



Governo do Estado de São Paulo  
Universidade Estadual Paulista

FACULDADE DE ENGENHARIA DO CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

*Análise da estampagem de chapas metálicas  
utilizando elementos finitos*

AILTON RODRIGUES DA COSTA

PUBLICAÇÃO  
2003

GUARATINGUETÁ – SP

BRASIL

AILTON RODRIGUES DA COSTA

ANÁLISE DA ESTAMPAGEM DE CHAPAS METÁLICAS  
UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Projetos e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

Guaratinguetá  
2003

C837a	<p>Costa, Ailton Rodrigues da</p> <p>Análise da estampagem de chapas metálicas utilizando elementos finitos / Ailton Rodrigues da Costa. - Guaratinguetá : [s.n.], 2003 189 f. : il.</p> <p>Bibliografia: f. 117</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2003</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva</p> <p>1. Simulação I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 519.876.5</p>
-------	--

UNESP  UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

**ANÁLISE DA ESTAMPAGEM DE CHAPAS METÁLICAS  
UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS**

***AILTON RODRIGUES DA COSTA***

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

**“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETOS E MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-  
GRADUAÇÃO

Prof. Dr. José Luiz Silveira  
Coordenador do programa de  
Pós-graduação

***BANCA EXAMINADORA:***

---

Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA  
Orientador / FEG – UNESP

---

Prof. Dr. GUSTAVO ARISTIDES SANTANA MARTINEZ  
DEMAR – FAENQUIL

---

Prof. Dr. ANGELO CAPORALLI FILHO  
FEG – UNESP

29 de Outubro de 2003

**DADOS CURRICULARES****AILTON RODRIGUES DA COSTA**

NASCIMENTO	22.07.63 – LORENA / SP
FILIAÇÃO	Bento Rodrigues da Costa Maria Alice da Costa
1987/1992	Engenharia Industrial – Mecânica Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP
1998	Curso de Pós-Graduação – Programa Especial de Formação Pedagógica de Docentes para as Disciplinas da Educação Profissional em Nível Médio
2001/2003	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá - UNESP.

de modo especial, a minha esposa Mariângela que me incentivou e acompanhou ao longo deste trabalho aceitando os sacrifícios que a dedicação a tão árdua tarefa exige, aos meus filhos Andressa, Alice e Danilo que torceram pelo meu sucesso, e a minha família pais e irmãos que acompanharam ansiosos a minha jornada.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, que me proporcionou saúde e força para persistir no meu objetivo;

Ao meu orientador Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva que me incentivou e acompanhou neste estudo, depositando sua confiança na minha capacidade, balizando os rumos desta empreitada;

Ao Prof. Dr. Angelo Caporalli Filho cujo apoio e vivido interesse foi fundamental, o acompanhei em visitas a empresas na busca de apoio, e que conseguiu junto a Rio Negro a doação do material para o experimento;

Ao meu amigo Urbano que sempre me recebeu com alegria no campus, me incentivou e sempre esteve disposto a ajudar, trabalhou com afinco na preparação da ferramenta do experimento;

Ao técnico Manoel cujo conhecimento habilidade de dedicação proporcionou a usinagem do ferramental;

Ao meu amigo Paulo Guatura cujo auxílio foi vital para a usinagem da matriz e punção da ferramenta;

A empresa Metalúrgica Jambeiro Ind. e Com. que forneceu a matéria prima para a ferramenta e a Rio Negro empresa do Grupo USIMINAS que doou a chapa para o experimento;

E de modo geral a todos os professores e funcionários dos departamentos de Mecânica e de Materiais pela receptividade e auxílio prestado.

COSTA, A.R., *Análise da estampagem de chapas metálicas utilizando elementos finitos* - 2003. 189f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

## **RESUMO**

Os processos de estampagem em chapas metálicas destacam-se entre os processos de conformação plástica de metais por possibilitarem a obtenção de peças com formatos diversos e boas propriedades mecânicas. A simulação de processos de fabricação é atualmente uma realidade possibilitando uma melhor compreensão do comportamento dos metais e de processos assim como os avanços na área computacional que permitem desenvolver e aperfeiçoar os programas de simulação. Neste trabalho é apresentada a simulação do processo de embutimento de uma caixa quadrada utilizando o programa comercial de elementos finitos ANSYS, onde foram introduzidas as condições e propriedades reais tanto do processo quanto do material estudado. Nas simulações numéricas são avaliados dois parâmetros do processo de embutimento. O primeiro, é analisada a variação da força máxima de embutimento, até a profundidade limite de estampagem. O segundo, as deformações na espessura do material, é verificada a variação da espessura da chapa devido ao processo de estampagem. Os resultados numéricos são confrontados com os resultados experimentais com o objetivo de validar as simulações.

**PALAVRAS-CHAVE:** Elementos finitos, Simulação, Estampagem, Embutimento profundo, Força de estampagem.



COSTA, A. R., **Analysis of the stamping of metallic sheet using finite elements** 2003. 189f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

## **ABSTRACT**

The stamping processes in metallic foils stand out among the processes of forming metals for they make possible the obtaining of pieces with several shapes and good mechanical properties. The simulation of production processes is now a reality to permit a better understanding of the behavior of the metals and of processes as well as the progresses in the computational area that allow to develop and to improve the simulation programs. In this work the simulation of the process of deep-drawing of a square box is presented using the commercial program of finite elements ANSYS, where the conditions and real properties were introduced as much the process of the studied material. In the numeric simulations it is presented two parameters of the deep-drawing process. The first, the variation of the maximum force deep-drawing is analyzed, until the depth stamping limit. The second, the deformations in the thickness of the material, the variation of the thickness of the foil is verified due to the stamping process. The numeric results are compared to the experimental results with the objective of validating the simulations.

**KEYWORDS:** Finite elements, Simulation, Stamping, deep-drawing Force of stamping.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	XV
LISTA DE TABELAS .....	XIX
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	XX
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XXI
<b>1      INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1    REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
1.2    OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS .....	6
1.3    ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	7
<b>2      PROCESSO DE ESTAMPAGEM .....</b>	<b>9</b>
2.1    CONCEITOS BÁSICOS .....	9
2.1.1    Prensas .....	11
2.1.2    Fatores de influência do processo .....	14
2.2    CRITÉRIO LIMITE DE CONFORMAÇÃO.....	15
2.2.1    Fatores de formabilidade .....	15
2.2.2.0    Ensaio de estampabilidade.....	18
2.2.2.1    Ensaio Erichsen.....	18
2.2.2.2    Ensaio Swift.....	19
2.2.2.3    Curvas limite Keeler-Goodwin.....	20
2.3    PROJETO DE FERRAMENTAS .....	21
<b>3      TEORIA DA PLASTICIDADE.....</b>	<b>22</b>
3.1    INTRODUÇÃO .....	22
3.2    CURVAS DE ESCOAMENTO .....	22
3.3    O COMPORTAMENTO UNIAXIAL NA PLASTICIDADE.....	24
3.3.1    Curvas simplificadas $\sigma_x$ e $\epsilon$ para tensões uniaxiais .....	24
3.3.2    Curva linear elástica com encruamento exponencial .....	25

3.3.3	Módulo tangente e módulo plástico e plástico.....	25
3.4	CRITÉRIOS DE ESCOAMENTO .....	27
3.4.1	Condições de escoamento.....	27
3.4.1.1	Tensões octaédricas .....	27
3.4.1.2	O critério de Von Mises .....	29
3.4.2	Regra de fluxo associada com a função de Von Mises. ....	30
3.4.2.1	Superfícies de carregamento e regras de encruamento .....	31
3.4.3	Regras de encruamento.....	32
3.4.3.1	Encruamento isotrópico .....	32
3.4.3.2	Encruamento cinemático.....	33
<b>4</b>	<b>MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....</b>	<b>34</b>
4.1	INTRODUÇÃO .....	34
4.1.2	Elementos empregados.....	35
4.2	PRINCIPAIS TIPOS DE PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.....	36
4.2.1	Método de análise inversa (IA) .....	36
4.2.2	Método dinâmico explícito .....	38
4.2.3	Método estático implícito.....	40
4.3	FORMULAÇÃO DO ELEMENTO ANSYS 6.0.....	40
4.3.1	Grandes deformações .....	40
4.3.2	Implementação.....	43
4.3.3	Formulação do elemento .....	44
4.3.4	Relações não lineares – Aplicando a teoria da plasticidade .....	45
4.3.5	O critério de escoamento .....	45
4.3.6	Regra de fluxo .....	46
4.3.6.1	Incremento plástico de deformações .....	47
4.3.6.2	Implementação .....	49
4.3.7	Regra de encruamento - Plasticidade isotrópica (MISO) .....	51
4.3.8	Procedimento de Newton-Rapson.....	53
4.3.9	Convergência.....	56
4.3.10	Elemento sólido viscoplástico VISCO 107 – 3D .....	57

4.3.11	Cinemática do contato .....	61
4.3.12	Modelo de fricção .....	63

## **5 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM PROFUNDA** **64**

5.1	O PRÉ PROCESSAMENTO .....	64
5.1.1	Escolha do elemento .....	66
5.1.2	Carregando as propriedades do material .....	67
5.1.3	Contato .....	68
5.1.3.1	Constantes reais .....	68
5.1.3.2	Atrito .....	69
5.1.3.3	O elemento TARGE170 .....	71
5.1.2.4	Elemento CONTA174 .....	71
5.2	SOLUÇÃO.....	72
5.2.1	Condições de contorno .....	72
5.2.2	Carregamento.....	74
5.2.3	Monitorando os nós pilotos .....	74
5.2.4	Condições de processamento.....	75
5.2.5	Geração do loop de carregamento .....	76
5.2.6	Passos da Solução .....	77
5.3	PÓS PROCESSAMENTO .....	78

## **6 MATERIAIS E MÉTODOS**..... 82

6.1	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL MICROGRAFIA.....	82
6.1.1	Metalografia Microscópica.....	83
6.1.2	Propriedades Mecânicas .....	85
6.1.2.1	Determinação da curva $\sigma$ x $\epsilon$ real.....	85
6.1.2.2	Razão de deformação plástica índice de anisotropia $r$ .....	87
6.2	EXPERIMENTO .....	88
6.2.1	Equipamento de ensaio .....	88
6.2.2	Dimensionamento da caixa e blank.....	89

6.2.3	Dimensionamento da força de estampagem máxima .....	89
6.2.4	Dimensionamento da caixa.....	90
6.2.5	Dimensionamento do blank segundo ASM Metals HandBook.....	91
6.2.5.1	Calculo da taxa de compressão nos cantos da caixa $r/w$ .....	91
6.2.5.2	Calculo da resistência ao dobramento e enrugamento $t/W$ .....	91
6.2.5.2	Calculo da altura máxima de estampagem $h_{max}$ .....	91
6.2.5.3	Calculo do fator de formabilidade .....	91
6.2.5.4	Calculo da largura para a parede lateral e raio inferior.....	92
6.2.5.5	Calculo do raio $R$ do canto do blank.....	92
6.2.5.6	Calculo do raio corrigido .....	92
6.2.5.7	Calculo do redutor das paredes laterais .....	93
6.2.5.8	Desenho do blank.....	93
6.2.6	Força exercida pelo prensa-chapa.....	95
6.2.7	Ferramenta.....	97
6.2.8	Experimento.....	97
6.2.8.1	Corte e preparação do blank.....	97
6.2.8.2	Gravação dos círculos no blank a chapa.....	98
6.2.8.3	Lubrificação.....	98
6.2.8.4	Procedimento de estampagem.....	98
<b>7</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>101</b>
7.1	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO.....	101
7.1.1	Curvas de força aplicada x deslocamento do punção. ....	101
7.1.2	Espessura e deformações na espessura da chapa simulada .....	103
7.1.3	Níveis de tensões e deformações resultantes.....	106
7.2	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO EXPERIMENTO.....	108
7.2.1	Curvas da força aplicada x deslocamento do punção.....	108
7.2.2	Espessura e deformações na espessura da chapa no experimento .....	109
7.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS. ....	111
7.3.1	Curvas Força x deslocamento do punção .....	111
7.3.2	Espessuras e deformações na espessura da chapa simulada.....	113

<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	117
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	121
	<b>APÊNDICE</b> .....	126
A	ENSAIO DE MICROGRAFIA.....	127
B	ENSAIO DE TRAÇÃO .....	132
C	FERRAMENTA .....	139
D	EXPERIMENTO .....	153
E	REGISTRO FOTOGRÁFICO.....	179
E	PROGRAMA PARA SIMULAÇÃO .....	182
	<b>ANEXOS</b>	
1	CERTIFICADO DE MATERIAL	

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA	2.1	Embutimento de um copo cilíndrico	9
FIGURA	2.2	Estampo de simples ação – prensa chapas acionado por molas	10
FIGURA	2.3	Estampo para caixas retangulares	11
FIGURA	2.4	Estrutura típica de prensa H	13
FIGURA	2.5	Esforços atuantes em uma caixa estampada	15
FIGURA	2.6	Dimensões principais da caixa	17
FIGURA	2.7	Relações dimensionais para definição das áreas de formabilidade para caixas quadradas e retangulares	17
FIGURA	2.7	Ensaio de embutimento Erichisen	18
FIGURA	2.8	Curvas de ensaio Erichisen para chapas finas	19
FIGURA	2.9	Curvas limite de escoamento Keeler-Goodwin	20
FIGURA	3.1	Diagramas $\sigma \times \epsilon$	23
FIGURA	3.2	Diagramas $\sigma \times \epsilon$ carga / descarga / recarga	23
FIGURA	3.3	Efeito Bauschinger	24
FIGURA	3.4	Curva idealizada elástica perfeitamente plástica	25
FIGURA	3.5	Curva idealizada plástica com encruamento	26
FIGURA	3.6	Planos octaédricos	27
FIGURA	3.7	Elipse de Von Mises	29
FIGURA	3.8	Superfícies de carregamento	31
FIGURA	3.9	Expansão da elipse de carregamento	33
FIGURA	3.10	Translação da elipse de carregamento	33
FIGURA	4.1	O processo de análise dos elementos finitos	35
FIGURA	4.2	Cinemática de uma casca fina em estampagem	37
FIGURA	4.3	Vetores posição e movimento de um corpo deformado	41
FIGURA	4.4	Decomposição polar da deformação de cisalhamento	42
FIGURA	4.5	Superfície de escoamento anisotrópica	46
FIGURA	4.6	Curva uniaxial para encruamento isotrópico-multilinear	52
FIGURA	4.7	Solução de Newton-Rapson – uma interação	54
FIGURA	4.8	Solução de Newton-Rapson - próxima interação	55

FIGURA 4.9	Procedimento incremental de Newton-Rapson	56
FIGURA 4.10	Elemento VISCO107	58
FIGURA 4.10	Detecção do contato	61
FIGURA 4.11	Distância de penetração	62
FIGURA 4.12	Modelo de fricção	63
FIGURA 5.1	Modelo –1/8 da chapa e ferramenta -volumes	65
FIGURA 5.2	Malha de elementos finitos aplicado na chapa	66
FIGURA 5.3	Curva MISO de propriedades do material da chapa	67
FIGURA 5.4	Malha e normais de contato chapa-matriz	70
FIGURA 5.5	Malha e normais de contato chapa-punção	70
FIGURA 5.6	Malha e normais de contato do prensa chapa	71
FIGURA 5.7	Restrição dos nós pilotos	72
FIGURA 5.8	Restrição de rotação dos nós do elementos VISCO107	73
FIGURA 5.9	Gráfico do critério de convergência do 1º passo de tempo	78
FIGURA 5.10	Gráfico do critério de convergência do 2º passo de tempo	78
FIGURA 5.11	Resultado final da estampagem da caixa	80
FIGURA 5.12	Setor de 1/8 da caixa simulada	80
FIGURA 5.13	Caixa estampada modelo expandido	81
FIGURA 6.1	Pontos de inclusão de alumina no material	83
FIGURA 6.2	Microestrutura da seção transversal da chapa –100x	84
FIGURA 6.3	Microestrutura da seção transversal da chapa –500x	84
FIGURA 6.4	Curvas $\sigma$ x $\epsilon$ convencional x real	87
FIGURA 6.5	Máquina Universal de ensaios MEN 10.000	88
FIGURA 6.6	Célula de carga	89
FIGURA 6.7	Caixa dimensões principais	89
FIGURA 6.8	Dimensões do fundo da caixa	91
FIGURA 6.9	Fundo e paredes da caixa	92
FIGURA 6.10	Medidas do blank para caixa 44x44x39,5	94
FIGURA 6.11	Foto da ferramenta para estampagem da caixa -peças	95
FIGURA 6.12	Foto da ferramenta para estampagem da caixa - matriz	96
FIGURA 6.13	Foto da ferramenta para estampagem da caixa – prensa-chapa	96



FIGURA	6.14	Blank otimizado	97
FIGURA	6.15	Foto da caixa	99
FIGURA	6.16	Foto da caixa - setores	100
FIGURA	7.1	Força x deslocamento do punção (EF)	102
FIGURA	7.2	Espessuras da chapa no plano a 0° (EF)	103
FIGURA	7.3	Espessuras da chapa no plano a 45° (EF)	104
FIGURA	7.4	Espessuras da chapa no plano a 45° (EF)	104
FIGURA	7.5	Deformações na espessura da chapa no plano a 0° (EF)	105
FIGURA	7.6	Tensões de Von Mises nas paredes da caixa (EF)	106
FIGURA	7.7	Tensões de Von Mises – perfil da caixa (EF)	106
FIGURA	7.8	Deformações de Von Mises nas paredes da caixa (EF)	107
FIGURA	7.9	Deformações de Von Mises - perfil da caixa (EF)	107
FIGURA	7.10	Força x deslocamento do punção (EXP)	108
FIGURA	7.11	Espessuras médias da chapa no plano a 0° (EXP)	109
FIGURA	7.12	Deformações na espessura da chapa no plano a 0° (EXP)	110
FIGURA	7.13	Espessuras médias da chapa no plano a 45° (EXP)	110
FIGURA	7.14	Deformações na espessura da chapa no plano a 45° (EXP)	111
FIGURA	7.15	Força x deslocamento do punção (EF x EXP)	112
FIGURA	7.16	Espessuras médias da chapa no plano a 0° (EF x EXP)	113
FIGURA	7.17	Deformações na espessura da chapa no plano a 0° (EF x EXP)	114
FIGURA	7.18	Espessuras médias da chapa no plano a 45° (EF x EXP)	114
FIGURA	7.19	Deformações na espessura da chapa no plano a 45° (EF x EXP)	115
FIGURA	7.20	Foto da flange da caixa estampada	116
FIGURA	7.21	Imagem da flange da caixa simulada	116
FIGURA	A.1	Inclusões de Alumina no material – 100 x	128
FIGURA	A.2	Face transversal da chapa – 100 x	129
FIGURA	A.3	Face transversal da chapa – 200 x	129
FIGURA	A.4	Face transversal da chapa – 500 x	130
FIGURA	A.5	Face transversal da chapa – 1000 x	130
FIGURA	B.1	Direção de retirada das amostras da chapa	132
FIGURA	B.2	Dimensões dos corpos de prova	133

FIGURA B.3	Curvas $\sigma$ x $\epsilon$ convencional e real	138
FIGURA C.1	Ferramenta para estampagem da caixa	140
FIGURA C.2	Esforços nas colunas	142
FIGURA C.3	Esforços nos tirantes	142
FIGURA C.4	Esforços no prensa chapa	143
FIGURA C.5	Dimensões para mola de poliuretano	144
FIGURA C.6	Usinagem do punção	145
FIGURA C.7	Montagem da ferramenta na maquina	145
FIGURA C.8	Gráfico força x deslocamento do punção	146
FIGURA E.1	Ferramenta montada	179
FIGURA E.2	Detalhe da montagem do punção	179
FIGURA E.3	Ferramenta montada	179
FIGURA E.4	Detalhe da matriz	179
FIGURA E.5	Lubrificação do Blank	179
FIGURA E.6	Alimentação	179
FIGURA E.7	Aplicando a carga no prensa chapa	180
FIGURA E.8	Extraindo a caixa sem flange por baixo da mesa	180
FIGURA E.9	Extraindo a caixa com flange por cima	180
FIGURA E.10	Testes – rupturas das caixas	180
FIGURA E.11	Caixas com flanges	180
FIGURA E.12	Caixas sem flanges	180
FIGURA E.13	Caixas de 38 mm	181
FIGURA E.14	Setores preparados para medição	181
FIGURA E.15	Ferramenta desmontada	181

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	Velocidade de estampagem recomendadas para diversos materiais	13
TABELA 2.2	Fator de formabilidade $0,71\sqrt{r/h}$	16
TABELA 2.3	Fator de formabilidade $h/w$	17
TABELA 5.1	Parâmetro de controle de deslocamento e força	74
TABELA 5.2	Simulações de estampagem realizadas	79
TABELA 5.3	Variação do tempo de processamento e força do punção em função do coeficiente de atrito	79
TABELA 6.1	Composição química (%) e prop. Mecânicas do material	82
TABELA 6.2	Resultados da medição de inclusões	83
TABELA 6.3	Resultados da medição de grãos efetuados no IMAGE	85
TABELA 6.4	Pontos para construção da curva real	86
TABELA 6.5	Valores da razão plástica e índice de orelhamento	87
TABELA 6.6	Fator “y” para raios do canto do blank	93
TABELA 6.7	Parâmetros da estampagem	94
TABELA A.1	Resultados da medição de inclusões	128
TABELA A.2	Resultados da medição de inclusões	131
TABELA B.1	Composição química da chapa	133
TABELA B.2	Razão plástica $r_m 0^\circ$	135
TABELA B.3	Razão plástica $r_m 90^\circ$	135
TABELA B.4	Razão plástica $r_m 45^\circ$	135
TABELA B.5	Tensão de escoamento e alongamento – CDP a $0^\circ$	136
TABELA B.6	Tensão de escoamento e alongamento – CDP a $90^\circ$	137
TABELA B.7	Índices para a curva real	137
TABELA C.1	Poliuretano - propriedades	144

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
ASM	- AMERICAN SOCIETY FOR MATERIALS
ASTM	- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS
CAD	- COMPUTER AIDED DESIGN
EEP	- ESTAPAGEM EXTRA PROFUNDA
EF	- ELEMENTOS FINITOS
EXP	- EXPERIMENTO
FEM	- FINITE ELEMENT METHOD
IGES	- INITIAL GRAPHICICS EXCHANGE SPECIFICATIONS
LDR	- LIMIT DRAWING RATIO
NUMISHEET	- CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ESTAMPAGEM DE CHAPAS
PCH	- PRENSA CHAPA

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	área	$m^2$
Cd	Velocidade do som	$m/s$
$D_0$	Diâmetro inicial do blank	$m$
$D\varepsilon^e$	Incremento de deformação elástica	[1]
$D\varepsilon^p$	Incremento de deformação plástica	[1]
$D\sigma^e$	Incremento de tensão	[1]
E	Módulo de Young	$Pa$
$E_p$	Módulo plástico	[1]
$E_t$	Módulo tangente	[1]
F	Força	$N$
H	Altura da caixa	$m$
J	Função constitutiva	[1]
J2	Incremento do tensor de tensões	[1]
K	Valor crítico das tensões octaédricas	$Pa$
$K_b$	Coefficiente de severidade do embutimento	[1]
$K_c$	Encruamento acumulado durante a compressão	[1]
$K_t$	Encruamento acumulado durante a tração	[1]
L2	Norma Euclidiana	[1]
P	Perímetro	$m$
Q	Potencial plástico	[1]
r	razão de deformação plástica	[1]
R	raio	$m$
$R_{ref.}$	Valores de tolerância	[1]
T	Espessura da caixa	$m$
$U_p$	vetor deslocamento do ponto	[1]
$U_{ref.}$	Valores de tolerância	[1]
V	Volume	$m^3$
W	Largura	$m$
$W_p$	Trabalho plástico	$Nm$
$\varepsilon$	Deformação	%
$\lambda_i$	Autovalores de [U]	[1]
$\lambda$	Multiplicador plástico	[1]
$\{e_i\}$	Autovalores de [v]	[1]
$\mu$	Coefficiente de atrito	[1]
$\nu$	Coefficiente de poisson	$Pa$
$\sigma$	Tensão	$Pa$
$\sigma_m$	Tensão Hidrostática	$Pa$
$\sigma_{oct}$	Tensão octaédrica	$Pa$
$\Delta J$	Determinante relativo do gradiente de deformações	[1]
$\Delta \lambda$	Incremento do trabalho plástico	[1]
[F]	Gradiente de deformações	[1]
$[\tau_i]$	matriz corrente de tensões de Cauchy	[1]
$[D_i]$	matriz corrente de tensões de deformação	[1]

[K]	matriz de coeficientes	[1]
[D]	matriz de deformação deslocamento	[1]
[Bi]	matriz de deslocamentos de deformação	[1]
[M]	matriz de massa	[1]
[ε]	matriz de tensões de deformação	[1]
[Gi]	matriz derivativa da função de forma	[1]
[U]	matriz estiramento principal	[1]
[I]	matriz identidade	[1]
[Δε <sub>n</sub> ]	matriz incremento de deformação	[1]
[Δ <sub>en</sub> ]	matriz incremento de deformação	[1]
[Δu <sub>n</sub> ]	matriz incremento de deslocamento	[1]
[R]	matriz rotação	[1]
[K R <sub>ref.</sub> ]	matriz tangente de rigidez	[1]
{u}	norma do vetor residual	[1]
{ K <sub>i</sub> }	matriz Jacobiana ( matriz Tangente)	[1]
{a}	tensão de retorno	[1]
{F}	vetor das forças externas	[1]
{Fa}	vetor de cargas aplicadas	[1]
{F <sub>i</sub> <sup>nr</sup> }	vetor de retorno das cargas aplicadas	[1]
{I}	vetor de força interna	[1]
{S}	tensões de desvio	[1]
{u}	vetor dos valores dos graus de liberdade	[1]
{α}	translação da superfície de escoamento	[1]
{Xn}	Geometria corrente	[1]
{Δε <sup>pl</sup> }	variação de deformação plástica	[1]
{Δ <sub>ui</sub> }	variação dos vetores de deslocamento	[1]

# Capítulo 1

## 1. INTRODUÇÃO

A competitividade global leva as indústrias a inovar rapidamente seus produtos, lançando continuamente novos modelos em prazos curtos com elevados requisitos de qualidade a custos reduzidos. Para atender a esta necessidade os procedimentos de desenvolvimento de produtos e de fabricação devem ser continuamente aprimorados, incorporando novas técnicas de análise e controle.

A estampagem é um importante processo de fabricação industrial, pois é um meio rápido e econômico de produzir artigos complexos, precisos, duráveis e em grande quantidade. O ferramental utilizado na estampagem é específico para cada produto, seu desenvolvimento e ajuste demandam de muito tempo e recursos.

Durante a estampagem de uma peça podem ocorrer simultaneamente operações de dobramento, estiramento e embutimento que interagem influenciando na geometria final do produto. As propriedades mecânicas do material empregado e seu comportamento às deformações impostas, o atrito nas faces em contato, a geometria e características mecânicas do ferramental, também influenciam o processo. A interação destes fatores torna difícil a determinação analítica do processo de estampagem.

Esta dificuldade leva o desenvolvimento de novas ferramentas a se basear na experiência do projetista, adquirida em peças similares e no tipo de material aplicado.

Entre concepção de um novo produto estampado até a fase de fabricação, o ferramental é desenvolvido em várias etapas, sendo necessário à fabricação de ferramentas protótipo e ajustes com longos ciclos de tentativa e erro. Estes ciclos influem decisivamente no custo de um novo produto.

A aplicação de programas de análise e aproximação numérica (Elementos Finitos), desenvolvidos para simular o processo de conformação de chapas metálicas, pode diminuir o número de ciclos no desenvolvimento de ferramentas ou mesmo eliminá-los, garantindo a eficiência do processo, de modo a obter produtos de qualidade ao menor custo e prazo.

Atualmente muitos programas baseados em diferentes algoritmos têm sido desenvolvidos e testados para simular o processo de conformação de chapas metálicas.

Estes programas procuram modelar o complexo comportamento plástico dos metais e sua interação com o ferramental durante a estampagem, buscando a predição da força de estampagem, a formação de rugas, a deflexão superficial, a condição limite de rasgamento, a geometria do *blank*, o retorno elástico, avaliação da espessura da chapa, as tensões residuais, etc. A obtenção destes dados por simulação auxilia a tomada de decisões e possibilita a redução do tempo de desenvolvimento do ferramental, através da diminuição das etapas de embutimento e aumento da complexidade das peças. São dados fundamentais na escolha e utilização adequada das prensas no aumento da confiabilidade do processo e na melhoria da qualidade do produto.

O método dos elementos finitos tem grande potencial de aplicação na indústria automobilística na qual o processo de estampagem é empregado em larga escala. No desenvolvimento de uma peça de um grande painel, por exemplo, para um novo modelo são necessários entre um a dois meses para ajustar a ferramenta e os gastos com estes ajustes atingem 22% do custo total de desenvolvimento do produto. Este longo ciclo e o alto custo envolvido, afetam diretamente a eficiência da fabricação (Hongzhi e Zhongqi, 2000).

Makinouchi, 1996, demonstrou como pode se dar a aplicação dos elementos finitos, no ciclo de desenvolvimento de produtos da indústria automobilística. Esta pode auxiliar a tomada de decisões quanto ao design, modificações de peças e ferramentas em diferentes etapas do ciclo, possibilitando uma diminuição ou mesmo eliminação das ferramentas protótipo e dos ajustes por tentativas, com conseqüente diminuição do tempo e recursos empregados.

O ciclo é iniciado com a concepção de um novo modelo, seu design determinará os procedimentos de fabricação. A partir deste design a carroceria é concebida e a simulação por elementos finitos pode ser empregada com o propósito de fazer uma estimativa grosseira se as peças podem ou não ser produzidas redirecionando o design.



Após o dimensionamento das peças uma simulação mais precisa pode ser aplicada para determinar o número de passos da estampagem e a geometria da ferramenta em cada passo minimizando os ajustes por tentativas.

Após a fabricação da ferramenta na etapa de ajustes a simulação pode ser aplicada para solucionar os defeitos de conformação ocorridos antes do início da produção. E finalmente uma vez iniciada a produção em linha das peças o método dos elementos finitos pode ser aplicado para estudar a origem e a propagação de defeitos que aparecem durante a fabricação, obtendo informações que podem ser usadas como referência em futuros modelos.

Tendo em vista o potencial de aplicação do método, muitos esforços têm sido empregados no desenvolvimento de novos algoritmos e programas de elementos finitos direcionados a análise não linear. A partir destes desenvolvimentos pretende-se obter ferramentas com grande capacidade de predição dos defeitos de conformação, dentro de tolerâncias aceitáveis e prover ferramentas de conformação otimizadas, eliminando as ferramentas protótipo e o número de tentativas de ajuste, encurtando drasticamente o tempo do ciclo do processo de desenvolvimento de novas ferramentas.

## 1.1 Revisão bibliográfica

Naceur et al (2001), apresentaram um estudo sobre otimização de ferramentas de estampagem, com a aplicação de dispositivos de restrição localizada da chapa (drawbeads), para evitar enrugamentos. O estudo é baseado no uso do algoritmo de análise inversa, cuja formulação é apresentada e aplicada na simulação de dois problemas, uma caixa e uma tampa do Renault Twingo. Os resultados das simulações efetuadas com e sem o uso de drawbeads são comparadas e com os obtidos em simulações executadas no programa comercial de elementos finitos *OPTRIS*, demonstrando a capacidade efetiva do aproximador de análise inversa.

Tekkaya (2000), apresentou um estudo sobre o estado da arte da simulação de estampagem de chapas, avaliando os três principais algoritmos utilizados como base dos programas de simulação. O estágio atual dos programas de simulação alcançado, os requisitos industriais, as tendências e expectativas de desenvolvimento esperadas

são discutidos. O autor conclui que os programas com base estática implícito deverão dominar o mercado, dado o grande número de programas comerciais baseados neste algoritmo, que apresenta a vantagem de efetuar uma simulação de estampagem completa, embora necessite de grande esforço computacional. O desenvolvimento contínuo da capacidade dos computadores e programas será decisivo para isto.

Stoughton (2000), apresentou um critério de cálculo de um limite de estampabilidade, baseado no estado de tensões do material, que pode ser implementado com o método dos elementos finitos. A formulação do critério limite é apresentada e aplicada, os resultados são comparados com um grande número de curvas de limite de conformação Keeler-Goodwin para alumínio e aço. A dependência do limite de conformação em relação ao histórico de deformações é discutida e demonstrada como é encampada no novo critério. O autor destaca as vantagens do uso do critério nas operações de ajuste de ferramental, e a necessidade de mudança de atitude do pessoal envolvido nestas operações.

Hongzhi e Zhongqi (2000), apresentaram trabalho sobre estampagem de chapas por simulação numérica, no qual são comparados os resultados da simulação da lateral do automóvel Santana, executada no programa comercial base implícita *AUTOFORM* com os da simulação do LS-Dyna-3D programa que é baseado em dinâmica explícita. A análise dos resultados experimentais apontou as principais diferenças entre os algoritmos e a capacidade de integração CAD/FEM dos programas.

Narasimhan e Lovell (1999), através de um trabalho de pesquisa sobre a predição do retorno elástico em estampagem, apresentam um procedimento de simulação com a utilização de programa de base dinâmica explícita, *Ansys-Dyna*, para obter as deformações da chapa, os dados obtidos são aplicados no programa Ansys, de base estático implícito que simula o descarregamento da peça e o conseqüente retorno elástico. O uso deste procedimento seqüencial resulta em maior velocidade da simulação e maior precisão, possibilitando reduzir o número de ferramentas protótipo e os ajustes por tentativa e erro na indústria automotiva.

Takuda, Mori e Hatta (1999), apresentam um estudo sobre a aplicação do critério de Crockroft e Lathan para predição de fratura dúctil, que pode ser usado na determinação do limite de conformação de chapas (LDR). O critério é aplicado na simulação do embutimento profundo, de copos de alumínio Al-1100 e Al-2024, pelo método dos elementos finitos. A formulação do critério e os resultados das simulações e experimentos são analisados comprovando a aplicabilidade do método.

Hattangady (1999), através de um trabalho de pesquisa sobre aplicação de malhas de elementos finitos em ferramentas de estampagem e de forjamento, apresenta vários métodos de expansão da malha. Os modelos obtidos com uma malha mais grossa têm um menor número de nós e elementos, porém retendo as mais importantes informações de geometria da peça. Estes modelos com menor número de nós tornam a simulação mais rápida, porém seu uso deve ser criterioso para não comprometer os resultados da análise.

Kawka e Makinouche (1997), apresentam uma análise do estágio de desenvolvimento de dois programas de simulação, através do método dos elementos finitos. O programa dinâmico explícito *Itas Dynamic* resultado do trabalho de um grupo de pesquisa da Universidade de Osaka e do Instituto Riken, que obteve resultados positivos em testes nas maiores montadoras do Japão. Outro programa avaliado foi o Fast 3D que é baseado no algoritmo de análise inversa, que tem como vantagem principal uma maior velocidade de processamento.

Cheok e Nee (1998), apresentam um estudo sobre as tendências de desenvolvimento e aplicação da automação no projeto de ferramentas de estampagem. Através da análise dos procedimentos adotados em diversas empresas, que aplicam intensivamente as novas tecnologias CAD/CAM e FEM. Os autores identificam um procedimento de trabalho capaz de agilizar o desenvolvimento de novas ferramentas, automatizando o projeto de ferramentas. Os diagramas do procedimento são discutidos e sua aplicação em um programa comercial é apresentada.

Makinouchi (1996), desenvolveu um estudo sobre a aplicação atual da simulação na indústria, no qual avalia a aplicação da simulação pelo método dos elementos finitos, no desenvolvimento de ferramentas de estampagem de peças automotivas. Os resultados do banco de testes aplicado nos programas comerciais baseados em diferentes algoritmos apresentados na NUMISHEET 93 e exemplos de simulações são analisados. A integração de sistemas CAD/FEM no estágio atual e os desenvolvimentos esperados são discutidos.

Mamalis et al (1996), apresenta um estudo da aplicação da estampagem profunda de caixas retangulares. As simulações apresentadas foram efetuadas com o programa DYNA-3D, que é baseado num algoritmo de dinâmica explícita. A influência de diferentes velocidades do punção e coeficientes de atrito são apresentados. As curvas de força no punção x deslocamento e as deformações na chapa são analisadas e comparadas com resultados experimentais. Os resultados deste estudo proporcionam parâmetros para se balizar estudos de simulação de estampagem.

## 1.2 Objetivos e justificativas

O objetivo deste trabalho é a determinação da força de estampagem necessária à fabricação de uma caixa quadrada e a variação da espessura da chapa resultante da deformação imposta, através do método dos elementos finitos, utilizando o programa comercial ANSYS®6.0.

O conhecimento da força de estampagem é de fundamental importância para se determinar à capacidade da prensa adequada ao processo, as características de acionamento do prensa-chapas e fixação da ferramenta.

A espessura final do material pós-deformação influencia a escolha do número de passos do estampo, o ajuste de sua geometria e parâmetros do processo como velocidade de aplicação do carregamento, lubrificação e pressão do prensa-chapas.

Os resultados da simulação são comparados com dados obtidos do experimento de estampagem, possibilitando a avaliação da convergência do método e programa, comentários gerais e dificuldades encontradas são relatadas.

Para a escolha da geometria da peça sujeita a simulação foram levados alguns pontos em consideração, como:

- Comparadas com peças em formato de copo cilíndrico, que tem solução analítica e gráfica simplificadas, e extensamente explorada, as peças em formato de caixa quadrada apresentam solução analítica e gráfica mais complexa.

- Em relação ao espaço de simulação, os corpos cilíndricos podem ser simulados em duas dimensões (2D) por meio de planos axisimétricos, na análise de uma peça de formato quadrado é necessária uma simulação em três dimensões (3D), o que representa um desafio à capacidade do programa, bem como da avaliação dos resultados obtidos.

- A estampagem de uma peça em chapa com a forma de caixa quadrada foi usada como um dos problemas para teste de capacidade e precisão na predição dos problemas de estampagem, em programas de simulação apresentados na NUMISHEET 93 (Conferência Internacional sobre Simulação Numérica 3D de Estampagem de Chapas, Tekkaya, 2000). Também foi aplicada como um dos testes para o desenvolvimento do software ITAS 3D pelas equipes dos laboratórios dos Institutos de tecnologia RIKEN e Osaka (Kawka e Makinouchi, 1997).

Espera-se que o presente trabalho possa servir de base para futuros estudos relacionados ao processo, tal como o estudo do atrito na interface chapa ferramenta, o estudo da influência dos raios da matriz e punção, o retorno elástico pós-descarregamento e conseqüente agarramento da peça ao punção, entre outros.

### 1.3 Estrutura da dissertação

Para atingir os objetivos propostos este trabalho apresenta uma base teórica resumida dos princípios, métodos e processos envolvidos sendo que:

O capítulo 1 apresenta uma introdução ao tema e a revisão do estado da arte na aplicação de simulação pelo método dos elementos finitos na área da estampagem de metais.

O capítulo 2 apresenta um resumo dos fundamentos do processo de estampagem, os conceitos básicos, os produtos e ferramental e os critérios limites adotados no processo.

O capítulo 3 apresenta um resumo da teoria da Plasticidade com os princípios que norteiam o algoritmo base do programa a ser utilizado neste estudo, partindo do conceito de deformação plástica, suas curvas de escoamento, regras de encruamento, o critério de Von Mises e as regras de fluxo associadas.

O capítulo 4 apresenta uma introdução ao método dos elementos finitos com a formulação do algoritmo base do programa ANSYS®6.0, a modelagem do contato e o critério de convergência usado para controle.

O capítulo 5 apresenta a metodologia empregada na simulação, as etapas de modelagem, os parâmetros de processamento adotados e o pós-processamento envolvido.

O capítulo 6 apresenta as propriedades do material empregado no ensaio de embutimento, o projeto da ferramenta e o procedimento experimental.

O capítulo 7 apresenta os resultados da simulação e do experimento, sua comparação e análise.

O capítulo 8 apresenta os comentários gerais e conclusões.

## Capítulo 2

### 2. PROCESSO DE ESTAMPAGEM

#### 2.1 Conceitos básicos

A estampagem é um método de conformação sob condições de compressão e tração, onde uma chapa é forçada a escoar para dentro de uma cavidade na matriz, da qual assume a forma com um simples golpe da prensa é possível obter um copo a partir de um disco de chapa (blank), como pode ser observado na Figura 2.1 (Shüller, 1998).

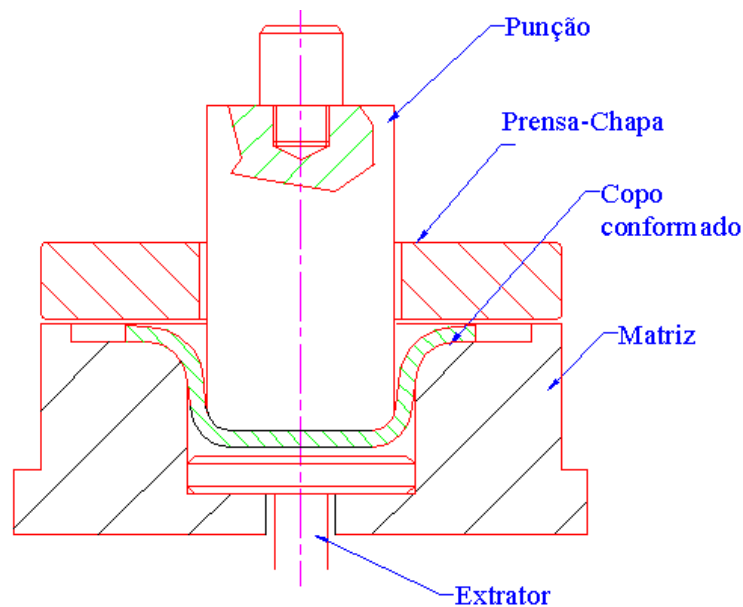


Figura 2.1 – Embutimento de um copo cilíndrico.

O processo de estampagem é indicado para grandes lotes, pois o ferramental desenvolvido tem alto custo e é específico para cada peça. Sua aplicação é vantajosa pela alta produtividade do processo, pela complexidade e qualidade das peças obtidas que podem apresentar grande resistência mecânica. Em geral a estampagem é feita a frio.

Dois tipos básicos de operações de estampagem são empregados:

1. Estampagem a simples ação => é usada na produção de peças pequenas e médias. Nesta operação o prensa-chapas é acionado por meio de molas ou por um sistema pneumático regulável, que é mais vantajoso, pois se pode regular e manter a pressão constante no prensa-chapa.

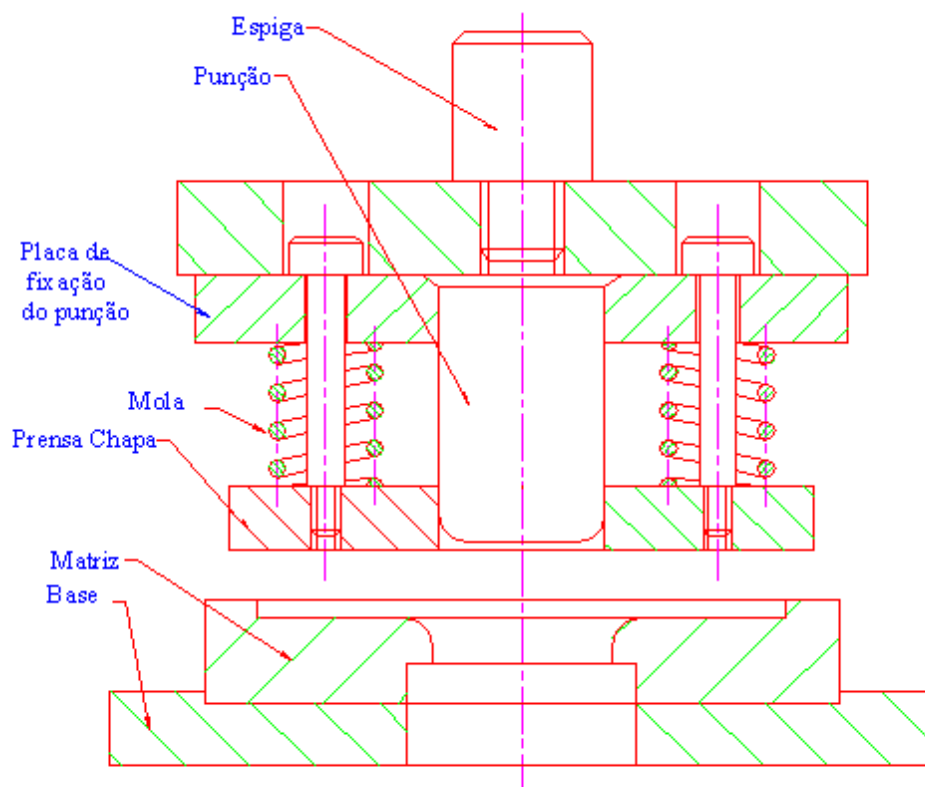


Figura 2.2 - Estampo de simples ação - prensa-chapa acionado por molas.

2. Estampagem a dupla ação => é usada para peças médias a grandes. Nesta operação o prensa-chapa é acionado por um segundo pistão que pode ser ajustado, obtendo maiores pressões e melhor controle do que com o emprego de molas.



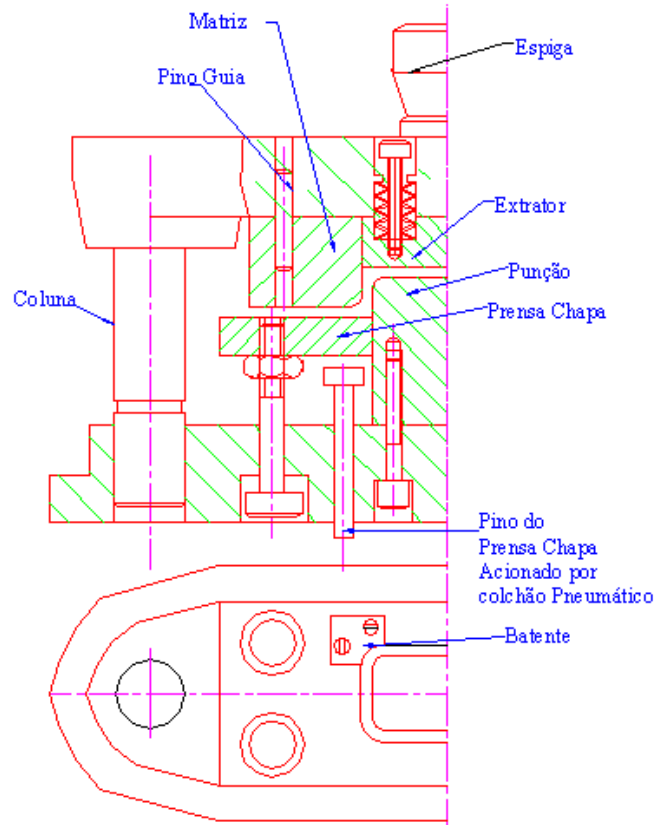


Figura 2.3 - Estampo para fabricar caixas retangulares.

