel aumenta o diâmetro interno, e quando as condições de atrito são altas o diâmetro interno diminui. ⁽¹⁰⁾

Entre as vantagens do ensaio de compressão do anel estão: ⁽⁴⁾

- Para se determinar o coeficiente de atrito não é preciso ter conhecimento da força e da deformação;
- O teste é fácil de ser executado, sendo aplicável a várias taxas de deformação e temperatura.

Por outro lado:

- Devido à anisotropia do material, gerado por processos anteriores, o anel não deforma homogeneamente (forma oval) Neste caso, é medido um valor médio do diâmetro interno.
- Não há um modelo teórico capaz de determinar com eficiência o coeficiente de atrito.

Plotando a variação do diâmetro interno em função da redução da altura para vários passes e diversas condições de atrito na interface, obtemos a chamada curva de calibração. Os métodos numéricos para levantamento da curva de calibração apresentam resultados mais próximos à condição real.⁽⁷⁾

Neste presente trabalho, o ensaio de compressão do anel será simulado em softwares de elementos finitos e serão comparados com os resultados experimentais.

2. MOTIVAÇÃO

A importância de se desenvolver trabalhos relacionados ao atrito na interface de contato matriz/peça se resume em:

- O estudo do atrito na interface de contato matriz/peça para elevadas temperaturas ainda não está resolvido.
- O atrito superficial de contato altera o fluxo do material, a distribuição de tensão, força e energia de conformação requerida.
- O conhecimento das condições de atrito tem aplicação industrial na fabricação e uso de lubrificantes (estampagem).
- Desenvolvimento de pesquisas nas áreas: conformação de metais, tribologia e ciência dos materiais.
- A necessidade de obter produtos melhores com custos menores, juntamente com a evolução da informática (software de simulação por FEM), tem tornado cada vez mais atrativo a modelagem dos processos de conformação plástica.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Lubrificação

As condições de lubrificação podem ser classificadas em: ⁽¹⁾

- Condição a seco: sem lubrificação, existindo apenas uma camada de óxido na interface matriz-peça. Nessa condição o atrito é alto e aplicável em processos como laminação a quente de tiras, chapas e extrusão de alumínio.
- Condição hidrodinâmico: regido pela viscosidade do lubrificante e pela velocidade relativa entre matriz e peça. Nesse caso existe uma fina camada de lubrificante na interface. Sendo que para temperaturas maiores a viscosidade diminui (maioria dos casos), conseqüentemente em operações práticas com alta velocidade de conformação a condição hidrodinâmico só existirá dentro de um regime de velocidades, na qual a temperatura na interface é relativamente baixa.
- Lubrificação “limite” (boundary): situação mais encontrada na prática em processos de conformação de metais. Aumento da temperatura na interface e alta pressão não permitem a presença do regime hidrodinâmico de lubrificação. As análises com informações da prática não são confiáveis e conseqüentemente a maioria do conhecimento baseado na lubrificação de processos de conformação são empíricos, havendo poucas bases de análise.

Os principais motivos para aplicação de lubrificantes em processos de conformação de metais são: ⁽¹⁾

- Reduzir a fricção entre matriz e peça.
- Evitar desgaste, erosão e depósito do material na matriz (marcas).
- Isolante térmico, principalmente em processos a quente a camada de lubrificação age como isolante diminuindo a perda de calor para o meio externo.
- Diminui reações que eventualmente podem ocorrer entre matriz e peça.
- Diminuir contaminantes, inclusões e formação de gases durante processo.
- Fácil aplicação e remoção da matriz e peça.
- Tem custo relativamente barato.

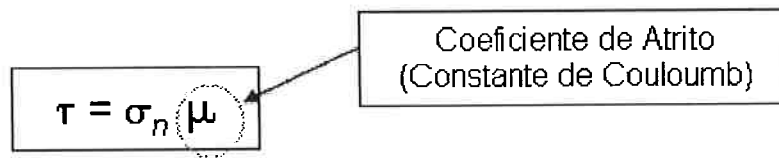
- Diminui a força requerida, isto é, menor energia necessária e tensões na estrutura da máquina.

3.2. Definição de coeficiente de atrito e fator de atrito

Para avaliarmos quantitativamente a condição de atrito na superfície de contato matriz/peça utilizamos a definição de coeficiente de atrito (μ) definido pela lei de Coulomb : ⁽⁴⁾

$$F_F = \mu F_N \quad \text{ou} \quad \tau_F = \mu \sigma_N$$

$\tau = \sigma_n \mu$



Coeficiente de Atrito
(Constante de Coulomb)

(Lei de Coulomb)

Figura 3.1 – Lei de Coulomb

Na figura 3.1, a força F_F (força de cisalhamento) é proporcional à força F_N (força normal) e a tensão τ_F (tensão de cisalhamento) é proporcional à tensão σ_N (tensão normal).

Um ponto qualquer de um corpo está geralmente submetido a um estado triaxial. É possível encontrar um sistema de eixos relativamente ao qual todas as componentes tangenciais do tensor das tensões se anulam, sendo, nestas circunstâncias, as componentes normais designadas por tensões principais σ_1 , σ_2 , σ_3 . Afim de comparar o nível de tensão instalado num ponto de um corpo com o limite de resistência que é determinado por ensaios laboratoriais em provetes que estão sujeitos a um estado de tensão uniaxial, consideramos um estado de tensão uniaxial equivalente (σ_{eq}) ao estado triaxial e análise, $\sigma_{eq} = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$. Esse estado de tensão uniaxial equivalente pode então ser comparado diretamente com o estado de tensão existente em qualquer ponto do provete do ensaio de tração. ⁽⁴⁾

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

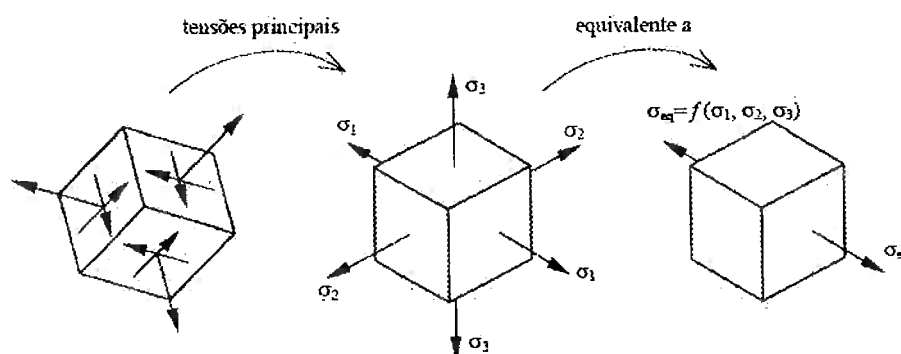


Figura 3.2 – Tensões principais e equivalente

Para materiais dúcteis adota-se o critério de Von Mises com o estado de tensão plano representado na figura 3.3: ⁽⁴⁾

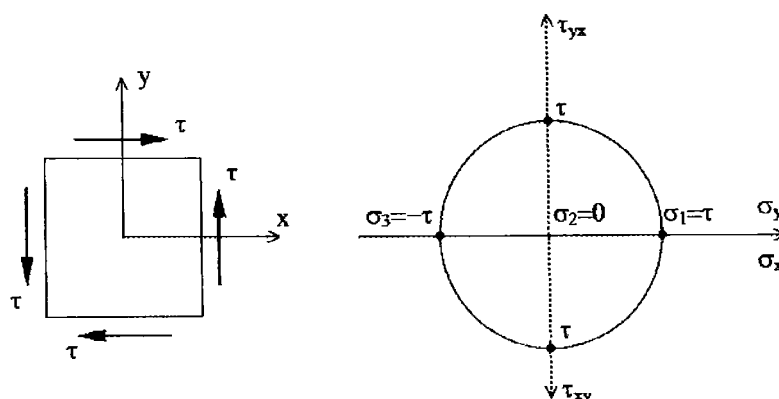


Figura 3.3 – Estado plano de tensão: círculo de Mohr e valores de tensões principais

Desse modo a tensão equivalente vale: ⁽⁴⁾

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\tau^2 + \tau^2 + (2\tau)^2} = \sqrt{3} \tau \quad \text{Eq. A}$$

No caso da análise envolvendo atrito na superfície, teremos : ⁽⁴⁾

$$\tau \text{ (tensão de cisalhamento)} = m \cdot \tau_{max} \quad \text{Eq. B}$$

Onde τ_{max} é a tensão de cisalhamento limite determinada pela fórmula de tensão equivalente de Von Mises e m é a constante chamada fator de atrito. Este fator é introduzido em função da força de cisalhamento atuante na superfície de contato. Para o caso da tensão máxima de cisalhamento (τ_{max}), a tensão equivalente (σ_{eq}) pode ser chamada de tensão de escoamento. ⁽⁴⁾

Portanto pelas equações A e B, com a hipótese de que o material obedece ao critério de Von Mises: ⁽⁴⁾

$$\tau = m \frac{\sigma}{\sqrt{3}}$$

(Critério de Von Mises)

Fator de Atrito ou Fator de Cisalhamento

$$0 \leq m \leq 1$$

Figura 3.4 – Critério de Von Mises

Na análise do fator de atrito pelo teste do anel consideramos as tensões de cisalhamento e tensão de escoamento do material como constantes. Esta hipótese não pode ser aplicada para o ensaio a quente. A discussão será feita no próximo item.

3.3. Ensaio de Compressão do Anel

O conhecido teste de compressão do anel, descrito a seguir, é um método simples para medir o coeficiente de atrito (ou fator de atrito) entre a face do anel a ser deformado plasticamente e a matriz de contato. ⁽¹⁸⁾

Quando um anel – que possui um diâmetro externo D_o , um diâmetro interno d_o e uma altura h_o – é comprimido por um par de matrizes planas, o diâmetro interno d_o , após a compressão, é sensível ao fator de atrito entre o anel e as matrizes. O diâmetro interno cresce com a diminuição do coeficiente de atrito e vice-versa. Os diâmetros externos também são diferentes para cada condição de atrito. A tendência é do diâmetro externo ser menor para deformações com alto coeficiente de atrito. Na figura 3.3 podemos visualizar estes efeitos: ⁽¹⁸⁾

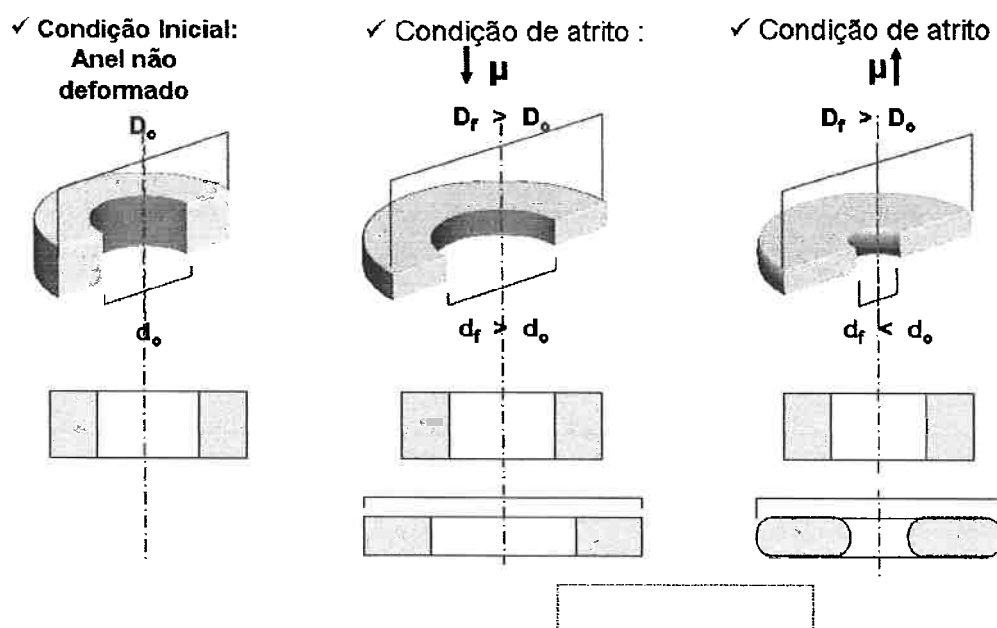


Figura 3.5 – Evolução do anel no ensaio de compressão

O fator de atrito (ou coeficiente de atrito) de um teste de compressão do anel é obtido pela plotagem do valor médio de R_h , R_i , no gráfico usado para calibração. R_h e R_i são definidos conforme mostrado na figura 3.4. ⁽¹⁸⁾

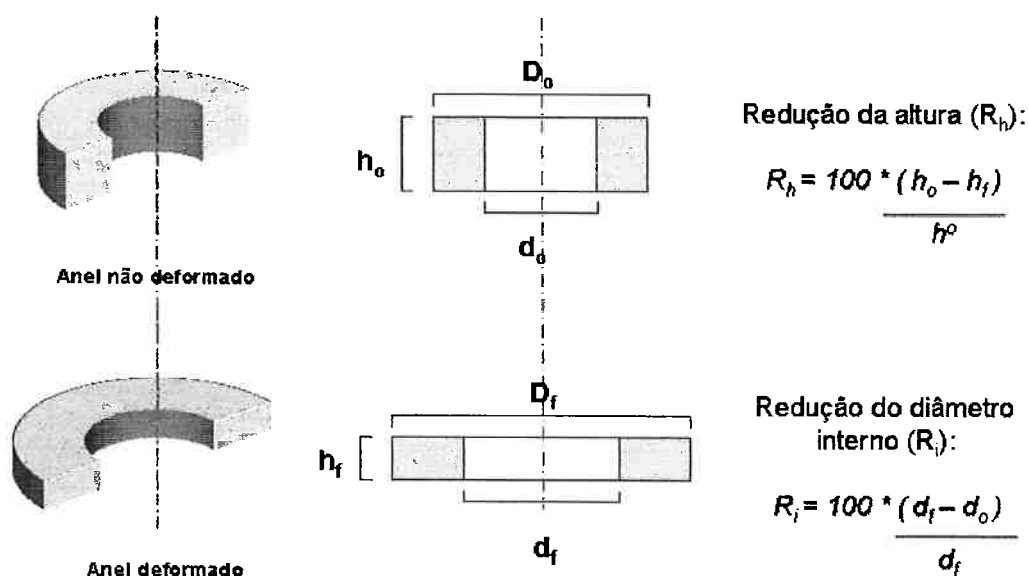


Figura 3.6 – Parâmetros utilizados na determinação do fator de atrito

Compreendido o ensaio de compressão do anel, faremos uma breve revisão dos conceitos aplicados ao teste e desenvolvidos por diversos autores.

O teste de compressão de anel foi proposto inicialmente por Kunogi e mais tarde desenvolvido por Male e Cockcroft ⁽²⁾. Avitzur e Hawkyard e Johnson ⁽²⁾ em seus estudos teóricos assumiram distorção uniforme, sem efeito de barril e fator de atrito constante. Posteriormente Male estudou a aplicação do teste em processos de conformação. Em uma de suas publicações faz uma comparação entre fator de atrito e do coeficiente de atrito em relação à condição real de atrito no processos de conformação. Neste estudo é sugerido que o fator de atrito (m) é mais realista na determinação da condição de atrito do que o coeficiente de atrito. ⁽⁸⁾

Wang e Lenard ⁽⁹⁾, analisaram o teste do anel realizado a temperaturas elevadas. Mostrou-se que o atrito na interface de contato da matriz e peça depende da taxa de deformação e da temperatura. Lee e Altan ⁽⁵⁾ consideraram o efeito da variação da tensão de escoamento do material durante a deformação. Até então, os modelos consideravam o material do anel homogêneo, com tensão de escoamento médio e uniforme para cada passe de deformação.

Tanto a deformação plástica como a condição de atrito influem na geração e troca de calor no trabalho a quente. O efeito da temperatura é importante já que aproximadamente 90 a 95% da energia mecânica envolvida no processo de conformação é transformada em calor. No trabalho desenvolvido por Altan ⁽¹¹⁾ é mostrado que no teste do anel a quente a curva de calibração do fator de atrito muda para tensões de escoamento do material não constante e não uniforme. Considera-se que a tensão de escoamento varia em função da deformação, taxa de deformação e temperatura. Os resultados mostraram que para o fator de atrito $m = 1$, a curva de calibração do material com tensão não constante é superior. A tensão de cisalhamento aumenta devido ao resfriamento da superfície de contato e o fator de atrito aumenta proporcionalmente com o aumento da tensão de cisalhamento (Figura 3.4 - Critério de Von Mises),

Citamos acima os estudos mais importantes feitos para o entendimento do fenômeno do atrito no ensaio de compressão do anel. As pesquisas estão sendo direcionadas para a solução numérica por meio de simulação de softwares de elementos finitos.

3.4. Curvas de Calibração

As curvas de calibração foram inicialmente medidas por Male e Cockcroft.⁽³⁾ Foram utilizadas as relações de redução da altura e redução do diâmetro interno do anel (R_h e R_i). As curvas são aplicadas segundo a geometria do anel. As geometrias mais utilizadas são:⁽¹⁾

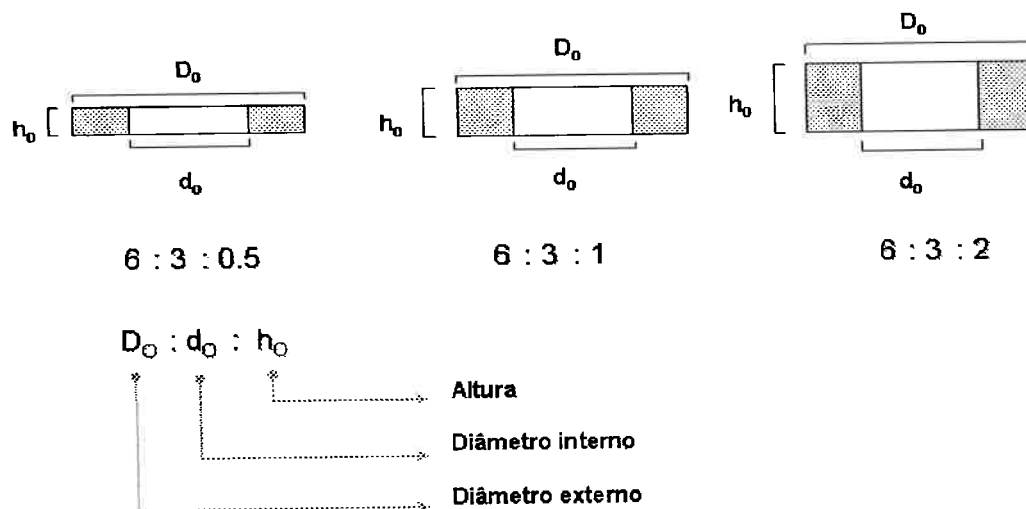


Figura 3.7 – Geometria do anel

As curvas de calibração serão discutidas sob os seguintes aspectos:

Geometria, autores e materiais.

3.4.1. Efeito geométrico

Os estudos mostram que não existe uma curva de calibração padrão válida para qualquer formato de anel ou cilindro. Ellwood⁽²⁰⁾, Lee e Raynor⁽²¹⁾ sugerem que os melhores resultados podem ser obtidos com um anel de altura pequena e diâmetro interno largo, comparados com o diâmetro externo. No entanto, diâmetro muito largo com altura muito pequena o anel se deforma não uniformemente para baixos valores de fator de atrito.⁽³⁾ Kunogi⁽²²⁾ utilizando um anel de 6:3:1,5 (3 mm de altura) houve perda de calor no teste a quente devido ao tamanho reduzido do corpo de prova, invalidando os resultados. Por outro lado, se o material apresenta propriedade mecânica muito elevada, anéis menores economizarão força requerida da máquina. Os experimentos mostram que o parâmetro “variação do diâmetro” não

muda para amostras de dimensões diferentes, mas com proporção $D_o:d_o:h_o$ constantes. ⁽³⁾

Mostra-se na sequência da figura 3.8 curvas de calibração com geometrias diferentes. Observamos que para R_h e R_i constantes, o valor do fator de atrito varia com a mudança da geometria do anel.

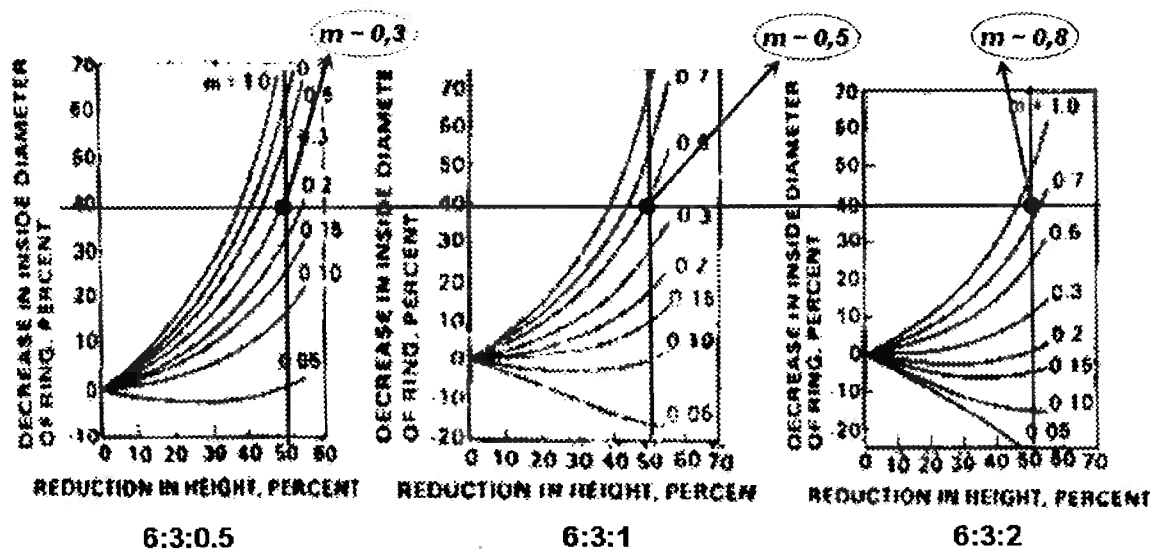


Figura 3.8 – Efeito geométrico nas curvas de calibração ⁽¹⁾

3.4.2. Variabilidade de autores

Faremos agora a comparação para um mesmo material e geometria, mas diferentes autores.

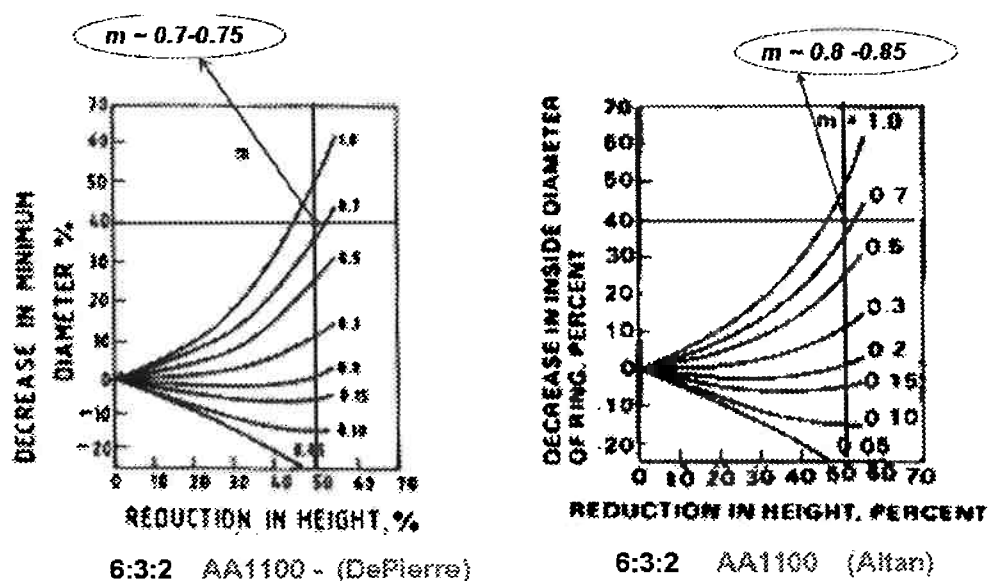


Figura 3.9 – Variabilidade de autores (curva de calibração 6:3:2 – AA1100) ^(2,8)

As curvas foram obtidas através de métodos numéricos (simulações numéricas). Apesar da pequena diferença nos valores do coeficiente de atrito, ainda assim há variabilidade nos resultados de cada autor.

3.4.3. Variabilidade de materiais

Consideramos agora a mesma geometria e o mesmo autor, no entanto os materiais de determinação da curva de calibração são diferentes.

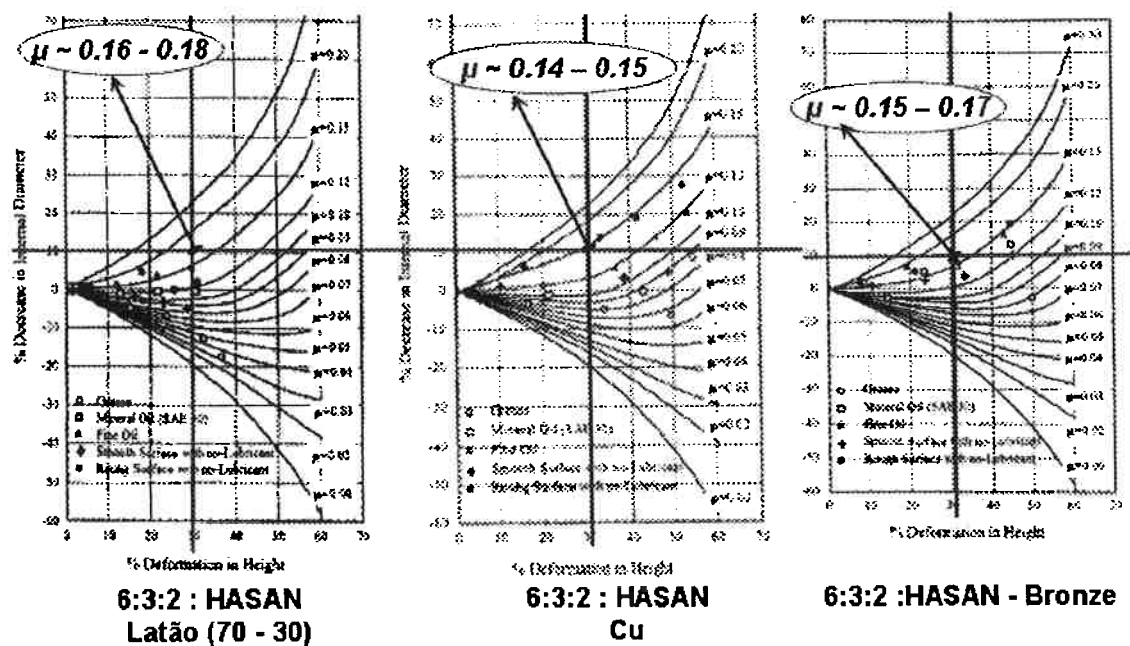


Figura 3.10 – Variabilidade de materiais
(curva de calibração 6:3:2 – HASAN) ⁽¹⁾

Nota-se diferenças nos valores dos coeficientes de atrito. Desse modo, o material influe na medição da curva de calibração. ⁽¹⁾

3.5. Curva Tensão-deformação de ligas de alumínio

Na figura 3.11, são apresentadas as curvas tensão x deformação de diversas ligas de alumínio na temperatura ambiente. O objetivo é mostrar o formato da curva de cada material, com especial atenção para as ligas AA2024 E AA6111-T4, as quais

serão utilizadas como dado de entrada na simulação. No anexo A, encontra-se os principais elementos de liga para cada série das ligas de alumínio, assim como um resumo dos conceitos mais importantes aplicados às séries 2XXX e 6XXX, tabelas de composição química e propriedades mecânicas.

