

**FÁBIO RODRIGUES PINHO**

**DETERMINAÇÃO DA CURVA DE ESCOAMENTO E DO ATRITO  
EM COMPRESSÃO PLANAR: COMPARAÇÃO DE  
RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM MODELOS  
MATEMÁTICOS**

Trabalho de Formatura apresentado ao  
Departamento de Engenharia de Materiais e  
Metalurgia da Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo.

Área de Concentração:  
Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Orientador:  
Prof. Dr. Ronald Lesley Plaut

**São Paulo  
2007**

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e meu irmão, pela oportunidade, compreensão e apoio incondicional durante todo o curso.

Ao meu orientador, **Prof. Dr. Ronald Lesley Plaut**, pela sua dedicação, orientação, paciência, persistência e objetividade.

Ao **Engenheiro Olmede Celestino dos Santos Filho** pelo estímulo e ajuda durante a realização dos experimentos.

A todos os **funcionários** do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EPUSP, que colaboraram na realização deste trabalho, em especial ao técnico do Hall Tecnológico Rubens, sem o qual seria impossível a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b>	I
<b>SUMÁRIO</b>	II
<b>LISTA DE TABELAS</b>	IV
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	V
<b>LISTA DE EQUAÇÕES</b>	VIII
<b>RESUMO</b>	IX
<b>ABSTRACT</b>	XI
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b>	XII
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	XIII
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	01
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	04
2.1. Definição de Coeficiente de Atrito e Fator de Atrito	04
2.2. Modelos para a Curva Tensão-Deformação	06
2.2.1. Modelo de Hollomon	07
2.2.2. Modelos de Swift e de Ludwik	07
2.2.3. Modelo Linear	07
2.2.4. Modelo Constante	08
2.2.5. Modelo de Voce	08
2.2.6. Redes Neurais	09
2.3. Ensaios Experimentais Comuns para a Obtenção da Curva de Escoamento e do Coeficiente de Atrito e do Fator de Atrito	09
2.3.1. Ensaio de Compressão em Anel	09
2.3.2. Ensaio de Compressão em Corpos de Prova Rastegaev	11
2.3.3. Ensaio de Compressão Planar em "Matriz de Canal" ("Channel Die")	12
2.4. Projeto do Dispositivo Para Execução de Ensaios de Compressão Planar em "Matriz de Canal"	14
2.5. Método dos Elementos Finitos (FEM - Finite Element Method)	16
2.5.1. Histórico	16
2.5.2. Aplicações	17
2.5.3. Modelamento Matemático	18
2.5.4. Vantagens e Limitações	18
<b>3. OBJETIVOS</b>	20
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	21
4.1. Material dos Corpos de Prova	21
4.2. Equipamentos	22
4.3. Construção do Dispositivo	23
4.4. Procedimento Experimental	23
4.5. Simulação no QFORM2D	24
4.5.1. Dados de Entrada na Simulação	26

<b>5. RESULTADOS</b>	<b>28</b>
5.1. Resultados Experimentais	28
5.2. Resultados da Determinação do Coeficiente de Atrito e do Fator de Atrito	29
5.2.1. Resultados da Simulação no QFORM2D	29
5.2.2. Resultados da Determinação do Fator de Atrito por Equações Analíticas	36
5.3. Resultado da Simulação no QFORM2D para os Dados da Literatura	37
<b>6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>42</b>
<b>7. CONCLUSÕES</b>	<b>44</b>
<b>ANEXO A - CONSTRUÇÃO DO DISPOSITIVO</b>	<b>46</b>
<b>ANEXO B - MÉTODO DE TRABALHO - QFORM2D</b>	<b>52</b>
<b>ANEXO C - RELATÓRIO DE ENSAIO DE COMPRESSÃO PARA A LIGA AA5052</b>	<b>58</b>
<b>ANEXO D - VALORES DE K E n PARA VÁRIAS LIGAS DE ALUMÍNIO</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO E - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NO QFORM2D PARA A LIGA AA5052</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO F - CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ATRITO E DO FATOR DE ATRITO PELO MODELO DA "BOSSA DE ATRITO"</b>	<b>64</b>
<b>ANEXO G - CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ATRITO E DO FATOR DE ATRITO PELO MÉTODO DE G. W. ROWE<sup>(27)</sup></b>	<b>66</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>67</b>

## LISTA DE TABELAS

**4. MATERIAIS E MÉTODOS**

Tabela 4.1 – Composição química da liga AA5052 (% em peso).....	21
---	----

**5. RESULTADOS**

Tabela 5.1 – Dimensões Finais dos Corpos de Prova .....	29
---	----

## LISTA DE FIGURAS

### 1. INTRODUÇÃO

Figura 1.1 – Métodos desenvolvidos para reduzir o efeito do atrito na determinação da curva de escoamento <sup>(2)</sup> .....	02
--	----

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Figura 2.1 – Lei de Coulomb .....	04
Figura 2.2 – Tensões principais e equivalente .....	05
Figura 2.3 – Estado plano de tensão: círculo de Mohr e valores de tensões principais.....	05
Figura 2.4 – Critério de Von Mises .....	06
Figura 2.5 – Curvas Tensão-Deformação empíricas obtidas através de regressão em dados experimentais <sup>(25)</sup> .....	07
Figura 2.6 – Comparação dos modelos para a curva tensão x deformação com base em dados coletados em uma situação real <sup>(29)</sup> .....	08
Figura 2.7 – O diâmetro interno $d_i$ no ensaio de compressão de um corpo de prova anelar como função da altura $h$ para vários <u>coeficientes de atrito</u> . Os valores foram calculados assumindo isotropia do material e resultados experimentais para três sistemas tribológicos <sup>(4)</sup> .....	10
Figura 2.8 – Curvas de calibração para determinação do <u>fator de atrito</u> em um ensaio de compressão em corpo de prova anelar <sup>(31)</sup> .....	11
Figura 2.9 – Dimensões de um Corpo de Prova Rastegaev, contendo uma câmara para a colocação de um lubrificante <sup>(7)</sup> .....	12
Figura 2.10 – Ensaio de compressão planar <sup>(1)</sup> .....	14
Figura 2.11 – Princípio de funcionamento do dispositivo construído <sup>(1)</sup> .....	15
Figura 2.12 – Esquema do Arranjo Experimental .....	15

### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Figura 4.1 – Corte do material utilizado na confecção dos corpos de prova .....	21
Figura 4.2 – Usinagem dos corpos de prova .....	22
Figura 4.3 – Máquina de ensaios EMIC DL30000 com capacidade para 300kN .....	22
Figura 4.4 – Montagem do Ferramental .....	24
Figura 4.5 – Layout da tela de abertura do programa QFORM .....	25
Figura 4.6 – Ajuste da curva $\sigma \times \varepsilon$ .....	26
Figura 4.7 – Comparação entre as duas regressões realizadas .....	27

### 5. RESULTADOS

Figura 5.1 - Curva Força (kN) x Deformação Real para os três ensaios válidos.....	28
Figura 5.2 – Largura final do corpo de prova na simulação na condição ideal.....	30
Figura 5.3 – Largura final do corpo de prova na simulação para $m = 0,5$ .....	30
Figura 5.4 – Fluxo do material (Ideal). Detalhe para a região onde o fluxo é nulo .....	31
Figura 5.5 – Fluxo do material ( $m = 0,5$ ). Detalhe para a região onde o fluxo é nulo.....	31
Figura 5.6 – Linhas de fluxo (Ideal) .....	31
Figura 5.7 – Linhas de fluxo ( $m = 0,5$ ).....	31
Figura 5.8 – Malha de elementos finitos (Ideal). Detalhe para a região de maior refinamento da malha .....	32

Figura 5.9 – Malha de elementos finitos ( $m = 0,5$ ). Detalhe para as regiões de maior refinamento da malha .....	32
Figura 5.10 – Distribuição de tensões (Ideal).....	33
Figura 5.11 – Distribuição de tensões ( $m = 0,5$ ) .....	33
Figura 5.12 – Tensões médias (Ideal).....	34
Figura 5.13 – Tensões médias ( $m = 0,5$ ) .....	34
Figura 5.14 – Taxa de deformação efetiva (Ideal) .....	35
Figura 5.15 – Taxa de deformação efetiva ( $m = 0,5$ ) .....	35
Figura 5.16 – Distribuição de temperatura (Ideal).....	36
Figura 5.17 – Distribuição de temperatura ( $m = 0,5$ ) .....	36
Figura 5.18 – Resultado da simulação no QFORM2D na liga AA5052 para $m = 0,83$ .....	37
Figura 5.19 – Comparação entre os resultados obtidos na simulação pelo QFORM2D com $m = 0,6$ , $m = 0,7$ e os resultados experimentais de Wang e Ramaekers <sup>(1)</sup> .....	38
Figura 5.20 – Distribuição de temperaturas no início na simulação .....	39
Figura 5.21 – Distribuição de temperaturas no final da simulação .....	40
Figura 5.22 - Variação de $\mu$ e $m$ com a deformação (Wang e Ramaekers) <sup>(1)</sup> .....	40
Figura 5.23 – Configurando o programa QFORM2D para modelar $m$ em função da temperatura.....	41
Figura 5.24 – Resultados da simulação para $m$ variável comparados com os resultados experimentais de Wang e Ramaekers <sup>(1)</sup> .....	41

## ANEXO A - CONSTRUÇÃO DO DISPOSITIVO

Figura A1 – Matriz de Base com o corpo de prova e a fita de Teflon.....	46
Figura A2 – Lubrificante da marca Molykote™ .....	47
Figura A3 – Primeira tentativa de montagem do ferramental .....	48
Figura A4 – Base usinada para guiar a matriz superior .....	48
Figura A5 – Segunda tentativa de guiar a matriz superior.....	49
Figura A6 – Terceira tentativa de guiar a matriz superior .....	49
Figura A7 – Quarta tentativa para a montagem da aparelhagem.....	50
Figura A8 – Configuração final da aparelhagem.....	51

## ANEXO B - MÉTODO DE TRABALHO - QFORM2D

Figura B1 – Layout do Qdraft – Desenho do ferramental e do corpo de prova de dimensões 5,0 x 4,0 mm.....	52
Figura B2 – Layout do Qform2D – Tela de trabalho .....	53
Figura B3 – Escolha de prensa hidráulica.....	53
Figura B4 – Escolha da geometria do problema .....	54
Figura B5 – Selecionando desenho do Qdraft .....	54
Figura B6 – Seleção do tipo de prensa utilizada na simulação .....	55
Figura B7 – Determinação do critério de parada da simulação .....	55
Figura B8 – Seleção da temperatura de trabalho e adição das propriedades da liga AA5052 ao banco de dados do QFORM2D .....	56
Figura B9 – Seleção do Lubrificante .....	57
Figura B10 – Simulação concluída.....	57

## ANEXO E - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NO QFORM2D PARA A LIGA AA5052

Figura E1 – Curva Força x Deformação Real para $m = 0$ .....	60
Figura E2 – Curva Força x Deformação Real para $m = 0,1$ .....	60

Figura E3 – Curva Força x Deformação Real para $m = 0,2$ .....	61
Figura E4 – Curva Força x Deformação Real para $m = 0,3$ .....	61
Figura E5 – Curva Força x Deformação Real para $m = 0,4$ .....	62
Figura E6 – Curva Força x Deformação Real para $m = 0,45$ .....	62
Figura E7 – Curva Força x Deformação Real para $m = 0,5$ .....	63
Figura E8 – Curva Força x Deformação Real para $m = 0,6$ .....	63

## **ANEXO F - CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ATRITO E DO FATOR DE ATRITO PELO MODELO DA "BOSSA DE ATRITO"**

Figura F1 – Distribuição de pressão em uma peça pelo modelo da Bossa de Atrito <sup>(26)</sup> .....	64
Figura F2 – Modelo da "Bossa de Atrito" para um CP retangular.....	65



## LISTA DE EQUAÇÕES

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Equação 1 .....	05
Equação 2 .....	05
Equação 3 .....	06
Equação 4 .....	07
Equação 5 .....	07
Equação 6 .....	07
Equação 7 .....	07
Equação 8 .....	08
Equação 9 .....	08
Equação 10 .....	12
Equação 11 .....	12
Equação 12 .....	15

### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Equação 13 .....	26
Equação 14 .....	27

### 5. RESULTADOS

Equação 15 .....	37
------------------	----

### ANEXO F - CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ATRITO E DO FATOR DE ATRITO PELO MODELO DA "BOSSA DE ATRITO"

Equação F1 .....	64
Equação F2 .....	64
Equação F3 .....	64

### ANEXO G - CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ATRITO E DO FATOR DE ATRITO PELO MÉTODO DE G. W. ROWE<sup>(27)</sup>

Equação G1 .....	66
Equação G2 .....	66

## RESUMO

Na conformação mecânica dos materiais, o desenvolvimento dos métodos de análise numérica associada à deformação planar necessita de dois parâmetros fundamentais que são a curva de escoamento e o coeficiente de atrito na interface. Objetiva-se construir um pequeno dispositivo a ser acoplado em máquina de ensaios (EMIC com capacidade para 300 kN) para efetuar ensaio em compressão planar. Com esse dispositivo, objetiva-se determinar os dois parâmetros acima mencionados, inicialmente em liga de alumínio a temperatura ambiente. Os resultados serão comparados com a simulação numérica efetuada com auxílio do programa QFORM2D.

## ABSTRACT

In the mechanical working of metals and alloys, the development of numerical analysis methods is related to two fundamental parameters, namely the flow stress curve and the coefficient of friction. The aim of this work is to build a small device to be adapted to the 300 kN EMIC testing machine to perform plain strain tests. With this device, both above mentioned parameters can be evaluated, initially for an aluminium alloy at room temperature. The results are compared with the simulation carried out with the QFORM2D program.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**Eq.** - Equação

**FEM** – Finite Element Method

**$W_0$**  – comprimento inicial

**$B_0$**  – largura inicial

**$B_f$**  – largura final

**$H_0$**  – altura inicial

**$H_f$**  – altura final

**kN** – kilo-Newton

**kgf** – Kilograma-força

**2D** – duas dimensões

**3D** – três dimensões

**PMT** – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade de São Paulo

## LISTA DE SÍMBOLOS

**F** – Força

**$\Delta H$**  – variação da altura

**$\sigma$**  – Tensão

**$\sigma_n$**  – Tensão normal

**$\tau$**  – Tensão de cisalhamento

**$\varepsilon$**  – Deformação

**$\mu$**  – Coeficiente de Atrito

**m** – Fator de Atrito

## 1. INTRODUÇÃO

Na conformação mecânica dos metais, a curva de escoamento (propriedade do material) e o coeficiente de atrito (condição de contorno) são variáveis importantes para o controle de qualidade dos produtos. Os principais motivos são três. Primeiro, a curva de escoamento do material que compõe o objeto a ser conformado influencia diretamente o prognóstico das tensões e da energia envolvidas na operação de conformação do material, pois estas são uma função da deformação, da taxa de deformação, da temperatura e da microestrutura durante a deformação plástica. Segundo, o atrito aumenta a intensidade de força e de energia necessárias para se realizar o trabalho de conformação, altera a fluência do material, a distribuição de tensão e deformação e propicia a possível formação de defeitos no produto. Terceiro, a curva de escoamento e o coeficiente de atrito são formulados fundamentalmente em um modelo matemático baseado na análise mecânica em um corpo de prova em um determinado processo de conformação. Desse modo, sem os valores precisos para o coeficiente de atrito e para o escoamento do material, é impossível melhorar os modelos matemáticos para este processo.<sup>(2)</sup>

Para a determinação da curva de escoamento e do coeficiente de atrito, alguns métodos experimentais são realizados, considerando-se a hipótese de que os materiais permanecem isotrópicos. Como os metais geralmente apresentam uma plasticidade menor durante a tração, ensaios de compressão são um método comum para a obtenção da curva de escoamento para altos valores de deformação. Várias tentativas foram realizadas no passado com a finalidade de reduzir o efeito do atrito na determinação desta curva de escoamento (Figura 1.1). Apesar de todos estes esforços, a influência do atrito em processos de conformação mecânica ainda permanece um problema. Por isso, este trabalho é direcionado à tribologia (aqui, em particular, na análise quantitativa do atrito na interface) . O ensaio de compressão em anel é um método bastante empregado para a avaliação quantitativa do atrito na conformação plástica. Este método foi proposto inicialmente por Kunogi<sup>(3)</sup> e posteriormente aprimorado por Male e Cockcroft<sup>(8)</sup>. Um grande número de trabalhos, tanto experimentais como teóricos, provaram a importância deste método na determinação do atrito entre a matriz e o objeto a ser deformado quando vários modelos para o cálculo da força de atrito (coeficiente de atrito de Coulomb, fator de atrito, entre outros) foram empregados em materiais isotrópicos<sup>(2)</sup>.

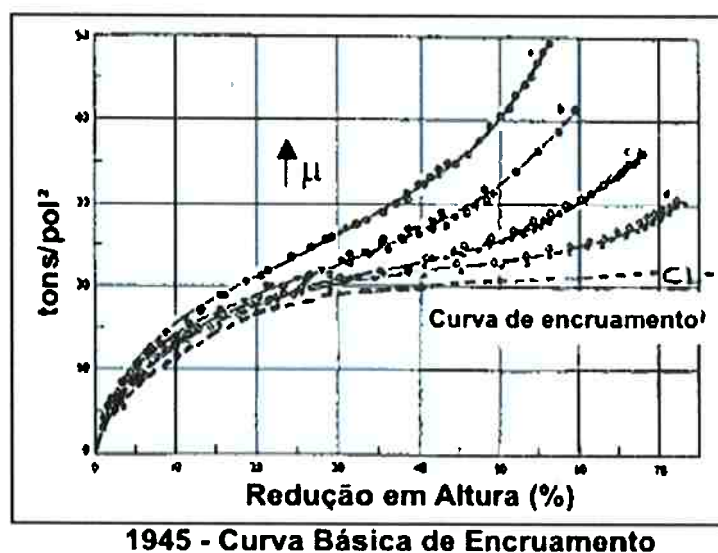
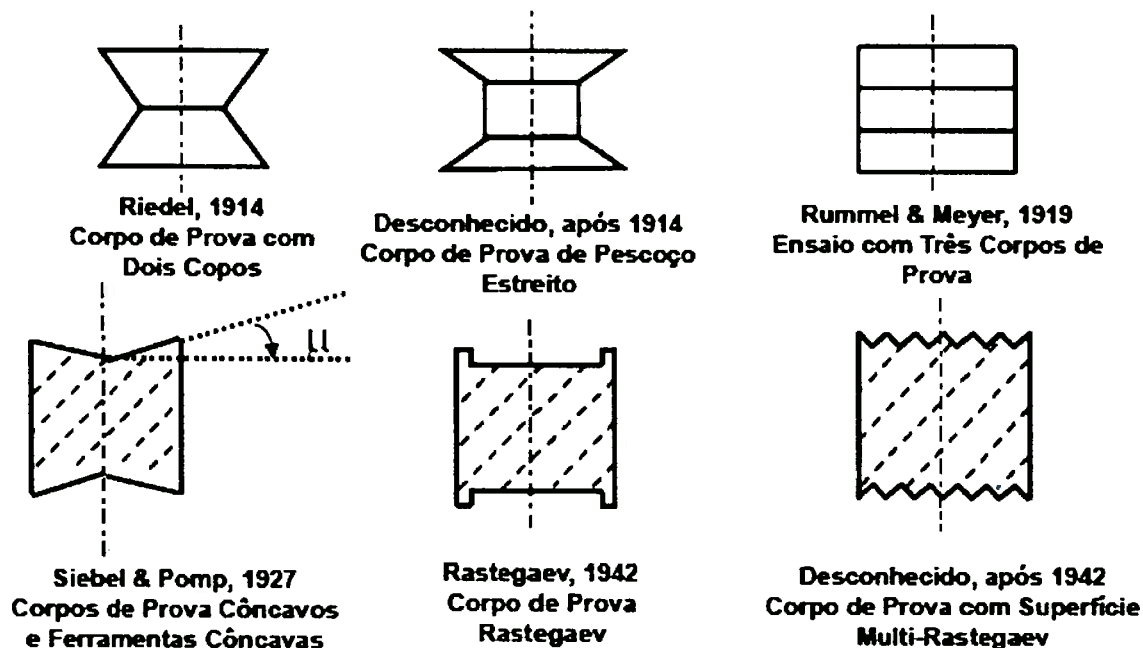


Figura 1.1 – Métodos desenvolvidos para reduzir o efeito do atrito na determinação da curva de escoamento<sup>(2)</sup>

Infelizmente, a anisotropia é um fenômeno inevitável na fabricação de materiais metálicos<sup>(9)</sup>. A principal causa é a textura cristalográfica produzida nos processos de conformação. Isto é, com o aumento da tensão aplicada, os cristais aleatoriamente distribuídos nos metais tendem a rotacionar em certas orientações cristalográficas preferenciais (textura). Os tipos de conformação mais comuns são o forjamento, a extrusão, a estampagem, a trefilação e a laminação. Em 1948, Hill<sup>(10,11)</sup> propôs pela primeira vez um critério para a caracterização da anisotropia, e desde então esta vem sendo reconhecida como um importante fator nos processos de conformação, e os

conceitos de anisotropia planar e anisotropia normal têm sido cada vez melhor definidos. Atualmente tem sido crescente a atenção dada à anisotropia, mas poucos estudos ainda têm sido realizados para conectar a anisotropia com o comportamento do atrito<sup>(2)</sup>.