### 2.1.1 Prensas

A seleção de uma prensa para a estampagem de uma peça em particular, tem que ser baseada no conhecimento íntimo do trabalho a ser executado e dos diversos tipos de prensas disponíveis. O conhecimento da força de estampagem, as dimensões da mesa e martelo, o curso do martelo, as condições de fixação e acionamento do prensa-chapas, são requisitos básicos a serem considerados para esta seleção (Lascoe, 1988).

As prensas são projetadas e construídas meticulosamente para se garantir a precisão, o paralelismo e o controle de deflexões mínimas e dispendo de controles elétricos sofisticados de alta precisão. Seu modo de acionamento pode ser mecânico (excêntricas) ou hidráulico.

As prensas excêntricas têm como vantagem principal uma maior velocidade de trabalho, como desvantagens apresentam pequeno curso de avanço do martelo e possibilidade de sobrecarga tanto da ferramenta quanto da própria máquina.

As prensas hidráulicas são mais indicadas para embutimento profundo, pois apresentam maior curso do martelo, têm controle de velocidade de avanço e ajuste de curso do punção, têm a carga máxima ajustável de acordo com o trabalho a ser executado o que evita sobrecargas. Como desvantagens, têm uma menor velocidade que as mecânicas e a necessidade de um motor maior, pois não têm um volante para estocar energia. As prensas hidráulicas podem ser de simples efeito, duplo efeito ou triplo efeito.

Como todos os materiais estruturais empregados seguem as leis da elasticidade, deve-se reconhecer que todas as prensas sofrem deflexões, por mais robustas que possam ser construídas, não existindo prensas com deflexão nula. A função das estruturas das prensas é absorver as forças e prover uma guia precisa de deslizamento, dar suporte ao sistema de acionamento e outras unidades auxiliares, seu desenho depende de:

- Força da prensa, que determina os requisitos de resistência e rigidez da estrutura;
- As dimensões da matriz que influenciam no tamanho da área da mesa de trabalho da prensa;
- Acesso a área de trabalho que determina a forma da estrutura da prensa;
- Grau de precisão das guias que tem influência determinante na forma e rigidez da estrutura.

Para atender a todos estes requisitos de projeto, as estruturas são otimizadas com o auxílio do método dos elementos finitos. Em relação aos principais tipos de estruturas adotadas, temos:

- Estruturas tipo “C” – são prensas de frente abertas, muito versáteis por apresentar fácil acesso a mesa de trabalho por todos os lados e apresentam menor custo de fabricação. Sua principal desvantagem é que devido a sua forma tende a sofrer uma deflexão angular, desalinhando a ferramenta, o que pode comprometer a qualidade do produto, para minimizar este problema são acoplados tirantes na sua parte frontal.

- Estruturas tipo “H” – formadas por colunas ou paredes laterais unidas por uma base e uma cabeceira, apresentam maior custo e são as mais indicadas, pois têm a vantagem de eliminar a deflexão angular. Suas colunas proporcionam guias mais rígidas e precisas, porém impõem restrições ao acesso à mesa de trabalho.

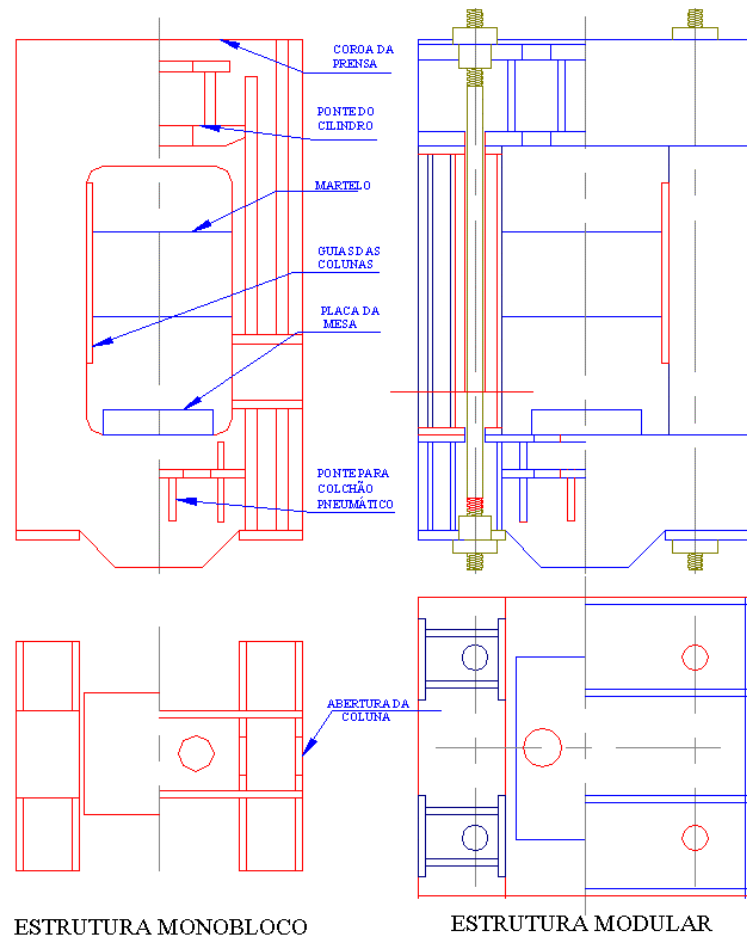


Figura 2.4 - Estrutura típica de prensa tipo “H” (Shüller, 1998).

Este tipo de estrutura suporta cargas mais elevadas, prensas acima de 4.000 KN, são construídas exclusivamente com este design.

As velocidades de trabalho recomendadas para alguns materiais pela ASM, 1969, são dadas na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Velocidade de estampagem para diversos materiais.

Material	Velocidade da prensa (m/min)
Alumínio	45,5 - 53,3
Latão	53,3 - 61,0
Cobre	38,1 - 45,7
Aço	5,5 - 15,2
Aço inoxidável	9,1 - 45,7
Zinco	38,1 - 45,7

### 2.1.2 Fatores de influência do processo

As operações de estampagem são usadas em larga escala na indústria automobilística, aeronáutica, de eletrodomésticos de linha branca, etc. Na indústria automobilística é o processo responsável pela obtenção dos inúmeros painéis que montados e soldados, vão formar a carroceria do automóvel, e ainda os painéis externos como, portas, tampas, para lamas etc. Os fatores que influenciam o processo podem ser divididos em fatores mecânicos do processo e os ligados as propriedades e comportamento mecânico dos materiais.

Entre os fatores mecânicos temos: a forma e as dimensões da peça e ferramenta, do tipo de lubrificante, a prensa empregada e a taxa de deformação. A forma e as dimensões da peça determinam o grau de deformações a ser imposto ao material, para grandes deformações a estampagem é executada progressivamente em várias operações (passos).

Na ferramenta os raios no punção e na matriz devem ser bem dimensionados para manter os esforços de conformação dentro de limites adequados ao material empregado. Estes raios têm grande influência no atrito entre a chapa e ferramenta, quanto menor o raio maior o atrito, sendo decisivos na qualidade do produto obtido bem como na vida do ferramental. Segundo ASM, 1969, as folgas entre o punção e matriz devem levar em consideração o aumento de 7 a 15% que ocorre na espessura do material ao penetrar na cavidade, por isto são recomendadas folgas de 15 a 20 % acima da espessura da chapa.

As superfícies da ferramenta e punção devem ter alta dureza e fino acabamento para suportar os esforços e o atrito durante o trabalho. Na estampagem a lubrificação é fundamental, sendo que a escolha do lubrificante vai depender da severidade do trabalho e da experiência adquirida na fabricação de peças similares. Os lubrificantes devem conter aditivos adequados à severidade do trabalho, aliando características de fácil aplicação e remoção para não onerar o processo.

O alinhamento entre o punção e matriz é determinante na qualidade do produto evitando rasgos e rebarbas, este alinhamento é influenciado diretamente pelo tipo de prensa adotada.

Entre os fatores ligados as propriedades e comportamento mecânico dos materiais têm: a anisotropia da chapa devido à laminação, que pode ser eliminada ou atenuada com um tratamento térmico antes do processo, o encruamento ocorrido durante a deformação, a influência de algum revestimento na chapa como zinco, e a espessura da chapa, já que com chapas mais espessas se consegue maior embutimento.

O conhecimento de como o material se comporta e uma análise cuidadosa dos vários tipos de conformação que envolve a fabricação de uma peça é indispensável no sucesso do desenvolvimento de um processo mais eficiente.

## 2.2 CRITÉRIOS LIMITE DE CONFORMAÇÃO

### 2.2.1 Fatores de formabilidade

Na conformação de caixas quadradas ou retangulares o metal nos cantos sofre severas tensões, de tração próxima ao raio do canto do punção e de compressão ao penetrar no raio da matriz, nas paredes laterais o metal é sujeito principalmente a tensões de tração, pois o material se move por dobramento no raio da matriz e adicionalmente uma tensão de compressão devido ao escoamento do material nos cantos que se desloca em direção à área das paredes, Figura 2.4 (ASM Metals Handbook, 1969).

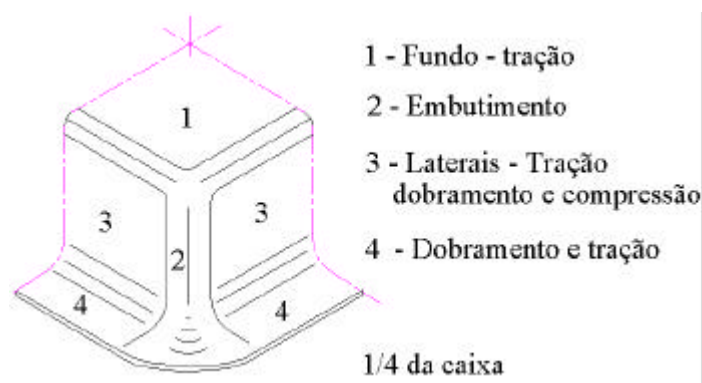


Figura 2.4 - Esforços atuantes uma caixa estampada.

A compressão nas áreas dos cantos depende da taxa do raio do canto vertical interno em relação à largura da caixa ( $r/w$ ).

A resistência do metal ao dobramento e ao enrugamento depende da taxa da espessura da chapa em relação à largura do blank ( $t/W$ ).

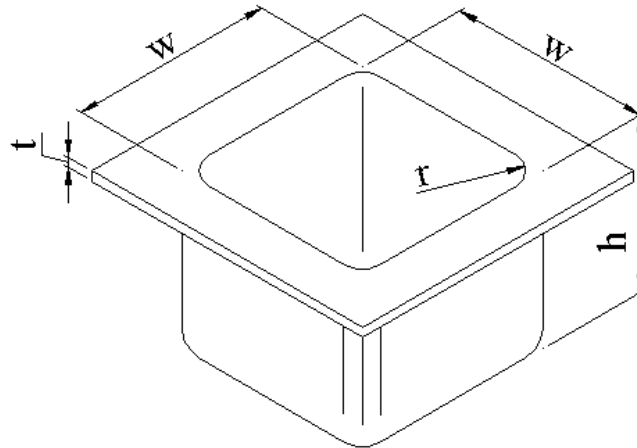


Figura 2.5 - Dimensões principais da caixa.

Fatores de formabilidade ( $0.71\sqrt{r/h}$ ) para caixas quadradas ou retangulares em operações para aço 1010, recomendadas pela ASM 1969, são listadas na tabela 2.2, fatores de formabilidade para metais menos dúcteis são 10% maiores.

Tabela 2.2 – Fator de formabilidade.

r/w	Fator de formabilidade ( $0.71\sqrt{r/h}$ )			
	t / w 2.0 %	t / w 1.0 %	t / w 0.6 %	t / w 0.3 %
0.40	0.40	0.42	0.44	0.48
0.30	0.36	0.38	0.40	0.42
0.20	0.33	0.34	0.36	0.38
0.10	0.25	0.25	0.25	0.25
0.05	0.15	0.15	0.15	0.15

Taxas máximas da profundidade da caixa pela largura do blank em uma operação recomendadas pela ASM 1969, para aço 1010 estão na tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Fator de formabilidade  $h/W$ .

r/w	h/W (%)			
	t/w 2.0 a 1.5 %	t/w 1.5 a 1.0 %	t/w 1.0 a 0.6 %	t/w 0.6 a 0.3 %
0.30	1.00	0.95	0.90	0.85
0.20	0.90	0.82	0.76	0.70
0.15	0.75	0.70	0.65	0.60
0.10	0.60	0.55	0.50	0.45
0.05	0.40	0.35	0.30	0.25

Estes fatores são aplicados na Figura 2.6, caixas situadas nas áreas A, B e C abaixo da curva 2 podem ser estampadas em uma operação.

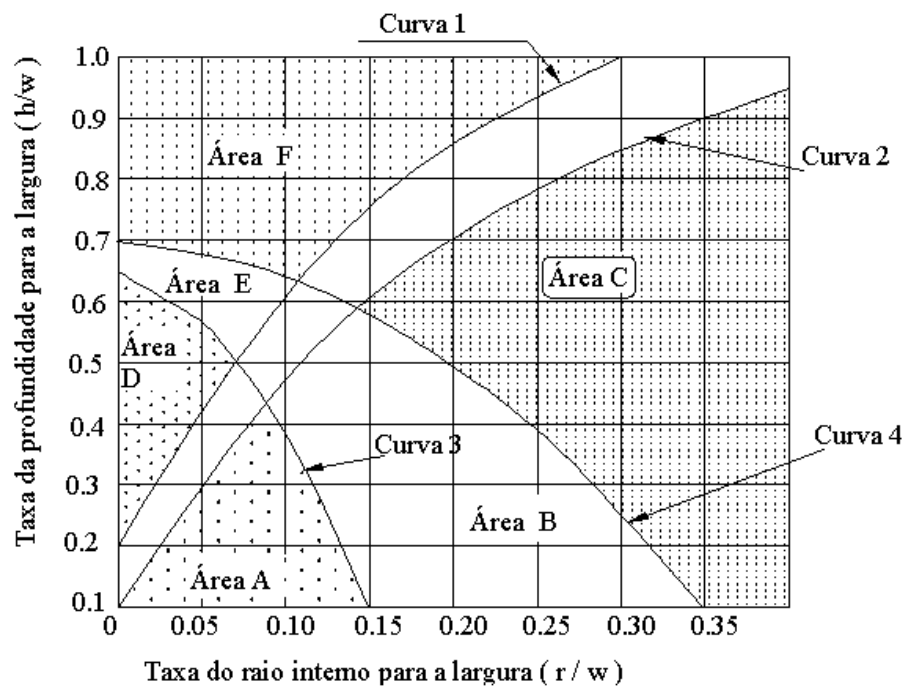


Figura 2.6 - Relações dimensionais para definição das áreas de formabilidade para caixas quadradas e retangulares.

Caixas situadas nas áreas D, E e F acima da curva 1 necessitam de uma ou mais operações. O espaço entre as curvas 1 e 2 representam caixas na fronteira para conformação em uma operação.

## 2.2.2 Ensaio de estampabilidade

Durante uma seqüência de estampagem complexa de chapas finas podem coexistir várias operações, não há um teste simples que dê uma indicação precisa da formabilidade dos materiais em todas as situações. O conhecimento de como o material se comporta e uma análise cuidadosa das diversas operações de conformação que envolve a fabricação de uma peça, são indispensáveis ao desenvolvimento de um processo de produção mais eficiente (ASM Metals Handbook, 1969).

Os ensaios mecânicos padronizados aplicáveis na qualificação de chapas para estamparia podem ser: tração, dobramento, dureza e os ensaios que simulam o processo. Destes os mais empregados são o ensaio de embutimento Erichsen e o ensaio Swift, em que predomina a operação de estampagem (Souza, 1982).

### 2.2.2.1 Ensaio Erichsen

Neste ensaio a chapa é presa entre uma matriz e um anel de fixação por uma carga de compressão. O punção de cabeça esférica, lubrificado com graxa grafitada, aplica uma carga abaulando a chapa até sua ruptura.

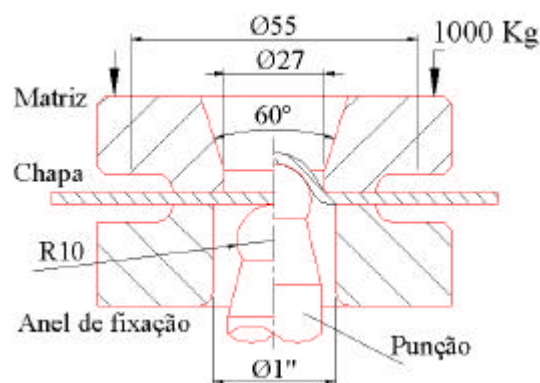


Figura 2.7 - Ensaio de embutimento Erichsen.

A altura atingida pela deformação então é medida e comparada com as recomendações da norma ou do fabricante para cada espessura. Além da determinação



da ductilidade este ensaio é usado para detectar rugosidades superficiais na chapa deformada resultante de tamanho de grão excessivo (Souza, 1982). A Figura 2.8 apresenta as curvas dos valores mínimos a serem obtidos nos ensaio de embutimento Erichsen modificado para chapas finas de qualidade estampagem da USIMINAS.

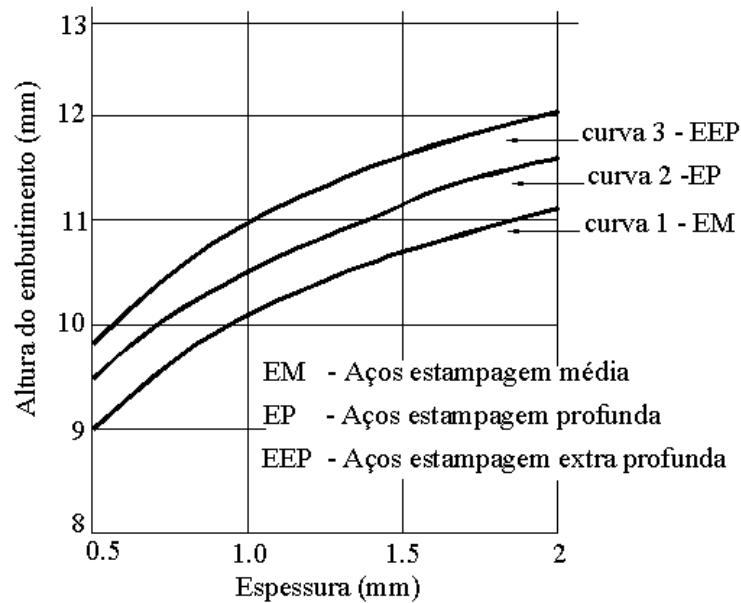


Figura 2.8 - Curvas de ensaio Erichsen modificado para chapas finas (Catálogo USIMINAS).

### 2.2.2.2 Ensaio Swift

Neste ensaio o punção tem fundo plano e é lubrificado, a força aplicada para a fixação da chapa permite que ela escoe entre a matriz e o anel, simulando a estampagem, são estampadas várias chapas de diâmetros crescentes a taxa de 2%, até atingir a ruptura do fundo do copo. Determina-se o diâmetro  $D_1$  que é o maior diâmetro de chapa que pode ser estampado sem ruptura ou estrição localizada no fundo do copo. Determina-se por este ensaio a LDR (Limiting Drawing Ratio), que é a razão entre o diâmetro inicial do blank e o diâmetro do copo, dada pela fórmula:

$$LDR = \left( \frac{D_0}{D_P} \right) \quad (2.1)$$

O valor da LDR é fortemente influenciado pelo índice de anisotropia plana da chapa,  $\bar{R}$ , que é a média dos parâmetros de “R” razão de deformação plástica, tomados em diferentes ângulos em relação a direção de laminação da chapa.

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (2.2)$$

Também são utilizados os ensaios: Olsen e o ensaio Nakazima em que predominam a operação de estiramento, estes ensaios são variantes do ensaio Erichsen.

### 2.2.2.3 Curvas limite de conformação Keeler-Goodwin

O limite de conformação de chapas é definido como o estado no qual, em um ponto da chapa se iniciam uma estricção levando ao rompimento (Dieter, 1981). A curva para este limite é determinada pelo método de Keeler-Goodwin, no qual uma malha de pequenos círculos de diâmetro igual a 2,5 mm é gravada quimicamente na superfície da chapa.

A chapa é então estampada, parando o processo a intervalos iguais, mede-se então com uma escala transparente, a deformação dos círculos, que gradualmente se tornam elipses. A partir deste histórico de deformações, é traçada a curva da maior deformação versus a menor deformação (Figura 2.9).

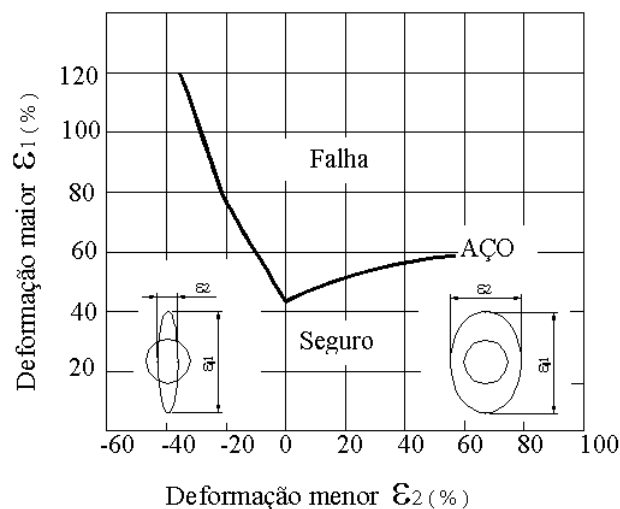


Figura 2.9 - Curva limite de escoamento Keeler-Godwin.

Esta curva é importante para se determinar no produto os pontos críticos na fase de ajuste da ferramenta e das variáveis do processo. Deformações medidas com valores abaixo da curva são seguras, na curva ou acima dela corre-se o risco de rupturas.

### 2.3 Projeto de ferramentas

O desenvolvimento de ferramentas demanda muito conhecimento e grande esforço dos projetistas. Cheok e Nee, 1997, estudaram a aplicação de novas tecnologias CAD/CAM e conceitos no projeto e construção de ferramentas de estampagem, que acopladas ao aumento da velocidade e rigidez das prensas, contribui continuamente para o desenvolvimento e aplicação do processo em produtos mais complexos e sofisticados.

A utilização de técnicas numéricas em problemas relacionados com o comportamento dos materiais resulta em um amplo conjunto de dados de tensões e deformações. Uma criteriosa análise dos resultados deve ser feita para a seleção de informações úteis, ao projeto da ferramenta.

O cálculo da força de estampagem é o primeiro requisito na escolha da prensa e em função das características e recursos da prensa a ferramenta será dimensionada.

Como na estampagem as falhas tendem a ocorrer preferencialmente na chapa que na ferramenta as deformações e tensões residuais são resultados críticos (Tekkaya, 2000). A análise dos dados de tensões e deformações obtidas por simulação numérica auxilia o projetista na tomada de decisões quanto ao número mínimo de operações de estampagem necessárias e a forma da matriz e punção da ferramenta em cada operação. Os pontos críticos da peça podem ser avaliados orientando as modificações necessárias. Esta é a chave para o desenvolvimento de ferramentas otimizadas, que eliminem as etapas de protótipo e ajuste, gerando produtos de alta qualidade com grande economia de recursos.

## Capítulo 3

### 3. TEORIA DA PLASTICIDADE

#### 3.1 INTRODUÇÃO

O objetivo da teoria da plasticidade é prover a descrição teórica das relações entre tensão e deformação para materiais que exibem uma resposta elasto-plástica. O comportamento plástico é caracterizado por uma deformação irreversível que ocorre a partir de certos níveis de tensão (Bathe, 1982).

A teoria da plasticidade estuda o comportamento dos materiais a níveis de deformação em que já não se verifica a lei de HOOKE, representando uma necessária extensão da teoria da elasticidade. A formulação matemática da teoria da plasticidade tem que contemplar os diversos aspectos da deformação plástica como: sua irreversibilidade, o modo de aplicação das solicitações mecânicas, o comportamento real dos materiais como a anisotropia plástica, o fenômeno do encruamento, a histerese elástica e o efeito Bauschinger, todos estes aspectos impõem uma considerável complexidade matemática na sua descrição. O desenvolvimento contínuo dos computadores e sua difusão aliada à aplicação do método dos elementos finitos têm se mostrado uma ferramenta poderosa na solução virtual dos problemas que envolvem deformações plásticas.

#### 3.2 CURVAS DE ESCOAMENTO

A Figura 3.1 mostra uma curva tensão-deformação ( $S \times e$ ) típica do ensaio de tração de um material dúctil. Nesta curva podemos observar que as tensões  $S$  crescem proporcionalmente em relação à deformação e até atingir a tensão  $S_0$ , a inclinação desta reta é que define o módulo de elasticidade ( $E$ ) do material.

Além de  $S_0$  o material começa a escoar e as deformações se tornam irreversíveis (plásticas). A maioria dos metais encrua na região de deformações plásticas, assim para se atingir maiores deformações o valor de  $S$  deve aumentar continuamente, porém sem apresentar uma proporcionalidade constante com a deformação ocorrida e, até que

a tensão  $\sigma$  atinge um valor máximo onde o material falha, iniciando um estrangulamento (estricção) que levará a sua completa ruptura.

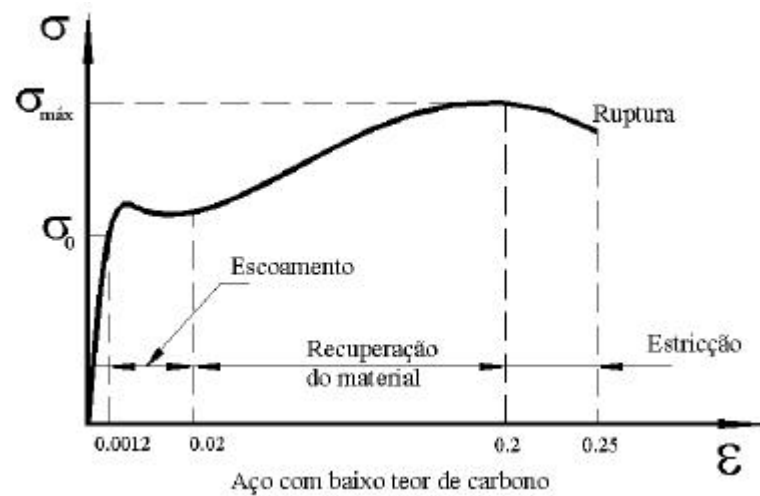


Figura 3.1 - Diagrama tensão - deformação ( $\sigma \times \epsilon$ ).

Podemos ver nos diagramas da Figura 3.2 que se um metal é deformado a tração até o ponto A, quando a carga é retirada, a deformação total decrescerá imediatamente de um valor  $s/e$ , de  $e_1$  para  $e_2$ . O decréscimo de deformações  $e_1 - e_2$  é a deformação elástica recuperável, da deformação restante uma pequena parte, dependendo do material, da temperatura e do tempo, desaparecerá  $e_2 - e_3$ , isto é conhecido como comportamento anelástico (Figura 3.2a).

Ao se recarregar o material (Figura 3.2b), à medida que a tensão se aproxima do valor original no qual ocorreu o descarregamento, a curva irá dobrar-se até se tornar uma continuação daquela que seria obtida caso não houvesse ocorrido o descarregamento.

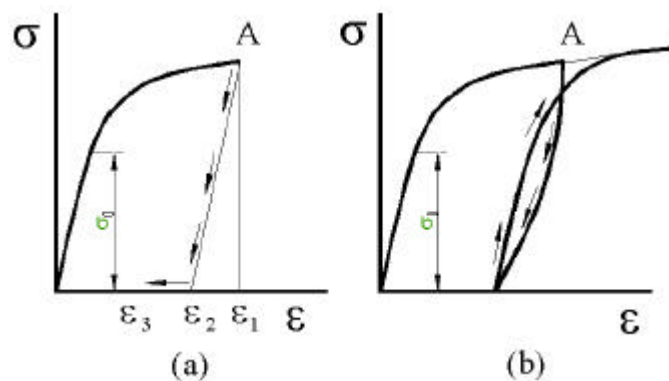


Figura 3.2 - Curva  $\sigma \times \epsilon$  - carga / descarga / recarga.

Ao ensaiarmos determinados metais a compressão simples podemos obter uma curva  $\sigma - \epsilon$  e semelhante à obtida em um ensaio de tração simples (Figura 3.1), entretanto se o mesmo material for deformado a tração além do limite de escoamento como no diagrama da Figura 3.3, plasticamente e depois descarregado até que  $\sigma_0 = 0$ , e recarregado a compressão o limite de escoamento será inferior ao de tração  $\sigma_0 < \sigma_1$ , a curva  $\sigma - \epsilon$  em compressão irá diferir consideravelmente da obtida para o mesmo metal sem pré-carga, este fenômeno é conhecido como efeito Bauschinger (Chen e Han, 1988).

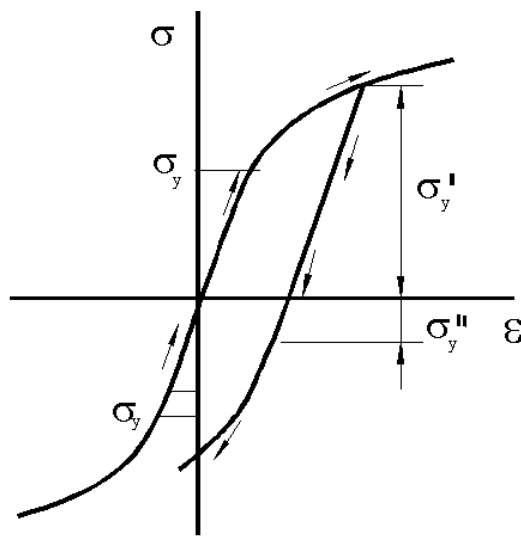


Figura 3.3 – Efeito Bauschinger.

Como se pode ver, a deformação de um metal não é somente função da tensão atingida, mas depende também do histórico prévio e da trajetória do carregamento aplicado no material.

### 3.3. O COMPORTAMENTO UNIAXIAL NA PLASTICIDADE

#### 3.3.1 Curvas simplificadas $\sigma - \epsilon$ para tensões uniaxiais

A curva  $\sigma - \epsilon$  verdadeira, fornece a tensão necessária para causar o escoamento a qualquer nível de deformações, por isto frequentemente são chamadas de curvas de escoamento. Para simplificar o tratamento matemático, sem se desviar da realidade física, são empregadas curvas de escoamento idealizadas.

### 3.3.2 Curva linear elástica com encruamento exponencial

Na Figura 3.4 temos o modelo da curva linear elástica com encruamento exponencial, definida pelas equações 3.1 e 3.2, onde  $\mathbf{k}$  e  $\mathbf{n}$  são duas constantes características do material e são determinadas experimentalmente para se obter a curva, e que representa a deformação total, por um ponto na curva podemos obter a tensão de escoamento e a correspondente deformação elástica.

$$\mathbf{s} = E\mathbf{e} \quad \text{para} \quad \mathbf{s} \leq \mathbf{s}_0 \quad (3.1)$$

$$\mathbf{s} = k\mathbf{e}^n \quad \text{para} \quad \mathbf{s} > \mathbf{s}_0 \quad (3.2)$$

Esta expressão de força só pode ser usada no campo de deformações com encruamento.

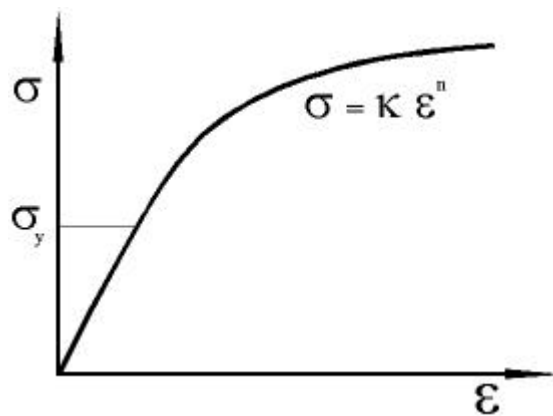


Figura 3.4 - Curva linear elástica com encruamento exponencial.

### 3.2.3 Módulo plástico $E_p$ e módulo tangente $E_t$

Como a resposta de um material a uma tensão de deformação elasto-plástica não é linear, assumimos que o incremento de deformação,  $d\mathbf{e}$ , consiste de duas partes: o incremento elástico  $d\mathbf{e}^e$  e o incremento de deformação plástico  $d\mathbf{e}^p$ , como pode ser visto na Figura 3.5.

$$d\mathbf{e} = d\mathbf{e}^e + d\mathbf{e}^p \quad (3.3)$$

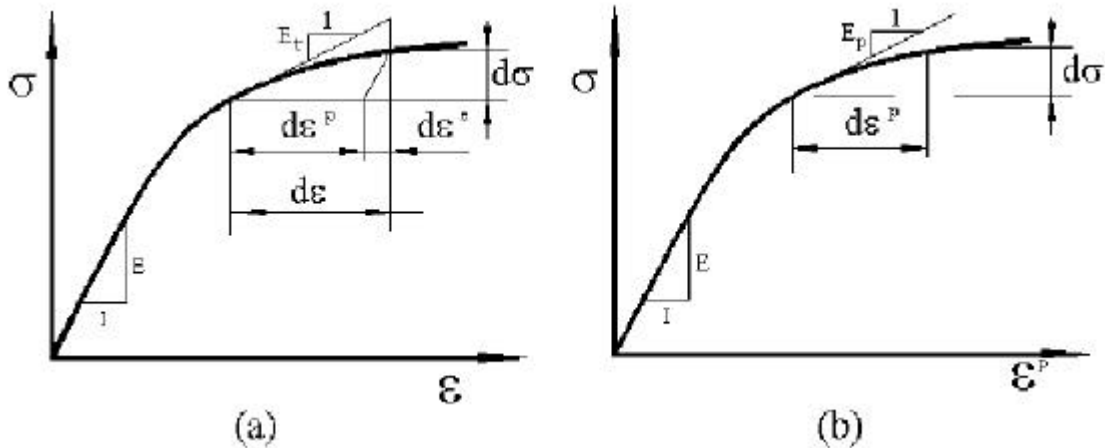


Figura 3.5 – Módulo tangente e módulo plástico.

O incremento de tensão  $d\sigma$  é relacionado ao incremento de deformação plástica por:

$$d\sigma = E_t de \quad (3.4)$$

Onde:  $E_t$  = Módulo tangente que muda durante a deformação plástica.

Separando a deformação plástica  $e^p$  da deformação total  $e$  então o incremento de tensão plástica  $d\sigma^p$  e o incremento de tensão  $d\sigma$ , na Figura 3.5, são relacionados por:

$$d\sigma = E_p de^p \quad (3.5)$$

Onde:  $E_p$  = Módulo plástico.

Para o incremento de deformação elástica  $de^e$ , usa-se a relação:

$$d\sigma = E de^e \quad (3.6)$$

Substituindo  $de^e$  na equação 3.4 e  $de^p$  na equação 3.5 e  $de^e$  na equação 3.6 na equação 3.2 temos:

$$\frac{1}{E_t} = \frac{1}{E} + \frac{1}{E_p} \quad (3.7)$$



### 3.4 CRITÉRIOS DE ESCOAMENTO

Segundo Bathe, 1986, o comportamento elasto-plástico dos materiais pode ser descrito usando elementos finitos na teoria de fluxo e a construção da matriz tensão x deformação será baseada em três condições que se completam:

1. A condição de escoamento a qual especifica o estado de tensões multiaxiais correspondendo ao início do fluxo plástico;
2. A regra de fluxo, a qual relata os incrementos de deformação plástica para as tensões correntes e os incrementos de tensão subsequente ao escoamento;
3. A regra de encruamento que especifica como a condição de escoamento é modificada durante o fluxo plástico.

#### 3.4.1 Condições de escoamento

##### 3.4.1.1 Tensões octaédricas

A tensão de cisalhamento octaédrica ( $\mathbf{t}_{oct}$ ) ou energia de distorção é uma variável chave para causar o escoamento dos materiais que estão à pressão independente (hidrostática) (Chen e Han, 1988). A tensão de cisalhamento octaédrica é o maior valor de tensão normal que ocorre sobre um plano octaédrico e apresenta a mesma intensidade em todos os planos do octaedro.

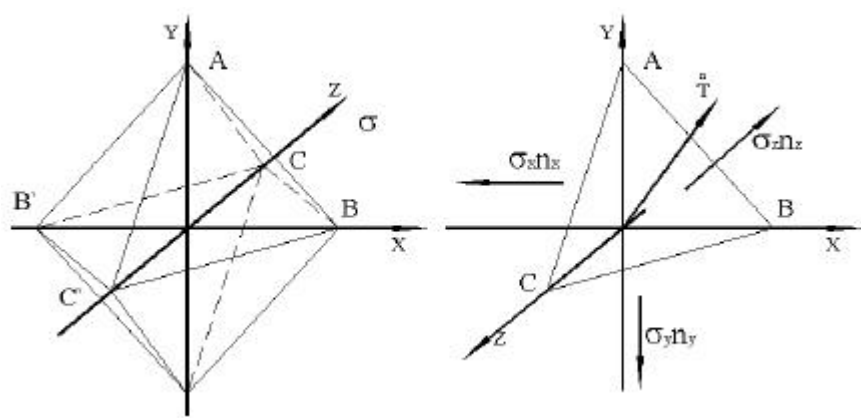


Figura 3.6 – Planos octaédricos.

Considerando o plano octaedral, onde  $AO=OC=OB=AO'=OB'=OC'$  da Figura 3.6, na qual os eixos  $x, y, z$  representam as direções principais de tensões o tensor de tensões  $\mathbf{s}_{ij}$  é escrito como:

$$\mathbf{s}_{ij} = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{s}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{s}_3 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Podemos escrever:

$$\cos^2 \mathbf{q}_x + \cos^2 \mathbf{q}_y + \cos^2 \mathbf{q}_z = 1 \quad \therefore 3\cos^2 \mathbf{q} = 1/3 \quad (3.9)$$

A componente normal do tensor de tensões no ponto  $o$  associado com qualquer direção  $n$ , pode ser obtida da fórmula de Cauchy:

$$\mathbf{s}_n = \mathbf{s}_{ij} n_i n_j \quad (3.10)$$

Ou:

$$\mathbf{s}_n = \mathbf{s}_1 n_i n_j + \mathbf{s}_2 n_i n_j + \mathbf{s}_3 n_i n_j \quad (3.11)$$

A tensão normal na face do octaedro será:

$$\mathbf{s}_{oct} = \mathbf{s}_1 n_1^2 + \mathbf{s}_2 n_2^2 + \mathbf{s}_3 n_3^2 = \frac{1}{3} (\mathbf{s}_1 + \mathbf{s}_2 + \mathbf{s}_3) = \frac{1}{3} I_1 \quad (3.12)$$

A intensidade de  $\mathbf{s}_{oct}$  é a mesma em todas as oito faces. A tensão de cisalhamento na face do tetraedro  $\mathbf{t}_{oct}$  pode ser obtida da equação:

$$\mathbf{t}_{oct}^2 = (\overset{n}{\mathbf{T}}_{oct})^2 - \mathbf{s}_{oct}^2 \quad (3.13)$$

Calculando  $\mathbf{t}_{oct}$ , temos:

$$(\overset{n}{\mathbf{T}})^2 = \mathbf{s}_1^2 n_1^2 + \mathbf{s}_2^2 n_2^2 + \mathbf{s}_3^2 n_3^2 = \frac{1}{3^2} (\mathbf{s}_1 + \mathbf{s}_2 + \mathbf{s}_3) \quad (3.14)$$

Entretanto:

$$\begin{aligned} \mathbf{t}_{oct}^2 &= \frac{1}{3} (\mathbf{s}_1^2 + \mathbf{s}_2^2 + \mathbf{s}_3^2) + \frac{1}{3^2} (\mathbf{s}_1 + \mathbf{s}_2 + \mathbf{s}_3) \\ &= \frac{4}{9} \left[ (\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2)^2 + (\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_3)^2 + (\mathbf{s}_3 - \mathbf{s}_1)^2 \right] \end{aligned} \quad (3.15)$$

Recalculando os resultados obtemos para a tensão principal de cisalhamento,  $t_{oct}$ , pode ser expressa pôr:

$$t_{oct}^2 = \frac{4}{9}(t_{12}^2 + t_{23}^2 + t_{31}^2) \quad (3.16)$$

Onde:  $t_{12}$ ,  $t_{23}$  e  $t_{31}$  são as principais tensões de cisalhamento, entretanto:

$$t_{oct} = \frac{2}{3}(t_{12}^2 + t_{23}^2 + t_{31}^2)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{2}{3}} j_2 \quad (3.17)$$

### 3.4.1.2 O critério de Von Mises

Os critérios de escoamento são relações essencialmente empíricas, que procuram associar o escoamento a uma tensão desvio. Para materiais isotrópicos o critério de escoamento independe da escolha dos eixos, isto é, deve ser uma função invariante.

Portanto o critério de escoamento deve ser uma função dos invariantes da tensão desvio (Dieter, 1981). O critério de Von Mises, datado de 1913 é baseado no princípio de que o escoamento se inicia quando as tensões de cisalhamento octaédricas atingem um valor crítico “ $k$ ”, da equação 3.13 temos:

$$t_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3}} j_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} k \quad (3.18)$$

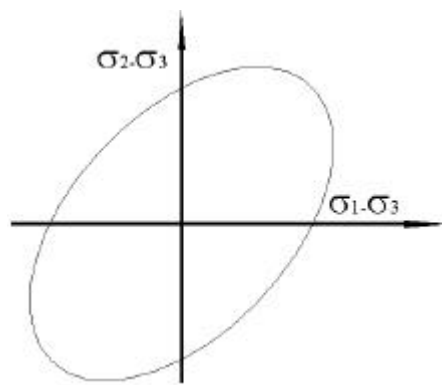


Figura 3.7 – Elipse de Von Mises.

Reduzindo a forma simples, temos a função de escoamento:

$$f(J_2) = J_2 - k^2 = 0 \quad (3.19)$$

Ou, escrita em termos de tensões principais:

$$(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2)^2 + (\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_3)^2 + (\mathbf{s}_3 - \mathbf{s}_1)^2 = 6k^2 \quad (3.20)$$

Onde  $k$  é a tensão de escoamento em cisalhamento puro. O escoamento irá ocorrer em uma tensão uniaxial testada quando:

$$\mathbf{s}_1 = \mathbf{s}_0 ; \mathbf{s}_2 = \mathbf{s}_3 = 0 \quad (3.21)$$

Na substituição destes valores na equação 3.19, encontramos:

$$k = \frac{\mathbf{s}_0}{\sqrt{3}} \quad (3.22)$$

O critério de Von Mises para o estado biaxial de tensões é representado pela intersecção de um cilindro com a coordenada do plano  $\mathbf{s}_3 = 0$ , e

$$\mathbf{s}_1^2 + \mathbf{s}_2^2 - \mathbf{s}_1\mathbf{s}_2 = \mathbf{s}_0^2 \quad (3.23)$$

que dá uma elipse mostrada na Figura 3.7 a intersecção da superfície de Von Mises no espaço geral de tensões com o plano  $\mathbf{s}_x - \mathbf{t}_{xy}$  é também uma elipse, dada pôr :

$$\mathbf{s}_x^2 + 3\mathbf{t}_{xy}^2 = \mathbf{s}_0^2 \quad (3.24)$$

### 3.4.2 Regra de fluxo associada com a função de Von Mises

A regra de fluxo determina a direção do incremento da deformação plástica  $d\mathbf{e}_{ij}^p$  no espaço de deformações, tomando a função de escoamento, equação 3.17, de Von Mises, temos:

$$d\mathbf{e}_{ij}^p = d\mathbf{l} \frac{\mathbf{r}f}{\mathbf{r}\mathbf{s}_{ij}} = d\mathbf{l}S_{ij} \quad (3.25)$$

Onde  $s_{ij}$  é o tensor de desvio de tensão e  $d\mathbf{l}$  é um fator de proporcionalidade com valor :  $d\mathbf{l} = 0$ , quando  $J_2 < k_2$  ou  $J_2 = K_2$ , mas  $J_2 < 0$

$d\mathbf{l} > 0$ , quando  $J_2 = k_2$  e  $dJ_2 = 0$

### 3.4.2.1 Superfícies de carregamento e regras de encruamento

Superfície de carregamento é a superfície subsequente ao escoamento de um metal deformado elasto plasticamente, a qual define o limite da região elástica atual. Se um ponto de tensão encontra-se nesta região, não há deformação plástica. De outro modo, se o estado de tensões no limite da região elástica tende a se mover para fora da superfície de carregamento corrente, deformações plásticas adicionais irão ocorrer, acompanhadas por uma mudança na configuração da superfície de carregamento atual.

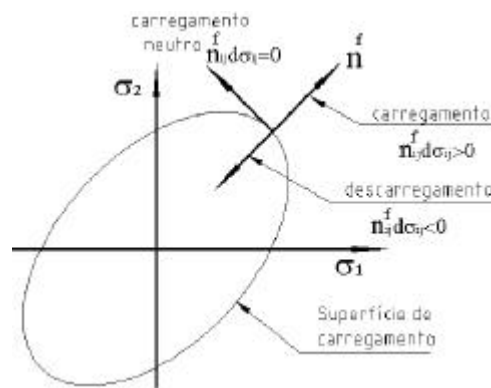


Figura 3.12 - Superfícies de carregamento.

Assim a superfície de carregamento pode geralmente ser expressa como uma função de estado corrente de tensões e algumas variáveis como:

$$f(\mathbf{s}_{ij}; \mathbf{e}_{ij}^p; \mathbf{k}) = 0 \quad (3.26)$$

A regra de encruamento é a resposta pós-escoamento do material, é a regra para a evolução da superfície subsequente ao escoamento ou ao carregamento superficial.

Pode-se definir que o carregamento ou fluxo plástico ocorre somente quando o ponto de tensão está na superfície de carregamento e as cargas adicionais os vetores incrementais de tensões  $d\mathbf{s}_{ij}$  são direcionado para fora da região elástica corrente, Figura 3.12.

### 3.4.3 Regras de encruamento

Quando uma superfície de escoamento inicial é conhecida, é a regra de encruamento que vai definir sua modificação durante o processo de fluxo plástico.

- Forma geral da função de carregamento

$$f(\mathbf{s}_{ij}; \mathbf{e}_{ij}^p; k) = F(\mathbf{s}_{ij}, \mathbf{e}_{ij}^p) - k^2(\mathbf{e}_p) = 0 \quad (3.27)$$

Onde:  $k^2$  = Tamanho da superfície de escoamento;

$F(\mathbf{s}_{ij}; \mathbf{e}_{ij}^p)$  = Define a forma da superfície;

$k^2$  = Expresso como função da  $\epsilon_p$  (deformação efetiva).

Devido ao encruamento uma anisotropia é introduzida em um material inicialmente isotrópico, mas não é suficiente para representar uma anisotropia na superfície de escoamento no espaço principal de tensões (Chen e Han, 1988). A superfície de escoamento é descrita com nove graus de liberdade, mas os gráficos são apresentados em duas dimensões, como uma idéia básica a ser estendida ao espaço tridimensional.

#### 3.3.4.1 Encruamento isotrópico

Nesta regra se assume que a superfície inicial de escoamento expande uniformemente sem distorção e translação enquanto o fluxo plástico ocorre (Figura 3.13). A equação para a superfície subsequente ao carregamento, para o Modelo isotrópico de Von Mises é:

$$f(\mathbf{s}_{ij}, k) = \frac{2}{3} S_{ij} \cdot S_{ij} - \mathbf{s}_e^2(\mathbf{e}_p) = 0 \quad (3.28)$$

Onde:  $\mathbf{s}_e^2(\mathbf{e}_p)$  – deformação efetiva;

$\mathbf{e}_p$  – Obtida de uma curva experimental  $\sigma \times \epsilon$ .