As referências das curvas são listadas abaixo:

- AA2024 (Takuda, Mori) ⁽¹⁵⁾
- AA1100 (Lee, Altan) ⁽⁵⁾
- AA1100 (Suzuki) ⁽⁶⁾
- AA6101 (Mehta, Al-Zkeri) ⁽¹³⁾
- AA6111-T4 (Neale, WU) ⁽¹²⁾
- AA5182 + 1%Mn (Li, Ghosh) ⁽¹⁴⁾
- AA5182 (Takuda, Mori) ⁽¹⁵⁾

Devemos lembrar que as condições que geraram estas curvas não serão tratadas em detalhe. Nas simulações de modelos que objetivam a determinação do fator de atrito ou construção da curva de calibração, deve-se tomar sempre o cuidado com as informações de entrada na simulação. A precisão de um software de elementos finitos depende dos dados de entrada, isto é, os resultados serão tão bons quanto o forem os dados de entrada. ⁽⁷⁾

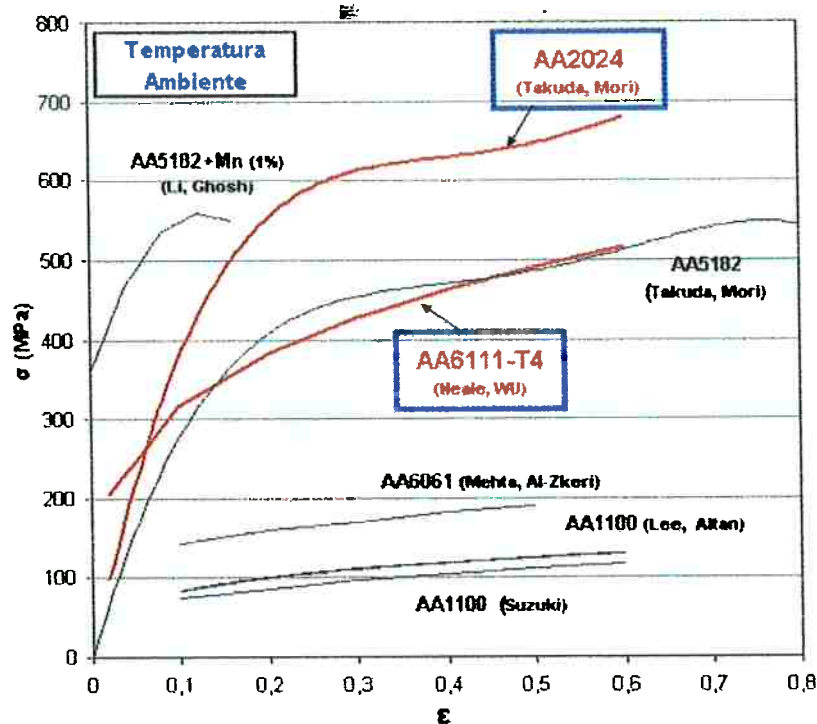


Figura 3.11 – Curvas σ (MPa) x ϵ (%) para ligas de alumínio (T_{amb})

Para a liga AA2024, apresentamos dados experimentais medidos por H. Suzuki. ⁽⁶⁾

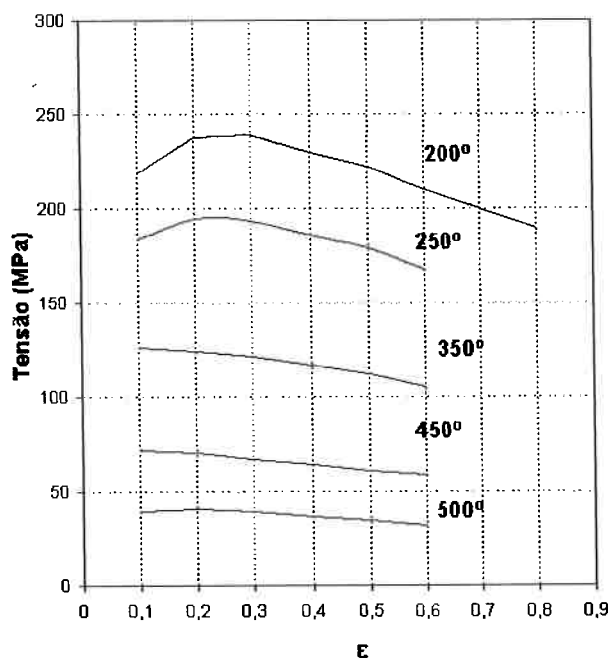


Figura 3.12 – Curva σ (MPa) x ϵ (%) para altas temperaturas (Suzuki) ⁽⁶⁾

Utilizaremos a curva medida por Suzuki (Figura 3.12) para comparar com a curva σ x ϵ utilizada no software QForm2D/ 3D (banco de dados do programa). Como vimos anteriormente é fundamental averiguar o dado de entrada em uma simulação numérica, para resultados mais precisos.

3.6. Deformação de ligas de alumínio em altas temperaturas

As características de encruamento das ligas de alumínio em altas temperaturas variam tanto com a temperatura como com a taxa de deformação. O grau de encruamento reduz-se com o aumento de temperatura até que a 370 °C não ocorre mais encruamento. Isso se deve ao fato de que em temperaturas relativamente altas é favorecida termicamente a recuperação, que ocorre rapidamente durante e imediatamente após a deformação, resultando na formação de uma estrutura de subgrãos semelhante à que se forma no metal aquecido após deformação a frio. ⁽¹⁶⁾

Quando a deformação ocorre a temperatura e a taxa de deformação constantes o resultado é um tamanho de subgrão que depende dessa temperatura e dessa taxa de deformação. A resistência à deformação em alta temperatura é inversamente

proporcional ao tamanho do subgrão formado. Sendo assim, menores tamanhos de subgrão e, conseqüentemente, maior resistência ao escoamento em alta temperatura, resultam de temperaturas de deformação mais baixas e ou de taxas de deformação mais elevadas. ⁽¹⁶⁾

A redução na densidade de discordâncias causada pela recuperação provoca queda de resistência mecânica e também afeta outras propriedades. A velocidade desse processo depende da composição química da liga, sendo tanto maior, quanto maior for o grau de pureza da liga. A recuperação leva ao aumento da condutividade elétrica e à redução das tensões internas e da energia armazenada., sendo que as mudanças de algumas propriedades podem ser observadas em temperaturas tão baixas como as do intervalo de 93 a 120°C, sendo porém mais intensas em rápidas em temperaturas mais elevadas. Entretanto, o retorno às mesmas propriedades que o material antes do encruamento somente é possível através da recristalização. ⁽¹⁶⁾

O tamanho de grão também é muito afetado pela composição química. Em geral elementos de liga comuns e impurezas como cobre, ferro, magnésio e manganês favorecem a redução do tamanho de grão. Os efeitos de elementos com baixa solubilidade sólida como manganês, cromo e ferro dependem do tipo de fases que esses elementos formam, reagindo entre si e com outros elementos e pela sua distribuição na liga. O manganês é particularmente interessante nesse aspecto. A distribuição de soluto é determinada pelas condições de solidificação do lingote, pelo pré-aquecimento do mesmo e por outros variáveis dos processos de fabricação, que são controlados de forma a produzir o grão mais fino possível. ⁽¹⁶⁾

A tensão do material muda com a elevação da temperatura, sendo assim no teste do anel devemos ter a altas temperaturas a mudança da propriedade durante a deformação. O fenômeno que ocorre é a recuperação e recristalização dinâmica. Outro aspecto importante é que em elevadas temperaturas o teste de anel é sensível à mudança dos parâmetros, taxa de deformação e variação da temperatura. Enquanto que no ensaio a temperatura ambiente a taxa de deformação pouco influencia o fator de atrito medido. ⁽¹⁹⁾

3.7. Texturas cristalográficas

O alumínio fundido tende a apresentar uma distribuição aleatória de orientações cristalográficas, com exceção dos casos em que se formam grãos colunares durante a solidificação. Esse caráter aleatório é rapidamente perdido durante o trabalho a frio ou a quente, sendo substituído por texturas (orientações cristalográficas preferenciais) nas quais os grãos assumem preferencialmente determinadas orientações.⁽¹⁶⁾

A textura final de um determinado processo de deformação depende de alguns fatores, como o tipo de deformação, mudanças na forma do produto e, em menor escala, a composição química da liga. Além da textura de deformação, também é importante a textura de recristalização, que geralmente difere da textura de deformação introduzida antes do recozimento, dependendo do histórico de fabricação da peça e da composição química da liga.⁽¹⁶⁾

Este assunto não será detalhado. O estudo da textura neste trabalho é apenas introdutório e complementar ao ensaio experimental. Foram feitas análises de textura apenas de uma amostra: anel não deformado. Discutiremos no item dos resultados experimentais.

4. OBJETIVOS

Este trabalho foi elaborado para atingir as seguintes metas:

- Determinação do coeficiente de atrito através de Ensaio de Compressão do Anel;
- Simulação do Ensaio de Compressão de Anel para ligas de alumínio pelo método dos elementos finitos via softwares QFORM 2D/3D e COSMOSMTM GeoStar;
- Comparação dos resultados da análise por elementos finitos com os resultados do ensaio experimental.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Apresentaremos neste tópico as ligas utilizadas, o método de trabalho para cada parte experimental, procedimentos ocorridos e todas informações necessárias para a análise dos resultados.

Os materiais e métodos utilizados experimentalmente serão divididos da seguinte forma:

- 5.1. Materiais e Métodos do Ensaio Experimental de Compressão do Anel.
- 5.2. Materiais e Métodos da simulação no QFORM2D/3D.
- 5.3. Materiais e Métodos da simulação no COSMOSM™.

5.1. Ensaio experimental

5.1.1. Material do corpo de prova

A liga utilizada nos ensaio foi AA6351-T4, cuja composição química é apresentada na tabela a seguir:

Composição química (% em peso)							
6351-T4	Si	Mg	Cu	Mn	Fe	Cr	Al
	1.0	0.6	--	0.6	--	--	balan.

Tabela 5.1 – Composição química da liga AA6351-T4

O material foi fornecido pela Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) por intermédio do Professor Ronald Lesley Plaut. O material de fornecimento foi usinado no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Do extrudado bruto obteve-se anéis com a geometria 6:3:1 (figuras 5.1 – 5.4).



Figura 5.1 - Matéria-prima do anel



Figura 5.2 - Liga AA6351-T4



Figura 5.3 - Usinagem do material bruto

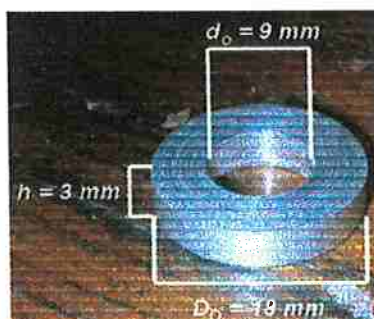


Figura 5.4 - Anel 6:3:1

5.1.2. Equipamentos

Na execução dos ensaios utilizou-se:

- Máquina de Ensaio EMIC – DL 30000: Localizada no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da USP. Antes dos ensaios realizou-se um treinamento de operação da máquina com acompanhamento direto do assistente técnico da EMIC. O treinamento foi coordenado pelo professor Cyro Takano. A capacidade de carga da máquina é de 300 kN.

- Acoplado à máquina de ensaio, fez-se uso do software TESC (Vmaq.). No TESC foi implementado o método de trabalho. As etapas de preparação do método e execução do ensaio são mostrados no anexo B (Método de trabalho e execução do ensaio na máquina EMIC).

- Para os ensaios à quente utilizou-se o forno da BRASIMET com capacidade de até 1300°C.

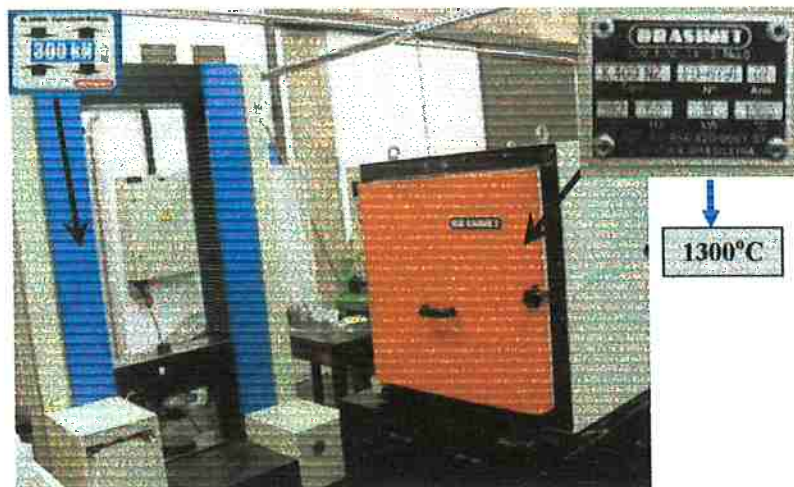


Figura 5.5 - Máquina de Ensaio EMIC e forno BRASIMET

5.1.3. Procedimento

Os ensaios ocorreram à temperatura ambiente, 250°C e 350°C. Sendo que as condições de atrito no contato matriz/anel foram:

Temperatura	Condição de contato Matriz/anel	Nº de Amostras	Velocidade da Máquina
	SECO/TEFLON fita	6	100 mm/min.
250°C	SECO	6	100 mm/min
350°C	SECO	1	100 mm/min

Tabela 5.2 - Condições de atrito e temperatura



Figura 5.6 - Fita TEFLON

5.1.3.1. Ensaio à temperatura ambiente

A seguir mostramos o roteiro do procedimento para o ensaio a frio:

- Mediu-se o anel bruto para confirmar a dimensão inicial (considerou-se uma tolerância de até 0.05 mm).
- Inseriu-se uma matriz-base (apoio) na região de ensaio (sucata de aço 1020)
- A seguir colocou-se o anel sobre a base centralizando-o em relação ao pulsor superior da máquina.
- Sobre o anel centralizado colocou-se uma matriz superior de apoio (sucata de aço 1020), sempre com o cuidado de não deslocar o corpo de prova.
- Para cada ensaio tanto o corpo de prova como as matrizes de apoio foram submetidas à limpeza com solução de acetona.

Obs 1. As matrizes de apoio do corpo de prova como partes complementares do ensaio tiveram a função de alinhamento do anel e proteção da matriz da máquina (material aderido).

Obs 2. No ensaio utilizando a fita de TEFLON, as matrizes de apoio e o corpo de prova foram cuidadosamente revestidos com três camadas de fita.

- Conforme anexo B, regulou-se a máquina com limites inferiores e superiores.
- Posicionando o pulsor superior sobre o conjunto de apoio e corpo de prova realizou-se o ensaio utilizando a força como parâmetro de parada. Impôs-se uma força limite máxima variando entre 100 a 290 kN (lembrando que a capacidade da máquina é de 300 kN).

5.1.3.2. Ensaio à temperatura de 250°C e 350°C

(Isotérmico do ferramental e corpo de prova)

Como vimos na tabela 5.2, os ensaios a altas temperaturas foram realizados apenas sobre a condição a seco (contato matriz/anel). A programação do método de trabalho na máquina EMIC foi de mesma configuração que os ensaios a temperatura ambiente. No entanto, o procedimento requereu cuidados especiais no manuseio das matrizes de apoio (aquecidas) e a transferência do corpo de prova para a região de ensaio a partir do forno de aquecimento.

Utilizou-se uma matriz de base, um macho (contato superior) e um anel retentor para alinhamento do corpo de prova e sustentação do macho. Sobre a matriz

de base encaixa-se o anel retentor. Coloca-se o corpo de prova sobre a superfície da base e no centro do anel retentor. Finalmente o macho é encaixado no anel retentor mantendo contato com a face superior do corpo de prova (Figura 5.7).

O método de parada da máquina foi a da força máxima (variando de 170 kN até 250 kN para os diversos ensaios).

Foram considerados seis ensaios válidos, sendo cinco para temperatura de 250°C e um para a temperatura 350°C. Os outros ensaios, considerados não válidos tiveram caráter regulador das condições experimentais (as condições não foram as mesmas, desse modo não se encaixam ao grupo dos experimentos válidos). A velocidade da máquina foi a máxima permitida, aproximando à situação industrial em processos de conformação de metais (forjamento).

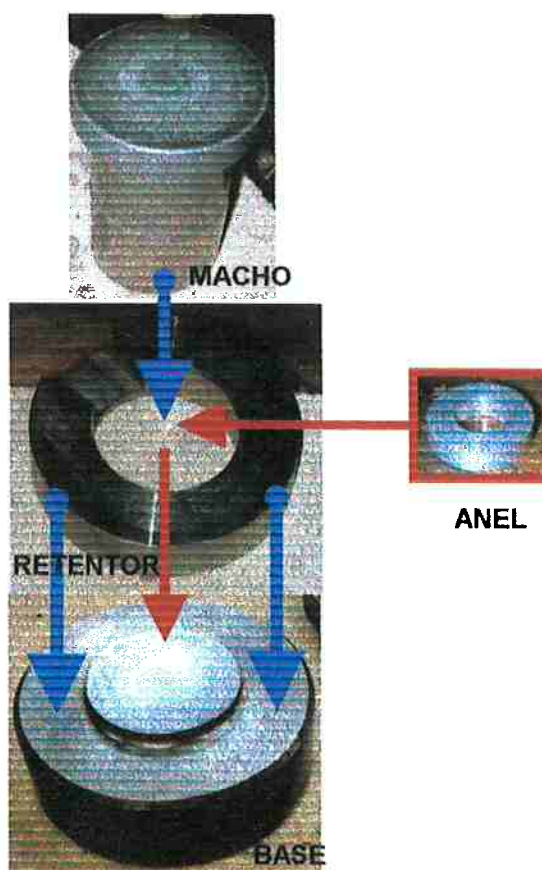


Figura 5.7 - Conjunto de matrizes para ensaio a quente

O procedimento dos ensaios foram padrões para todos corpos de provas, seguindo a seqüência:

1. Ligar o forno até a temperatura de 250°C ou 350°C.
2. Inserir o conjunto de apoio do ensaio: matriz de base, macho e anel retentor no forno e aquecer por trinta minutos (Figura 5.8).

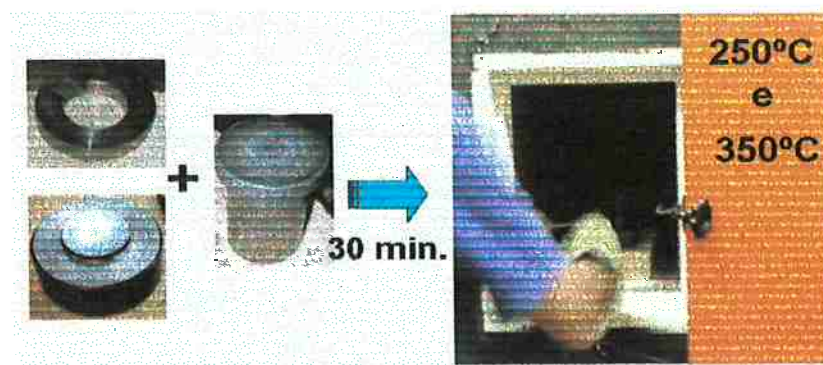


Figura 5.8 - Aquecimento do ferramental

3. Retira-se a matriz de base + anel retentor do forno e aloca-se o corpo de prova no centro para pré-aquecimento até a temperatura de 250°C ou 350°C. A permanência no forno é de mais quinze minutos. Após o pré-aquecimento do corpo de prova, o conjunto é transferido para a região onde ocorrerá o ensaio (Figuras 5.9 e 5.10).



Figura 5.9 - Pré-aquecimento
do corpo de prova

Pré-aquecimento
por 15 min.



250°C e 350°C



Figura 5.10 - Transferir
para o ensaio

4. Após o ensaio de compressão, movimenta-se a travessa da máquina até o fim de curso superior. Retira-se o conjunto, separando o anel deformado.



Figura 5.11 - Execução do ensaio



**Separação do
anel
deformado**

Figura 5.12 - Separação do
anel deformado

5. Para que o ensaio ocorresse de forma padronizada, a regulagem de aproximação do pulsor superior fez-se da seguinte maneira: Na programação dos limites superiores e inferiores, estabelece-se como limite superior o deslocamento zero (ver em anexo 1, o layout com o indicador digital). O indicador da força também é zerado. Coloca-se na região de trabalho o conjunto matriz de base + anel retentor + macho + corpo de prova (como mostrado na figura 5.7). Aproxima-se o pulsor superior da máquina cuidadosamente até que ocorra a primeira indicação de força. Nesse momento anota-se o valor do deslocamento utilizando este valor como ponto de referência para todos os próximos ensaios. A força no indicador digital é zerada novamente. O sistema está pronto para a execução do ensaio.

5.2. Simulação no QFORM2D/3D

O programa QFORM2D/3D (QuantorForm Ltda), foi lançado em 2002 em sua versão 3D, sendo que a versão de 1998 era a QFORM2D (Quantor-soft Ltda). O programa é específico para efetuar simulações de forjamento e processos afins como recalque e extrusão de peças. 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 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, se pode torná-la mais otimizada para a aproximação da solução

corrente, fazendo com que a precisão aumente consideravelmente, e mantendo o número total de elementos dentro dos limites.



Figura 5.13 - Layout da tela de abertura do programa QForm

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 específico, apresenta diversos comandos 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, que é fundamental 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 algum defeito, e fornecendo uma noção sobre o fibramento final da peça.

Neste trabalho utilizamos a versão QFORM2D/3D, com licença de uso do software adquirida legalmente. O período de uso do programa ocorreu entre os meses de setembro e outubro. Todas as análises e resultados aqui obtidos foram efetuados em microcomputador situado no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da USP (contendo a licença de uso do software) com orientação do Professor Ronald Lesley Plaut.

A construção do modelo é demonstrado passo a passo no anexo C. Nas simulações variou-se a temperatura e as condições de atrito na interface de contato matriz/peça, sendo que para todas as simulações considerou-se uma redução de 50% na espessura do anel (6:3:1). A seguir, na tabela 5.3 temos todas as análises que serão feitas no QForm:

Liga de Trabalho	Temperatura	Coeficiente de atrito	Resultados a serem analisados		
			D _{externo}	d _{interno}	Força
AA2024	350°C	Ideal	O	O	O
		$\mu = 0.3$	O	O	O
		$\mu = 0.6$	O	O	O
	500°C	Ideal	O	O	O
		$\mu = 0.3$	O	O	O
		$\mu = 0.6$	O	O	O
AA6101	450°C	$\mu = 0.3$	X	X	X
			X	X	X

Tabela 5.3 - Simulações desenvolvidas no QForm

Para a liga AA6101 não serão comparados os resultados, já que não há material de comparação nos métodos COSMOS e experimental. Para a liga AA2024 (tabela 5.4 – Composição química) serão feitas as análises da força de recalque e da evolução dos diâmetros internos e externos, com o objetivo de comparar com o modelo desenvolvido no COSMOSTM. Outras informações como distribuição de tensões, deformações, taxas de deformações e distribuição de temperatura também serão analisados.

Composição química (% em peso)							
AA2024	Si	Mg	Cu	Mn	Fe	Cr	Al
	--	1.5	4.4	0.6	--	--	balan.

Tabela 5.4 – Composição química da liga AA2024

5.2.1. Comparação de dados de entrada

Para analisarmos a veracidade dos dados de entrada sugerida pelo programa foi feita uma comparação dos valores da curva tensão x deformação para o duralumínio. A referência foi o resultado experimental de Suzuki ⁽³⁾ (figura 3.12). A seguir são apresentados os gráficos comparativos dessa análise:

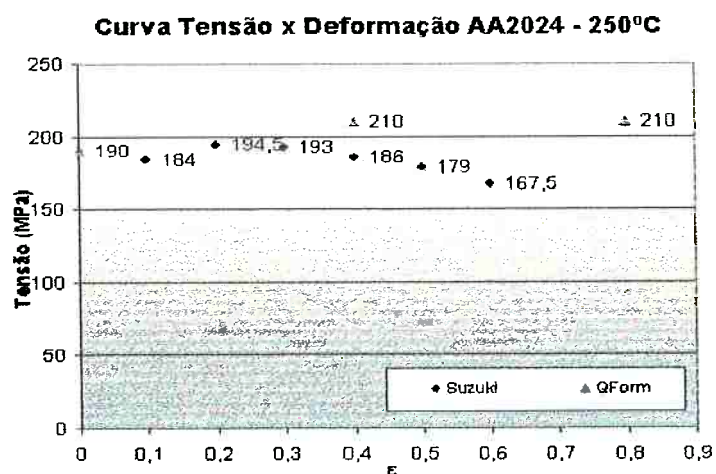


Figura 5.14 – Curvas σ x ϵ para AA2024 – 250°C

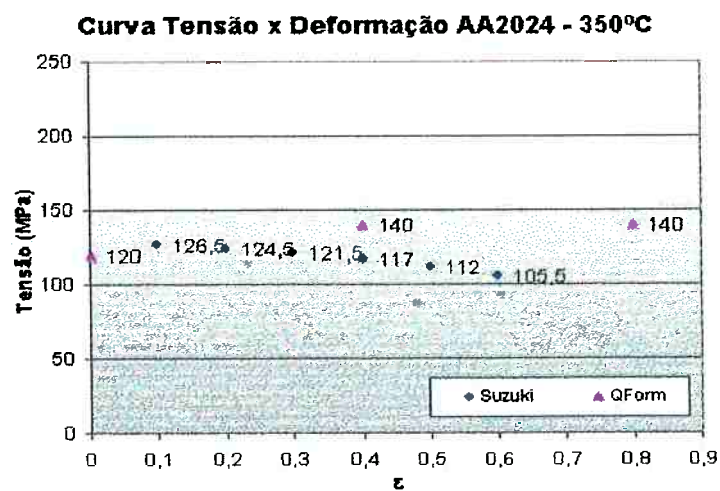


Figura 5.15– Curvas σ x ϵ para AA2024 – 350°C

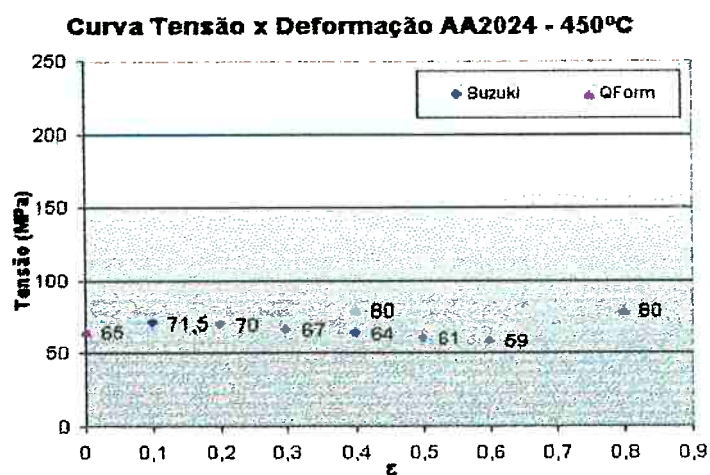


Figura 5.16 – Curvas σ x ϵ para AA2024 – 450°C

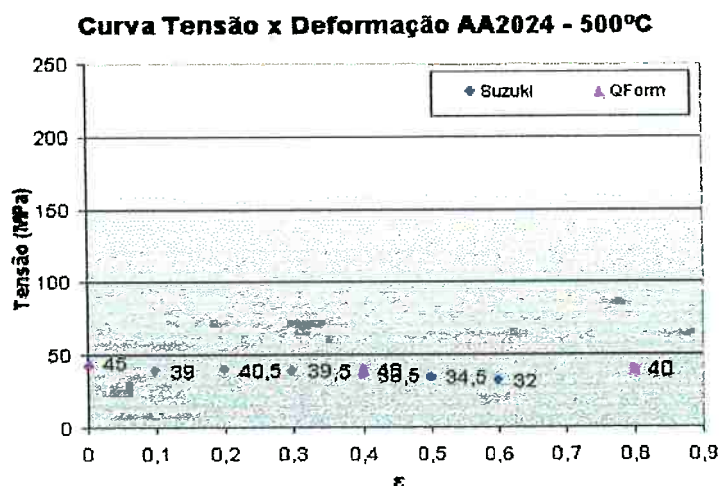


Figura 5.17 – Curvas σ x ϵ para AA2024 – 500°C

Podemos observar que até 40% de deformação os valores da tensão são coerentes. Acima dessa deformação observamos o aumento da diferença das tensões do Qform e Suzuki. Nota-se que a curva experimental de Suzuki tem uma característica interessante: há declínio da curva. A tensão cai com o aumento da deformação, pois ocorre o um fenômeno chamado de “Efeito adiabático”, que devido à aplicação da deformação há um acréscimo de energia térmica no material (aquecimento adiabático). No caso da curva do QForm o processo foi “adiabático” isto é, não foi considerada a troca de calor durante a medição (justificando o formato da curva crescente).

