

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Desenvolvimento de um programa paramétrico para
simulação do processo de estampagem utilizando
elementos finitos

Guaratinguetá
2009

ERICK SIQUEIRA GUIDI

DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA PARAMÉTRICO PARA
SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM UTILIZANDO
ELEMENTOS FINITOS

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

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

Guaratinguetá
2009

G947d	Guidi, Erick Siqueira Desenvolvimento de um programa para métrico para simulação do processo de estampagem utilizando elementos finitos / Erick Siqueira Guidi. – Guaratinguetá: [s.n.], 2009 109 f.: il. Bibliografia: f. 76-80 Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2009 Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva 1. Estampagem (Trabalhos em metal) 2. Elementos finitos I. Título CDU 31.434.1
-------	--



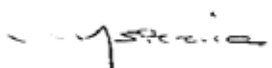
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

ERICK SIQUEIRA GUIDI

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: PROJETOS

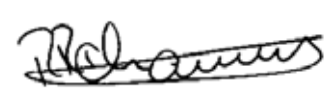
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. ÂNGELO CAPORALI FILHO
Unesp-Feg


Prof. Dr. RICARDO RISSO CHAVES
UNIFEI/DEM

maio de 2009

Dedicatória

De modo especial, aos meus pais, Luiz Fernando e Maria Elizabeth, e ao meu irmão, Eliandro, pelo incentivo, apoio e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por todas as dádivas que Ele me proporcionou,

Aos meus pais, Luiz Fernando e Maria Elizabeth, e ao meu irmão, Eliandro, que sempre me incentivaram em meus estudos,

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva, pela confiança, incentivo, auxílio e compreensão desde o início do desenvolvimento deste projeto,

A CAPES, pela concessão de uma bolsa de estudos,

Ao CNPq, pela concessão de uma bolsa de estudos,

Ao Professor Ailton Rodrigues da Costa, pela ajuda e auxílio no desenvolvimento deste trabalho,

Aos técnicos da oficina mecânica e dos laboratórios pela ajuda nos ensaios,

Às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá, pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

À Rio Negro empresa do Grupo USIMINAS que doou a chapa para o experimento.

GUIDI, E. S. Desenvolvimento de um programa paramétrico para simulação do processo de estampagem utilizando elementos finitos. 2009. 109f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

RESUMO

Dentre os processos de conformação mecânica de metais por deformação plástica, a estampagem possui grande importância por possibilitar a obtenção de produtos de diversos formatos, semi-acabados ou acabados e com boas propriedades mecânicas. A simulação computacional utilizando o método dos elementos finitos apresentou um grande desenvolvimento na última década, hoje é uma importante ferramenta de análise de projetos. Neste trabalho é apresentada a elaboração de um arquivo paramétrico, em linguagem APDL, de simulação do processo de estampagem de copos cilíndricos para o programa comercial ANSYS® 7.0. Este arquivo é construído de maneira automática por um programa criado no software de programação DELPHI 7.0. O paramétrico irá auxiliar o projetista na análise das variáveis do processo de estampagem e no desenvolvimento de ferramental, permitindo realizar um estudo dessas variáveis de maneira isolada ou com vários fatores simultâneos. Para a validação do arquivo paramétrico foram realizados ensaios que foram confrontados com os resultados obtidos nas simulações.

PALAVRAS-CHAVE: Estampagem profunda, Paramétrico, Elementos finitos.

GUIDI, E. S. Development of a parametric program for simulation of the stamping process using finite elements. 2009. 109f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

ABSTRACT

Among the processes of forming metals by plastic deformation, the stamping possesses great importance for facilitating the obtaining the products of several formats, near net-shape or net-shape and with good mechanical properties. The computational simulation using the finite elements method presented a great development in the last decade, today it is an important tool of analysis the projects. In this work the elaboration of a parametric file, in language APDL, of simulation of the stamping process of cylindrical cups for the commercial program ANSYS® 7.0. This file is built in an automatic way by a program making in the programming software DELPHI 7.0. The parametric will help the designer in the analysis of the stamping process variables and development of tools, allowing accomplishing a study of these variables alone or with several factors simultaneously. For validation of the file parametric was accomplished experimentals that were confronted with the results obtained in the simulations.