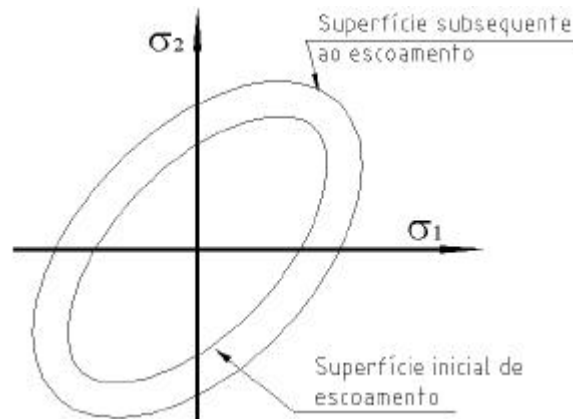


Figura 3.13 – Expansão da elipse – encruamento isotrópico.

### 3.3.4.2 Encruamento cinemático

A regra de encruamento cinemático assume que, durante a deformação plástica a superfície de carregamento translada como um corpo rígido no espaço de tensões, mantendo o tamanho a forma e a orientação originais. Esta regra devido a Prager (1955-1956) provê um meio simples de se levar em conta o efeito Bauschinger, e tem forma geral:

$$f(\mathbf{s}_{ij}, \mathbf{e}_{ij}^p) = F(\mathbf{s}_{ij} - \mathbf{a}_{ij}) - k^2 = 0 \quad (3.29)$$

Onde:

$\mathbf{a}_{ij}$  = São as coordenadas do centro da superfície de carregamento;

$K$  = Constante.

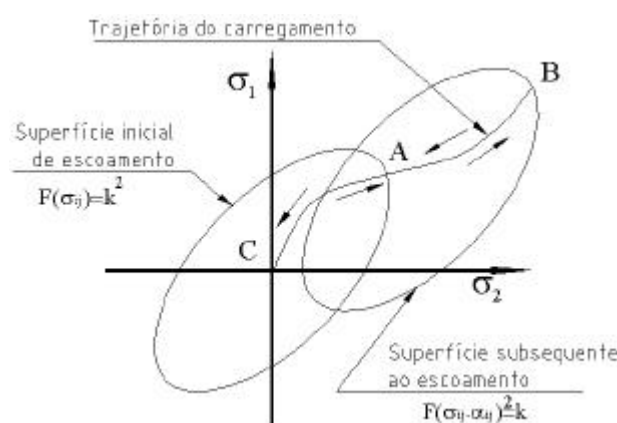


Figura 3.14 - Translação da Elipse - encruamento cinemático.

## Capítulo 4

### 4. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

#### 4.1 INTRODUÇÃO

A solução analítica de problemas de engenharia é baseada na aplicação clássica das equações diferenciais, que descrevem o equilíbrio da estrutura, gerando expressões de solução exata mas aplicáveis a sistemas de geometria simples. Para estruturas de formas complexas a solução analítica frequentemente se torna impossível, e para a solução do problema são adotadas grandes simplificações resultando em cálculos pouco apurados (Alves, 2000).

Nos anos 40 engenheiros projetistas de estruturas aeronáuticas, enfrentando este tipo de problema, desenvolveram métodos de aproximação para analisar estruturas complexas, que pudessem ser aplicados em caráter geral e dentro de precisão aceitável aos problemas de engenharia. Desde então muitos pesquisadores tem dado significantes contribuições para o desenvolvimento do método dos elementos finitos, que só teve aplicação efetiva com o desenvolvimento dos computadores eletrônicos a partir de 1965 (Grandin,1986).

Nos últimos anos o aumento da capacidade e velocidade dos computadores e sua difusão em larga escala no mundo, tornou possível o desenvolvimento de inúmeros programas baseados no método dos elementos finitos com diferentes algoritmos, ampliando o campo de aplicação do método, da análise estrutural que o originou aos mais diversos problemas físicos.

O método dos elementos finitos é um método aproximado de cálculo de sistemas contínuos, no qual o corpo contínuo é subdividido (discretizado) em um número finito de partes (elementos) conectados entre si por intermédio de pontos discretos, chamados nós. Os elementos resultantes da discretização, podem ser representados por funções mais simples que a requerida para o sistema inteiro e as equações produzidas podem ser resolvidas por procedimentos computacionais padrões.

O diagrama de aplicação do método é apresentado na Figura. 4.1.



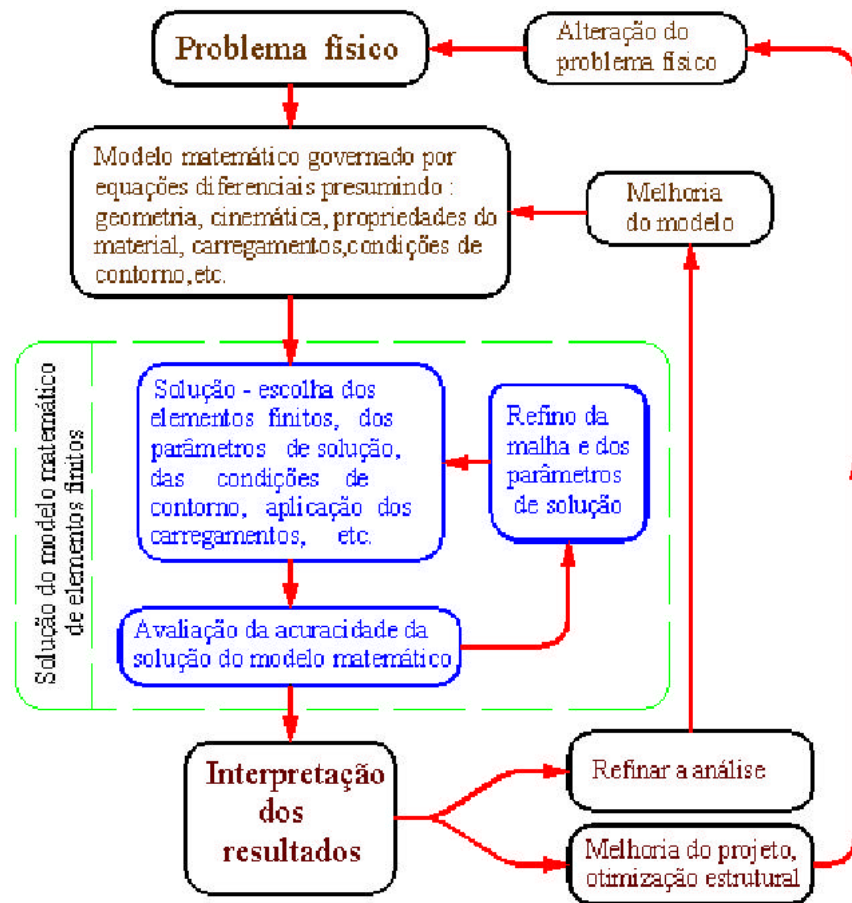


Figura 4.1 – O processo de análise por elementos finitos.

#### 4.1.2 Elementos empregados

Na estampagem as falhas tendem a ocorrer preferencialmente na chapa do que na ferramenta. Durante a estampagem o comportamento à deformação do material da chapa é afetado pela anisotropia, que resulta do processo de laminação da chapa, e também a ocorrências de instabilidades macroscópicas que levam a formação de enrugamentos ou à estrição. Por isto a escolha do elemento para o modelamento da chapa requer atenção especial. Todo programa de simulação oferece uma biblioteca de elementos, para aplicações em simulação 2D ou para 3D, com recomendações de aplicação específicas. A alta taxa entre a superfície para o volume da peça trabalhada na conformação de chapas torna oportuno de uso de elementos estruturais com formato similar a uma chapa. Quatro tipos de elementos são aplicáveis para análise da estampagem de chapas, os elementos do tipo membrana, os do tipo placa, os do tipo casca com ou sem espessura e os do tipo contínuo.

## 4.2 PRINCIPAIS TIPOS DE PROGRAMAS DE ELEMENTOS FINITOS

Os programas desenvolvidos especialmente para a simulação de estampagem de chapas, baseados no método dos elementos finitos apresentam características distintas de acordo com o algoritmo usado na sua formulação, três dos principais são descritos a seguir.

### 4.2.1 Método de análise inversa (I.A.)

É um método de elementos finitos simplificado, que a partir da forma final da peça, aplica uma malha de elementos finitos, fazendo uma estimativa inicial a através da simples projeção dos nós no plano horizontal da chapa plana e através de um algoritmo de Newton-Raphson modifica a posição destes nós de modo a satisfazer o equilíbrio no final da peça, com isso é possível estimar as tensões e deformações na peça final e formato inicial do blank.

Duas condições principais são adotadas : a primeira é assumir-se carregamento proporcional o que leva a evitar a integração dos incrementos da plasticidade, a segunda é o uso das forças de atrito instantâneas simplificadas das condições de contato entre a ferramenta e a chapa. Isto conduz a um método direto que independe do histórico de deformações (Guo, 2000).

Para atingir o equilíbrio na forma final da peça são aplicadas um conjunto de equações não lineares com somente dois graus de liberdade por nó, estas equações podem ser resolvidas por diferentes técnicas como o aproximador estático implícito de Newton-Raphson, ou o algoritmo de dinâmica explícita.

É um método rápido, pois devido as simplificações adotadas necessita de pouca memória para ser calculado, porém dificuldades de convergência podem ser observadas.

Segue a formulação do método de análise inversa (Guo, 2000) dada pôr:

Usando uma condição generalizada de Kirchhoff, a posição final e inicial de um ponto material que pode ser expressa em relação a um ponto "p" no meio da superfície, Figura 4.2:

$$x_q^0 = x_p^0 + z^0 n^0 = x_p - u_p + z^0 n^0 \quad (4.1)$$

$$x_q = z_p + zn \quad (4.2)$$

onde :  $\mathbf{u}_p$  é o vetor de deslocamento do ponto  $\mathbf{p}$ ;

$\mathbf{n}^0$  e  $n$  são as normais do meio da superfície até  $\mathbf{p}^0$  ;

$\mathbf{p}, \mathbf{z}^0$  e  $\mathbf{z}$  são as coordenadas entre direções inicial e final da espessura.

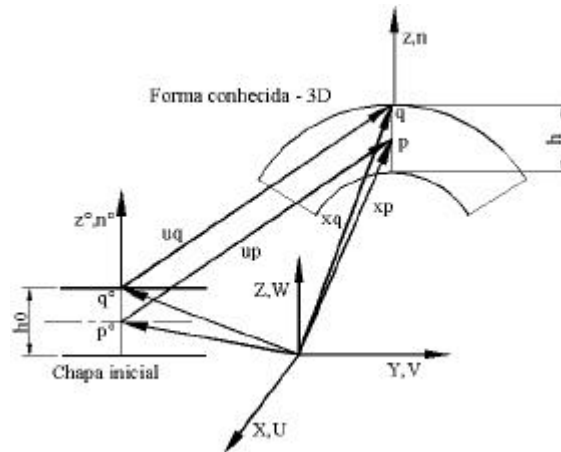


Figura 4.2 – Cinemática de uma casca fina em estampagem profunda.

Fazendo  $\mathbf{x} = (\mathbf{z} \ \mathbf{y} \ \mathbf{z})$  como coordenadas curvilíneas ortogonais locais. O tensor no ponto  $\mathbf{q}^0$  e  $\mathbf{q}$  com respeito ao ponto  $\mathbf{p}$  são dados por :

$$dx_q^0 = [F_0]^{-1} dx, [F_0]^{-1} = \begin{bmatrix} x_{p,x} - u_{p,x}; x_{p,y} - u_{p,y}; n^0 / I_3 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$dx_q = [F_z] dx, [F_z] = \begin{bmatrix} x_{p,x} + zn_{,x}; xn_{p,y} + zn_{p,y}; n \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

onde  $I_3 = z / z^0 = h / h^0$  é a espessura do trecho (na chapa é constante).

Então o tensor gradiente de deformação inversa em  $\mathbf{q}$  é obtido das equações 4.3 e 4.4 como :

$$dx_q^0 = [F]^{-1} dz_q, [F]^{-1} = [F_0]^{-1} [F_z]^{-1} \quad (4.5)$$

Os tensores  $[F_0]^{-1}$  e  $[F_z]^{-1}$  são a membrana e a contribuição de dobra, respectivamente. Expressões simples dos tensores  $[F_0]^{-1}$  e  $[F_z]^{-1}$  são obtidas no sistema de coordenadas locais definido por :

$$t_1 = x_{p,x}, t_2 = x_{p,y}, n = t_1 \times t_2 / \|t_1 \times t_2\| \quad (4.6)$$

No modelo da membrana,  $[F_z]^{-1}$  reduz a uma matriz ortogonal. O inverso do tensor esquerdo de Cauchy-Green entre  $q$  e  $q^0$  pode ser definido por :

$$[B]^{-1} = [F]^{-T} [F]^{-1} \quad (4.7)$$

O tensor  $[B]^{-1}$  pode ser obtido sob a condição de espessura constante sem ligação no plano do trecho e na espessura do trecho. O  $[B]^{-1}$  dá autovalores dos dois planos principais dos trechos  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  e sua matriz de transformação da direção  $[M]$ . Então a espessura do trecho é calculada por condição de incompressibilidade. Finalmente as deformações logarítmicas são obtidas por :

$$[e] = [M] [\ln I] [M]^T \quad (4.8)$$

#### 4.2.2 Método dinâmico explícito

A equação de equilíbrio dinâmico é a base desta formulação, o que dá uma grande vantagem já que não é necessário construir e calcular a matriz de rigidez, ou controlar a convergência o que proporciona mais estabilidade, obtendo assim soluções mais rápidas, pois precisa menos memória para processar do que o método estático implícito.

A predição de enrugamentos na chapa é obtida a partir de imprecisões numéricas que ocorrem quando estes são iniciados, a região da ocorrência não é determinada acuradamente mas o número de rugas e sua amplitude são determinados com precisão.

Neste método para se diminuir o número de incrementos necessários a simulação, são aplicados truques numéricos que aumentam a velocidade do punção e a

densidade do material, mas isto as vezes pode levar a resultados não realísticos, outra desvantagem é que a tensão local e o retorno elástico não são seguramente calculados.

Segundo Tekkaya, 2000, partindo do princípio do trabalho virtual a formulação do método dinâmico explícito é :

$$\int_V T_{ij} \ddot{u}_{ij} dv = \int t_i \dot{u}_i dA \quad (4.9)$$

A equação do trabalho virtual pode ser modificada para :

$$\int_V T_{ij} \ddot{u}_{ij} dv = \int t_i \dot{u}_i dA - \int_V \rho \ddot{u}_i \dot{u}_i dV \quad (4.10)$$

onde  $\rho$  é a densidade e  $\ddot{u}$  a aceleração das partículas do material. Discretizando esta equação se produz :

$$[M] \ddot{u}^t = \{F^t\} - \{I^t\} \quad (4.11)$$

Nesta equação  $[M]$  é a matriz de massa,  $\{F^t\}$  a força externa e  $\{I^t\}$  o vetor de força interna dado em um tempo  $t$ . Então um esquema de diferença central para marcação de tempo é utilizado na forma de :

$$\mathbf{m}^{t+\Delta t} = \mathbf{m}^{t+\Delta t} \mathbf{m}^{t+\Delta t/2} \quad (4.12)$$

com

$$\dot{\mathbf{m}}^{t+\Delta t/2} = \dot{\mathbf{m}}^{t+\Delta t/2} + \frac{\Delta y^{t+\Delta t} + \Delta t^t}{2} \quad (4.13)$$

A equação 4.13 pode ser modificada por uma mudança de termos de modo a ser compensada em possíveis manipulações de densidade na estrutura :

$$[M] \ddot{u}^t + [C] \dot{u}^t = \{F^t\} - \{I^t\} \quad (4.14)$$

A diferença central do algoritmo é condicionalmente estável. Entretanto, o passo de tempo tem que ser menor que :

$$\Delta t \leq \frac{L}{C_d} \approx \frac{2}{\mathbf{w}} \approx \frac{L}{\sqrt{E/\mathbf{r}}} \quad (4.15)$$

onde  $L$  é o comprimento característico do elemento,  $C_d$  a velocidade do som no material da peça trabalhada,  $\omega$  é o autovalor do sistema e  $E$  o módulo de Young do material.

#### 4.2.3 Método estático implícito

No processo de estampagem o trabalho executado pelas forças aplicadas no punção pode ser desprezado, pois apresenta baixa intensidade em relação a energia de deformação plástica, então uma condição de equilíbrio estático pode ser assumida na simulação.

No esquema de integração de tempo estático implícito a condição de equilíbrio é satisfeita a cada passo de integração de tempo, permitindo a solução estática completa do problema de deformação com controle de convergência. Os requisitos de memória e velocidade necessários ao processamento da simulação são altos, dificuldades de convergência podem ocorrer devido ao grande número de pontos de contato (nós) gerados e a contínua mudança do contato a cada interação.

Atualmente há uma tendência na aplicação de métodos de dinâmica explícita, o que é demonstrado pelo aumento do número de programas comerciais baseados neste princípio (Tekkaya, 2000). Os programas estáticos implícitos podem ainda ser usados em combinação com os de dinâmica explícita para a verificação do retorno elástico e tensões residuais completando o processo de simulação de estampagem. O programa ANSYS 6.0® aplicado neste trabalho tem esta formulação básica, seu algoritmo será apresentado a seguir neste capítulo.

### 4.3 FORMULAÇÃO DO ELEMENTO – ANSYS 6.0

#### 4.3.1 Grandes deformações

Quando as deformações em um material ultrapassam o limite convencional de escoamento do material, a mudança de geometria devido à esta deformação não pode ser desprezada. Análises que incluem estes efeitos são chamadas de análises de grandes deformações, ou deformações finitas.

A teoria de cálculo das grandes deformações pode ser definida como a medida dos movimentos e deformações e suas relações matemáticas. As cargas aplicadas agindo no corpo o fazem se mover de uma posição para outra. Este movimento pode ser definido pelo estudo do vetor posição na configuração não deformado para a deformado.

Estes vetores são representados por  $\{x\}$  e  $\{X\}$  respectivamente, então o movimento (deslocamento) vetor  $\{u\}$  é calculado por :

$$\{u\} = \{x\} - \{X\} \quad (4.16)$$

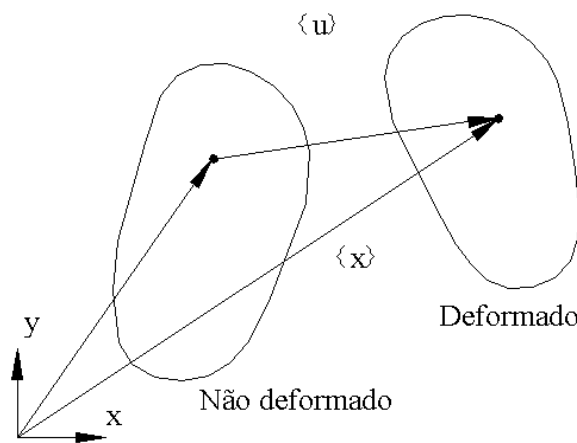


Figura 4.3 - Vetores posição e movimento de um corpo deformado.

O gradiente de deformação é definido como :

$$[F] = \partial\{x\} / \partial\{X\} \quad (4.17)$$

que pode ser escrito em termos do deslocamento do ponto via a equação 4.16, como :

$$[F] = [I] + \frac{\partial\{u\}}{\partial\{X\}} \quad (4.18)$$

onde  $[I]$  é a matriz identidade

A informação contida no gradiente de deformação  $[F]$  inclui a mudança de volume, a mudança da rotação e da forma do corpo deformado, é dada pôr:

$$\det[F] = \frac{dV}{dV_0} \quad (4.19)$$

onde  $V_0$  é o volume inicial e  $V$  é o volume atual.

O gradiente de deformação pode ser separado em uma rotação e uma mudança de forma usando o teorema de alta decomposição polar :

$$[F] = [R] [U] \quad (4.20)$$

onde  $[R]$  = matriz rotação ( $[R]^T [R] = [I]$ )

$[u]$  = matriz de estiramento ( mudança de forma ).

O teorema da decomposição polar, equação 3.15, extrai a rotação  $[R]$  que representa a média da rotação do material no ponto. Linhas do material inicialmente ortogonais não serão, em geral, depois da deformação (devido ao cisalhamento) veja Figura 4.4. A decomposição polar desta deformação, entretanto, irá indicar que eles irão manter-se ortogonais (linhas  $x'$ -  $y'$  na Figura 4.4) por esta razão, o comportamento não isotrópico deve ser usado com cuidado para grandes deformações, especialmente se elas ocorrerem por cisalhamento.

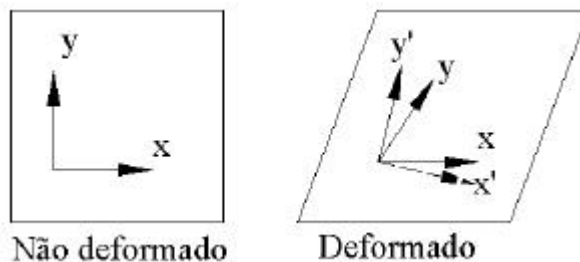


Figura 4.4 - Decomposição polar da deformação de cisalhamento.

Uma vez que a matriz de estiramento é conhecida , uma medida ou deformação logarítmica de Hencky é definida como:

$$[\epsilon] = \ln [U] \quad (4.21)$$

onde  $[\epsilon]$  está em forma de tensor (matriz), a equação 4.21 é determinada através da decomposição de  $[U]$ :



$$[\boldsymbol{\varepsilon}] = \sum_{i=1}^3 \ln(\mathbf{I}_i) \{e_i\} \{e_i\}^t \quad (4.22)$$

onde  $\lambda_i$  = são os autovalores de [U] (estiramento principal);

$\{e_i\}$  = autovalores de [U] (direções principais).

### 4.3.2 Implementação

Computacionalmente, a determinação da equação 4.21 é feita por um ou dois métodos de aproximação usando um procedimento de solução incremental :

$$[\mathbf{e}] = \int d[\mathbf{e}] \approx \sum [\Delta \mathbf{e}_n] \quad (4.23)$$

com

$$[\Delta \mathbf{e}_n] = l_n [\Delta U_n] \quad (4.24)$$

onde  $[\Delta U_n]$  é incremento da matriz do estiramento computada do gradiente de deformação incremental :

$$[\Delta F_n] = [\Delta R_n] [\Delta U_n] \quad (4.25)$$

onde :  $[\Delta F_n]$  é :

$$[\Delta F_n] = [F_n] [F_{n-1}]^{-1} \quad (4.26)$$

$[F_n]$  é o gradiente de deformação no passo de tempo corrente e  $[F_{n-1}]$  é no passo de tempo anterior. Dos dois métodos que podem ser empregados para avaliar a equação 4.24, o indicado para elementos sólidos como o VISCO106, 107 e 108 é o método proposto por Weber, et al, que usa a idéia da equação :

$$[\Delta \mathbf{e}_n] = \sum_{i=1}^3 \ln(\mathbf{I}_i) \{e_i\} \{e_i\}^T \quad ; \quad 4.27$$

onde  $I_i$  e  $\{e_i\}$  são os autovalores e os auto vetores para o incremento "i" dos incrementos principais de estiramento da matriz  $[\Delta Un]$ .

### 4.3.3 Formulação do elemento

A matriz do elemento e os vetores de carregamento são derivados usando uma formulação de *Lagrange* de atualização. Isto produz equações da forma :

$$[K_i] \Delta u_i = \{F^{app}\} - \{F_i^{nr}\} \quad (4.28)$$

onde a matriz tangente  $[K_i]$  tem a forma :

$$[K_i] = [K_i] + [S_i] \quad (4.29)$$

e  $[K_i]$  é matriz de rigidez usual:

$$[K_i] = \int [B_i]^T [D_i] [B_i] d(vol) \quad (4.30)$$

onde:

- $[B_i]$  é a matriz de deslocamentos da deformação em termos da geometria corrente  $\{X_n\}$ ;
- $[D_i]$  é matriz de tensão deformação corrente;
- $[S_i]$  é contribuição da rigidez de tensão (ou rigidez geométrica), escrita simbolicamente como :

$$[S_i] = \int [G_i]^T [t_i] [G_i] d(vol) \quad (4.31)$$

onde  $[G_i]$  é a matriz derivativa da função de forma e  $[t_i]$  a matriz corrente das tensões de Cauchy (verdadeiras)  $\{\sigma_i\}$  no sistema global cartesiano. O retorno das forças de Newton-Raphson é:

$$[F_i^{nr}] = \int [B_i]^T \{s_i\} d(vol) \quad (4.32)$$

#### 4.3.4 Relações não lineares – aplicando a teoria da plasticidade

A plasticidade é caracterizada pôr uma deformação irreversível que ocorre no material quando um certo nível de tensão é atingido. Assume-se que as deformações plásticas desenvolvam-se instantaneamente, isto é independam do tempo.

A teoria da plasticidade provê as relações matemáticas que caracterizam a resposta elasto plástica dos materiais. Estas relações são regidas pôr três critérios que independem do tempo: o critério de escoamento, a regra de fluxo, e a regra de encruamento.

São chamadas relações não lineares as relações entre as tensões e deformações do material na fase plástica, ou seja a tensão não é uma função linear da deformação, estas relações também dependem do caminho de deformações, tanto que a tensão depende do histórico de deformações, bem como da própria deformação.

As deformações podem ser definidas pela equação :

$$\{\varepsilon^{el}\} = \{\varepsilon\} - \{\varepsilon^{th}\} - \{\varepsilon^{pl}\} - \{\varepsilon^{cr}\} - \{\varepsilon^{sw}\} \quad (4.33)$$

Onde:

$\varepsilon^{el}$  = vetor de deformação elástica;

$\varepsilon$  = vetor de deformação total;

$\varepsilon^{th}$  = vetor de deformação térmica;

$\varepsilon^{pl}$  = vetor de deformação plástica

$\varepsilon^{cr}$  = vetor de deformação creep;

$\varepsilon^{sw}$  = vetor de deformação inchamento (Sweling).

#### 4.3.5 O critério de escoamento

O critério de escoamento determina o nível de tensões no qual se inicia o escoamento . Para tensões multi-componentes, isto é representado como uma função dos componentes individuais,  $f(\{\sigma\})$ , que pode ser interpretado como uma tensão equivalente  $\sigma_e$  :

$$\sigma_e = f(\{\sigma\}) \quad (4.34)$$

onde:  $\{\sigma\}$  é o vetor tensão.

Quando a tensão equivalente é igual ao parâmetro de escoamento  $\sigma_y$ , o material desenvolve deformações plásticas.

$$f(\{\sigma\}) = \sigma_y \quad (4.35)$$

Se  $\sigma_e$  é menor do que  $\sigma_y$ , o material é elástico e as tensões irão desenvolver-se de acordo com as relações tensão x deformação.

A equação 4.35 pode ser representada no espaço de tensões como mostra a Figura 4.5 para algumas das opções da plasticidade. As superfícies são conhecidas como superfícies de escoamento e todo estado de tensão na superfície é elástico, isto é, eles não causam deformações plásticas.

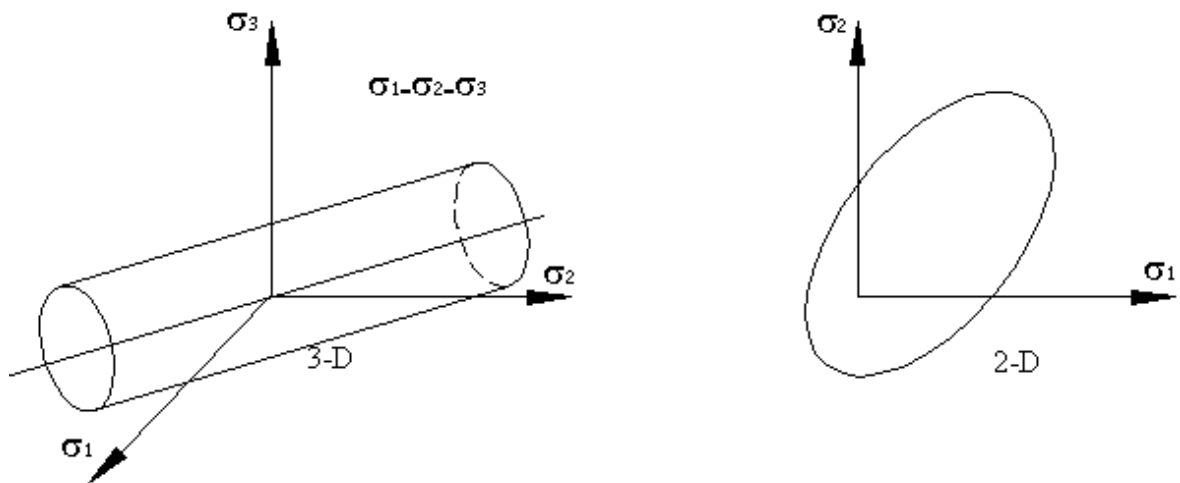


Figura 4.5 - Superfície de escoamento anisotrópica.

#### 4.3.6 Regra de fluxo

A regra de fluxo determina a direção das deformações plásticas e é dada como :

$$\left\{ d\mathbf{e}^{pl} \right\} = \lambda \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \mathbf{s}} \right\} \quad (4.36)$$

Onde:

$\lambda$  = multiplicador plástico (que determina a quantidade de deformações plásticas);

Q = função da tensão denominada potencial plástico (que determina a direção da deformação plástica).

A função Q normalmente é o critério de escoamento que foi adotado para o material. A regra de fluxo é denominada associada e as deformações plásticas ocorrem na direção normal a superfície de escoamento.

#### 4.3.6.1 Incremento plástico de deformações

Se as tensões equivalentes calculadas usando as propriedades elásticas excedem a tensão de escoamento do material, então deformações plásticas devem ocorrer. Deformações plásticas reduzem o estado de tensões de modo que isto satisfaça o critério de escoamento, equação 4.41, o incremento de deformação plástica é então calculado.

O estado da regra de escoamento e o critério de escoamento mudam com encruamento isotrópico e ou com o encruamento cinemático incorporando estas dependências a equação 4.35, e reformulada na seguinte forma :

$$F(\{\sigma\}, \kappa, \{\alpha\}) = 0 \quad (4.37)$$

onde :  $\kappa$  = trabalho plástico;

$\{\alpha\}$  = translação da superfície de escoamento.

As variáveis  $\kappa$  e  $\{\alpha\}$  são os termos internos ou variáveis de estado. Especificamente, o trabalho plástico é a soma do trabalho plástico feito sobre o histórico de carregamento :

$$\mathbf{k} = \int \{\mathbf{s}\}^T [M] \{d\mathbf{e}^{pl}\} \quad (4.38)$$

e a translação (ou troca) da superfície de escoamento é também dependente do histórico e é dada como :

$$\{a\} = \int C \{d\mathbf{e}^{pl}\} \quad (4.39)$$

onde : C = parâmetro do material;

$\{a\}$  = tensão de retorno (localização do centro da superfície de escoamento).

A equação 4.43 pode ser diferenciada assim que a condição de consistência é :

$$dF = \left\{ \frac{\partial F}{\partial \mathbf{s}} \right\}^T [M] \{d\mathbf{s}\} + \frac{\partial F}{\partial a} da + \left\{ \frac{\partial F}{\partial a} \right\}^T [M] \{da\} = 0 \quad (4.40)$$

onde :

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

Notando da equação 4.38 temos :

$$d\mathbf{k} = \{\mathbf{s}\}^T [M] \{d\mathbf{e}^{pl}\} \quad (4.41)$$

e da equação 4.39 :

$$\{da\} = C \{d\mathbf{e}^{pl}\} \quad (4.42)$$

da equação 4.40 obtemos :

$$\left\{ \frac{\partial F}{\partial \mathbf{s}} \right\}^T [M] \{d\mathbf{s}\} + \frac{\partial F}{\partial \mathbf{k}} \{\mathbf{s}\}^T [M] \{d\mathbf{e}^{pl}\} + C \left\{ \frac{\partial F}{\partial a} \right\}^T [M] \{d\mathbf{e}^{pl}\} = 0 \quad (4.43)$$

O incremento de tensão pode ser calculado via relações tensão deformação

$$\{d\mathbf{s}\} = [D] \{d\mathbf{e}^{el}\} \quad (4.44)$$

onde  $[D]$  = matriz deformação – deslocamento ; com

$$\{d\mathbf{e}^{el}\} = \{d\mathbf{e}\} - \{d\mathbf{e}^{pl}\} \quad (4.45)$$

Dado que o incremento total de deformações pode ser dividido em parte elástica e plástica. Substituindo a equação 4.42 equação 4.51 :

$$\{d\mathbf{e}^{el}\} = \{d\mathbf{e}\} - \mathbf{I} \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \mathbf{s}} \right\} \quad (4.46)$$

Substituindo as equações 42 e 52 na equação 49, podemos isolar  $\lambda$ , logo :

$$\mathbf{I} = \frac{\left\{ \frac{\partial F}{\partial \mathbf{s}} \right\}^T [M] [D] \{d\mathbf{e}\}}{-\frac{\partial F}{\partial \mathbf{k}} \{\mathbf{s}\}^T [M] \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \mathbf{s}} \right\} - C \left\{ \frac{\partial F}{\partial a} \right\}^T [M] \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \mathbf{s}} \right\} + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \mathbf{s}} \right\}^T [M] [D] \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \mathbf{s}} \right\}} \quad (4.47)$$

O incremento plástico é então computado usando a equação 4.42 :

$$\{d\mathbf{e}^{pl}\} = \mathbf{I} \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \mathbf{s}} \right\} \quad (4.48)$$

#### 4.3.6.2 Implementação

Um esquema de retorno de Euler é usado para forçar a condição de consistência (equação 4.40). Isto assegura que as tensões atualizadas, deformações e variáveis internas agirão sobre a superfície de escoamento. O algoritmo procede como se segue :

1. O parâmetro de material  $\sigma_y$  (equação 4.35) é determinado para este passo de tempo considerado.
2. As tensões são computadas baseadas na deformação de prova  $\{\epsilon_{tr}\}$ , que é obtida subtraindo da deformação total a deformação plástica do ponto no tempo anterior .

$$\{\mathbf{e}_n^{tr}\} = \{\mathbf{e}\} - \{\mathbf{e}_{n-1}^{pl}\} \quad (4.49)$$

A tensão de prova é então

$$\{\mathbf{e}^{tr}\} = [D] \{\mathbf{e}^{tr}\} \quad (4.50)$$

3. A tensão equivalente  $\sigma_e$  é avaliada a este nível de tensões pela equação 4.41 . Se  $\sigma_e$  é menor que  $\sigma_y$  o material é elástico e não é computado incremento plástico.

4. Se a tensão excede a tensão de escoamento do material, o multiplicador plástico  $\lambda$  é determinado por um procedimento de interação local de Newton-Rapson (Simo e Taylor, 1985).
5.  $\{\Delta \mathbf{e}^{pl}\}$  calculado via a equação 4.48 .
6. A deformação plástica corrente é atualizada

$$\{\mathbf{e}_n^{pl}\} = \{\mathbf{e}_{n-1}^{pl}\} + \{\Delta \mathbf{e}^{pl}\} \quad (4.51)$$

onde  $\{\mathbf{e}_n^{pl}\}$  = deformações plásticas correntes.

O vetor de tensões é calculado pôr :

$$\{\mathbf{e}^{EL}\} = \{\mathbf{e}^{TR}\} - \{\Delta \mathbf{e}^{PL}\} \quad (4.52)$$

onde  $\{\mathbf{e}^{el}\}$  = deformações elásticas.

O vetor de deformações é dado por :

$$\{\mathbf{s}\} = [D] \{\mathbf{e}^{el}\} \quad (4.53)$$

onde  $\{\mathbf{s}\}$  = tensões (quantidade de saída S)

7. Os incrementos do trabalho plástico  $\Delta \mathbf{C}$  e o centro da superfície de escoamento são computados via a equação 4.41.e 4.42 e os valores correntes são atualizados

$$\mathbf{k}_N = \mathbf{k}_{N-1} + \Delta \mathbf{k} \quad (4.54)$$

e

$$\{a_n\} = \{a_{n-1}\} + \{\Delta a\} \quad (4.55)$$

onde o subscrito n-1 se refere ao valor do ponto no tempo anterior.



8. Como resultados são calculados a deformação plástica equivalente  $\hat{e}^{pl}$ , o incremento de deformação plástica  $\Delta \mathbf{e}^{pl}$ , o parâmetro equivalente de tensões  $\mathbf{s}_e$  e a taxa de tensões  $N$  são calculadas. A taxa de tensões é dada como :

$$N = \frac{\mathbf{s}_e}{\mathbf{s}_y} \quad (4.56)$$

Onde  $\sigma_e$  é avaliado usando a tensão de prova  $\{\mathbf{s}^{tr}\}$ .  $N$  é entretanto maior ou igual a 1 quando o escoamento esta ocorrendo e é menor que um quando o estado de tensões é elástico. O incremento plástico equivalente é dado como :

$$\Delta \hat{e}^{pl} = \left( \frac{2}{3} \{\Delta \mathbf{e}^{pl}\}^T [M] \{\Delta \mathbf{e}^{pl}\} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.57)$$

O equivalente plástico de deformações e os parâmetros de tensões são desenvolvidos especificamente para materiais isotrópicos ou anisotrópicos.

#### 4.3.7 Regra de encruamento - Plasticidade isotrópica (MISO)

A regra de encruamento descreve a mudança da superfície de escoamento com o progresso do escoamento, tanto que as condições (estados de tensões) para o escoamento subsequente pode ser estabelecido.

O modelo de plasticidade isotrópica MISO o critério de escoamento de Von Mises que é associado com a regra de fluxo e com o encruamento isotrópico.

A tensão equivalente é :

$$\mathbf{s}_e = \left[ \frac{3}{2} \{S\}^T [M] \{S\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.58)$$

Onde  $\{s\}$  é tensão de desvio

$$\{S\} = \{\mathbf{s}\} - \mathbf{s}_m [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (4.59)$$

onde  $\sigma_m$  é a tensão hidrostática.

$$\mathbf{s}_m = \frac{1}{2}(\mathbf{s}_x + \mathbf{s}_y + \mathbf{s}_z) \quad (4.60)$$

Quando  $\sigma_e$  é igual a tensão de escoamento corrente  $\sigma_k$  assume-se que o material está escoando. O critério de escoamento é :

$$F = \left[ \frac{3}{2} \{S\}^T [M] \{S\} \right]^{\frac{1}{2}} - s_k = 0 \quad (4.61)$$

Para o encruamento,  $\sigma_k$  é uma função da quantidade do trabalho plástico feito. Para o caso plasticidade isotrópica,  $\sigma_k$  pode ser determinado diretamente da deformação plástica equivalente  $\hat{e}^{pl}$  da equação

$$\hat{e}_n^{pl} = \hat{e}_{n+1}^{pl} + \Delta \hat{e}_n^{pl} \quad (4.62)$$

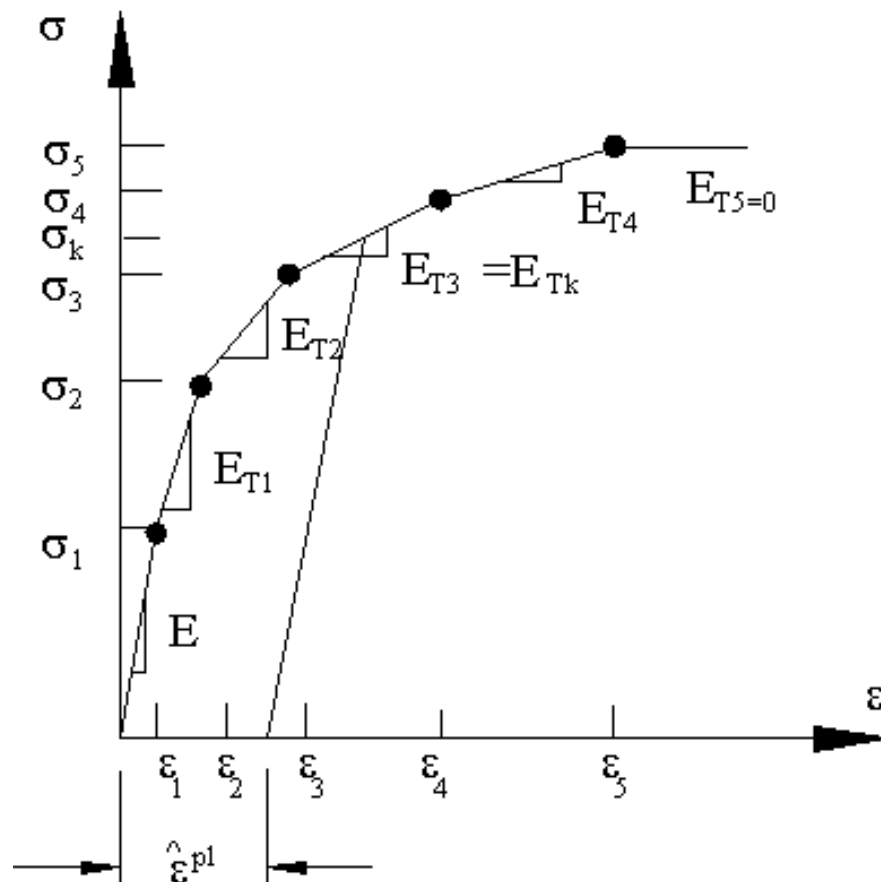


Figura 4.6 - Curva uniaxial para encruamento isotrópico multilinear.

#### 4.3.8 Procedimento de Newton-Rapson

O processo de discretização por elementos finitos do escoamento leva a um conjunto de equações :

$$[K] \{u\} = \{F^a\} \quad (4.63)$$

onde :  $[K]$  = matriz de coeficientes;

$\{u\}$  = vetor dos valores dos graus de liberdades desconhecidos;

$\{F^a\}$  = vetor das cargas aplicadas.

Se a matriz de coeficientes  $[K]$  é uma função dos valores graus de liberdades desconhecidos (ou de suas derivadas) então a equação 4.63 é uma equação não linear. O método de Newton-Rapson é um processo iterativo para a solução de equações não lineares e podem ser escritas como (Bathe, 1982):

$$[K_i^T] \{\Delta u_i\} = \{F^a\} - \{F_i^{nr}\} \quad (4.64)$$

$$\{u_{i+1}\} = \{u_i\} + \{\Delta u_i\} \quad (4.70)$$

onde :  $[K_i^T]$  = Matriz Jacobiana ( matriz tangente);

$i$  = subscrito representa a interação de equilíbrio corrente;

$\{F_i^{nr}\}$  = vetor de retorno das cargas aplicadas correspondente as cargas dos elementos internos.

Ambos  $[K_i^T]$  e  $\{F_i^{nr}\}$  avaliados baseados nos valores dados por  $\{u_{i+1}\}$ . O lado direito da equação 4.64 é o resíduo de saída do balanço do vetor de carga, por exemplo, a quantia do sistema é saída do equilíbrio. Uma solução simples de uma interação é descrita graficamente na Figura 4.7 para um grau de liberdade do modelo. Em análise estrutural,  $[K_i^T]$  é a matriz tangente de rigidez ,  $\{u_i\}$  são os vetores de deslocamento e  $\{F_i^{nr}\}$  são os vetores de restabelecimento das forças calculadas das tensões dos elementos.

Como pode ser visto na Figura 4.8 , mais que uma interação de Newton-Rapson é necessária para obter a convergência da solução. Em geral o algoritmo procede como o seguinte:

1. Assume  $\{u_0\}=\{u_0\}$  é usualmente a solução de convergência da solução no passo de tempo anterior . No primeiro passo  $\{u_0\}=\{0\}$ .
2. Calcula a atualização da matriz tangente  $[K_i^T]$  e o restabelecimento das cargas  $\{F_i^{nr}\}$  da configuração  $\{u_i\}$ .
3. Calcula  $\{u_i\}$  da equação 4.64 .
4. Adiciona  $\{\Delta u_i\}$  em  $\{u_i\}$  de modo a obter a aproximação seguinte  $\{u_{i+1}\}$  equação 4.65.
5. Repete os passos 2 a 4 até que a convergência seja atingida..

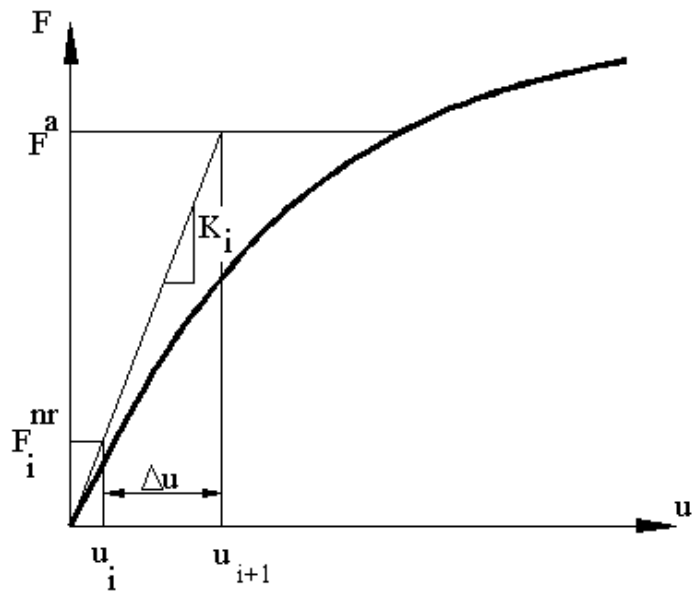


Figura 4.7 Solução de Newton-Rapson – uma interação.

A Figura 4.8 mostra a solução da próxima interação (i+1) do exemplo da Figura 4.7. As interações subsequentes podem ser processadas de maneira similar.

A solução obtida ao final do processo de interação irá corresponder ao nível de cargas  $\{F^a\}$ . A solução final convergida irá estar em equilíbrio, como o vetor das

cargas restabelecidas de  $\{F_i^{nr}\}$  (calculado do estado de tensões corrente). Nenhuma das soluções intermediárias estará em equilíbrio.

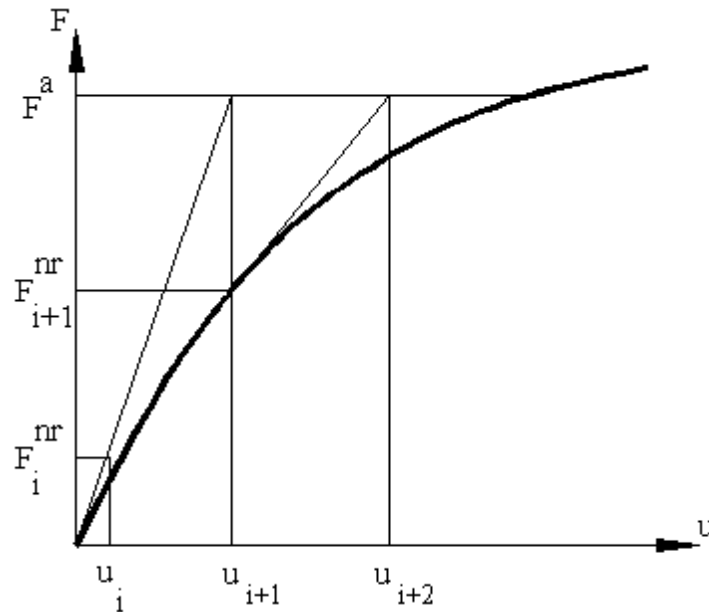


Figura 4.8 - Solução de Newton-Rapson – próxima interação.