No presente trabalho, será realizada a construção de um pequeno dispositivo, de baixo custo e de relativamente fácil construção, com a finalidade de determinar em um mesmo ensaio tanto o coeficiente de atrito como a curva de escoamento de um metal em compressão planar. Este método tem-se mostrado bastante promissor, uma vez que tende a minimizar os efeitos da anisotropia do metal nos resultados experimentais obtidos<sup>(1)</sup>.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. 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 ( $\mu$ ) definido pela Lei de Coulomb:<sup>(34)</sup>

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

$\tau = \sigma_n \mu$   
 (Lei de Coulomb)

Coeficiente de Atrito  
 (Constante de Coulomb)

Figura 2.1 – Lei de Coulomb

Na Figura 2.1, a força  $F_F$  (força de cisalhamento) é proporcional à força  $F_N$  (força normal) e a tensão  $\tau_F$  (tensão de cisalhamento) é proporcional à tensão  $\sigma_N$  (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  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ . A fim 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 ensaio de tensão uniaxial, consideramos um estado de tensão uniaxial equivalente ( $\sigma_{eq}$ ) 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.<sup>(34)</sup>

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

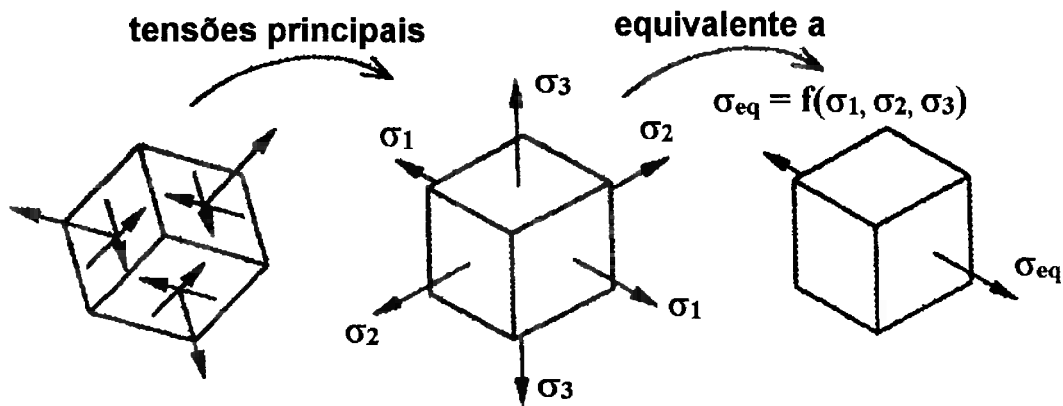


Figura 2.2 – Tensões principais e equivalente

Para materiais dúcteis adota-se o critério de Von Mises com o estado de tensão plano representado na Figura 2.3:<sup>(34)</sup>

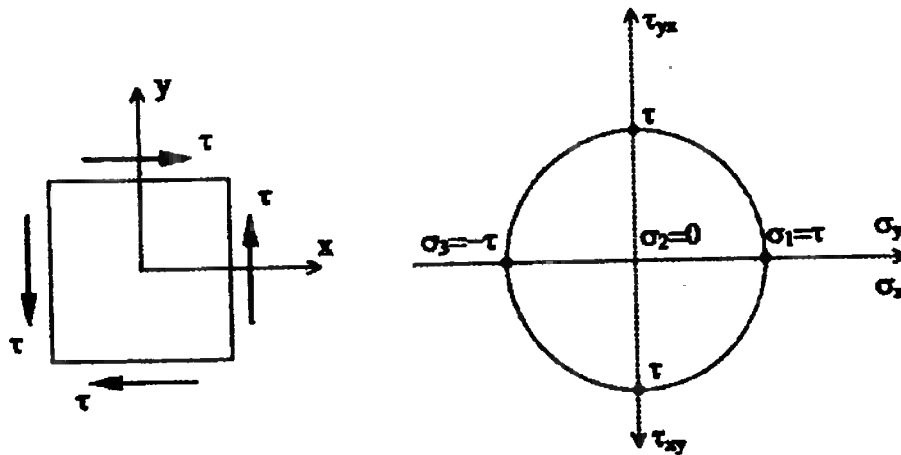


Figura 2.3 – Estado plano de tensão: círculo de Mohr e valores de tensões principais

Desse modo a tensão equivalente vale:<sup>(34)</sup>

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

No caso da análise envolvendo atrito na superfície, teremos:<sup>(34)</sup>

$$\tau \text{ (tensão de cisalhamento)} = m \cdot \tau_{\max} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde  $\tau_{\max}$  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 ( $\tau_{\max}$ ), a tensão equivalente ( $\sigma_{eq}$ ) pode ser chamada de tensão de escoamento.<sup>(34)</sup>

Portanto pelas Equações 1 e 2, com a hipótese de que o material obedece ao Critério de Von Mises:<sup>(34)</sup>

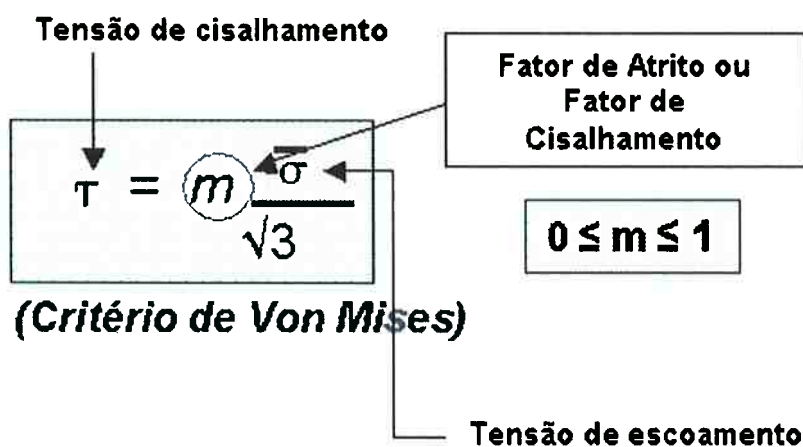


Figura 2.4 – Critério de Von Mises

Portanto, pode-se deduzir a seguinte relação de equivalência entre o fator de atrito e o coeficiente de atrito:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{3}} m \approx 0,57735 \cdot m \quad (\text{Eq. 3})$$

## 2.2. Modelos para a Curva Tensão-Deformação

No estudo de um processo de conformação mecânica qualquer, geralmente o primeiro passo é a obtenção da distribuição de deformação. O próximo passo é determinar o estado de tensão associado à deformação em cada ponto. Para que isso seja possível, é necessário possuir as propriedades de tensão-deformação do material. Alguns modelos simples foram desenvolvidos para aproximar os dados obtidos em ensaios experimentais em uma equação empírica. A seguir serão consideradas algumas destas leis. Nos diagramas abaixo, a curva experimental é representada por uma curva tracejada, enquanto que a regressão é representada por uma curva contínua<sup>(25)</sup>.

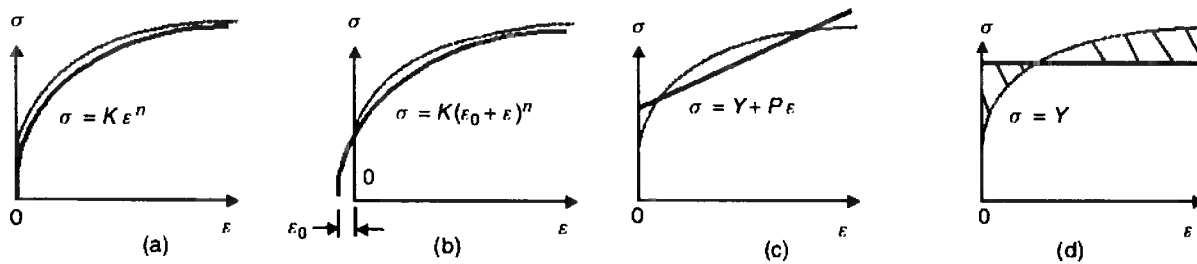


Figura 2.5 – Curvas Tensão-Deformação empíricas obtidas através de regressão em dados experimentais<sup>(25)</sup>

### 2.2.1. Modelo de Hollomon

Uma simples regressão linear em potência para os dados obtidos em ensaios experimentais, do tipo  $\sigma = K\epsilon^n$  (Eq. 4) como mostra a Figura 2.5(a), se ajusta bem para uma grande quantidade de metais, exceto para os valores próximos ao início da deformação plástica. O expoente  $n$  é conhecido como coeficiente de encruamento, e  $K$  é o coeficiente de resistência. A única desvantagem deste modelo é que, para deformação zero ele prevê tensão zero, e a curva cresce infinitamente. Este modelo não indica onde se dá o início da deformação plástica<sup>(25)</sup>.

### 2.2.2. Modelos de Swift e de Ludwik

Apesar da necessidade de determinar três constantes, um modelo do tipo  $\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n$  (Eq. 5) é bastante útil e se ajusta bem para um material em que o início da deformação plástica é conhecido. Este modelo foi proposto por Swift e é apresentado na Figura 2.5(b). A constante  $\epsilon_0$  é conhecida como uma pré-carga<sup>(25)</sup>.

Posteriormente, Ludwik aprimorou este modelo de Swift com a adição de uma nova constante  $\sigma_0$ , resultando em uma expressão do tipo  $\sigma = \sigma_0 + K(\epsilon_0 + \epsilon)^n$ <sup>(29)</sup> (Eq. 6).

### 2.2.3. Modelo Linear

Apesar de não se ajustar bem aos resultados experimentais, uma relação do tipo  $\sigma = Y + P\epsilon$  (Eq. 7) como na Figura 2.5(c) pode ser utilizada em alguns casos. Esta lei pode ser apropriada para deformações muito pequenas<sup>(25)</sup>.

### 2.2.4. Modelo Constante

Um modelo do tipo  $\sigma = Y$  (Eq. 8), representado na Figura 2.5(d), é adotado quando o objeto em estudo é considerado como um corpo perfeitamente rígido<sup>(25)</sup>.

### 2.2.5. Modelo de Voce

Em 1948, Voce propôs um modelo do tipo  $\sigma = \sigma_0(1 - Ae^{-B\epsilon})$  (Eq. 9), sendo  $\sigma_0$ , A e B constantes. Este modelo é o mais adequado para altos valores de deformação, uma vez que, ao contrário dos demais modelos, estabelece um patamar superior para o crescimento da curva<sup>(29)</sup>.

A Figura 2.6 abaixo faz um comparativo dos principais modelos para a curva tensão x deformação, utilizando-se dados coletados em uma situação real<sup>(29)</sup>.

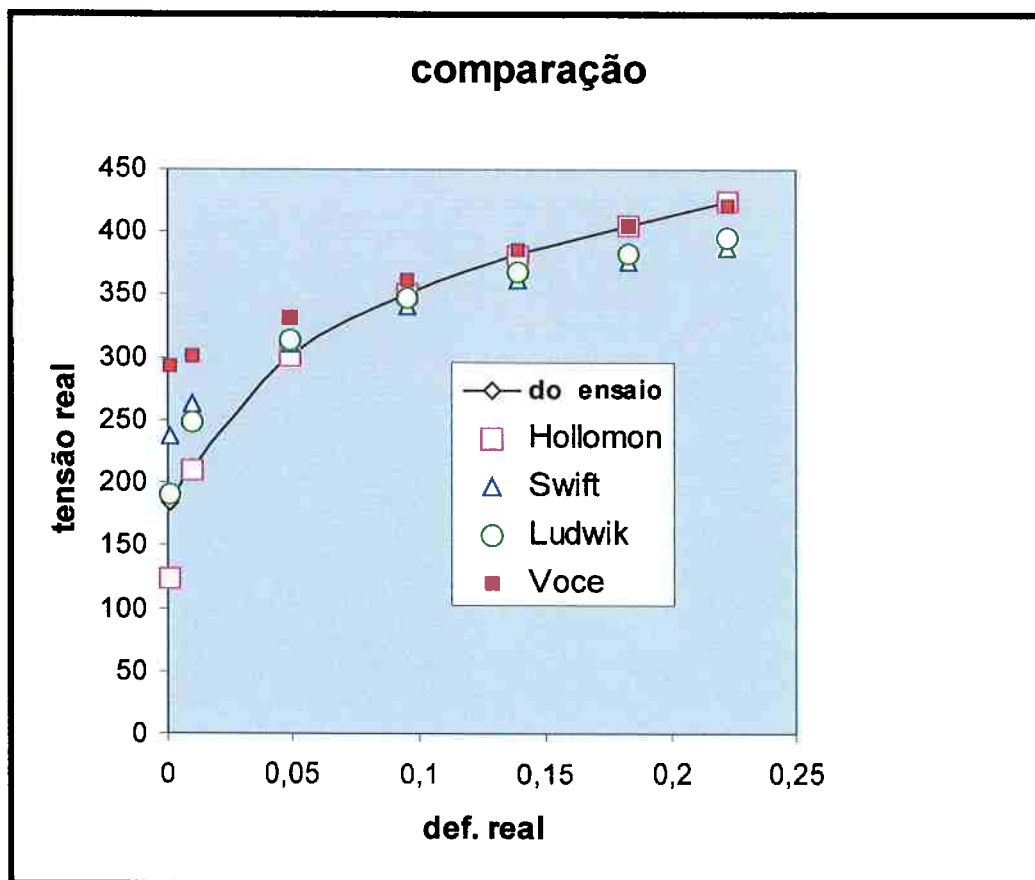


Figura 2.6 – Comparação dos modelos para a curva tensão x deformação com base em dados coletados em uma situação real<sup>(29)</sup>

### **2.2.6. Redes Neurais**

Atualmente existe um método muito mais sofisticado e preciso para a determinação da curva tensão x deformação dos materiais metálicos, através da utilização de redes neurais.

Redes neurais são um tipo de análise de dados que utiliza inteligência artificial, ou seja, tentam fazer com que o computador se comporte de forma similar ao cérebro humano; daí o nome (neurônios – neurais). Na verdade, não são “biologicamente” neurais, são apenas simulações matemáticas de neurônios, rodando em computadores tradicionais.

Mais detalhes sobre a aplicação de redes neurais na determinação da curva tensão x deformação em ligas de alumínio podem ser encontrados no Trabalho de Formatura do Engenheiro Eric Jun Urabayashi<sup>(30)</sup>.

### **2.3. Ensaios Experimentais Comuns para a Obtenção da Curva de Escoamento e do Coeficiente de Atrito e do Fator de Atrito**

Vários tipos de ensaios experimentais padronizados de tração, torção e compressão são comumente utilizados para a obtenção da curva de escoamento e do coeficiente de atrito do material. Neste trabalho, será dada uma particular atenção aos ensaios de compressão. A seguir será feita uma breve explicação comparativa dos principais destes tipos de ensaios.

#### **2.3.1. Ensaio de Compressão em Anel**

As simulações em elementos finitos tornaram-se uma ferramenta poderosa no planejamento dos processos de conformação de metais e projeto das ferramentas. Por isso existe uma tendência cada vez maior ao aumento da precisão necessária dos modelos matemáticos empregados nestas simulações. Até o momento, entretanto, a precisão de tais simulações é limitada por erros nos dados de entrada, em particular nos coeficientes (ou fatores) de atrito. Os coeficientes (ou fatores) de atrito em aplicações na conformação plástica têm sido muito comumente determinados por ensaios de compressão em anel a partir de Kunogi<sup>(3)</sup>.

Um corpo de prova como no exemplo apresentado na Figura 2.6 é comprimido até uma certa altura e o diâmetro interno é medido após a compressão. Ao avaliar tais resultados, é geralmente admitida a hipótese de que o material que compõe o corpo de prova anelar é isotrópico.

O diâmetro interno após a compressão depende do coeficiente de atrito  $\mu$ , conforme mostra a Figura 2.7, ou do fator de atrito  $m$ , conforme mostra a Figura 2.8. Este diagrama pode ser explicado da seguinte maneira: Para uma dada altura o diâmetro interno apresenta o valor para o qual o trabalho total necessário é o mínimo possível. Este trabalho é a soma do trabalho necessário para vencer o atrito e o trabalho envolvido na deformação plástica. O trabalho necessário para vencer o atrito depende do movimento relativo entre o corpo de prova e a matriz. Portanto ocorre a formação de um fluxo no qual uma parte do material se move para o centro e o resto se move para fora. Uma função entre o diâmetro interno, a redução de altura e o coeficiente de atrito pode ser calculada utilizando-se um programa de computador de elementos finitos. As curvas apresentadas na Figura 2.7 foram obtidas desta maneira. Rao e Sivaram<sup>(6)</sup> apresentam que, a princípio, o diâmetro externo também poderia ser medido, porém o diâmetro interno é mais sensível à variação do coeficiente de atrito.

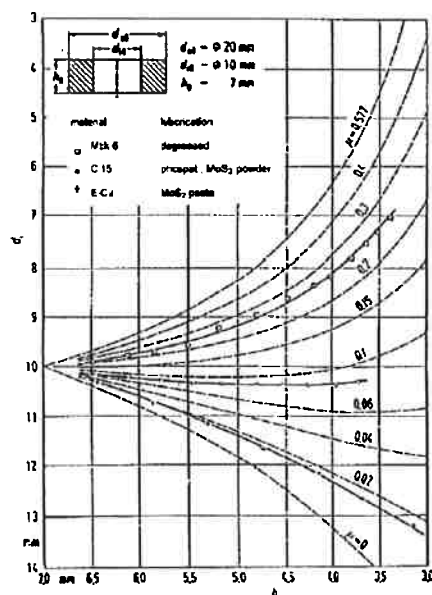


Figura 2.7 – O diâmetro interno  $d_i$  no ensaio de compressão de um corpo de prova anelar como função da altura  $h$  para vários coeficientes de atrito. Os valores foram calculados assumindo isotropia do material e resultados experimentais para três sistemas tribológicos<sup>(4)</sup>

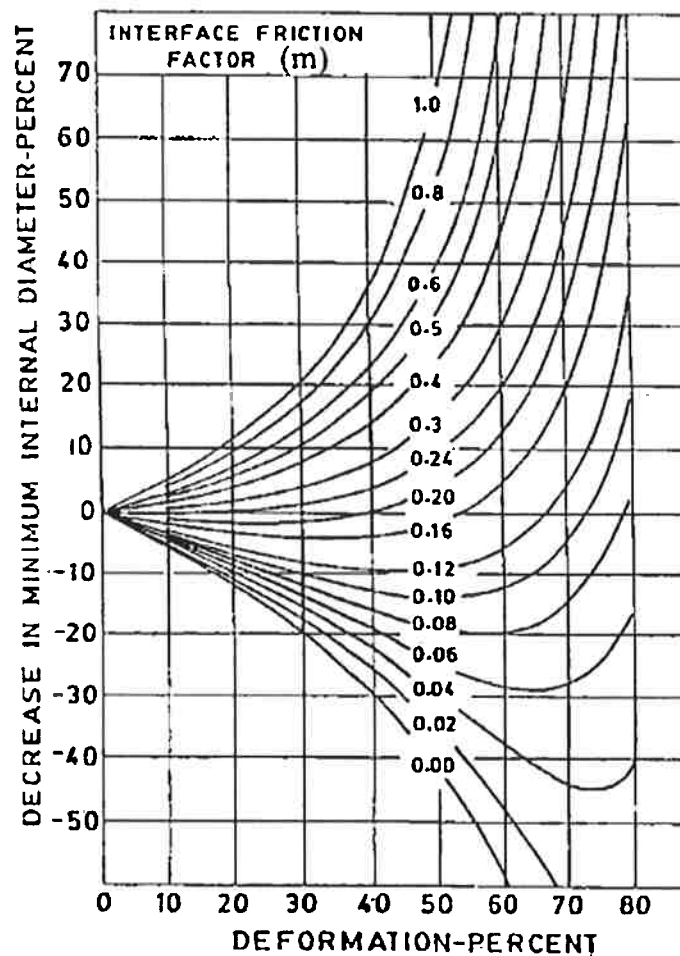


Figura 2.8 – Curvas de calibração para determinação do fator de atrito em um ensaio de compressão em corpo de prova anelar<sup>(31)</sup>

### 2.3.2. Ensaio de Compressão em Corpos de Prova Rastegaev

Este é um método bastante empregado para o levantamento da curva de escoamento de um material em ensaios de compressão, e foi desenvolvido como uma tentativa de minimizar o efeito do atrito nos resultados destes ensaios.

A geometria de um corpo de prova Rastegaev em particular é adequada para manter um estado de tensão uniaxial e deformação “uniforme” durante os ensaios. Na verdade, o formato da câmara do corpo de prova (dimensões  $u$  e  $t$ ) foi otimizado experimentalmente para garantir tal propriedade<sup>(7)</sup>.



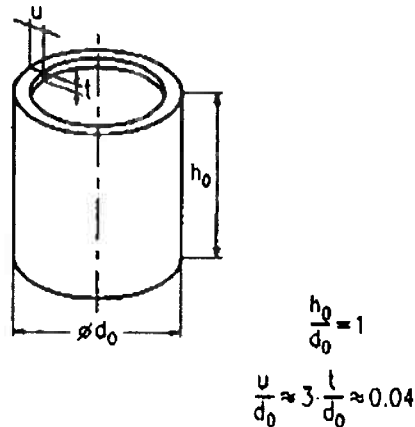


Figura 2.9 – Dimensões de um Corpo de Prova Rastegaev, contendo uma câmara para a colocação de um lubrificante<sup>(7)</sup>

### 2.3.3. Ensaio de Compressão Planar em “Matriz de Canal” (“Channel Die”)

Em componentes reais de engenharia, a tensão e a deformação são tensores tridimensionais, mas em estruturas prismáticas tais como longos tarugos metálicos, o comprimento é muito maior do que as outras duas dimensões. As deformações associadas ao comprimento, isto é, a componente normal de deformação  $\epsilon_{33}$  e as componentes de cisalhamento de deformação  $\epsilon_{13}$  e  $\epsilon_{23}$  (se o comprimento é a terceira dimensão) estão restritas devido à existência de material adjacente e, portanto são pequenas comparadas às demais componentes. Deste modo, o tensor de deformação pode ser aproximado por:<sup>(23)</sup>

$$\underline{\underline{\epsilon}} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & 0 \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 10})$$

onde a linha dupla indica um tensor de segunda ordem. Este estado de deformação é chamado de deformação planar. O tensor de tensões equivalente é dado por:<sup>(23)</sup>

$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & 0 \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 11})$$

no qual o componente não-nulo  $\sigma_{33}$  é necessário para manter a igualdade  $\epsilon_{33}=0$ . Este componente de tensão pode ser temporariamente removido da análise para manter apenas os termos planares, reduzindo efetivamente o problema tridimensional em um problema bidimensional muito mais simples.<sup>(23)</sup>

Conforme citado anteriormente, o ensaio de compressão em anel é bastante utilizado nos processos de conformação planar. Com as devidas curvas de calibração, o coeficiente de atrito médio ou o fator de atrito pode ser determinado. A vantagem do ensaio em anel é que o atrito ( $\mu$  ou  $m$ ) pode ser determinado apenas através de medidas geométricas associadas às curvas de calibração, que são fáceis de serem utilizadas, sem o conhecimento das forças envolvidas. Entretanto, existem alguns pontos fracos: ainda não existe uma análise teórica válida (incluindo modelamento em elementos finitos) para a construção das curvas de calibração; devido à descrição imprecisa do atrito, os valores obtidos de  $\mu$  e  $m$  podem variar facilmente em até 50% de acordo com a escolha da teoria utilizada<sup>(24)</sup>; as interrupções durante o experimento mudam as condições de contorno (tais como o regime do lubrificante) influenciando os valores de  $\mu$  e de  $m$  consideravelmente, e além disso o anel geralmente se torna oval, tornando a medida difícil e afetando sua precisão<sup>(1,13)</sup>.

Por outro lado, o ensaio de tração é limitado pela estricção do material e portanto não é adequado para altas deformações. Embora seja possível efetuar as correções devido ao estado de triaxialidade (correções de Bridgman<sup>(29)</sup>) para  $\varepsilon$  tendendo a 1, este ensaio não fornece informações relativas ao atrito. O fato de que o estado de tensão está fortemente relacionado com a curva de escoamento do material faz com que o ensaio de compressão seja o método mais usual para a obtenção dessa curva. A dificuldade em eliminar completamente o atrito nos ensaios em corpos de prova Rastegaev implica que existe uma certa imprecisão na verdadeira tensão calculada. A baixa precisão da curva de escoamento obtida nos ensaios de compressão em anel torna este tipo de teste ainda menos adequado. O ensaio de compressão planar aproximado (Figura 2.10(b)) também depende da adoção de algumas hipóteses que resultam em alguma imprecisão<sup>(1)</sup>.

Uma análise global precisa ser desenvolvida para representar bem os reais processos de conformação. O estado de tensão e deformação no teste de compressão planar real (Figura 2.10(a)) pode representar muito bem um vasto grupo de processos de conformação, como a extrusão, laminação, estampagem, forjamento, etc. É um método bastante promissor para avaliar o atrito e a lubrificação para a obtenção das curvas de escoamento do material<sup>(1)</sup>. O estado de tensão pode ser controlado e, pela precisa medição instrumentada da tensão planar, a influência do atrito pode ser avaliada. Deste modo, a curva de escoamento pode ser obtida juntamente com os coeficientes de atrito durante o mesmo experimento<sup>(1)</sup>.

A seguir será feita a descrição de um dispositivo, apresentado por Wang e Ramaekers<sup>(1)</sup>, que será empregado para a execução dos ensaios de compressão planar. Este dispositivo pode reproduzir muitas características dos processos de conformação. Utilizando este aparato, a força de atrito, a força vertical e o deslocamento vertical são registrados e analisados em um programa de computador, através da aquisição dinâmica dos dados por meio de uma placa PCL 718 durante o processo de conformação obtendo-se, a partir do processamento destes dados, os coeficientes de atrito, os fatores de atrito e as curvas de escoamento dos materiais ensaiados<sup>(1)</sup>.

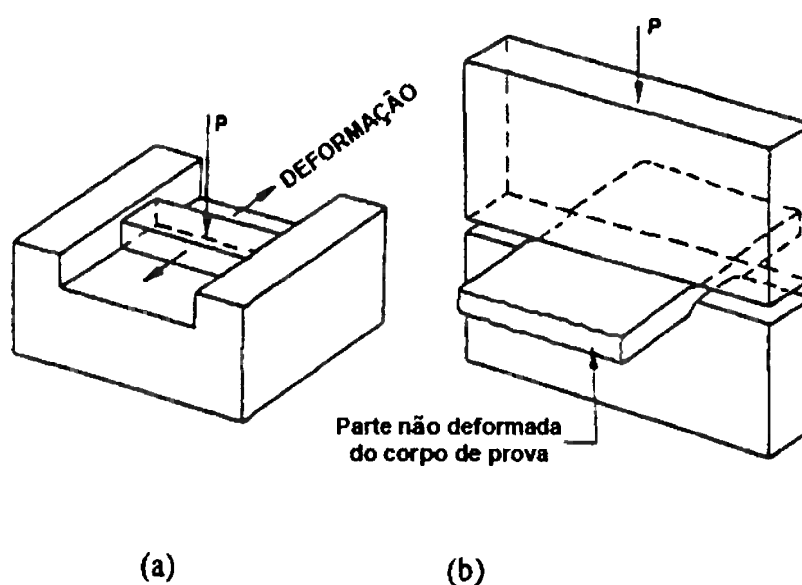


Figura 2.10 – Ensaio de compressão planar<sup>(1)</sup>

#### 2.4. Projeto do Dispositivo Para Execução de Ensaio de Compressão Planar em “Matriz de Canal”.

A maioria dos processos de conformação plástica são processos de compressão, sendo a compressão planar escolhida como o protótipo destes processos. A força de atrito pode ser detectada por um pino sensor acoplado às ferramentas. Devido à dificuldade no projeto e à baixa precisão do pino sensor, o dispositivo deve ser projetado para comprimir o corpo de prova em uma deformação planar, de forma a expor todo o atrito a uma célula de carga.