KEYWORDS: Deep-drawing, Parametric, Finite elements.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Operação de estampagem profunda	25
FIGURA 2.2 – Forma mais comum de punções utilizados em processos de estampagem profunda	26
FIGURA 2.3 – Raio da matriz de estampagem profunda	27
FIGURA 2.4 – Prensa-chapas acionado por molas	28
FIGURA 2.5 – Copo cilíndrico com orelhamento	29
FIGURA 2.6 – Elemento de volume antes e depois de uma deformação plástica causada por uma força agindo no sentido longitudinal.....	29
FIGURA 2.7 – Esquematização do processo de análise por elementos finitos	32
FIGURA 3.1 – Máquina de ensaios utilizada.....	34
FIGURA 3.2 – Curva σ versus ε real	35
FIGURA 3.3 – Peças estampadas.....	36
FIGURA 3.4 – Ferramenta utilizada no ensaio.....	38
FIGURA 3.5 – Base da ferramenta.....	38
FIGURA 3.6 – <i>Blank</i> com as marcações	39
FIGURA 3.7 – Aplicação da força no prensa-chapas.....	40
FIGURA 3.8 – Copo estampado.....	40
FIGURA 3.9 – Corte do copo estampado	41
FIGURA 4.1 – Etapas para a construção de um modelo paramétrico.....	43
FIGURA 4.2 – Interface principal do programa Estampagem Profunda.....	44
FIGURA 4.3 – Interface do arquivo paramétrico.....	45
FIGURA 4.4 – Fluxograma com resumo do funcionamento do programa.....	46
FIGURA 4.5 – Geometria de 1/8 do modelo	46
FIGURA 4.6 – Pares de contato	47
FIGURA 4.7 – Curva MISO para o material	48
FIGURA 4.8 – Elemento VISCO107	49
FIGURA 4.9 – Gráfico de convergência da 1ª etapa de carregamento.	53
FIGURA 4.10 – Gráfico de convergência da 2ª etapa de carregamento.....	53
FIGURA 4.11 – Modelo com 1/8 da chapa deformada.	54
FIGURA 4.12 – Modelo expandido da chapa deformada.....	55

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 4.13 – Modelo expandido com defeito de enrugamento no flange.	55
FIGURA 5.1 – Peça estampada na simulação.....	56
FIGURA 5.2 – Peça estampada no ensaio.	57
FIGURA 5.3 – Curvas de força de estampagem aplicada no punção versus deslocamento.	57
FIGURA 5.4 – Curva da variação de espessura em relação à posição radial inicial da simulação.....	58
FIGURA 5.5 – Peça estampada na simulação.....	59
FIGURA 5.6 – Peça estampada no ensaio.	59
FIGURA 5.7 – Curvas de força de estampagem aplicada no punção versus deslocamento.	60
FIGURA 5.8 – Curva da variação de espessura em relação à posição radial inicial da simulação.....	60
FIGURA 5.9 – Peça estampada na simulação.....	61
FIGURA 5.10 – Peça estampada no ensaio.	62
FIGURA 5.11 – Detalhe do flange na simulação.....	62
FIGURA 5.12 – Detalhe do flange da peça ensaiada.	63
FIGURA 5.13 – Curvas de força de estampagem aplicada no punção versus deslocamento.	63
FIGURA 5.14 – Curva da variação de espessura em relação à posição radial inicial da simulação.....	64
FIGURA 5.15 – Peça estampada na simulação.....	65
FIGURA 5.16 – Peça estampada no ensaio.	65
FIGURA 5.17 – Curvas de força de estampagem aplicada no punção versus deslocamento.	66
FIGURA 5.18 – Curva da variação de espessura em relação a posição radial inicial da simulação.....	66
FIGURA 5.19 – Peça estampada na simulação.....	67
FIGURA 5.20 – Peça estampada no ensaio.	68
FIGURA 5.21 – Curvas de força de estampagem aplicada no punção versus deslocamento.	68

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 5.22 – Curva da variação de espessura em relação à posição radial inicial da simulação.....	69
FIGURA 5.23 – Peça estampada na simulação.....	70
FIGURA 5.24 – Peça estampada no ensaio.	70
FIGURA 5.25 – Curvas de força de estampagem aplicada no punção versus deslocamento.	71
FIGURA 5.26 – Curva da variação de espessura em relação à posição radial inicial da simulação.....	71
FIGURA 5.27 – Curvas de força de estampagem aplicada no punção versus deslocamento.	72
FIGURA 5.28 – Curva da variação de espessura em relação a posição radial inicial da simulação.....	72
FIGURA A.1 – Superfície de escoamento anisotrópica	82
FIGURA A.2 – Diagrama uniaxial de tensão-deformação para encruamento isotrópico ..	88
FIGURA A.3 – Solução de Newton-Rapson para uma iteração simples.....	89
FIGURA A.4 – Solução de Newton-Rapson para a próxima iteração	90
FIGURA A.5 – Procedimento incremental de Newton-Rapson	91
FIGURA A.6 – Método de detecção através dos pontos de integração de Gauss.....	93

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – Composição química (%) e propriedades mecânicas.....	35
TABELA 3.2 – Valores da razão plástica	35
TABELA 3.3 – Dimensões dos <i>blanks</i> e força aplicada pelo prensa-chapas	37
TABELA 5.1 – Resumo dos Resultados.....	73