O aumento da temperatura favorece ao fenômeno da recuperação, com diminuição da tensões. Em ambas curvas podemos observar este efeito.

Em todas simulações o anel foi reduzido em 50% da sua espessura inicial. Como as diferenças se tornam relevantes a partir de 40% de deformação, consideraremos coerente os valores de σ x ϵ para a simulação no programa QForm.

5.3. Simulação no COSMOSMTM.

O programa COSMOSMTM GeoStar é uma ferramenta de simulação aplicada à engenharia que utiliza o método de análise por elementos finitos (FEM – Finite Element Method). Em trabalho recente elaborado pela Engenheira Juliana Y. T.

Hanashiro no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da USP, podemos encontrar informações básicas do programa. ⁽²²⁾

Neste trabalho, utilizaremos o programa COSMOSMTM para simular o ensaio de compressão do anel na condição ideal de atrito e temperatura ambiente. Serão desenvolvidos dois modelos. No primeiro modelo, para a liga de alumínio AA2024, compararemos os resultados obtidos com os resultados da simulação do software QForm. Para o segundo modelo, utilizando a liga AA6111-T4, faremos a comparação com os resultados experimentais obtidos para a liga AA6351-T4.

Segundo HASAN ⁽¹⁾, na condição ideal de atrito aparentemente não há variação da curva de calibração para diferentes materiais. Verificaremos essa hipótese levantando a curva de calibração na condição ideal para as ligas AA2024 e AA6111-T4 via COSMOSMTM.

A listagem dos comandos utilizados para a simulação e informações complementares de procedimentos estão no anexo E. Os aspectos mais importantes da simulação dos modelos construídos via COSMOSMTM, são:

- Corpo de prova: Anel com geometria 6:3:1, desenho de 1/4 do anel e espessura de 3 mm (figura 5.18).
- Entrada de dados externos da curva tensão-deformação para ligas AA2024 e AA6111-T4. ^(15,12). As referências foram medidas a temperatura ambiente.
- Análise pelo Método Não-Linear.
- Considerado Modelo Elasto-plástico Von Mises Cinemático (VMK) para pequenas deformações (metal).
- Para o cálculo da força, utilizou-se a tensão de Von Mises e a área da superfície de contato matriz/anel após a deformação. As fórmulas utilizadas foram:

$$F_{final} = \sigma_{VonMises} * A_{anel\ deformado}$$

Onde

$$A_{anel\ deformado} = \pi * (R_{e\ final}^2 - r_{i\ final}^2)$$

$R_{e\ final}$ – Raio externo do anel deformado

$r_{i\ final}$ – Raio interno do anel deformado

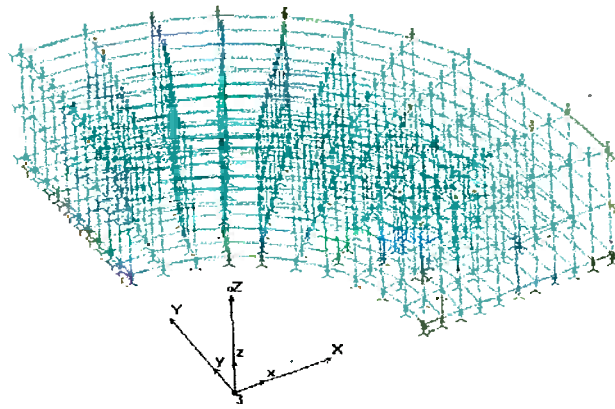


Figura 5.18 – Desenho inicial de $\frac{1}{4}$ do anel

6. RESULTADOS

Organizaremos os resultados do procedimento experimental e das simulações da seguinte maneira:

6.1. Resultados experimentais: Temperatura ambiente, 250°C e 350°C.

6.2. Resultados da Simulação QForm 2D/3D

6.3. Resultados da Simulação COSMOSTM

6.1. Experimental

O objetivo maior do ensaio de compressão do anel nesse trabalho é determinar o fator de atrito e comparar o resultado de forças com o modelo de simulação. Para isso, devemos primeiramente determinar as reduções em altura (R_h) e diâmetro interno (R_i) para cada anel deformado. Em seguida apresentaremos as forças experimentais no formato gráfico e taxa de deformação.

Utilizando a curva de calibração de alumínio na geometria 6:3:1, podemos determinar o fator de atrito aproximado para cada ensaio.

Devido à dificuldade de se desenvolver uma simulação do ensaio de compressão na condição de atrito no COSMOSTM, como já comentamos anteriormente, faremos uma aproximação dos resultados obtidos na prática para a condição ideal. Isto é, levantando a curva força x fator de atrito para duas amostras com aproximadamente 50% de redução e fatores de atrito diferentes (1 CP da condição a seco e 1 CP da condição TEFLON) podemos fazer uma extrapolação à condição $m = 0$ (ideal). Desse modo, será possível comparar a força experimental na condição ideal com o resultado da força COSMOSTM nas mesmas condições de atrito, redução, material, taxa de deformação e temperatura.

6.1.1 Temperatura ambiente – Condição de lubrificação: Seco

Os três anéis deformados na condição de contato sem lubrificação podem ser vistos a seguir:

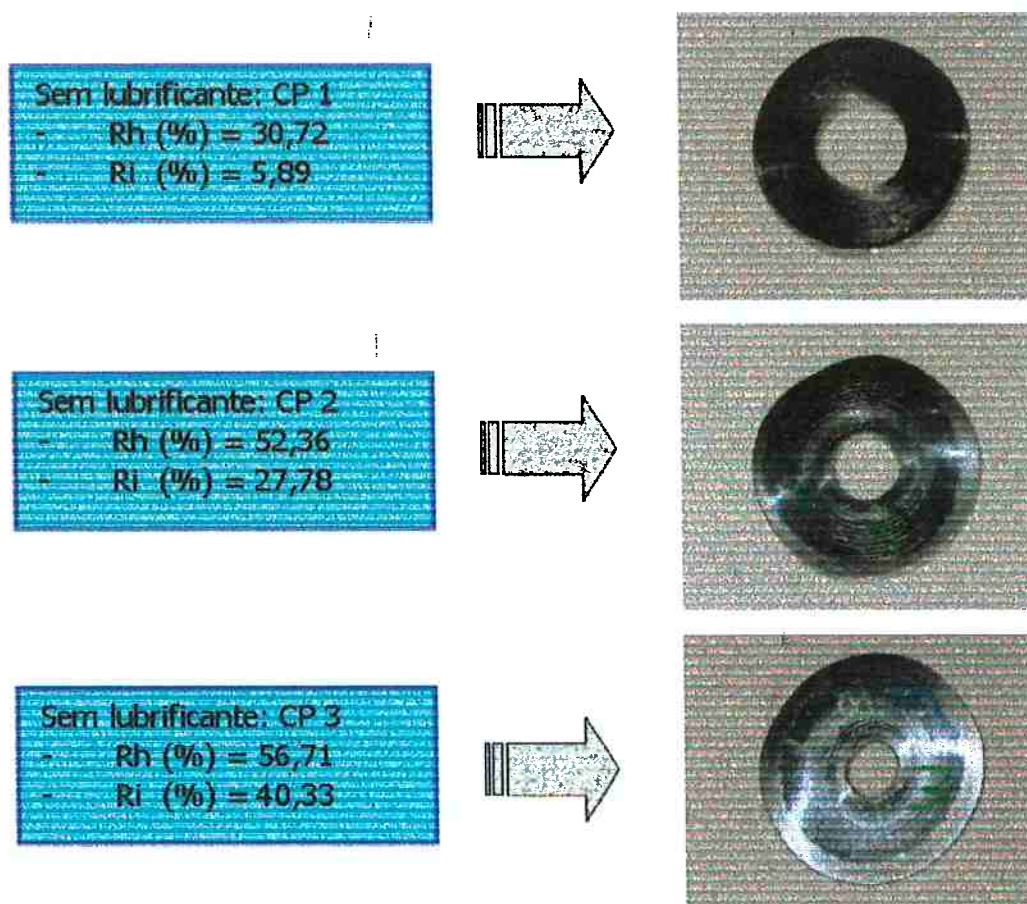


Figura 6.1 - Anéis deformados na condição sem lubrificante (temperatura ambiente)



Figura 6.2 - Variação dos diâmetros internos e externos com aumento da redução (Seco)

6.1.2 Temperatura ambiente – Condição de lubrificação: TEFLON

Para o ensaio das três amostras utilizando a fita de TEFLON os anéis deformados foram:

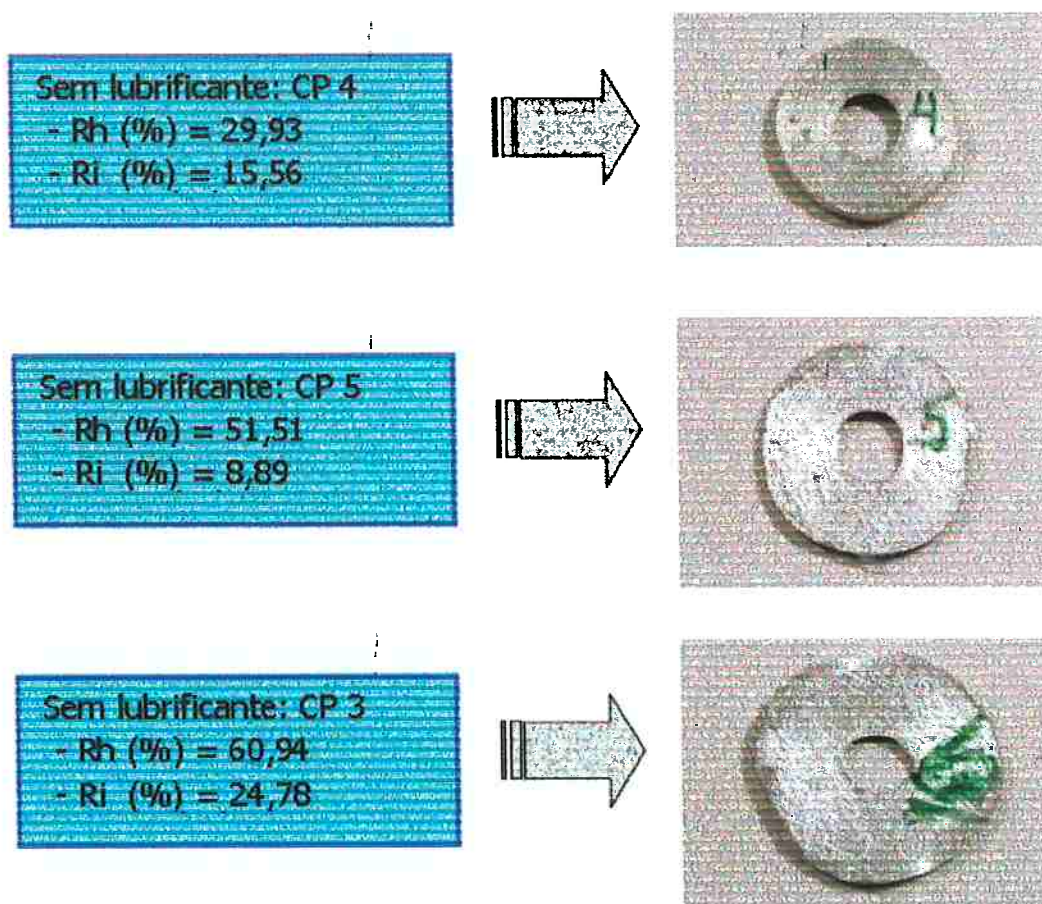


Figura 6.3 - Anéis deformados na condição TEFLON de contato (temperatura ambiente)



Figura 6.4 - Variação dos diâmetros internos e externos com aumento da redução (TEFLON)

6.1.3 Temperatura 250°C e 350°C - Condição de lubrificação: Seco

Os anéis deformados à quente apresentaram os seguintes resultados:

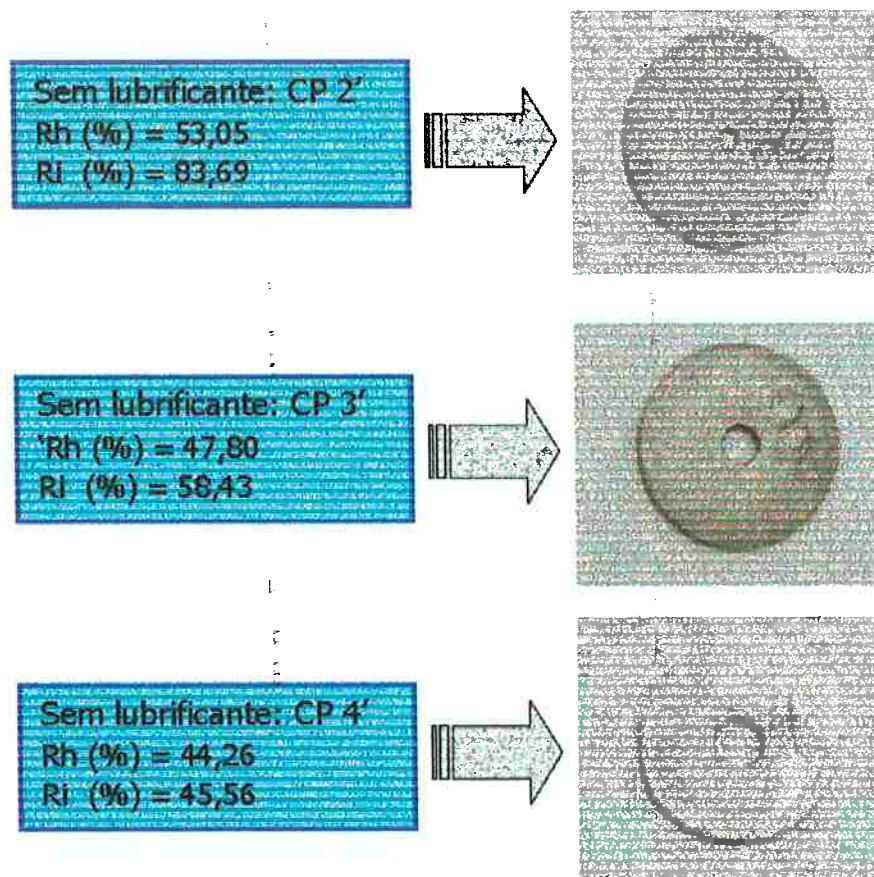


Figura 6.5 - Anéis deformados na condição seco de contato (250°C)

No ensaio à 350°C e alguns de 250°C (CP – 7' e CP – 2' respectivamente) o anel aderiu à matriz. No caso de 350°C foi preciso resfriá-lo em água para separá-lo da matriz de base.

As condições experimentais em relação ao acabamento do corpo de prova, matriz de base e macho não podem ser consideradas como ideais. Isto porque os anéis brutos não foram lixados ou usinados de forma a produzir um acabamento liso na superfície de contato com a matriz. Os resultados serão discutidos no tópico discussão dos resultados.

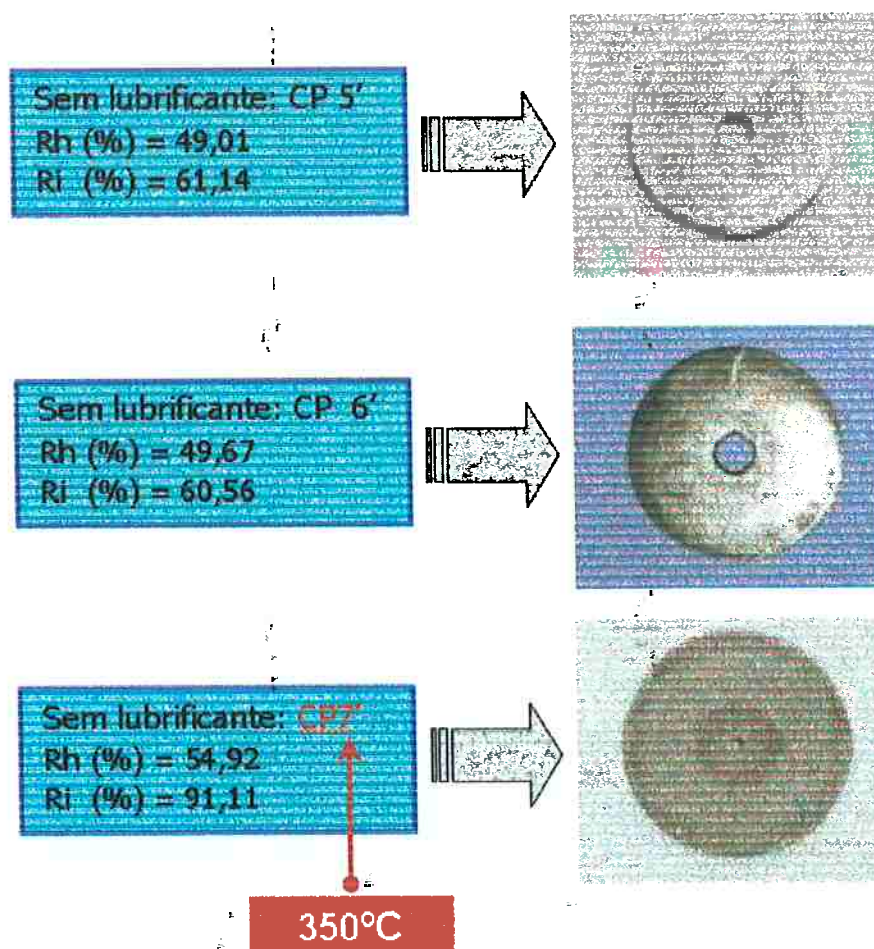


Figura 6.6 - Anéis deformados na condição seco de contato - AA6351-T4
(250°C e 350°C)

6.1.4 Curvas Força (kN) x Redução (%)

Os dados de saída do ensaio foram exportados no formato.txt através do programa Tesc (ver em anexo B o procedimento). A seguir mostraremos os gráficos levantados no programa Microsoft Excel (Figuras 6.7 – 6.10)

A força máxima medida pela máquina EMIC, para cada ensaio está demonstrada na tabela 6.1.

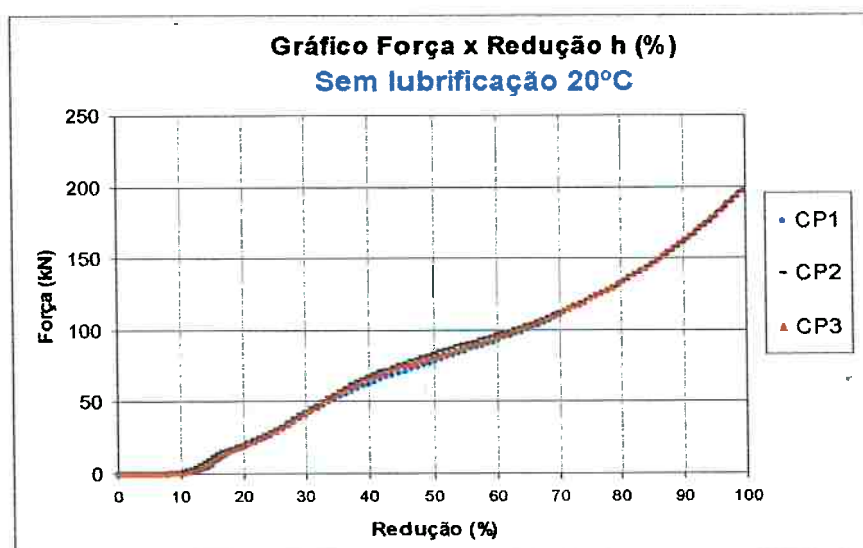


Figura 6.7 - Curva Força (kN) x redução (%) – Seco (Temperatura ambiente)

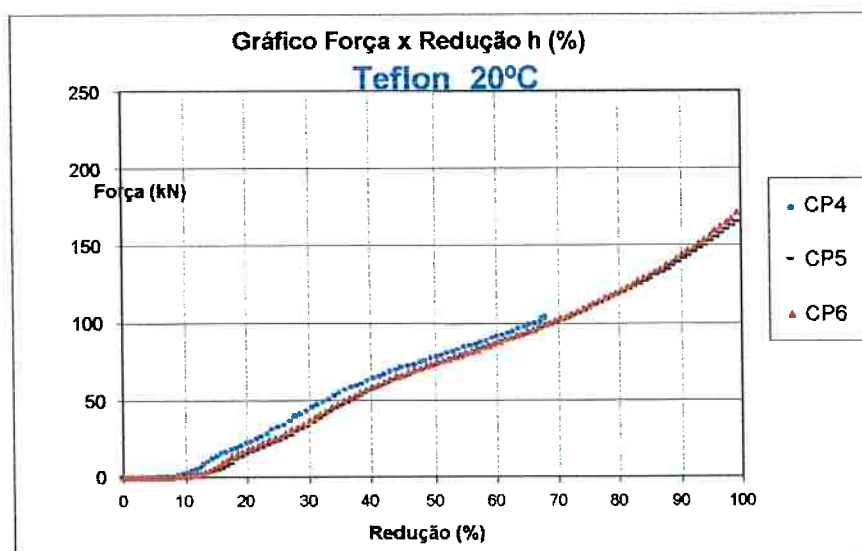


Figura 6.8. - Curva Força (kN) x redução (%) – TEFLON (Temperatura ambiente)

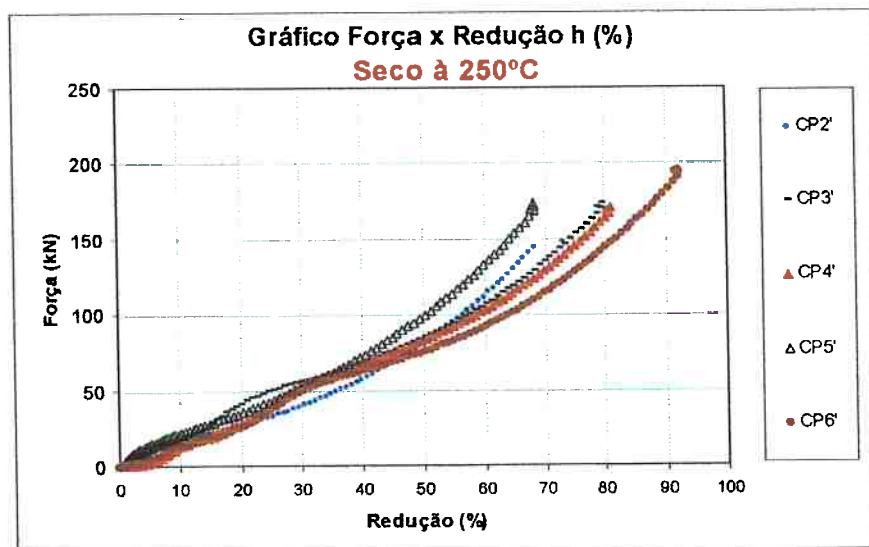


Figura 6.9 - Curva Força (kN) x redução (%) – Seco (250°C)

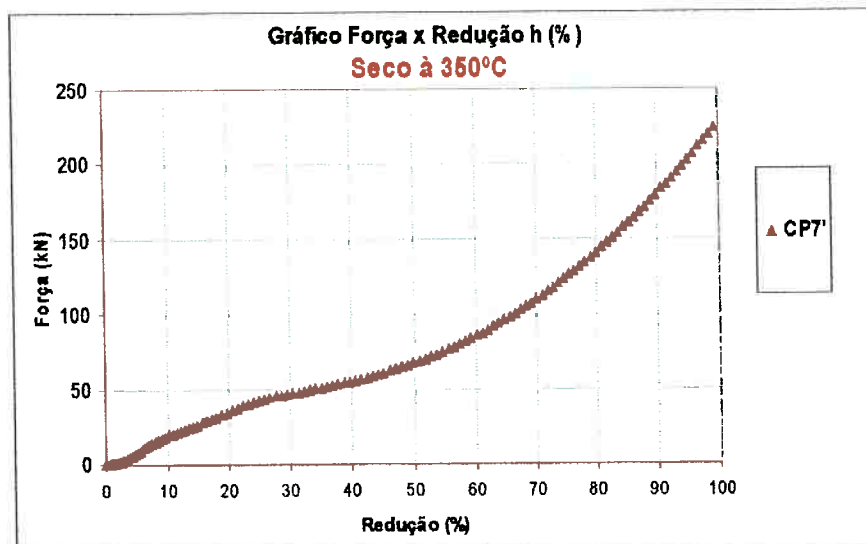


Figura 6.10 - Curva Força (kN) x redução (%) – Seco (350°C)

Condição de Atrito	CP	Temperatura	Força Máxima (Experimental)	Redução (%)
SECO	1	Ambiente	112	30,72
	2	Ambiente	220	52,36
	3	Ambiente	290	56,71
TEFLON fita	4	Ambiente	103	29,93
	5	Ambiente	179	51,51
	6	Ambiente	264	64,94
SECO	2'	250°C	176	53,05
	3'	250°C	173	47,8
	4'	250°C	170	44,26
	5'	250°C	173	49
	6'	250°C	195	49,67
	7'	350°C	268	91,11

Tabela 6.1 - Força experimental medida pela máquina (força máxima)

6.1.5 Taxa de deformação

Se observarmos os gráficos da força em função da redução e compararmos com as reduções reais medidas através do anel deformado concluímos que algo está aparentemente incoerente. Por exemplo, o corpo de prova “2” do ensaio na condição a seco e temperatura ambiente teve uma redução real de 52 %. Jogando este valor para o gráfico gerado pelo programa Tesc para este mesmo ensaio encontramos uma força na faixa de 70 a 80 kN. Mas a máquina chegou ao seu limite de força imposta no método de trabalho no valor de 220 kN. Aparentemente não se verificou a causa desta diferença, podendo ser atribuída à regulagem inadequada do software com a máquina ou falhas na implementação do método de trabalho. Na realidade no método criado via software Tesc há uma opção que não foi desenvolvida que é a pré-carga que tem o papel de deslocar a curva força x deslocamento para a esquerda, uma forma de tentar corrigir esta aparente incoerência que ocorre na prática. Deste modo, a deformação deveria ter sido corrigida. Focamos nosso objetivo em determinar o fator de atrito (que depende apenas de R_h e R_i) e comparar a força experimental com a força COSMOS, de modo que a princípio não nos preocuparemos em corrigir a curva tensão x deslocamento.