O princípio deste dispositivo é mostrado na Figura 2.11. O corpo de prova sofre compressão planar, de tal modo que a força de atrito é exposta a um sensor de forças e

detectado por uma célula de carga. A variação da largura do corpo de prova é detectada por um sensor de deformação horizontal. Através do balanço de forças sofridas pelo corpo de prova na direção x, temos:

$$F_{fr} = 2F_{fr1} + 2F_{fr2} \quad (\text{Eq. 12})$$

Para assegurar as condições de deformação planar, as forças de atrito nas duas superfícies laterais ABCD e EFGH devem ser reduzidas para o menor valor possível. Para evitar contaminação do lubrificante nas superfícies a serem testadas, lubrificantes líquidos ou em pó não devem ser utilizados nas superfícies laterais. As dimensões do corpo de prova devem ser escolhidas de modo que a área ADEH seja muito maior do que a área ABCD. Desse modo, a influência do atrito nas superfícies laterais em relação ao atrito total é muito pequeno, garantindo que  $F_{fr1} \approx F_{fr2}^{(1)}$ .

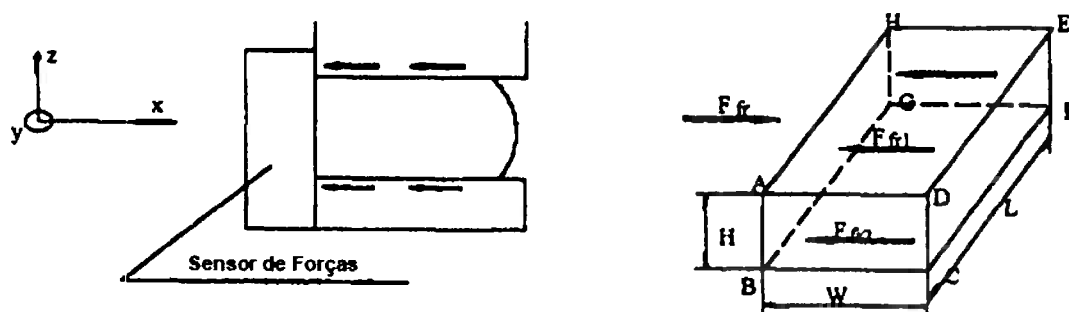


Figura 2.11– Princípio de funcionamento do dispositivo construído<sup>(1)</sup>

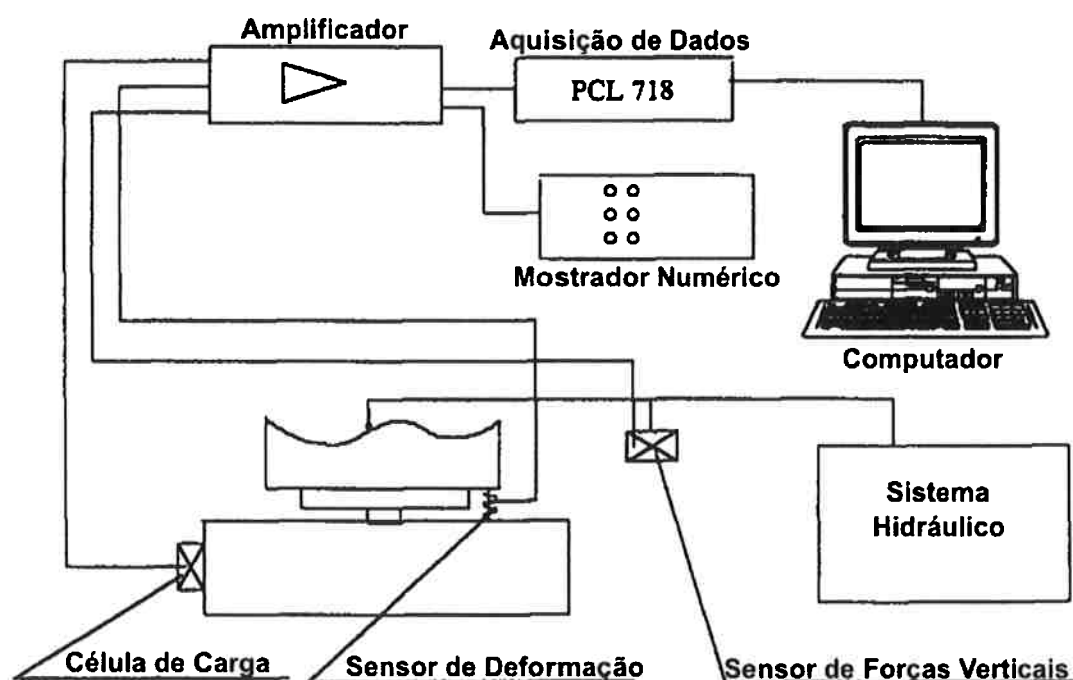


Figura 2.12 – Esquema do Arranjo Experimental

## **2.5. Método dos Elementos Finitos (FEM – Finite Element Method)**

### **2.5.1. Histórico**

A evidente complexidade do mundo que nos cerca torna natural a forma de proceder de engenheiros, cientistas e outros profissionais, que aplicam o processo de análise do método científico de abordagem de problemas, separando os sistemas em componentes básicos (elementos). Assim, pode-se estudar o comportamento dos elementos, que é mais simples, e depois sintetizar as soluções parciais para o estudo do sistema global<sup>(12)</sup>.

Com a evolução dos computadores digitais, os problemas discretos podem ser resolvidos geralmente sem dificuldades, mesmo que o número de elementos seja muito elevado. Entretanto, como a capacidade dos computadores é finita, os problemas contínuos (que geralmente exigem o uso da definição matemática de infinitésimo) só podem ser resolvidos de forma precisa com o uso da matemática.

Dessa forma, os engenheiros procuram abordar problemas de maneira mais intuitiva, estabelecendo analogias entre os elementos discretos e reais e porções finitas de um domínio contínuo.

É difícil precisar o início dos estudos do Método dos Elementos Finitos. Contudo, pode-se dizer que advém do estudo da análise de estruturas, a partir de 1875, quando utilizava-se o processo de análise aproximada de treliças e pórticos baseada na distribuição de tensões, com forças como incógnitas. Por volta de 1920, depois de um lento desenvolvimento, em função dos trabalhos de Maney (EUA) e de Ostenfeld (Dinamarca), passou-se a utilizar a idéia básica de análise aproximada de treliças e pórticos baseada nos deslocamentos como incógnitas. Estas idéias são as precursoras do conceito de análise matricial de estruturas, em uso hoje em dia.

No começo de 1940, McHenry, Hrenikoff e Newmark demonstraram – no campo da mecânica dos sólidos – que podiam ser obtidas soluções razoavelmente boas de um problema contínuo, substituindo-se pequenas porções do contínuo por uma distribuição de barras elásticas simples<sup>(14)</sup>. É dessa época a origem do FEM para a maioria dos matemáticos, associada ao apêndice de um artigo de Courant<sup>(15)</sup>, onde são discutidas aproximações lineares contínuas por parte do problema de Dirichlet em um domínio usando triângulos.

Para a engenharia, duas publicações notáveis podem ser consideradas marcos no estudo do FEM: foram os trabalhos de Argyris & Kesley e de Turner, Clough, Martin & Topp. Tais publicações uniram os conceitos de análise estrutural e análise do contínuo, e lançaram os procedimentos resultantes na forma matricial (o que foi possibilitado pelo surgimento dos computadores digitais por volta de 1950). Elas representaram uma influência preponderante no desenvolvimento do FEM nos anos subseqüentes. Assim, as equações de rigidez passaram a ser escritas em notação matricial e resolvidas em computadores digitais. A publicação clássica de Turner et alli é de 1956<sup>(16)</sup>. Com estas e com outras publicações um desenvolvimento explosivo do FEM aconteceu.

O trabalho de Courant representa o FEM como se conhece hoje em dia, mas havia sido esquecido até que engenheiros, independentemente, o desenvolveram.

O nome Elementos Finitos, que identifica o uso preciso da metodologia geral aplicável a sistemas discretos, foi dado em 1960 por Clough<sup>(17)</sup>.

Daí em diante, a década de 60 serviu para divulgar este novo método, ao mesmo tempo em que a comunidade reconheceu sua potencialidade.

Este período foi seguido por um intensivo desenvolvimento de programas computacionais para colocar as potencialidades do FEM ao alcance dos usuários.

Atualmente, há dezenas de programas computacionais (ABAQUS, ADINA, ALGOR, ANSYS, COSMOSM, MARC, NASTRAN, NONSAP, PATRAN, SINDA, TEAP, TEXGAP etc.) comerciais de uso corrente em diversas áreas do conhecimento que utilizam esse método para análises linear e não-linear<sup>(18)</sup>.

### **2.5.2. Aplicações**

O Método dos Elementos Finitos é seguramente o processo que mais tem sido usado para a discretização de meios contínuos. A sua larga utilização se deve também ao fato de poder ser aplicado, além dos problemas clássicos da mecânica estrutural elástico-linear – para os quais foi o método inicialmente desenvolvido –, também para problemas tais como:

- Problemas não lineares, estáticos ou dinâmicos;
- Mecânica dos sólidos;
- Mecânica dos fluidos;
- Eletromagnetismo;

- Transmissão de calor;
- Filtração de meios porosos;
- Campo elétrico;
- Acústica; etc.

Além disso, pode-se afirmar também que o FEM é muito utilizado face à analogia física direta que se estabelece, com o seu emprego, entre o sistema físico real (a estrutura em análise) e o modelo (malha de elementos finitos)<sup>(19)</sup>.

### **2.5.3. Modelamento Matemático**

O FEM envolve o modelamento de uma estrutura qualquer, empregando elementos interconectados (elementos finitos).

Para problemas que envolvam complexas geometrias, carregamentos, propriedades dos materiais, normalmente não é possível obtermos soluções matemáticas analíticas (que podem envolver equações diferenciais parciais), as quais podem se tornar muito complexas ou, até, impossíveis de solucionar, devido à geometria, carregamento ou propriedades dos materiais envolvidos.

Assim, métodos numéricos, como o FEM, podem trazer soluções aproximadas aceitáveis. Da formulação do FEM, resulta um sistema de equações algébricas simultâneas, em vez de equações diferenciais. Do método numérico obtemos valores aproximados das grandezas, em pontos discretos do contínuo<sup>(20)</sup>.

### **2.5.4. Vantagens e Limitações**

Como todo método numérico, o FEM apresenta também estes dois aspectos, a saber<sup>(21)</sup>:

Vantagens: possibilidade de modelar corpos irregulares; aplicar diferentes carregamentos; modelar corpos compostos de diferentes materiais; aplicar diferentes tipos de condições de carregamento; variar os tamanhos dos elementos; efetuar alterações no modelo de maneira rápida e eficiente; aceitar o comportamento não-linear existente em deformações de sistemas que empregam materiais não-lineares.

Limitações: obtém-se uma solução numérica para um problema específico, não fornecendo, portanto, soluções que permitam um estudo analítico dos efeitos através da variação dos parâmetros envolvidos.



### 3. OBJETIVOS

Objetiva-se, no presente projeto:

1. Construção de um dispositivo para realizar ensaio de compressão planar.
2. Efetuar a comparação entre dados experimentais e modelamento matemático e analítico, relativos ao atrito ( $\mu$  e  $m$ ).
3. Validar o modelo matemático do programa QFORM2D contra os resultados disponíveis na literatura técnica, em particular os relativos ao trabalho de Wang e Ramaekers<sup>(1)</sup>.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico, serão apresentados as ligas utilizadas, o método de trabalho para cada parte experimental, incluindo a construção do dispositivo citado anteriormente, procedimentos ocorridos e todas as informações necessárias para a análise dos resultados.

### 4.1. Material dos Corpos de Prova

A liga utilizada para a confecção dos corpos de prova foi a AA5052, cuja composição química é apresentada na Tabela 4.1 a seguir:

Tabela 4.1 – Composição química da liga AA5052 (% em peso)

Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Al
0,09	0,13	0,16	0,23	2,50	0,05	Balanço

O material foi adquirido através da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) por intermédio do Professor Dr. Ronald Lesley Plaut. O material fornecido foi cortado em tiras e posteriormente usinado para a obtenção de corpos de prova com a geometria de um paralelepípedo. As dimensões dos corpos de prova são:  $(W_0)(B_0)(H_0) = (25,4)(5,0)(4,0)$  mm.

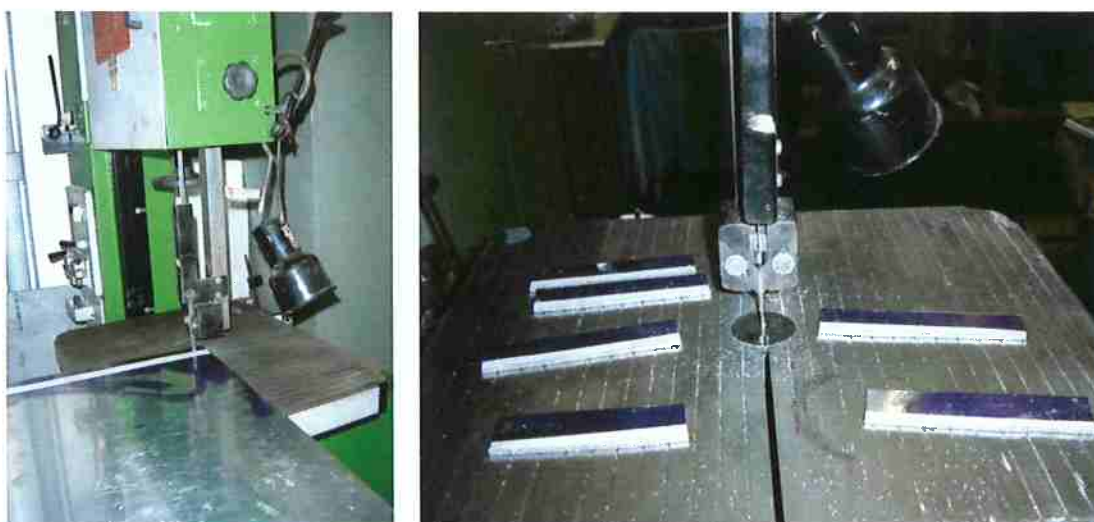


Figura 4.1 – Corte do material utilizado na confecção dos corpos de prova



Figura 4.2 – Usinagem dos corpos de prova

## 4.2 Equipamentos

Na realização dos ensaios foi utilizada uma Máquina de Ensaio EMIC – DL 30000, localizada no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da USP. O treinamento de operação da máquina foi realizado no ano de 2005, com acompanhamento direto do assistente técnico da EMIC. O treinamento foi coordenado pelo Prof. Dr. Cyro Takano. A capacidade de carga da máquina é de 300 kN. Acoplado à máquina de ensaio, fez-se o uso do software TESC (Vmaq.). No TESC foi implementado o método de trabalho.



Figura 4.3 – Máquina de ensaios EMIC DL30000 com capacidade para 300kN

### 4.3 Construção do Dispositivo

O principal desafio do presente projeto foi a construção do dispositivo empregado na realização dos ensaios de compressão planar com os recursos disponíveis no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade de São Paulo.

A construção do dispositivo, bem como os materiais empregados, está explicada detalhadamente no Anexo A (Construção do Dispositivo).

### 4.4. Procedimento Experimental

Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente, seguindo o seguinte roteiro:

- Mediu-se as dimensões dos corpos de prova para confirmar a dimensão inicial (considerou-se uma tolerância de até 0,05 mm).

- Acoplou-se a base de suporte diretamente parafusada à máquina de ensaios e, sobre ela, fixou-se a matriz inferior.

- Cada um dos componentes da aparelhagem foi lubrificado com uma camada de Molykote™.

- A seguir colocou-se o corpo de prova sobre a base centralizando-o em relação ao pulsor superior da máquina.

- Foram colocados dois blocos de aço em cada lado do corpo de prova para guiar a descida da matriz superior e garantir que a variação de largura no corpo de prova durante a compressão ocorresse somente em uma única direção e sentido.

- Sobre o corpo de prova centralizado colocou-se a matriz superior.

- As roscas laterais foram parafusadas para garantir que o conjunto ficasse bem rígido, evitando o deslocamento lateral do corpo de prova e também da matriz superior durante sua descida.

- Posicionado o pulsor superior sobre o conjunto de apoio e corpo de prova realizou-se uma série de vários ensaios com o caráter regulador das condições experimentais. A velocidade da máquina foi a máxima permitida, aproximando à situação industrial em processos de conformação de metais (forjamento).

- Após a regulagem, a máquina foi configurada através do programa de computador TESC para que o critério de parada se desse quando o corpo de prova atingisse a altura final de 2,0 mm (equivalente a 50% de redução). 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 no TESC, estabelece-se como limite superior o deslocamento zero. O indicador da força também é zerado. Coloca-se na região de trabalho o conjunto completo de matrizes e corpo de prova. 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 realização do ensaio.



Figura 4.4 – Montagem do Ferramental

Após a realização do primeiro ensaio válido, foram realizados mais dois ensaios com a finalidade de verificar a reprodutibilidade do experimento.

#### 4.5 Simulação no QFORM2D

O programa QFORM (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 lagrangeana (grandes deformações) 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 torna-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 4.5 – 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, foi utilizada a versão QFORM2D, com licença de uso do software adquirida legalmente. O período de uso do programa ocorreu nos meses de novembro de 2007 a janeiro de 2008. Todas as análises e resultados aqui obtidos foram efetuados em microcomputador situado no laboratório de informática do PECE (Programa de Educação Continuada em Engenharia) do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Universidade de São Paulo (contendo a licença de uso do software) com orientação do Prof. Dr. Ronald Lesley Plaut.

A construção do modelo é demonstrada passo a passo no Anexo B.



#### 4.5.1 – Dados de Entrada na Simulação

A curva tensão-deformação da liga utilizada nos corpos de prova é um dos dados de entrada de maior importância na simulação. Para garantir a qualidade deste dado, foi adquirido um relatório de ensaios de tração na liga AA5052 realizados no laboratório da própria CBA, por intermédio do Engenheiro Heber Otomar. Este relatório se encontra detalhado no Anexo C. A partir da plotagem no programa Microsoft Excel dos valores de tensão e deformação obtidos por este relatório, realizou-se a regressão em potência da curva  $\sigma \times \varepsilon$ , do tipo  $\sigma = K\varepsilon^n$ , obtendo-se a seguinte função:  $\sigma = 354\varepsilon^{0,24}$  (Eq. 13).

Como estes ensaios de tração forneceram valores de tensão e deformação até um alongamento máximo médio de 19%, o comportamento do material para deformações acima deste valor não foi determinado, e a aproximação da curva  $\sigma \times \varepsilon$  torna-se muito grosseira utilizando-se regressão baseada em dados extrapolados.

Para minimizar este problema e tornar a regressão mais adequada, a curva  $\sigma \times \varepsilon$  obtida pelos dados da CBA foi comparada com a literatura. Sabendo-se que o comportamento da curva  $\sigma \times \varepsilon$  de um material depende da composição química (que varia conforme o fabricante e o lote do produto) e das condições de encruamento, Altan<sup>(22)</sup> fornece dois valores de K e n para a liga AA5052. Uma cópia da Tabela contendo os dados fornecidos por este livro encontra-se no Anexo D.

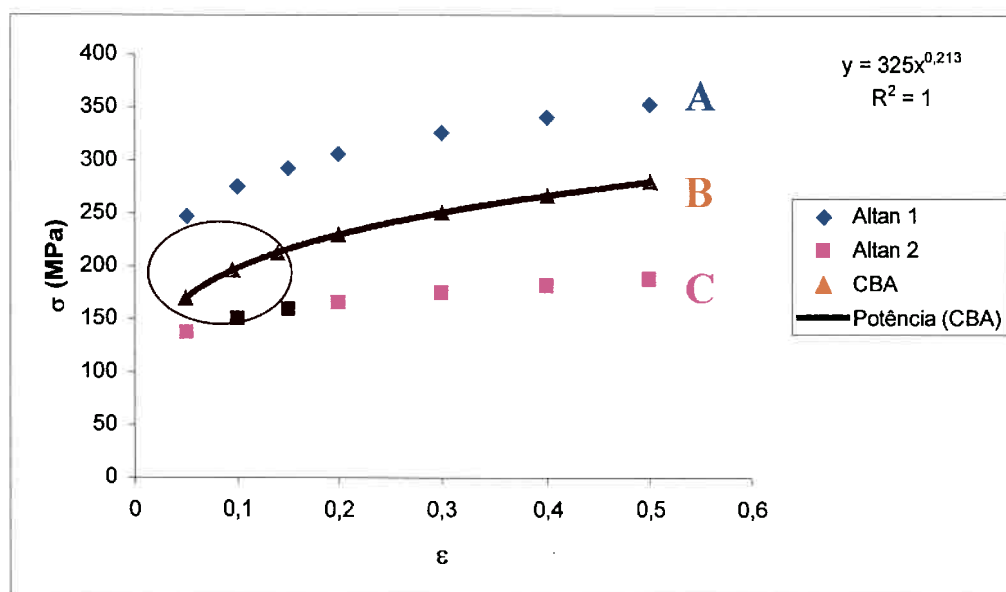


Figura 4.6 – Ajuste da curva  $\sigma \times \varepsilon$

Na Figura 4.6, pode-se observar que a curva B assume valores intermediários às duas curvas obtidas na literatura (Curvas A e C), sendo os três primeiros pontos

(indicados por um círculo em volta dos mesmos) correspondentes aos dados obtidos pelo ensaio de tração da CBA. Os demais valores foram suavizados de modo a seguir a tendência de crescimento dos valores da literatura, obtendo-se assim o novo modelo para o material:  $\sigma = 325\varepsilon^{0,213}$  (Eq. 14).

Uma comparação das duas regressões pode ser observada na Figura 4.7 a seguir:

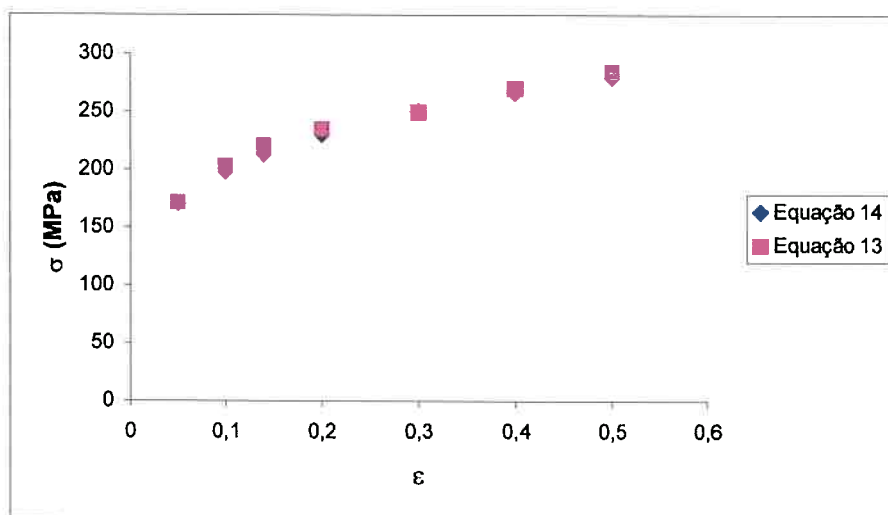


Figura 4.7 – Comparação entre as duas regressões realizadas



## 5. RESULTADOS

Neste tópico, os resultados experimentais serão comparados com a simulação em elementos finitos no software QFORM2D e com cálculos efetuados em equações analíticas.

### 5.1. Resultados Experimentais

A Figura 5.1 abaixo mostra os resultados obtidos para a curva Força (kN) x deformação real para os três ensaios válidos realizados pela máquina EMIC para a liga AA5052, temperatura ambiente, com lubrificação da marca Molykote™ e velocidade da máquina de 10 mm/s.