LISTA DE SÍMBOLOS

$\{\epsilon^{el}\}$	Vetor de deformação elástica
$\{\epsilon\}$	Vetor de deformação total
$\{\epsilon^{th}\}$	Vetor de deformação térmica
$\{\epsilon^{pl}\}$	Vetor de deformação plástica
$\{\epsilon^{cr}\}$	Vetor de deformação <i>creep</i>
$\{\epsilon^{SW}\}$	Vetor de deformação inchamento (<i>Sweling</i>)
$\{\epsilon_n^{pl}\}$	Deformações plásticas correntes
$\Delta \epsilon^{pl}$	Incremento de deformação plástica
$\{\sigma^{tr}\}$	Tensão de ensaio
$[K_i^T]$	Matriz Jacobiana (matriz tangente)
$\{F_i^{nr}\}$	Vetor de retorno do carregamento correspondente ao elemento de carregamentos interno
$[K_{n,i}^T]$	Matriz tangente para o passo de tempo n na interação i
$\{F_n^a\}$	Vetor do carregamento total aplicado no passo de tempo n
$\{F_{n,i}^{nr}\}$	Vetor de retorno do carregamento para o passo tempo n na interação i
ϕ_l	Deformação verdadeira ao longo do comprimento
Δr	Anisotropia planar
$[D]$	Matriz tensão versus deformação
$[K]$	Vetor dos valores dos graus de liberdades desconhecidos
$\{a\}$	Tensão de retorno
$\{F^a\}$	Vetor dos carregamentos aplicados
$\{R\}$	Vetor residual
$\{s\}$	Tensão de desvio
$\{u\}$	Vetor tensão
$\{\Delta \alpha\}$	Centro da superfície de escoamento
$\{\alpha\}$	Translação da superfície de escoamento
$\{\sigma\}$	Vetor tensão
b_0	Largura inicial
b_l	Largura final
C	Parâmetro do material
d	Diâmetro do punção
D	Diâmetro do <i>blank</i>
e	Espessura do <i>blank</i>
E	Módulo de Young
EP	<i>extreme pressure</i> (extrema pressão)
E_T	Módulo da tangente do diagrama uniaxial de tensão versus deformação para encruamento isotrópico
h_l	Profundidade de estampagem
i	Subscrito que representa a interação do equilíbrio corrente
l_0	Comprimento inicial
l_l	Comprimento final
Q	Função da tensão

LISTA DE SÍMBOLOS

R_m	Resistência de ruptura
r_m	Anisotropia média
β	Razão de estampagem
β_{max}	Razão máxima de estampagem
σ_m	Tensão hidrostática
ϵ^{pl}	Deformação plástica equivalente
ϵ	
$\Delta\kappa$	Incrementos do trabalho plástico
κ	Trabalho plástico
λ	Multiplicador plástico
σ_e	Tensão equivalente
σ_k	Tensão de escoamento corrente
σ_y	Parâmetro de escoamento

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	17
1.2	ESTADO DA ARTE.....	18
1.3	OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS	21
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	22
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	23
2.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1.1	Introdução.....	23
2.1.2	Estampagem Profunda ou Embutimento.....	24
2.1.3	Ferramentas Utilizadas na Estampagem	25
2.1.3.1	Prensas de Estampagem	25
2.1.3.2	Matriz e Punção de Estampagem.....	25
2.1.3.3	Prensa-chapas	27
2.1.4	Estampabilidade dos Materiais Metálicos.....	28
2.1.4.1	Anisotropia	29
2.2	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	31
2.2.1	Introdução.....	31
2.2.2	Aplicação do método dos elementos finitos a processos de conformação de metais	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	ESPECIFICAÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO	34
3.1.2	Curva σ versus ϵ real.....	35
3.2	DETERMINAÇÃO DAS MEDIDAS DO <i>BLANK</i> E CÁLCULO DA FORÇA DO PRENSA-CHAPAS	36

3.3	PROJETO DAS FERRAMENTAS	37
3.4	EXPERIMENTO	39
4	PROGRAMA DE ESTAMPAGEM PROFUNDA	42
4.1	LINGUAGEM PARAMÉTRICA (APDL).....	42
4.2	PROGRAMA ESTAMPAGEM PROFUNDA	43
4.3	PRÉ-PROCESSAMENTO	46
4.3.1	Elemento VISCO107	48
4.4	SOLUÇÃO	49
4.4.1	Carregamento.....	49
4.4.2	Processamento	51
4.4.3	Monitor dos nós pilotos.....	52
4.5	PÓS-PROCESSAMENTO	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	56
5.1	MATRIZ E PUNÇÃO DE 10 [mm] DE RAIO	56
5.2	MATRIZ DE 10 [mm] E PUNÇÃO DE 5 [mm] DE RAIO	58
5.3	MATRIZ E PUNÇÃO DE 5 [mm] DE RAIO	61
5.4	MATRIZ E PUNÇÃO DE 10 [mm] DE RAIO	64
5.5	MATRIZ DE 5 [mm] E PUNÇÃO DE 10 [mm] DE RAIO	67
5.6	MATRIZ DE 5 [mm] E PUNÇÃO DE 15 [mm] DE RAIO	69
5.7	RESUMO E COMENTÁRIOS GERAIS	73
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS... 75	
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
	APÊNDICES	
A	APLICANDO A TEORIA DA PLASTICIDADE – RELAÇÕES NÃO- LINEARES (ANSYS® 7.0)	81
A.1	CRITÉRIO DE ESCOAMENTO	81