Se a análise inclui o caminho de dependência (como a plasticidade), então o processo de solução requer alguns passos intermediários em equilíbrio de modo a seguir corretamente o caminho das cargas. Isto é acoplado efetivamente especificando uma análise incremental passo por passo, por exemplo, o vetor final de carga  $\{F^a\}$  é atingido por aplicação de cargas em incrementos e realizando interações de Newton-Rapson a cada passo :

$$[K_{n,i}^T] \{\Delta u_i\} = \{F_n^a\} - \{F_{n,i}^{nr}\} \quad (4.71)$$

onde :  $[K_{n,1}]$  = matriz tangente para o passo de tempo n, interação i;

$\{F_n^a\}$  = vetor total das forças aplicadas no passo de tempo n;

$\{F_{n,1}^{nr}\}$  = vetor das cargas restabelecidas para o passo tempo n na interação i.

Este processo é o procedimento incremental de Newton-Rapson e é mostrado na Figura 4.10. O procedimento incremental de Newton-Rapson garante convergência se e somente se a solução a cada interação  $\{u_i\}$  é próxima da solução exata. Entretanto, mesmo sem um caminho de dependência não linear, o aproximador incremental (que

aplica cargas em incrementos) é algumas vezes utilizado de modo a obter uma solução correspondente para o nível final de carregamento.

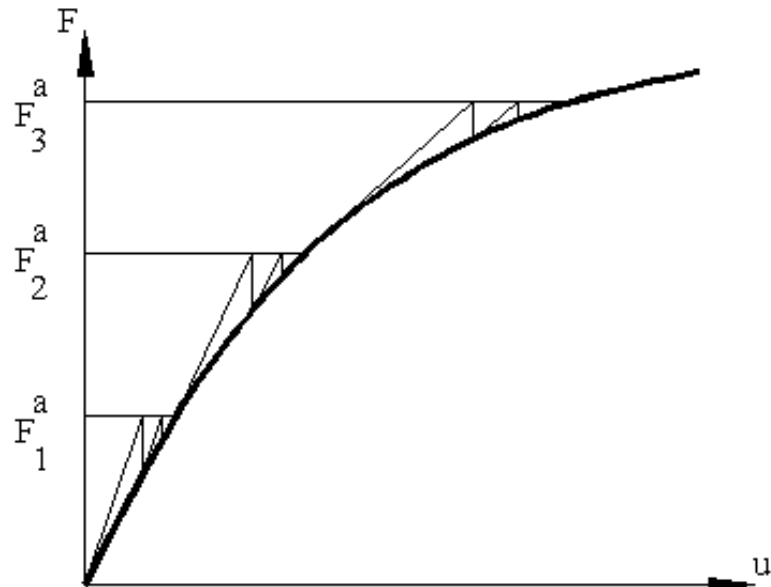


Figura 4.9 - Procedimento incremental de Newton-Rapson.

Quando a matriz de rigidez é atualizada a cada interação (como indicado na equação 4.69 e 4.71) processo é denominado “Procedimento de solução de Newton-Rapson completo”.

Alternativamente a matriz de rigidez pode ser atualizada menos frequentemente usando o procedimento de solução de Newton-Rapson modificado. Especialmente, para casos de análise estática, ela será atualizada somente durante a primeira ou segunda interação de cada subpasso, respectivamente. O modificado e o procedimento de rigidez inicial de Newton-Rapson converge mais lentamente do que o procedimento de Newton-Rapson completo, mas ele requer poucas reformulações da matriz e inversões.

#### 4.3.9 Convergência

O processo de interação descrito em 4.57 continua até que a convergência seja atingida.

A convergência é atingida quando :

$$\| \{R\} \| < \epsilon_R R_{ref} ; \quad (4.72)$$

(saída do balanço de convergência)

e ou

$$\|\{\Delta u_i\}\| < e_u U_{ref} \quad (4.88)$$

(incremento de convergência dos graus de liberdade)

onde  $\{R\}$  é o vetor residual:

$$\{R\} = \{F^a\} - \{F^{nr}\} \quad (4.73)$$

O lado direito da equação de Newton-Rapson  $\{\Delta u_i\}$  é o vetor dos incrementos dos graus de liberdades,  $e_R$  e  $e_u$  são as tolerâncias e  $R_{ref}$  e  $U_{ref}$  são valores de referência,  $\|\bullet\|$  é a norma do vetor, isto é, uma medida escalar da magnitude do vetor.

A convergência, entretanto, é obtida quando o tamanho do resíduo é menor que a tolerância de um valor de referência do tempo ou quando o tamanho dos incrementos dos graus de liberdade é menor que a tolerância de um valor de referência do tempo.

Por falta é usado somente a convergência da saída do equilíbrio para verificação. O valor da tolerância para este caso é .001 ( para  $e_R$  e  $e_u$  ).

A norma adotada neste trabalho é a norma L2, que é a raiz quadrada da soma dos quadrados (SRSS) dos valores das condições também chamada norma Euclidiana.

$$\|\{R\}\|_2 = \left(\sum R_i^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.76)$$

#### 4.3.10 Elemento sólido viscoplástico VISCO 107 – 3D

O elemento VISCO107 é do tipo contínuo aplicado para modelagem 3D de estruturas sólidas. O elemento é definido pôr oito nós tendo três graus de liberdade pôr nó A utilização do elemento requer a utilização de procedimentos de solução incrementais, pôr ser aplicado a simulação de comportamento não linear.

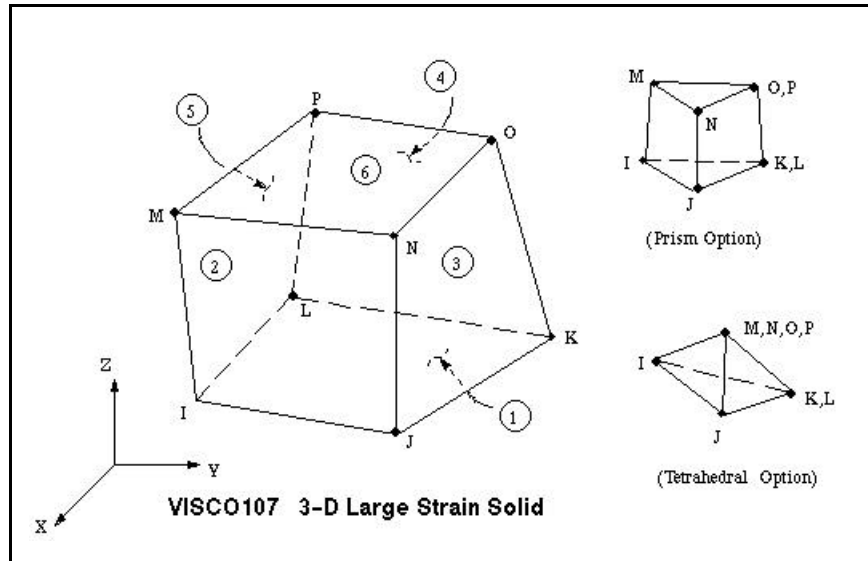


Figura 4.10 – Elemento VISCO 107.

Viscoplasticidade é um fenômeno de plasticidade, onde o desenvolvimento de deformações plásticas são dependentes da taxa de carregamento. Viscoplasticidade é definida pela união da plasticidade e Creep via um conjunto de equações evolutivas. Uma equação de restrição é usada para preservar o volume na região plástica. O material a ser empregado é limitado a ser de natureza isotrópica e deformações elásticas são consideradas pequenas em relação as deformações plásticas

A solução de Newton-Rapson plena é empregada quando a forças restabelecidas são dadas pela equação 4.38

$$\{F^{nr}\} = \int_{vol} [B]^T \{s\} d(vol) \quad (4.38)$$

onde  $[B]$  = matriz de deslocamento;

$\{\sigma\}$  = tensão de Cauchy.

A equação 4.38 é modificada assumindo a decomposição da tensão de Cauchy na parte de desvio e na parte de pressão :

$$\{s\} = \{s\} - \{q\} s_h \quad (4.78)$$



onde :  $\{\sigma'\}$  = tensão de desvio de Cauchy;

$$[q] = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0];$$

$$\sigma_h = -(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) / 3 \Rightarrow \text{tensão hidrostática.}$$

A pressão é interpolada separadamente para convenientemente levar o reforço da restrição de incompressibilidade associada com grandes deformações plásticas (Oden e Kikuchi, 1982) As forças de restituição podem agora ser escritas como :

$$\{F^{nr}\} = \int_{vol} [B]^T \{s\} d(vol) - \int [B]^T \{q\} P d(vol) \quad (4.79)$$

A restrição de incompressibilidade durante o fluxo plástico é reforçada através do aumento das equações de momento com :

$$\int_{vol} [N^p]^T \left( \Delta J - \hat{J}(\Delta^p) \right) d(vol) = 0 \quad (4.80)$$

onde :  $[N^p]$  = Função de forma associada com pressão interpolada independente;

$\Delta J$  = Determinante relativo do gradiente de deformações;

$\hat{J}$  = Função constitutiva expressando a mudança de volume e suas relações expressas como :

$$\Delta \hat{J} = \exp \frac{-\Delta P}{K} \quad (4.81)$$

onde :  $K = (E/(3(1-2\nu)))$  módulo elástico;

$E$  = módulo de Young;

$\nu$  = coeficiente. de Poisson.

A tensão total de Cauchy é calculada encontrando a parte de desvio da parte constitutiva das equações usando as deformações calculadas dos deslocamentos nodais e subtraindo separadamente a pressão interpolada.

$$\{\bar{\mathbf{s}}\} = \{\mathbf{s}^i\} - \{q\} P_0 \quad (4.82)$$

onde :  $P_0$  = campo de pressões interpolado.

A matriz de rigidez para análise estática é construída avaliando o Jacobiano exato do sistema discretizado. Isto produz uma equação da forma :

$$\begin{bmatrix} K^{uu} & K^{up} \\ K^{pu} & K^{pp} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} F^u \\ F^p \end{Bmatrix} \quad (4.83)$$

onde :  $\{F\}$  = forças nodais externas;

$\{\Delta u\}; \{\Delta P\}$  = incrementos de deslocamento e pressão.

$$\{F^u\} = \int_{vol} [B]^T \{\mathbf{s}\} d(vol) \quad (4.84)$$

$$\{F^p\} = \int_{vol} [N^p]^T \left( \Delta j - \Delta J(\hat{\Delta P}) \right) d(vol) \quad (4.84)$$

$$[K^{uu}] = \frac{\partial}{\partial u} \left[ \int_{vol} [B]^T \{\mathbf{s}\} d(vol) \right] \quad (4.85)$$

$$[K^{up}] = [K^{pu}]^T = \frac{\partial}{\partial p} \left[ \int_{vol} [B]^T \{\mathbf{s}\} d(vol) \right] \quad (4.86)$$

$$[K^{pp}] = \frac{\partial}{\partial p} \left[ \int_{vol} [N^p]^T \left( \Delta J - \Delta J(\hat{\Delta P}) \right) d(vol) \right] \quad (4.87)$$

A matriz tangente desenvolvida na equação 4.82, tem duas partes, denominada parte constitutiva e parte geométrica, ambas são essenciais, mas a eficiência numérica

e as considerações de estabilidade tem se mostrado diferentes. A melhoria da estabilidade geométrica é conseguida com a inclusão da rigidez de tensão ou rigidez geométrica. A simetria da matriz é atingida assumindo pequenos incrementos de deformação para a parte constitutiva e negligenciando a mudança de volume durante o passo para a parte geométrica. Para detalhes adicionais da matriz de rigidez podem ser encontrados em Weber et al.,1990

#### 4.3.11 Cinemática do contato

No estudo do contato entre dois corpos, denomina-se a superfície de um deles de superfície de contato e a do outro de superfície alvo. O conceito de par contato-alvo é amplamente usado na simulação por elementos finitos. Para contato rígido-flexível, a superfície de contato é associada ao corpo deformável e a superfície alvo deve ser associada a do corpo rígido.

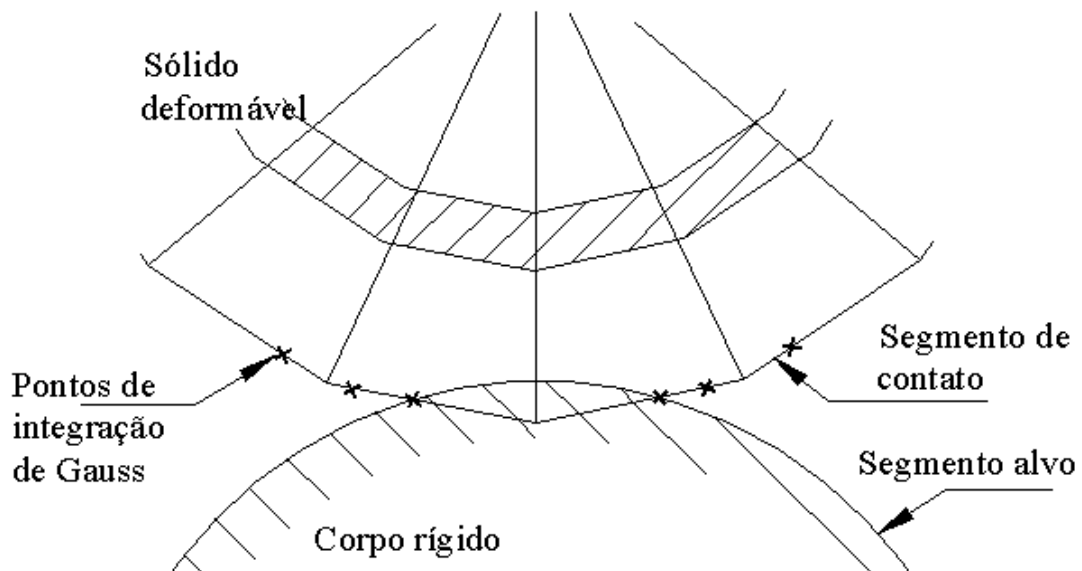


Figura 4.11 – Detecção do contato.

A detecção dos pontos de contato é feita através da localização dos pontos nodais ou pontos de Gauss.

Os elementos de contato são restringidos contra a penetração na superfície alvo através da integração de seus pontos. Entretanto em princípio, a superfície alvo pode penetrar na superfície de contato. Através do uso da integração dos pontos de Gauss

geralmente se consegue resultados precisos, embora imprecisões possam levar a perda de contato e a conseqüente dificuldade de convergência (Cescotto e Charilier, 1994)

A distância de penetração é medida na direção normal a superfície de contato, localizada na integração dos pontos na superfície alvo. Esta definição é feita unicamente devido a geometria da superfície alvo não ser suave. Descontinuidades podem ocorrer devido aos cantos físicos na superfície alvo, ou podem ser introduzidas pelo processo de discretização numérica. O cálculo da distância de penetração baseados neste método não tem restrições da forma da superfície alvo rígida.

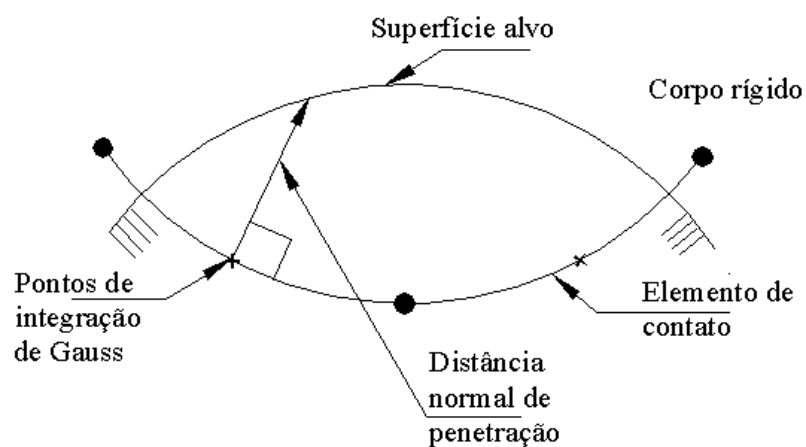


Figura 4.12 - Distância de penetração.

A posição e movimento de um elemento de contato relativo a sua superfície alvo determina o status do elemento. Que pode ser : aberto com grande campo de contato; aberto com pequeno campo de contato; contato adesivo ou contato deslizante

Um elemento de contato é considerado no campo próximo do elemento entrando na região do algoritmo piball, que é centrado na integração dos pontos do elemento de contato. O custo computacional da procura por contato depende do tamanho da região piball. O cálculo de um campo largo de elemento de contato é simples e de pequena demanda computacional.

O cálculo de um campo próximo é maior e mais pesado. O cálculo é mais complexo e ocorre quando os elementos estão de fato em contato.

### 4.3.12 Modelo de fricção

No modelo básico de fricção de Coulomb, entre duas superfícies em contato, devido a adesão podem ocorrer intensas tensões de cisalhamento na interface dos corpos, antes do início do escorregamento relativo entre as superfícies.

O modelo de fricção de Coulomb é:

$$t_{\text{lim}} = \mu P \quad (4.88)$$

$$|t| \leq t_{\text{lim}} \quad (4.89)$$

onde :  $t_{\text{lim}}$  = limite de tensão de cisalhamento;

$t$  = tensão equivalente de cisalhamento;

$\mu$  = coeficiente de atrito;

P = pressão normal de contato.

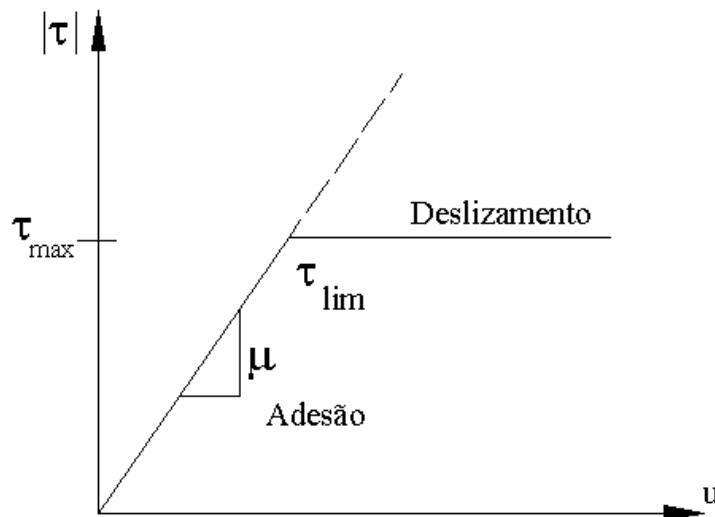


Figura 4.13 – Modelo de fricção.

Quando a tensão equivalente de cisalhamento excede  $t_{\text{lim}}$  as superfícies de contato e alvo estarão em atrito relativo. Este estado é conhecido como deslizamento. O cálculo da adesão e deslizamento determina quando ocorre uma transição do ponto de adesão para deslizamento ou vice-versa.

## CAPÍTULO 5

### 5. SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM PROFUNDA

A simulação numérica do MEF no programa ANSYS 6.0 é executada em três etapas: a etapa da modelagem, a da solução e a de pós processamento.

Na etapa de pré processamento o modelo matemático do blank e ferramental utilizado pode ser construído com as ferramentas de modelagem do programa, ou a partir de um modelo gerado em CAD importado no formato IGES (Initial Graphics Exchange Specifications).

O modelo deve ser planejado de modo a tirar proveito dos planos de simetria do produto e ferramenta, o que possibilita construir apenas uma fração representativa do mesmo, isto proporciona uma redução do número de elementos a serem gerados e conseqüentemente do tempo de processamento da solução.

Na etapa da solução são estabelecidas as condições de contorno, gerados os deslocamentos, aplicados os carregamentos e estabelecidas as condições de processamento. O algoritmo base de cálculo utilizado no ANSYS 6.0 é estático implícito e para executar uma análise não linear, que é o caso da simulação do processo de estampagem, os deslocamentos e carregamentos, devem ser aplicados gradativamente em incrementos de tempo, nos quais as interações de equilíbrio são calculadas.

A etapa final é a de pós processamento, nesta o programa ANSYS 6.0 disponibiliza os resultados numéricos e gráficos obtidos na simulação, e pode-se utilizar o recurso de criar uma animação do processo.

#### 5.1 O PRÉ PROCESSAMENTO

A partir das dimensões estabelecidas para o produto e ferramental, foi gerado o modelo matemático diretamente como os recursos de modelagem do ANSYS 6.0. Dado que geometria do produto, é simétrica nos planos transversais e diagonais, isto possibilita que apenas a metade, ou um quarto ou ainda um oitavo da caixa e ferramenta possa ser modelado. Em virtude dos

recursos computacionais disponíveis bem como do ganho no tempo de processamento foi adotado o modelo de um oitavo. O modelo contempla a geometria exata da ferramenta projetada, porém se restringindo as suas partes principais, a cabeça do punção, a matriz e o prensa-chapas. Detalhes como furos de fixação da matriz bem como o comprimento total do punção foram omitidos.

Este modelo pode ser adaptado para diferentes geometrias de blanks , o que possibilita a análise em diferentes situações, tais como:

- Estampagem da caixa sem o prensa-chapa, objetivando prever o enrugamento da chapa;

- Estampagem completa da caixa sem flange, objetivando prever a profundidade máxima de estampagem;

- Estampagem completa da caixa com flange, objetivando prever a profundidade máxima de estampagem e a formação de orelhas;

- Estampagem da caixa nas condições acima, variando-se o carregamento no prensa-chapa, e condições de atrito para se otimizar o processo.

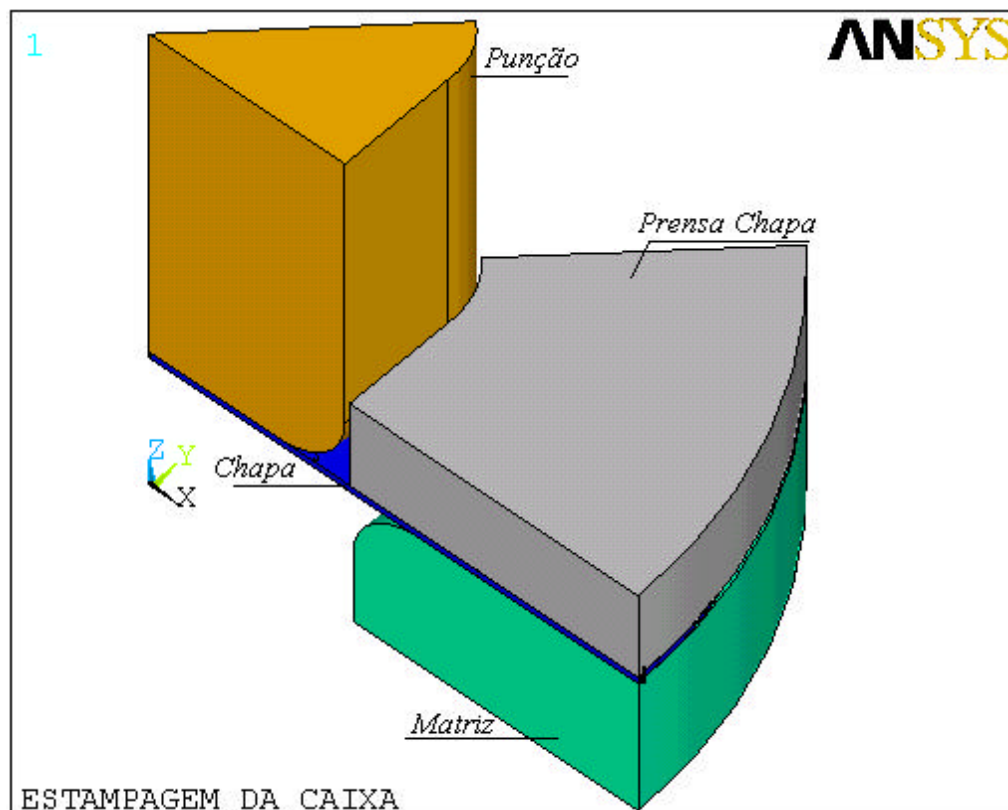


Figura 5.1 – Modelo 1/8 da chapa e ferramenta (volumes).

Foi utilizado o método de geração direta do modelo, o que possibilita o controle da geometria exata deste bem como dos elementos gerados.

Neste método os vértices e pontos de tangência são gerados e interligados por linhas e arcos, que definem os limites das faces laterais a partir das quais são gerados os volumes.

Os componentes do modelo são gerados seqüencialmente rastreando-se pontos linhas, áreas e volumes. Para controle e otimização das malha a serem geradas, cada linha foi dividida em um número de segmentos que determinam o mapeamento da malha na região em que está delimita.

### 5.1.1 Escolha do elemento

Na escolha do elemento da chapa as características do processo de estampagem são determinantes, ou seja o elemento escolhido deve suportar grandes deformações preservando o seu volume e que seja aplicável a análise não linear em 3D.

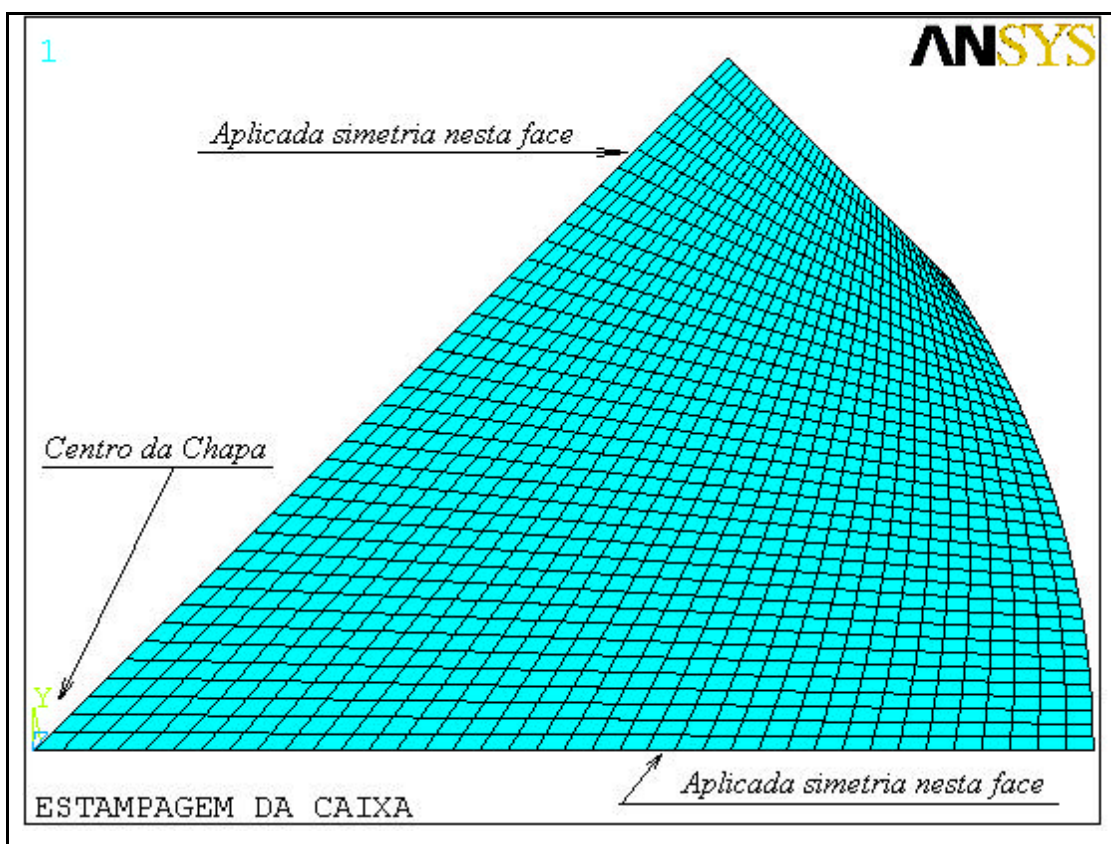


Figura 5.2 - Malha de elementos finitos aplicada na chapa.



Dos elementos disponíveis na biblioteca de elementos do ANSYS 6.0 para grandes deformações foi adotado o elemento VISCO107, que é um elemento do tipo linear já que não dispõe de nós no meio das arestas de cada face, a aplicação deste elemento com uma malha mais fina em análise não linear proporciona maior precisão e facilita a convergência. Este elemento só comporta material isotrópico, como o material da chapa é anisotrópico isto terá influência na margem de erro dos resultados.

### 5.1.2 Carregando as propriedades do material

Para análise envolvendo grandes deformações a curva real de tensão x deformação do material do produto analisado deve ser fornecida ao programa, esta é utilizada como base para se determinar as tensões na deformação dos elementos durante o processamento. Os pontos da curva  $\sigma \times \epsilon$  real obtida nos ensaios de material da chapa, foi alimentada no programa no modo de tabela multilinear (MISO) que utiliza um critério de escoamento de Von Mises acoplada com encruamento isotrópico. A curva montada pelo programa é apresentada na Figura 5.3.

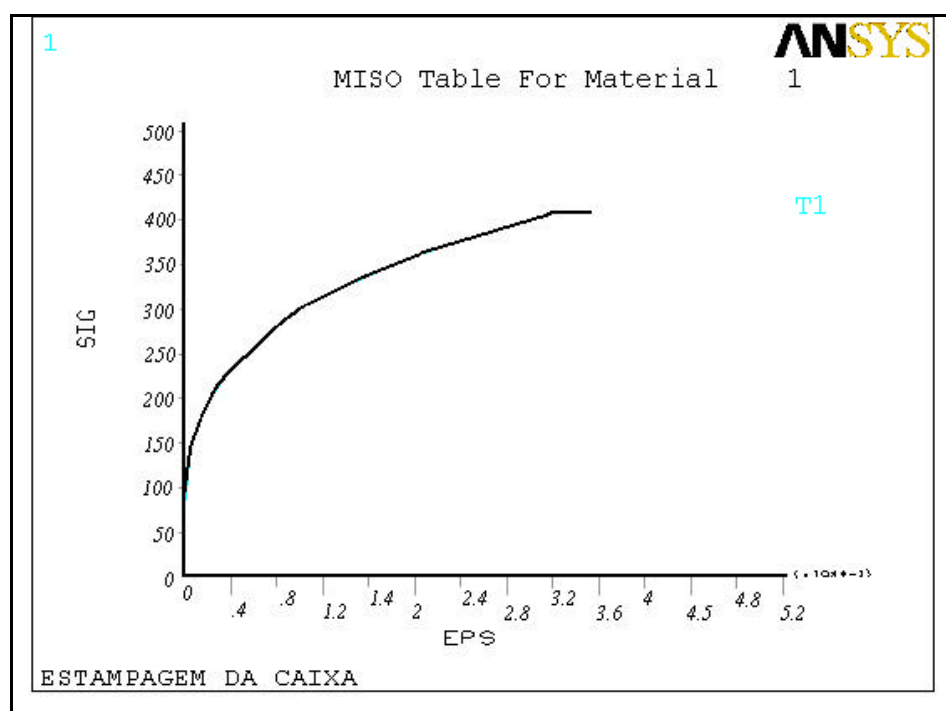


Figura 5.3 - Curva MISO de propriedades do material da chapa.

### 5.1.3 CONTATO

Dado que na estampagem as deformações e falhas tendem a ocorrer preferencialmente na chapa que na ferramenta, a ferramenta para efeito de análise será considerada de corpo rígido, recebendo apenas uma malha superficial para geração de contato na áreas onde a chapa é sujeitada e estampada. Cada componente rígido gerado desta maneira é controlada por um nó piloto.

Todos os esforços e condições de contorno de cada componente da ferramenta são aplicados nos respectivos nós pilotos, a adoção desta forma de modelo, diminui consideravelmente o número de nós gerados. A densidade da malha aplicada nas superfícies de contato foi dimensionada de modo a minimizar a penetração, e conseqüente distorção do elemento durante o processamento.

Para o contato rígido/flexível a superfície de contato (CONTA) é associada com o corpo deformável (chapa) e a superfície alvo (TARGE) ao corpo rígido (ferramenta). Os elementos utilizados para a malha de contato são: TARGE170 e CONTA174.

Foram estabelecidos três pares de contato:

- par Matriz / Chapa (superfície inferior);
- par Prensa-chapa / Chapa (superfície superior);
- par Punção / Chapa (superfície superior).

#### 5.1.3.1 Constantes reais

Para cada par de contato são estabelecidos onze constantes reais que controlam diferentes variáveis do contato, sendo que as duas primeiras se referem ao elemento TARGE170 e restantes ao elemento CONTA174, são elas :

R1 – define o raio mínimo do segmento para a geometria do elemento TARGE170, não aplicáveis para elemento com forma quadrangular.

R2 – idem R1.

- R3 – FKN = 1 - define o fator de escala para a rigidez de contato que é baseada na propriedade de rigidez do material, a faixa de valores recomendada para o fator varia de 0.01 à 10.
- R4 – FTOLN = 0.1 - define o fator de tolerância de penetração deve ser menor que 1,00 , usualmente menor que 0,02.
- R5 – ICONT = 0 - define o fechamento do contato inicial default = 0,003.
- R6 – PINB = 0 - define o raio da esfera a região de pimbal de contato.
- R7 – PMAX = 0 - valor máximo da penetração inicial.
- R8 – PMIN = 0 - valor mínimo da penetração inicial.
- R9 – TAUMAX = 1.0E20 - máxima tensão de fricção, default = 1e20, um valor recomendado é  $s_y/\sqrt{3}$  em que  $s_y$  é o critério de escoamento de Von Mises.
- R10 – CNOF = 0.0 - abertura no contato entre as superfícies.
- R11 – FKOP = 1.0 - abertura no contato entre as superfícies.

Após aplicação da malha nas faces de contato, cada par de contato pode ser visualizado individualmente para verificação, nas Figuras 5.4 a 5.6 podemos observar as malhas de contato aplicadas, as normais de contato que aparecem nas figuras tem a função de indicar a direção da normal de contato dos elementos TARGE170 e CONTA174.

### 5.1.3.2 Atrito

Como o modelo básico de fricção utilizado é o de Coulomb vide 4.5.11, o valor do coeficiente de atrito ( $\mu$ ) de ser fornecido para cada par de contato através do comando MU (MU, nº material,  $\mu$ ). Foram adotados três valores: 0 (sem atrito), 0,075 e 0,15 para as simulações.

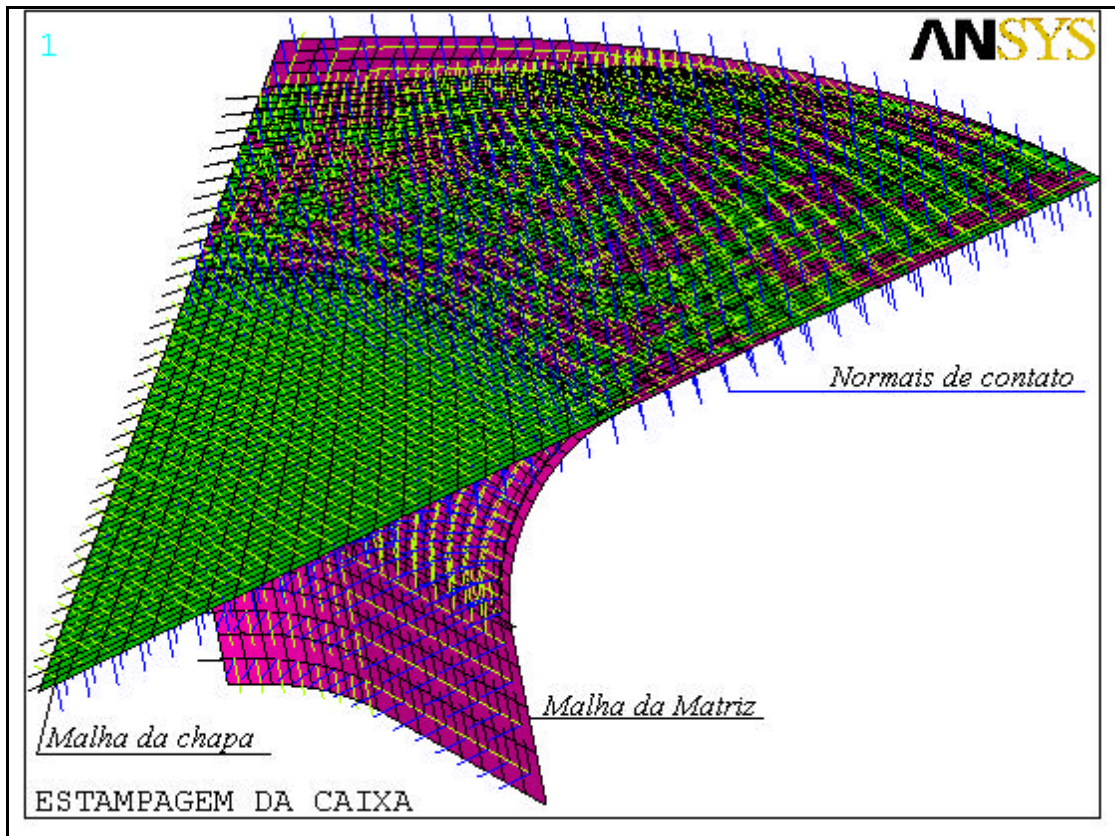


Figura 5.4 - Malha e normais de contato chapa – matriz.

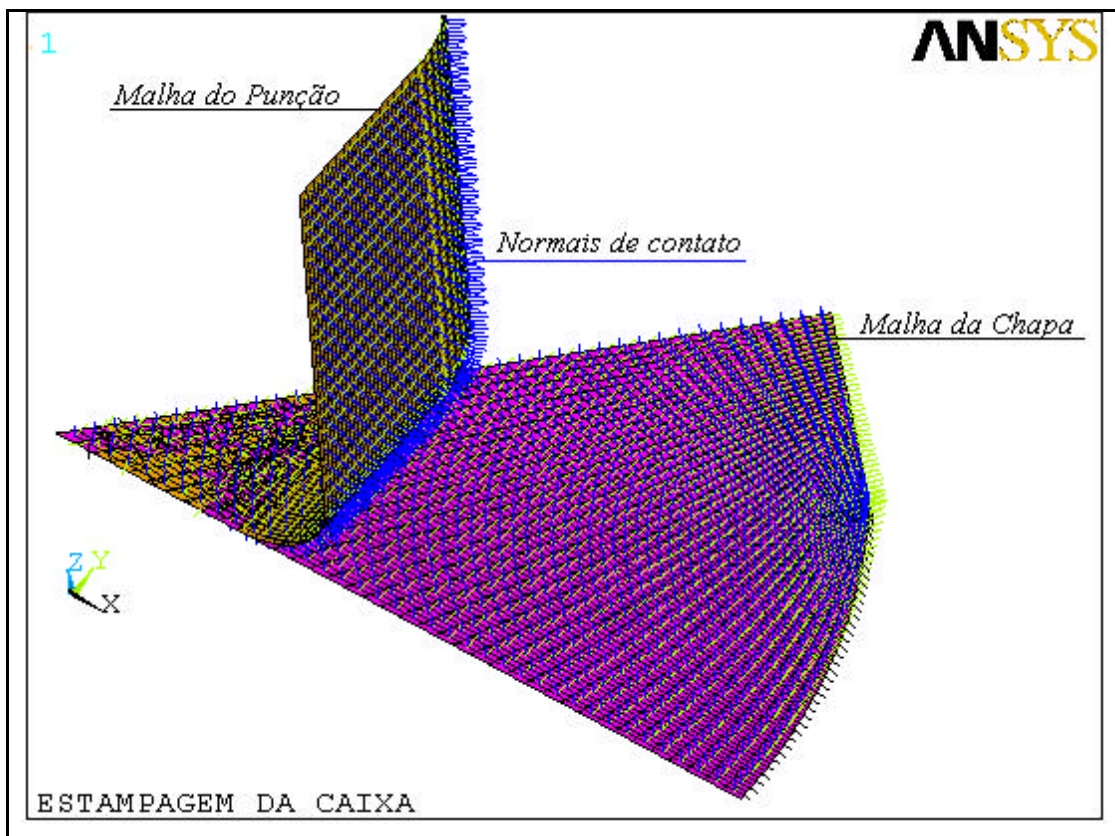


Figura 5.5 - Malha e normais de contato chapa – punção.

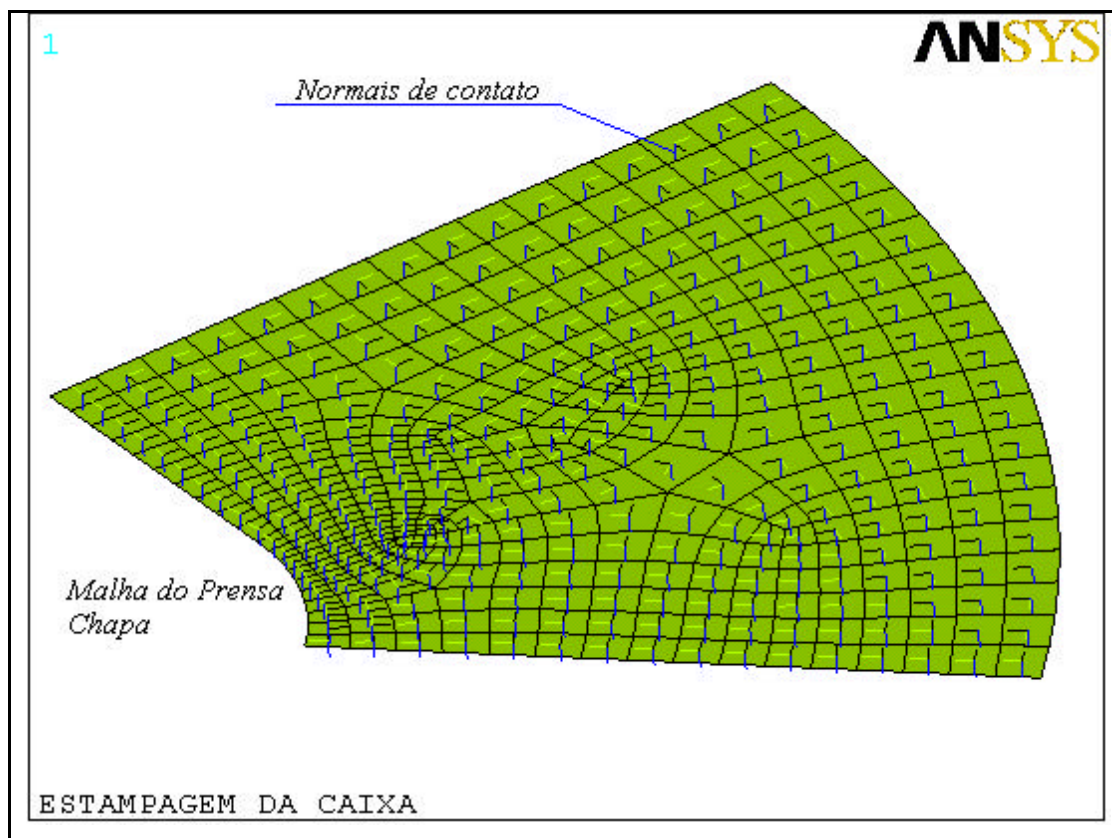


Figura 5.6 - Malha e normais de contato no prensa-chapa.

### 5.1.3.3 O elemento TARGE170

Elemento alvo é simplesmente uma entidade geométrica no espaço que sente e responde quando um ou mais elementos de contato o tocam.

As forças de reação nodais de todos os elementos de contatos associados a superfície são acumuladas no nó piloto.

O elemento TARGE170 é controlado por duas opções chaves (keyoptions):

Keyopt 1 = 0 - para elementos de baixa ordem;

Keyopt 2 = 1 - para se controlar as condições de contorno para nós de TARGE rígidos.

### 5.1.3.4 Elemento CONTA174

É um elemento de oito nós aplicado a análise estática ou dinâmica com ou sem atrito. O elemento CONTA174 tem como variáveis de controle (keyoptions):

Keyopt 2 = 0 - assume função penalt mais multiplicador de Lagrange.

Keyopt 6 = 0 - assume matriz de rigidez simétrica.

Keyopt 7 = 1 - o passo de carregamento será dividido se ocorrer muita penetração ou mudança brusca no estado de contato.

Keyopt 8 = 1 evita erro devido a penetração na mudança do campo de contato.

Keyopt 9 = 0 - ignora e inclui o efeito da penetração inicial.

Keyopt 12 = 0 contato unilateral a normal de pressão será igual a zero se ocorrer separação.

As Keyopt 1; 3; 4; 5 ,10 e 11 não são aplicáveis.

## 5.2 SOLUÇÃO

### 5.2.1 Condições de contorno

Na matriz são impedidos os deslocamentos e rotações em todas as direções, para efeito de análise foi considerada como um corpo rígido, e as restrições aplicadas no nó piloto.

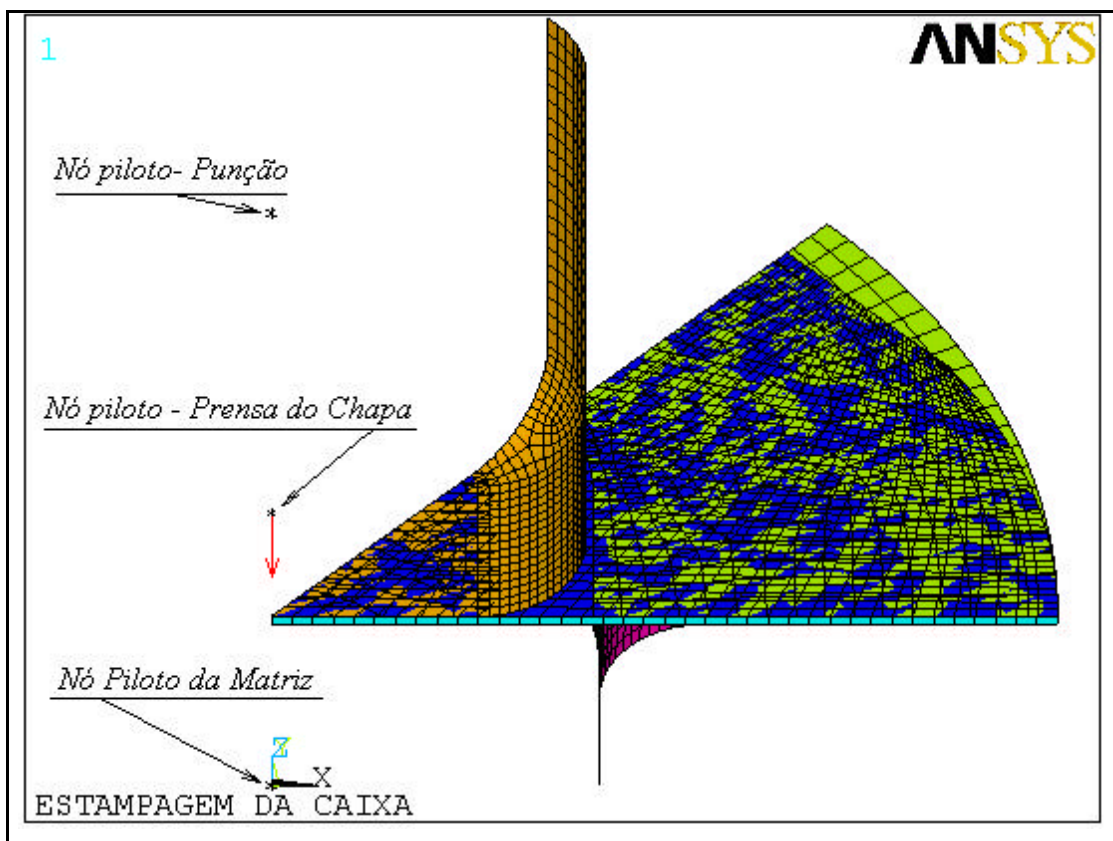


Figura 5.7 - Restrição dos nós pilotos.