Para o cálculo da taxa de deformação utilizamos a deformação de engenharia (medido no anel deformado), sendo que a taxa de deformação de engenharia é dada por:

$$\dot{\varepsilon}_e = \frac{d\left(\frac{l - l_0}{l_0}\right)}{dt} = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{dl}{dt} = \frac{v}{l_0}$$

Assim, para velocidade de ensaio de $v = 100 \text{ mm / min}$ e $l_0 = 3 \text{ mm}$, obtemos a tabela 6.2 segundo a fórmula abaixo:

$$\text{Taxa de deformação} = 100 / (60) \cdot (h_0)$$

Condição de atrito	ε	Taxa de deformação
SECO (T ambiente)	0,32	0,55
	0,62	0,55
	0,57	0,55
TEFLON (T ambiente)	0,29	0,55
	0,52	0,55
	0,61	0,55
SECO (250°C)	0,53	0,55
	0,48	0,55
	0,45	0,55
	0,49	0,55
	0,50	0,55
SECO (350°C)	0,55	0,55

Tabela 6.2.1 - Taxa de deformação de engenharia

Para o cálculo da taxa de deformação real utilizamos a deformação de real:

$$\varepsilon = \ln(h_0 / h_1)$$

E a taxa de deformação real, considerando a redução total do corpo de prova:

$$\dot{\varepsilon}_v = \frac{d\left(\ln \frac{l}{l_0}\right)}{dt} = \frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dt} = \frac{v}{l}$$

Assim, para velocidade de ensaio de $v = 100 \text{ mm / min}$ e l é a espessura final do anel, obtemos a tabela 6.2.2 segundo a fórmula abaixo:

$$\text{Taxa de deformação} = 100 / (60) \cdot (h_f)$$

Condição de atrito	ε	Taxa de deformação
SECO (T ambiente)	0,46	0,82
	0,734	1,18
	0,837	1,29
TEFLON (T ambiente)	0,35	0,78
	0,72	1,15
	0,94	1,44
SECO (250°C)	0,75	1,14
	0,65	1,1
	0,58	1,0
	0,65	1,1
	0,66	1,1
SECO (350°C)	0,79	1,25

Tabela 6.2.2 - Taxa de deformação verdadeira

Observamos que a taxa de deformação de engenharia é constante desde que a altura inicial e a velocidade da máquina sejam mantidas. No entanto, para a taxa de deformação verdadeira, há variação pois é considerada a altura final. Neste caso quanto maior a redução maior será a taxa de deformação.

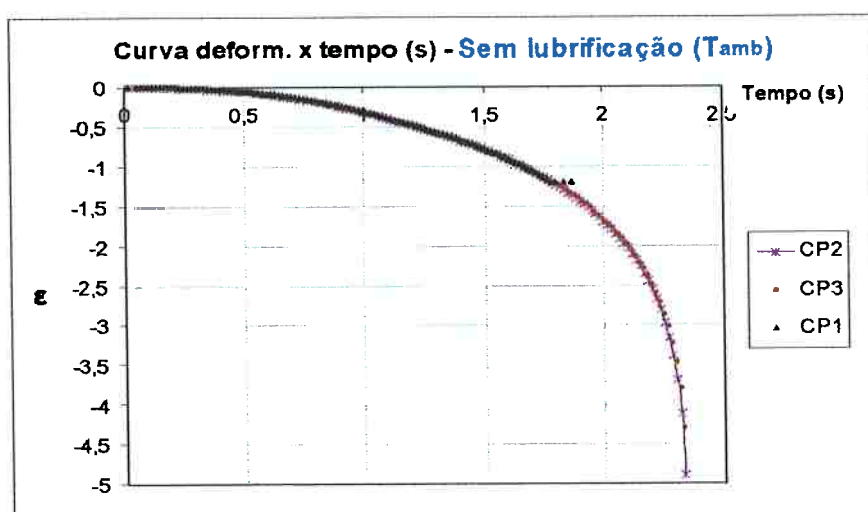


Figura 6.11- Curva Deformação x tempo (s) – Seco (Temperatura ambiente)

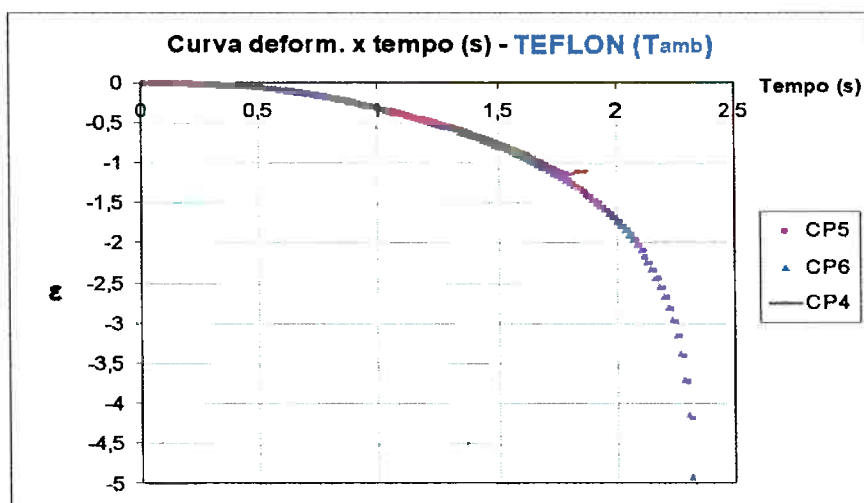


Figura 6.12 - Curva Deformação x tempo (s) – TEFLON (Temperatura ambiente)

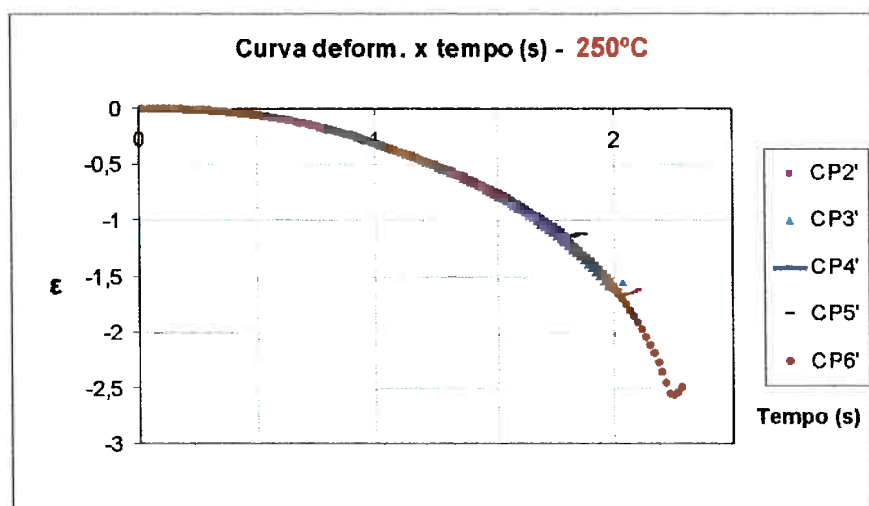


Figura 6.13 - Curva Deformação x tempo (s) – Seco (250°C)

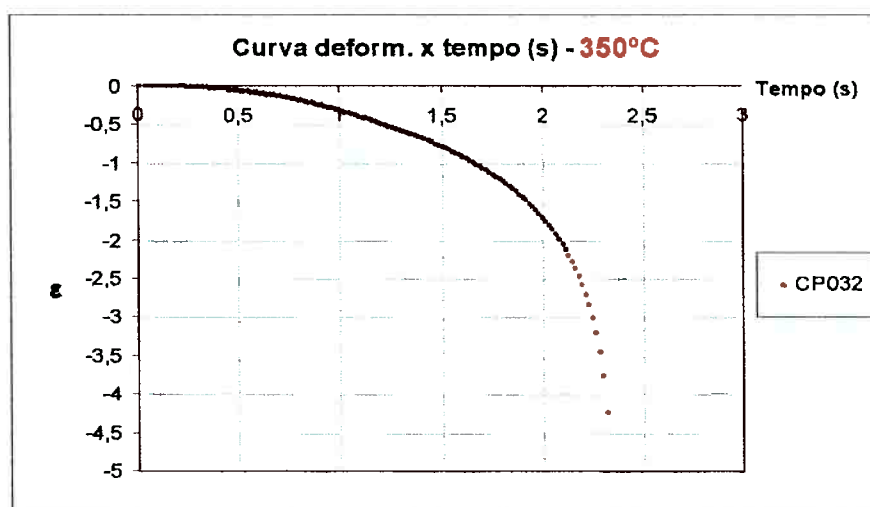


Figura 6.14 - Curva Deformação x tempo (s) – Seco (350°C)

6.1.6. Extrapolando a força experimental para a condição ideal de atrito

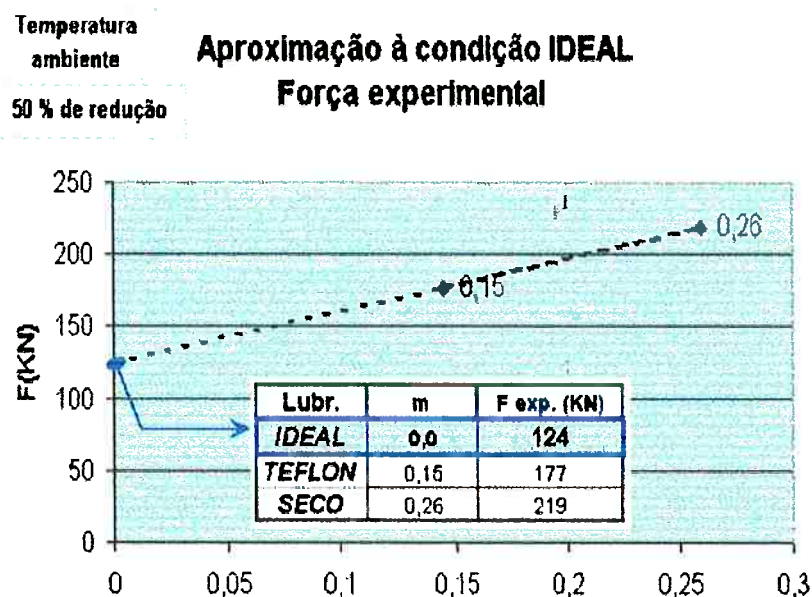


Figura 6.15 - Gráfico de extrapolação à condição ideal para o ensaio experimental

Na prática, dificilmente se trabalhará com a condição de atrito zero no contato matriz / peça. Muitos fatores deverão ser avaliados e discutidos para que se chegue ao modelo experimental na condição ideal. Não iremos abordar essa discussão neste trabalho, sendo que nosso objetivo será apenas o de comparar a força experimental com a força simulada pelo software COSMOSMTM.

6.1.7. Determinação do fator de atrito

Utilizaremos a curva teórica de calibração desenvolvida por Altan, para a geometria 6:3:1 e liga de alumínio AA 1100 .⁽²⁾

Os dados da tabela 6.3 foram extraídos da curva teórica de calibração na referência acima.

CURVA DE CALIBRAÇÃO PARA ANEL DE 6:3:1								
Rh (%)	Ri (%) para m :							
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5	0,7	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	-3,5	-1,5	0,3	0,5	1,5	3,5	5,1	7,1
20	-8,2	-2,5	0,55	3	5	10	12,8	16,2
30	-11	-2,9	1,3	6	10	17	21,4	27,5
40	-15	-2,3	4,2	10,8	18,5	27,5	34,5	44
50	-18	-0,5	9,5	19,2	29,5	42	56,7	72
56	-19,1	0,8	14,5	26	38	54	72	

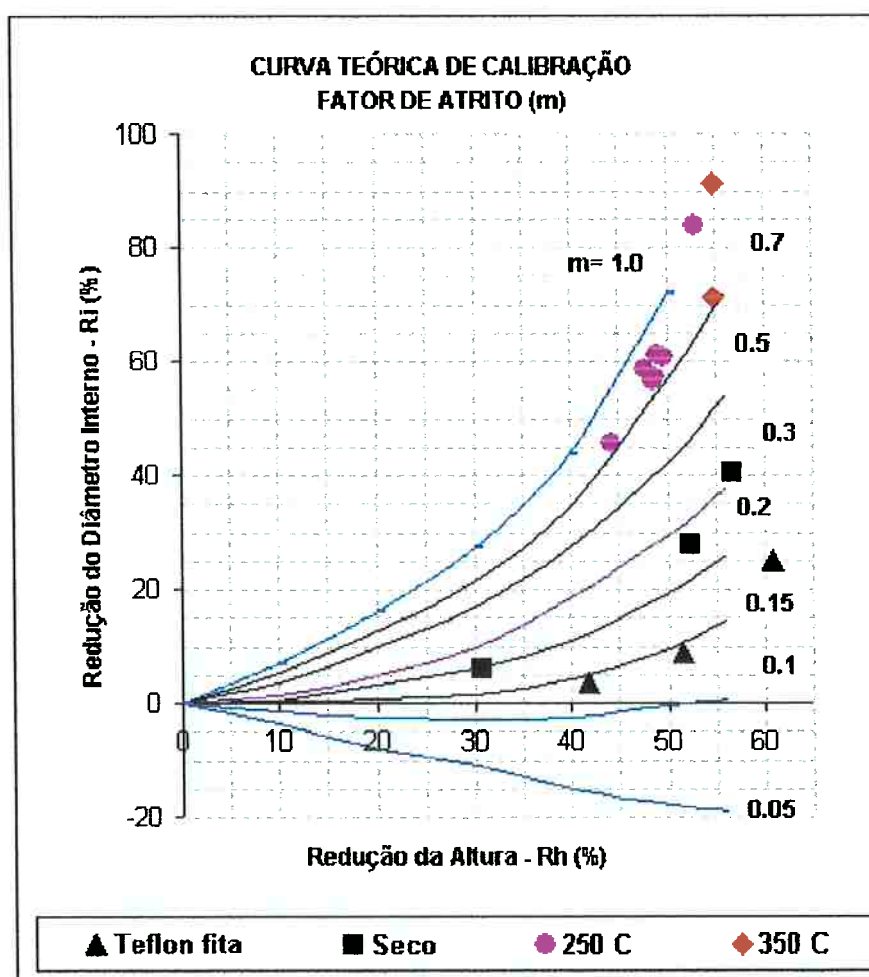
Tabela 6.3 - Curva teórica de calibração – 6:3:1⁽²⁾

Figura 6.16 - Determinação do fator de atrito para o ensaio experimental

O fator de atrito determinado experimentalmente variou para cada sequência de ensaio nas faixas entre:

- Seco (Tambiente): $0,2 \leq m \leq 0,3$
- TEFLON (Tambiente): $0,14 \leq m \leq 0,16$
- Seco (250°C): $0,7 \leq m \leq 1,0$
- Seco (350°C): $0,7 \leq m \leq 1,0$

No anexo D, mostra-se a tabela com todos resultados experimentais.

6.1.8. Microestrutura do anel não deformado

Preparou-se os corpos de provas para a análise EBSD (Difração de Elétrons Retroespalhados). Foram submetidos à análise um anel não deformado (condição inicial de ensaio) e dois anéis deformados à redução aproximada de 50% (uma amostra deformada na condição sem lubrificação e outra na condição TEFLON, ambas à temperatura ambiente). Infelizmente as duas amostras deformadas não obtiveram padrão IQ (Índice de Qualidade) suficiente para efetuar as análises. A alta redução (50%) e a pequena área útil para análise são os motivos que justificam tal falha. Foram feitas duas tentativas de preparação das amostras deformadas e uma para a amostra do anel não deformado, conforme descrição abaixo:

- Ataque eletrolítico da seção longitudinal do anel (Figura 6.17)
- Solução utilizada: 70% etanol; 12% H₂O; 10% Etileno Glicol e 8% HClO₄
- Local: IPEN (Laboratório de Ensaio Eletrolítico) - Com acompanhamento dos técnicos Luiz Carlos (IPEN) e Cláudio (EPMT)
- Aparelho: ELECTROMET 4
- 70% de Speed
- 40 V/s à temperatura de 23°C
- Tempo: 10 segundos de polimento
- As correntes foram: 1ª.Amostra (anel bruto): 2,4 A;
2ª.Amostra (deformado a seco): 2,4 A;
3ª.Amostra (deformado com TEFLON): 1,1 A



Figura 6.17 - Aparelho de ataque eletrolítico e as amostras

A análise da microestrutura do anel na condição inicial é apresentado a seguir:



300.0 μm = 100 steps IQ 9.37...238.676

Figura 6.18 - IQ – Índice de Qualidade (Anel não deformado)

ODF – Figura de Distribuição de Orientação

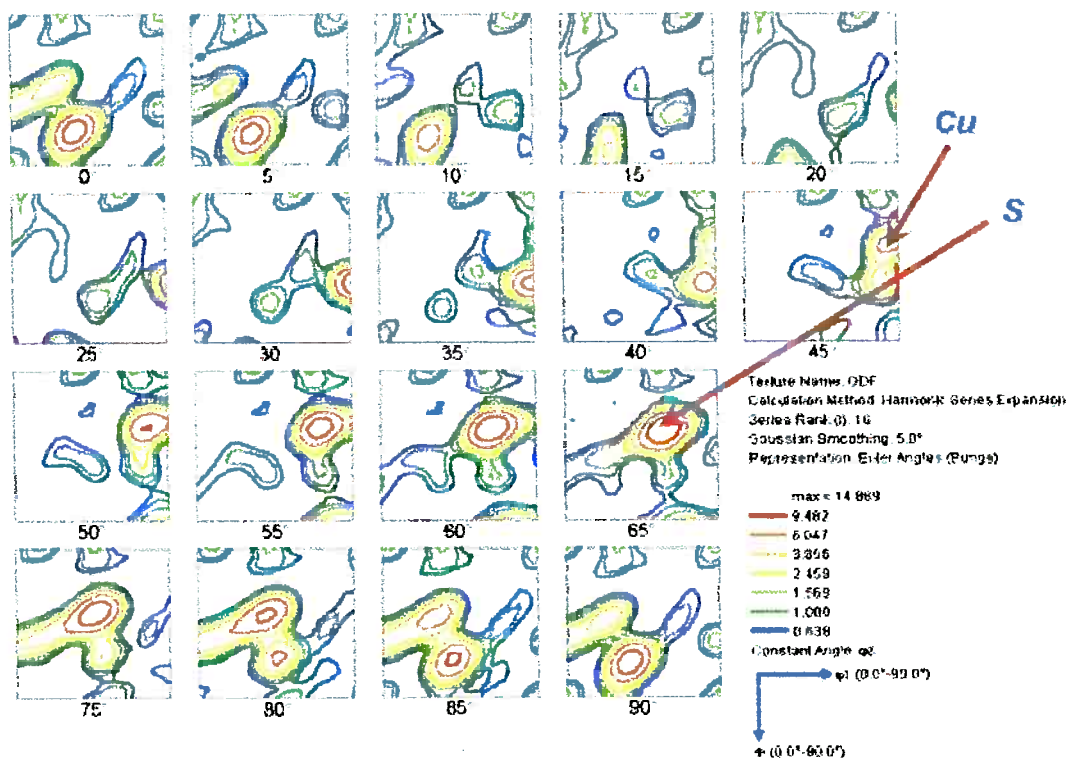


Figura 6.19 - ODF para liga AA6351-T4 – Anel não deformado

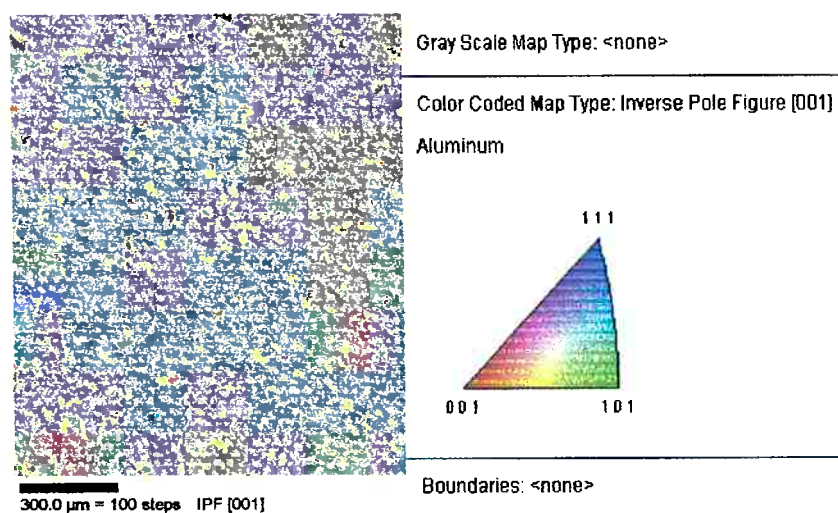


Figura 6.20 - OIM (Mapa de Orientação de Grão) para liga AA6351-T4 – Anel não deformado

Na figura 6.19, observamos a ocorrência de componentes na textura do material:

- $\{112\} \langle 634 \rangle$ para 65° - Componente S

- $\{112\} <111>$ para 45° - Componente **Cu (cobre)**

Outra componente de referência é a componente **Latão**, $\{110\} <112>$, no entanto, ela não se apresenta com relevância no material analisado. A referência do resultado obtido neste tópico é o livro *Textura e Relações de Orientação, “Deformação plástica, recristalização, crescimento de grão”*, 2003 – Cap. 7⁽¹⁷⁾. Os padrões aqui citados (componente Cobre, S e Latão) podem ser vistos e comparados na referência acima. As componentes encontradas na amostra analisada são características do material alumínio.

Na figura 6.20, observamos que a microestrutura do material é constituída por grãos finos. O step foi de 3 μm . A varredura cobriu uma área de 1200 μm em x e 1500 μm em y, com total de número de grãos 17353. Conforme padrão ASTM, o tamanho de grão medido foi de 16.8. Já a média do diâmetro de todos grãos foi de 10.39 μm . A área média do grão foi de 102.71 μm^2 .

Um dos efeitos do tratamento de solubilização (T4) é o refinamento do grão (ver anexo A3). Como a liga estudada é a AA6351-T4, então é coerente o resultado.

O estudo da microestrutura neste trabalho será apenas introdutório. Visto que a continuidade será a análise das amostras após o ensaio de compressão do anel. Sugestão para trabalho futuro.

6.2. Simulação QForm2D/3D

Neste item iremos apresentar os resultados obtidos na simulação QForm para a liga AA2024. Faremos uma análise das imagens e vídeos gerados pela simulação na temperatura de 350°C. Compara-se os parâmetros envolvidos no processo de deformação do anel para as condições de atrito extremas: condição ideal e condição máxima de atrito ($\mu = 0.6$). Os parâmetros que serão discutidos são: evolução do diâmetro interno, tensões, deformações, taxas de deformações, temperatura, fluxo de material, evolução da malha de elementos finitos e linhas de fluxo do material.

Para as simulações sob as temperaturas de 350°C e 500°C, serão apresentados os resultados de forças e dimensão final do anel. As imagens geradas pela simulação na temperatura de 500°C não serão mostradas e discutidas neste trabalho, já que

tornaria o trabalho extenso demais e cansativo. A julgar pelo autor, as informações aqui apresentadas são suficientes para alcançar os objetivos inicialmente propostos.

Como parte deste trabalho acompanha uma mídia CD-R com todos vídeos gerados tanto pelo QForm como pelo COSMOS (formato Windows Media File). A intenção é possibilitar ao leitor uma visualização dinâmica do processo de compressão do anel sob diversas temperaturas e condições de atrito. Os vídeos são auto explicativos no sentido de compreender a movimentação das malhas de elementos finitos e fluxos de material, assim como na distribuição de tensões no interior do anel. Além dos resultados da liga AA2024, são mostrados os resultados da simulação para a liga AA6101 à temperatura de 450°C.

6.2.1. Evolução do diâmetro interno

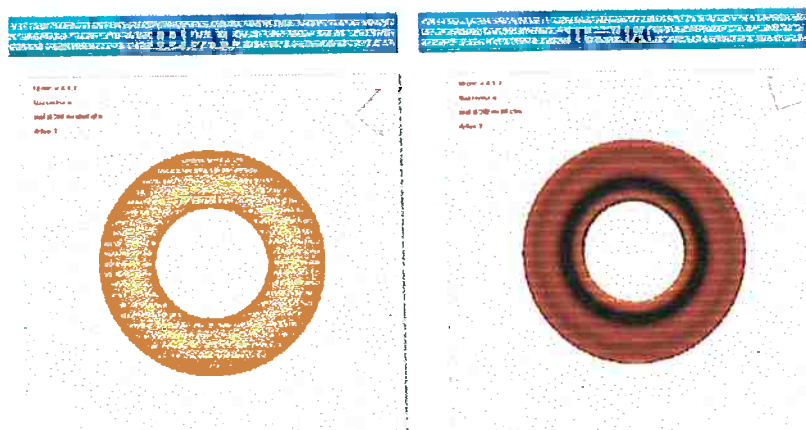


Figura 6.21 – Dimensão inicial do anel

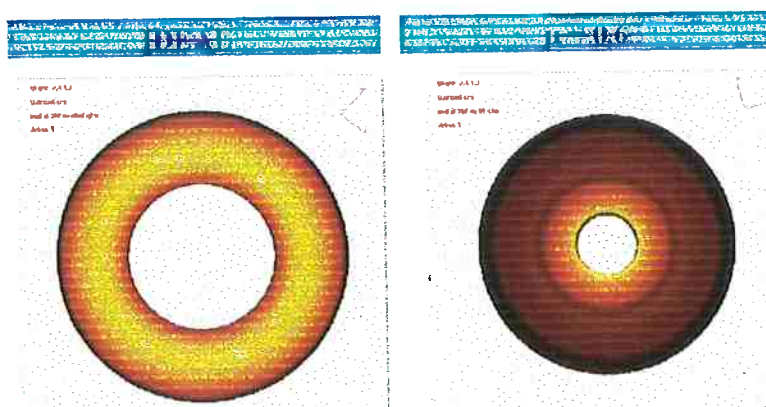


Figura 6.22 – Dimensão final do anel

O diâmetro interno do anel cresce proporcional ao diâmetro externo para condição ideal de atrito. E para a condição $\mu = 0.6$ o diâmetro interno do anel diminui. O modelo teórico proposto anteriormente do ensaio de compressão do anel em relação à variação do diâmetro interno em função da condição de atrito é comprovado na simulação QForm.