A.2	REGRA DO FLUXO	82
A.3	INCREMENTO PLÁSTICO DE DEFORMAÇÕES	83
A.4	IMPLEMENTAÇÃO	85
A.5	REGRA DO ENCRUAMENTO ISOTRÓPICO - MISO.....	87
A.6	PROCEDIMENTO DE NEWTON-RAPSON	88
A.7	CONVERGÊNCIA	92
A.8	CONTATO	93
B	DESENHO DA FERRAMENTA	94
C	ARQUIVO PARAMÉTRICO FONTE	99
C.1	ARQUIVO PARAMÉTRICO DE 1ª ETAPA.....	99
C.2	ARQUIVO PARAMÉTRICO DE 2ª ETAPA	108

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A estampagem é um processo de conformação mecânica, realizado geralmente a frio, que compreende um conjunto de operações, pelas quais uma chapa plana adquire uma nova forma geométrica. Esse processo pode alcançar elevada produtividade industrial, obtendo-se baixos custos de produção, baixo consumo de material, produtos semi-acabados ou acabados e com boas propriedades mecânicas, por esses motivos é um processo de conformação bastante utilizado nas indústrias. O desenvolvimento de seu ferramental normalmente é realizado com a utilização do método de tentativa e erro.

Na última década ocorreu um grande aumento na elaboração de estudos que visam o desenvolvimento de programas destinados a simular os processos de conformação de chapas. Dentro deste contexto têm destaque as simulações computacionais utilizando o método dos elementos finitos, tornando-se uma importante ferramenta na definição de processos reais ótimos.

Nos últimos anos os trabalhos normalmente foram focados no estudo de apenas uma única variável do processo de estampagem, como por exemplo: a força exercida pelo prensa-chapas, coeficiente de atrito, a geometria do ferramental e a força de estampagem.

Neste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta computacional que permite ao projetista continuar estudando uma variável isoladamente ou realizar a combinação do estudo das variáveis, fazendo isso de maneira rápida e descomplicada através de um *software* desenvolvido em ambiente de programação DELPHI®.

Este *software* desenvolvido deverá ser alimentado pelo usuário com dados referentes a geometria do ferramental e do *blank*, profundidade de estampagem, coeficiente de atrito e condições de carregamento. Após a inserção dos dados de entrada o *software* irá gerar automaticamente um arquivo do tipo “*.txt” de maneira parametrizada que deverá ser executado no programa comercial ANSYS® 7.0. Este arquivo é escrito em uma linguagem de programação própria do ANSYS®, o APDL (*Ansys Parametric Design Language*). Esta linguagem é similar ao FORTRAN, com diferenças de sintaxe e adição de comandos específicos.

1.2. ESTADO DA ARTE

Malekani (2008) – Os autores utilizam um modelo não linear implícito de simulação no *software* ANSYS, através do método dos elementos finitos para avaliar a influência do ângulo do prensa-chapas no processo de estampagem de um copo cilíndrico. A anisotropia do material foi desconsiderada por ser baixa, ou seja, considerou-se um material isotrópico. Os corpos de prova utilizados são de aço carbono com 1,5 [mm] de espessura. O ferramental foi considerado como um material rígido e é composto por: matriz, punção e prensa-chapas, sendo destinado para estas peças o elemento sólido PLANE42. Para a chapa foi designado o elemento viscoplástico VISCO108 e para os contatos existentes entre a chapa e a superfície do ferramental utilizou-se o par de contatos CONTA172 E TARGET169. O método de solução utilizado é um algoritmo iterativo que funciona através de *looping*, Newton-Raphson. O ângulo do prensa-chapas varia de 0 a 9°. Para selecionar o ângulo ideal foram avaliados os parâmetros: força no punção, força no prensa-chapas e tensão na chapa. Observou-se que quanto maior a inclinação do prensa-chapas menor era o aparecimento de rugas no flange e melhorava o fluxo de entrada de material na matriz, sendo que os melhores resultados foram obtidos quando se utilizou um prensa-chapas com ângulo de 6,38°.

Lajarin (2008) – Os autores relatam um estudo sobre a influência de diferentes condições de lubrificação em um processo de estampagem de um aço de alta estampabilidade. Através de ensaios realizados em corpos-de-prova e simulação numérica computadorizada, avaliando o coeficiente de atrito correspondente a processos utilizando lubrificantes líquidos (óleo mineral e vegetal com aditivos de extrema pressão e fluidos sintéticos) e sólidos (filmes de PVC e poliuretano) e identificando as melhores condições de processo. Os ensaios foram realizados segundo o método de Nakazima com variação das condições de lubrificação. A simulação foi realizada no *software* Abaqus® 6.5. Para o ferramental foi utilizado um elemento sólido/rígido e para a chapa um elemento de casca flexível *Shell*. Nos experimentos foi comprovado que com a utilização do filme sólido de poliuretano proporciona uma grande melhora na conformabilidade. Nos demais lubrificantes, a única opção que melhorou a conformabilidade foi quando se utilizou óleos com propriedades *EP*.