Na chapa os nós centrais (pertencentes ao eixo z) tem liberdade de movimento em z, e tem os deslocamentos impedidos nos eixos x e y. Foi aplicado condição de simetria nos planos xz nas faces situadas a  $0^\circ$  e a  $45^\circ$ . Na criação dos nós pilotos, graus de liberdade adicionais (MX, MY e MZ) são aplicados no modelo, porém o elemento VISCO107 da chapa só admite três graus de liberdade (UX, UY e UZ), portanto os graus adicionais tem que ser restringidos para evitar a não convergência.

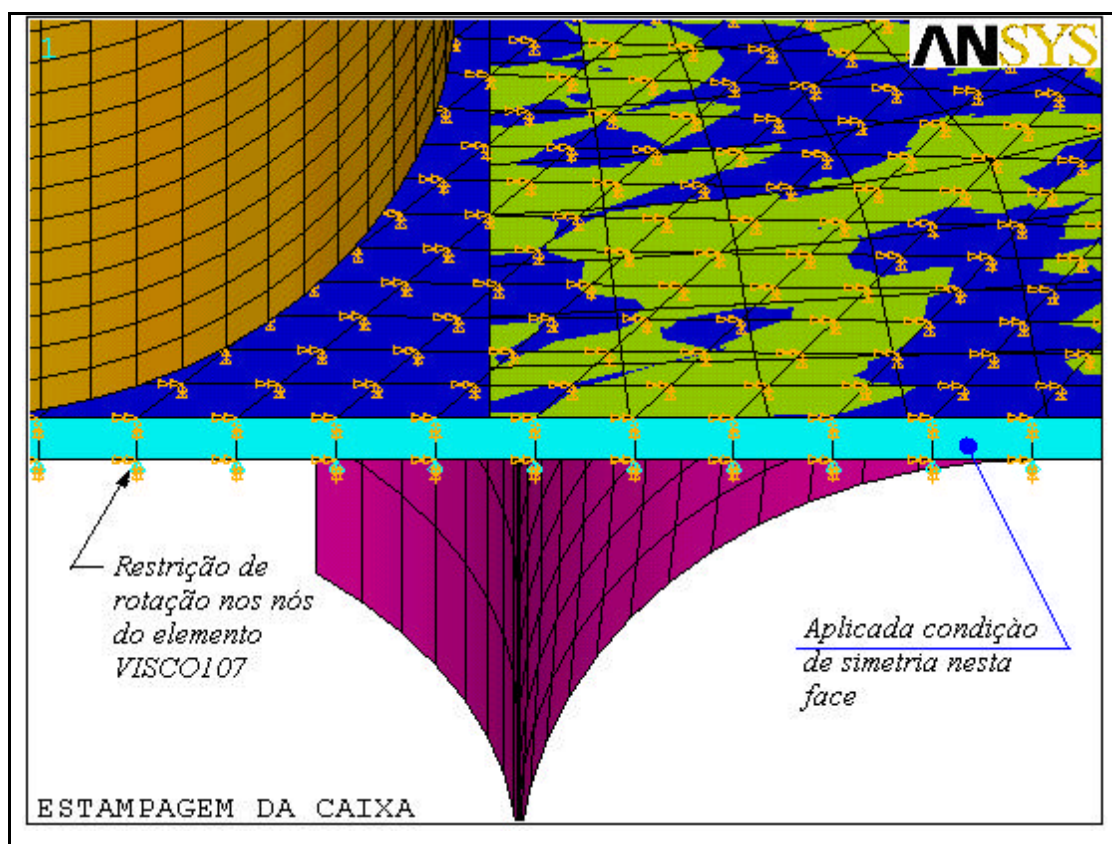


Figura 5.8 - Restrição de rotação nos nós do elemento VISCO107.

No prensa-chapa e no punção os deslocamentos foram impedidos nos eixos “x e y”, ficando livres em “z”. O prensa-chapa e o punção também são considerados corpos rígidos, tendo as restrições aplicadas no nó piloto.

### 5.2.2 Carregamento

A pressão exercida pelo prensa-chapa foi adotada como constante durante todo o processo de estampagem. A pressão calculada é obtida pela ação de uma força aplicada no nó piloto, como a área da chapa no modelo corresponde a 1/8 do protótipo, também a força aplicada deve ser igualmente fracionada. Este parâmetro é alimentado pela variável DIM que estabelece uma tabela do valor de carga x tempo, a força é aplicada gradualmente no primeiro passo de tempo até atingir o valor máximo tabelado, e é mantida constante até atingir o tempo final no segundo passo de tempo.

No punção foi imposto um deslocamento no nó piloto de -37,5 mm no eixo z, em incrementos de 0,05 mm no primeiro passo de tempo até atingir o valor máximo no último passo de tempo e este é alimentado por uma tabela gerada pelo comando de definição de conjuntos de variáveis \*DIM. O punção foi modelado com uma folga de 1,25 mm em relação a chapa, para que nas primeiras interações as tensões de compressão sob o prensa-chapa atinjam o equilíbrio, isto inibe a não convergência.

Tabela 5.1 - Parâmetros de controle de deslocamento e força.

Tempo (TIM)	*DIM(avanço)	*DIM (Força)	Passos de tempo
0 - 1.25	0 - 0	858	1º Passo de tempo
1.25 - 37.75	0 - 37.5	858	2º Passo de tempo

### 5.2.3 Monitorando os nós pilotos

As reações aos esforços dos nós pilotos do punção, da matriz e do prensa-chapas foram monitoradas, aplicando-se o comando MONITOR que grava as reações e deslocamentos dos nós durante todo deslocamento do punção, a partir destes dados são geradas as curvas carga no punção x deslocamento.

MONITOR,Var, Node, Lab, controla e salva os valores obtidos do nó em relação a um campo de variáveis (deslocamento), a cada passo de tempo.

Var - variável de referência, avanço do punção (uz).

Node - número do nó a ser monitorado.



Lab - valor a ser monitorado (UZ,FZ).

#### 5.2.4 Condições de processamento

Para o processamento de uma análise não linear no ANSYS diversos parâmetros de controle devem ser ajustados. Estes parâmetros são ajustados pelos comandos descritos a seguir :

NLGEOM,ON - Inclui os efeitos de grandes deformações em análises estáticas;

SSTIF,ON - ativa o efeito de tensão de rigidez em análise não linear;

AUTOTS,ON - especifica o uso de passo de tempo automático;

NEQIT,25 - determina o número máximo de interações de equilíbrio para se atingir a convergência, se esta não é atingida a solução é abortada;

PRED,ON - ativa um preditor do passo de tempo a cada interação;

NCNV,Kstop,Dlim,Itlim,Etlim,Cplim - Ajusta o término da análise;

Kstop = 2 - termina a análise, mas não a execução do programa se a convergência não é atingida;

Dlim = 0 - Termina a execução do programa se os valores de deslocamento excederem o limite de  $1 \cdot 10^6$ ;

Itlim = 0 - determina o limite de interações máximas acumuladas;

Etlim = 0 - Determina um tempo máximo de processamento para a solução;

Cplim = 0 - Determina um tempo máximo de processamento para a solução;

SOLCONTROL,1,2 – Especifica o uso de algoritmos padrões otimizados para solução não linear;

1- ativa padrões, 2-verifica o estado de contato.

DELTIM,Dtime,Dtmin,Dtmax,Carry – determina os valores dos incrementos do passo de tempo para a análise.

Dtime = 0,05 - tamanho do passo de tempo a ser utilizado varia de 1 à 1/20 do tempo total do passo de carregamento;

Dtmin = 0,005- tamanho mínimo do passo de tempo;

$Dt_{m\acute{a}x} = 0,05$  - tamanho máximo do passo de tempo;

Carry = ON- usa o tamanho final do passo de tempo anterior para início do próximo.

TIME,Time - Determina o tempo total do passo de carregamento.

CNVTOL,Lab,Value,Tol,Norm,Minref – determina o campo de tolerância para o cáculo da convergência.

Lab = F - Determina o parâmetro base para cáculo da convergência, neste trabalho foi utilizado o parâmetro força;

Value = - valor tpico para rótulo da análise, de preferência o mesmo valor do tempo de um passo de tempo para evitar erro devido a interpolao da curva Tensão x deformao;

Tol = 0,05 - valor da tolerância % para o critério força o padrão recomendado  0,005 (0,5%);

Norm = L2 - específica a seleo da norma de cáculo, a norma L2  a padrão SRSS (Raiz Quadrada da Soma dos Quadrados);

Minref = 0,001- o valor mínimo para calcular o valor de referência.

NROPT,FULL,,OFF –especifica as opoes de Newton Raphson em análise esttica ou transiente.

FULL– aplica a utilizao do modelo completo de Newton Raphson atualizando a matriz de rigidez, isto evita problemas de convergência estes são devidos às descontinuidades ocorridas , na mudança do status de contato;

OFF – desliga a malha adaptativa decrescente para contato superfície – superfície.

### 5.2.5 Gerao do loop de carregamento

O deslocamento total do puno  dividido em pequenos intervalos que são aplicados. No intervalo de tempo inicial o puno avança 0,05 mm e as reaoes e tensoes são calculadas em diversas interaoes até que se atinja a convergência (equilíbrio) dentro da tolerância especificada, no intervalo chamando subpasso (substep) ou passo de tempo (timestep), e novo

deslocamento é imposto no modelo e novas interações são processadas até ser atingida a convergência e assim sucessivamente, até atingir o passo de tempo total (determinado na variável TIM) no qual deslocamento final é atingido.

\*DO,Par,Ival,Fval,Inc – gera o loop no processamento, é através deste que os deslocamentos são incrementados.

Par = TIM - Parâmetro de controle do loop

Ival = 00.05 - Valor inicial do sub-passo

Fval = 37,75 - Valor final do passo

Inc = 00.05 - Valor do incremento do passo

\*ENDDO - Determina o fechamento do loop gerado

#### 5.2.6 Passos da Solução

Devido a característica da análise não linear, ser do tipo incremental, ou seja as cargas são aplicadas gradualmente A solução da simulação tem que ser feita em duas etapas passos de tempo.

No primeiro passo de tempo a força é aplicada gradualmente no prensa-chapa até atingir o valor máximo desejado;

No segundo passo de tempo o deslocamento é gradualmente imposto ao nó piloto do punção, que avança até a profundidade desejada. Durante este avanço a força no prensa-chapa é mantida constante.

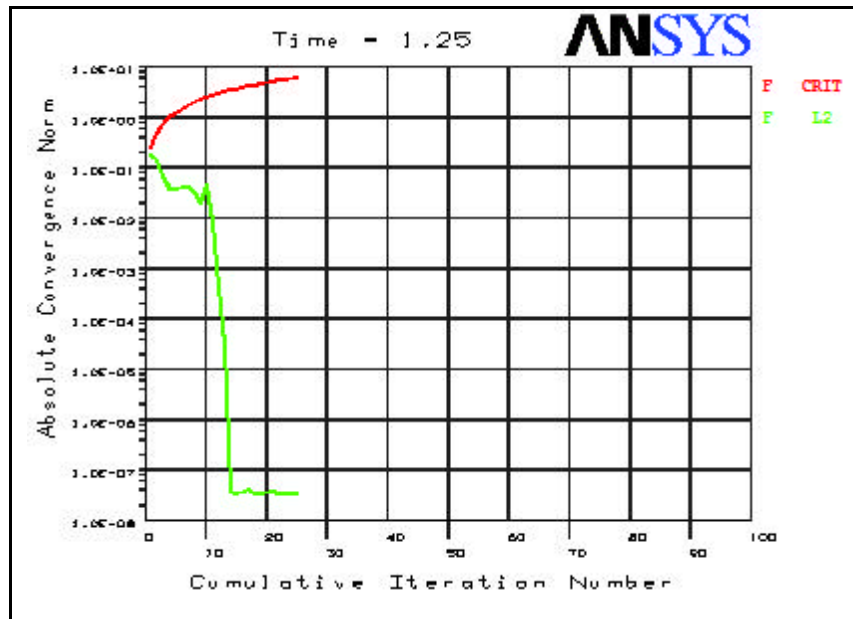


Figura 5.9 - Gráfico do critério convergência do primeiro passo de tempo.

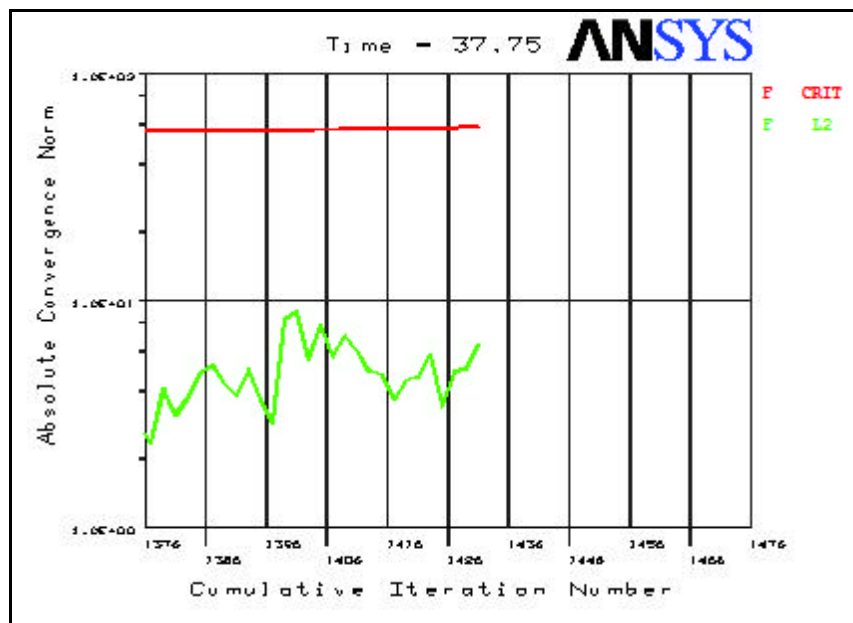


Figura 5.10 - Gráfico do critério convergência do segundo passo de tempo.

### 5.3 PÓS PROCESSAMENTO

Os resultados de uma análise não linear consistem principalmente de deslocamentos nodais, deformações, tensões e reações, estes dados podem ser acessados na forma de tabelas e gráficos no módulo de pós processamento do programa. Os valores das reações no punção monitoradas, são utilizados para

gerar as curvas força x deslocamento e estas são apresentadas no capítulo 7 que contempla os resultados deste trabalho.

Através da distância nodal resultante nos planos de simetria da chapa as deformações na espessura da chapa podem ser analisadas e estas também são apresentadas no capítulo 7.

A estampagem da caixa foi simulada nas seguintes condições.

Tabela 5.2 – Simulações de estampagem realizadas

Nº	Blank Dimensões mm	Força PCH (KN)	Coef. Atrito ( $\mu$ )	Profundidade (mm)
1	102 x 110	785	0,000	37,5
2	102 x 110	12.5	0,075	37,5
3	102 x 110	15.0	0,150	37,5

Tabela 5.3 – Variação do tempo de processamento e força no punção em função do coeficiente de atrito e profundidade.

Nº	Coeficiente de atrito ( $\mu$ )	Profundidade de estamp.(mm)	Tempo de process.( Hs)	Força máx. no punção ( KN)
1	0.000	37,5	5.00	31.94
2	0.075	37,5	5.50	35.84
3	0.150	37,5	5.50	39.80

As simulações finais foram executadas em um computador com as seguintes características: processador Intel Pentium 4, com 2,4 GHz e 512MB de memória RAM. O volume de dados gerados em cada simulação ficou acima de 480 Megabytes, as estatísticas da simulação que contemplam o número de elementos e as condições gerais de processamento são apresentadas no capítulo de apêndice.

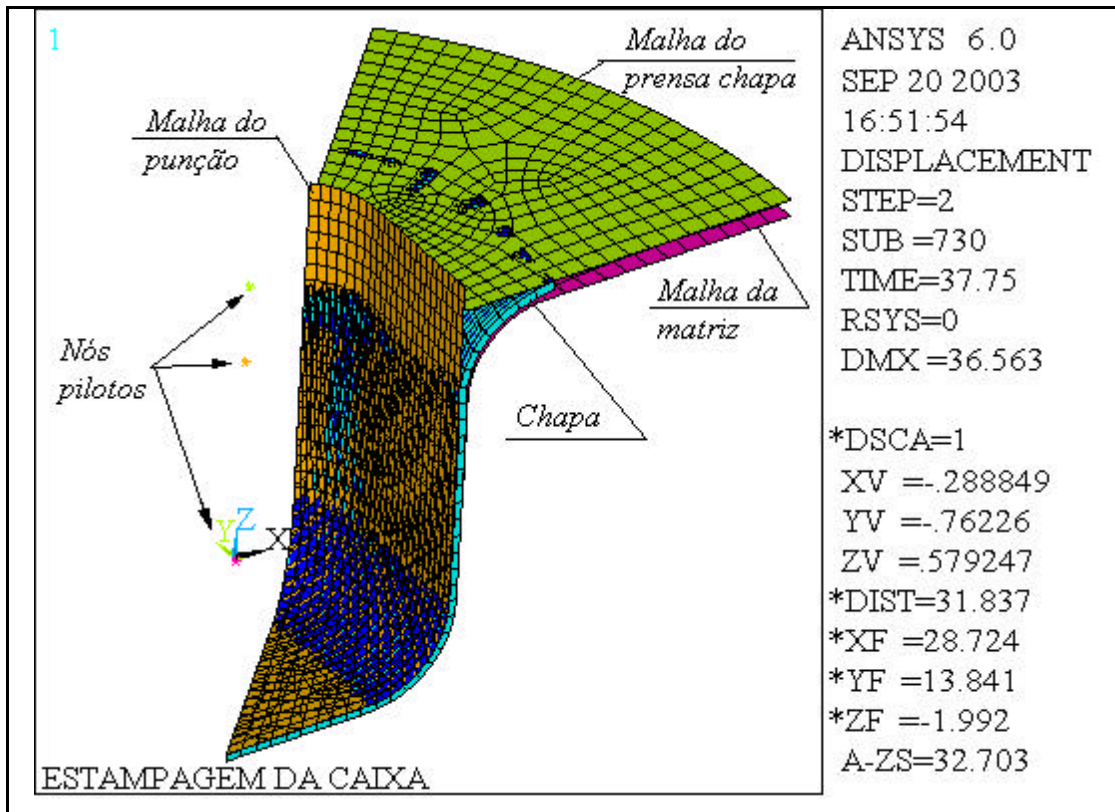


Figura 5.11 - Resultado final da estampagem da caixa.

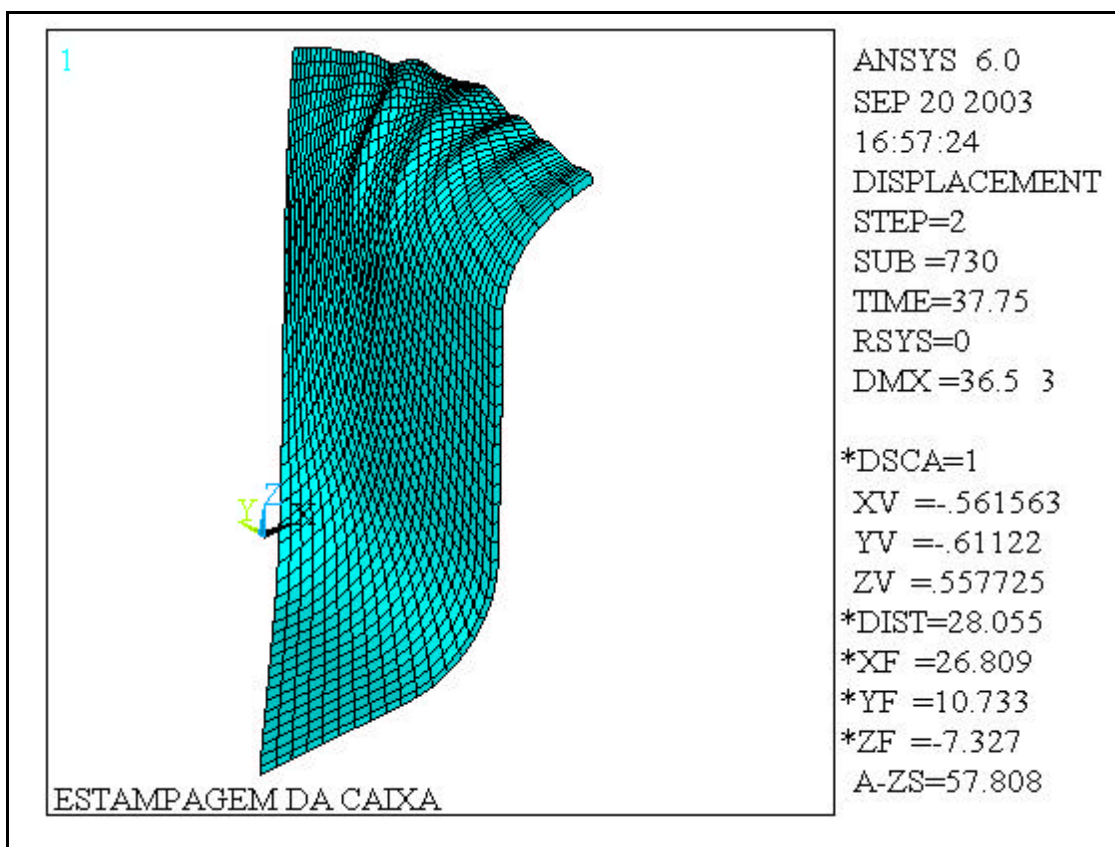


Figura 5.12 - Setor de 1/8 da caixa simulada.

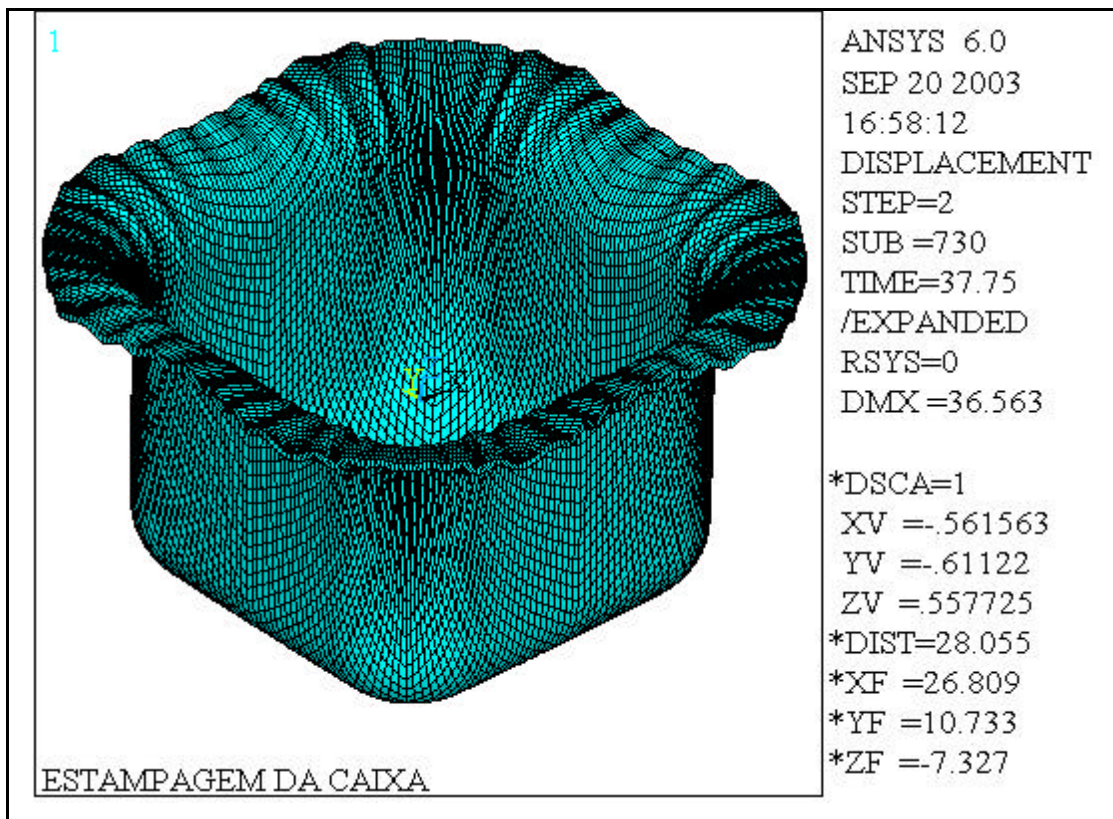


Figura 5.13 - Caixa estampada modelo expandido.

Nas Figuras 5.11 a 5.13 são mostrados os resultados de deformação da malha da chapa, após o avanço do punção até a profundidade de 37,5 mm, após a simulação o setor de chapa pode ser visualizado individualmente sem as malhas da ferramenta, em seguida o modelo é expandido para a visualização completa da caixa. As rugas apresentadas na flange da caixa embora se apresentem bastante altas na realidade não o são, o programa aplica um fator de escala que as aumentam para destacar os locais de formação de rugas.

## Capítulo 6

### 6. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos de estampagem foi executado utilizando-se como prensa a máquina de ensaios de tração e compressão modelo MEN-10.000, pertencente ao Departamento Materiais e Tecnologia FEG-UNESP. Este equipamento possui recursos de controle e medição precisa das cargas e deslocamentos durante o processo, o que é de fundamental importância dado que a força de estampagem foi tomada como parâmetro de comparação e controle.

A capacidade de carga da máquina é de 98,04 KN (10.000 Kgf), equipada com célula de carga e impressora gráfica, controle de velocidade e ampla mesa para fixação de dispositivos.

A chapa utilizada no experimento é de aço carbono classe EEP (Estampagem Extra Profunda), com espessura de 0,75 mm e foram executados ensaios para se levantar as propriedades mecânicas do material.

Em função da capacidade e características da prensa disponível foi calculada as dimensões da caixa e ferramenta. No experimento diferentes condições de estampagem e geometria de blanks foram testados e documentados os resultados.

#### 6.1 Composição química do material da chapa e micrografia.

A chapa empregada no experimento foi fornecida pela Rio Negro S.A. com certificado de Inspeção nº 5411 (vide anexo), sob especificação:

- Chapa fina a frio - NBR-5915-EEP, dimensões 0,75 x 1350 x 3000 mm.

Tabela 6.1 - Composição química (%) e propriedades mecânicas conf. certificado.

C	Mn	P	S	AL	$s_e$	$s_r$	$I$	Dureza
$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	MPa	MPa	%	HB
4	25	18	11	35	193	312	42	45



### 6.1.1 Metalografia

As amostras da chapa retiradas foram embutidas em ebonite, lixadas e polidas com pasta de diamante. As amostras polidas e sem ataque foram fotografadas com aumento de 100 vezes, as fotos digitais foram tratadas e analisadas utilizando o programa IMAGE PRO PLUS para determinar a quantidade de inclusões. Uma imagem característica do material sem ataque, onde se nota pontos de inclusões de alumina é apresentada na Figura 6.1, os resultados da medição de inclusões é apresentada na tabela 6.2.



Figura 6.1 – Pontos de inclusões de alumina no material  
(aumento de 100 X - sem ataque).

Tabela 6.2 – Resultados da medição de inclusões.

Análise Estatística	Metal base (%)	Inclusões(%)
Mínimo	74,82	0,04
Máximo	99,96	25,18
Média	98,89	1,11
Desvio Padrão	3,25	3,25
Área total escaneada ( $\mu\text{m}$ )	Área do campo ( $\mu\text{m}$ )	Nº de campos (fotos)
2,07 .10e7	268521,1	77

Em seguida as amostras foram atacadas com solução de Nital a 1 % e fotografadas. As fotomicrografias foram tratadas no programa IMAGE PRO PLUS e analisadas para se determinar o tamanho de grão, cujos resultados são apresentados na Tabela 6.3.

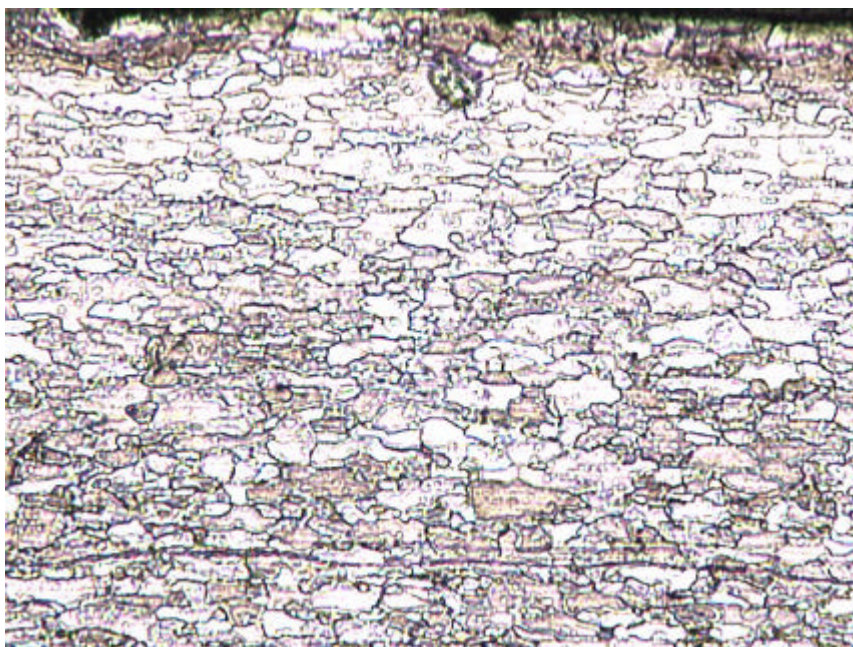


Figura 6.2 – Microestrutura característica da seção transversal da chapa com aumento de 100 X (atacada com Nital).

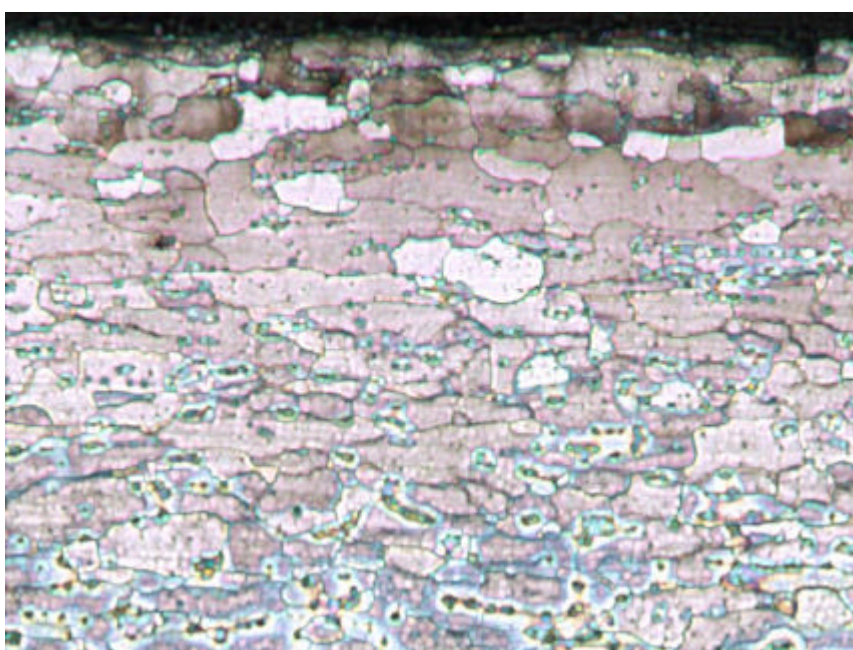


Figura 6.3 – Microestrutura característica da seção transversal da chapa com aumento de 500 X (com ataque de Nital).

Tabela 6.3 – Resultados da medição de grãos efetuada no Image.

Análise Estatística	Tamanho de grão ASTM	Área ( $\mu\text{m}$ )
Mínimo	8,3731	1,6782
Máximo	9,0924	138,73
Média	8,6477	6,6023
Desvio Padrão	0,1571	6,9048

Área total escaneada ( $\mu\text{m}^2$ )	Área do campo ( $\mu\text{m}^2$ )	Nº de campos (fotos)
10740841	268521,09	40

Como se pode observar nas micrografias o material apresenta estrutura cristalina ferrítica, característica de aços baixo carbono. Por ser um aço acalmado ao alumínio, apresenta as inclusões de alumina, que podem ser observadas na Figura 6.1, que se apresentam ao microscópio como partículas negras espaçadas, a medição da quantidade de inclusões na amostra apresentou um valor médio de 1,11 %.

A estrutura do material apresenta grãos finos tamanho ASTM 8,6. Materiais de grãos finos são adequados a estampagem por proporcionarem produtos de melhor acabamento superficial.

## 6.1.2 Propriedades Mecânicas

### 6.1.2.1 Determinação da curva $\sigma \times \epsilon$ real

A curva  $\sigma \times \epsilon$  real fornece uma indicação precisa das propriedades mecânicas do material, na fase plástica, pois leva em consideração as variações das medidas da seção transversal do corpo de prova, que ocorrem durante a deformação plástica, (Souza, 1986).

Para alimentar o programa de simulação foi traçada a curva  $\sigma \times \epsilon$  real, a partir dos ensaios de tração de amostras retiradas no sentido de laminação da chapa.

Os pontos da curva são mostrados na Tabela 6.4 e a curva na Figura 6.4. O alongamento e a resistência do material apresentados no ensaio de tração, comprovam que o material da chapa apresenta excelentes características de estampabilidade.

Tabela 6.4 - Pontos para construção da curva  $\sigma \times \epsilon$  real.

	Valores da curva $\sigma \times \epsilon$			Índices da curva real	
	convencional			$d_R = \ln(1 + e)$	$s_R = s(1 + e)$
	$\epsilon$	F(Kgf)	$\sigma$ (MPa)	$\delta$	$\sigma$ (MPa)
1	0,003761	78,94	84,45	0,0037	82,76
2	0,006268	143,50	150,00	0,0062	150,94
3	0,162970	173,03	180,98	0,0162	183,93
4	0,2630	192,03	200,85	0,0260	206,13
5	0,0376	209,40	219,00	0,0369	227,24
6	0,0752	238,50	249,40	0,0725	268,26
7	0,1128	258,25	270,60	0,1069	315,25
8	0,1504	270,88	283,30	0,1401	325,91
9	0,1880	276,94	289,60	0,1723	344,05
10	0,2257	280,98	293,88	0,2035	360,21
11	0,2633	283,00	296,00	0,2337	373,94
12	0,3008	283,00	296,00	0,2685	387,17
13	0,3385	283,00	296,00	0,2915	396,17
14	0,3761	283,00	296,00	0,3193	407,33
15	0,4137	274,00	286,50	0,3462	405,02
16	0,1413	194,00	202,00	0,3725	293,00

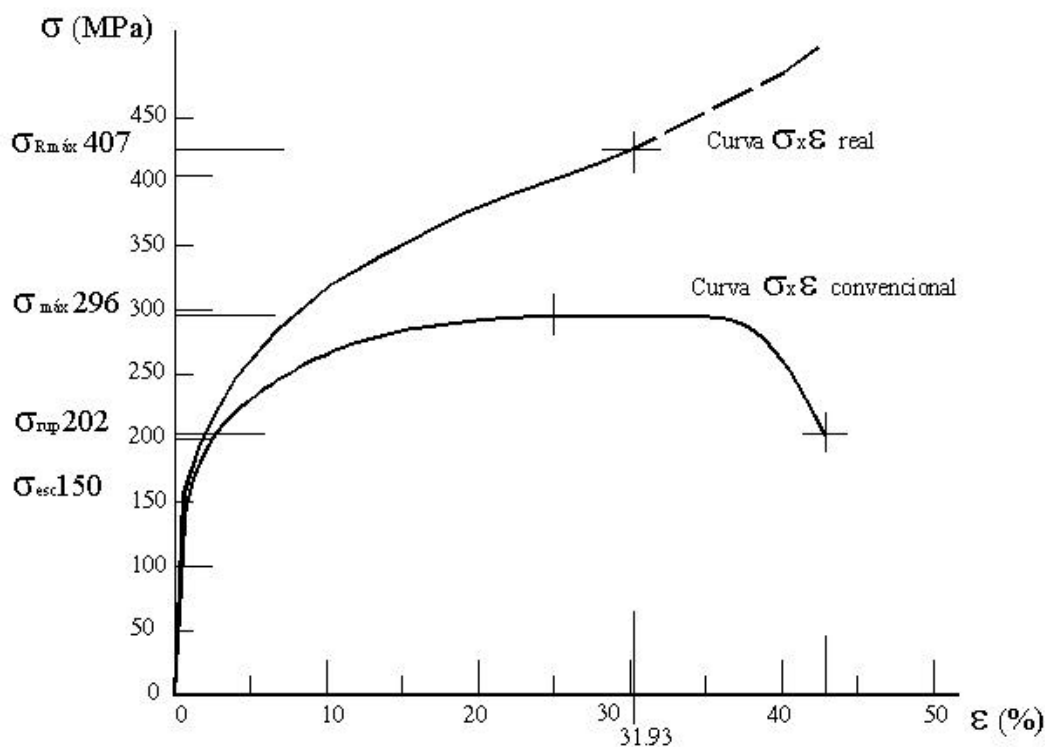


Figura 6.4 - Curvas  $\sigma \times \epsilon$  convencional e real.

### 6.1.2.2 Razão de deformação plástica índice de anisotropia “r”

A razão de deformação plástica “r” é o parâmetro que indica a propriedade mecânica da chapa metálica de resistir à deformação plástica através da espessura quando sujeita a forças trativas. Devido a variação das propriedades elásticas e plásticas apresentada no material de chapas laminadas, o valor de “r” é calculado como a média dos valores tomados em diferentes ângulos em relação a direção de laminação da chapa (Dieter, 1986).

O material foi ensaiado conforme norma ASTM E517 e 96, e o relatório de ensaios se encontra no capítulo de apêndices; os valores de razão plástica e o índice de orelhamento calculados são apresentados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Valores da razão plástica e índice de orelhamento.

$r_m 0^\circ$	$r_m 45^\circ$	$r_m 90^\circ$	$r_m$	$\Delta r$
1.52	1.42	1.76	1,62	0,22

A razão plástica obtida no ensaio ( $r_m=1,62$ ), e o índice de orelhamento ( $\Delta r=0,22$ ) demonstram que o material da chapa apresenta boas características de estampabilidade. Já que para os aços a razão plástica deve variar entre 1 e 2, e quanto mais alto o valor de “ r ” maior resistência do material a diminuição da espessura.

## 6.2 EXPERIMENTO

### 6.2.1 Equipamento de ensaio

Para a estampagem será utilizada a máquina universal de ensaios modelo MEM 10 000, fabricada pela EMIC – Equipamentos Mecânica para Indústria e Construção Ltda., com capacidade máxima de carga 98,04 KN (10.000 Kgf). Equipada com célula de carga de igual capacidade, o equipamento e célula de carga são apresentados nas Figuras 6.5 e 6.6.



Figura 6.5 - Máquina universal de ensaios MEM 10000.



Figura 6.6 – Célula de carga de capacidade 10.000 Kgf.

### 6.2.2 Dimensionamento da caixa e blank

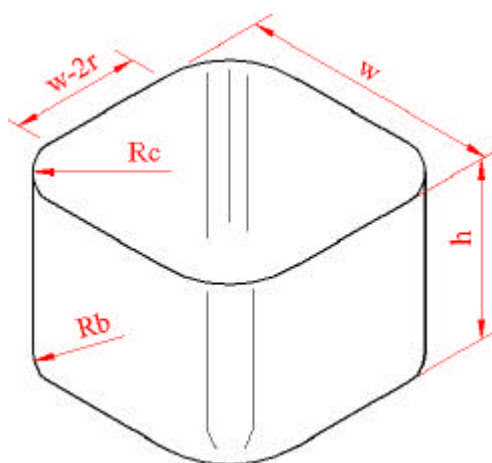


Figura 6.7 – Caixa dimensões principais.

### 6.2.3 Dimensionamento da força de estampagem máxima

Considerando :

- por segurança a utilização no máximo de 50% da capacidade da prensa;
- que  $F_{m\acute{a}x.} = F_{\text{estampagem}} + F_{\text{prensa-chapa}}$ ;
- que a força de estampagem corresponda a 75%, e que a força do prensa-chapa a no máximo 25% da força de estampagem total ;

temos :

$$F_{\text{máx.}} = 98,1 \times 0,50 = 49,05 \text{ KN}$$

$$F_{\text{estampagem}} = 36,79 \text{ KN}$$

$$F_{\text{prensa-chapa}} = 12,26 \text{ KN}$$

#### 6.2.4 Dimensionamento da caixa

Considerando que a força máxima de estampagem ( $F_{\text{máx.}}$ ) deve ser menor ou igual a força necessária para cortar o fundo da caixa temos:

$$F_{\text{estamp}} \leq s_{\text{rup.}} \cdot P \cdot t \quad (6.1)$$

Onde “P” é o perímetro do fundo da caixa, “t” é a espessura do material e “ $s_{\text{rup.}}$ ” é a tensão de ruptura do material conforme certificado.

Logo:

$$P \leq \frac{F_{\text{máx. estamp.}}}{s_{\text{rup.}} \cdot t} \Rightarrow P \leq \frac{36,79 \cdot 10^{-3}}{312 \cdot 10^6 \cdot 0,75 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow P \leq 0,16 \text{ m}$$

Conforme recomendações da ASM Metals HandBook, 1969, para a relação raio do canto da caixa ( $R_c$ ) x Altura da caixa ( $h$ ) temos :

- para  $R_c$  de 3/8” a 1/2”, recomenda-se altura  $h$  da caixa de até 2”

Adotando-se : o raio do canto da caixa  $R_c = 10 \text{ mm}$ , raio do fundo da caixa  $R_b = 7,5 \text{ mm}$ ,  $W$  = largura do blank, temos:

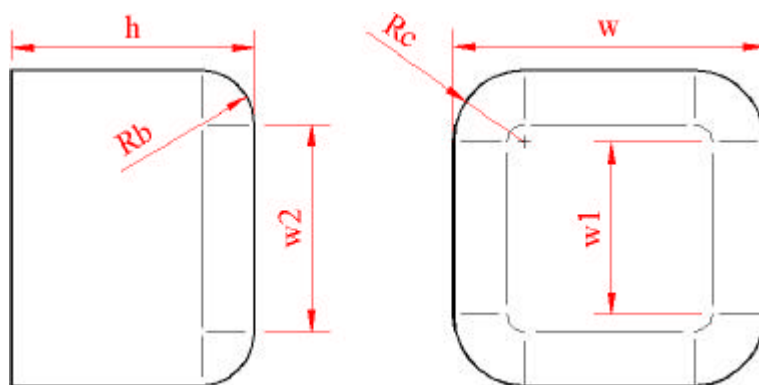


Figura 6.8 - Dimensões do fundo da caixa.



$$w1 = (P - 2p.R_c)/4 \quad (6.2)$$

$$w1 = (0,16 - 2p \cdot 0,01)/4 \Rightarrow w1 = 0,024m$$

$$w = w1 + Rc \quad (6.3)$$

$$w = 0,024 + 0,020 \Rightarrow w = 0,044m$$

$$w2 = P - 2.R_b \quad (6.4)$$

$$w2 = 44 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 7,5 \cdot 10^{-3} \Rightarrow w2 = 0,029m$$

$$W = w1 + R_b p + 2(h - R_b) \quad (6.5)$$

$$W = 29 \cdot 10^{-3} + 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot p + 2 \cdot 36,5 \cdot 10^{-3} \Rightarrow W = 125,6 \cdot 10^{-3} m$$

### 6.2.5 Dimensionamento do blank segundo ASM Metals HandBook

Inicialmente o blank foi dimensionado a partir das tabelas e recomendações da ASM, na qual se calculou um blank para atingir o máximo de altura para a caixa. O dimensionamento deste blank é apresentado a seguir.

#### 6.2.5.1 Cálculo da taxa de compressão nos cantos da caixa r/w

$$\text{taxa comp.} = \frac{R_c}{w} \Rightarrow \frac{10 \cdot 10^{-3}}{44 \cdot 10^{-3}} = 0,23$$

#### 6.2.5.2 Cálculo da resistência ao dobramento e enrugamento t/W

$$\text{Resist. ao dob.} = \frac{0,75 \cdot 10^{-3}}{125,6 \cdot 10^{-3}} \cdot 100 = 0,60\%$$

#### 6.2.5.3 Cálculo da altura máxima de estampagem $h_{\max}$

Da tabela 2.3 obtemos a taxa de profundidade máxima para uma operação, onde

$(R/w) = 0,23$  e  $(t/W) = 0,60\%$ , temos  $\frac{h}{w} = 0,76$ , logo:

$$h_{\max} = 44 \cdot 10^{-3} \cdot 0,76 = 33,5 \cdot 10^{-3} m$$

Recalculando a largura do blank temos:

$$W = 29.10^{-3} + 7,5.10^{-3} \cdot p + 2.26.10^{-3} \Rightarrow W = 104,5.10^{-3} m$$

Aplicando os valores de  $(h/w)$  e  $(R/w)$  na Figura 2.6, observamos que a intersecção das retas está na área “C”, portanto os passos de cálculo para o dimensionamento do blank conforme ASM são :

#### 6.2.5.4 Cálculo da largura para a parede lateral e raio inferior

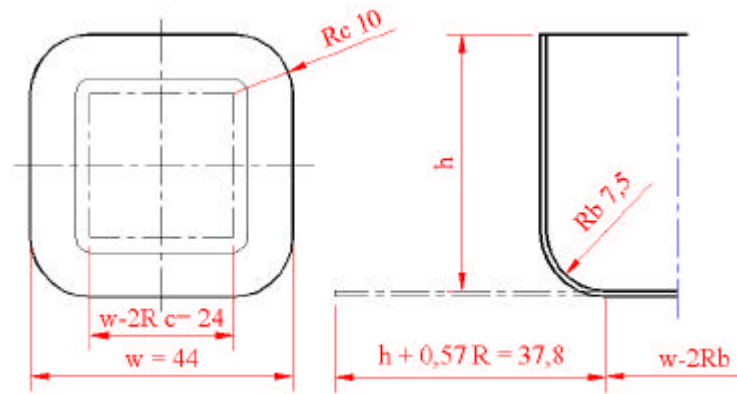


Figura 6.9 – Fundo e paredes da caixa.

$$L = h + 0,57rb \quad (6.6)$$

$$L = 33,5.10^{-3} + 0,57.7,50.10^{-3} = 37,8.10^{-3} m$$

#### 6.2.5.4 Cálculo do raio $R_{cb}$ do canto do blank

$$R_c = \sqrt{R_c^2 + 2hR_c - 0,86R_b \cdot (R_c + 0,16R_b)} \quad (6.7)$$

$$R_{cb} = \sqrt{(10.10^{-3})^2 + 2 \cdot (33,50.10^{-3} \cdot 10.10^{-3}) - 0,86 \cdot 7,5.10^{-3} \cdot (10.10^{-3} + 0,16 \cdot 7,5.10^{-3})}$$

$$\Rightarrow R_{cb} = 24,65.10^{-3} m$$

#### 6.2.5.6 Cálculo do raio corrigido

$$R_{cc} = R_{cb} \left[ 0,074(R_{cb} / 2R_c)^2 + 0,982 \right] \quad (6.8)$$

$$R_c = 24,65.10^{-3} \cdot [0,074(24,65.10^{-3} / 2 \cdot 10.10^{-3})^2 + 0,982] \Rightarrow R_c = 26,63.10^{-3} m$$

### 6.2.5.7 Cálculo do redutor das paredes laterais

Para compensar a compressão nas paredes, o valor de  $y$  da formula é obtido na

tabela 6.6 
$$.hw = \frac{y \cdot R_{cb}^2}{(w - 2R_c)} \quad (6.9)$$

Tabela 6.6 - Fator “y” para raio do canto do blank

Fator “y” para cascas com taxa h/w de :				
r/w	0,30	0,40	0,50	0,60
0,10	...	0,15	0,20	0,27
0,15	0,08	0,11	0,17	0,20
0,20	0,06	0,10	0,12	0,17
0,25	0,05	0,08	0,10	0,12
0,30	0,04	0,06	0,08	...