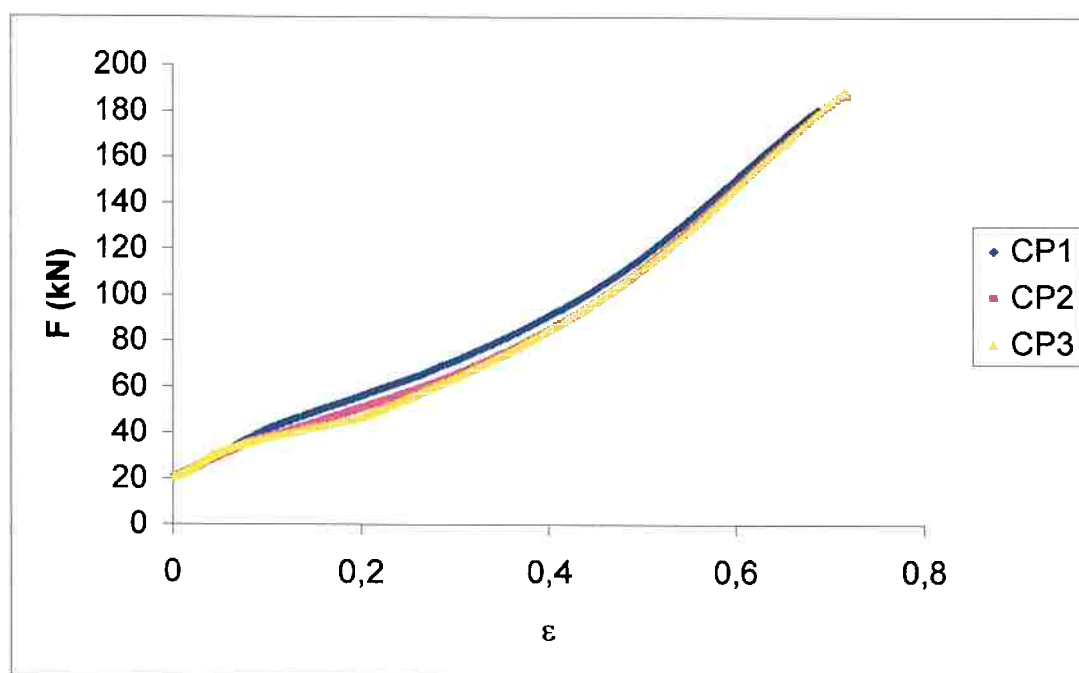


Figura 5.1 - Curva Força (kN) x Deformação Real para os três ensaios válidos

Após a realização dos ensaios, a largura média final dos corpos de prova medida foi de 10,1 mm. A Tabela 5.1 abaixo apresenta as dimensões finais medidas para cada corpo de prova:

Tabela 5.1 – Dimensões Finais dos Corpos de Prova

CP	H <sub>0</sub> (mm)	H <sub>f</sub> (mm)	B <sub>0</sub> (mm)	B <sub>f</sub> (mm)
1	4,01	2,03	5,01	10,09
2	3,99	1,99	5,01	10,11
3	4,00	1,99	5,00	10,10

## 5.2. Resultados da Determinação do Coeficiente de Atrito e do Fator de Atrito

Neste item serão apresentados os valores do coeficiente de atrito e do fator de atrito determinados através da simulação no QFORM2D, e estes valores serão comparados com cálculos em equações analíticas.

### 5.2.1. Resultados da Simulação no QFORM2D

Utilizando-se o método de trabalho especificado no Anexo B, foram realizadas várias simulações no programa QFORM2D para a liga AA5052 à temperatura ambiente, utilizando-se como parâmetro vários valores para o Fator de Atrito. É importante salientar que o programa QFORM2D trabalha apenas com o valor de  $\underline{m}$  para o cálculo do atrito (outros programas de elementos finitos, como o ABAQUS, utilizam tanto o  $\underline{m}$  como o  $\underline{\mu}$ . Já o programa DEFORM2D / 3D utiliza apenas o  $\underline{\mu}$ ). As curvas Força x Deformação Real geradas pelo programa em cada uma destas simulações foram comparadas com os resultados experimentais, até que fosse encontrada a curva que mais se ajustasse com as curvas experimentais. Todos os resultados destas simulações podem ser encontrados no Anexo E.

Com base nestes dados, o Fator de Atrito obtido pela simulação é  $0,45 \leq m \leq 0,5$ .

A seguir será feita uma análise das imagens e vídeos gerados pela simulação. Os parâmetros envolvidos no processo de deformação do corpo de prova serão comparados nas condições ideal ( $m = 0$ ) e  $m = 0,5$ . Os parâmetros que serão discutidos são: largura final do corpo de prova, fluxo do material, linhas de fluxo, temperatura, refinamento da malha de elementos finitos, distribuição de tensões, tensão média e taxa de deformação efetiva.

Como parte deste trabalho acompanha uma mídia CD-R com todos os vídeos gerados pelo QFORM2D no formato AVI (Áudio Vídeo Interleave) utilizando-se codec

(codificador / decodificador) nativo do sistema operacional Windows nas versões 2000/ME e superiores. A intenção é possibilitar ao leitor uma visualização dinâmica do processo de compressão dos corpos de prova. Os vídeos objetivam compreender a movimentação das malhas de elementos finitos e fluxos de material, assim como na distribuição de tensões no interior do corpo de prova.

**a) Largura final do corpo de prova:** na simulação para  $m = 0,5$ , o QFORM2D forneceu o valor de 10,029 mm para a largura final do corpo de prova após a compressão, ao passo que as larguras finais medidas experimentalmente para os três corpos de prova foram, respectivamente, 10,09, 10,10 e 10,11 mm.

Na condição de atrito ideal ( $m = 0$ ), a largura final é de 9,976 mm. Pode-se perceber que nesta condição, a geometria do corpo de prova conserva o seu paralelismo, permanecendo um retângulo, enquanto que para  $m = 0,5$ , a presença do atrito propicia a formação da deformação heterogênea ou “barrica”.

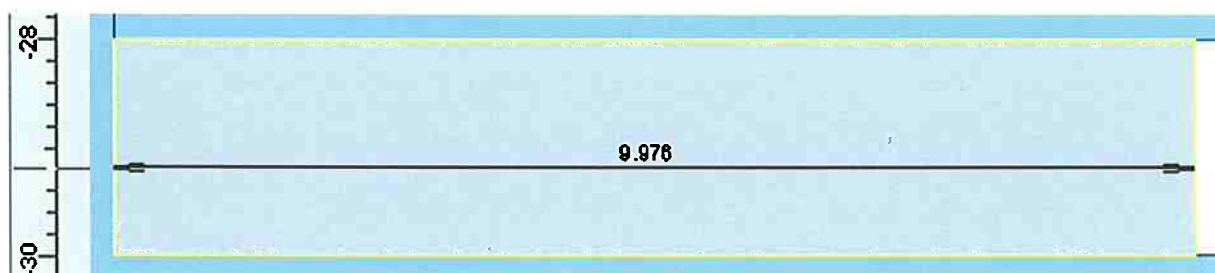


Figura 5.2 – Largura final do corpo de prova na simulação na condição ideal

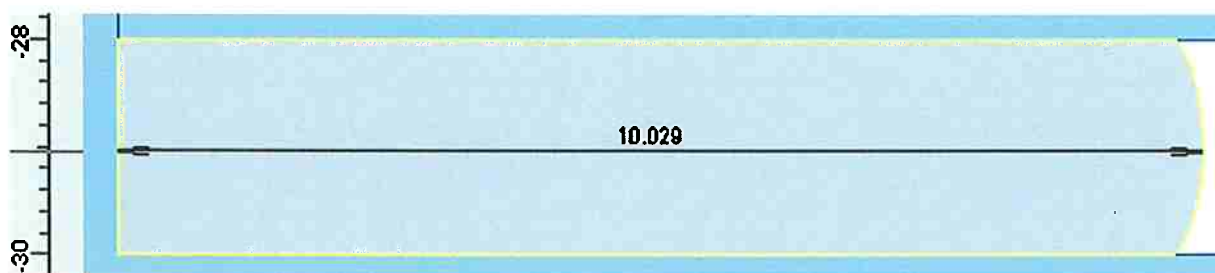


Figura 5.3 – Largura final do corpo de prova na simulação para  $m = 0,5$

**b) Fluxo do material:** observa-se que a direção do fluxo do material segue o deslocamento da largura do corpo de prova, sendo que o fluxo é nulo em uma pequena porção da região inferior esquerda do corpo de prova, indicada nas Figuras 5.4 e 5.5, onde o seu movimento está constringido.

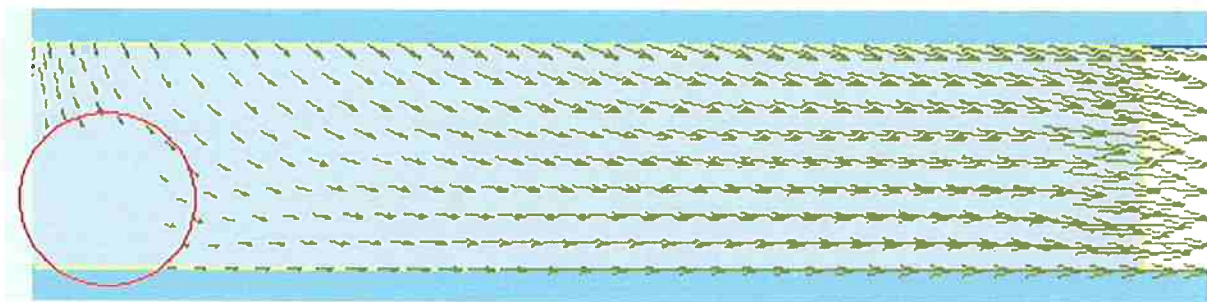


Figura 5.4 – Fluxo do material (Ideal). Detalhe para a região onde o fluxo é nulo

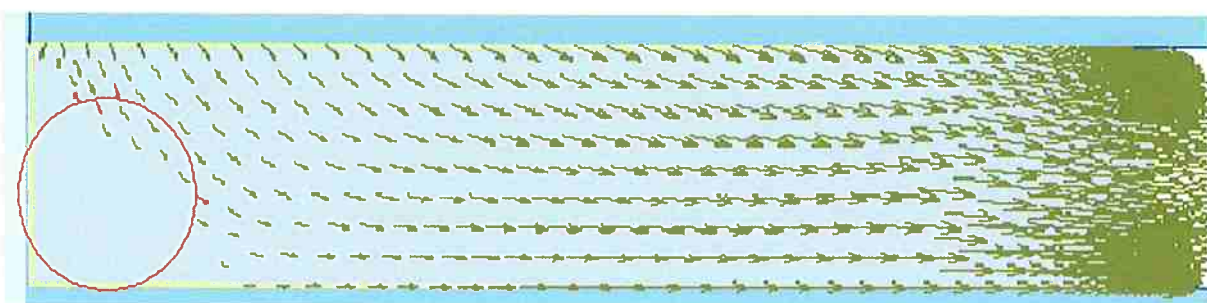


Figura 5.5 – Fluxo do material ( $m = 0,5$ ). Detalhe para a região onde o fluxo é nulo

**c) Linhas de fluxo:** Na Figura 5.6 observa-se que, aparentemente, as linhas de fluxo na condição ideal não sofrem distorção, já para a condição  $m = 0,5$ , na Figura 5.7, as linhas são distorcidas no sentido do fluxo do material.

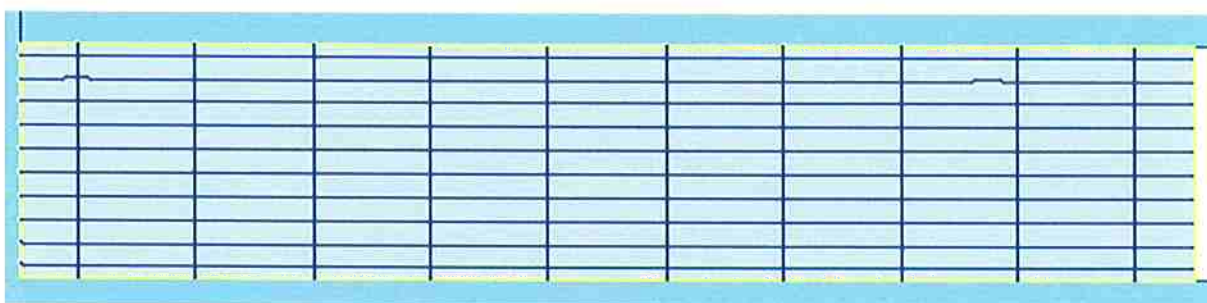


Figura 5.6 – Linhas de fluxo (Ideal)

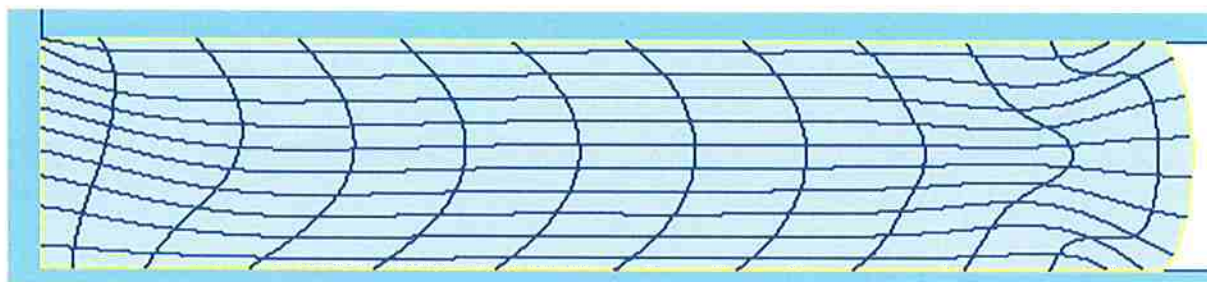


Figura 5.7 – Linhas de fluxo ( $m = 0,5$ )

**d) Malha de Elementos Finitos:** Na condição ideal, na Figura 5.8 observa-se um maior refino da malha no canto inferior esquerdo do corpo de prova, sendo que a distribuição é praticamente homogênea nas demais áreas, ao passo que na condição  $m = 0,5$  (Figura 5.9), o refino da malha é maior na extremidade livre (o programa configura a distribuição dos nós automaticamente). Nas Figuras 5.8 e 5.9, as regiões de maior refinamento das malhas estão destacadas por um círculo.

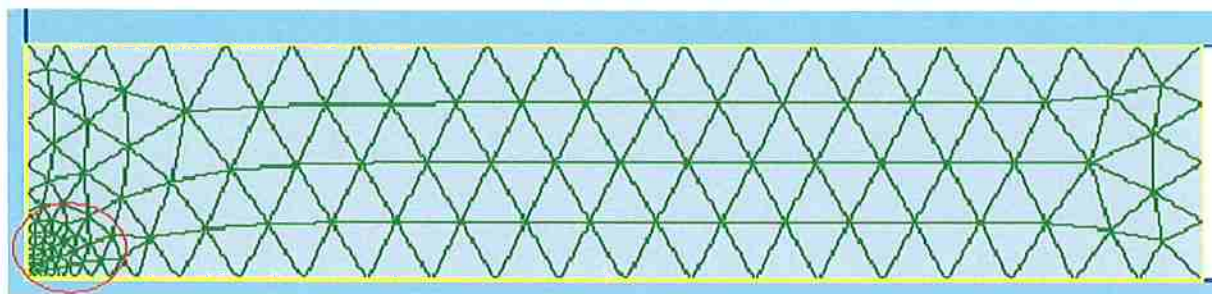


Figura 5.8 – Malha de elementos finitos (Ideal). Detalhe para a região de maior refinamento da malha

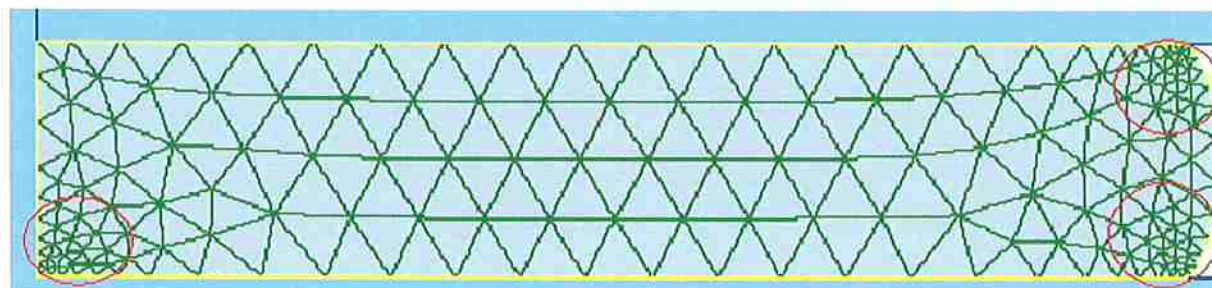


Figura 5.9 – Malha de elementos finitos ( $m = 0,5$ ). Detalhe para as regiões de maior refinamento da malha

**e) Distribuição de tensões:** Na condição ideal (Figura 5.10), verifica-se que a distribuição de tensões é homogênea (nas tonalidades de cores, pouco se altera o valor da tensão: de aproximadamente 306,6 a 306,7 MPa). Já no caso  $m = 0,5$  (Figura 5.11), há maior variação de tensões ao longo da seção lateral do corpo de prova (de 161 MPa na região menos deformada até 325 MPa na região mais deformada).



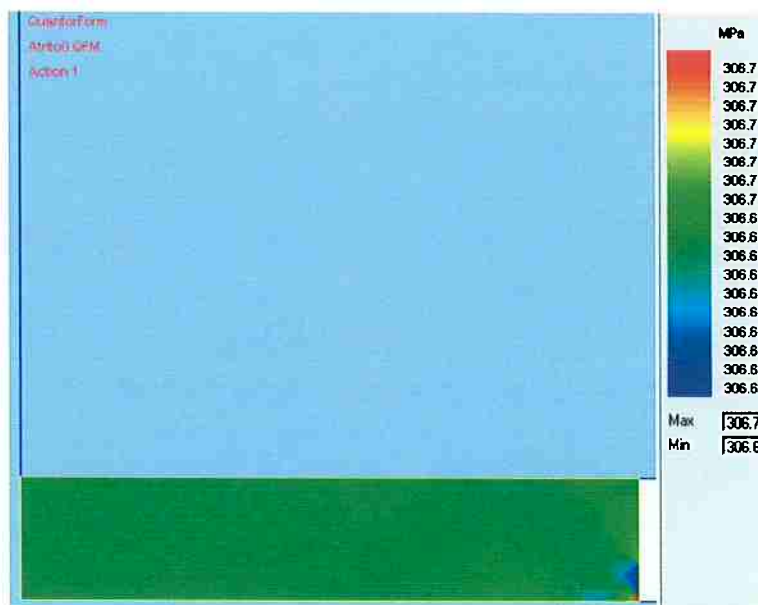


Figura 5.10 – Distribuição de tensões (Ideal)

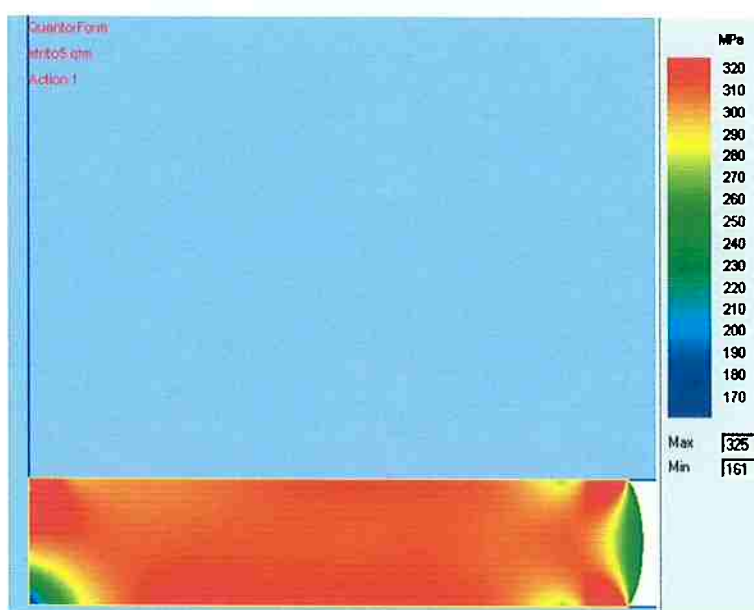


Figura 5.11 – Distribuição de tensões ( $m = 0,5$ )

f) **Tensão média:** Na condição ideal (Figura 5.12) verifica-se que as tensões médias variam pouco (aproximadamente 177,0 a 177,2 MPa). Já na condição de  $m = 0,5$  (Figura 5.13) a tensão média varia entre -929,7 a 184,7 MPa), o que indica que a distribuição é bem mais heterogênea se comparado com a condição ideal.

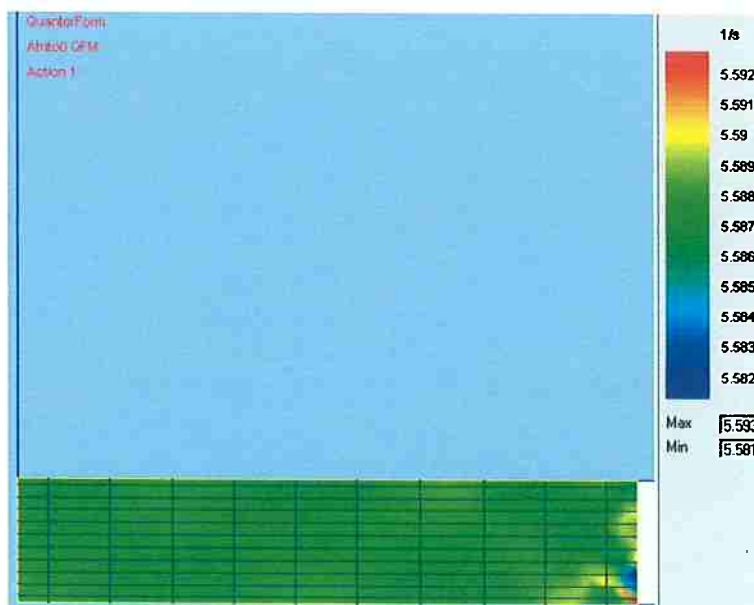


Figura 5.14 – Taxa de deformação efetiva (Ideal)

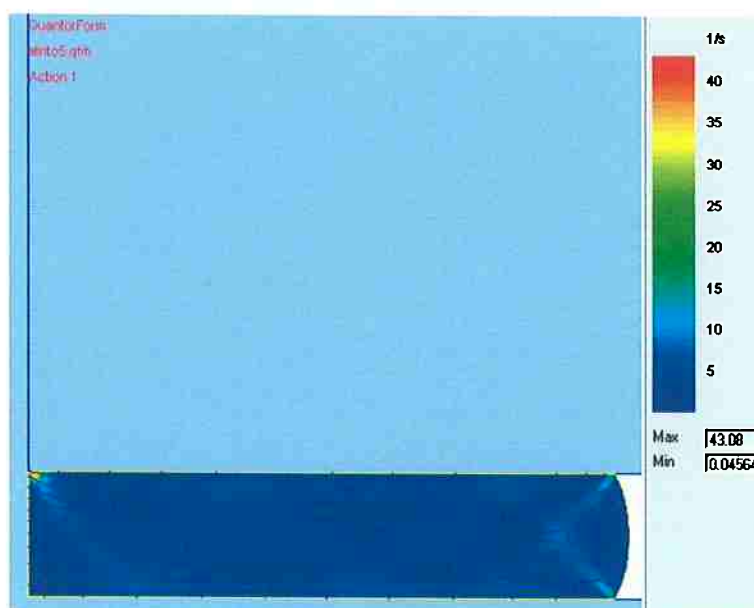


Figura 5.15 – Taxa de deformação efetiva ( $m = 0,5$ )

**h) Temperatura:** Para o modelamento da distribuição da temperatura na simulação, foi necessária a utilização de dados de entrada no programa referentes às propriedades térmicas do material. Os dados obtidos na literatura<sup>(32)</sup> para a liga AA5052, e utilizados para a simulação são: densidade ( $2840 \text{ kg/m}^3$ ), condutividade térmica ( $246 \text{ W/mK}$ ), calor específico ( $1022 \text{ J/kgK}$ ) e ponto de fusão ( $660^\circ\text{C}$ ).