Obs. As figuras 6.21 à 6.36 foram geradas a partir de vídeos (formato avi) resultantes das simulações feitas no software QForm.

6.2.2. Fluxo do material

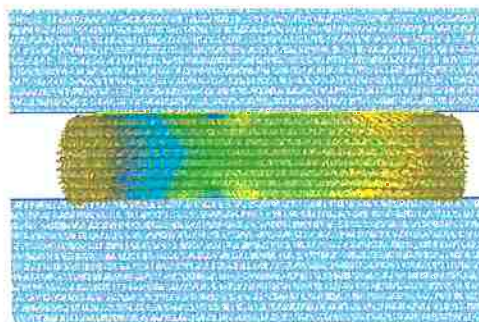
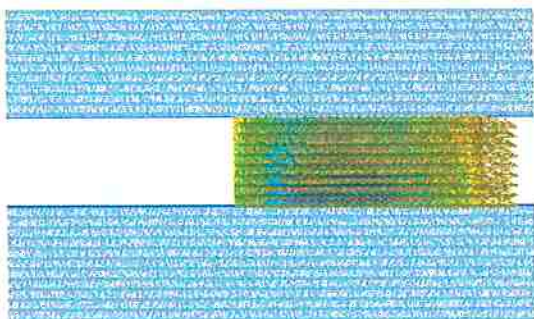


Figura 6.23 – Fluxo do material (Ideal)

Figura 6.24 – Fluxo do material ($\mu = 0.6$)

A direção do fluxo do material na condição ideal segue o deslocamento do diâmetro externo. Para a condição $\mu = 0.6$ o fluxo apresenta duas direções distintas ao longo do anel, há fluxo de material no sentido de diminuição do diâmetro interno e também no sentido de aumento do diâmetro externo.

6.2.3. Linha de fluxo

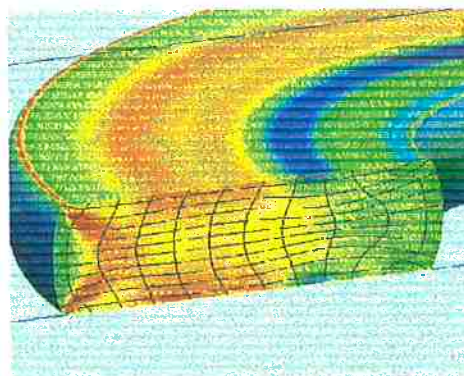
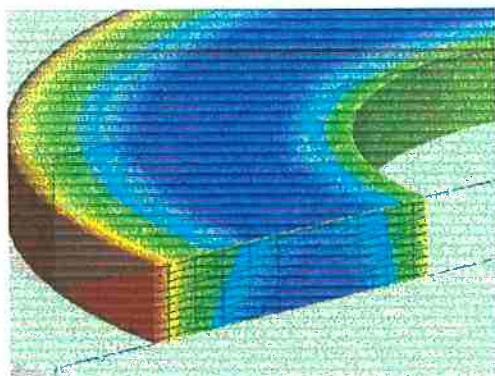


Figura 6.25 – Linhas de fluxo (Ideal)

Figura 6.26 – Linhas de fluxo ($\mu = 0.6$)

Obs. Distribuição de tensões – Cores vermelha e laranja indicam maior concentração de tensão, enquanto que as cores verde e azul indicam menor tensão.

Aparentemente a linha de fluxo na condição ideal não sofre distorção, já para a condição $\mu = 0.6$ as linhas são distorcidas no sentido do fluxo do material.

6.2.4. Malha de elementos finitos

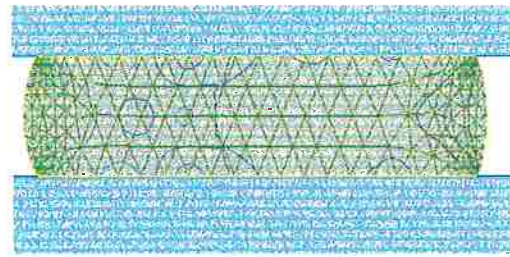
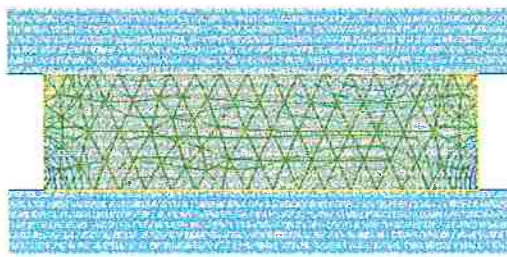


Figura 6.27 – Malha de elementos finitos (Ideal) Figura 6.28 – Malha de elementos finitos ($\mu = 0.6$)

Na condição ideal a distribuição da malha é homogênea. Para a condição de atrito elevado podemos observar maior refino da malha nos extremos do anel: região do diâmetro interno e região do diâmetro externo (o software configura a distribuição dos nós automaticamente).

6.2.5. Distribuição de tensões

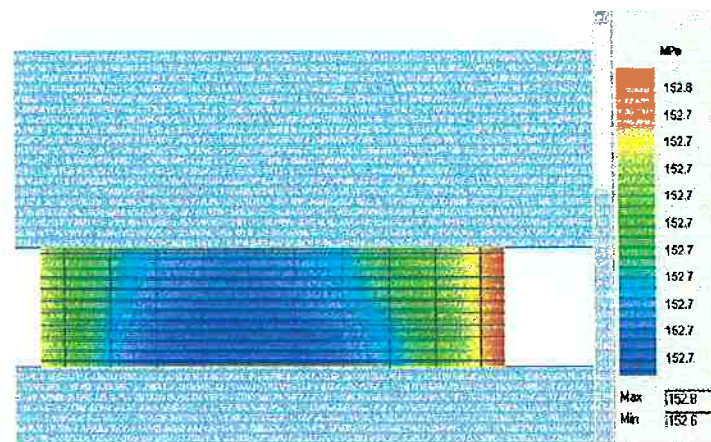


Figura 6.29 – Distribuição de tensões (Ideal)

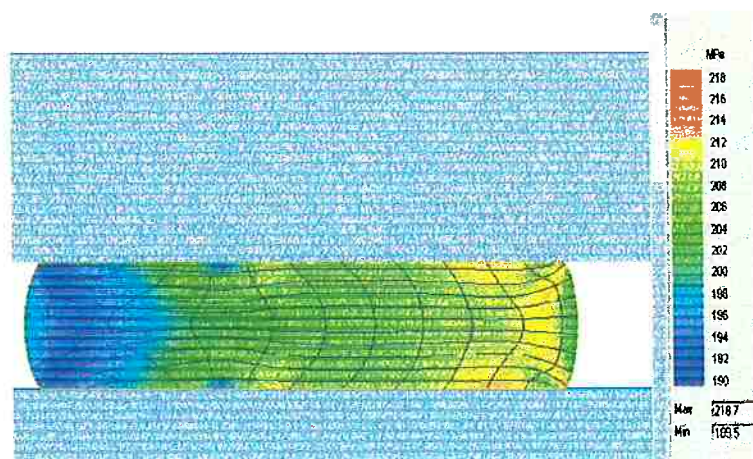


Figura 6.30 – Distribuição de tensões ($\mu = 0.6$)

Na condição ideal verificamos que a distribuição das tensões é homogênea (nas tonalidades de cores, pouco se altera o valor da tensão: de aproximadamente - 152.7 a 152.8 MPa). Já no caso $\mu = 0.6$ há maior variação de tensões ao longo da seção do anel (190 MPa próximo ao diâmetro interno, chegando à 218 MPa próximo à região do diâmetro externo). Durante a simulação observou-se um fenômeno interessante para condição de atrito elevado: nos primeiros momentos do ensaio a região de maior tensão ocorre próximo ao diâmetro interno do anel. Com o decorrer da deformação essa região de máxima tensão é deslocada no sentido do diâmetro externo.

6.2.6. Tensão média

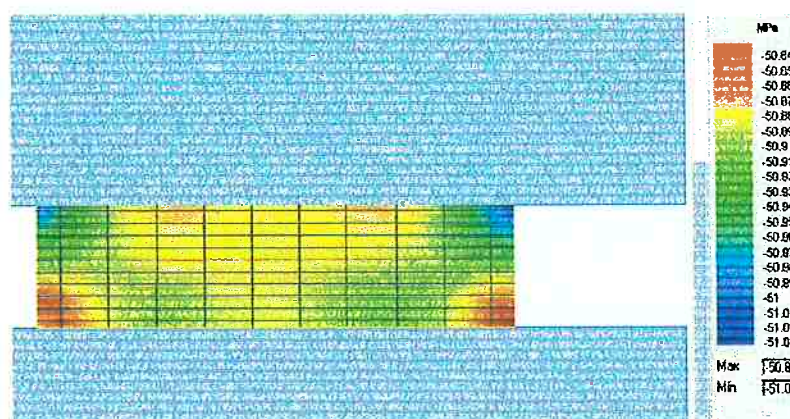


Figura 6.31 – Tensões médias (Ideal)

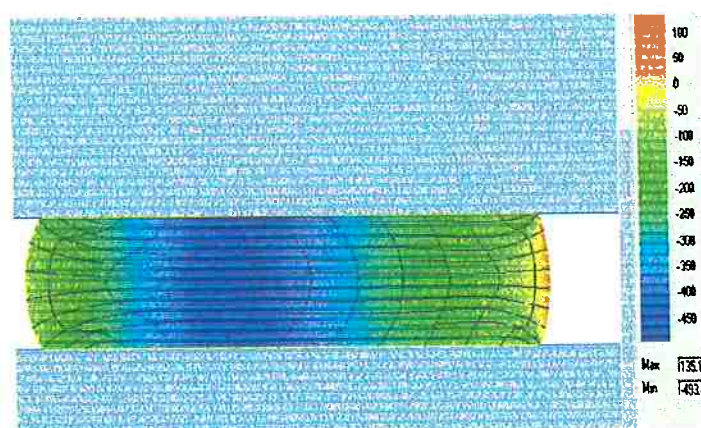


Figura 6.32 – Tensões médias ($\mu = 0.6$)

Na condição ideal verificamos que as tensões médias variam pouco (aproximadamente 50.83 a 51.03 MPa). Já na condição de atrito elevado teremos uma tensão média variando entre -493.4 a 135.1 MPa, que indica que a distribuição é bem mais heterogênea se comparado com a condição ideal.

6.2.7. Temperatura

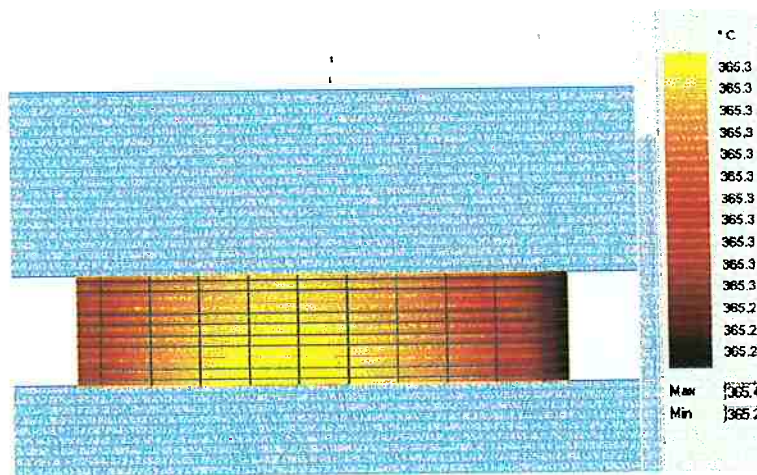


Figura 6.33 – Temperatura (Ideal)

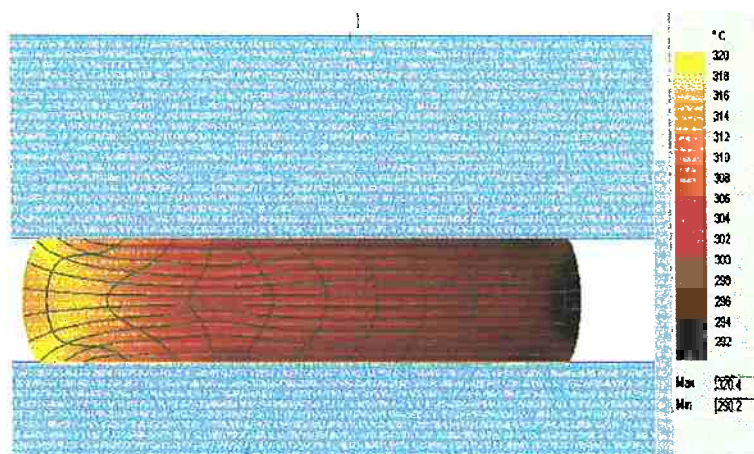


Figura 6.34 – Temperatura ($\mu = 0.6$)

A simulação indica que para atrito ideal a distribuição da temperatura é aproximadamente homogênea, entre 365,2 – 365,3°C (a troca de calor com o ferramental e o ar é aparentemente homogêneo). Já na condição de atrito elevado temos uma distribuição da temperatura mais heterogênea (aproximadamente 292 – 320°C), outro aspecto importante mostrado na simulação é a maior taxa de resfriamento na região do diâmetro externo. Na região do diâmetro interno encontram-se menores taxas de resfriamento.

6.2.8. Taxa de deformação efetiva

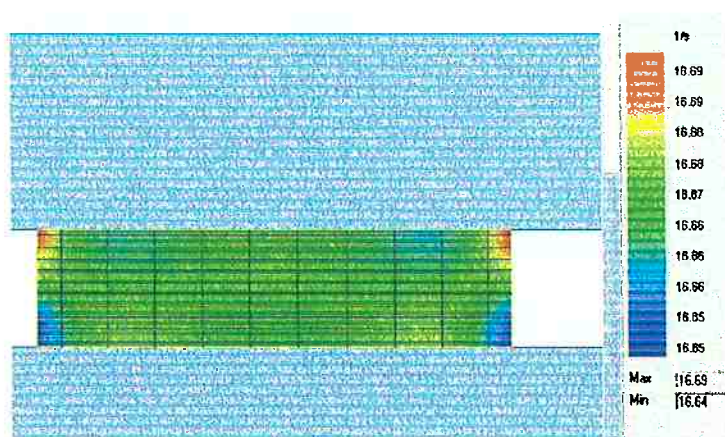


Figura 6.35 – Taxa de deformação efetiva (Ideal)

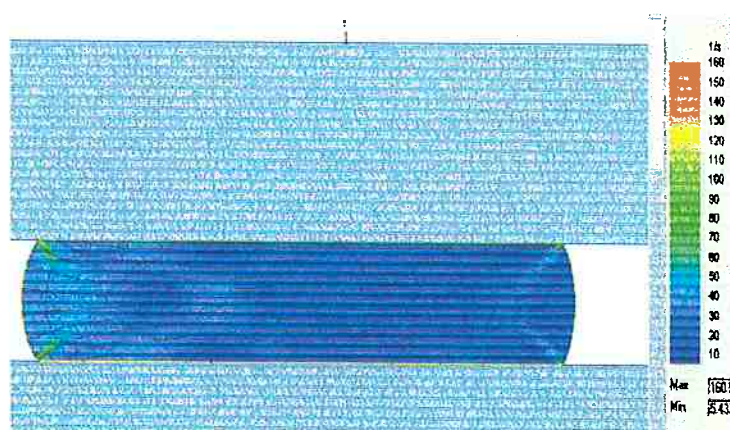


Figura 6.36 – Taxa de deformação efetiva ($\mu = 0.6$)

Tanto a intensidade da taxa de deformação efetiva como sua variação ao longo da seção do anel são maiores na condição $\mu = 0.6$ ($10 - 160 \text{ s}^{-1}$) em relação à condição ideal de atrito (aproximadamente $16,05 - 16,09 \text{ s}^{-1}$).

No anexo F, é mostrada os resultados na forma gráfica de força em função do deslocamento. A partir das forças máximas e diâmetros internos e externos dos anéis deformados (ver o procedimento em anexo F) encontramos os resultados desejados conforme tabela 6.4 para a liga AA2024 em duas temperaturas diferentes de simulação.

Resultado das Simulações do Ensaio de Compressão do Anel no QForm2D/3D						
μ (Coef. atrito)	T (°C)	Load (N)	d _{interno} (mm)	D _{externo} (mm)	A _{final} (mm ²)	σ (MPa)
IDEAL	350	232700	12,7	25,4	1524	153
	500	145200	12,7	25,4	1524	95
0.3	350	375000	6,8	23,1	1533	245
	500	215000	6,8	23,4	1569	137
0.6	350	603000	5,1	22,8	1553	388
	500	432500	5,2	22,4	1495	289

Tabela 6.4 – Resultados simulações QForm para liga AA2024

Como nosso objetivo é comparar com o resultado da simulação do programa COSMOS então, faremos uma extrapolação à temperatura ambiente sob a condição ideal de atrito.

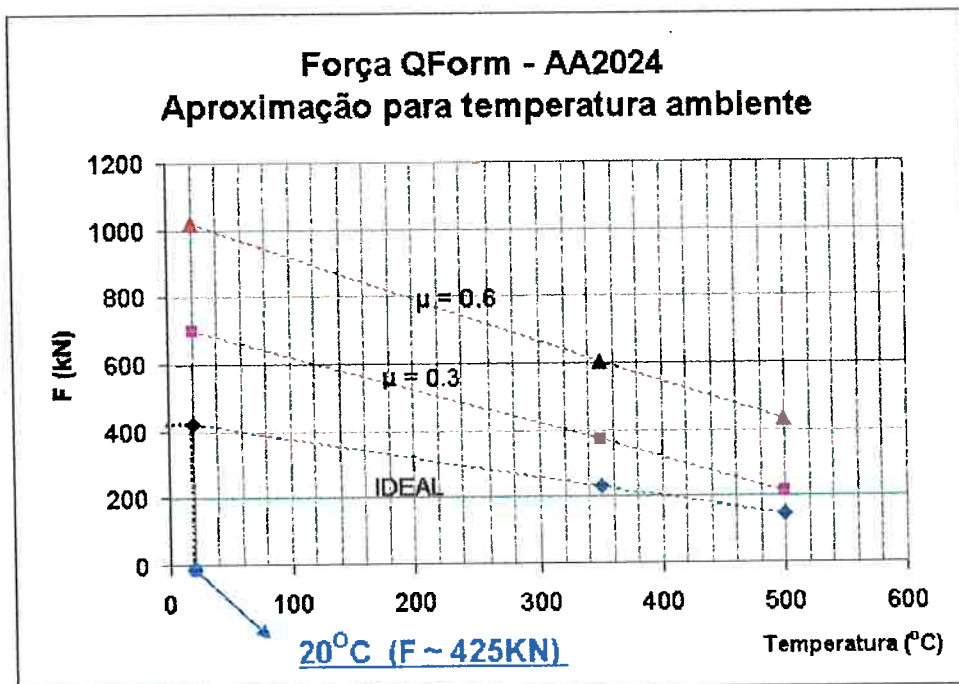


Figura 6.37 – Extrapolação da força QForm para temperatura ambiente

6.3. Resultados da Simulação COSMOSTM

Para a obtenção da força de recalque utilizamos a tensão de Von Mises e a área deformada do anel. Para o cálculo da área final do anel levantamos a curva de deslocamento na direção x. Dessa forma, encontramos o diâmetro interno e o diâmetro externo do anel deformado, possibilitando calcular a área final (ver fórmula no item 5.3).

6.3.1. Simulação para liga AA2024

Através do deslocamento medido na direção x, para os diâmetros internos e externos do anel deformado, determinou-se a força final. Utilizou-se a tensão de Von Mises calculada pelo COSMOS:

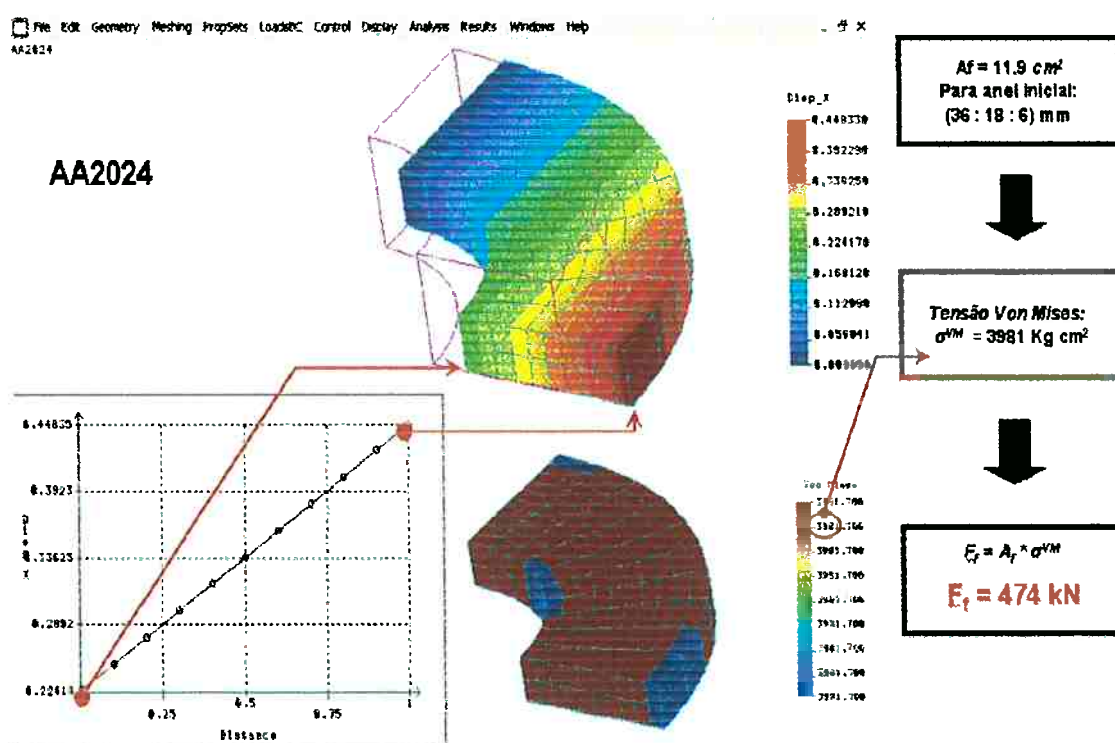


Figura 6.38 – Resultado da força COSMOS para a liga AA2024

A força resultante na direção z foi de aproximadamente 474 kN. Ela será comparada com a força resultante do QForm para temperatura ambiente e atrito zero no item discussão dos resultados.

6.3.2. Simulação para liga AA6111-T4

Analogamente, obtemos a força para liga AA6111-T4. A força obtida foi de aproximadamente 130 kN e será comparada com a força experimental para atrito zero e temperatura ambiente.

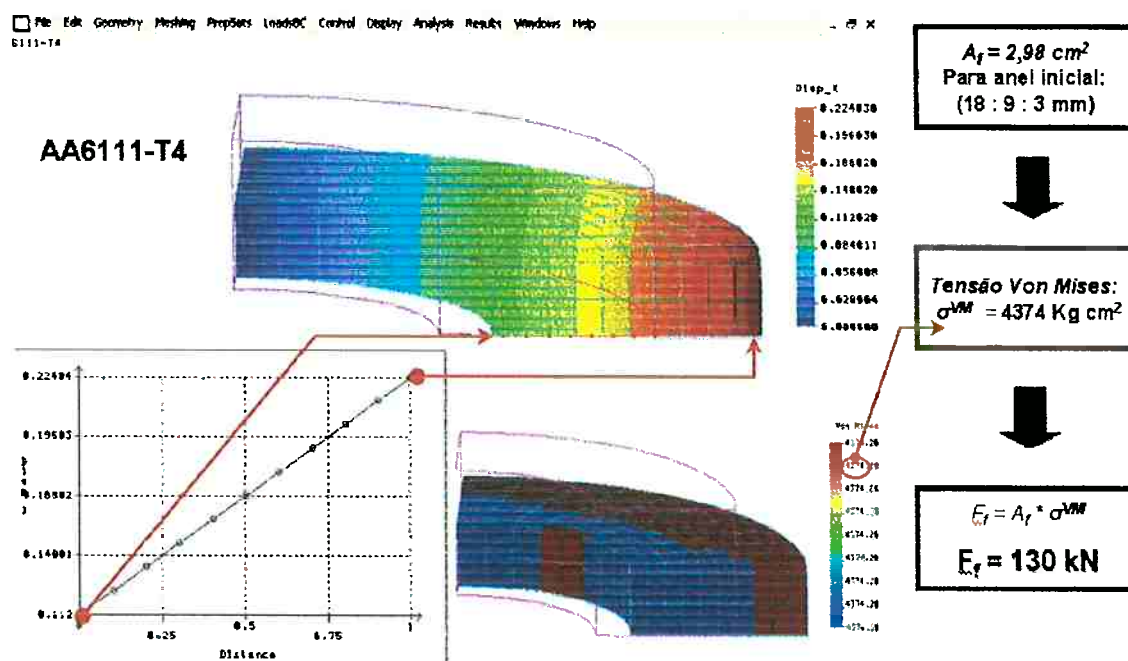


Figura 6.39 – Resultado da força COSMOS para a liga AA6111-T4

Na figura 6.40 mostramos o comportamento da força resultante aplicada ao anel para o material AA2024 (temperatura ambiente e atrito zero). O tom avermelhado simboliza as maiores intensidades da força aplicada. No início da simulação observou-se que as maiores intensidades se concentravam na região central do anel. Com o decorrer do ensaio essa região foi deslocada para região próxima do diâmetro externo. Como vimos na simulação do QForm, o sentido do fluxo de material e da tensão de maior intensidade também seguem este fluxo.