Onde temos para um fator  $r/w = 0,20$  e  $h/w = 0,6$  temos  $y = 0,17$

Logo: 
$$hw = \frac{0,17 \cdot (24,65 \cdot 10^{-3})^2}{(44 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3})} \Rightarrow hw = 4,30 \cdot 10^{-3} m$$

### 6.2.5.8 Desenho do blank

Com os resultados, podemos desenhar o blank .

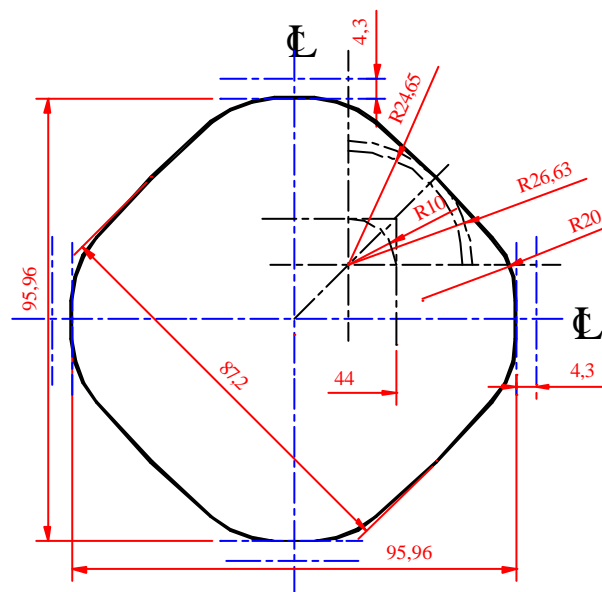


Figura 6.10 – Medidas do blank para uma caixa 44 x 44 x 33,5 mm.

### 6.2.6 Força exercida pelo prensa-chapa

Conforme ASM 1969, recomenda-se para chapas de aço uma pressão de 0,98 MPa a 1,96 MPa no prensa-chapa, tomando a média destes valores e calculando a área da chapa sujeitada sob o prensa chapa temos:

$$\text{Área livre sob o PCH} \Rightarrow A_f = 3,22 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\text{Área do blank} \Rightarrow A_b = 6,70 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\text{Área sob o prensa-chapa} = 6,70 \cdot 10^{-3} - 3,22 \cdot 10^{-3} = 3,48 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

temos:

$$P_{PCH} = 1,47 \cdot 10^6 \cdot 3,48 \cdot 10^{-3} \Rightarrow P_{PCH} = 5,11 \text{ KN (521 kgf)}$$

Tabela 6.7 – Parâmetros da estampagem.

Parâmetros da estampagem			
	Dimensões (mm)	Raio fundo (mm)	Raio da Lateral (mm)
Caixa	45,5 x 45,5 x 44	7,5	10
Blank	1 x 97 x 97	Conforme figura 6.10	
Punção	44 x 44 x 55	7,5	10
Matriz	16 x 140 x 140	7,5 (entrada)	10
Profundidade de estampagem		33,50 mm	
Coeficiente de atrito estático		de 0,05 à 0,15	
Pressão no prensa-chapa		5,11 KN	
Velocidade do punção		10 mm/mim	

### 6.2.7 Ferramenta

A ferramenta construída especialmente para o experimento é dotada de colunas guias e batente com buchas para assegurar que cargas axiais interferissem nos resultados ou danificassem a célula de carga.

A ferramenta apresentada na Figura 6.11 é constituída de três subconjuntos, sendo:

- Base- é composto pela base, colunas, tirantes e a mesa e matriz.
- Prensa-chapa- é composto por duas placas entre as quais estão montadas quatro molas de poliuretano .
- Punção- que está montado no batente juntamente com as buchas guias e espiga.



Figura 6.11- Foto da ferramenta para estampagem da caixa - peças .

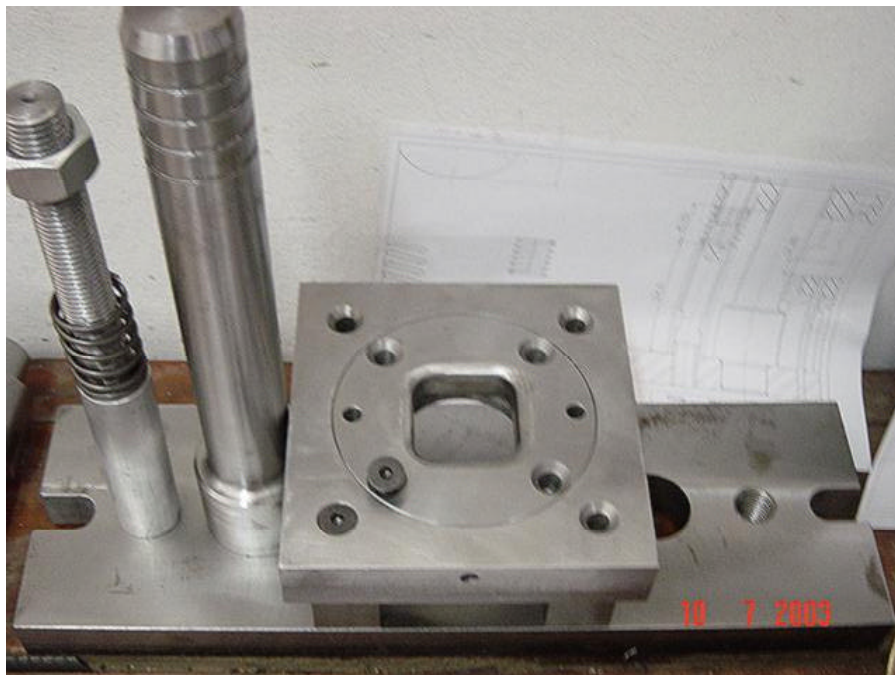


Figura 6.12 – Foto da ferramenta para estampagem da caixa - matriz.

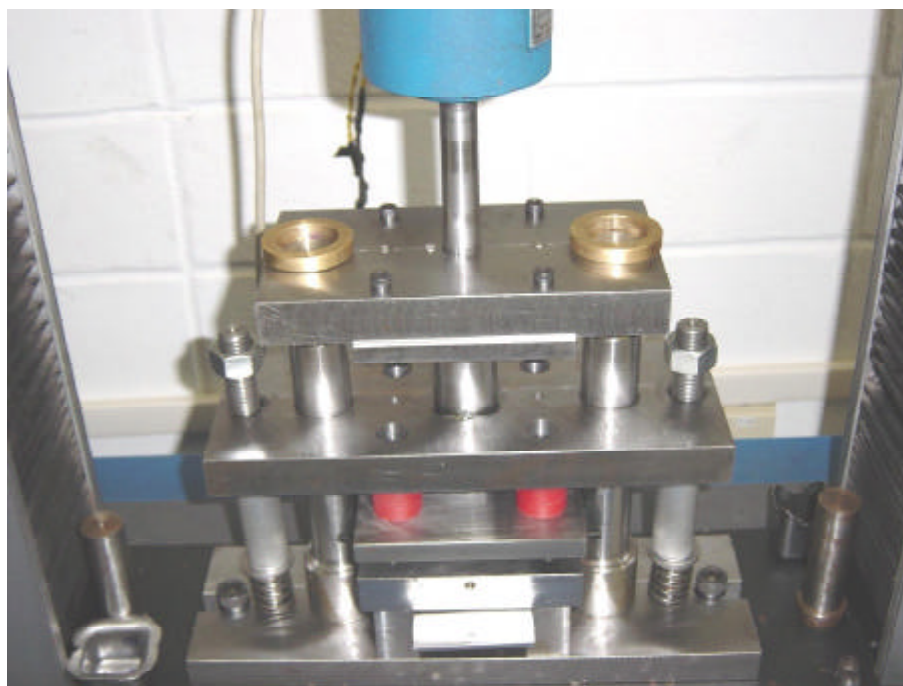


Figura 6.13 - Foto da ferramenta para estampagem da caixa – prensa chapa.

Todos os detalhes de dimensionamento e os desenhos de fabricação da ferramenta se encontram no Apêndice C

## 6.2.8 Experimento

No experimento foram feitos vários testes buscando determinar a altura máxima da caixa, a melhor forma de blank e a força aplicada no prensa-chapa.

A altura máxima atingida foi de 39,5 mm, com o blank que é mostrado na Figura 6.14, com uma flange de aproximadamente 2 mm. Para a carga aplicada no prensa-chapa o melhor valor obtido foi de 6,86 KN (700 Kgf).

A partir destes resultados foram preparados novos blanks e estampados para a obtenção dos dados da força de estampagem, geometria final e espessura das paredes da caixa. Dois tipos de lubrificantes foram empregados, três caixas foram estampadas com a aplicação de graxa grafitada e outras três com graxa a base de sabão de lítio. A altura atingida média de 37,5 mm e flange média de 2,50 mm.

### 6.2.8.1 Corte e preparação do blank

Os diferentes blanks e condições de que foram testadas estão descritas no capítulo de apêndice, o formato do blank otimizado obtido nestes testes foi o empregado para a estampagem da caixa e com flange é apresentado na Figura 6.14.

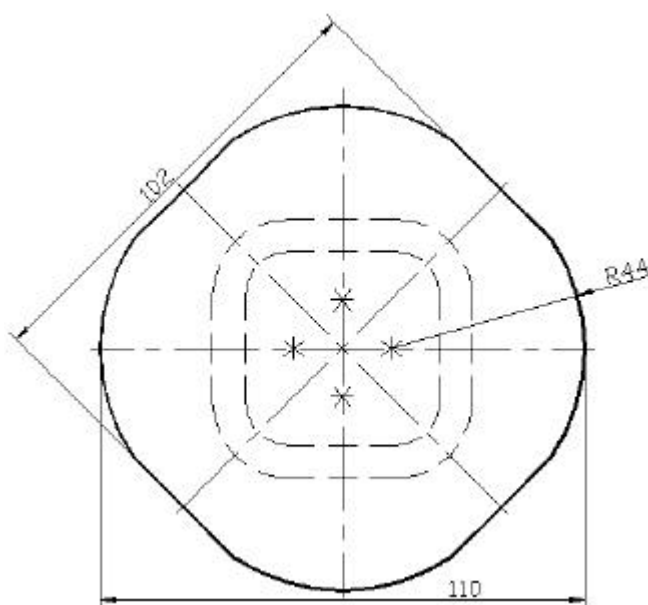


Figura 6.14 – Blank otimizado.

#### 6.2.8.2 Gravação dos círculos no blank a chapa

Para a medição da deformação da espessura da chapa e deslocamento radial, nos blanks cortados foram traçados círculos concêntricos igualmente espaçados (3 mm), os traços foram riscados levemente para minimizar sua influência nos resultados.

#### 6.2.8.3 Lubrificação

A estampagem profunda é impossível sem o emprego de lubrificação. Na prática o emprego de lubrificantes depende de “try-outs”. Se ocorrer desgaste excessivo ou adesão um lubrificante melhor é aplicado. A seleção do lubrificante é baseada em primeiro na habilidade de prevenir enrugamento ou rasgamento durante a operação, também é influenciado pela facilidade de aplicação e remoção. Em geral quanto mais eficaz um lubrificante mais difícil sua remoção elevando os custos do processo (METALS HANDBOOK, 1969).

Nos experimentos dois tipos de lubrificantes foram testados nas superfícies de contato, a

- Graxa RETINAX-WB-SHELL - a base de sabão de lítio com óleos minerais;
- Graxa Grafitada- POWER – POWER BRIL Ind. Com. Ltda. - a base de sabão de cálcio e grafite, aplicação até 90° C , ponto de gota 115° C.

#### 6.2.8.4 Procedimento de estampagem

Preparação - após montagem da célula de carga e ferramenta na máquina de ensaio, foi executado teste em vazio para verificar e quantificar possíveis interferências relativas a alinhamento e/ou atrito entre as partes.

Lubrificação - o lubrificante foi aplicado com o auxílio de uma trincha no punção, matriz e prensa-chapa e blank.

O blank cortado conforme a Figura 6.14 e lubrificado é colocado sobre a matriz onde é centralizado pelos batentes montados na ferramenta.

Em seguida o prensa-chapa é baixado e aplicada a carga de compressão que deformará as molas de poliuretano até atingir a carga desejada de 700 Kgf.



O prensa-chapa é fixado por meio das porcas, e a distância entre as placas do prensa-chapa são verificadas com auxílio de paquímetro, a carga é mantida constante durante todo experimento.

O punção é regulado para deslocar-se com uma velocidade de 10 mm/min, os valores da reação e deslocamento são apresentados no painel digital e o gráfico impresso em papel. A carga máxima atingida é anotada, e a profundidade do atingida pelo punção é controlada de acordo com a condição estudada.

Após o recuo do punção as molas de poliuretano são aliviadas, o prensa-chapa é afastado e o produto extraído. Quando a caixa é estampada com flange, esta tende a aderir nas paredes da matriz, a retirada se dá pela ação de um extrator.

Na estampagem completa da caixa o punção avança até ultrapassar completamente a matriz, dois batentes extratores são acionados manualmente abraçando o punção, que então é recuado ficando o produto retido nos batentes.

As caixas obtidas são apresentadas nas Figuras 6.15 e 6.16.



Figura 6.15 – Foto da caixa estampada.



Figura 6.16 – Foto da caixa -setores.

Medições - Três caixas foram medidas nas grades de referência externas, em cada um dos eixos de simetria da peça ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $270^\circ$  e  $315^\circ$ ), com o uso altímetro digital, a partir da média dos pontos obtidos pode-se traçar o perfil médio da caixa nos eixos. Os pontos obtidos do perfil são apresentados no capítulo de apêndice D nas tabelas D.3 e D.4

Para a medição da espessura, três caixas foram seccionadas nos eixos de simetria resultando oito segmentos cada uma, as superfícies de corte foram cuidadosamente rebarbadas e lixadas. Na medição foi utilizado um paquímetro digital, com precisão de 0,01 mm, o uso de micrômetro se tornou inviável devido as formas curvas dos setores obtidos. As medidas de espessura foram tomadas nas linhas das grades marcadas, foi então calculada a média dos valores de espessura para os eixos no centro da face reta e nos eixos no centro do raio dos cantos. As tabelas D.5 e D.6 com os resultados das medições podem ser observadas no capítulo de apêndice D e as curvas que representam as deformações na espessura em relação a posição radial inicial são apresentadas no capítulo 7.

## CAPÍTULO 7

### 7. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo os resultados obtidos nas simulações e nos experimentos serão apresentados e discutidos. Estes serão apresentados na forma de curvas relacionando a força aplicada no punção pelo deslocamento do mesmo e as espessuras e deformações na espessura da chapa em relação a posição radial inicial.

A condição da estampagem a ser analisada foi baseada nos experimentos práticos que determinaram as melhores condições para o processo, em que a forma otimizada do blank e força no prensa-chapa foram determinadas.

#### 7.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO.

##### 7.1.1 Curvas de força aplicada x deslocamento do punção.

Durante a simulação a reação ao deslocamento aplicado no punção foi monitorada a cada interação de equilíbrio, os dados diretos obtidos se referem a força necessária a estampagem de um oitavo da caixa, portanto se fez necessário a sua multiplicação por oito para se obter a carga total, e então foi montada a curva força x deslocamento nas três condições de atrito simuladas que são apresentadas superpostas na Figura 7.1.

Nesta figura podemos observar que os valores de máximo das curvas aumentam de acordo com o coeficiente de atrito adotado:

- 31,94 KN - simulação com coeficiente de atrito igual zero;
- 35,84 KN - simulação com coeficiente de atrito igual a 0,075;
- 39,86 KN - simulação com coeficiente de atrito igual a 0,15.

O valor da força máxima de estampagem obtido com coeficiente de atrito igual a 0,15 foi a que mais se aproximou do valor obtido experimentalmente.

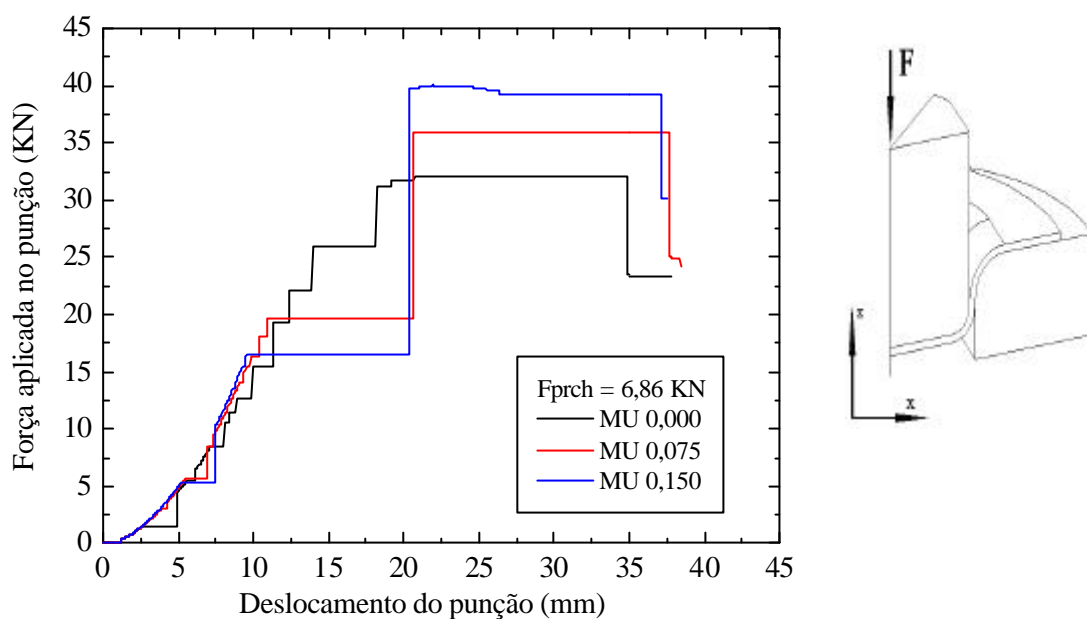


Figura 7.1 - Força x deslocamento do punção (EF).

A determinação da deformação na espessura foi feita a partir da identificação dos pares de nós e sua posição inicial em cada face de simetria da chapa, os dados de deslocamento nodal, foram utilizados para se calcular a posição final de cada nó e desta a espessura do material para cada par nodal. Os dados obtidos foram inseridos em uma planilha no EXCEL 97, os resultados então transferidos para o programa ORIGIN para a construção das curvas. Este procedimento se faz necessário uma vez que o elemento utilizado não apresenta o resultado da variação da espessura automaticamente. As planilhas com os dados para cálculo das deformações se encontram no capítulo de apêndices, tabelas D.7 e D.8

### 7.1.2 Espessura e deformações na espessura da chapa simulada

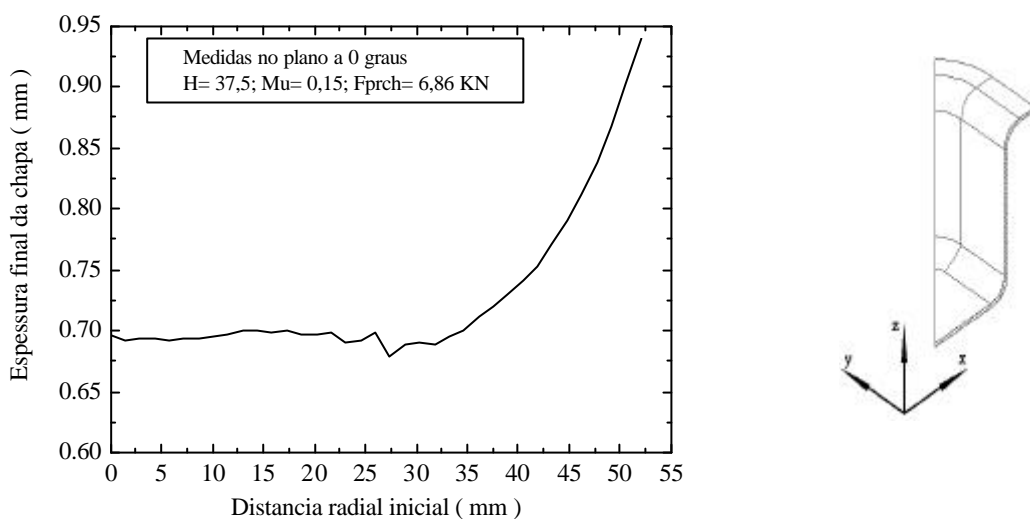


Figura 7.2 - Espessuras médias da chapa no plano a  $0^\circ$  (EF).

Na Figura 7.2 podemos observar a espessura da chapa, no centro das paredes planas (plano  $xz$ ) em relação a sua posição radial inicial, partindo-se do centro da caixa nota-se que a chapa sofre uma redução de espessura devido ao estiramento do material na região entre 0 e 20 mm que corresponde ao fundo da caixa, esta redução se acentua na região após o raio do fundo, entre 22 e 25 mm, esta é a região crítica aqui o material está submetido a um estado de deformação plana que o alonga e reduz sua espessura, as rupturas observadas nos experimentos se deram nesta região. Na região das paredes, entre 25 e 33 mm a espessura permanece abaixo de 0,70 mm e na região seguinte no raio de curvatura da flange aumenta gradativamente devido a compressão do material no flange da caixa.

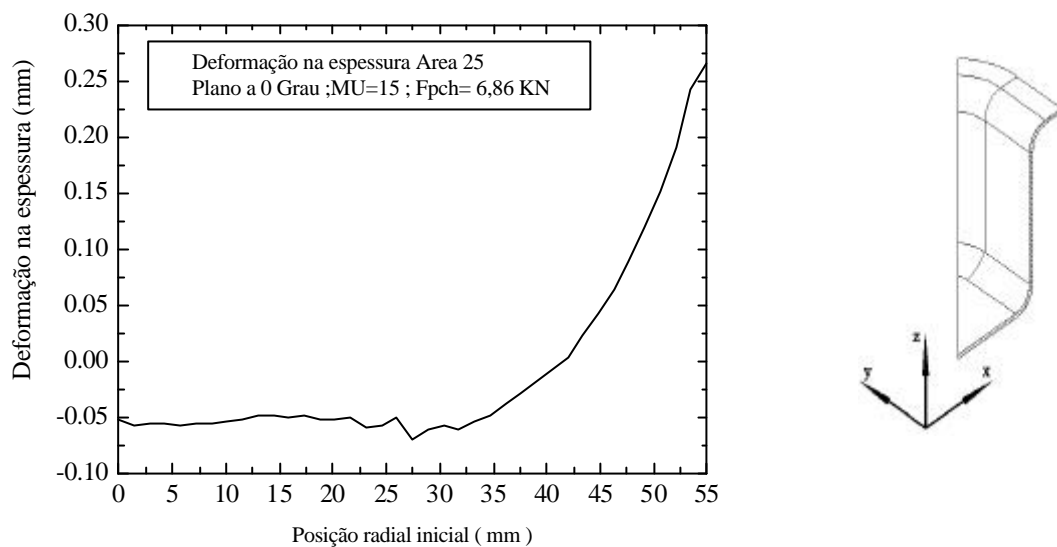


Figura 7.3 - Deformações na espessura do plano a  $0^\circ$  (EF).

A Figura 7.3 apresenta os valores de deformação na espessura da parede que apresenta uma redução máxima de 0,075 mm e um aumento da espessura máximo de 0,25 mm.

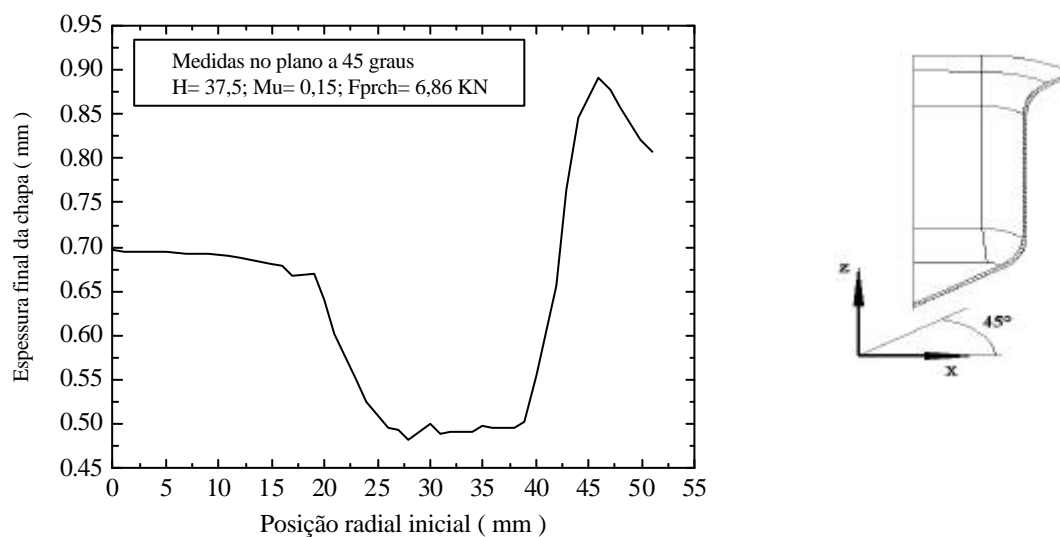


Figura 7.4 - Espessuras no plano a  $45^\circ$  (EF).

Na Figura 7.4 podemos observar a espessura da chapa, no centro do raio do canto da caixa (plano a  $45^\circ$  em relação ao plano XZ) tomando como referência sua posição radial inicial. Percebe-se que na região do fundo da caixa, entre 0 e 20 mm, a redução de espessura é compatível com a observada no plano do centro das paredes. A redução na região do raio do fundo e logo após este bem como na parede do canto foram bastante severas, ficando bem acima do esperado.

Na região do raio da flange o material apresenta um aumento de espessura devido a compressão do material na entrada na matriz e após atingir um ponto de máximo novamente apresenta uma redução devido as forças trativas na periferia da flange.

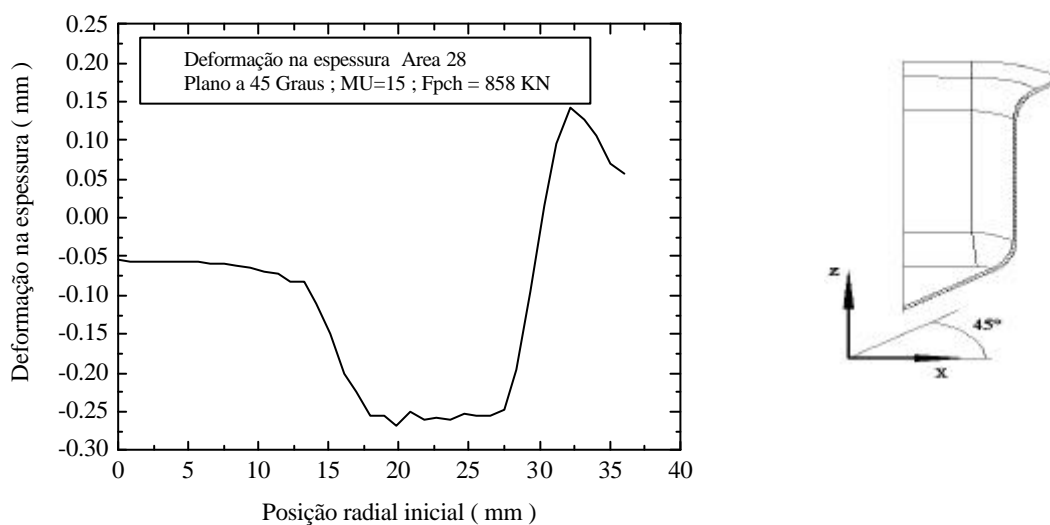


Figura 7.5 - Deformações na espessura do plano a  $45^\circ$  (EF).

Na Figura 7.5 podemos observar diretamente os valores de redução da espessura da chapa, em que a redução máxima apresentada foi de 0,27 e o aumento máximo da espessura atingiu 0,15 mm.

### 7.1.3 Níveis de tensões e deformações resultantes

As tensões resultantes no material são apresentadas graficamente pelo programa onde os diferentes níveis de tensão através de uma escala de cores aplicada diretamente no modelo. As tensões equivalentes de Von Mises são apresentadas nas Figura 7.6 e 7.7.

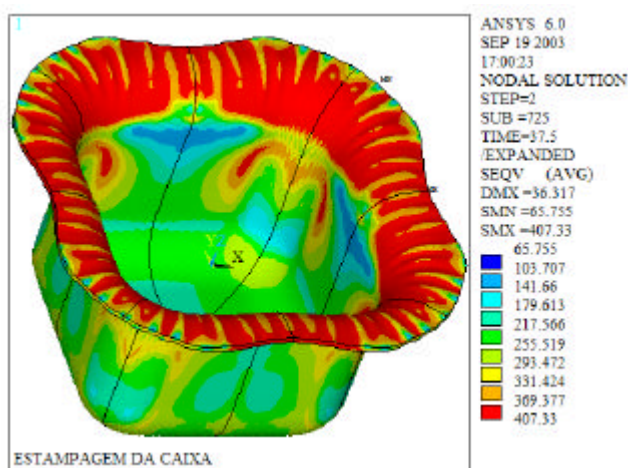


Figura 7.6 - Tensões de Von Mises nas paredes da caixa (EF).

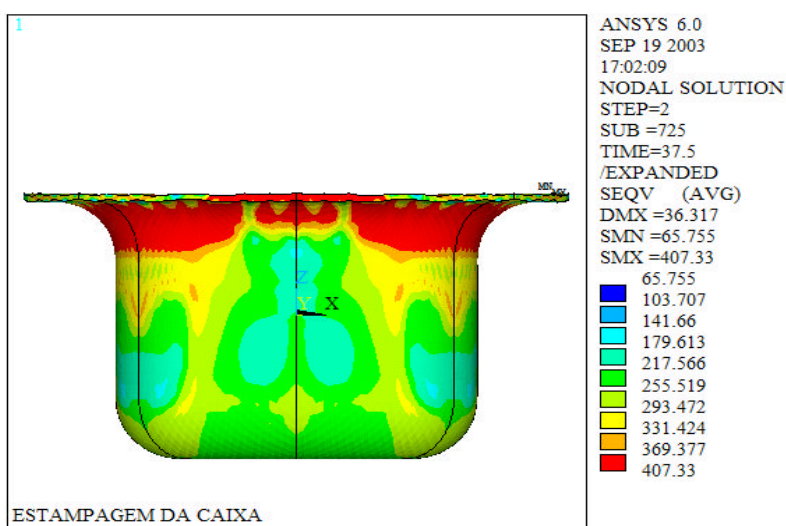


Figura 7.7 - Tensões de Von Mises – perfil da caixa (EF).



Nas Figuras 7.8 e 7.9 podem-se observar a distribuição da intensidade das tensões equivalentes de Von Mises, a região que apresenta uma maior concentração de fica localizada no raio do flange e no seu raio, o que pode proporcionar a formação de rugas nesta região.

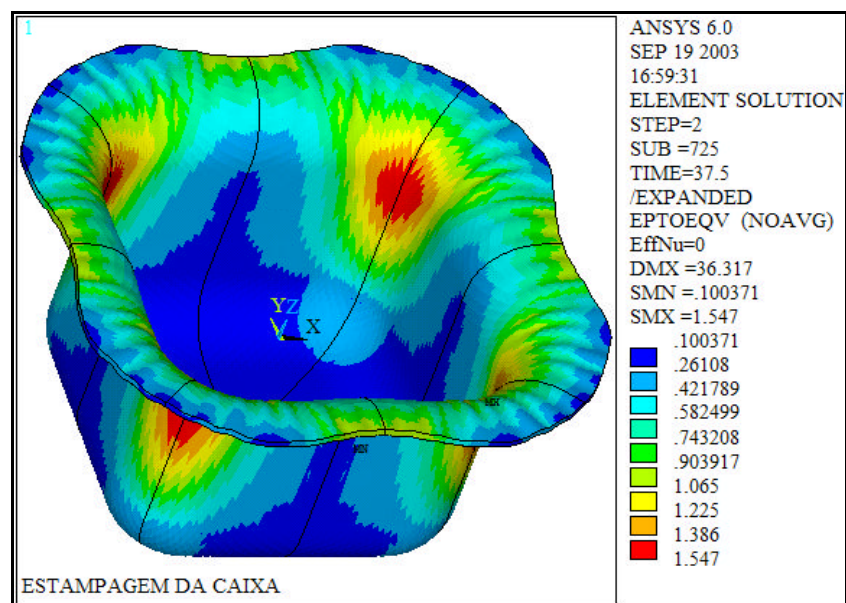


Figura 7.8 - Deformações de Von Mises (EF).

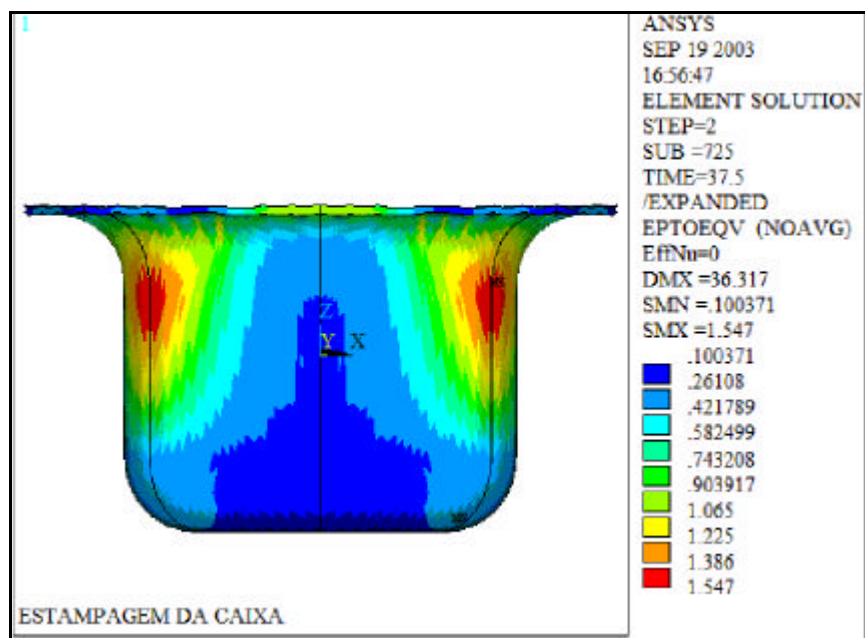


Figura 7.9 - Deformações de Von Mises no perfil da caixa (FE).

Nas Figuras 7.8 e 7.9 a distribuição das deformações equivalentes na caixa podem ser avaliadas, nota-se que as regiões que apresentam a maior intensidade de deformações se situa na região do raio do canto da caixa, conforme já apresentado nas curvas das Figuras 7.4 e 7.5, a região na cor azul marca a diminuição de espessura no fundo subindo em direção ao centro das paredes. A distribuição de deformações apresentada nas Figuras 7.8 e 7.9 concordam com os valores apresentados na anteriormente no parágrafo 7.1.2.

## 7.2 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO EXPERIMENTO

### 7.2.1 Curvas da força aplicada x deslocamento do punção

As curvas de força x deslocamento do punção foram obtidas a partir da média de três experimentos executados em cada condição de lubrificação adotada.

A estampagem com lubrificação de graxa grafitada apresentou melhor desempenho com um valor de força máxima de 47,2 KN, menor que na condição de lubrificação com graxa a base de sabão de lítio.

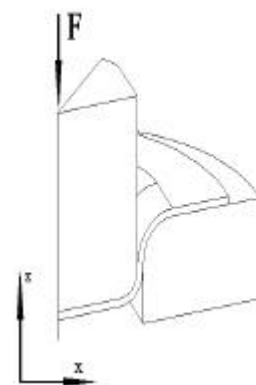
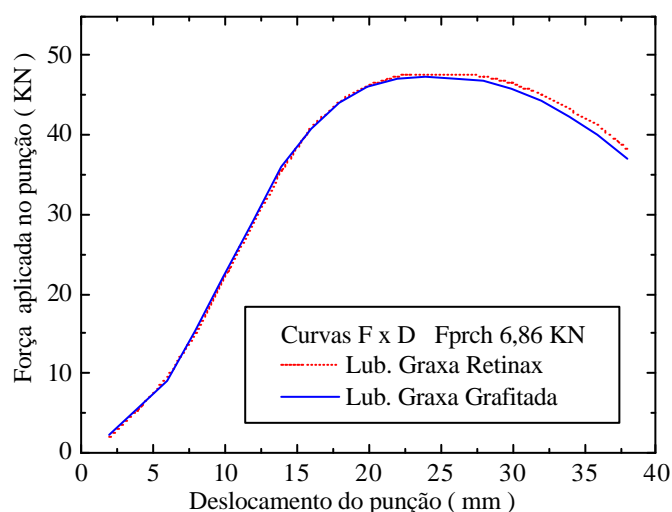


Figura 7.10 - Força x deslocamento do punção (EXP).

Nas curvas apresentadas na Figura 7.10 vemos que a força aplicada no punção atinge seu ponto de máximo entre 20 e 28 mm, nesta região o material punção já se encontra dentro da matriz e as deformações crescem continuamente, a partir do que inicia uma queda devido a diminuição do tamanho da flange, que diminui o esforço de compressão do material e a área de atrito sob o prensa-chapa. As rupturas ocorridas durante a fase experimental se deram a partir de 20 mm com forças de aproximadamente 49,30 KN, com valores de força aplicada no prensa-chapa acima de 7,36 KN.

### 7.2.2 Espessura e deformações na espessura da chapa no experimento

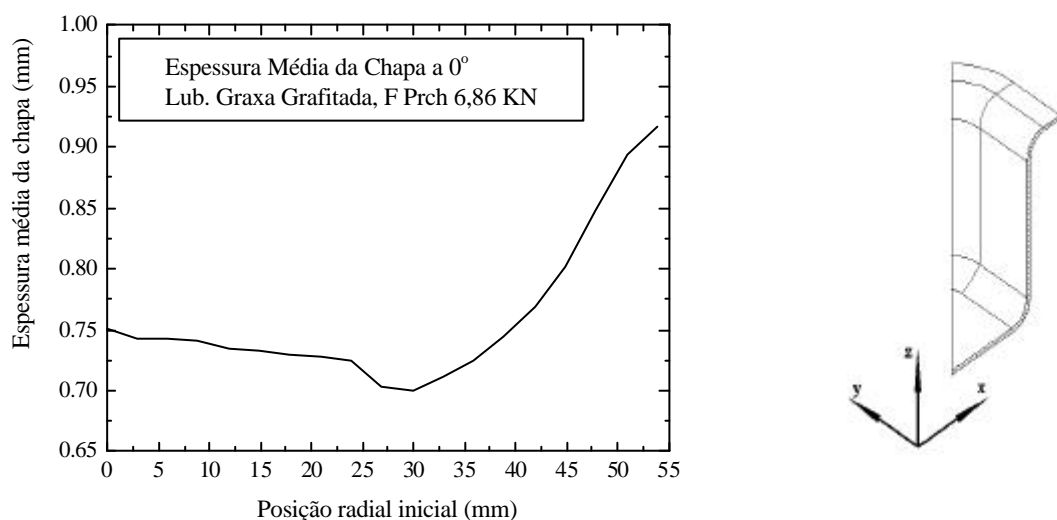
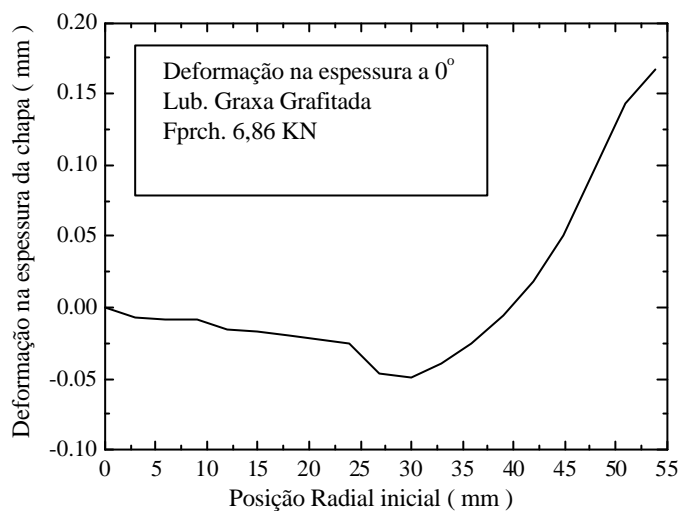
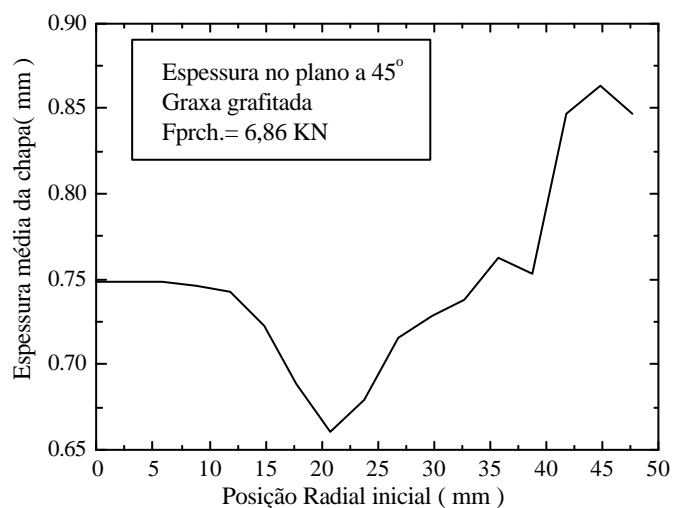


Figura 7.11 - Espessura da chapa no plano a 0° (EXP).

A Figura 7.11 apresenta a espessura média da chapa em relação a sua posição radial inicial, nota-se que na região do fundo da caixa a espessura apresenta uma diminuição devido ao estiramento do material, esta diminuição se acentua na região da parede plana logo após a região do raio do fundo chegando a uma espessura de 0,70 mm, logo em seguida a espessura aumenta continuamente devido as forças de compressão do material dos cantos da caixa que tendem a escoar para o centro das paredes planas. O valor máximo de 0,92 mm de espessura ocorre na borda do flange.

Tabela 7.12 - Deformação da espessura no plano a  $0^\circ$  (EXP).

A deformação da espessura no plano a  $0^\circ$  apresenta uma redução máxima de 0,05 mm na região acima do raio do fundo e um aumento máximo de 0,16 mm na borda da flange.

Figura 7.13 - Espessura média no plano a  $45^\circ$  (EXP).

Analisando a caixa estampada pode-se notar que nos cantos o material apresenta uma superfície muito lisa e os círculos traçados foram quase totalmente apagados devido a folga insuficiente.

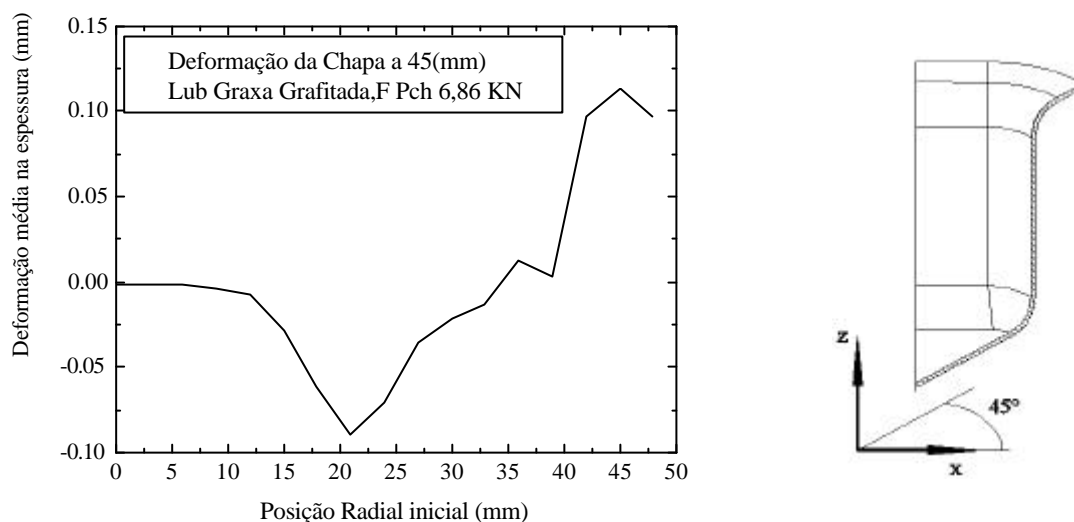


Figura 7.14 - Deformação na espessura no plano a 45° (EXP).

### 7.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item são comparadas as curvas de força x deslocamento do punção, as da espessura e de deformação da espessura em relação a posição radial inicial obtidas na simulação e no ensaio experimental.

#### 7.3.1 Curvas Força x deslocamento do punção

As curvas de força x deslocamento do punção obtidas na simulação e no ensaio experimental, são apresentadas na Figura 7.15, verifica-se que os valores máximos obtidos na simulação ficaram abaixo do valor obtido na estampagem da caixa em que foi aplicada graxa grafitada como lubrificante.

Estampagem com graxa grafitada - 49,30 KN – 100 %

Simulação com coef. de atrito = 0,150 - 39,86 KN - 80 %

Simulação com coef. de atrito = 0,075 - 35,94 KN - 72 %

Simulação com coef. de atrito = 0.000 - 31,94 KN - 65 %

As regiões do ponto de máximo na curva experimental bem como nas obtidas na simulação coincidem, embora nas condições de atrito a transição ocorra de forma abrupta. Ao se atingir um deslocamento de 20 mm do punção e também decrescem instantaneamente após atingido um deslocamento de 36 mm. Este comportamento não era esperado e se acentuou como aumento do coeficiente de atrito, aparentemente isto se deve a um maior estiramento das paredes e conseqüentemente uma maior redução da espessura da chapa.