Na Figura 5.16, pode-se observar que a simulação indica uma distribuição de temperatura mais homogênea para a condição de atrito ideal se comparada com a

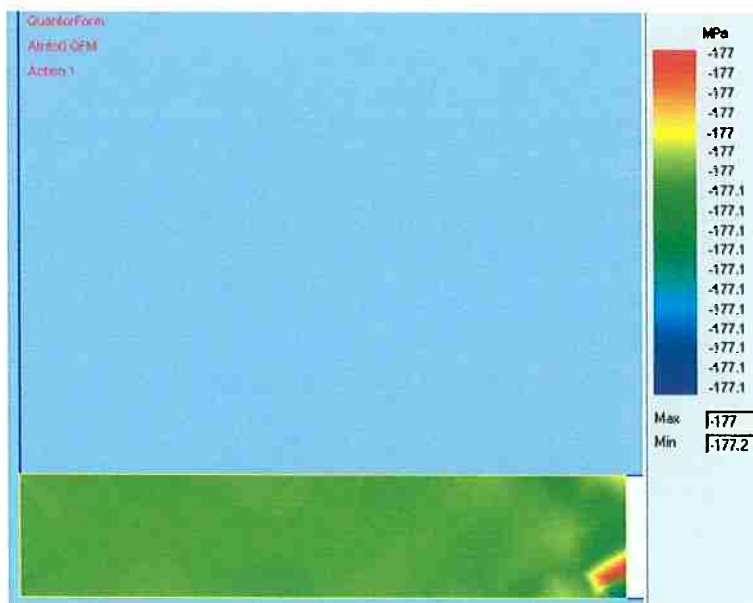


Figura 5.12 – Tensões médias (Ideal)

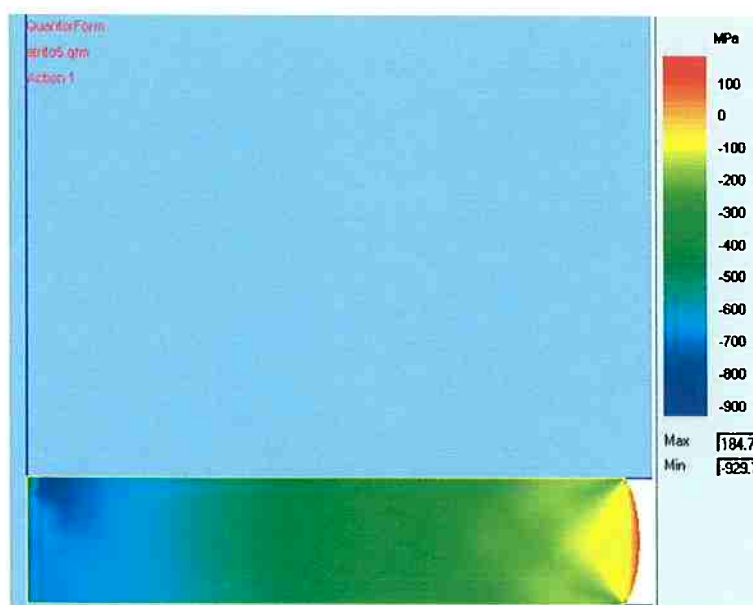


Figura 5.13 – Tensões médias ( $m = 0,5$ )

**g) Taxa de deformação efetiva:** Tanto a intensidade da taxa de deformação efetiva como sua variação ao longo da seção lateral do corpo de prova são maiores na condição  $m = 0,5$  ( $0,04 - 43,08 \text{ s}^{-1}$ ), conforme a Figura 5.15, em relação à condição ideal de atrito ( $5,58 - 5,59 \text{ s}^{-1}$ ), conforme a Figura 5.14.



condição de atrito  $m = 0,5$  (Figura 5.17). As diferenças entre as temperaturas finais é muito pequena ao se comparar as condições ideal e  $m = 0,5$  (da ordem de aproximadamente  $2^{\circ}\text{C}$ ).

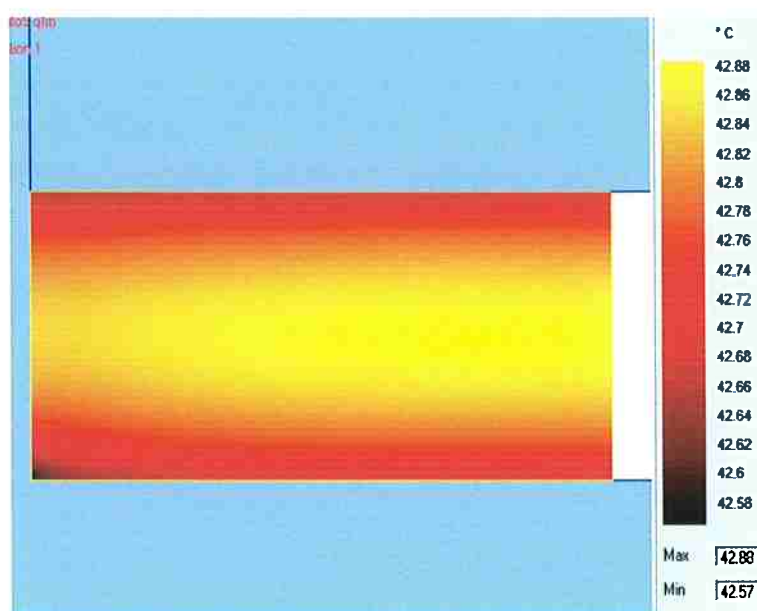


Figura 5.16 – Distribuição de temperatura (Ideal)

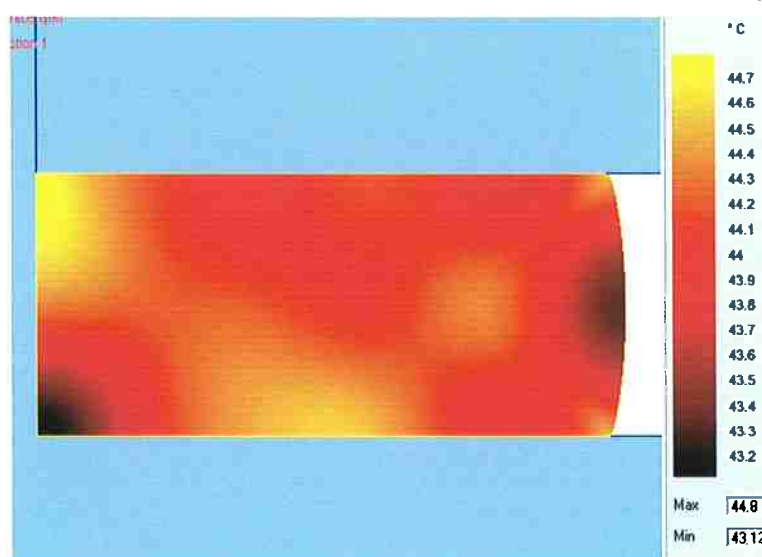


Figura 5.17 – Distribuição de temperatura ( $m = 0,5$ )

### 5.2.2. Resultados da Determinação do Fator de Atrito por Equações Analíticas

O fator de atrito também foi calculado por meio de equações analíticas através de dois modelos: o modelo da “Bossa de Atrito”<sup>(26)</sup> e o modelo proposto por G. W. Rowe<sup>(27)</sup>

(na verdade, ambos os modelos calculam o valor do coeficiente de atrito  $\mu$ , e este foi convertido - pela Equação 3 - para fator de atrito  $m$ ). Todos os cálculos envolvidos em cada um destes modelos se encontram respectivamente nos Anexos F e G.

Pelo modelo da “Bossa de Atrito”, o valor de  $m$  encontrado foi aproximadamente 0,83 e, portanto, incoerente com o modelo levantado pelo QFORM2D (apresentado na Figura 5.18 abaixo).

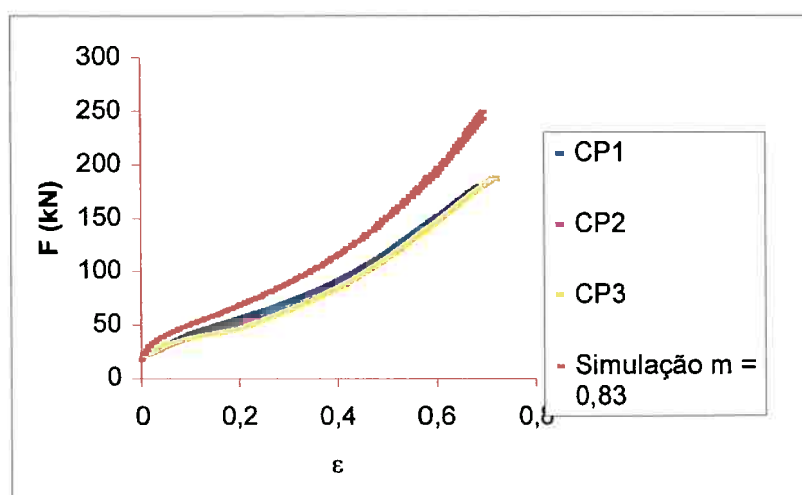


Figura 5.18 – Resultado da simulação no QFORM2D na liga AA5052 para  $m = 0,83$

Pelo modelo de G. W. Rowe, o valor encontrado para  $m$  foi de aproximadamente 0,46, o que é aparentemente coerente com o resultado da simulação no QFORM2D.

### 5.3. Resultado da Simulação no QFORM2D para os Dados da Literatura

Utilizando-se o mesmo método de trabalho especificado no Anexo B, foram realizadas simulações com os dados de entrada de um artigo de S.L. Wang e J. A. H. Ramaekers<sup>(1)</sup>. O objetivo destas simulações é compara-las com o modelo desenvolvido no presente projeto, uma vez que os experimentos realizados pelos referidos autores foram todos devidamente instrumentados com precisão.

O princípio básico do ferramental utilizado pelos autores do artigo<sup>(1)</sup> é semelhante ao descrito neste trabalho, com exceção principalmente das dimensões e dos materiais utilizados. Os corpos de prova de Wang e Ramaekers foram confeccionados em uma liga de alumínio cuja curva  $\sigma \times \epsilon$  segue a seguinte equação:  $\sigma = 120\epsilon^{0,24}$  (Eq. 15). Esta equação é dada pelo próprio artigo. Os autores não especificam exatamente qual liga foi

utilizada, mas como o artigo cita que a liga é um “soft aluminium”, provavelmente trata-se de uma liga da série AA1XXX. Os corpos de prova confeccionados por Wang e Ramaekers possuem as seguintes dimensões:  $(W_0)(B_0)(H_0) = (50,02)(25,00)(19,84)$  mm.

Como o fator de atrito máximo medido no referido artigo é 0,6 as simulações foram computadas para valores de  $m = 0,6$  e  $m = 0,7$  e em seguida as curvas  $F$  (kN) x  $\Delta H/H_0$  foram comparadas.

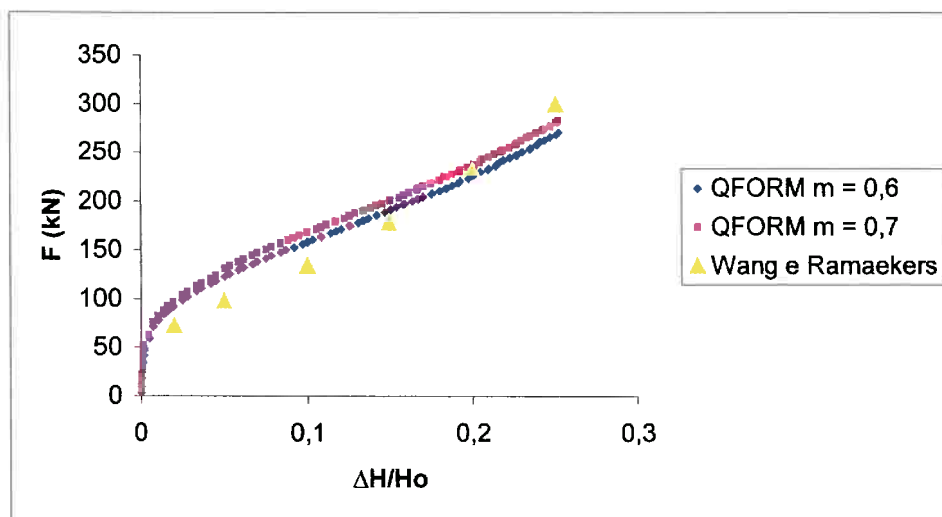


Figura 5.19 – Comparação entre os resultados obtidos na simulação pelo QFORM2D com  $m = 0,6$ ,  $m = 0,7$  e os resultados experimentais de Wang e Ramaekers<sup>(1)</sup>

A Figura 5.19 compara os resultados obtidos na simulação com os resultados experimentais de Wang e Ramaekers<sup>(1)</sup>. Pode-se observar que os modelos matemáticos ainda não são coerentes com os resultados experimentais, e a força máxima na simulação mesmo com  $m = 0,7$  é da ordem de 280 kN, ao passo que no experimento foi da ordem de 300 kN.

Os autores, porém, registraram dinamicamente os valores do coeficiente de atrito e do fator de atrito ao longo do ensaio, e demonstraram que os mesmos não são constantes e variam conforme a deformação (Figura 5.22). Deste modo, a simulação necessitava ser aprimorada, levando em consideração que o valor de  $m$  é variável.

Infelizmente, o programa QFORM2D não permite modelar a variação de  $m$  em função da deformação. A única maneira de contornar esse problema foi modelar a variação de  $m$  em função da variação da temperatura, uma tarefa que o programa é capaz de executar.

Como o tipo de liga de alumínio utilizada no artigo não foi especificada (só é possível deduzir que se trata de uma liga da série AA1XXX), foram utilizados como dados

de entrada para as propriedades térmicas do material os valores de densidade ( $2750 \text{ kg/m}^3$ ), condutividade térmica ( $150 \text{ W/mK}$ ), calor específico ( $1080 \text{ J/kgK}$ ) e ponto de fusão ( $660^\circ\text{C}$ ) da liga AA1100, encontrados no banco de dados do próprio programa. Estes dados apresentam pouca variação com os dados obtidos na literatura<sup>(33)</sup>.

Com base nas figuras geradas pelo programa durante a simulação, verificou-se a variação da temperatura na superfície do corpo de prova no início ( $20^\circ\text{C}$ ) – Figura 5.20 – e no final do processo ( $28^\circ\text{C}$ ) – Figura 5.21. Com base nisso o programa foi configurado para estabelecer uma variação de  $m$  em função da temperatura, com  $m$  variando de 0 a 0,8 (Figura 5.23).

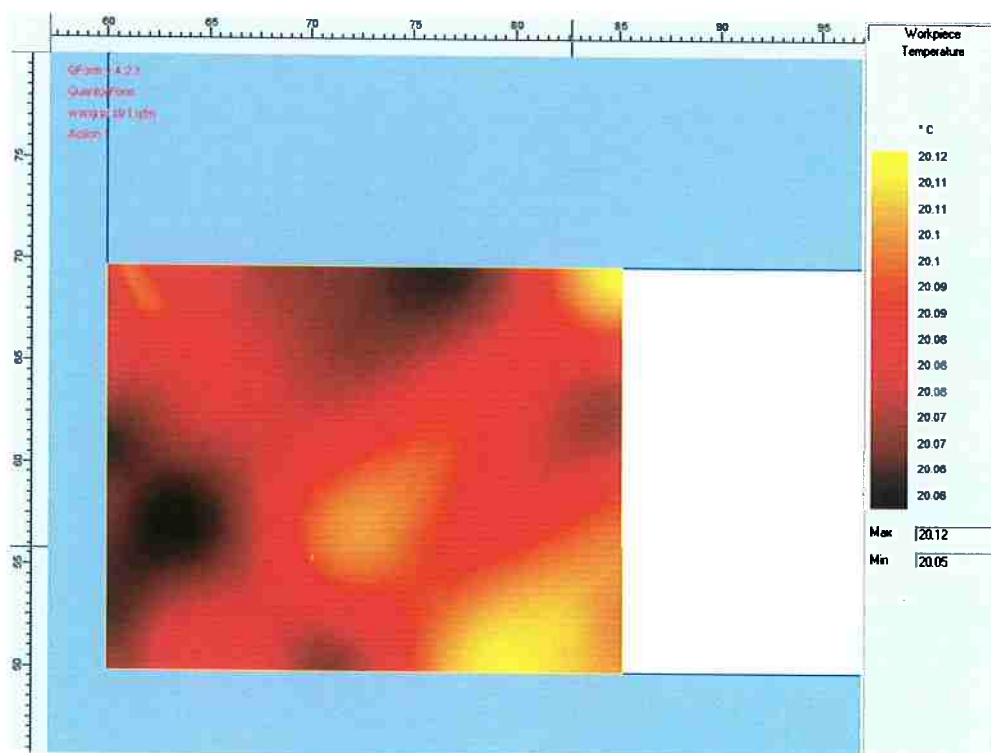


Figura 5.20 – Distribuição de temperaturas no início na simulação

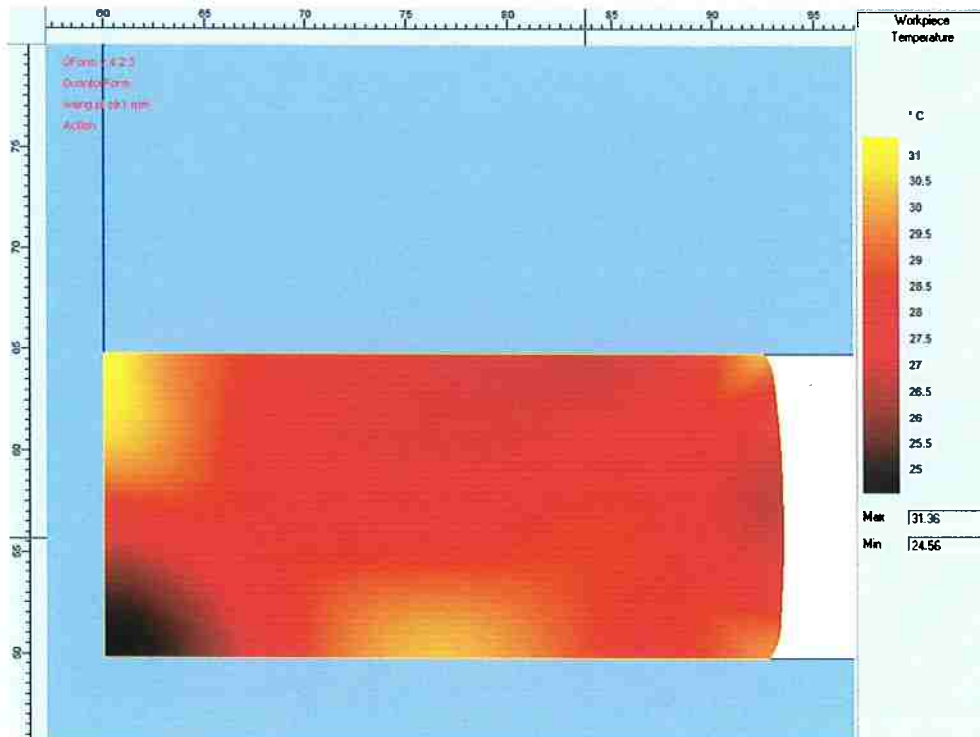


Figura 5.21 – Distribuição de temperaturas no final da simulação

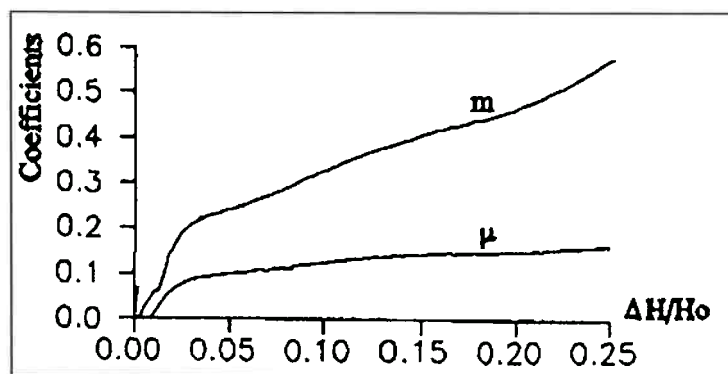


Figura 5.22 - Variação de  $\mu$  e  $m$  com a deformação (Wang e Ramaekers)<sup>(1)</sup>

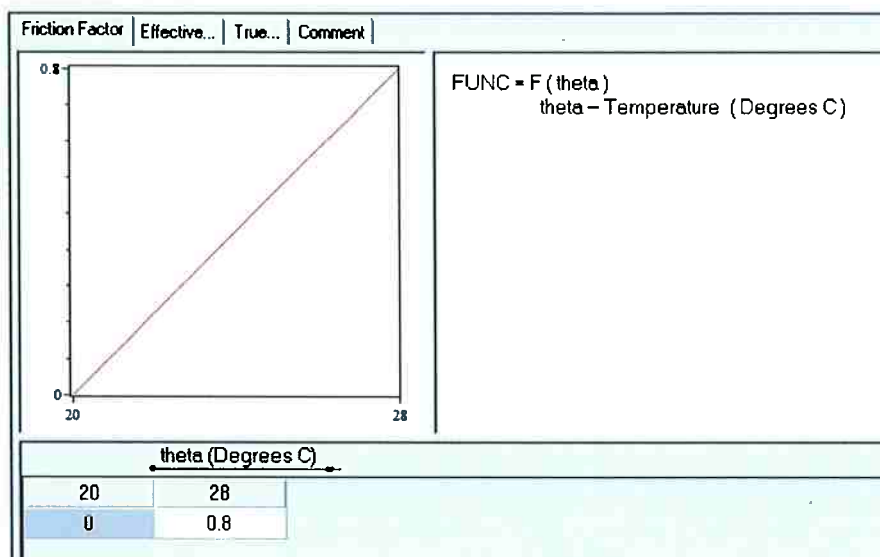


Figura 5.23 – Configurando o programa QFORM2D para modelar  $m$  em função da temperatura

Com base nestes novos dados de entrada para os valores assumidos por  $m$ , obteve-se uma nova curva  $F$  (kN)  $\times \Delta H/H_0$ , desta vez um pouco mais coerente com os resultados experimentais.

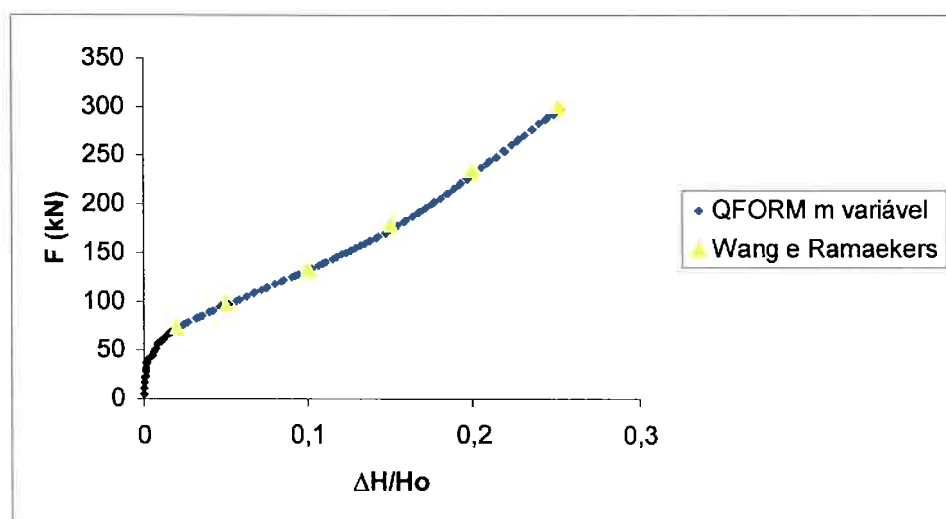


Figura 5.24 – Resultados da simulação para  $m$  variável comparados com os resultados experimentais de Wang e Ramaekers<sup>(1)</sup>

## 6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Atualmente ainda se discute diferentes modelos para explicar o atrito. Dependendo do modelo utilizado, os valores calculados podem variar em até 50%<sup>(24)</sup>.

Comparando-se as curvas de Força x Deformação Real geradas pelas simulações no QFORM2D para o arranjo experimental desenvolvido neste trabalho, pode-se observar que, ainda que aparentemente a curva que mais se ajusta aos resultados teóricos em média é a curva para  $m = 0,5$ , à medida em que o parâmetro de simulação “Fator de Atrito” aumenta, o valor das forças calculadas pelo programa para baixas deformações vai cada vez mais se afastando dos valores experimentais.