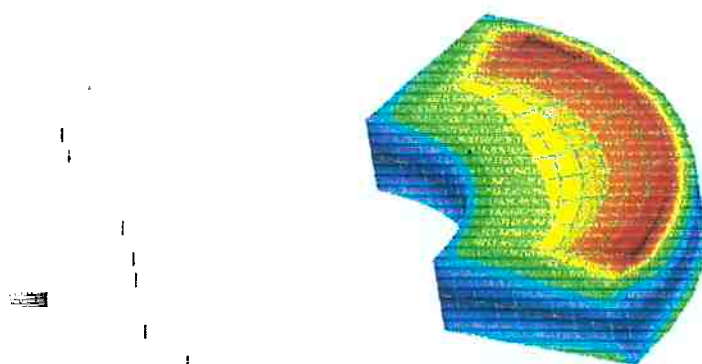


Figura 6.40 – Distribuição de força na superfície de contato anel – matriz

Obs. As cores vermelho e amarelo indicam maior intensidade da força (em módulo) enquanto as cores azul e verde indicam menores intensidades de forças.

6.3.3. Curva de calibração COSMOS para condição ideal

Através da simulação das ligas AA6111-T4 e AA2024, conseguimos levantar a curva de calibração na condição de atrito ideal. É possível obter as variações de diâmetros internos do anel para cada passe de redução. Isto é, podemos medir o deslocamento do diâmetro interno na direção x, para reduções 10, 20 30, 40 e 50 %. Para cada liga, obtivemos a curva de calibração na condição ideal de atrito:

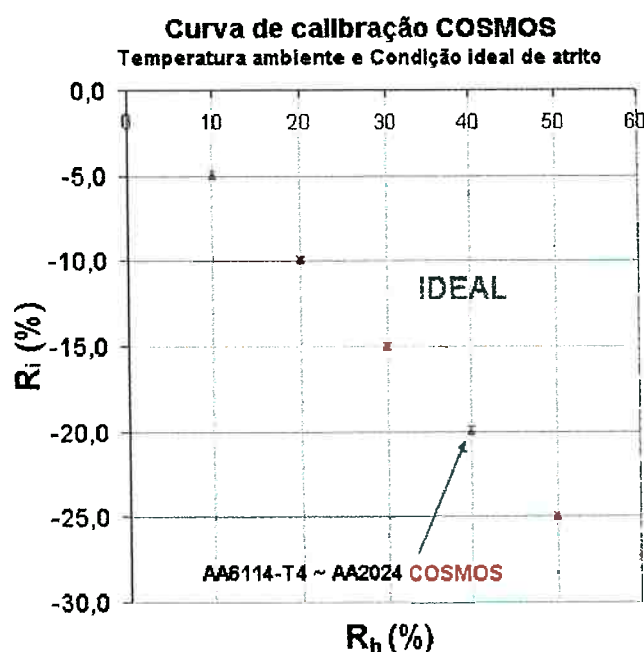


Figura 6.41 - Curva de calibração COSMOS – Ideal (T_{amb})

No gráfico da figura 6.41 verificamos que as curvas de calibração na condição ideal e temperatura ambiente para as ligas AA2024 e AA6111-T4 são muito próximas. Verificamos coerência com o resultado de HASAN⁽³⁾, cujo trabalho sugere que para a condição ideal a variação da curva de calibração de materiais diferentes é pequena. No entanto, não podemos afirmar que a curva obtida via COSMOS é a mais viável na aplicação do problema. É preciso obter dados experimentais da curva de calibração de ambas ligas e então compará-los com os simulados. No entanto, seguiremos a linha de raciocínio sugerida por HASAN, já que utilizaremos uma curva de calibração medida por ALTAN⁽¹⁾ para a liga AA1100, sendo que a liga de trabalho é AA6351-T4 (experimental).

Como neste trabalho não será desenvolvido um modelo COSMOS para o ensaio de compressão do anel na condição de atrito diferente de zero (ideal), limitaremos nossa análise apenas para o caso de atrito ideal e temperatura ambiente.

7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

7.1. Relação entre força e fator de atrito

Para mesma geometria do anel (6:3:1), composição do material, condições de ensaio e temperatura ambiente, prevemos que há uma tendência do aumento do coeficiente de atrito favorecer ao aumento da força necessária para a deformação do anel. Como podemos observar no gráfico da figura 7.1 as duas seqüências de ensaios (condição superficial - seco e condição - TEFLON) apresentam o comportamento sugerido acima. Deste modo, é possível prever a força de conformação baseado na determinação do fator de atrito.

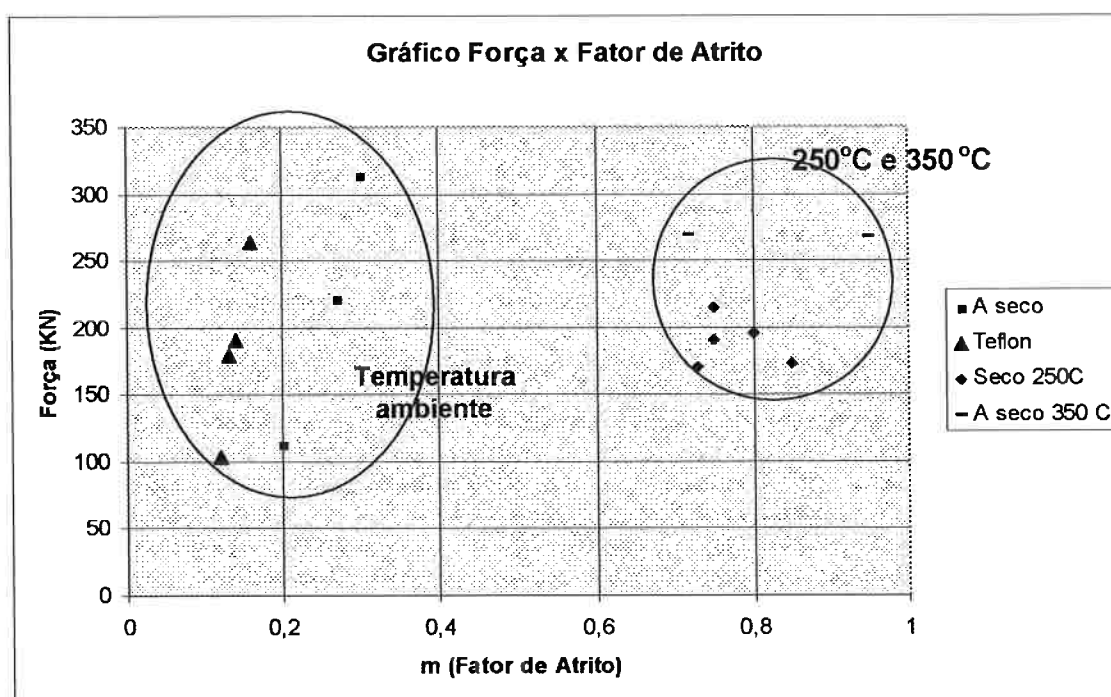


Figura 7.1 – Gráfico da força experimental em função do fator de atrito

Nos ensaios realizados a altas temperaturas, não podemos sugerir uma relação entre o fator de atrito e a força de conformação. Como já discutido por vários autores anteriormente, há a dificuldade de se prever um bom resultado na condição de alta temperatura devido à variação das propriedades do material.

Um efeito que podemos citar devido à variação da temperatura durante o ensaio, é o resfriamento da superfície de contato matriz com o anel. Com o resfriamento da temperatura, a tensão de cisalhamento (propriedade do material) aumenta. Conforme o critério de Von Mises, (tensão de cisalhamento diretamente proporcional ao fator de atrito), aumentando a tensão de cisalhamento há aumento do fator de atrito. De fato, isto foi previsto, já que logo após os ensaios verificou-se a alta taxa de resfriamento do material para com o meio (troca de calor com o ar e o ferramental). O que era previsto já que o anel é pequeno (altura de 3 mm). Em relação ao fator de atrito, comprovou-se com os resultados (plotados na curva de calibração) que para altas temperaturas (250°C e 350°C) o fator de atrito é elevado. O material aderiu à matriz em alguns ensaios a quente.

Complementando, durante a deformação o material sofre restauração em sua microestrutura (um misto de recristalização e recuperação). Que por sua vez modifica as propriedades do material (ver item 3.6).

7.2. Fator de atrito x taxa de deformação verdadeira

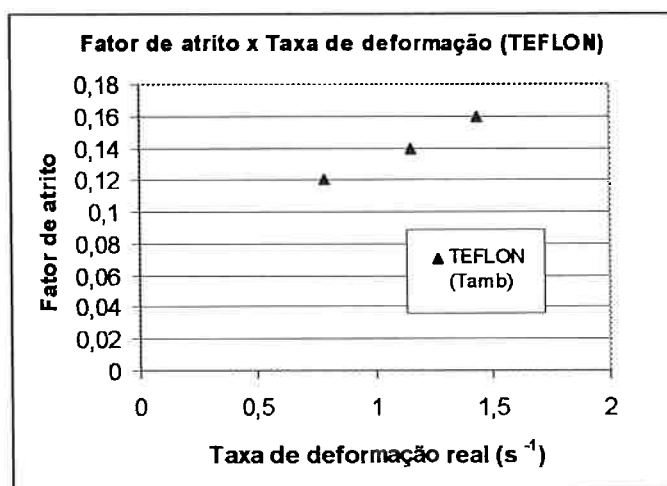


Figura 7.2 - Gráfico Fator de atrito x Taxa de deformação verdadeira

Pela figura 7.2 observa-se uma relação entre a taxa de deformação verdadeira e o fator de atrito. Isto é, com o aumento da taxa de deformação há aumento do fator de atrito. Segundo o experimento de HWU ⁽¹⁹⁾, utilizando TEFLON também como lubrificante na interface matriz / anel, o aumento da taxa de deformação eleva o fator de atrito pois diminui o tempo de deformação do filme. Quanto maior o tempo para

deformar o filme de TEFLON maior o fluxo do material sobre a interface. O aumento da deformação, acarreta o aumento da taxa de deformação para um mesmo intervalo de tempo, sendo que para altas reduções o filme é reduzido a uma espessura muito pequena, o que dificulta a lubrificação no contato, aumentando assim o fator de atrito.

7.3. Comparação de resultados: QForm2D/3D e COSMOSTM

Condições Método	Material	Geometria (mm)	Temp. (°C)	Rh (%)	Tax.deform. (1s ⁻¹)	Condição de atrito	Força final (KN)
QFORM2D/3D	AA2024	6:3:1 ($h_o = 6 \text{ mm}$)	Ambiente	60%	1	IDEAL	425
COSMOS TM	AA2024	6:3:1 ($h_o = 6 \text{ mm}$)	Ambiente	50%	0.1 - 1	IDEAL	474
						ERRO (%)	12

Figura 7.3 – Comparação da força QForm e COSMOS (T_{amb} – AA2024)

Os resultados obtidos pela simulação apresentam um erro de aproximadamente 12%. Como já comentados anteriormente, a entrada de dados é um fator fundamental para se atingir resultados mais precisos e condizentes com a realidade. Para a liga AA2024 (Takuda, Mori) ⁽¹⁵⁾ no modelo COSMOS há boa precisão de entrada já que a medida é experimental..

Outro aspecto importante é a aproximação feita para a temperatura ambiente. Extrapolando os valores de força obtidos nas temperaturas 350°C e 500°C, aproximamos a força de recalque do anel simulado para a temperatura ambiente (atrito zero). Essa aproximação não pode ser considerada um valor preciso, no entanto, como no COSMOS houve a dificuldade de se simular em altas temperaturas e em condições de atrito variados optamos em fazer essa tentativa de aproximação, sendo válido já que os valores comparados de certo modo são coerentes.

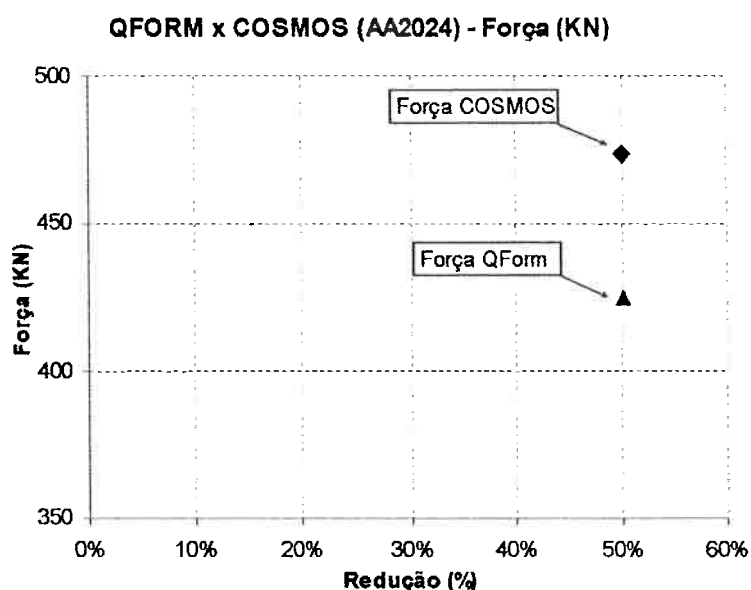


Figura 7.4 – Gráfico da força QForm e COSMOS (T_{amb} – AA2024)

7.4. Comparação de resultados: Experimental e COSMOSTM

Coletando os resultados das simulações, obtemos o quadro da figura 7.5. Para as mesmas condições (ou próximas) observamos que houve validação do modelo na comparação da força de recalque.

Para a tolerância de 5% de erro, devemos considerar alguns aspectos importantes:

- Preparação do corpo de prova: os anéis deformados a frio não foram lixados. O único cuidado a ser tomado foi à limpeza com solução de acetona das matrizes antes de cada novo ensaio.
- Não foi considerado a variação da taxa de deformação e o aumento do atrito no decorrer do ensaio. Quando o anel é deformado a área de contato é aumentada. Com o aumento da área a força requerida aumenta, assim como as tensões de cisalhamento na superfície.
- A determinação do fator de atrito, através da curva de calibração aplicada originalmente para ligas AA1100, pode conter erros. Como vimos no item 3.4.2, em curvas de calibração, há mudança da curva com a variabilidade de materiais. Por outro lado, experimentos feitos por HASAN ⁽¹⁾ demonstraram

que para a condição ideal de atrito e temperatura ambiente, pouco varia a curva de calibração em função dos materiais.

Condições Método	Material	Geometria (mm)	Temp. (°C)	Rh (%)	Tax.deform. (1s ⁻¹)	Condição de atrito	Força final (KN)
EXPERIMENTAL	AA6351-T4	6:3:1 ($r_0 = 3 \text{ mm}$)	Ambiente	50%	0.5	IDEAL	124
COSMOSM™	AA6111-T4	6:3:1 ($r_0 = 3 \text{ mm}$)	Ambiente	50%	0.1 - 1	IDEAL	130
ERRO (%)							5

Figura 7.5 – Comparação da força COSMOS e experimental
(T_{amb} – AA6111-T4 e AA6351-T4)

Experimental x COSMOS - Força (KN)

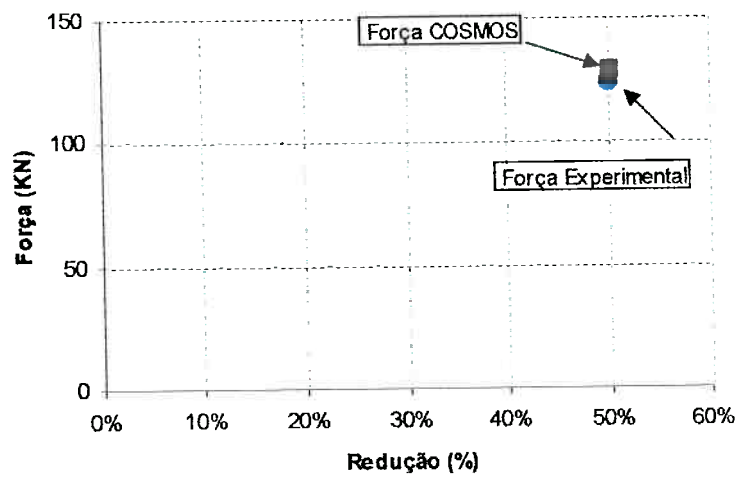


Figura 7.6 – Gráfico da força COSMOS e experimental (T_{amb} – AA6111-T4 e AA6351-T4)

8. CONCLUSÃO

- Foi desenvolvido ensaio de anel para determinação do fator de atrito em ligas de alumínio para temperaturas ambiente, 250°C e 350°C. Os resultados obtidos são apresentados na tabela abaixo:

Liga	Temperatura	Condição de lubrificação	Fator de atrito
AA6351-T4	Ambiente	Seco	$0,2 \leq m \leq 0,3$
AA6351-T4	Ambiente	TEFLON	$0,14 \leq m \leq 0,16$
AA6351-T4	250°C	Seco	$0,7 \leq m \leq 1,0$
AA6351-T4	350°C	Seco	$0,7 \leq m \leq 1,0$

Tabela 8.1 – Fator de atrito

- Na comparação com os resultados experimentais o método é viável para temperatura ambiente, nas condições de lubrificação a seco e com fita de TEFLON.
- Com os resultados do ensaio conclui-se que aparentemente o fator de atrito é proporcional à força aplicada para temperatura ambiente.
- Para o teste do anel a quente não foi possível estabelecer uma relação entre a força aplicada com o fator de atrito medido.
- Na simulação com FEM, para o material AA2024, houve validação do modelo. Os resultados do QForm foram coerentes com os resultados do COSMOS. Só foi possível fazer a comparação no caso da condição ideal de atrito e temperatura ambiente. Houve dificuldade em se criar um modelo nas condições com atrito no programa COSMOS.
- Escolheu-se a princípio fazer toda análise utilizando a condição ideal de atrito e temperatura ambiente devido à coerência de resultados encontrados na literatura e em publicações consultadas. O objetivo foi, estabelecer um estudo inicial nas condições as quais encontram-se resultados coerentes na literatura. Em uma segunda etapa, estabeleceu-se o estudo do teste do anel para temperaturas elevadas e fator de atrito diferente de zero. No entanto, esta segunda etapa não foi concluída, ficando como sugestão para trabalho futuro.

9. CONTINUIDADE DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho foram alcançados de forma coerente para o autor. Os conceitos e a prática estabelecida neste trabalho foram introdutórios para um trabalho futuro mais completo: estudo do atrito aplicado aos processos de conformação mecânica de metais.

As dificuldades encontradas neste trabalho sugerem um enfoque em trabalhos futuros relacionados ao tema:

- Escolha de uma liga para trabalho que detenha de maiores informações e resultados experimentais para comparação;
- Levantamento da curva de calibração pelo método numérico utilizando software de simulação. A referência da curva de calibração é muito importante, lembrando que a variabilidade dos métodos utilizados, o material e a geometria influem no resultado a ser obtido.
- Escolha de anel com geometria 6:3:2 e aplicação de lubrificantes no ensaio de compressão do anel a quente.
- Desenvolver modelo no software COSMOSTM com atrito diferente de zero.
- Desenvolver modelo no software QForm a temperatura ambiente.

ANEXO A - LIGAS DE ALUMÍNIO

A1 – Séries 2XXX e 6XXX

A2– Tabelas de composição química e propriedade mecânica

A3– Tratamento térmico T4

A1- Séries 2XXX E 6XXX

A introdução de elementos de liga no alumínio tem um efeito importante nas características de encruamento da liga, mesmo quando não confere a capacidade de endurecimento por precipitação. A adição de elementos como magnésio e manganês, por exemplo, permite obter maiores taxas de endurecimento por deformação, devido à maior densidade de discordâncias. ⁽¹⁶⁾

Na tabela 3.3.1 podemos conferir os elementos de liga mais importantes para cada série.

GRUPO	PRINCIPAL ELEMENTO DE LIGA
1XXX	Alumínio não ligado (99,0%)
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outros elementos
6XXX-T4	Solubilizado e envelhecido naturalmente

Tabela A1 – Ligas de alumínio - Principal elemento de liga

Ligas do sistema Al – Cu – Mg (AA2024)

As ligas do sistema Al-Cu, conhecidas como ligas da série 2XXX (trabalhadas) e 2XX.X (fundidas) na classificação da Aluminum Association, são as ligas de alumínio de desenvolvimento mais antigo, sendo que o seu surgimento data do início do século XX, quando Alfred Wilm, na Alemanha, descobriu o fenômeno

de endurecimento por precipitação. ⁽²⁴⁾ Essas ligas até hoje são conhecidas como duralumínio.

A liga duralumínio apresenta teor de magnésio relativamente alto (também denominadas Al-Cu-Mg), entre 1% e 1,5 %. ⁽¹⁶⁾

De um modo geral as ligas Al-Cu (-Mg) apresentam elevada resistência mecânica após tratamento térmico de endurecimento por precipitação, entretanto, apesar dessa vantagem, apresentam algumas desvantagens quando comparadas com outros tipos de ligas de alumínio, que vão desde a resistência à corrosão relativamente baixa e a conformabilidade limitada (são pouco adequadas a processos com elevada deformação, como a extrusão, por exemplo) até a soldabilidade igualmente restrita (em geral são soldadas somente por processos de resistência elétrica). ⁽²³⁾

Ligas do sistema Al – Mg - Si (AA6111; AA6351; AA6101)

Nas ligas da série 6XXX o magnésio e o silício combinam-se para formar o composto intermetálico Mg_2Si , que antes de atingir o equilíbrio no superenvelhecimento, é o responsável pelo endurecimento dessas ligas. A solubilidade da fase Mg_2Si (beta) na matriz rica em alumínio (alfa) aumenta com a elevação da temperatura. O tratamento de solubilização e envelhecimento artificial controlado permite a precipitação da segunda fase (beta) a partir de uma solução sólida supersaturada. Isso favorece a formação de precipitados finos e uniformemente distribuídos, que acarretam um substancial aumento na dureza do material. ^(16,25,26)

As ligas da série 6XXX apresentam duas características que justificam o seu uso mais freqüente quando comparadas às demais ligas de alumínio: a capacidade de endurecimento por precipitação (são termicamente tratáveis) aliada à facilidade de serem extrudadas. Estas ligas apresentam elevada ductilidade, que permite o seu uso em operações que acarretam elevados graus de deformação, como a extrusão. Por esse motivo, as ligas Al-Mg-Si representam a maior parte do volume de ligas de alumínio extrudadas. ⁽²⁷⁻³²⁾

Além da maior facilidade de serem trabalhadas, quando comparadas com as demais ligas termicamente tratáveis (Al-Zn-Mg e Al-Cu) ^(27,28), as ligas Al-Mg-Si apresentam maior soldabilidade ⁽³³⁾ e maior resistência à corrosão ⁽¹⁶⁾ do que as demais ligas termicamente tratáveis (Al-Zn-Mg e Al-Cu). Assim, as ligas da série 6XXX são as mais utilizadas comercialmente.

A2 – TABELAS

Composição química das ligas de alumínio (% em peso)							
	Si	Mg	Cu	Mn	Fe	Cr	Al
1100	--	--	0.12	--	--	--	> 99.0
2024	--	1.5	4.4	0.6	--	--	balan.
5182	--	4.8	--	0.8	--	0.15	balan.
5754	0.2	3.1	0.04	0.25	--	--	balan.
5182+Mn	0.07	4.05	0.03	1.26	0.22	--	balan.
6061	0.6	1.0	0.28	--	--	0.2	balan.
6101	0.5	0.6	--	--	--	--	balan.
6111-T4	0.5-0.9	0.6	--	--	--	--	balan.
6351-T4	1.0	0.6	--	0.6	--	--	balan.

Tabela A2 - Composição química de algumas ligas de alumínio

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE LIGAS DE ALUMÍNIO		
Tensile Strength (MPa)		
LIGA	Ultimate Strength	Yield Strength
2024-0	185	75
2024-T4	472	325
6061-0	125	55
6061-T4 (máx.)	179 - 240	110 - 145
6351-T4 (máx.)	185 - 250	115 - 150

Tabela A3 - Propriedades mecânica de algumas ligas da série 2xxx e 6xxx

A3 – TRATAMENTO DE SOLUBILIZAÇÃO E ENVELHECIMENTO NATURAL (T4)

O tratamento de solubilização e envelhecimento tem por objetivo a obtenção de precipitados finos, que ao mesmo tempo em que sejam grandes suficientes para agir como obstáculos ao movimento das discordâncias, endurecendo a liga, sejam por outro lado pequenos o suficiente para manter a coerência com a matriz, fundamental para manter o efeito de endurecimento. ^(16,23)

A solubilização, ao garantir a obtenção de uma solução sólida (dissolução dos elementos de liga) mantida à temperatura ambiente de modo instável por meio de resfriamento rápido, permite um melhor controle do crescimento dos precipitados durante o posterior envelhecimento, através do surgimento de discordâncias de interface entre o precipitado e a matriz, que está associada a uma pequena queda de dureza. A diferença básica entre o envelhecimento artificial e o envelhecimento natural (à temperatura ambiente), além dos níveis de dureza que podem ser atingidos (bem mais altos para o envelhecimento artificial), é a cinética do processo: enquanto o pico de dureza no envelhecimento artificial pode ser obtido em algumas horas (tanto mais rápido quanto mais alta a temperatura), no envelhecimento natural o máximo de dureza (inferior ao obtido em forno) somente acontece após uma semana ou mais de manutenção do material à temperatura ambiente. ^(16,23)

No tratamento “T4” o material é solubilizado e envelhecido naturalmente até uma condição substancialmente estável. Aplica-se a produtos que não são trabalhados mecanicamente após solubilização, ou nos quais o efeito do trabalho a frio no endireitamento ou a planificação pode não ser reconhecido nos limites de propriedades mecânicas. ^(16,23)

ANEXO B - MÉTODO DE ENSAIO E EXECUÇÃO DA MÁQUINA DE ENSAIO EMIC ⁽³⁴⁾

Listaremos alguns cuidados e procedimentos importantes na preparação da máquina de ensaio EMIC: ⁽³⁴⁾

1. Tensão de alimentação deve ser de 220 V.
2. Verificar a conexão correta dos seguintes cabos:
 - Cabo de comunicação serial: troca de informação entre o microcomputador e a máquina;
 - Adaptador serial: Permite adaptação do cabo serial à saída serial com conector DB9;
 - Cabo de extensão de célula: Interliga a célula à placa de instrumentação da máquina;
 - Cabo de alimentação: Interliga a rede de energia à entrada da máquina.

Obs. Ver layout do esquema de conexões. ⁽³⁴⁾

3. Ligar, sempre, primeiramente o microcomputador.
4. Nunca conecte ou desconecte os cabos com o equipamento ligado, desligue-o sempre que for fazer este tipo de operação.
5. Carregar o programa Tesc (carregamento automático do VirMaq);
6. O ensaio poderá ser executado via teclado do microcomputador ou painel da máquina de ensaio.
7. Para fixar limites superiores e inferiores da máquina (no painel de operação):
 - Pressione o quadrado <2ª. Função> e depois o quadrado roxo <RETORNO> (estará acionando a opção “Fim de Curso”);
 - Caso o Led do indicador <Parada> estiver piscando, significa que a máquina está sem nenhum limite para se movimentar. Neste caso movimente a travessa para cima <Subida Rápida> ou <Subida Lenta> até limite que desejar.
 - Aperte novamente <2ª. Função> e depois <RETORNO>, o Led parará de piscar, significando que foi limitado o deslocamento da máquina para cima dessa posição.