Silva (2008) – Discute a utilização do método dos elementos finitos para determinar o valor do coeficiente de atrito no processo de estampagem e analisar sua influência. Para validar os modelos numéricos foram realizados ensaios experimentais com o material aço SAE 1020, sendo este estampado sob três condições de lubrificação distintas. A modelagem do ferramental e peças de trabalho foi realizada em 2D com o auxílio do programa SoildWorks®. O programa Deform® foi utilizado para fazer a análise numérica. Com a comparação dos resultados experimentais com os da simulação verificou-se que a modelagem por elementos finitos é capaz de auxiliar na determinação do coeficiente de atrito, possibilitando a comparação da eficiência de diversos lubrificantes. Observou-se que mesmo com a utilização de lubrificante não foi possível alcançar maiores profundidades de conformação.

Demirci (2008) – Este trabalho apresenta um estudo sobre os efeitos da força exercida pelo prensa-chapas no processo de estampagem para o AL 1050. Para a realização deste estudo foi utilizado um modelo não linear explícito utilizando o método dos elementos finitos no programa ANSYS/ LS-DYNA®. A geometria que serviu como base de estudo possui a forma de um copo cilíndrico e o modelo de simulação é composto por: punção, matriz, prensa-chapas e a chapa que será estampada. O elemento utilizado para todos os componentes é o SHELL163, sendo que na chapa foi realizado um refinamento na malha próximo aos locais onde ocorrem as maiores deformações. O ferramental foi considerado como sendo um material rígido. Neste estudo variou-se a pressão aplicada no prensa-chapas de 0,4 MPa a 15 MPa. Para pressões abaixo de 0,65 MPa foi observado a formação de rugas e para pressões acima de 10 MPa ocorreu ruptura. As maiores profundidades de estampagem, em uma única etapa, foram alcançadas quando se aplicou pressões maiores que 6,5 MPa. Conseguiu resultados satisfatórios para pressões compreendidas entre 2 e 4 MPa. A maior perda de espessura ocorreu nos raios do copo e ocorreu um aumento na espessura na área do flange, principalmente nos corpos de prova em que foram aplicadas pressões maiores.

Costa (2007) – Apresenta um estudo da influência do raio do punção na força de estampagem necessária à fabricação de uma caixa quadrada e da variação da espessura da chapa resultante da deformação imposta, utilizando o método dos elementos finitos. Os raios de arredondamento do punção estudados foram: 5,0 [mm]; 7,5 [mm]; 10,0 [mm] e 12,5 [mm], sendo os demais parâmetros constantes. O coeficiente de atrito mais adequado para a simulação foi de 0,15. A simulação foi realizada com uma profundidade de 37,5 [mm] e em

todos os casos o *blank* apresentou maior perda de espessura na região compreendida entre 25 e 35 [mm] tendo como base a posição radial, sendo mais acentuada nos cantos. Foi observado que quando se utiliza pequenos raios o valor da força máxima de estampagem é maior, quando comparado a grandes raios de arredondamento e para raios acima de 10 [mm] esta variação se torna desprezível. O modelo foi construído com elementos rígidos para o ferramental e viscoplástico para o *blank*, no qual somente as faces de contato são levadas em consideração para aplicação da malha de contato.

Firat (2007) – Neste estudo é abordada a utilização da simulação para realizar a análise e o projeto do processo de estampagem. É dada uma ênfase maior nos conceitos que envolvem a simulação. Os autores abordam a necessidade dos conceitos computacionais para elaborar a simulação. São comparados sete elementos do tipo casca SHELL 3-D em um método dinâmico explícito, e o pacote LS-DYNA[®]. Para avaliar os elementos realizaram-se simulações utilizando um modelo de estampagem de uma peça automotiva, com ferramental composto por: matriz, punção e prensa-chapas com um fator de atrito de 0,125. O *blank* foi uma chapa de aço com espessura de 2,5 [mm]. A construção da malha de elementos finitos iniciou com elementos de 16 [mm], sendo que após iterações encontrou-se uma malha que mais atendia as necessidades da simulação com elementos de 4 [mm]. A avaliação dos elementos foi realizada considerando: a tensão plástica equivalente no *blank*, a força no punção e o tempo de processamento.

Moreno (2002) – Apresentam uma metodologia de otimização de *blank* de uma caixa quadrada que trabalha integrada com o *software* ANSYS/ LS-DYNA[®]. A metodologia inicia com a simulação utilizando um *blank* não otimizado. Com os dados do perfil nominal do flange da peça desejada e o perfil do *blank* inicial é aplicado um teste para verificar se a geometria ideal foi atingida ou se será necessário uma nova simulação. Este teste é realizado em um programa desenvolvido em FORTRAN. Para a construção do modelo foram utilizados os elementos SHELL163 para o *blank* e o elemento SOLID164 para a matriz, punção e prensa-chapas. Foram otimizadas duas geometrias distintas: *blank* circular e octogonal, em ambos os casos a geometria ideal foi alcançada na terceira iteração.