Existem diversas possibilidades que podem explicar esta aparente incoerência entre o modelo do QFORM2D e os resultados experimentais do presente projeto:

- A precisão do modelo matemático em FEM depende dos dados de entrada: quanto melhor a qualidade dos dados de entrada, melhor a sua precisão. A curva  $\sigma \times \varepsilon$  utilizada no modelo desenvolvido neste trabalho foi baseada em uma interpolação de valores obtidos em ensaios de tração realizados industrialmente (CBA). Sabe-se que a fluência de um metal é diferente na tração e na compressão. O ensaio da CBA fornece valores de  $\sigma$  para alongamentos de até 19% em média, sendo que os demais pontos foram extrapolados a partir de curvas obtidas na literatura. Estas hipóteses utilizadas no levantamento da curva  $\sigma \times \varepsilon$  fazem com que a aproximação seja grosseira.
- Não foi possível efetuar a medição da força horizontal ao longo deste experimento. Sem a presença de uma célula de carga ou de uma mola ligada ao corpo de prova, não é possível validar o modelo matemático por não haver medida experimental da força de atrito bem como do deslocamento (assumindo a temperatura constante).
- Existe atrito entre os componentes do ferramental quando estes deslizam entre si. No presente modelo matemático o ferramental não foi simulado.

- Wang e Ramaekers<sup>(1)</sup> demonstraram experimentalmente que o atrito é variável com a deformação. De fato, ao longo da conformação mecânica a área de contato matriz/peça aumenta e também ocorre um aquecimento do material devido ao atrito no processo, fazendo com que a aderência do lubrificante na superfície do material aumente no decorrer da compressão. Assim, o fator de atrito ( $m$ ) e o coeficiente de atrito ( $\mu$ ) aumentam no decorrer do processo. O QFORM2D não permite a criação de um modelo variável para o Fator de Atrito em função da deformação. O modelo foi elaborado baseando-se na hipótese de que  $m$  é constante.

Na simulação efetuada com os dados da literatura técnica (trabalho de Wang e Ramaekers<sup>(1)</sup>), o modelo com inclusão do efeito da variação do fator de atrito  $m$  com a temperatura apresentou melhores resultados em relação ao modelo com  $m$  constante, baseado na comparação das curvas experimentais com as curvas calculadas pelo programa QFORM2D.



## 7. CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu obter as seguintes conclusões:

1. Foi construído um dispositivo visando a determinação, em único ensaio, da curva de escoamento e do coeficiente de atrito em compressão planar. O dispositivo é capaz de reproduzir as condições existentes em uma peça em um processo industrial de conformação mecânica.

No presente projeto foi possível obter no ensaio as informações de Força x Deformação Real para uma liga de alumínio (AA5052) à temperatura ambiente.

2. O fator de atrito entre a matriz e o corpo de prova foi determinado por três métodos: simulação no QFORM2D (item 5.2.1 e Anexos B e E), modelo proposto por G.W. Rowe<sup>(27)</sup> (Anexo G) e modelo da “Bossa de Atrito” (Anexo F). Pela simulação, o fator de atrito calculado é  $0,45 \leq m \leq 0,5$ . O modelo de Rowe coincidiu com o fator de atrito obtido pela simulação, fornecendo um valor de  $m \approx 0,46$ . Já pelo modelo da “Bossa de Atrito” o  $m$  calculado foi de 0,83. Esta diferença entre os modelos se deve ao fato de que ainda não existe um modelo teórico preciso para definir e explicar o atrito, havendo uma grande variação nos valores calculados, dependendo do modelo utilizado.

Esta diferença pode ser superada acoplado-se ao dispositivo uma célula de carga para medir a força de atrito na horizontal, bem como um sensor de deslocamento.

3. Wang e Ramaekers<sup>(1)</sup> demonstraram experimentalmente que o atrito é variável com a deformação. De fato, ao longo da conformação mecânica a área de contato matriz/peça aumenta e também ocorre um aquecimento do material devido ao atrito no processo, fazendo com que a aderência do lubrificante na superfície do material aumente no decorrer da compressão. Assim, o fator de atrito e o coeficiente de atrito aumentam no decorrer do processo. No entanto, o QFORM2D não permite a criação de um modelo variável para o Fator de Atrito em função da deformação. Para criar um modelo em que o Fator de Atrito é variável, deve-se configurar o programa para variar o Fator de Atrito em função da temperatura na superfície da peça conformada.

Na simulação efetuada com os dados da literatura técnica (trabalho de Wang e Ramaekers<sup>(1)</sup>), o modelo com inclusão do efeito da variação do fator de atrito  $m$  com a temperatura apresentou melhores resultados em relação ao modelo com  $m$  constante, baseado na comparação das curvas experimentais com as curvas calculadas pelo programa QFORM2D.

## ANEXO A – CONSTRUÇÃO DO DISPOSITIVO

Neste tópico serão descritas detalhadamente todas as etapas envolvidas na construção do dispositivo utilizado para a realização dos ensaios. Este dispositivo é conhecido na literatura como “tribômetro”<sup>(1)</sup> ou “matriz de canal”<sup>(28)</sup>, em uma tradução livre. Todos os componentes constituintes do dispositivo são provenientes de materiais disponíveis no Hall Tecnológico do PMT.

Primeiramente, para garantir que a realização dos ensaios fosse possível, foi usinado um bloco de aço para a confecção da matriz de base, onde são afixados os corpos de prova para compressão, conforme mostra a Figura A1.



Figura A1 – Matriz de Base com o corpo de prova e a fita de Teflon

Inicialmente utilizou-se como lubrificante uma fita de Teflon para reduzir o atrito nas superfícies laterais. Como nos ensaios iniciais com caráter de teste os corpos de prova mantiveram o paralelismo de suas faces, ficou provado que o atrito nas superfícies laterais é desprezível em comparação com o atrito nas demais faces, garantindo que a deformação possa ser aproximada pelo modelo da compressão planar. Além disso, esta etapa foi fundamental para o ajuste das configurações necessárias para a operação da máquina de ensaios.

Nas demais etapas, a lubrificação com Teflon foi substituída pela graxa de óleo mineral à base de lítio da marca Molykote™.



Figura A2 – Lubrificante da marca Molykote™

Em seguida, o tamanho dos corpos de prova foi ajustado através de várias tentativas experimentais para garantir que fosse possível reduzir a espessura em 50% utilizando-se a máquina EMIC. Assim, ficou determinado que a dimensão ideal dos corpos de prova seria  $(W_0)(B_0)(H_0) = (30,0)(5,0)(4,0)$  mm.

O próximo passo foi a adaptação do ferramental disponível para a realização dos ensaios em sua forma definitiva. Para isso, o corpo de prova deveria ser inserido de tal modo que o movimento de sua face traseira e suas faces laterais ficasse constringido, garantindo que a sua deformação fosse unidirecional. Inúmeras tentativas foram realizadas para esse fim, que resultaram em muitos fracassos.

Na primeira tentativa, houve a formação de rebarbas nos corpos de prova, o que mostrou que seria necessário que a descida da matriz superior (a ferramenta que comprime o corpo de prova) fosse guiada lateralmente.

Para isso, foi retirado o prato da máquina de ensaios e usinada uma base que foi parafusada diretamente na máquina, no local onde estava o prato. Esta base possuía um pino que impedia o movimento lateral da matriz superior durante a sua descida.

Infelizmente, o pino sofreu muita deformação, e a tentativa resultou em fracasso. Além disso, o outro lado da base também deveria receber uma guia.



Figura A3 – Primeira tentativa de montagem do ferramental



Figura A4 – Base usinada para guiar a matriz superior

Aproveitando a mesma base, o pino foi removido e em seu lugar foi inserida uma guia fixa mais reforçada, de geometria semicilíndrica, e no outro lado da base foi soldado um bloco de aço, por dentro do qual passava uma rosca que serviu como guia ajustável. No entanto, a solda não conseguiu resistir aos esforços, e o bloco de aço foi removido.



Figura A5 – Segunda tentativa de guiar a matriz superior

Então, foi feito um furo na posição da base onde o bloco de aço seria colocado, e uma nova guia, semelhante à guia fixa semicilíndrica foi usinada, desta vez sendo presa à base não somente através de um pino, mas também através de solda.



Figura A6 – Terceira tentativa de guiar a matriz superior

Esta terceira tentativa funcionou bem para pequenas deformações, no entanto, devido à alta dureza e fragilidade do material da matriz superior, composta por bits com 10% de cobalto, colocado de modo que a maior secção ficasse na horizontal, houve rompimento desta matriz.

Portanto, houve a necessidade da usinagem de uma nova matriz inferior, de modo que os novos corpos de prova possuíssem as dimensões  $(W_0)(B_0)(H_0) = (25,4)(5,0)(4,0)$  mm, e a matriz superior foi substituída por um bloco de bits de 1 polegada (25,4 mm), colocado de modo que a maior secção ficasse na vertical, evitando que este fosse rompido na realização dos ensaios.



Figura A7 – Quarta tentativa para a montagem da aparelhagem

Com o arranjo experimental apresentado anteriormente, foi possível obter com sucesso apenas um ensaio válido, nas especificações desejadas. No entanto, após a realização deste ensaio, houve o cisalhamento do orifício onde uma das guias para a matriz superior está inserida. Então, houve a necessidade da implementação de um reforço para a guia existente na base acoplada à máquina de ensaios, permitindo uma realização de uma quantidade maior de ensaios válidos.

Finalmente, este reforço foi soldado à base de apoio e uma segunda rosca foi implementada neste novo reforço. Esta foi a configuração final do ferramental.



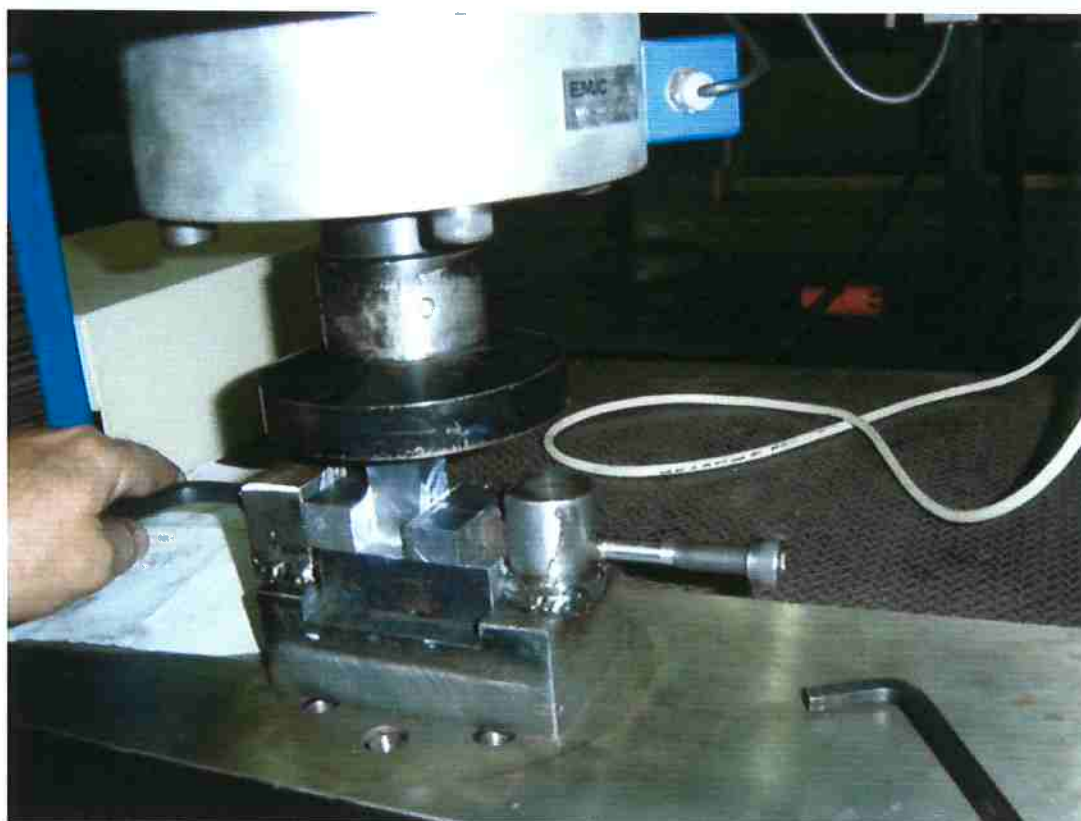
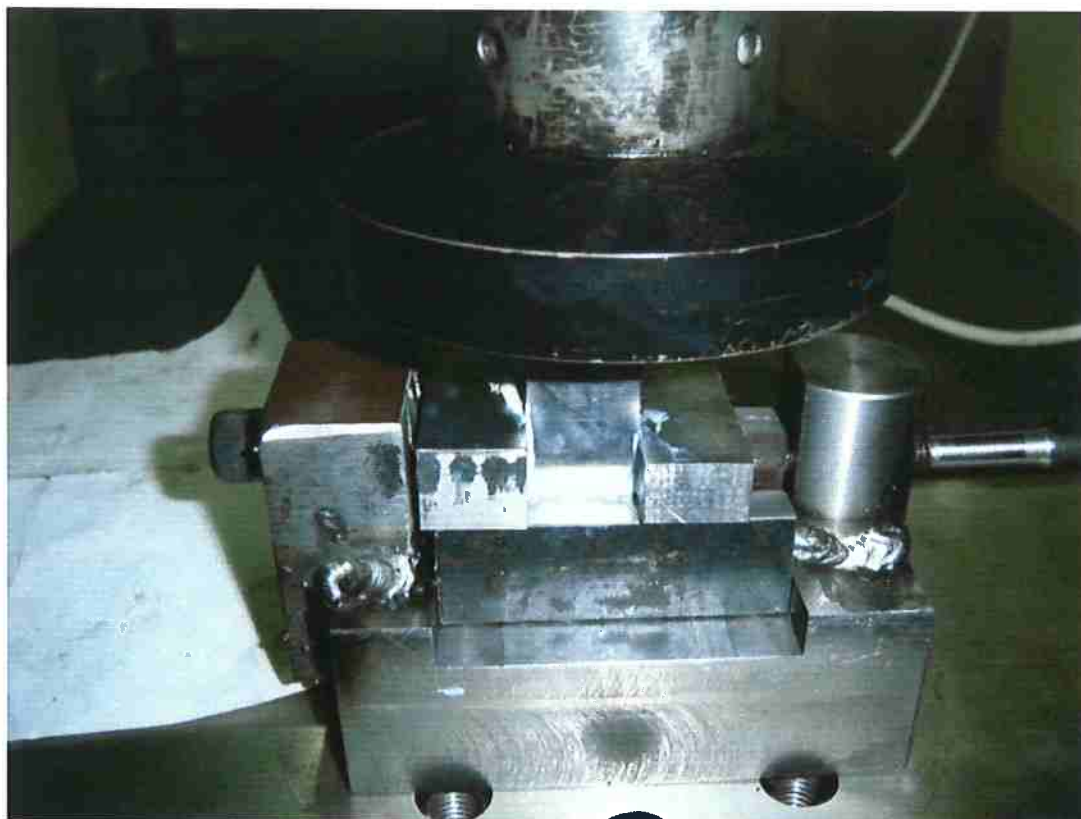


Figura A8 – Configuração final da aparelhagem



## ANEXO B – MÉTODO DE TRABALHO - QFORM2D

A construção do modelo no QFORM2D é demonstrada passo a passo a seguir:

### 1. 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 pode ser visualizado na Figura B1:

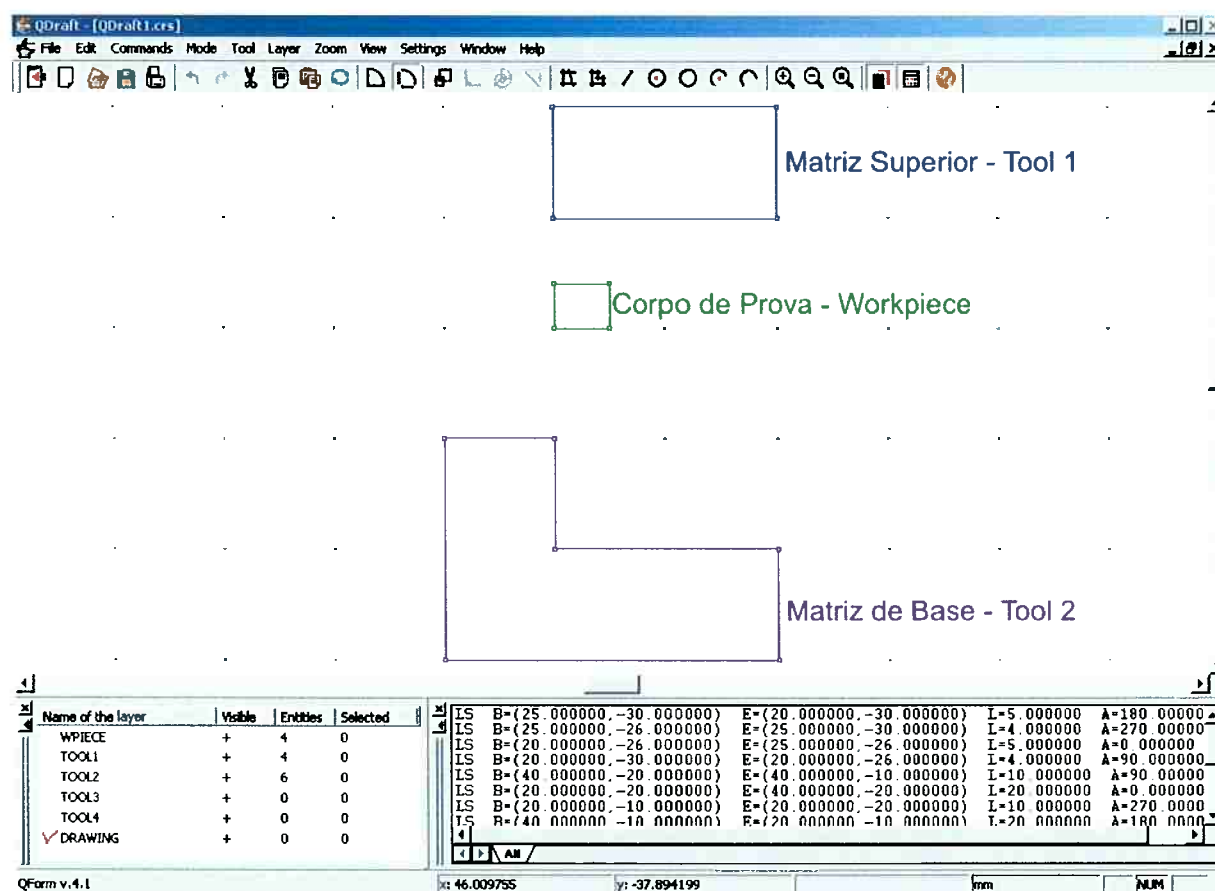


Figura B1 – Layout do Qdraft – Desenho do ferramental e do corpo de prova de dimensões 5,0 x 4,0 mm

## 2. Criando Método de Trabalho no QFORM2D:

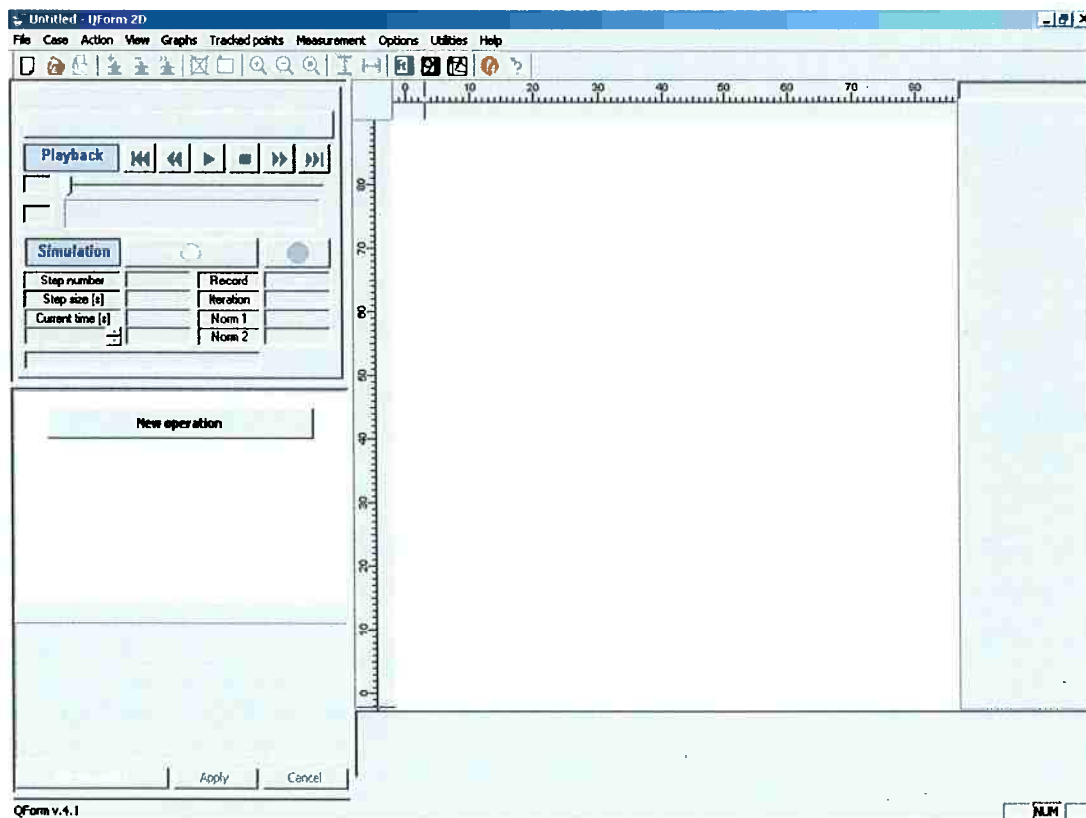


Figura B2 – Layout do Qform2D – Tela de trabalho

## 3. Escolha de prensa hidráulica para trabalho:

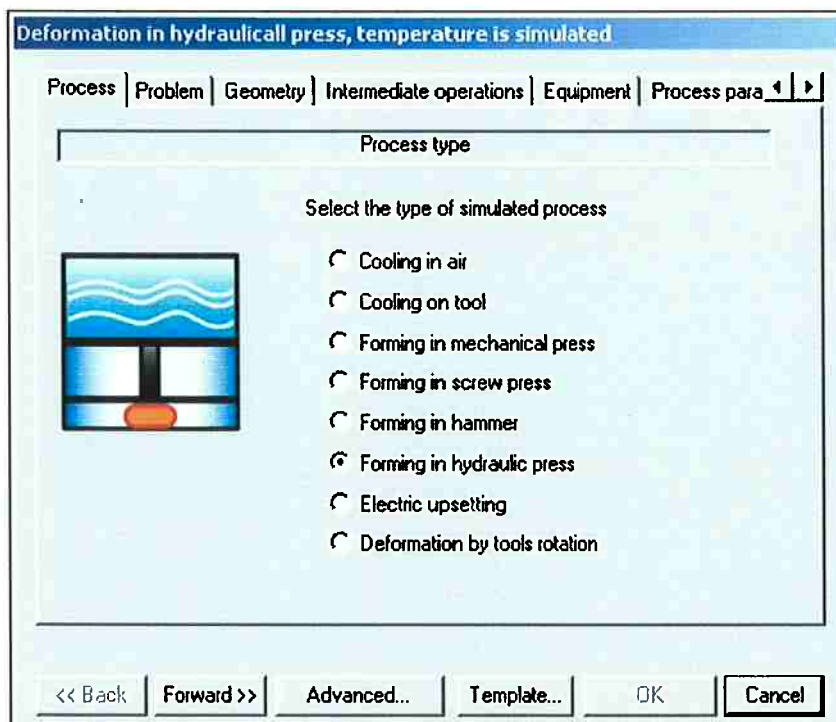


Figura B3 – Escolha de prensa hidráulica

4. Escolha da opção Geometria “Plane cross section”, com 25.4 mm de comprimento:

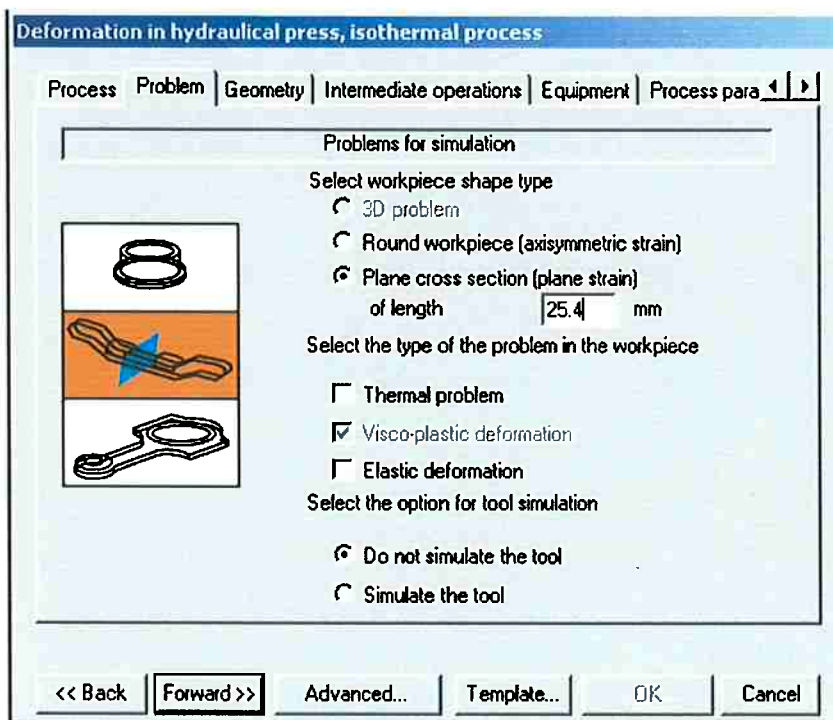


Figura B4 – Escolha da geometria do problema

5. Exportação do desenho do Qdraft:

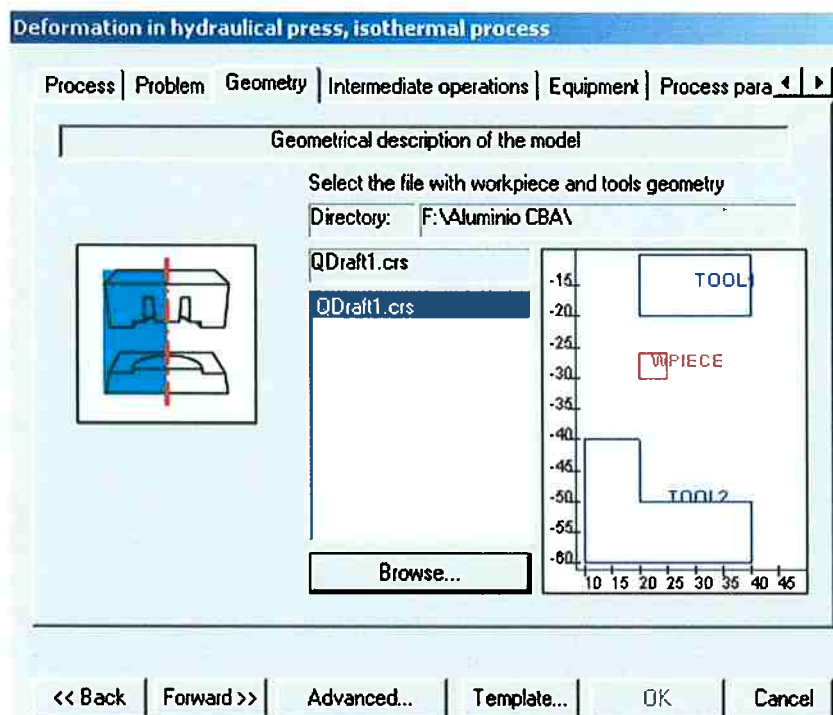


Figura B5 – Selecionando desenho do Qdraft

**6. Configuração das características do equipamento selecionado: Capacidade de 50 MN e velocidade de conformação de 0.01 m/s:**