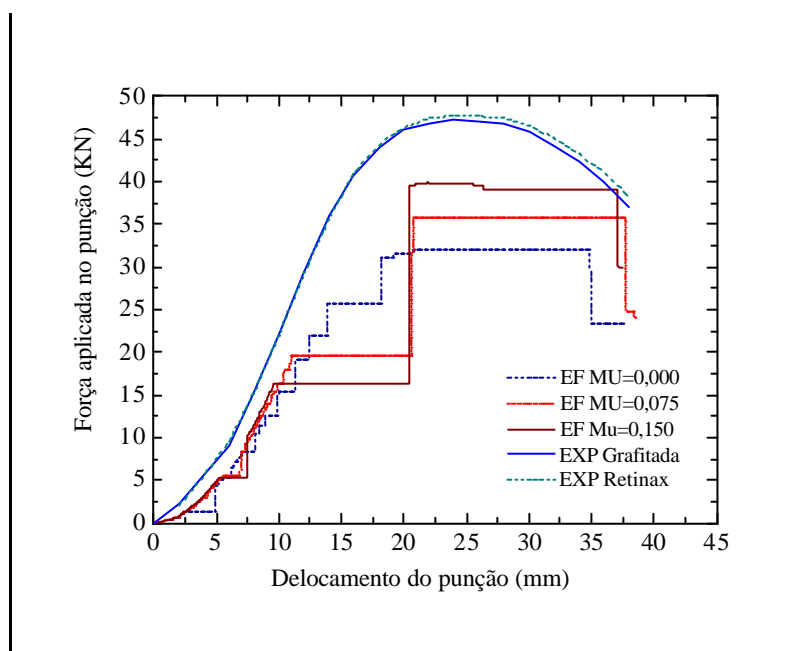


Figura 7.15 - Força x deslocamento do punção (EF x EXP).

As curvas simuladas apresentam um inclinação inicial muito próxima das experimentais, divergindo após os 12 mm de deslocamento do punção. Quando o fundo da caixa já está formado e o material gradativamente é forçado para dentro da matriz iniciando a formação das paredes, nesta fase a compressão do material nos cantos da caixa e o atrito nos raios da matriz e sob o prensa-chapa aumentam continuamente, o que se reflete na curva experimental. Nas curvas simuladas a que

mais se aproximou deste comportamento foi a da condição sem atrito, embora também apresente aumentos abruptos na força aplicada. A medida que o punção avança o flange diminui e a força aplicada decresce, nas curvas simuladas esta diminuição se apresenta também de forma abrupta, uma vez que a área de atrito sob o prensa-chapa diminui rapidamente.

### 7.3.2 Espessura e deformações na espessura da chapa simulada

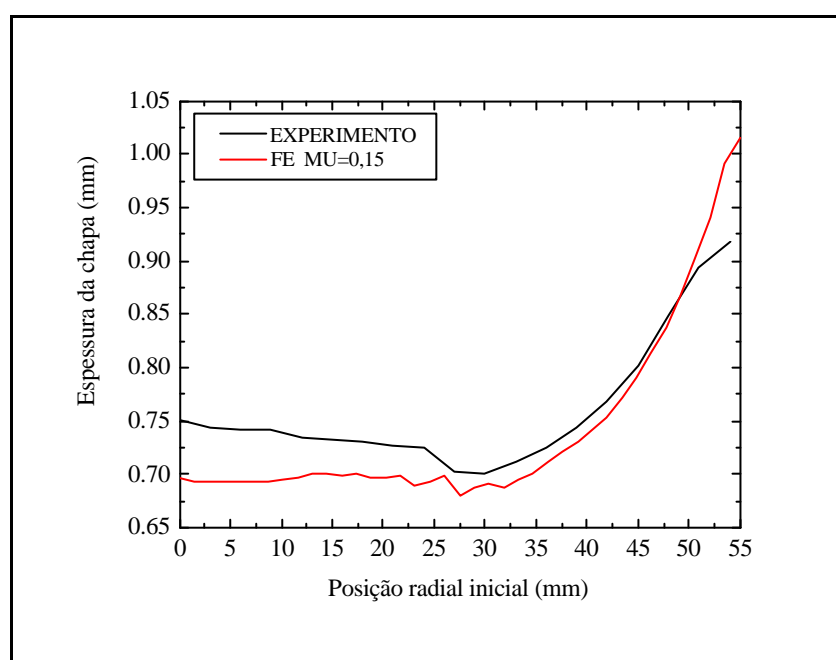


Figura 7.16 - Deformação na espessura no plano  $0^\circ$  (EF x EXP).

Nas curvas da espessura em relação a posição radial inicial, EF x EXP, apresentadas na Figura 7.16 observa-se que a espessura obtida na simulação com condição de atrito  $\mu = 0,15$ , é menor que a experimental no fundo e paredes da caixa, e maior que a experimental no flange da caixa. Este maior estiramento do fundo e laterais e conseqüente aumento do material no flange se deu em função das condições de atrito utilizadas na simulação.

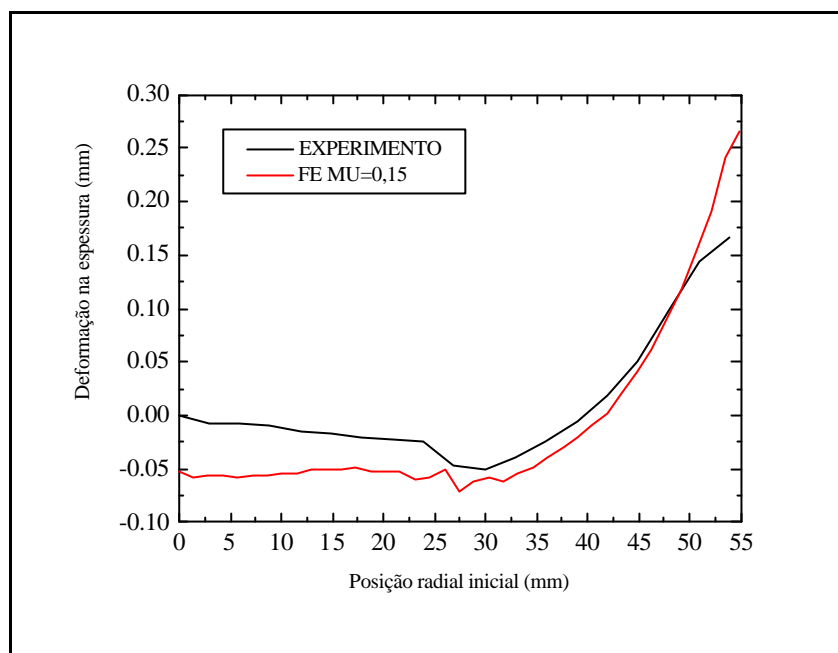


Figura 7.17 - Deformação na espessura a  $0^\circ$  (EF x EXP).

A Figura 7.17 apresenta as curvas da deformação radial x a posição radial inicial EF x EXP, indicando uma maior deformação na espessura na simulação do que a observada no experimento.

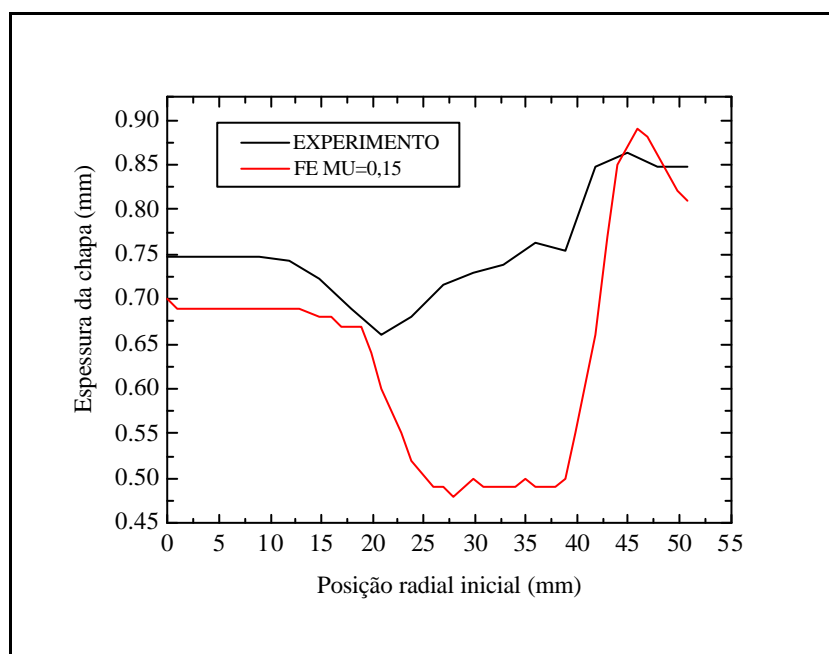


Figura 7.18 - Espessuras no plano a  $45^\circ$  (EF x EXP).



Na Figura 7.18 as espessuras nos planos a  $45^\circ$  EF x EXP são apresentadas e podemos observar que na simulação a espessura é um pouco menor que a experimental na região do fundo da caixa, entre 0 e 20 mm de maneira similar a observada no plano a  $0^\circ$ . Entretanto embora o experimento tenha apresentado uma redução da espessura do material na região do raio do fundo e paredes laterais. A redução apresentada na simulação foi muito severa, atingindo quase 50% da espessura do material.

O aumento da espessura, a partir da região do raio da flange, devido a compressão do material na entrada na matriz, pode ser observado nas duas curvas, porém a curva da simulação apresenta um máximo de espessura superior ao experimental e uma espessura na borda da flange menor que a experimental.

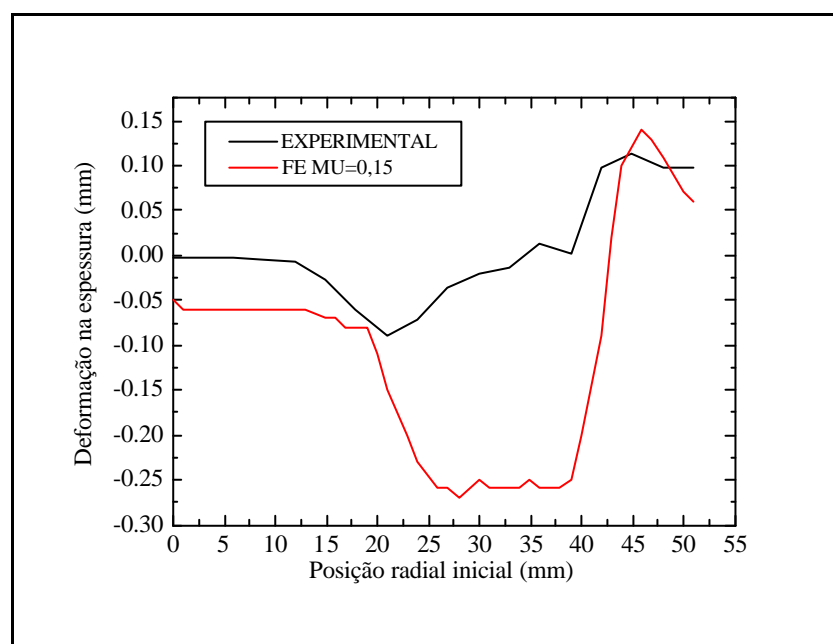


Figura 7.19 - Deformação da espessura no plano a  $45^\circ$  (EF x EXP).

A chapa apresenta anisotropia planar, que aumenta a resistência do material devido ao encruamento durante o escoamento. O elemento escolhido para a simulação, o VISCO107 representa materiais anisotrópicos, por isto já era esperado que os valores da força aplicada no punção fossem menores que os experimentais.

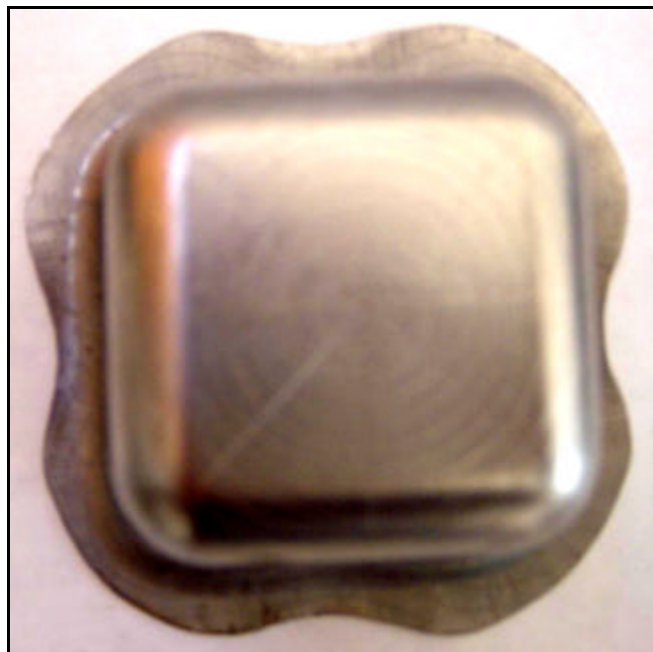


Figura 7.20 – Foto do flange da caixa estampada (EXP).

A anisotropia também influencia na forma final do flange como pode ser observado na Figura 7.20, na simulação este fator não é levado em consideração e o flange da caixa se apresenta de forma regular como pode ser visto na Figura 7.21.

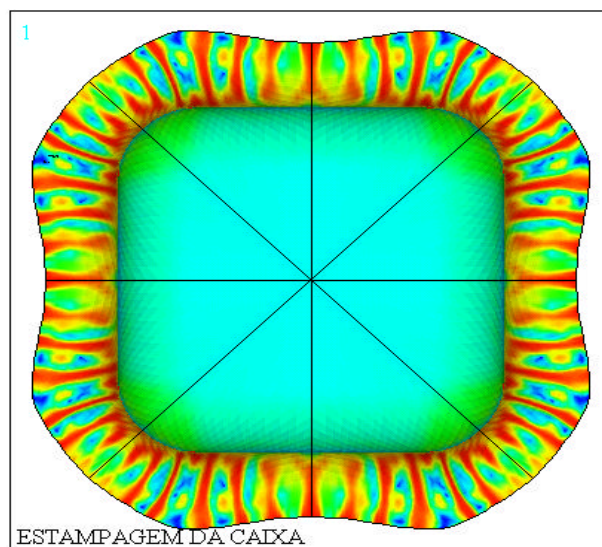


Figura 7.21 – Imagem do flange da caixa estampada (EF).

## Capítulo 8

### 8. CONCLUSÕES

Podemos concluir que foi alcançado o objetivo do trabalho de conhecer a força de estampagem através do método dos elementos finitos utilizando o programa comercial ANSYS, conforme demonstrado no capítulo 7, as diferenças apontadas entre os valores experimentais de 49,30 KN, obtidos na estampagem com graxa grafitada como lubrificante, e os das simulações, em que a força máxima obtida foi de 39,86 KN na simulação com coeficiente de atrito igual a 0,15, se devem ao comportamento do elemento escolhido que difere em parte do comportamento real do material, mas melhorias no modelo e nas condições de contato e de processamento podem propiciar uma maior aproximação dos resultados.

A determinação da espessura também foi alcançada com valores bastante próximos dos valores experimentais, sendo que no plano a  $0^\circ$  grau variou de -0,05 mm na região do fundo da caixa e paredes à +0,10mm na região do flange. As diferenças apontadas na predição das deformações no canto da caixa, no plano a  $45^\circ$  grau que variou entre -0,05 a -0,01mm na região do fundo da caixa, de até -0,25mm nas paredes e à  $\pm 0,05$ mm na região do flange merecem uma nova avaliação, mas de maneira geral podemos afirmar que é possível a determinação aproximada da força de estampagem e das deformações da espessura decorrentes do processo de estampagem.

A adoção da modelagem rígido/flexível em que apenas o material da chapa é representado por elementos viscoplásticos e a ferramenta considerada um corpo rígido, no qual somente as faces de contato são levadas em consideração para aplicação da malha de contato, se mostrou eficiente com ganhos expressivos no tempo de simulação e nos requisitos de capacidade do computador utilizado. A aplicação desta forma de modelagem requer alguns cuidados no sentido de se evitar problemas de convergência por diferenças dos graus de liberdade permitidos entre os elementos aplicados no modelo, e também na aplicação das condições de simetria no modelo, estes problemas custaram inúmeras tentativas de simulação e ajustes do modelo.

O elemento VISCO107 adotado atendeu ao objetivo proposto, embora represente um comportamento isotrópico as regiões dos pontos de máximo na curva força x deslocamento concordaram com as regiões das curvas obtidas nos experimentos, as regiões de deformações também coincidiram.

A maior intensidade da deformação na espessura do material obtida na simulação resulta do comportamento do elemento escolhido, que não computou a anisotropia do material da chapa, isto reduziu a intensidade do encruamento, afetando o cálculo do valor da força de estampagem e a resistência do material a diminuição da espessura.

Os resultados gráficos obtidos do programa impressionam pela riqueza e precisão de detalhes referente a formação de rugas no material, embora esta análise não tenha sido o foco direto deste trabalho, as rugas geradas na simulação concordam com as observadas no experimento. A capacidade de predição da formação de rugas na estampagem é também um item de grande importância, pois estas afetam diretamente a qualidade do produto.

O programa demonstrou capacidade efetiva de simular as grandes deformações do processo de estampagem apresentando ferramentas de modelagem com recursos que atendem a modelagem de formas complexas em 3D, as ferramentas de visualização de seleção e controle de variáveis são muito eficazes. A modelagem de contato superfície–superfície no modo rígido/flexível atende as necessidades da simulação de estampagem, seu refino e ajuste demanda de avaliação criteriosa, para obter a melhor relação entre o precisão desejada e o dispêndio de esforço computacional.

O modelo, parâmetros e condições de simulação foram carregados no programa ANSYS 6.0 através de listas de comando. As listas geradas são arquivos pequenos que podem ser facilmente editados, com total controle das variáveis envolvidas, porém sua utilização requer bastante atenção aos detalhes.

A grande quantidade de dados gerados na simulação devem ser cuidadosamente avaliados de modo a se verificar os mais adequados ao trabalho. Como o elemento escolhido não tem como resultado direto a medição da espessura foi necessário tratar os dados de deslocamento nodal para obtê-la, um processo trabalhoso mas de pequena complexidade.

Aproveitando-se dos planos de simetria do produto e ferramenta, foi possível a modelagem de apenas um oitavo do mesmo, mesmo assim o modelo apresentou um número grande de elementos e nós, tornando sua solução pesada, em um computador com processador de 300 MHz, o tempo total de simulação chegou a 75 horas, já em um micro com processador Pentium 4 de 2,4 GHz o tempo de simulação foi de apenas 5,50 horas. O desempenho e a capacidade de memória do computador empregado na simulação é fundamental, pois permite a aplicação e correção efetiva dos resultados.

A utilização de ferramenta construída especialmente para uso na máquina de ensaios se mostrou muito eficiente, os recursos de controle disponíveis na máquina, facilitaram o controle das variáveis do experimento. A ferramenta desenvolvida apresentou boa rigidez e precisão de guia, sua operação é muito simples e os resultados atenderam as expectativas de projeto.

Como toda ferramenta de estampagem, a ferramenta construída apresenta uma certa complexidade na sua construção, que exige a demanda de muito trabalho de usinagem, algumas melhorias podem ser efetuadas como a das molas de poliuretano que se revelaram superdimensionadas, isto diminuiu a sensibilidade de regulagem da carga no prensa-chapa, isto pode ser facilmente contornado diminuindo-se o diâmetro dos cilindros. O modo de fixação da matriz pode ser alterado evitando problemas de aderência da chapa nos entalhes dos elementos de fixação, estes ajustes não foram executados devido a urgência dos resultados experimentais.

Este trabalho representa uma excelente contribuição em termos de aplicação prática do método dos elementos finitos como ferramenta de simulação, aliado a um conhecimento mais aprofundado da teoria da plasticidade.

As diferenças de valores detectadas neste trabalho merecem a atenção de novos trabalhos que busquem melhorar a aproximação dos resultados, estes podem se direcionados ao :

- Estudo da aplicação de outros tipos de elementos como os elementos casca (shell) para análise e comparação;
- Estudo das condições reais de contato envolvido no processo, cujos resultados podem ser aplicados no refino da análise;
- Estudo sobre a análise da intensidade de deformações e retorno elástico do produto estampado;
- Estudo da influência dos raios de entrada da matriz e punção a aplicação da estampagem com outros tipos de materiais podem ser estudados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER, J. M.; BREWER, R. C., *Manufacturing Properties of Materials*, Ed. Van Nostrand Comp. Ltd., London, 1963.
- ALMEIDA C. A., *Some Recent Advances on Adaptive Procedures in Nonlinear EF Analysis*, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica, RJ.
- ALVES, A. F., *Elementos Finitos : A Base da Tecnologia CAE*, Editora ÉRICA, 2000, 1ª ed., 292.
- ALVES, A. J.; GOUVÊA, J. P., *Análise de Desempenho de Ferramentas de Trefilação de Tubos, utilizando o Método dos Elementos Finitos*, CONEM 2002 - II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.
- ANSYS, COMMAND MANUAL, *ANSYS User's Manual – Commands*, Swanson Analysis Systems, Inc., 2000.
- ANSYS, COMMAND MANUAL, *ANSYS User's Manual – Elements*, Swanson Analysis Systems, Inc., 2000.
- ANSYS, COMMAND MANUAL, *ANSYS User's Manual – Guides*, Swanson Analysis Systems, Inc., 2000.
- ANSYS, COMMAND MANUAL, *ANSYS User's Manual – Theory*, Swanson Analysis Systems, Inc., 2000.
- APARÍCIO, C. A.; COELHO, R. T.; BARBOSA C. A., *Desenvolvimento de Simulação de Processo de Forjamento usando o Método de Elementos Finitos*, CONEM 2002 – II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.
- ARAGÃO R. R.; OLIVEIRA, S. A. G., *Análise da Força Máxima de Embutimento de Copos Cilíndricos utilizando o Método dos Elementos Finitos*, CONEM 2002 – II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.
- ASM - METALS HANDBOOK , *Forming*, vol. 8, 8ª ed. Metal Park Ohio, 1969.
- ASSIS, A. M.; LORENTE, G. F., *Rotas de Estampagem de um Disco de Roda Automotiva por Simulação Numérica*, CONEM 2002 – II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.

- BATHE, J. K., *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Ed. Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1982, 331p.
- BORTOLUSSI, R., *Simulação do Processo de Estampagem Profunda de Corpos Cilíndricos através do Método dos Elementos Finitos*, 1996, 124p, Mestrado em Engenharia Mecânica, UNICAMP.
- BUTTON, S. T., *O Ensino em Laboratório de Processo de Conformação Plástica de Metais*, 15º COBEM – Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1999.
- CESCOTTO, S. e CHARILIER, R., *Frictional Contact Finite Elements Based on Mixed Variational Principles*, International Journal for Numerical Method in Engineering, vol. 35, 1289-1309 (1982).
- CHEN, W. F. ; HAN, D. J., *Plasticity for Structural Engineers*, Springer-Verlag New York Inc., 1988, 606.
- CHEOK, B. T., NEE, A. Y. C., *Trends and Developments in the Automation of Design and Manufacture of Tools for Metal Stampings*, Journal of Processing Technology 75 (1988) 240-252
- COLPAERT H., *Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns*, 3ª ed. Editora Edgard Blucher Ltda., 1974, SP.
- DALLAS, DANIEL B., *Progressive Dies Design and Manufacture*, Ed. MacGraw Hill Book Company, 1962.
- DIAS, J. C. et al., *Curvas Limites de Resistência para Avaliação da Integridade Estrutural de Chapas Planas com Comportamento Anisotrópico*, CONEM 2002 – II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.
- DIETER, G. E., *Metalurgia Mecânica*, Ed. Guanabara Dois, 2ª Edição, 1981, 646p.
- GOMES, E.; BRESCIANI, E. F., *Projeto e Análise da Conformação Plástica dos Metais pelo Método dos Elementos Finitos Não Lineares*, Apresentado no 4º Simpósio de Conformação Plástica dos Metais – Escola Politécnica da USP e Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, 1990.
- GRANDIN, H. JR., *Fundamentals of Finite Element Method*, Macmillan Publishing Company, 1986.



- GUO, Y. Q., et al, *Recent Developments on the Analysis and Optimum Design of Sheet Metal Forming Parts using a Simplified Inverse Approach*, Computers and Structures 78 (2000) 133-148.
- GUPTA, K. K.; MEEK, J. L., *A Brief History of the Beginning of the Finite Element Method*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 39, 3761-3774 (1996).
- HATTANGADY, N. V., *Faster Analysis of Forming Problems through use of Coarse Mesh Models for Dies*, Finite Elements in Analysis and Design 32(1999) 21-35.
- HONGZHI, D.; ZHONGQI, L., *Investigation of Sheet Metal Forming By Numerical Simulation and Experiment*, Journal of Materials Processing Technology, 103, 404-410. (2000)
- HUGHES, T. J. R., *The Finite Elements Method*, Ed. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs New Jersey, 1987.
- JUNG, D. W.; YANG, K. B., *Comparative Investigation into Membrane, Shell and Continuum Elements for the Rigid-plastic Finite Element Analysis of Two-dimensional Sheet Metal Forming Problems*, Journal of Materials Processing Technology 104 (2000) 185-190.
- KAWKA, M.; MAKINOCHI, A., *Simulating Manufacturing Processes*, Automotive Engineering, April 1997.
- LASCOE, O. D., *Handbook of Fabrication Processes*, Metals park ASM International , 1988.
- LEI, L. P.; HWANG, S. M.; KANG, B. S., *Finite Element Analysis and Design in Stainless Steel Sheet Forming and its Experimental Comparison*, Journal of Materials Processing Technology 110 (2001) 70-77.
- LIA, G.; JINN, J. T.; WU, W. T., *Recent Development and Applications of Three-Dimensional Finite Element Modeling in Bulk Forming Processes*, Journal of Materials Processing Technology, 113, 2001 40-45.
- MACNEAL, R. H., *Perspective on Finite Elements for Shell Analysis*, Finite Elements in Analysis and Design 30 (1998) 175-186.

- MAKINOUCHI, A., *Sheet Metal Forming Simulation in Industry*, Journal of Materials Processing Technology, 60, 1996, 19-26.
- MAMALIS, A. G.; MANOLAKOS, D. E.; BALDOUKAS, *Simulation of Sheet Metal Forming using Explicit Finite Element Techniques: Effect of Material and Forming Characteristics. Part 2 Deep-drawing of Square Cups*, Journal of Materials Processing Technology 72 (1997) 110-116.
- MORENO, M. E.; CARVALHO, J.; LIRANI, J., *Development of a Methodology to Obtain the Ideal Blank Shape in Deep Drawing Process using Finite Element Analysis*, CONEM 2002 – II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.
- NACEUR, H. , GUO, Y.Q., BATOZ, J.L., KNOPF-LENOIR C., *Optimization of Drawbead Restraining Forces and Drawbead Design in Sheet Metal Forming Process*, International Journal of Mechanical Sciences 43 , 2001 , 2407-2434 .
- NARASIMHAN, N., LOVELL, M., *Predicting Springback in Sheet Metal Forming: An Explicit Implicit Sequential Solution Procedure*, Finite Elements in Analysis and Design 33 (1999) 29-42.
- ODEN, J.T. e KIKUCHI, N., *Finite Elements Method for Constrained Problems In Elasticity*, International Journal for Numerical Method in Engineering , vol. 18, 701-725(1982).
- OWEN, P. R. J.; HINTON, E., *Finite Elements in Plasticity*, Pineridge Press Limited, Swansea U. K., 1980.
- PIETRZYK, M., *Finite-element Simulation of Large Plastic Deformation*, Journal of Materials Processing Technology 106 (2000) 223-229.
- SCHAEFFER, L., et al., *Análise e Otimização de Processos de Estampagem Profunda*, Revista Máquinas e Metais 168-179, 2000.
- SCHÜLER – *Metal Forming Handbook*, Berlin Springer, 1998.
- SHI, X.; WEI, Y.; RUAN, X., *Simulation of Sheet Metal Forming by a One-step Approach: Choice of Element*, Journal of Materials Processing Technology”, 108 (2001) 300-306.

- SIMO, J. C. e TAYLOR, R. L. , *Consistent Tangent Operators for Rate Independent Elastoplasticity*, Computers Methods in Applied Mechanics and Engineering , Vol 48 , 101-118(1985)
- SOUZA, S. A., *Ensaio Mecânicos de Materiais Metalúrgicos - Fundamentos Teóricos e Práticos*, 5<sup>a</sup> ed. Editora Edgard Blucher Ltda.,1982. SP.
- STOUGHTON, T. B., *A General Forming Limit Criterion for Sheet Metal Forming*, International Journal of Mechanical Sciences 42 , 2000 , 1-27 .
- TAKUDA, H.; MORI, K.; HATTA, N. , *The Application of Some Criteria for Ductile Fracture to the Prediction of the Forming Limit of Sheet Metals*, Journal of Materials Processing Technology, 95, 1999, 116-121.
- TANOV, R.; TABIEI, A., *A Simple Correction to the First-order Shear Deformation Shell Finite Element Formulations*, Finite Elements in Analysis and Design, 35, 2000, 189-197.
- TEKKAYA, A. E., *State-of-the-art of Simulation of Sheet Metal Forming*, Journal of Materials Processing Technology, 103, 2000, 14-22.
- VIEIRA, E. L. S.; ÁVILA, A. F.; CAMPOS, H. B., *Previsão do Diagrama Limite de Conformação baseada no Critério de Escoamento de Logan e Hosford*, 16<sup>o</sup> COBEM – Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 2001.
- WEBER, G.G., LUSH, AM., ZAVALIANGOS, A. E ANAND, L., *An Objective Time Integration Procedure for Isotropic Rate-Independent Elastic Plástic Constitutive Equations*, International Journal for Numerical Method in Engineering , vol. 6, 701-749(1990).

## **APÊNDICE**

**A - RELATÓRIO DE METALOGRAFIA**

**B - RELATÓRIO DE ENSAIO DE TRAÇÃO**

**C - FERRAMENTA**

**D - REGISTRO FOTOGRÁFICO**

**E - EXPERIMENTO**

**F - PROGRAMA PARA SIMULAÇÃO**

## APÊNDICE

### A 1 - RELATÓRIO DE METALOGRAFIA

#### 1. Objetivos

Caracterização do material a ser empregado no ensaio de estampagem, detectar e medir inclusões do material, analisar sua microestrutura e determinar o tamanho dos grãos do material.

#### 2. Equipamentos utilizados

2.1 Máquina de corte de amostras

2.2 Prensa de embutimento

2.3 Banco de lixamento, lixas 220,300,400,600,800

2.4 Máquina de polimento, com disco de feltro e pasta de diamante 1  $\mu\text{m}$

2.5 Microscópio ótico

2.6 Microscópio ótico NIKON–EPIHOT 200 equipado com Câmera digital SPOT-INSIGHT QE

2.7 Programa IMAGE PRO PLUS INTERCEPTA WN

#### 3. Corpos de prova

Foram cortadas amostras da chapa de dimensões 5 x 5 mm e embutidas em ebonite de modo a se obter a microestrutura da face da chapa e de sua seção transversal.

#### 4. Lixamento e polimento

As amostras foram lixadas conforme procedimento padrão de ensaio com lixas 220, 300, 400, 600, 800 e polidas com pasta de diamante de 1  $\mu\text{m}$

#### 5. Observação e fotografias sem ataque

As amostras foram observadas no microscópio e fotografadas sem ataque para detecção de inclusões. Algumas das Figuras obtidas são apresentadas abaixo

Figuras A.1 a A.4, onde podemos observar as inclusões do material, utilizando-se o programa de análise de imagens IMAGE-PRO-PLUS INTERCEPTA WN, foi processado o cálculo da quantidade de inclusões do material cujo resultado pode ser observado na Figura A.1.

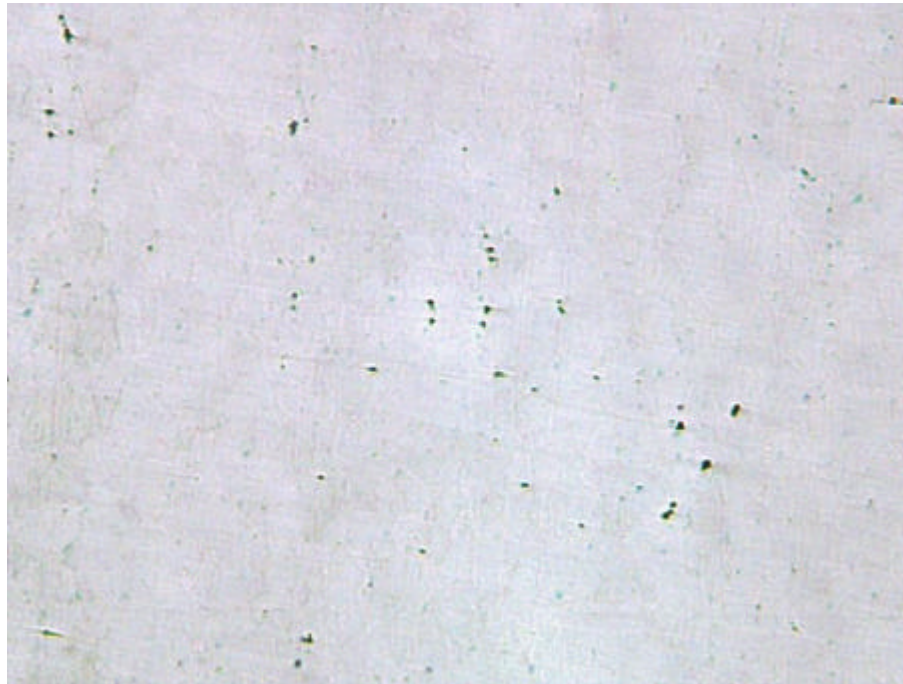


Figura A.1 –Foto de Inclusões de alumina no material (100 X) -

Tabela A.1. – Resultados da medição de inclusões

Análise Estatística	Metal base (%)	Inclusões(%)
Mínimo	74,82	0,04
Máximo	99,96	25,18
Média	98,89	1,11
Desvio Padrão	3,25	3,25
Área total escan. ( $\mu\text{m}$ )	Área do campo ( $\mu\text{m}$ )	Nº de campos (Figuras)
2,07 .10e7	268521,1	77

## 6. Ataque das amostras com Nital a 1%

As amostras foram atacadas com solução de Nital a 1%, durante 4 segundos, e analisadas no microscópio, as imagens obtidas da microestrutura podem ser observadas nas Figuras A.1 à A.4

## 7. Fotografias da amostra com ataque

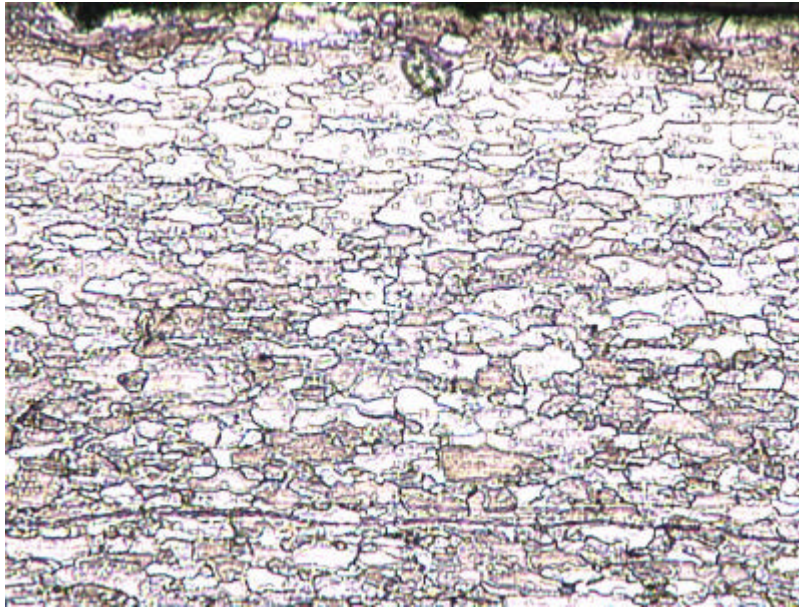


Figura A.2 Micrografia da face transversal da chapa (aumento 100 X)

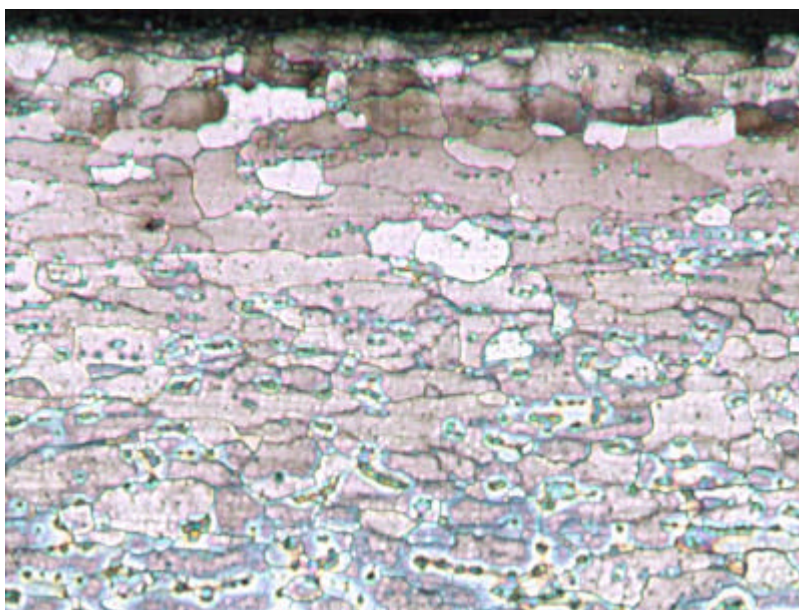


Figura A.3 Micrografia da face transversal da chapa (aumento 200 X)

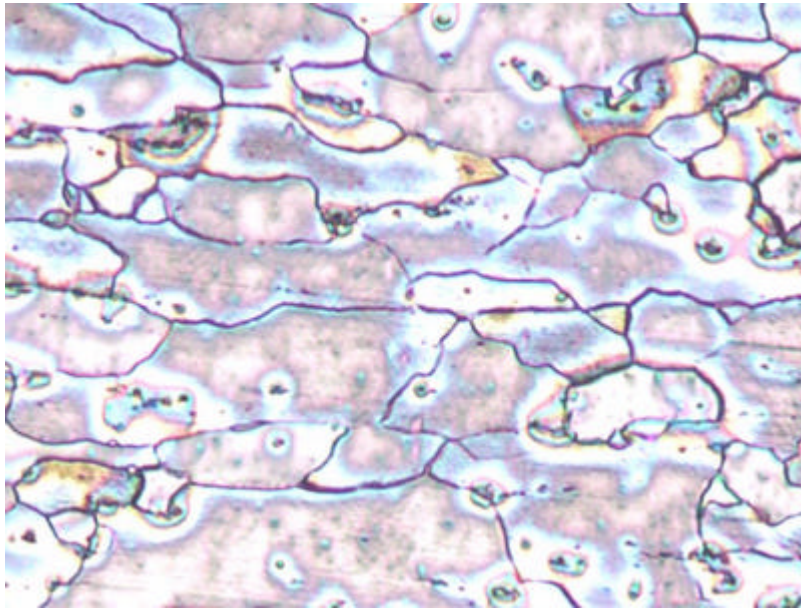


Figura A.4 Micrografia da face transversal da chapa (aumento 500 X) –

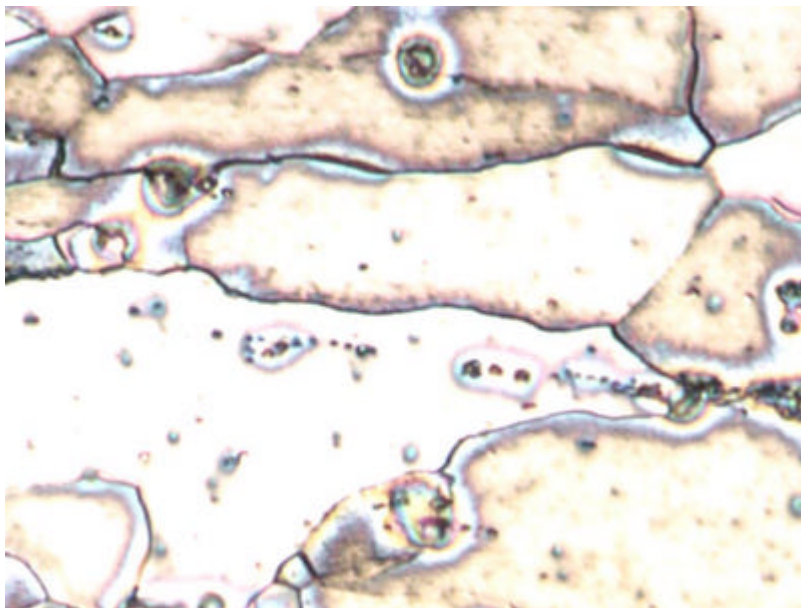


Figura A.5 Micrografia da face transversal da chapa (aumento 1000 X)–



## 8 Tamanho de Grão

A medida do tamanho de grão encontrado foi número ASTM 8,6.

Tabela A.2 – Resultados da medição de grãos efetuada no IMAGE

Análise Estatística	Tamanho ASTM	Área ( $\mu\text{m}^2$ )
Mínimo	8,3731	1,6782
Máximo	9,0924	138,73
Média	8,6477	6,6023
Desvio Padrão	0,1571	

Área tot. escaneada( $\mu\text{m}^2$ )	Área do campo ( $\mu\text{m}^2$ )	Nº de campos (Fotos)
10740841	268521,09	40

## 9. Conclusões

Podemos concluir que o material apresenta excelentes características de estampabilidade, como se pode observar nas micrografias o material apresenta estrutura cristalina Ferrítica, característica de aços baixo carbono. Este material é um aço acalmado com Alumínio, e apresenta a inclusões Alumina  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , que podem ser observadas na Figura A.1, e se apresentam ao microscópio como partículas negras espaçadas, a medição da quantidade de inclusões na amostra apresentou um valor médio de 1,11 %.

O tamanho de grão medido conforme ASTM é de 8.6,0 que classifica a estrutura deste material como de grãos finos, materiais de grãos finos são mais adequados a estampagem por proporcionarem produtos de melhor acabamento superficial.

## APÊNDICE

### B - RELATÓRIO DE ENSAIO DE TRAÇÃO

#### 1 Objetivos

Determinar as propriedades mecânicas do material, o índice de anisotropia, a tendência ao orelhamento e da curva real de tensão x deformação. A curva Tensão x Deformação Real obtida será aplicada na simulação no programa ANSYS 6.0 .

#### 2 Equipamentos utilizados

- Máquina de ensaio universal EMIC MEN 10.000, equipada com célula de carga de 1000 Kgf ( 98,1KN ).

#### 3 Corpos de prova

As amostras foram retiradas no sentido de laminação da chapa (longitudinal), a quarenta e cinco graus e a noventa graus em relação ao eixo longitudinal.

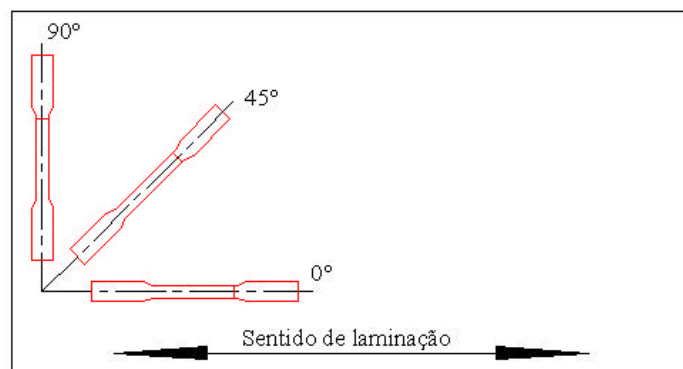


Figura B 01 Direção de retirada de amostras da chapa

A forma adotada para o CDP foi a recomendada na Norma ASTM E 517 , CDP tipo “A”. As amostras foram cortadas na guilhotina e usinadas conforme Figura B 02

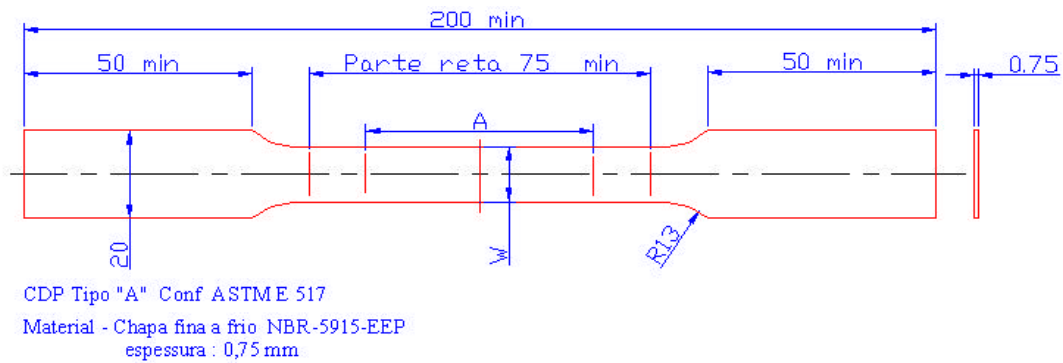


Figura B.2 Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração

#### 4 Especificações do material

A chapa aplicada no experimento foi fornecida pela RIO NEGRO, certificado de inspeção nº 5.411, com as seguintes especificações :

Chapa qualidade estampagem extra profunda USIMINAS

NBR-5915-EEP – Espessura 0,75 mm, laminada a frio sem revestimento

Dados de ensaios físicos :  $\sigma_{esc.}$ : 193 MPa;  $\sigma_{rup.}$ : 312 Mpa, Alongamento : 42 %, Dureza : 45 RB, Embutimento Ericksen : 11,2 mm

##### 4.1 Composição química

A composição química do material conforme certificado de inspeção Rio Negro nº 5.411, , é apresentada na tabela B.1 :

Tabela B 1 – Composição química da chapa

Composição Química %				
C x 10 <sup>-3</sup>	Mn x 10 <sup>-3</sup>	P x 10 <sup>-3</sup>	S x 10 <sup>-3</sup>	Al x 10 <sup>-3</sup>
4	25	18	11	35

#### 5 Procedimento

A taxa ‘r’ de deformação plástica pode ser determinada através da medida da mudança da largura e espessura do material resultante das deformações plásticas. Para a maior parte das chapas finas entretanto é preferível medir a variação da largura e do comprimento, assumindo que o volume permanece constante.

O procedimento adotado segue as recomendações da ASTM E 517-96a, para a determinação da Taxa de deformação plástica para chapas metálicas.

### 5.1 Procedimento Manual

- Medir a largura do cdp original em pelo menos três pontos com precisão de  $\pm 0,013\text{mm}$  em pelo menos três pontos no comprimento de análise;

- Medir o comprimento original de análise com precisão de  $L_0 \pm 0,25\text{mm}$ ;

- Marcar a bitola com entalhes finos e paralelos entre si e perpendiculares à lateral do CDP na medida de 50 mm. As marcas de leitura foram traçadas com auxílio de altímetro digital;

- Tracionar o cdp axialmente até que o estiramento atinja o ponto de escoamento e o ultrapasse mas não atingindo o ponto de força máxima. Medir com precisão o progresso da deformação até atingir o limite de 15% de alongamento. A taxa de alongamento deve ser igual ou menor 12.7 mm/min;

- Medir a largura final  $W_f$ , e o comprimento final  $L_f$  da mesma maneira e tolerância como nos valores iniciais, fazer estas medidas sem a força aplicada no CDP. Para a medição da deformação resultante nos cdp's foi utilizado do medidor de perfis.