Evangelista (2002) – Apresenta um estudo de estampagem de chapas metálicas utilizando o método dos elementos finitos e diagramas de conformação. Os autores abordam duas geometrias: um copo redondo e um quadrado. Seguiu-se o mesmo procedimento para a

execução das etapas de estabelecimento da geometria e modelamento matemático. O modelo construído utilizou o método de *substeps*, sendo o ferramental considerado perfeitamente rígido e a chapa de aço ABNT 1008/1010. A profundidade máxima de estampagem foi de 21,30 [mm]. Para a caixa redonda foram selecionados alguns nós da malha e a partir desses nós calculou-se as trajetórias de deformação. O *substep* crítico ocorreu a uma profundidade de 16,30 [mm]. O mesmo procedimento foi utilizado no modelo de caixa quadrada, selecionando alguns nós e traçando as trajetórias de deformação, o *substep* crítico ocorreu a profundidade de 12,50 [mm]. A caixa quadrada apresentou maior redução na espessura da chapa quando a simulação foi realizada com profundidade 21,30 [mm], sendo valores 0,45 e 0,29 [mm] para a caixa quadrada e redonda respectivamente. Quando se estampou até o limite crítico para ambos os casos os valores máximos das deformações na espessura foram de aproximadamente 0,20 [mm] em chapas de 1,00 [mm].

1.3. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

Este trabalho visa a elaboração de um programa fonte construído de maneira paramétrica, que tem como finalidade: agilizar, automatizar e tornar mais acessível à construção de modelos de simulação do processo de estampagem de copos cilíndricos, utilizando o método dos elementos finitos, pois sua construção de maneira manual é demorada e muito trabalhosa.

O programa paramétrico irá auxiliar o projetista na definição dos valores das variáveis envolvidas no processo de estampagem de copos cilíndricos como: força exercida pelo punção, geometria do ferramental e do *blank* e coeficiente de atrito, permitindo que os valores dessas variáveis sejam facilmente modificados através de um programa auxiliar desenvolvido em ambiente de programação DELPHI[®]. Desta forma o programa permite realizar um estudo dessas variáveis de maneira isolada ou com vários fatores simultâneos, isso de maneira rápida e sem a necessidade de que o projetista tenha sólidos conhecimentos na construção de modelos de simulação no programa comercial ANSYS[®], sendo necessário ao projetista apenas interpretar os resultados fornecidos pelo programa.

A criação do programa paramétrico é realizada automaticamente pelo *software* desenvolvido em DELPHI[®]. Este *software* é alimentado com os parâmetros do processo de estampagem e gera, automaticamente, um programa paramétrico em linguagem APDL (*Ansys Parametric Desing Language*), do tipo “*.txt”, e este deve ser carregado no programa

ANSYS[®], que efetuará a construção do modelo de maneira automática. O arquivo “*.txt” é muito compacto e consome poucos recursos computacionais.

O *software* tem como objetivo secundário sugerir uma primeira otimização nas dimensões do *blank*. Esta sugestão é baseada em equações internas inseridas em tempo de programação sendo resolvidas e selecionadas em tempo de execução. Com a otimização do *blank* ocorre uma diminuição no consumo de material necessário para a fabricação das peças estampadas.

A utilização da simulação numérica através do método dos elementos finitos auxilia o projetista no desenvolvimento de projetos reais. O presente estudo irá auxiliar no desenvolvimento de ferramental, minimizando ou até eliminando o método de tentativa e erro, com a determinação da variação da espessura do *blank* será possível definir o número de passos do estampo e ajuste de sua geometria e com o conhecimento da força máxima de estampagem poderá definir o equipamento adequado para executar a operação de estampagem.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 1 apresenta a introdução ao trabalho, uma revisão do estado arte de simulações computacionais do processo de estampagem utilizando elementos finitos e os objetivos.

No capítulo 2 é apresentado um resumo dos fundamentos teóricos do processo de estampagem, plasticidade e elementos finitos.

O material utilizado nos ensaios com suas propriedades e os procedimentos para a realização dos ensaios está exposto no capítulo 3.

O capítulo 4 apresenta os programas de estampagem profunda e paramétrico criados neste trabalho, com detalhes de funcionamento e comandos.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos pelo programa paramétrico e ensaio, com comparação entre estes dados.

O capítulo 6 apresenta as conclusões e comentários gerais.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1. Introdução

A estampagem é um processo de conformação mecânica, realizado geralmente a frio, que compreende um conjunto de operações, pelas quais uma chapa plana adquire uma nova forma geométrica (Chiaverini, 1986).

Segundo Schaeffer (2004) os primeiros produtos a partir de chapa foram produzidos na Mesopotâmia e no Egito em 4000 a. C. Eram copos de ouro e prata que foram produzidos através do processo de embutimento manual usando martelos de pedra como ferramentas. Martelos de embutir feitos de ferro e equipados com cabos foram desenvolvidos e usados somente a partir de 900 a. C. O desenvolvimento do processo de laminação e a fabricação das primeiras chapas finas de aço no século XVIII possibilitaram uma produção em série de peças de chapa. A construção das primeiras prensas e ferramentas de corte e embutimento profundo no fim do século XIX deram início à fabricação em série de produtos estampados. O crescimento rápido da indústria automobilística nos anos vinte do século XX impulsionou de forma significativa o desenvolvimento e aperfeiçoamento das máquinas e ferramentas para os processos de estampagem.