- Agora para determinar o limite inferior, abra novamente o fim de curso <2ª. Função> + <RETORNO>;
- Movimente a travessa para baixo até a posição que desejar (<Descida rápida> ou <Descida lenta>).
- Pressione novamente <2ª. Função> + <RETORNO>, o Led deverá parar de piscar o que significa que foi estabelecido o limite inferior de movimentação da máquina.
- Caso seja necessário mudar de posição dos limites, pressione <2ª. Função> + <RETORNO> movimente a máquina no sentido desejado e novamente aperte os mesmos botões.

Montar método de trabalho

Para realizar o ensaio é preciso configurar um método de trabalho. A sequência de figuras a seguir mostrará o procedimento que foi utilizado:

1. Salvar um método e montar o método para o ensaio de compressão do anel:

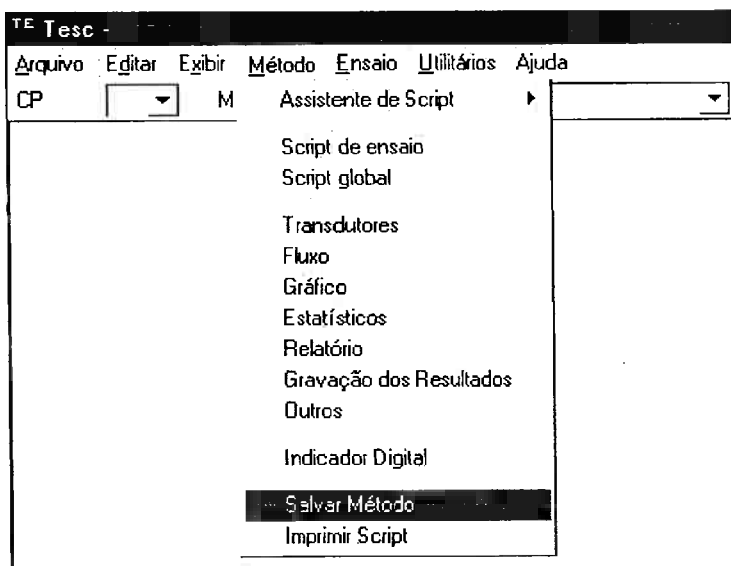


Figura B1. Salvar método Tesc

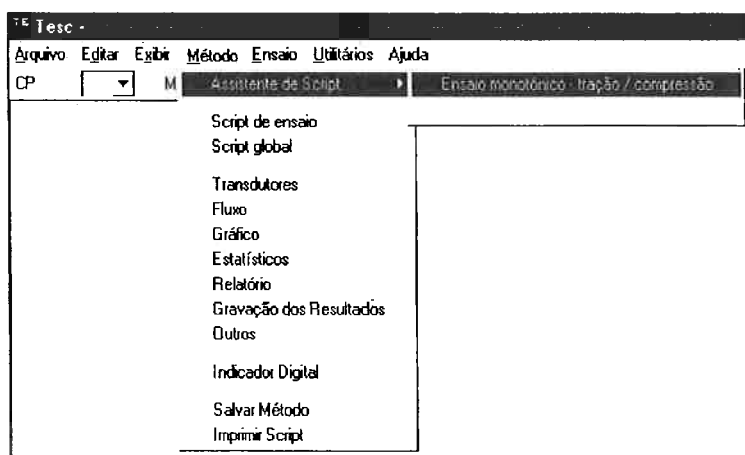


Figura B2. Montar método de Ensaio de Compressão

2. Na entrada de dados (figura B3) foi inserido o valor da área inicial do anel. Uma outra opção é não inserir o valor da área e marcar a opção “editável”, desse modo antes de se iniciar cada ensaio, é mostrada uma mensagem solicitando a entrada da área (sugestão: utilizar essa opção na execução de testes por passes em um mesmo corpo de prova ou para diferentes corpos de provas mantendo a mesma configuração do método de trabalho).

Figura B3. Entrada de dados

3. Solicita-se o parâmetro de saída nos resultados (figura B4).

Resultado Desejado

Parâmetro	Evento
Área	
Compr.Base	
Força	Força Max
Força/Larg.	Ruptura
Tensão	Colapso
Força/Gramat	Escoam. ES
Deformação	Ponto PT
Def.Especif.	
Energia	
Energia/Área	
Mod.Elástico	

N 0

Decimais: 0

OK Cancelar

Nota: os valores relativos têm como base a maior força atingida durante o ensaio

< Voltar Avançar > Cancelar

Figura B4 - Resultado desejado
(força máxima de compressão)

4. Estabelece-se o parâmetro de parada da máquina. No presente trabalho utilizou-se o parâmetro força máxima. Há a opção do deslocamento limite, no entanto, viu-se na prática que o deslocamento medido pelo software não é igual ao medido no corpo de prova (no decorrer dos ensaios comprovou-se essa hipótese – a redução medida no corpo de prova sempre era menor que o medido pelo software Tesc). Desse modo, optou-se pelo parâmetro força máxima (Ver figura B5).

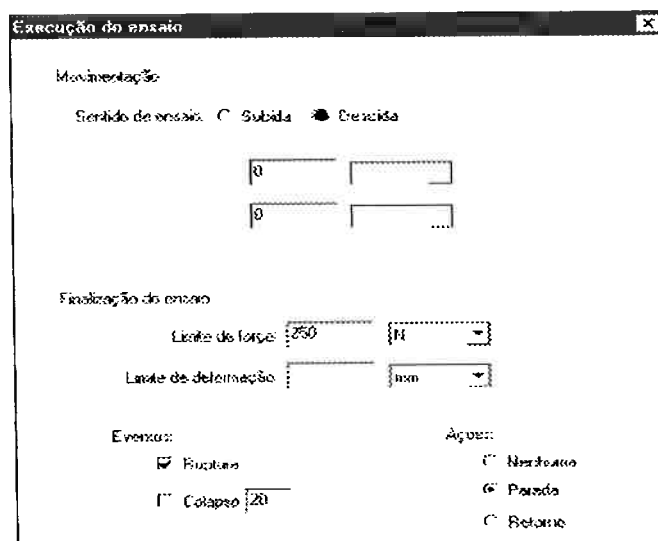


Figura B5 - Parâmetro de parada da máquina (limite da força máxima)

5. Na figura B6 são apresentados os sentidos de medição da carga, da deformação e opção de transdutor embutido na máquina. Na figura B7, configura-se a escala e unidade do gráfico a ser plotado no relatório de ensaio (figura B8). Na figura 8, além do modelo em branco do relatório de ensaio (na região em branco é plotado automaticamente os resultados do ensaio na forma do gráfico força x deslocamento), mostra-se o indicador digital. O indicador digital apresenta dois campos: o superior é referente ao valor da força medida pela máquina e o inferior é o deslocamento (pode-se zerar a qualquer instante o indicador deslocamento). A execução do ensaio pode ser feita através do programa Tesc pela opção Comandar Ensaio.

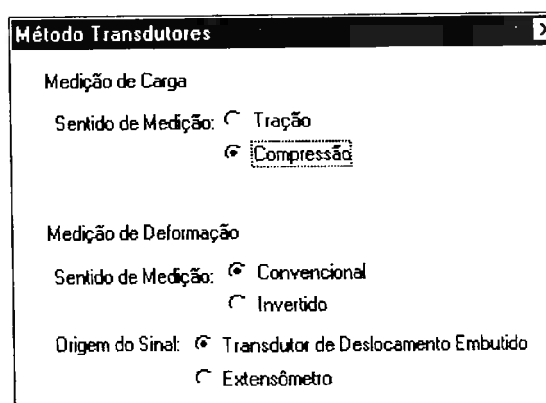


Figura B6 - Método Transdutores (ensaio de compressão)

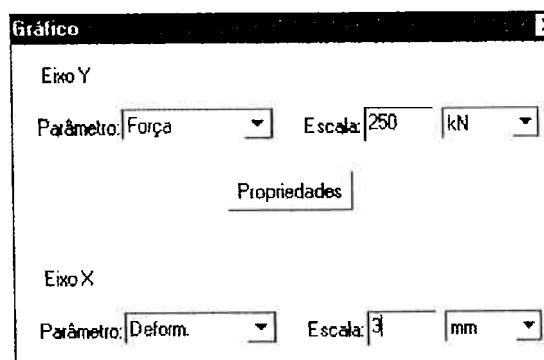


Figura B7 - Escala e unidade do gráfico força x deslocamento

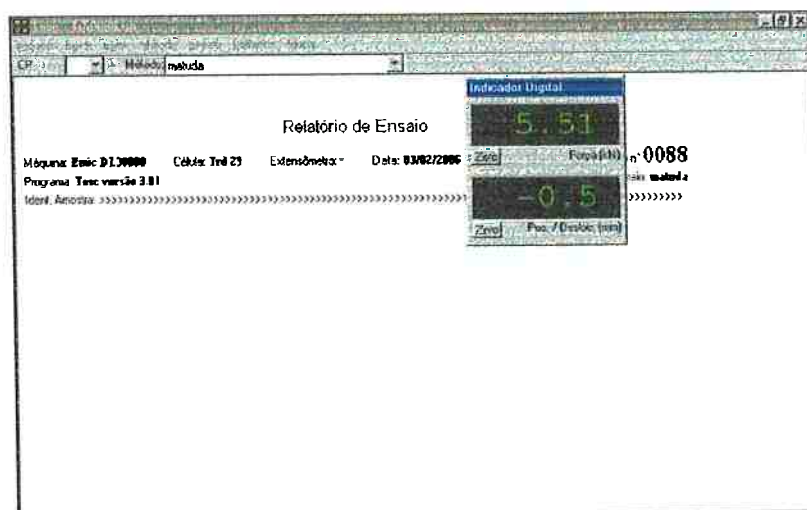


Figura B8 - Relatório de Ensaio e Indicador Digital do Ensaio

6. Configurado o método, é necessário salvar todas as informações inseridas. A opção é mostrada na figura B1. A seguir, abre-se um novo trabalho. Para cada ensaio é preciso abrir um novo trabalho que gerará automaticamente um arquivo com todas as informações do método configurado.

7. Após o ensaio os dados de saída são exportados selecionando o menu “Utilitários” e exportar curva. O formato de saída é .txt. Como para cada trabalho as informações são armazenadas em arquivo contido dentro da pasta do método já salvo, então é possível fazer a exportação dos resultados após os ensaios. Isto é, pode-se abrir quando quiser o ensaio executado (com o resultado da curva força x deslocamento), assim como coletar os resultados obtidos.

ANEXO C - MÉTODO QFORM2D/3D

Desenho do corpo de prova e ferramental

Na ferramenta QDraft é feito o desenho da peça e ferramental que será utilizado na simulação. O layout do desenho com as dimensões da peça e ferramental pode ser visualizado na figura C1.

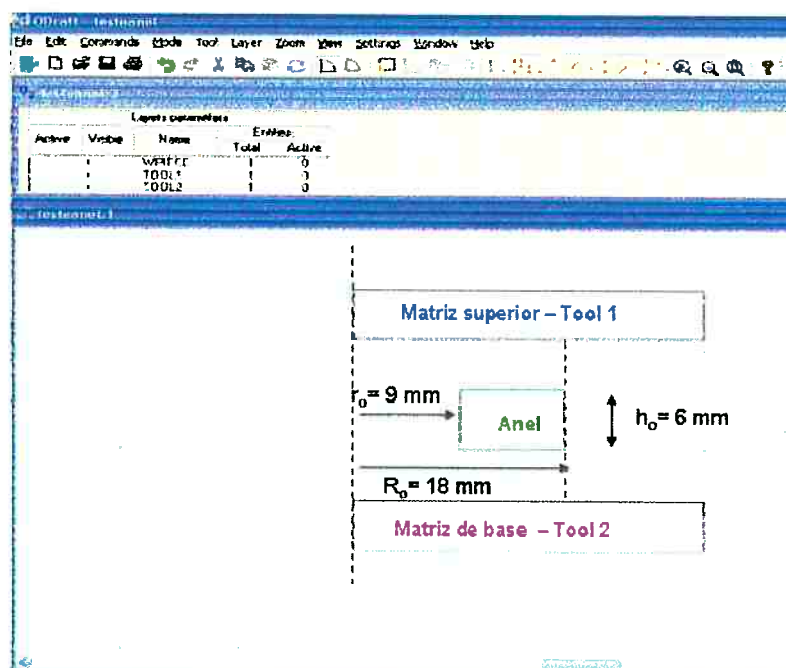


Figura C1 - Layout do QDraft – Anel 6:3:1 (6 mm de espessura)

Criando Método de Trabalho no QForm

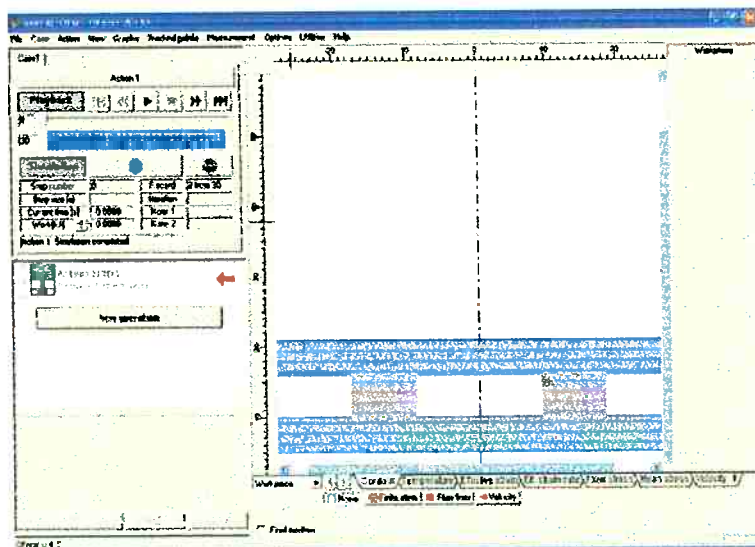


Figura C2 - Layout do Qform – Tela de trabalho

1. Escolha de prensa hidráulica para trabalho
2. Geometria “round workpiece” – revolução em 360° da seção do anel

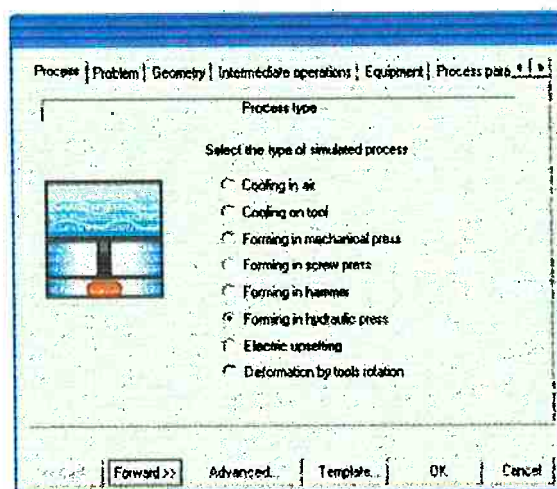


Figura C3 – Prensa hidráulica

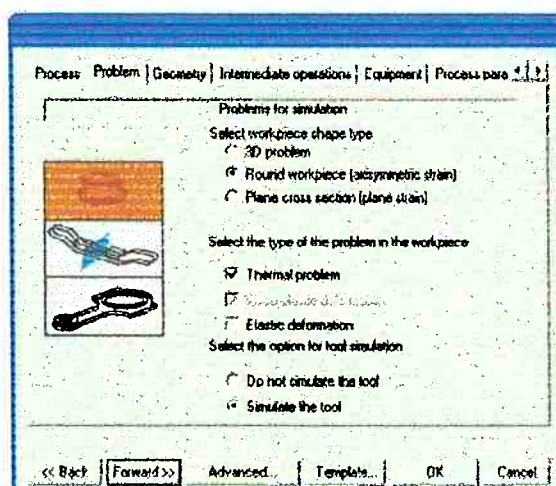


Figura C4 – Escolha de prensa hidráulica, corpo axissimétrico e problema térmico

3. Exportação do desenho do Qdraft
4. Tempo de 10 s de espera no ar e 10 s na ferramenta durante operação até que se inicie a operação

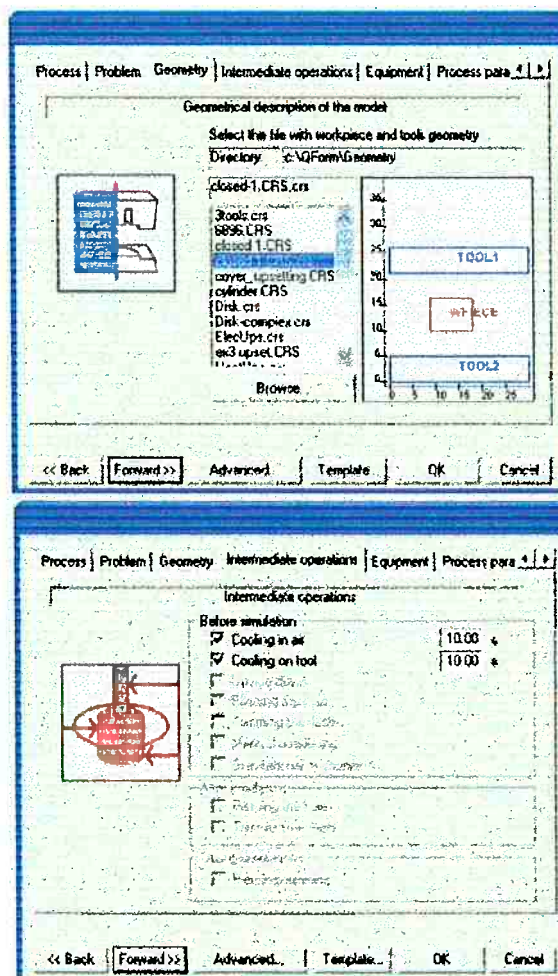


Figura C5 – Selecionando desenho do Qdraft e operações intermediárias

5. Características do equipamento selecionado:
 - Capacidade: 50 MN
 - Velocidade de conformação: 0.05 m/s
6. Parâmetro de parada da operação: deslocamento de 3mm. Equivalente à 50% de redução.

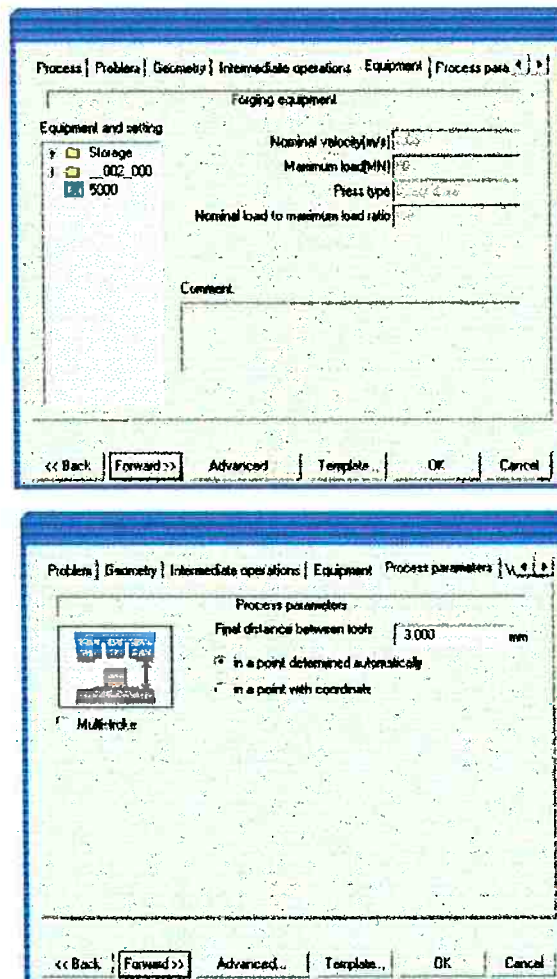


Figura C6 – Características do equipamento e parâmetro de parada da máquina
(50% em redução – 3mm)

7. Liga para trabalho: AA2024. No banco de dados do programa encontra-se a curva tensão-deformação do material para temperaturas variando de 200°C à 500°C para taxas de deformação 0.01, 1, 10 e 100. Para este trabalho foram escolhidas simulações à quente. Foram feitas análises com as temperaturas de 250°C, 350°C, 450°C e 500°C para AA2024.

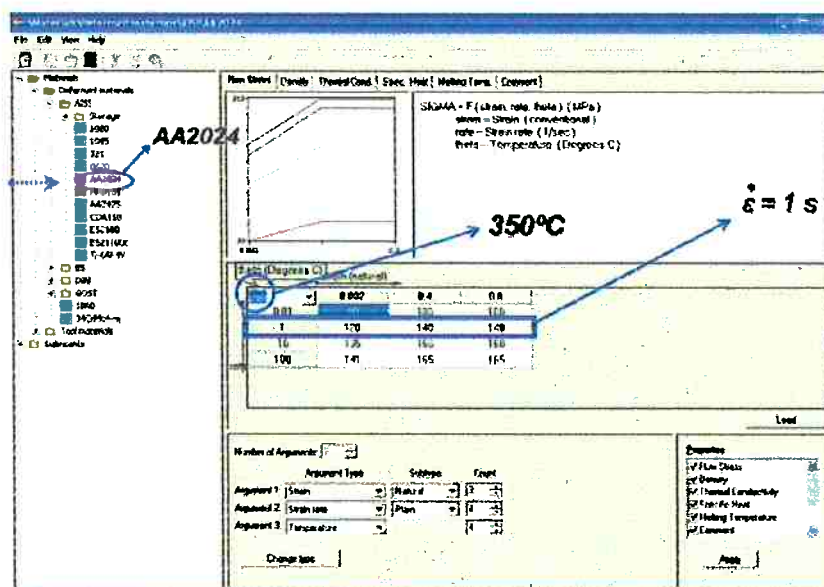


Figura C7– Liga de trabalho: AA2024 (QForm)

ANEXO D - RESULTADO EXPERIMENTAL

	CP	R _i (%)	R _h (%)	F _{máx} (N)	D _{externo} final	d _{interno} final	A (mm ²)	σ (MPa)	m _{aprox}	μ _{aprox}
A seco	1	5,89	30,72	112070	20,73	8,47	281,3	398,4	0,2	0,12
	2	27,78	52,36	220720	23,43	6,50	398,1	554,4	0,26	0,15
	3	40,33	56,71	313970	24,33	5,37	442,4	709,7	0,3	0,17
Teflon	4	15,56	29,93	103960	20,92	7,60	298,3	348,6	0,12	0,07
	4.1	3,33	41,78	179360	21,65	8,70	308,7	581,0	0,13	0,08
	5	8,89	51,51	190450	24,13	8,20	404,6	470,7	0,14	0,08
	6	24,78	60,94	264440	25,83	6,77	488,2	541,7	0,16	0,09
Seco 250°C	2'	83,69	53,05	171840	22,9	1,46	410,2	418,9	0,95	0,55
	3'	58,43	47,80	173150	21,8	3,7	362,5	477,7	0,87	0,50
	4'	45,56	44,26	170500	21,4	4,9	340,8	500,3	0,73	0,42
	5'	61,14	49,01	173070	21,9	3,4	367,6	470,8	0,85	0,49
	6'	60,56	49,67	195500	22,45	3,55	385,9	506,5	0,8	0,46
Seco 350°C	7'	91,11	54,92	268050	23,60	0,80	436,9	613,5	0,95	0,55

Tabela D1. Resultados experimentais

ANEXO E -DADOS DE ENTRADA PARA COSMOSM™

Foram feitas duas simulações do ensaio de compressão do anel no programa COSMOSM™ GeoStar:

1. Liga AA2024 – Anel com geometria 6:3:1 – Espessura de 6 mm.
2. Liga AA6111-T4 – Anel com geometria 6:3:1 – Espessura de 3 mm.

Mostraremos a listagem dos comandos para cada simulação.