## 6. Determinação do índice de anisotropia

Resultados dos ensaios de tração para determinação do coeficiente plástico sob alongamento máximo. de 15 %, são apresentados nas tabelas B.4, B.5 e B.6

Tabela B 2 Razão plástica  $r_{m 0^\circ}$ 

CDPS de amostras retiradas no sentido longitudinal : $0^\circ$							
N <sup>qs</sup>	L6	L7	L8	L9	L10	Média	Desvio
L0	49,87	49,94	49,88	49,96	49,93	49,91	0,004
Lf	57,35	57,05	57,29	57,58	57,42	57,34	0,194
Wo	12,51	12,55	12,59	12,60	12,58	12,57	0,036
Wf	11,46	11,45	11,61	11,63	11,52	11,53	0,083
$r_{m 0^\circ}$	$r_{m 0^\circ} = \frac{\ln(w_0/w_f)}{\ln(l_f \cdot w_f / l_0 \cdot w_f)}$			$r_{m 0^\circ} = 1,52$			

Tabela B.3 Razão plástica  $r_{m 90^\circ}$ 

CDPS de amostras retiradas no sentido transversal : $90^\circ$							
N <sup>qs</sup>	1	2	3	4	5	Média	Desvio
L0	49,59	50,14	49,52	49,99	50,06	49,86	0,287
Lf	57,25	57,27	57,23	56,80	53,63	57,24	0,294
Wo	12,53	12,55	12,54	12,55	12,527	12,54	0,013
Wf	11,50	11,48	11,46	11,49	11,48	11,48	0,015
$r_{m 90^\circ}$	$r_{m 90^\circ} = \frac{\ln(w_0/w_f)}{\ln(l_f \cdot w_f / l_0 \cdot w_f)}$			$r_{m 90^\circ} = 1,76$			

Tabela B.4 Razão plástica  $r_{m 45^\circ}$ 

CDPS de amostras retiradas a $45^\circ$							
N <sup>qs</sup>	1	2	3	4	5	Média	Desvio
L0	49,95	50,02	49,97	50,23	49,92	50,02	0,125
Lf	57,16	57,49	57,21	58,57	57,54	57,59	0,571
Wo	12,64	12,59	12,53	12,55	12,53	12,57	0,047
Wf	11,59	11,60	11,57	11,49	11,61	11,57	0,048
$r_{m 45^\circ}$	$r_{m 45^\circ} = \frac{\ln(w_0/w_f)}{\ln(l_f \cdot w_f / l_0 \cdot w_f)}$			$r_{m 45^\circ} = 1.42$			

6.1 Valor médio de  $r_m$

6.2 Determinação de  $r_m$  com duas casas de precisão calculado de acordo com a formula :

$$r_m = (r_{0^0} + 2r_{45^0} + r_{90^0})/4 \quad (\text{B.1})$$

$$r_m = 1,62$$

B.6.3. Tendência a orelhamento

O valor da tendência ao orelhamento foi calculado como :

$$\Delta r = (r_{0^0} + r_{90^0} - 2r_{45^0})/2 \quad (\text{B.2})$$

$$\Delta r = 0,22$$

## 7. Determinação da curva Tensão x Deformação real

Para a determinação das propriedades mecânicas do material e curva tensão x deformação, foram ensaiadas amostras no sentido longitudinal e transversal da chapa, os resultados obtidos são apresentados nas tabelas B.7, B.8 e B.9

### 7.1 Resultados do ensaio de tração

Tabela B.5 Tensão de escoamento e alongamento a tração - CDP's a  $0^0$

CDPS de amostras retiradas no sentido longitudinal : $0^0$					
N <sup>os</sup>	$\sigma_{esc.}$ (MPa)	$\sigma_{máx.}$ (MPa)	L0	Lf	$\lambda$ (%)
L1	149,54	295,95	49,94	70,50	41,00
L2	146,40	291,76	50,36	71,20	42,40
L3	156,76	295,95	50,25	71,00	42,00
Média	150,93	294,55	50,18	70,90	41,80
Desvio	5,3674	2,4191	0,2178	0,3606	0,7211

Tabela B 6 – Tensão de esc. e alongamento a tração - CDP's a 90°

CDPS de amostras retiradas no sentido longitudinal : 90°					
N <sup>os</sup>	$\sigma_{esc.}$ (MPa)	$\sigma_{máx.}$ (MPa)	L0	Lf	$\lambda$ (%)
T6	156,86	295,95	49,96	70,91	41,80
T7	151,63	304,31	49,88	71,08	42,20
T8	146,40	299,10	49,97	72,25	44,50
Média	151,63	299,79	49,93	71,41	42,83
Desvio	5,230	4,222	0,049	0,729	1,457

Tabela B 7 Índices para a curva real –no ensaio de tração CDP a 0°

Valores da curva $\sigma \times \epsilon$ convencional baseados na curva L1			Índices para a curva real		
	$\epsilon$	F(Kgf)	$\sigma$ (Mpa)	$d_R = \ln(1 + e)$	$s_R = s(1 + e)$
				$\delta$	$\sigma$ (Mpa)
1	0,003761	78,94	84,45	0,0037	82,76
2	0,006268	143,50	150,00	0,0062	150,94
3	0,162970	173,03	180,98	0,0162	183,93
4	0,2630	192,03	200,85	0,0260	206,13
5	0,0376	209,40	219,00	0,0369	227,24
6	0,0752	238,50	249,40	0,0725	268,26
7	0,1128	258,25	270,60	0,1069	315,25
8	0,1504	270,88	283,30	0,1401	325,91
9	0,1880	276,94	289,60	0,1723	344,05
10	0,2257	280,98	293,88	0,2035	360,21
11	0,2633	283,00	296,00	0,2337	373,94
12	0,3008	283,00	296,00	0,2685	387,17
13	0,3385	283,00	296,00	0,2915	396,17
14	0,3761	283,00	296,00	0,3193	407,33
15	0,4137	274,00	286,50	0,3462	405,02
16	0,1413	194,00	202,00	0,3725	293,00

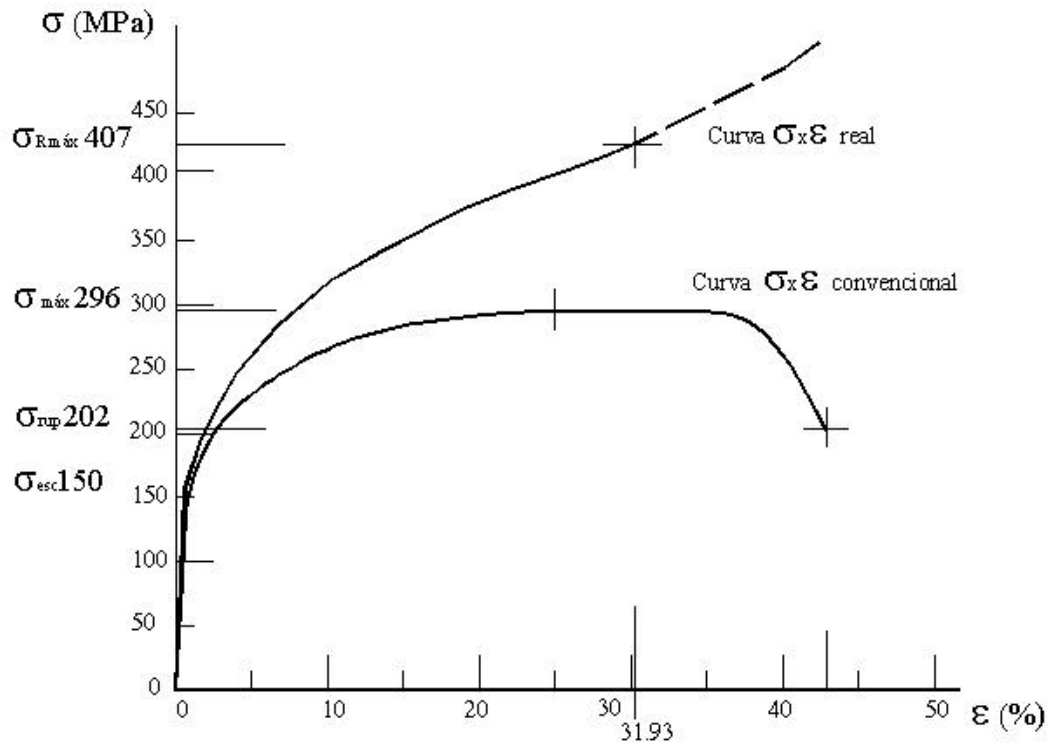


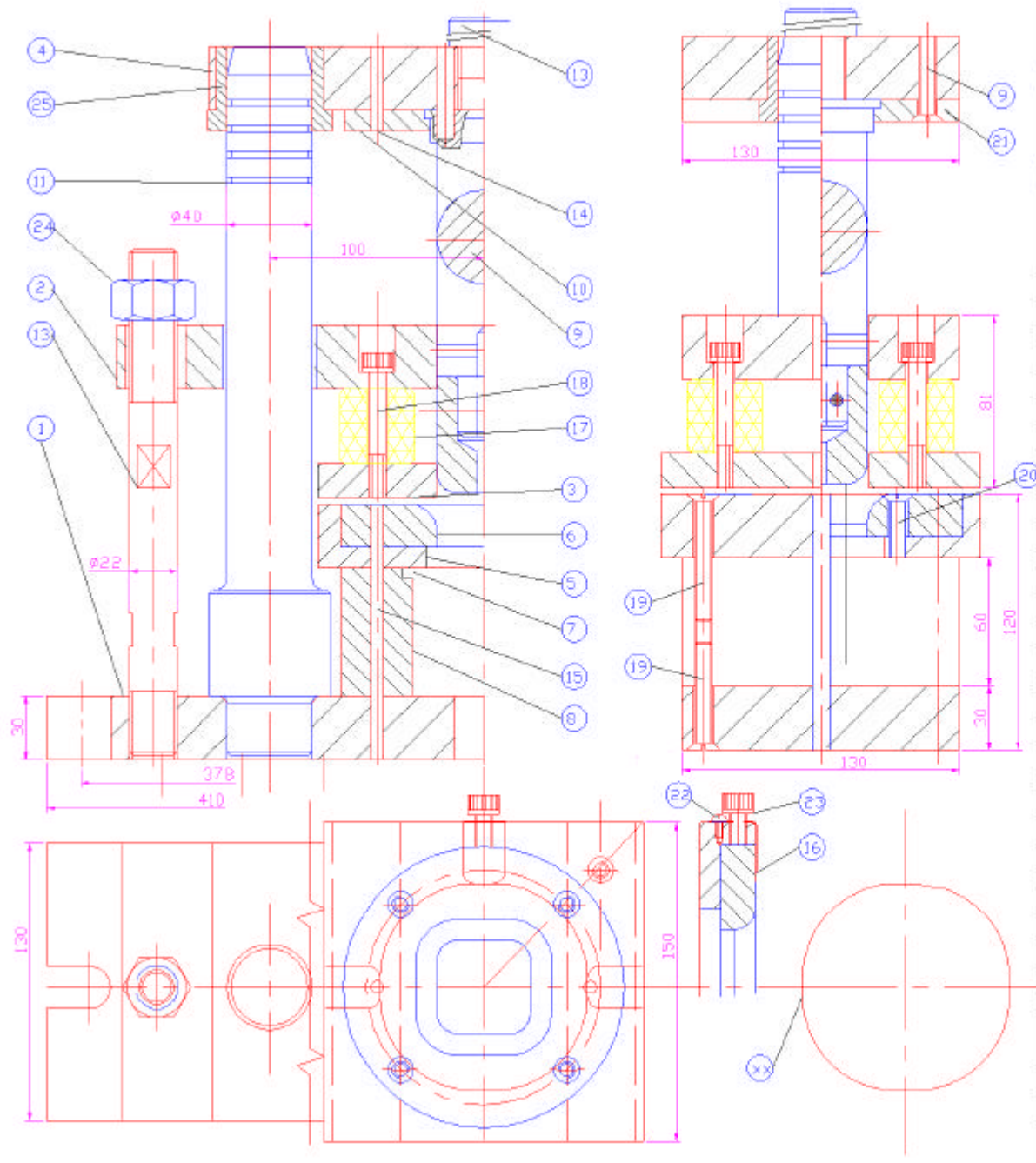
Figura B.3 Curvas  $\sigma \times \epsilon$  convencional e real

## 8. Conclusões

Podemos concluir que o material da chapa analisada apresenta excelentes características de estampabilidade, como pode ser comprovado pelos valores de alongamento e de resistência do material apresentado no ensaio de tração.

A razão plástica obtida no ensaio ( $r_m = 1,62$ ), e índice de orelhamento ( $\Delta r = 0,22$ ) demonstram que o material da chapa apresenta boas características de estampabilidade. Já que para os aços a razão plástica deve variar entre 1 e 2, e quanto mais alto o valor de “ r ” maior resistência do material a diminuição da espessura.





PESO BRUTO = 65,87 Kg  
 PESO LIQUIDO = 51,50 Kg

XX	6	BLANK - CH 0,7 x 100 x 100	ABNT 1020		1
26	.	.	.	.	-
25	2	BUCHA - TARUGO $\varnothing 76 \times \varnothing 39 \times 45$	BRONZE		-
24	4	POPCA SEXT. $\varnothing 7/8"$	CDN- GALV		-
23	4	PARAF. SEXT INT. $\varnothing 5/16" \times 20$	CDN- GALV		-
22	3	PARAF. CAB RED. $\varnothing 1/8" \times 30$	CDN- GALV		-
21	4	PARAF. CAB ESCAR. $\varnothing 5/16" \times 30$	CDN- GALV		-
20	4	PARAF. CAB ESCAR. $\varnothing 5/16" \times 32$	CDN- GALV		-
19	4	PARAF. CAB ESCAR. $\varnothing 3/16" \times 56$	CDN- GALV		-
18	2	PARAF. SEXT INT. $\varnothing 3/8" \times 52$	ABNT 1020		-
17	4	MOLA - BARRA $\varnothing 40 \times 40$	FLASTIPRENE		0,20
16	3	GUIA BLANK - CH 0,5 x 20 x 60	ABNT 1020		0,02
15	2	PINO GUIA - BARRA $\varnothing 8" \times 130$	AÇO PRATA		0,37
14	3	PINO GUIA - BARRA $\varnothing 8" \times 50$	AÇO PRATA		0,15
13	1	ESPIGA - BARRA $\varnothing 1/8" \times 120$	ABNT 1020		0,50
12	2	TIRANTES - BARRA $\varnothing 1" \times 250$	ABNT 1020		0,75
11	2	COLUNAS - BARRA $\varnothing 57 \times 345$	ABNT 1020		6,90
10	1	PORTA PUNÇÃO - CH3 x 140 x 140	ABNT 1020		2,00
9	1	PUNÇÃO - BARRA 50 x 50 x 200	VND		3,31
8	2	MESA - CH 33 x 65 x 135	ABNT 1020		4,54
7	2	EXTRATOR - CH 6 x 80 x 120	ABNT 1020		0,85
6	1	MATRIZ - CH19 x $\varnothing 140$	VC 130		2,30
5	1	PORTA MAT - CH33 x 160 x 160	ABNT 1020		6,63
4	1	BATENTE - CH33 x 140 x 260	ABNT 1020		6,30
3	1	PR CHAPA - CH16 x 160 x 160	ABNT 1020		3,20
2	1	PR CHAPA - CH33 x 140 x 345	ABNT 1020		12,56
1	1	BASE - CH33 x 140 x 425	ABNT 1020		15,46
ITEM	QTD	DESCRIÇÃO DE MATERIAIS	MAT	QDD	PESO

Unesp - FEG Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

DISCIPLINA - ABRILHO DA ESTAMPAGEM DE CHAPAS METÁLICAS UTILIZANDO ELEMENTOS PIVOTE		2002
Disc	Ailton Rodrigues da Costa	Orientador Fernando de Azevedo Silva
Escala	Título Ferreiros - Conjunto	Numero
1 :	Estampo para embutir uma caixa quadrada 40 x 40 x 45	FE - 01 Rev 3

## D – EXPERIMENTO

### 1. Introdução

Neste apêndice são apresentados os parâmetros e resultados dos experimentos :

- Desenho EX – 01 - testes T 01 e T 02;
- Desenho EX – 02 - testes T 03 e T 04;
- Desenho EX – 03 - testes T 05 a T 09;
- Desenho EX – 04 - testes T 10 a T 12;
- Desenho EX – 05 - testes T 13 e T 14;
- Desenho EX – 06 - testes T 15 a T 17;
- Desenho EX – 07 - testes T 18 e T 19;
- Desenho EX – 08 - testes T 20 a T 23;
- Desenho EX – 09 - testes T 24 e T 25;
- Desenho EX – 10 - testes T 27 e T 28;
- Desenho EX – 11 - testes T 29 e T 30;
- Desenho EX – 12 - testes T 31 a T 39;

A partir dos destes testes foram determinados os parâmetros para os experimentos de estampagem expostos no capítulo 6 e cujos resultados são apresentados no capítulo 7.

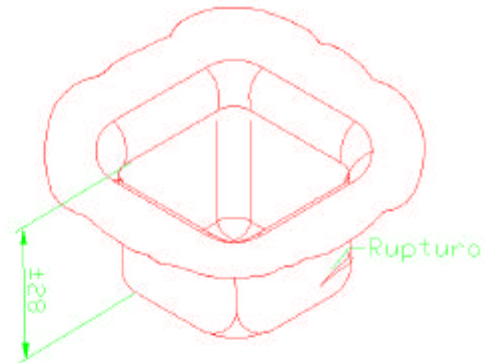
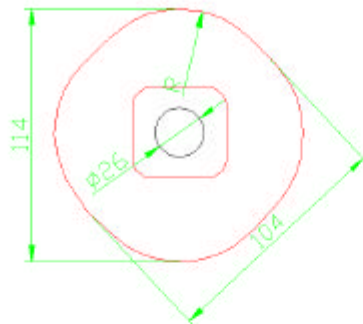
Tambem neste apêndice as tabelas com resultados das medições nas caixas estampadas e simuladas são apresentadas. As curvas geradas a partir destas tabelas se encontram no capítulo 7.

Experimento n°: T31 à 37

Data: 08/08/03

165

Blank - Aumentando blank para se obter uma flange mais larga.



Força no Prensa Chapa : 750/700/650/600 Kgf Velocidade de deslocamento : 10,00 mm/min

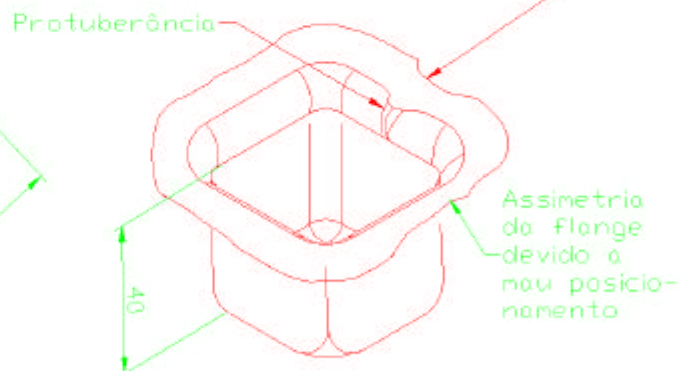
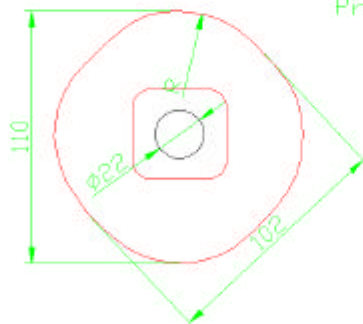
Força Máx no Punção : 5030 Kgf 49,31 KN Lubrificante : Graxa - Retinax -SHELL

Obs: Todas romperam no fundo, aproximadamente com a mesma profundidade de 28 mm, independentemente da carga no prensa chapa.

Experimento n°: T 38 e 39

Data: 08/08/03

Blank - tentando chegar a 40 mm com o blank devido o erro na geometria do blank e ou posicionamento



Força no Prensa Chapa : 700 Kgf 6,86 KN Velocidade de deslocamento 10,00 mm/min

Força Máx no Punção : 4890 Kgf 47,95 KN Lubrificante : Graxa - Retinax -SHELL

Obs: Atingiu 40 mm, mas com formação de protuberâncias no centro da flange, conclui-se que a altura máxima para esse blank deve ser mesmo 39 mm, a assimetria na flange deve ser corrigida com mais rigor na geometria do blank e no seu posicionamento.

Unesp - FEG - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá		DISSERTAÇÃO - ANÁLISE DA ESTAMPAGEM UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS	
Nome Ailton Rodrigues da Costa	Orientador Fernando de Azevedo Silva	Título Resultados dos ensaios	Número Ex- 12

**RELATÓRIO DE MEDIÇÃO**  
**D.9 DADOS PARA DA MOLA**  
**MEDIDAS TOMADAS NOS PONTOS DA CURVA**  
**DO CONJUNTO DE MOLAS DE POLIURETANO**

178

**APLICAÇÃO GRADUAL DA CARGA NO CONJUNTO DO PRENSA CHAPA**  
**ATÉ ATINGIR UMA DEFORMAÇÃO 25 % DA ALTURA DAS MOLAS ( 8,75mm)**

PONTO	ALTURA MOLA		DEFORMAÇÃO		GRÁFICO PLOTADO		
	ALTURA MOLA	mm	%	COMP.	ALTURA	FORÇA Kgf	FORÇA KN
1	35,00	0,00	0,00%	0,00	0,00	0	0,00E+00
2	33,75	1,25	3,57%	23,50	12,35	500	4,90E+03
3	33,44	1,56	4,46%	29,50	14,80	600	5,88E+03
4	33,20	1,80	5,14%	34,00	16,00	650	6,37E+03
5	33,00	2,00	5,71%	37,50	17,30	700	6,86E+03
6	32,85	2,15	6,14%	40,50	18,50	750	7,35E+03
7	32,70	2,30	6,57%	44,00	19,75	800	7,84E+03
8	32,55	2,45	7,00%	46,50	21,00	850	8,33E+03
9	32,40	2,60	7,43%	48,50	22,20	900	8,82E+03
10	32,20	2,80	8,00%	52,50	23,50	950	9,31E+03
11	32,00	3,00	8,57%	56,50	24,70	1000	9,80E+03
12	31,70	3,30	9,43%	62,50	27,15	1100	1,08E+04
13	31,50	3,50	10,00%	66,50	29,60	1200	1,18E+04
14	31,10	3,90	11,14%	73,00	32,10	1300	1,27E+04
15	30,50	4,50	12,86%	80,00	34,60	1400	1,37E+04
16	30,30	4,70	13,43%	88,00	37,80	1500	1,47E+04
18	29,20	5,80	16,57%	110,00	43,20	1750	1,72E+04
19	28,00	7,00	20,00%	132,00	49,40	2000	1,96E+04
20	26,25	8,75	25,00%	165,00	59,00	2390	2,34E+04







## APÊNDICE E

### E - Registro fotográfico

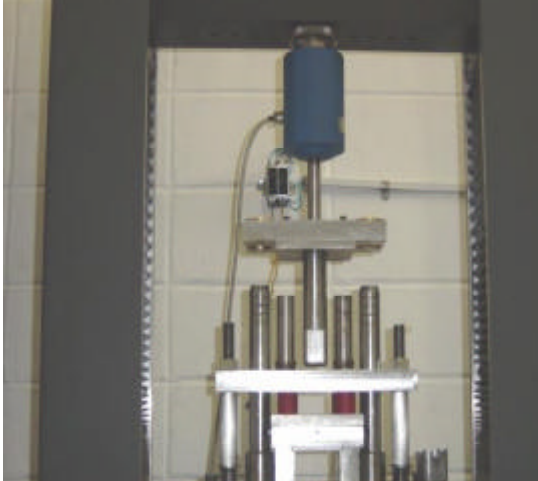


Figura E.1 - Ferramenta montada.



Figura E.2 - Detalhe da montagem do punção.

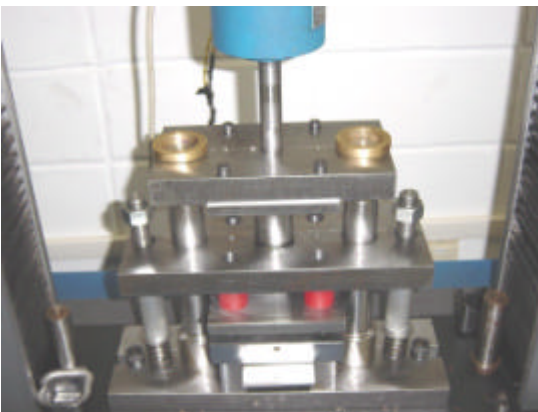


Figura E.3 - Ferramenta montada.

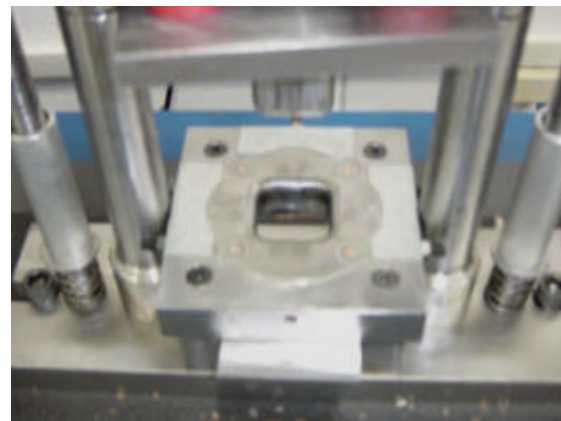


Figura E.4 - Detalhe da matriz.



Figura E.5 - Lubrificação do blank.

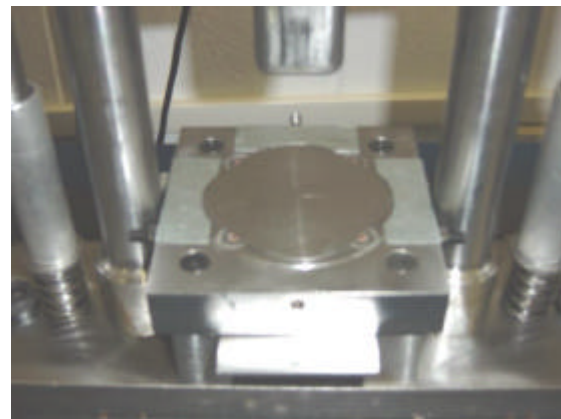


Figura E.6 - Alimentação.



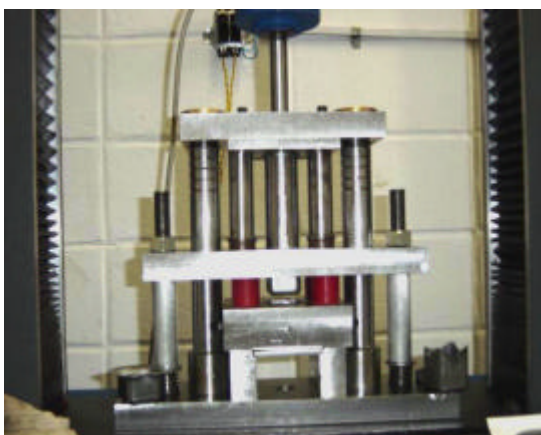


Figura E.7 - Aplicando a carga no prensa-chapa.

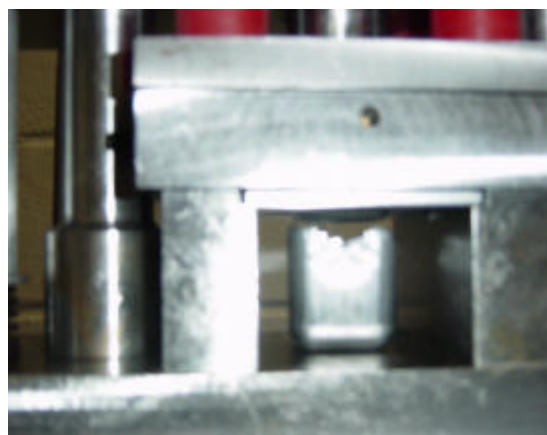


Figura E.8 - Extraíndo a caixa sem flange por baixo da mesa.

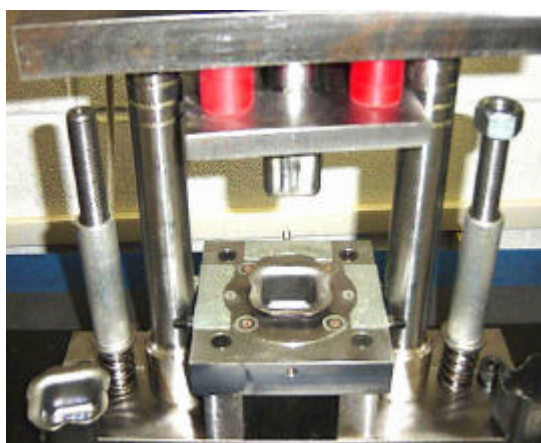


Figura E.9 - Extraíndo a caixa com flange por cima.



Figura E.10 - Testes (ruptura das caixas).



Figura E.11 - Caixas com flanges.

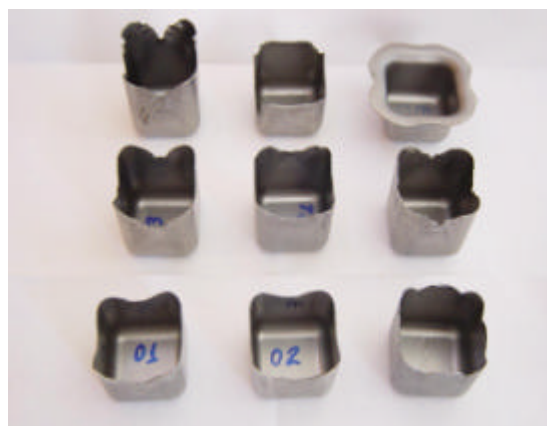


Figura E.12 - Caixas sem flanges.



Figura E.13 - Caixas de 38 mm.

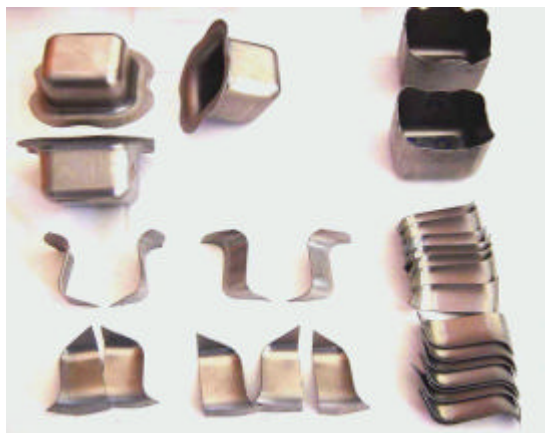


Figura E.14 - Setores preparados para medição.



Figura E.15 - Ferramenta desmontada.

## APÊNDICE F

### F – PROGRAMA PARA SIMULAÇÃO NO ANSYS 6.0

Este programa deve ser carregado no ANSYS 6.0 pelo comando: File/read input from. Terminado o carregamento verificar se o número de nós pilotos está correto, dependendo da versão do ANSYS que estiver sendo utilizada os números dos nós são modificados, corrigir se necessário os endereços, nos contatos, restrições, monitor e loop.

Para rodar o primeiro passo de tempo alterar os valores de :

TIN INC = 1.20

TIN FIN = 1.25

Inserir a instrução **/com,** na linha de comando : D,4742,UZ,avanco(TIM)

Digitar no menu input ALLSEL <enter>.

=> Solution/solve/Current LS<enter>

Ignorar as mensagens de advertência.

Para rodar o segundo passo de tempo alterar os valores de :

TIN INC = 37.50

TIN FIN = 37.45

Inserir a instrução **/com,** na linha de comando : F,51222,FZ,forca(TIM)

Selecionar no TXT do programa as instruções de condições de contorno , partindo da vinculação da matriz até ENDDO e colar no menu input ALLSEL <enter>.

Digitar no menu input ALLSEL <enter>.

=> Solution/solve/Current LS<enter>

Ignorar as mensagens de advertência.

O programa deve ser gravado como TXT a partir destas instruções.

\*\*\*\*\*

```

/prep7
DOF,UX,UY,UZ
!*
/com,CxFnSm - Adaptado p ansys 6.0
/com,chapa 0,75mm esp.,Blank
aproximado
!*
/title,ESTAMPAGEM DA CAIXA
/com,,Structural
/units,si
/UIS,MSGPOP,3
/NERR,5,15000,
!*
/com,Modelagem da Matriz
k,,0,0,0 !kp 01
k,,0,0,6 !kp 02
k,,0,0,16 !kp 03
k,,22.9,0,0 !kp 04
k,,55,0,0 !kp 05
k,,55,0,16 !kp 06
k,,30.4,0,16 !kp 07
k,,22.9,0,8.5 !kp 08
k,,30.4,0,8.5 !kp 09
k,,22.9,12.9,0 !kp 10
k,,22.9,12.9,8.5 !kp 11
k,,30.4,12.9,16 !kp 12
k,,30.4,12.9,8.5 !kp 13
k,,19.971068,19.971068,0 !kp 14
k,,19.971068,19.971068,8.5 !kp 15
k,,25.274369,25.274369,16 !kp 16
k,,38.8934,38.8934,16 !kp 17
k,,38.8934,38.8934,0 !kp 18
l,4,5 !L 01
l,5,6 !L 02
l,6,7 !L 03
LARC,7,8,9,7.5 !L 04
l,8,4 !L 05
l,4,10 !L 06
l,10,11 !L 07
LARC,11,12,13,7.5 !L 08
l,8,11 !L 09
l,7,12 !L 10
LARC,10,14,1,10 !L 11
LARC,11,15,2,10 !L 12
LARC,12,16,3,17.5 !L 13
l,14,15 !L 14
LARC,15,16,18,7.5 !L 15
l,16,17 !L 16
l,17,18 !L 17
LARC,17,6,3,55 !L 18
LARC,18,5,1,55 !L 19
l,18,14 !L 20
lsel,all
lesize,4,,,14

```

```

lesize,8,,,14
lesize,15,,,14
lesize,6,,,8
lesize,9,,,8
lesize,10,,,10
lesize,18,,,24
lesize,11,,,8
lesize,12,,,8
lesize,13,,,12
lesize,16,,,10
lesize,3,,,12
al,1,2,3,4,5      !A 01
al,5,6,7,9        !A 02
al,4,9,8,10       !A 03
al,7,11,12,14     !A 04
al,8,13,15,12     !A 05
al,16,17,20,14,15 !A 06
al,17,18,2,19     !A 07
al,3,10,13,16,18  !A 08
al,1,6,11,20,19   !A 09
va,1,2,3,4,5,6,7,8,9
vsel,s,volu,,1,1
cm,matriz,volu
!*
!*
/com,Modelagem do Puncao
k,,0,0,18          !kp 19
k,,12.9,12.9,25.5 !kp 20
k,,0,0,58          !kp 21
k,,22,0,58         !kp 22
k,,22,0,25.5       !kp 23
k,,14.5,0,18       !kp 24
k,,22,12.9,58      !kp 25
k,,22,12.9,25.5    !kp 26
k,,14.5,12.9,18    !kp 27
k,,19.334672,19.334672,58 !kp 28
k,,19.334672,19.334672,25.5 !kp 29
k,,14.031371,14.031371,18 !kp 30
l,19,21            !L 21
l,21,22            !L 22
l,22,23            !L 23
larc,23,24,19,7.5 !L 24
l,24,19            !L 25
l,24,27            !L 26
l,23,26            !L 27
l,22,25            !L 28
l,25,26            !L 29
larc,26,27,20,7.5 !L 30
larc,26,29,20,7.5 !L 31
larc,25,28,21,7.5 !L 32
l,28,29            !L 33
larc,29,30,20,7.5 !L 34
l,30,19            !L 35
l,28,21            !L 36
larc,27,30,19,1.6 !L 37
lssel,all
lesize,24,,,16

lesize,26,,,16
lesize,27,,,16
lesize,28,,,16
lesize,30,,,16
lesize,31,,,8
lesize,32,,,8
lesize,34,,,16
lesize,35,,,16
lesize,23,,,20
lesize,33,,,20
lesize,29,,,20
al,21,22,23,24,25 !A 10
al,23,28,29,27    !A 11
al,24,27,30,26    !A 12
al,29,32,33,31    !A 13
al,31,34,30,37    !A 14
al,35,26,25,37    !A 15
al,21,35,34,33,36 !A 16
al,22,28,32,36    !A 17
asel,all
va,10,11,12,13,14,15,16,17
vsel,s,volu,,2,2
CM,puncao,VOLU
!*
!*
/com,Modelagem do Prensa Chapas
k,,22.5,0,16.75   !kp 31
k,,55,0,16.75     !kp 32
k,,38.8934,38.8934,16.75 !kp 33
k,,19.688225,19.688225,16.75 !kp 34
k,,22.5,12.9,16.75 !kp 35
k,,0,0,16.75      !kp 36
k,,0,0,27         !kp 37
k,,22.5,0,27      !kp 38
k,,55,0,27        !kp 39
k,,38.8934,38.8934,27 !kp 40
k,,19.688225,19.688225,27 !kp 41
k,,22.5,12.9,27   !kp 42
l,31,32            !L 38
l,32,39            !L 39
l,39,38            !L 40
l,38,31            !L 41
l,38,42            !L 42
l,42,35            !L 43
l,35,31            !L 44
LARC,42,41,37,9.6 !L 45
l,41,34            !L 46
LARC,34,35,36,9.6 !L 47
l,41,40            !L 48
l,40,33            !L 49
l,33,34            !L 50
LARC,40,39,37,55 !L 51
LARC,32,33,36,55 !L 52
lssel,all
lesize,38,,,16
lesize,44,,,10
lesize,47,,,10

```

```

lesize,50,,,16
lesize,52,,,20
al,38,39,40,41      !A 18
al,41,42,43,44      !A 19
al,43,45,46,47      !A 20
al,46,48,49,50      !A 21
al,49,51,39,52      !A 22
al,40,51,48,45,42   !A 23
al,38,52,50,47,44   !A 24
va,18,19,20,21,22,23,24
vsel,s,volu,,3,3
cm,PRENSCHP,volu
!*
!*
/com,Modelagem da chapa
k,,0,0,16           !KP 43
k,,55,0,16          !KP 44
k,,55,0,16.75       !KP 45
k,,0,0,16.75        !KP 46
k,,47.388,24.7369,16 !KP 47
k,,47.388,24.7369,16.75 !KP 48
k,,36.0624,36.0624,16.75 !KP 49
k,,36.0624,36.0624,16 !KP 50
l,43,44             !L 53
l,44,45             !L 54
l,45,46             !L 55
l,46,43             !L 56
LARC,44,47,43,44   !L 57
l,47,48             !L 58
LARC,45,48,46,44   !L 59
l,48,49             !L 60
l,49,46             !L 61
l,49,50             !L 62
l,50,47             !L 63
l,50,43             !L 64
lsel,all
lesize,56,,,1
lesize,54,,,1
lesize,58,,,1
lesize,62,,,1
lesize,53,,,38
lesize,57,,,38
lesize,63,,,38
lesize,64,,,38
lesize,55,,,38
lesize,59,,,38
lesize,60,,,38
lesize,61,,,38
al,53,54,55,56      !A 25
al,54,57,58,59      !A 26
al,58,60,62,63      !A 27
al,62,61,56,64      !A 28
al,53,57,63,64      !A 29
al,55,59,60,61      !A 30
asel,all
va,25,26,27,28,29,30
vsel,s,volu,,4,4
cm,Chapa,volu
!*
!*
/com,Aplicacao da malha na chapa
!*
mat,1
ET,1,107
KEYOPT,1,5,2
KEYOPT,1,6,1
KEYOPT,1,7,1
ESYS,0
VSEL,S,,,4
VMESH,chapa
NSEL,ALL
CM,CHAPAN,NODE
!*
!*
/com,Tabelas de Propriedades de
Materiais
MP,EX,1,207000
MP,EX,2,207000
MP,EX,3,207000
MP,NUXY,1,0.3
MP,NUXY,2,0.3
MP,MU,3,
TB,MISO,1
TBPT,,3.96E-4,82
TBPT,,0.0062,150.94
TBPT,,0.0162,183.93
TBPT,,0.0260,206.13
TBPT,,0.0369,227.24
TBPT,,0.0725,268.24
TBPT,,0.1069,305.25
TBPT,,0.1401,325.91
TBPT,,0.1723,344.05
TBPT,,0.2035,360.21
TBPT,,0.2337,373.94
TBPT,,0.2685,387.17
TBPT,,0.2915,396.17
TBPT,,0.3193,407.33
TBPLOT
EPLOT
!*
R,2,450000,0
!*
R,3,450000,0
!*
R,4,450000,,1,.01,.01,3,
RMORE,, , , ,1,
!*
R,5,450000,0
!*
R,6,450000,1,1,.01,.01,3,
RMORE,, , , ,1,
!*
R,7,450000,1,1,.01,.01,3,

```

```

RMORE, , , , ,1,
!*
!*
R,8,450000,1,1,.01,.01,3,
RMORE, , , , ,1,
!*
R,9,450000,1,1,.01,.01,3,
RMORE, , , , ,1,
!*
!*
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
/COM, CONTATO CHAPA-MATRIZ
MP,MU,5,.15
MAT,5
R,5,450000
REAL,5
ET,5,170
ET,6,174
RMODIF,5,1,,,1.0,0.1,,
RMODIF,5,7,,,1.0e20,0.0,1.0
KEYOPT,6,2,0
KEYOPT,6,6,0
KEYOPT,6,7,0
KEYOPT,6,8,0
KEYOPT,6,9,2
KEYOPT,6,11,
KEYOPT,6,12,0
KEYOPT,6,1,0
KEYOPT,6,2,0
ASEL,S,,,2
ASEL,A,,,3
ASEL,A,,,4
ASEL,A,,,5
ASEL,A,,,8
CM,_TARGET,AREA
TYPE,5
NSLA,S,1
ESLN,S,0
tshap,qua
AMESH,all
!*
tshap,pilo
ksel,s,,,1,1,1,0
kmesh,1
!*
ASEL,S,,,2
NSLA,S,1
ESLN,S,1
ESURF,,REVERSE
ASEL,S,,,3
NSLA,S,1
ESLN,S,1
ESURF,,REVERSE
ASEL, , , , ,8
NSLA,S,1
ESLN,S,1
ESURF,,REVERSE
!*
ASEL,S,,,29
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,6
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESURF,,BOTOM
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,5
ESEL,A,TYPE,,6
ESEL,R,REAL,,5
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END
!*
!*
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
/COM, CONTATO CHAPA-PUNCAO
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,7,.15
MAT,7
R,7,450000
REAL,7
ET,7,170
ET,8,174
RMODIF,7,1,,,1.0,0.1,,
RMODIF,7,7,,,1.0e20,0.0,1.0
KEYOPT,8,2,0
KEYOPT,8,6,0
KEYOPT,8,7,0
KEYOPT,8,8,0
KEYOPT,8,9,2
KEYOPT,8,11,
KEYOPT,8,12,0
KEYOPT,8,1,0
KEYOPT,8,2,0
!*
ASEL,S,,,11
ASEL,A,,,12
ASEL,A,,,13
ASEL,A,,,14
ASEL,A,,,15
CM,_TARGET,AREA
TYPE,7
NSLA,S,1
ESLN,S,0
tshap,qua
AMESH,all
!*
tshap,pilo
ksel,s,,,21,21,1,0
kmesh,21

```

```

NSLK,S,21
ASEL,S,,14
NSLA,S,1
ESLN,S,1
ESURF,,REVERSE
ASEL,S,,15
NSLA,S,1
ESLN,S,1
ESURF,,REVERSE
!*
ASEL,S,,30
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,8
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESURF,ALL
ESEL,S,TYPE,,7
ESEL,A,TYPE,,8
ESEL,R,REAL,,7
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END
!*
!*
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
/COM, CONTATO CHAPA-PRENSA-CHAPA
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,9,.15
MAT,9
R,9,450000
REAL,9
ET,9,170
ET,10,174
RMODIF,9,1,,,1.0,0.1,,
RMODIF,9,7,,,1.0e20,0.0,1.0
KEYOPT,10,2,0
KEYOPT,10,6,0
KEYOPT,10,7,0
KEYOPT,10,8,0
KEYOPT,10,9,2
KEYOPT,10,11,
KEYOPT,10,12,0
! Generate the target surface
ASEL,S,,24
CM,_TARGET,AREA
TYPE,9
NSLA,S,1
ESLN,S,0
tshap,QUA
AMESH,all
!*
tshap,pilo
ksel,s,,,37,37,1,0

kmesh,37
ASEL,, , , ,24
NSLA,S,1
ESLN,S,1
ESURF,,REVERSE
!*
! Generate the contact surface
ASEL,S,,30
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,10
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESURF,,TOP
ESEL,S,TYPE,,9
ESEL,A,TYPE,,10
ESEL,R,REAL,,9
ASEL,S,REAL,,9
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END
!*
!*
/solu
/com,Tabela de avanço do punção
*dim,Avanco,table,3,1
*set,Avanco(1,1),0,-1.25,-37.5
*set,Avanco(1,0),0,0.4,12.5
*set,Avanco(0,1),1
!*
/com,Aplicação da força no prensa
chapa
/com,**Nota:aplicar 1/8 da força
total calculada/desejada
/com,para a area livre no pensa chapa
*dim,Forca,table,3,1
*set,Forca(1,1),-858,-858,-858
*set,Forca(1,0),0,0.4,12.5
*set,Forca(0,1),1
!*
/com,Condicoes de processamento
NLGEOM,ON
SSTIF,OFF
AUTOTS,ON
NEQIT,25
PRED,ON
DELTIM,0.05,0.005,0.05,on
CNVTOL,F,,0.005,2,0.01,
NCNV,2,0,0,0,0
!*
/com,Vinculando da matriz em UX,UY,UZ
Nsel,s,,,3773,3773,1,
D,3773,,0,,,,UX,UY,UZ,,,,,
!*

```

```

/com, Vinculando o puncao em UX e UY
Nsel,s,,,4742,4742,1,
D,4742,,0,,,,UX,UY,,,,,
!*
/com,Vinculando o prensa chapa em UX
e UZ
nsel,s,,,5122,5122,1,0
D,5122,,0,,,,UX,UY,,,,,
!*
/com, Vinculando a chapa no centro
Nsel,s,,,1,1,1,
D,1,,0,,,,UX,UY,,,,,
Nsel,s,,,41,41,1,
D,41,,0,,,,UX,UY,,,,,
!*
ASEL,S,,,25,
NSLA,S,25,
nsel,U,,,1,1,1,
nsel,U,,,41,41,1,
DA,25,SYMM
DTRAN
!*
ASEL,S,,,28,
NSLA,S,28,
nsel,U,,,1,1,1,
nsel,U,,,41,41,1,
DA,28,SYMM
DTRAN
!*
/com, Eliminando a rotacao em todos
os
/com, elementos do modelo
nsel,S,,,CHAPAN
D,all,,0,,,,ROTX,ROTY,ROTZ,,,
!*
/com,Monitorando forcas e reacoes nos
/com,pilotos do Puncao,Pchapa e
matriz
NSEL,S,,,4742
MONITOR,1,4742,UZ
NSEL,S,,,4742
MONITOR,2,4742,FZ
NSEL,S,,,5122
MONITOR,3,5122,FZ
/com,Geracao do loop de carregamento
TIM_INI=0.05
TIM_FIN=37.50
TIM_INC=37.45
*DO,TIM,TIM_INI,TIM_FIN,TIM_INC
TIME,TIM
!*
Nsel,s,,,4742,4742,1,
D,4742,UZ,avanco(TIM)
!*
Nsel,s,,,5122,5122,1,
F,5122,FZ,forca(TIM)
!*
ALLSEL
!*
/COM,SOLVE
*ENDDO

```