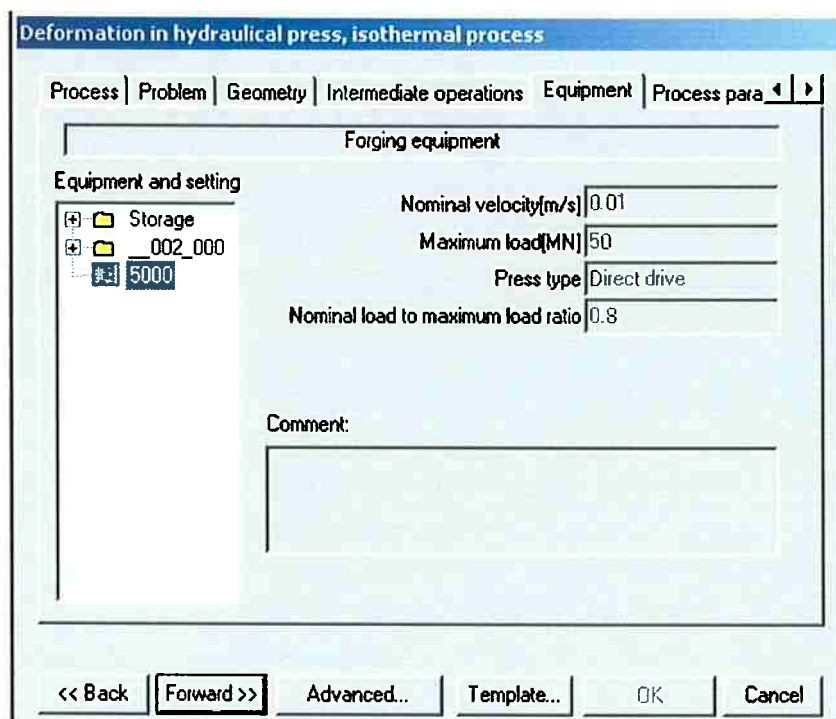


Figura B6 – Seleção do tipo de prensa utilizada na simulação

**7. Estabelecimento do parâmetro de parada da operação: distância final entre as matrizes de 2 mm. Equivalente a 50% de redução:**

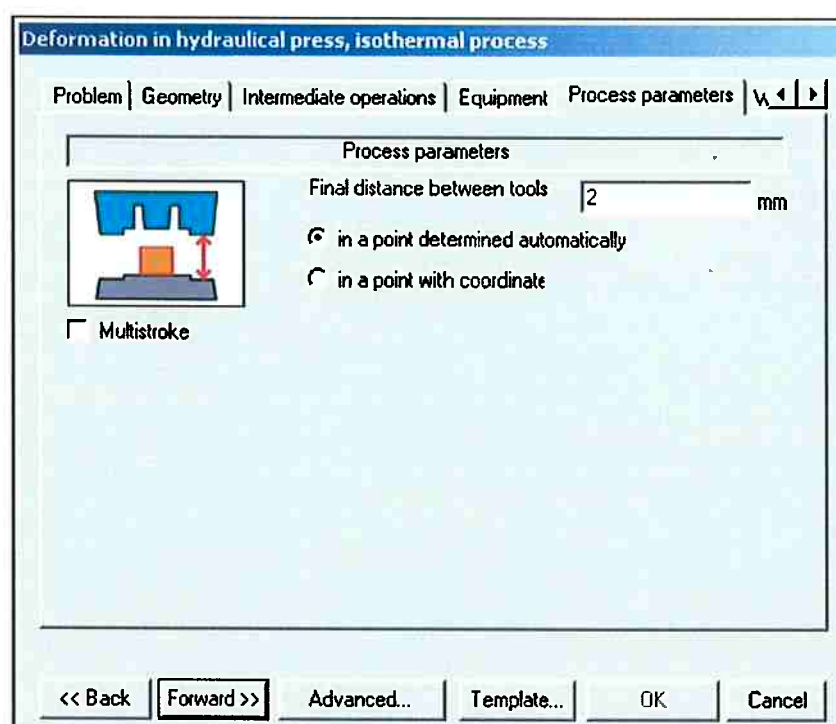


Figura B7 – Determinação do critério de parada da simulação

8. Seleção da liga que compõe o corpo de prova e da temperatura de trabalho. Como a liga em questão (AA5052) não existe no banco de dados do programa Qform, foi criada uma entrada nova com os dados da curva tensão-deformação para a liga AA5052:  $K = 325 \text{ MPa}$  e  $n = 0,213$ .

**Deformation in hydraulic press, isothermal process**

Intermediate operations | Equipment | Process parameters | Workpiece parameters

**Workpiece parameters**

Specify workpiece temperature

☒ Uniform and equal to 20 C

☐ Simulated in previous action

Select workpiece material

BS  
DIN  
AISI  
GOST  
Aluminio 5052  
AISI 1018 (cold)

Temperature  
... C

Effective strain rate  
... 1/s

Effective strain  
...

Workpiece material is not specified

<< Back Forward >> Advanced... Template... OK Cancel

---

**Function Wizard**

$$\sigma = Ae^{-m_1 T} \varepsilon^{m_2} e^{(-m_4/\varepsilon)} \dot{\varepsilon}^{m_3}$$

**Coefficients**

A 325 m2 0.213 m3 0

m1 0 m4 0

**Arguments values**

	Min	Max
Strain	0.002	1
Strain-rate	0.001	1000
Temperature	20	30

<< Back Next >> Cancel OK

Figura B8 – Seleção da temperatura de trabalho e adição das propriedades da liga AA5052 ao banco de dados do QFORM2D

**9. Seleção do Lubrificante:** o Fator de Atrito a ser testado é escolhido nesta etapa, através da criação de uma nova entrada no banco de dados para cada fator de atrito a ser testado:

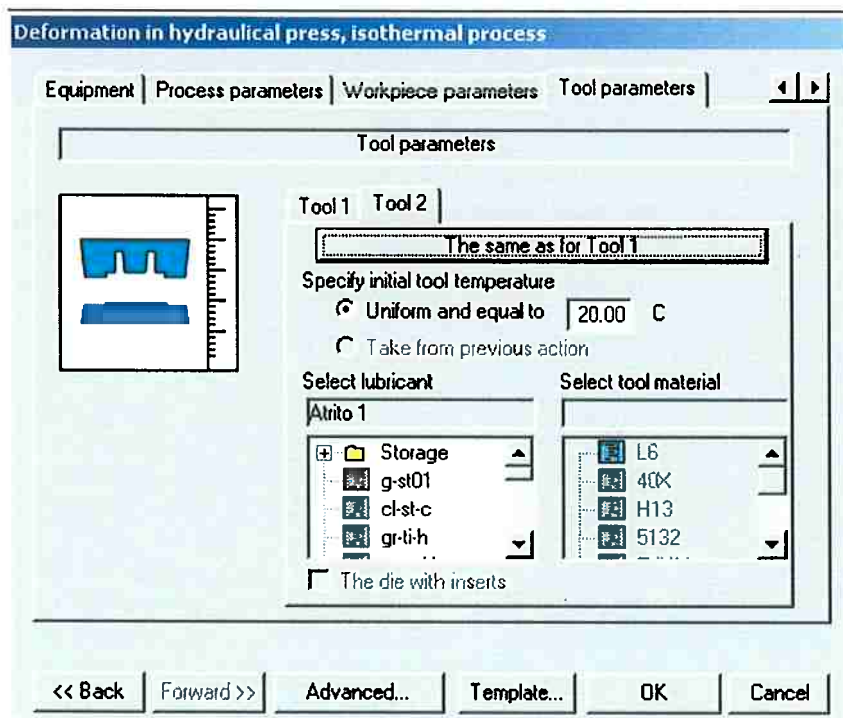


Figura B9 – Seleção do Lubrificante

## 10. Início da Simulação

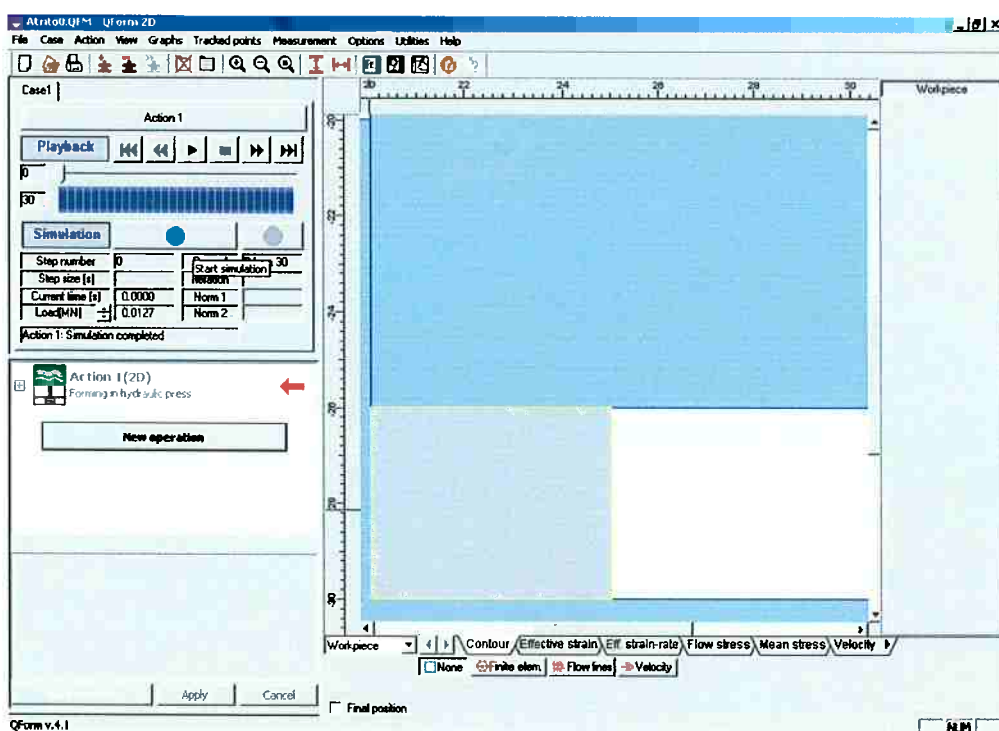


Figura B10 – Simulação concluída





# ANEXO D – VALORES DE K E n PARA VÁRIAS LIGAS DE ALUMÍNIO<sup>(22)</sup>

Tabela 4.2 Resumo dos valores de K e n descrevendo a relação tensão de escoamento-deformação,  $\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n$ , para várias ligas de alumínio.

Liga	Al	Cu	Si	Fe	Mn	Composição %	Zn	Ti	Cr	Pb	Velocidade de material (a)	Temperatura °F	Temperatura °C	Taxa de deformação 1/s	Variação da deformação	K (psi)	n
1100 ....	99.0	0.10	0.15	0.50	0.01	0.01					CD,A	32	0	10	0.25-0.7	26.2	0.304
1100 ....	Rem	0.01	0.10	0.16	0.01	0.01	0.03				A	68	20	(b)	0.2-1.0	17.3	0.297
EC ....	99.5	0.01	0.092	0.23	0.026	0.033	0.01				A(c)	68	20	4	0.2-0.8	22.4	0.204
2017 ....	Rem	4.04	0.70	0.45	0.55	0.76	0.22			0.06	A	68	20	(b)	0.2-1.0	45.2	0.180
2024(d) ..	Rem	4.48	0.80	0.48	0.87	1.12	0.20			0.056	A	68	20	(b)	0.2-1.0	56.1	0.184
5052 ....	Rem	0.068	0.10	0.19	0.04	2.74	0.01	0.003			A	68	20	4	0.2-0.8	29.4	0.134
5052(d) ..	Rem	0.09	0.13	0.16	0.23	2.50	0.05				A(e)	68	20	(b)	0.2-1.0	55.6	0.189
5056 ....	Rem	0.036	0.15	0.22	0.04	4.83	0.01		0.14		A	68	20	4	0.2-0.7	57.0	0.130
5083 ....	Rem	0.01	0.10	0.18	0.77	4.41	0.01	0.002	0.13		A(e)	68	20	4	0.2-0.8	65.2	0.131
5454 ....	Rem	0.065	0.12	0.18	0.81	2.45	<0.01	0.002			A(e)	68	20	4	0.2-0.8	49.9	0.137
6062 ....	Rem	0.03	0.63	0.20	0.63	0.68	0.065	0.08				68	20	(b)	0.2-1.0	29.7	0.122

(a) CD = trellado a frio, A = recozido; (b) máquina de teste de baixa velocidade, sem especificação de velocidade; (c) recozido por 4 horas a 400 °C; (d) composição aproximada; (e) recozido por 4 horas a 420 °C.

1 ksi = 10<sup>3</sup> psi = 6,897 MPa



## ANEXO E – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NO QFORM2D PARA A LIGA AA5052

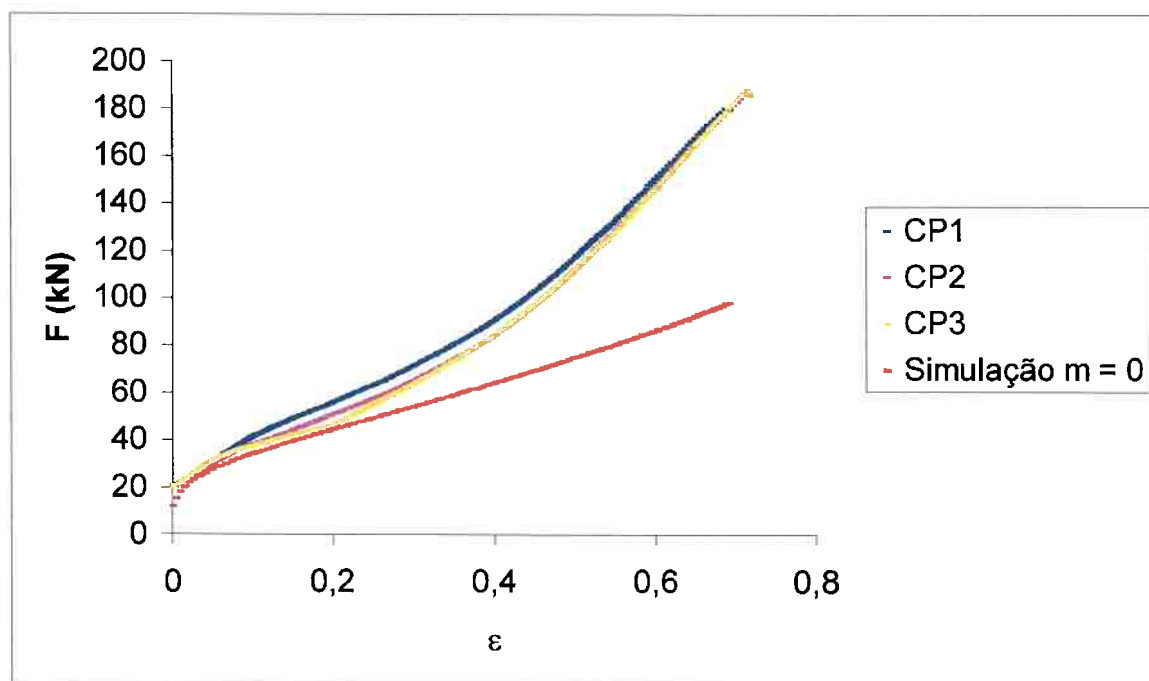


Figura E1 – Curva Força x Deformação Real para  $m = 0$

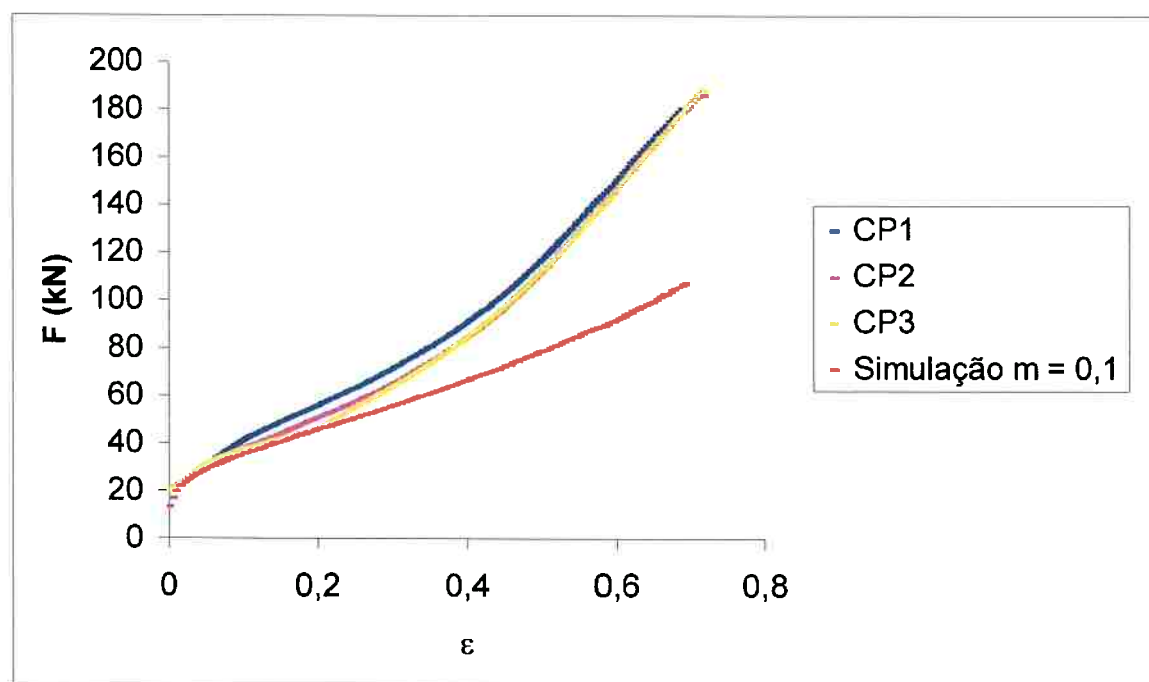
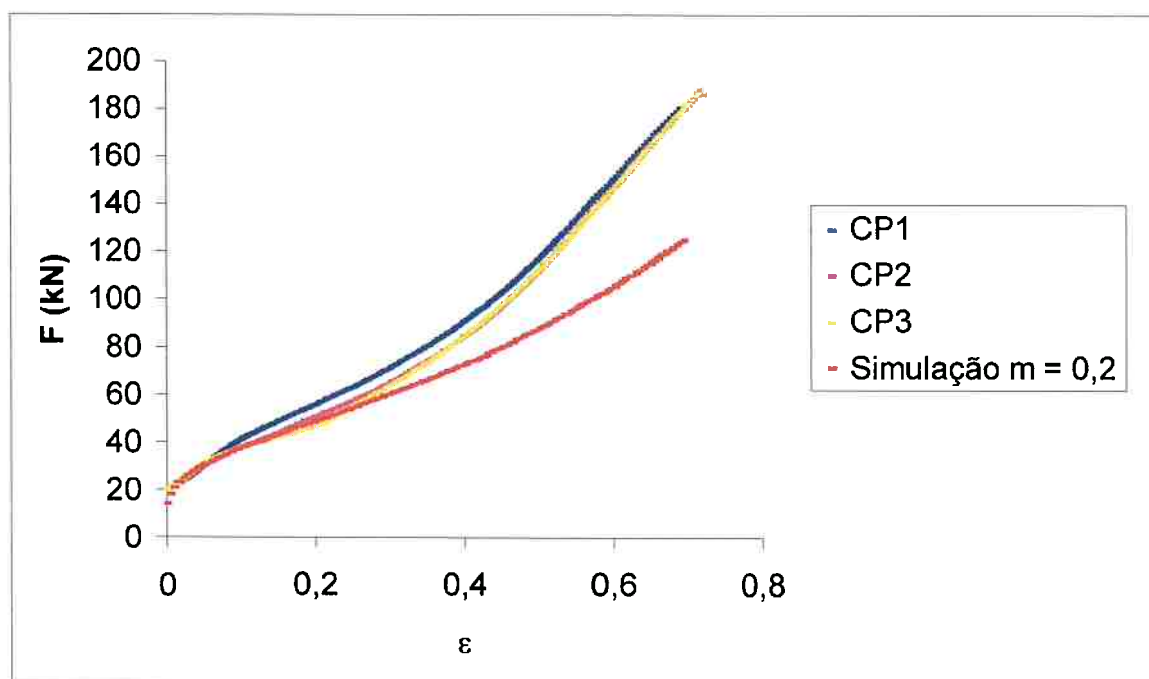
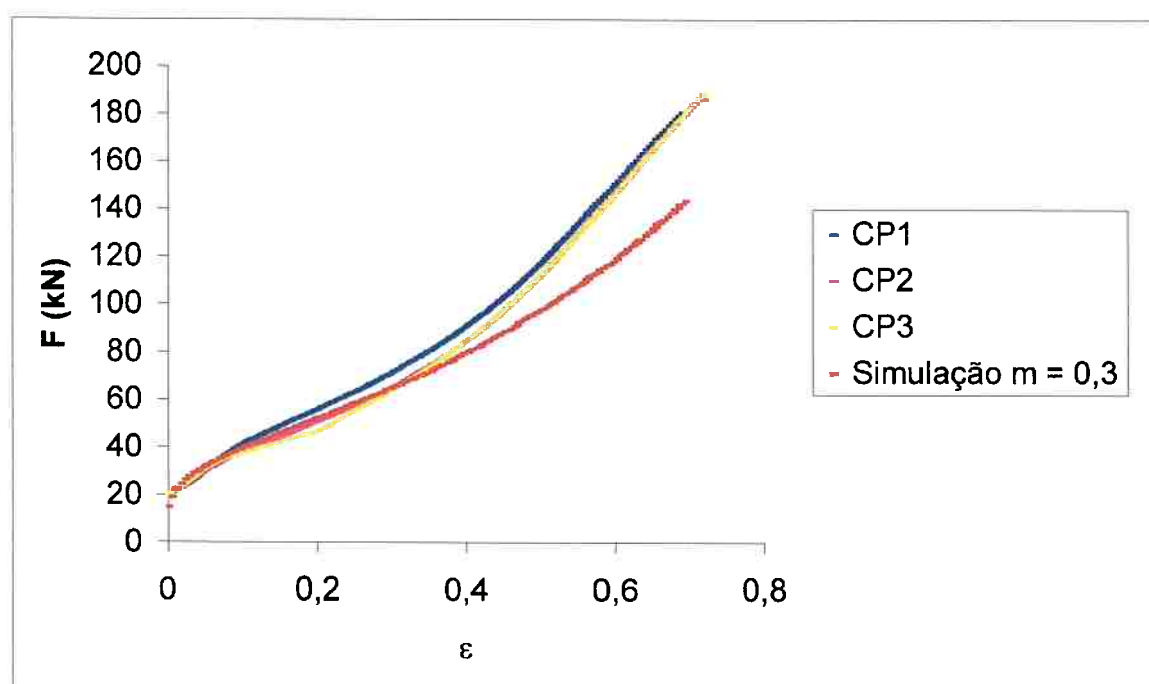