Ainda segundo Schaeffer (2004) atualmente a grande maioria de produtos estampados é produzida de chapas de aço. Exemplos para estes produtos são: autopeças, eletrodomésticos, talheres, embalagens etc. A importância econômica dos processos de estampagem comparada com outros processos de fabricação é visível analisando a produção de chapas nos últimos cinco anos. Estima-se que 14 a 15 % da produção siderúrgica do país são destinadas a ser empregada nestes processos.

Para realizar a deformação plástica no metal são utilizadas prensas de estampagem, cujas ferramentas são estampos ou matrizes. O processo pode ser dividido em três operações:

- Corte: corresponde à obtenção de formas geométricas determinadas, a partir de chapas, submetidas à ação de um punção ou lâmina de corte, aplicada através de uma prensa que pressiona a chapa apoiada numa matriz. Quando o punção ou lâmina penetra na matriz, o esforço de compressão se transforma em esforço de cisalhamento, provocando a separação brusca de uma porção da chapa. No

processo, a chapa é deformada plasticamente e levada até a ruptura nas superfícies em contato com as lâminas;

- Dobramento e Encurvamento: nesta operação, o material é submetido a esforços aplicados em duas direções opostas para realizar a flexão e a deformação plástica, mudando a forma de uma superfície plana para duas superfícies concorrentes, em ângulo, com raio de concordância em sua junção;
- Estampagem Profunda.

2.1.2. Estampagem Profunda ou Embutimento

É o processo utilizado para fazer com que uma chapa plana (“*blank*”) adquira a forma de uma matriz, imposta pela ação da força de um punção, sem geralmente modificar a espessura das chapas, realizando-se a deformação em uma ou mais fases. O processo é empregado na fabricação de peças de uso diário como: pára-lamas, portas de carros; banheiras, rodas, etc.

A distinção entre estampagem rasa (*shallow*) e profunda é arbitrária. A estampagem rasa geralmente se refere à conformação de um copo com profundidade menor do que a metade do seu diâmetro com pequena redução de parede. Na estampagem profunda o copo é mais profundo do que a metade do seu diâmetro (CIMM, 2008).

Para melhorar o rendimento do processo, é importante que se tenha boa lubrificação. Com isto reduzem-se os esforços de conformação e o desgaste do ferramental. Os óleos e graxas indicados normalmente são para extrema pressão (EP), devendo garantir boa proteção contra a corrosão da chapa, ser de fácil desengraxe e não levar à oxidação do material (devido às reações de subprodutos dos gases formados no aquecimento do metal). Geralmente, são óleos minerais com uma série de aditivos.

Quando se aplica uma força muito pequena no prensa-chapas ocorre o aparecimento de rugas nas laterais da peça, em contrapartida, se esta força for muito elevada pode ocasionar a ruptura da peça na prensa.

Às vezes, o diâmetro do *blank* é muito superior ao diâmetro da peça a estampar, sendo que esta deve atingir uma profundidade de copo muito elevada. A fabricação poderá exigir uma seqüência de operações de estampagem, utilizando uma série de ferramentas, com diâmetros decrescentes (da matriz e do punção). O número de operações depende do material

da chapa e das relações entre as dimensões iniciais e finais das peças estampadas. A Figura 2.1 exemplifica uma operação de estampagem (CIMM, 2008).

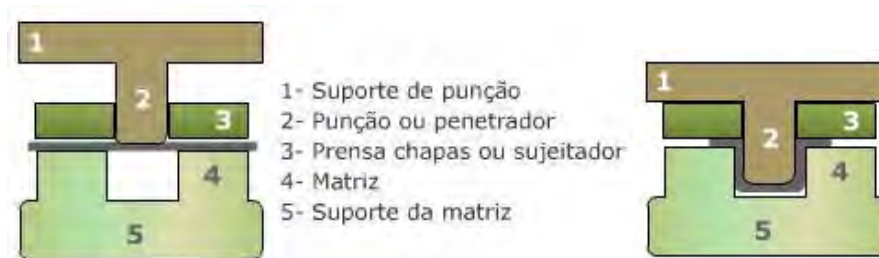


Figura 2.1 – Operação de estampagem profunda (CIMM).

2.1.3. Ferramentas Utilizadas na Estampagem

2.1.3.1. Prensas de Estampagem

As prensas podem ser mecânicas, em que um volante é a fonte de energia de impacto, energia que é aplicada por meio de manivelas, engrenagens, excêntrica ou hidráulica, em que a pressão hidrostática aplicada contra um ou mais pistões fornece a energia para o esforço de deformação (Chiaverini, 1986).