1. Liga AA2024 – Anel com geometria 6:3:1 – Espessura de 6 mm.

C COSMOSM GeoStar 2.8 (256K Version)*

C Problem : Ring Compression Test*

Date : 12-10-2006 Time : 12:00

*C**

C Material: AA2024*

*C*Propriedades do duraluminio: EX 730000; SIGYLD 750; NUXY,0.33*

*C*TODAS UNIDADES EM Kg e cm*

*C*Modelo Elasto-plástico Von Mises Cinemático – VMK*

C* 1. CRIA UMA SUPERFÍCIE COM A GEOMETRIA DE 1/4 DO ANEL

PT,1,0,0,0
 PT,2,0,0,9,0
 PT,3,1.8,0,0
 PT,4,0.9,0,0
 PT,5,0,1.8,0
 PT,6,0,0,0.6
 PT,7,0.9,0,0.6
 PT,8,1.8,0,0.6
 PT,9,0,0.9,0.6
 PT,10,0,1.8,0.6
 CRARC,1,2,4,1,0.9
 CRARC,2,9,7,6,0.9
 CRARC,3,10,8,6,1.8
 CRARC,4,5,3,1,1.8
 CRLINE,5,7,8
 CRLINE,6,8,3
 CRLINE,7,3,4
 CRLINE,8,4,7
 CRLINE,9,2,5
 CRLINE,10,5,10
 CRLINE,11,10,9
 CRLINE,12,9,2
 SF4PT,1,2,5,10,9,0
 SF4PT,2,3,4,7,8,0
 SF2CR,3,3,4,0
 SF2CR,4,1,2,0
 SF2CR,5,1,2,0
 VIEW,0,0,1,0
 VIEW,-1,1,1,0
 SF2CR,5,1,4,0

```

SF2CR,6,2,3,0
C* 2. CRIA VOLUME ENTRE AS SUPERFICIES - 3D
M_VL,1,1,1,8,10,10,2,1,1,1
VL2SF,1,5,6,1
M_VL,1,1,1,8,10,10,2,1,1,1
C* 3. DEFINE AS CURVA DE TEMPO E STEP
CURDEF,TIME,1,1,0,0,1,1
TIMES,0,1,0,1
C* 4. DEFINE AS PROPRIEDADES DO ANEL AA2024
MPC,1,0,1,0,02,1000,0.1,3800,0.2,5500,0.3,6100,0.4,6300,0.5,6500
EGROUP,1,SOLID,0,2,0,0,2,0,0,0
* PEQUENAS DEFORMAÇÕES E MODELO ELASTO-PLÁSTICO
VON MISES CINEMÁTICO *
VIEW,0,0,1,0
SCALE,0.6
MPROP,1,NUXY,0.33
MPROP,1,SIGYLD,750
MPROP,1,EX,730000 *
STRAIN_OUT,1,1,0,0,1,1
VIEW,1,1,1,0
STRAIN_OUT,1,1,0,0,1,1
C* 5. DEFINE OS ENGASTAMENTOS DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO
DSF,1,UX,0,1,1,
DSF,2,UY,0,2,1,
DSF,5,UZ,0,5,1,
DSF,6,UZ,-0.3,6,1,
* DESLOCAMENTO DE 3 mm NA DIREÇÃO - Z*
C* 6. VERIFICA SE HÁ ERROS
R_CHECK
C* 7. PARÂMETROS NÚMERICOS DA SIMULAÇÃO*
A_NONLINEAR,S,1,1,20,0.001,0,N,0,0,1E+010,0.001,1,0,1,0,0
C* 8. EXECUTA O PROGRAMA
C* R_NONLINEAR

```

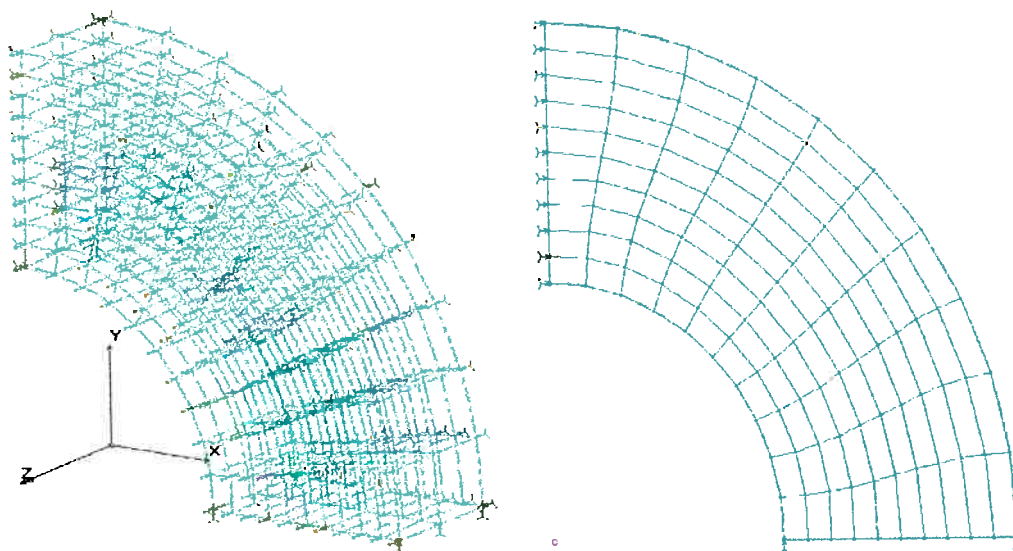


Figura E1 – Geometria de 1/4 do anel

2. Liga AA6111-T4 – Anel com geometria 6:3:1 – Espessura de 3 mm.

*C*C* COSMOSM GeoStar 2.8 (256K Version)*

C Problem : Ring Compression Test*

Date : 12-10-2006 Time : 12:00

*C**

C Material: AA6111-T4*

*C*Propriedades: EX 690000; SIGYLD 1500; NUXY,0.33*

*C*TODAS UNIDADES EM Kg e cm*

*C*Modelo Elasto-plástico Von Mises Cinemático - VMK*

C COSMOSM GeoStar 2.8 (256K Version)*

C Espessura do anel de 3 mm.*

C* 1. CRIA UMA SUPERFÍCIE COM A GEOMETRIA DE 1/4 DO ANEL

PT,1,0,0,0

PT,2,0,0.45,0

PT,3,0.9,0,0

PT,4,0.45,0,0

PT,5,0,0.9,0

PT,6,0,0,0.3

PT,7,0.45,0,0.3

PT,8,0.9,0,0.3

PT,9,0,0.45,0.3

PT,10,0,0.9,0.3

CRARC,1,2,4,1,0.45

CRARC,2,9,7,6,0.45

CRARC,3,10,8,6,0.9

CRARC,4,5,3,1,0.9

CRLINE,5,7,8

CRLINE,6,8,3

CRLINE,7,3,4

CRLINE,8,4,7

CRLINE,9,2,5

CRLINE,10,5,10

CRLINE,11,10,9

CRLINE,12,9,2

SF4PT,1,2,5,10,9,0

SF4PT,2,3,4,7,8,0

SF2CR,3,12,7,0

SF2CR,3,3,4,0

SF2CR,4,1,2,0

SF2CR,5,1,2,0

VIEW,0,0,1,0

VIEW,-1,1,1,0

SF2CR,5,1,4,0

SF2CR,6,2,3,0

C* 2. CRIA VOLUME ENTRE AS SUPERFÍCIES - 3D

M_VL,1,1,1,8,10,10,2,1,1,1

VL2SF,1,5,6,1

M_VL,1,1,1,8,10,10,2,1,1,1

C* 3. DEFINE AS PROPRIEDADES DO ANEL AA6111-T4

MPC,1,0,1,0.02,2000,0.1,3200,0.2,3800,0.3,4300,0.4,4600,0.5,5000,0.6,5200

EGROUP,1,SOLID,0,2,0,0,2,0,0,0

*** PEQUENAS DEFORMAÇÕES E MODELO ELASTO-PLÁSTICO VON MISES CINEMÁTICO ***

MPROP,1,EX,690000

MPROP,1,NUXY,0.33

MPROP,1,SIGYLD,1500

C* 4. DEFINE AS CURVA DE TEMPO E STEP

CURDEF,TIME,1,1,0,0,1,1

TIMES,0,1,0,1

SCALE,0.6

STRAIN_OUT,1,1,0,0,1,1

C* 5. DEFINE OS ENGASTAMENTOS DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO

DSF,1,UX,0,1,1,

DSF,2,UY,0,2,1,

DSF,5,UZ,0,5,1,

DSF,6,UZ,-0.15,6,1,

*** DESLOCAMENTO DE 1.5 mm NA DIREÇÃO - Z ***

C* 6. VERIFICA SE HÁ ERROS

R_CHECK

C* 7. PARÂMETROS NÚMERICOS DA SIMULAÇÃO*

A_NONLINEAR,S,1,1,20,0.001,0,N,0,0,1E+010,0.001,1,0,1,0,0

C* 8. EXECUTA O PROGRAMA

C* R_NONLINEAR

Para chegarmos aos resultados das forças para cada simulação foi preciso medir a área deformada. Na figura E2 é mostrado o comando no qual entramos com os nós na direção x (direção axial) para se obter o deslocamento dos diâmetros externos e internos.

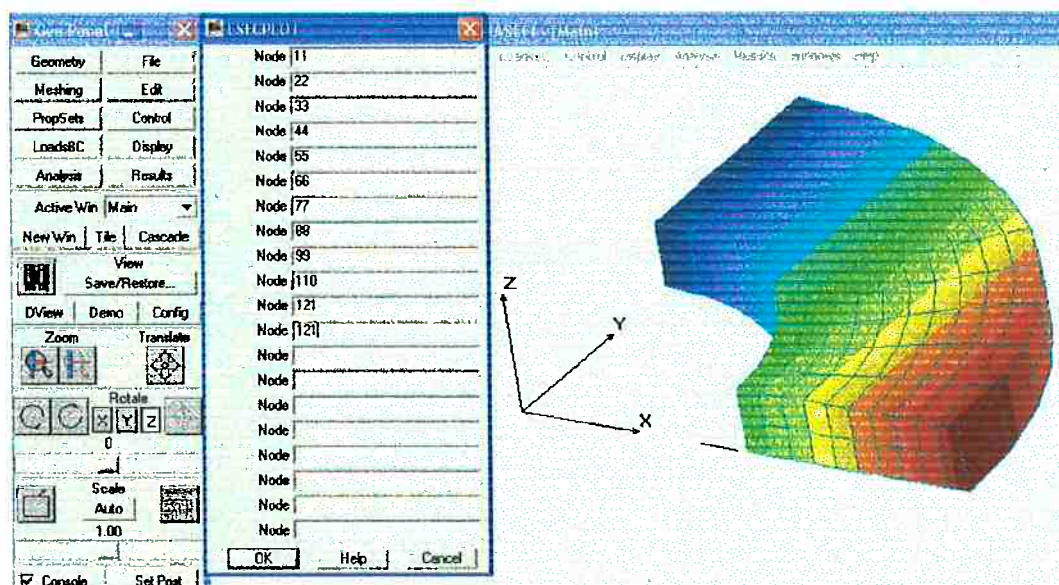


Figura E2 – Criando gráfico através da seleção de nós

O número de nós e elementos utilizados para análise foram:

```

COSMOS NONLINEAR MODULE                               (Version 2.90)
Customer Name:      AGAINU

      Nonlinear Static Analysis
Total number of nodes . . . . . =      363
Total number of elements . . . . . =      200
Total number of equations . . . . . =     1089
Maximum half bandwidth . . . . . =      42
Total number of stiffness blocks . . . . . =       1
Total number of element groups . . . . . =       1
Total number of solution time steps . . . . . =      10

Incremental solution : Force Control      (MNR Iterations)
Time value at the current step . . . . . =    0.7000E+00
Step Number . . . . . =      7
Stress calculation,      Solid Element no. =    164 <----
Decomposition of the stiffness matrix *****
                                     100% Completed
Iteration number . . . . . =      1

```

00:00:13

Figura E3 – Número de nós e elementos para a análise

ANEXO F - RESULTADOS QFORM2D/3D

(Gráficos dos resultados e ferramentas “user-friendly” do QForm)

1. A opção de saída de dados na forma gráfica do QForm é mostrado na Figura F1. O modo como é ativada essa função é simples: sobre a imagem da peça clique o botão direito do mouse que aparecerá a opção “General Graphs”

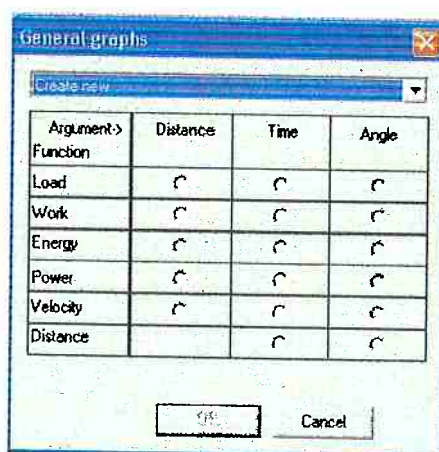


Figura F1– Resultado na forma gráfica

2. O QForm possuiu uma ferramenta muito prática para medir a dimensão do anel deformado. Podem-se obter as medidas finais do diâmetro interno, externo ou altura através das opções “vertical ruler” e “horizontal ruler” (medidas na horizontal e vertical). Em todas medidas dos diâmetros interno e externo do anel deformado foram utilizadas esta função.

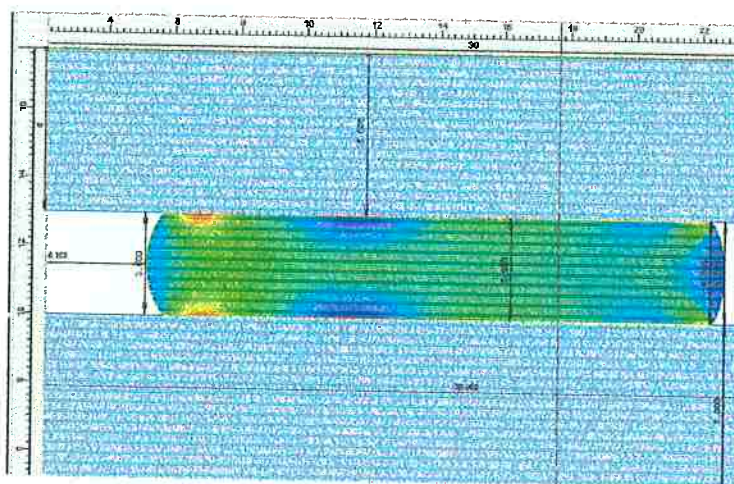


Figura F2 – Ferramenta de medição das dimensões finais do corpo de prova



Figura F3 – Medida dos diâmetro do anel após simulação para condição ideal e temperatura 350°C

3. Outra ferramenta que facilita o usuário do programa é a  “Value in Point”. Esta ferramenta permite que o usuário possa medir o parâmetro selecionado (tensão, temperatura, etc.) em qualquer ponto da peça. Arrasta-se o cursor do mouse e automaticamente os valores são atualizados ponto a ponto.

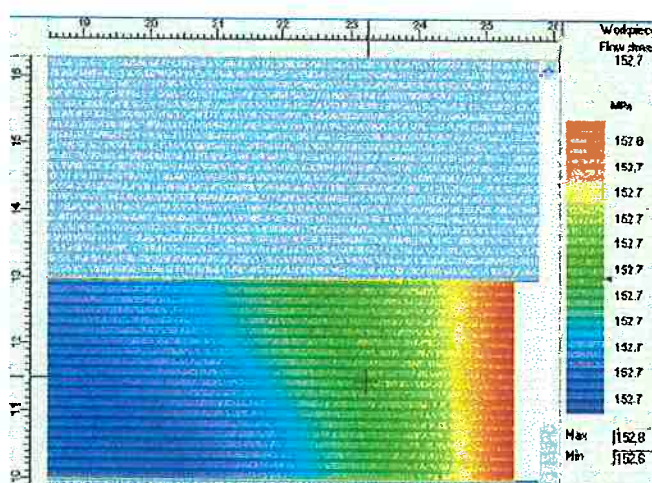


Figura F4– Ferramenta “Value in Point”

4. Gráficos de Força x deslocamento

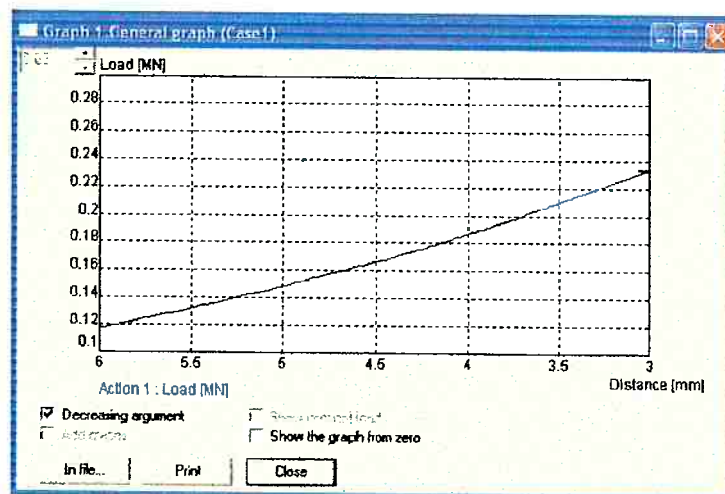


Figura F5 – Força x deslocamento (Ideal)

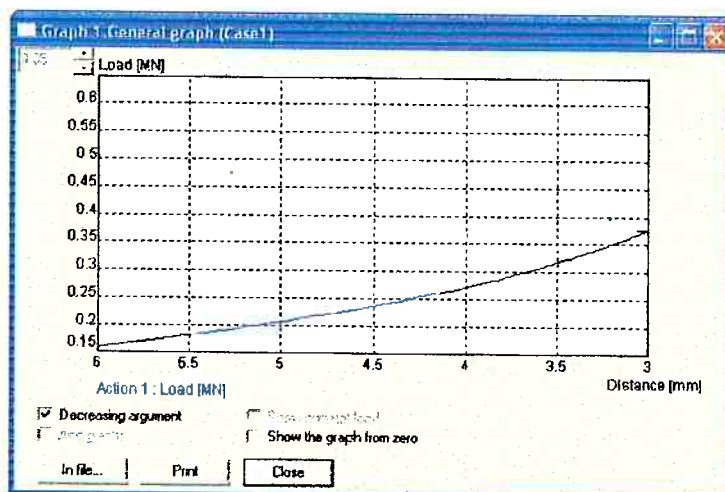


Figura F6 – Força x deslocamento ($\mu = 0.3$)

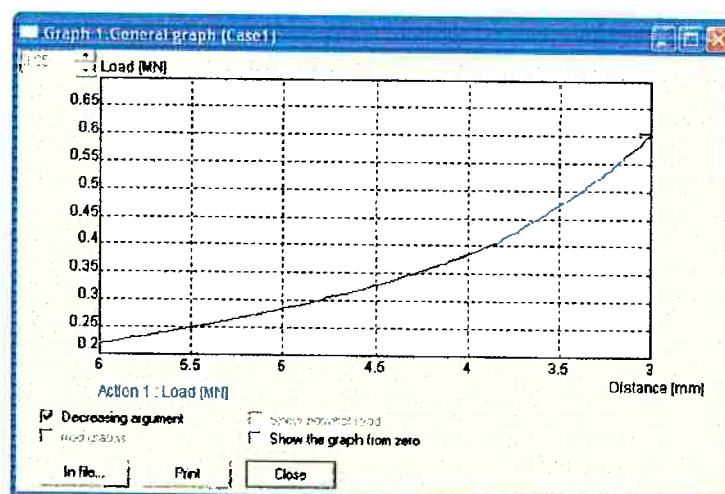


Figura F7 - Força x deslocamento ($\mu = 0.6$)

5. Gráficos de W (trabalho em kJ) x deslocamento

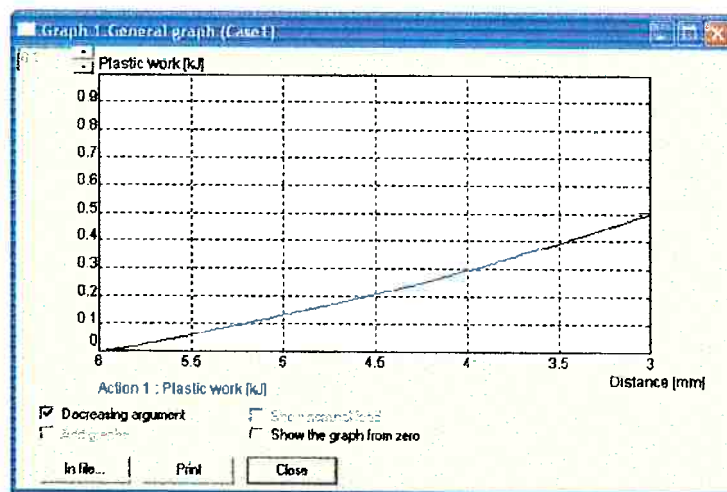


Figura F8 – Trabalho x deslocamento (Ideal)

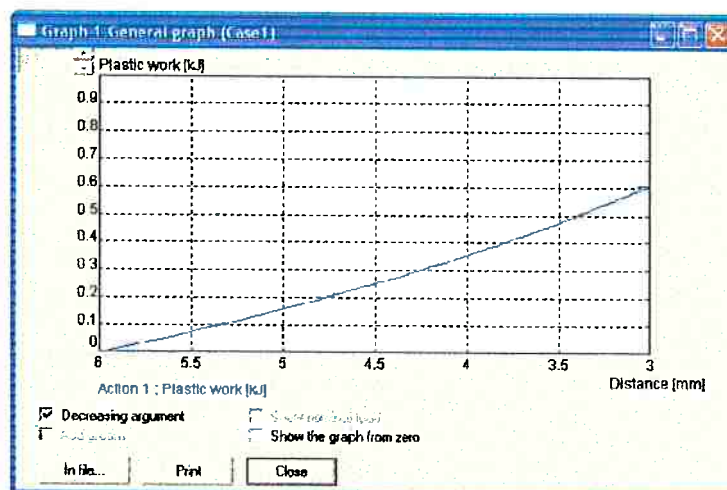


Figura F9 –Trabalho x deslocamento ($\mu = 0.3$)

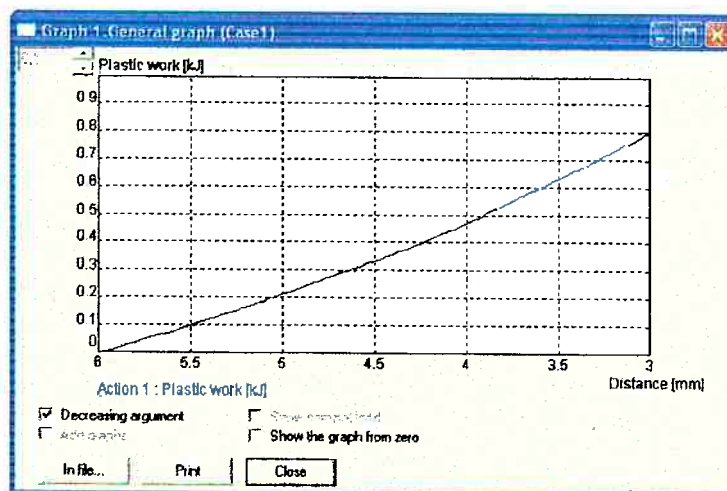


Figura F10 – Trabalho x deslocamento ($\mu = 0.6$)

LISTA DE REFERÊNCIAS

- 1 – SOFUOGLU, H.; Gedikli, H., Rasty, J., “Determination of Friction Coefficient by Employing the Ring Compression Test”, ASME, **J. Eng. Master. Technol.**, 123, pp. 338 -348.
- 2 - ALTAN, T., 1983, "Metal Forming: Fundamentals and Applications", *ASM, Metals Park*, OH.
- 3 - MALE, A.T.; COCKCROFT, M. G., 1965, "A Method for the Determination of the Coefficient of Friction of Metals under Conditions of Bulk Plastic Deformation", **J. Inst. Metals**, v. 93. p. 38-46.
- 4 – WAGONER, R.H., CHENOT, J.L., 1997, **Fundamentals of Metal Forming**, John Wiley&Sons, Inc.
- 5 – LEE, C. H., and ALTAN, T., “Influence of Flow Stress and Friction Upon Metal Flow in Upset Forging of Rings and Cylinders”, **Trans. ASME, J. Engr. Industry**, Vol 94, No. 3, Aug 1972, p 775.
- 6 – SUZUKI, H., HASHIZUME, S., “Studies on the flow stress of metals and alloys”, **Instituite of Industrial Science**, The University of Tokyo.
- 7 – WEY, C.H., MAMANI, G., KRÜGER, L.,SCHAEFFER, L. - Simulação do recalque de um anel metálico via elementos finitos, **Revista Máquinas e Metais**, nº 358, novembro, 1995.
- 8 – MALE, A. T., DEPIERRE, V., and SAUL, G., 1972, The Relative Validity of Concept of Coefficient of Friction and Interface Friction Shear Factor for Use in Metal Deformation Studies, **ASLE Trans.**, 16, pp. 177 – 184.
- 9 – HARTLEY, P. et alli – Friction in finite-element analyses of metal-forming processes. **Int. J. Mech. Sci.** Vol. 21, pp. 301-311, 1979.
- 10 – T. Altan et alli – A numerical method for simultaneous prediction of metal flow and temperatures in upset forging of rings. **Journal of Engineering for Industry**, vol.100, Novembro de 1978.
- 11 – WANG, F., and LENARD, J.G., 1992, “An Experimental Study of Interfacial Friction-Hot Ring Compression”, ASME, **J. Eng. Master. Technol.**, 114, pp. 13 -18.

- 12 - NEALE, K.W., WU, P.D., Giessen, V.D., Jain, M., Makinde, A., 1998. "Crystal Plasticity Forming Limit Diagram Analysis of Rolled Aluminium Sheets", **Metallurgical and Materials Transactions A**, v.29. p. 527 – 535.
- 13 – MEHTA, V. B., AL-ZKERI, I., GUNASEKERA, J.S., "Evaluation of MSC.SuperForge for 3D Simulation of Streamlined and Shear Extrusion Dies, **Ohio University**, Athens, Ohio, USA.
- 14 – LI, D., GHOSH, A., "Uniaxial and Biaxial Deformation Behavior of Aluminum Alloys at Warm Forming Temperatures", **Dept. of Materials Science and Engineering**, The University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109.
- 15 – TAKUDA, H., MORI, K., "Prediction of Forming Limit in Deep", 1996, **JMPT**, v. 260, p. 291 – 296.
- 16 - Aluminum: Properties and Physical Metallurgy, J.E.Hatch, ASM, **Metals Park, USA**, 1990.
- 17 - **II Workshop sobre Textura e Relações de Orientação, "Deformação plástica, recristalização, crescimento de grão"**, 8 e 9 de dezembro de 2003 – IPEN – São Paulo, SP, Brasil.
- 18 – FLACH, M.A., SCHAEFFER, L. – Escolha do coeficiente de atrito para simulação física no processo, **Revista Máquinas e Metais**, p. 48 – 59, fevereiro, 1997.
- 19 - Y. Hwu, C. T. Hsu, F. Wang. - "Measurement of friction and the flow stress of steels at room and elevated temperatures by ring-compression tests". **Journal of Materials Processing Technology**, 37 (1993), pg.319-335.
- 20 – E. C. Ellwood and K. Q. Bagley. **Ibid.**, o.617.
- 21 – J. A. Lee and G. V. Raynor, **Proc. Phys. Soc.**, 1954, [B], 67, 737.
- 22 – HANASHIRO, J.Y.T. Comparação entre resultados de ensaio de tração e de modelos matemáticos (elementos finitos) desenvolvidos para compostos elastoméricos. Trabalho de conclusão do curso de graduação do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP. Orient. Prof. Dr. Ronald L. Plaut. 2005. 127p.
- 23 - **Propriedades e Usos de Metais Não-Ferrosos**, Mario Rennó Gomes & Ettore Bresciani Filho, ABM, São Paulo, 1987.

- 24 - **Precipitation Hardening**, J.W.Martin, Pergamon Press, Oxford, UK, 1968, first edition.
- 25 - VAN HORN, K.R. - Aluminum, v.1, ASM, 1st printing, **Metals Park**, Ohio, 1967, p.324-327.
- 26 - BARBOSA, C., BASTIAN, F., ACSELRAD, O - "Efeito do Tratamento Térmico na Microestrutura e Dureza da Liga 6063 (Al-Mg-Si)", **Anais do 46^o Congresso Anual da ABM**, v.3, Setembro, 1991, p.177-188.
- 27 - RICKS, R.A et alli - "Microstructural Optimization for Extrusion of 6063 Alloys", 5th **International Aluminum Extrusion Technology Seminar**, v.II, 1992, May, p. 57-69.
- 28 - MUSULIN, I. - "Selection of 6xxx Alloys Based on Extrudability, Properties and Final Usage, 5th **International Aluminum Extrusion Technology Seminar**, v.II, 1992, May, p.25-33.
- 29 - ANDERSON, A.N.- "Physical Metallurgy and Extrusion of 6063 Alloy", 5th **International Aluminum Extrusion Technology Seminar**, v.II, 1992, May, p.43-56.
- 30 - PARSON, N.C. et alli - "The Metallurgical Background to problems Ocurring during the Extrusion of 6XXX Alloys", 5th **International Aluminum Extrusion Technology Seminar**, v.II, 1992, May, p.13-23.
- 31 - BLECIC et alli - "Extrusion Technology of AlMgSi Alloys", 5th **International Aluminum Extrusion Technology Seminar**, v.II, 1992, May, p.595-602.
- 32 - METALS HANDBOOK, ASM, 9th printing, v.14, **Metals Park**, Ohio, 1988, p.317-319.
- 33 - PICKERING, E.R. - "Welding Aluminum", **Advanced Materials & Processes**, v.152, 1997, n.4, October, p.29-30.
- 34 - MANUAL DE INSTALAÇÃO DA LINHA DL 30000 (Digital Line), **EMIC**. 3^a.ed., Janeiro de 2003.