Figura E2 – Curva Força x Deformação Real para  $m = 0,1$

Figura E3 – Curva Força x Deformação Real para  $m = 0,2$ Figura E4 – Curva Força x Deformação Real para  $m = 0,3$

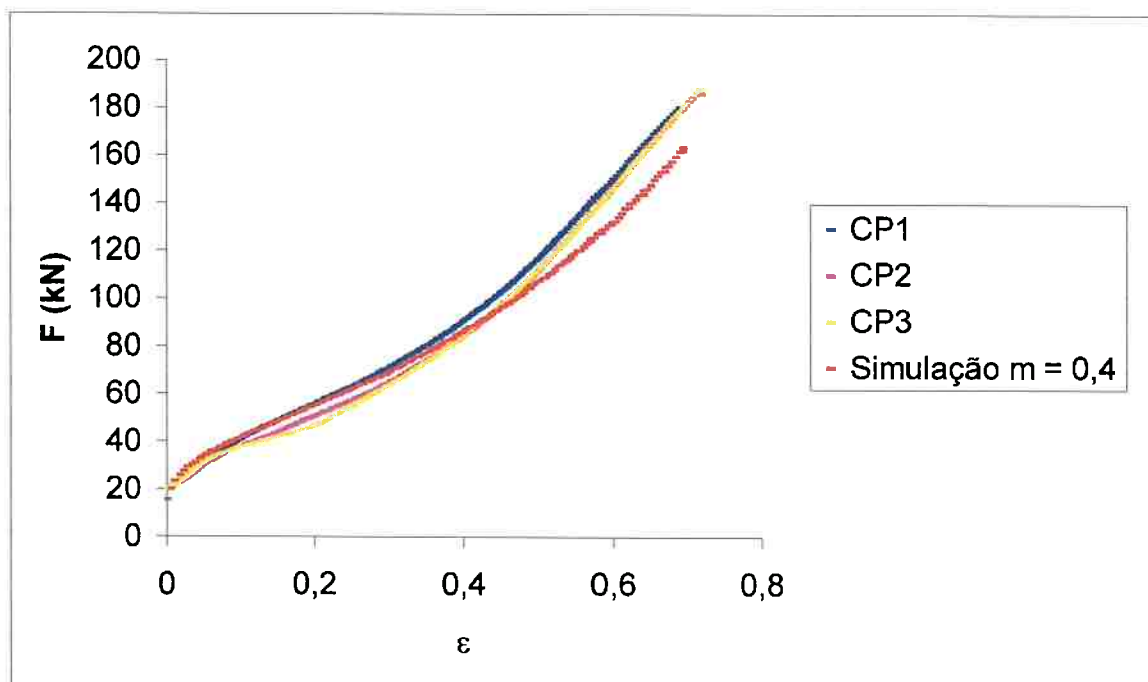


Figura E5 – Curva Força x Deformação Real para m = 0,4

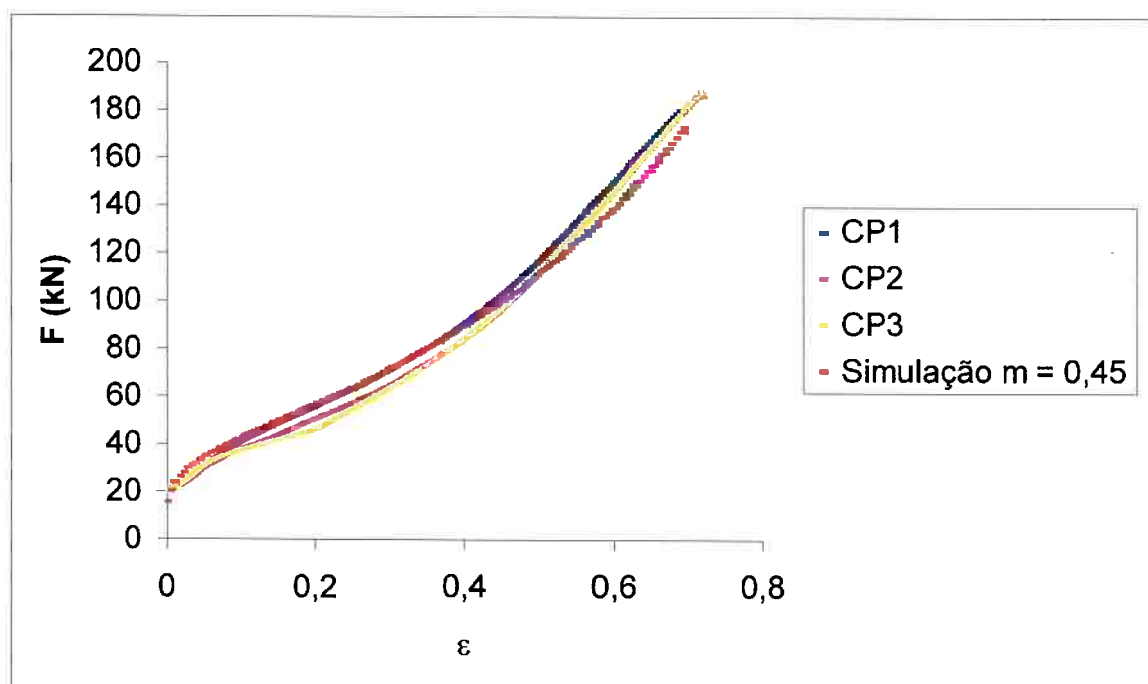


Figura E6 – Curva Força x Deformação Real para m = 0,45

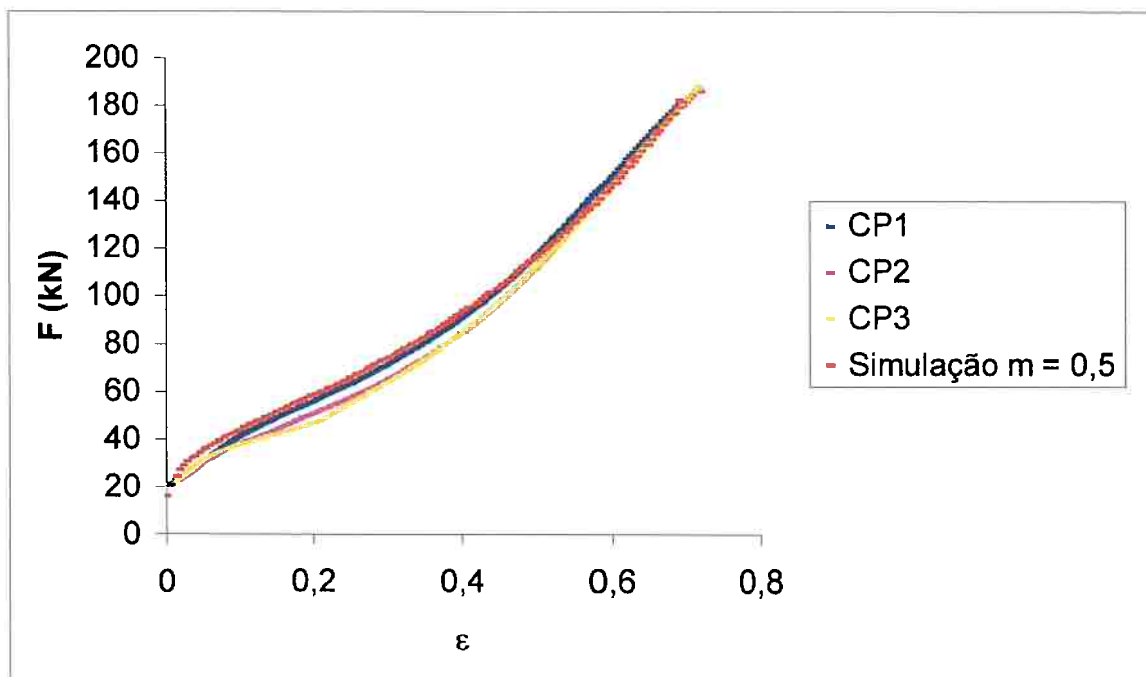


Figura E7 – Curva Força x Deformação Real para  $m = 0,5$

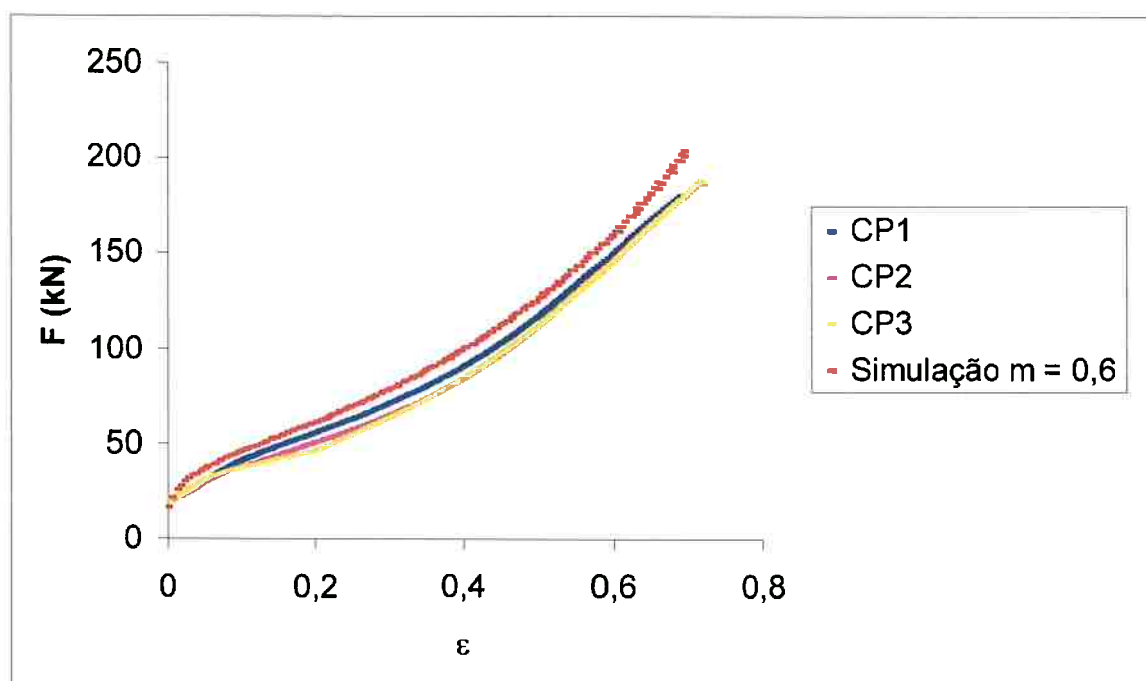


Figura E8 – Curva Força x Deformação Real para  $m = 0,6$

## ANEXO F – CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ATRITO E DO FATOR DE ATRITO PELO MODELO DA “BOSSA DE ATRITO”

O modelo da “Bossa de Atrito” objetiva descrever a distribuição de pressão sofrida por uma peça submetida a compressão.

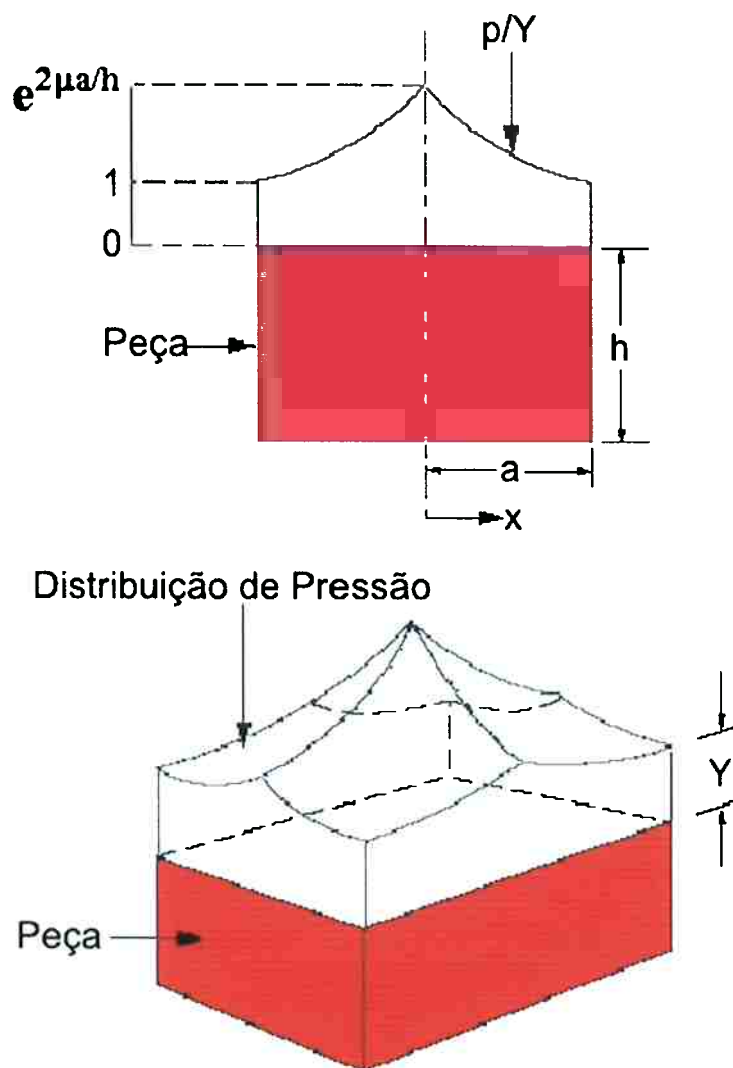


Figura F1 – Distribuição de pressão em uma peça pelo modelo da Bossa de Atrito<sup>(26)</sup>

Para um corpo de prova de geometria retangular, valem as seguintes relações:

$$F = P_{av} \times 2a \times \text{Comprimento} \text{ (Eq. F1)}$$

$$Y = 1,15 \times \sigma \text{ (Eq. F2)}$$

$$P_{av} = Y \left( 1 + \frac{\mu a}{h} \right) \text{ (Eq. F3)}$$

onde:  $P_{av}$  é a pressão média sofrida pelo corpo de prova,  $a$  corresponde à metade da largura,  $h$  é a altura e  $Y$  é a tensão de escoamento para um estado de tensão planar.

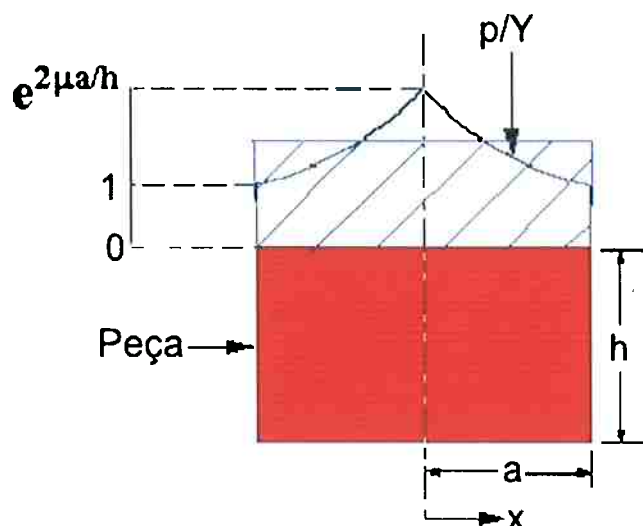


Figura F2 – Modelo da “Bossa de Atrito” para um CP retangular

No nosso experimento, calculando o Coeficiente de Atrito  $\mu$  no final do ensaio, temos:  $F = 185 \text{ kN}$ ,  $2a = 0,0101 \text{ m}$ ,  $h = 0,0254 \text{ m}$ .

Portanto:

$$\begin{aligned}
 185 \text{ kN} &= P_{av} \times 0,0101 \times 0,0254 \\
 P_{av} &= 721,135 \text{ MPa} \\
 Y &= 1,15 \times 324 \times 0,69^{0,213} = 345 \text{ MPa} \\
 721,135 &= 345 + 345 \times \mu \times \frac{5,05}{2} \\
 \mu &\approx 0,48 \\
 m &\approx 0,48 \times \sqrt{3} \approx 0,83
 \end{aligned}$$

## ANEXO G – CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ATRITO E DO FATOR DE ATRITO PELO MÉTODO DE G.W. ROWE<sup>(27)</sup>

G. W. Rowe elaborou uma expressão para descrever a pressão média  $\bar{p}$  exercida em um corpo pelas ferramentas em função do Coeficiente de Atrito  $\mu$ , da tensão de cisalhamento  $k$ , da altura do corpo  $h$  e da largura do corpo  $w$ . No nosso caso particular, temos:

$$\frac{\bar{p}}{2k} = \frac{h}{\mu w} \left[ \exp\left(\frac{\mu w}{h}\right) - 1 \right] \quad (\text{Eq. G1})$$

$$k = \frac{Y}{2} \quad (\text{Eq. G2})$$

$$Y = 1,15 \times 324 \times 0,69^{0,213} = 345 \text{ MPa}$$

$$Y = 345 \text{ MPa}$$

$$\bar{p} = \frac{185}{0,0101 \times 0,0254}$$

$$\bar{p} = 721,135 \text{ MPa}$$

$$\frac{721,135}{345} = \frac{2}{10,1\mu} \left[ \exp\left(\frac{10,1\mu}{2}\right) - 1 \right]$$

$$\mu \approx 0,27$$

$$m \approx \mu \times \sqrt{3} \approx 0,27 \times \sqrt{3} \approx 0,46$$

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. WANG, S. L., RAMAEKERS, J. A. H. *Measurement of friction and material flow-stress by a plane-strain compression tribometer*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 57, pp. 345-350, 1996.
- [2]. HAN, H. *Determination of Flow Stress and Coefficient of Friction for Extruded Anisotropic Materials under Cold Forming Conditions*. Licenciante Thesis, Royal Institute of Technology, Estocolmo, pp. 1-2, Jan. 2002.
- [3]. KUNOGI, M.J. *On Plastic deformation of hollow cylinders under axial compressive loading*. Scientific Research Institute, Tóquio, pp. 63, 1954.
- [4]. BURGDORF, M. *Über die Ermittlung des Reibwertes für Verfahren der Massivumformung durch den Ringstauchversuch*. Ind.-Anz 89, pp. 623-629, 1967.
- [5]. LANGE, K. (Ed.) *Handbook of Metal Forming*, Nova Iorque, McGraw Hill, 1985.
- [6]. RAO, K.P., SIVARAM, K. *A review of ring-compression testing and applicability of the calibration curves*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 37, 1993.
- [7]. SILLEKENS, W. H. *Backward Can Extrusion and Material Behaviour*. Ph.D. Thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, pp.55, 1992.
- [8]. MALE, A.T., COCKCROFT, M.G. *Coefficient of Friction under Condition of Bulk Plastic Deformation*. J. Inst. Metals, Vol 93, pp.38, 1964.
- [9]. HONEYCOMBE, R. W. K. *The Plastic Deformation of Metals*. Edward Arnold Ltd., Londres.
- [10]. HILL, R. *A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals*. Proc. Roy. Soc., Vol. A193, pp. 281-297, 1948.
- [11]. HILL, R. *The Mathematical Theory of Plasticity*. Oxford University Press, Nova Iorque.
- [12]. FILHO, D.Z. - *Simulação de ensaio de tração em metais utilizando o método dos elementos finitos*. Trabalho de Formatura, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- [13]. MATUDA, F. *Determinação do fator de atrito de ligas de alumínio conformadas a frio e a quente*. Trabalho de Formatura, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- [14]. FONSECA, J. *Ferramentas de Simulação em Mecânica: Elementos Finitos*. Material compilado para a disciplina de Elementos Finitos para Graduação e Pós Graduação em Engenharia Mecânica. UFRGS. 2002.



- [15]. COURANT, R. *Variational Methods for the Solution of Problems of Equilibrium and Vibration*, Bull. Am. Math. Soc., Vol. 49, pp.1-23, 1943.
- [16]. TURNER, M. CLOUGH, R.W., MARTIN, H.C. *Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures*. J. Aer. Sci., Vol. 23, pp.805-823, 1956.
- [17]. CLOUGH, R.W. *The Finite Element Method in Plane Stress Analysis*. Proc. Of the American Soc. Of Civil Engineers, 2nd Conference of Electronic Computation, Pittsburgh, pp. 345-378, 1960.
- [18]. PLAUT, R.L. *Aspectos Relativos à Caracterização Dinâmica de Compostos Elastoméricos e Modelos Matemáticos para a Área de Contato de Prensas Úmidas de Máquinas de Papel*. Tese de livre docência, USP, 1999.
- [19]. FONSECA, J. *Ferramentas de Simulação em Mecânica: Elementos Finitos*. Material compilado para a disciplina de Elementos Finitos para Graduação e Pós-graduação em Engenharia Mecânica. UFRGS. 2002.
- [20]. HANASHIRO, J. *Comparação e Avaliação de Resultados de Ensaios de Tração de Compostos Elastoméricos Obtidos na Prática e Obtidos por Modelamento Matemático*. 2005. 127p. Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.
- [21]. PLAUT, R.L. – *Aspectos Relativos à Caracterização Dinâmica de Compostos Elastoméricos e Modelos Matemáticos para a Área de Contato de Prensas Úmidas de Máquinas de Papel*. Tese de livre docência, USP, 1999.
- [22]. ALTAN, T. - *Conformação de metais: fundamentos e aplicações*, pp. 60, 1999.,
- [23]. MEYERS, M.A., CHAWLA, K.K. - *Mechanical Behavior of Materials*, pp. 66-75, 1999
- [24]. SCHEY, J. A. – *Tribology in Metalworking – Friction, Lubrication and Wear*, ASM, Metals Park, OH, 1983.
- [25]. MARCINIAK, Z., DUNCAN, J.L., HU, S.J. - *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Butterworth Heineman, 2002.
- [26]. Ahmed, M. - *Bulk Deformation Processes*. Material compilado para a disciplina Manufacturing Processes I. King Fahd University of Petroleum and Minerals College of Engineering. Dhahran, 2007.
- [27]. Rowe, G.W. - *An introduction to the principles of metalworking*, 1965, London, Edward Arnold.

- [28]. SILK, N.J., DER WINDEN, M.R. Van – *Interpretation of hot plane strain compression testing of aluminium specimens*. Mat. Sci. Technol. 15, pp. 295-300, 1999.
- [29]. DIETER, G.E., Metalurgia Mecânica, 1981.
- [30]. URABAYASHI, E.J., *Desenvolvimento de uma rede neural artificial para a previsão de comportamento constitutivo de uma liga de alumínio AFNOR 7020*. Trabalho de Formatura, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- [31]. SAGAR, N.V., ANAND, K.S., MITHUN, A.C., SRINIVASAN, K., Friction factor of CP aluminium and aluminium-zinc alloys. Bull. Mater. Sci., Vol. 29, No. 7, pp. 685-688, December 2006.
- [32]. PIETRZYK, M., LENARD, J.G., *Thermal-mechanical modeling of the flat rolling process*, pp. 135, 1991.
- [33]. ASM Metals Handbook Vol. 2 – Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, 1992.
- [34]. WAGONER, R.H., CHENOT, J.L., Fundamentals of Metal Forming. John Wiley & Sons, Inc., 1997.