Nas prensas mecânicas a energia é geralmente, armazenada em um volante e transferida para o cursor móvel no êmbolo da prensa. As prensas mecânicas são quase sempre de ação rápida e aplicam golpes de curta duração, enquanto que as prensas hidráulicas são de ação mais lenta, mas podem aplicar golpes mais longos. As prensas podem ser de efeito simples ou de duplo efeito. Algumas vezes pode ser utilizado o martelo de queda na conformação de chapas finas. O martelo não permite que a força seja tão bem controlada como nas prensas, por isso não é adequado para operações mais severas de conformação.

2.1.3.2. Matriz e Punção de Estampagem

As ferramentas básicas utilizadas em uma prensa de conformação de peças metálicas são o punção e a matriz. O punção, normalmente o elemento móvel, é a ferramenta convexa que se acopla com a matriz côncava. Como é necessário um alinhamento acurado entre a

matriz e o punção, é comum mantê-los permanentemente montados em uma sub-prensa ou porta matriz, que pode ser rapidamente inserida na prensa.

O punção é o componente responsável pela formação da geometria da peça estampada, por isso sua forma é de grande importância. As formas mais comuns em processos de estampagem profunda estão ilustradas na Figura 2.2.

- Forma “A”: é a forma mais simples que se observa, mas deve-se atentar para que o raio, indicado por “ r ” na Figura 2.2, nunca seja inferior ao raio de concordância da matriz (que é de 6 a 10 vezes a espessura das chapas);
- Forma “B”: é também de geometria bem simples. Mas tem duas particularidades: o diâmetro indicado por d corresponde ao diâmetro da próxima estampagem e o chanfro de 45° é concordado através de dois raios diferentes com a peça.
- Forma “C”: esta geometria já é mais difícil de ser usada, devido a sua complexidade de realização. É mais conhecida como “asa de cesta”.
- Forma “D”: É uma forma semi-esférica e é utilizada em peças cuja geometria final também é semi-esférica.

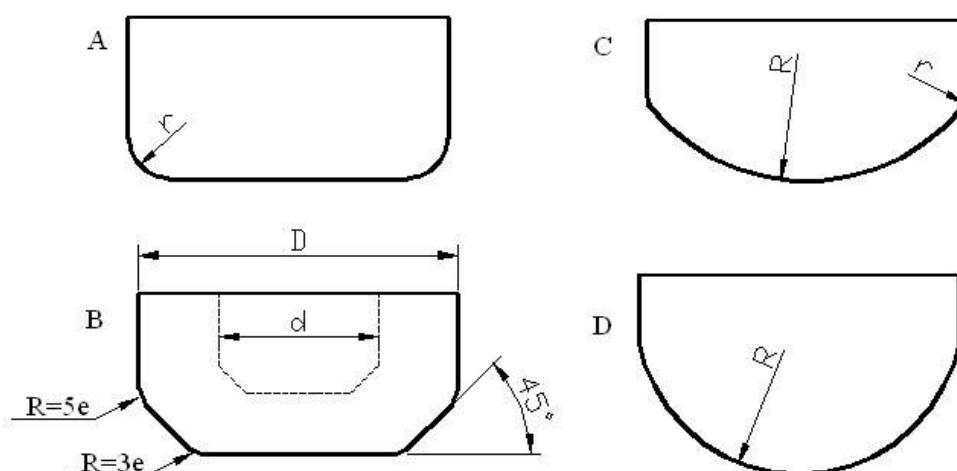


Figura 2.2 – Formas mais comuns de punções utilizados em processos de estampagem profunda.

Onde: e : espessura da chapa.

A matriz de estampagem possui uma particularidade de grande importância, que é seu raio de concordância mostrado na Figura 2.3. Quanto menor o valor do raio maior será o

esforço de estampagem, e com ele a tendência de engripar (travar) o punção, e/ou destacar o fundo do copo.



Figura 2.3 – Raio da matriz de estampagem profunda.

O cálculo da força máxima exercida pelo punção pode ser realizado utilizando-se a Equação 2.1 (Schuler, 1998).

$$F_{\max} = \pi \cdot (d + e) \cdot e \cdot R_m \cdot 1,2 \cdot \frac{\beta - 1}{\beta_{\max} - 1} \quad (2.1)$$

Onde: d : Diâmetro do punção;

e : Espessura do *blank*;

R_m : Resistência de ruptura;

β : Razão de estampagem (diâmetro do *blank*/diâmetro do punção);

$\beta_{\max}$: Razão máxima de estampagem;

2.1.3.3. Prensa-chapas

O prensa-chapas é um dispositivo ajustado em torno do punção, sendo que seu diâmetro deve corresponder ao da chapa a ser estampada, cuja função é permitir escoamento de material durante o processo de forma mais controlada (como um freio) para não permitir a formação de rugas. Um prensa-chapas de molas é apresentado na Figura 2.4.

Existem diversos meios de acionamento e montagem de dispositivos prensa-chapas como:

- Atuador hidráulico;
- Arruelas em borracha empilhadas umas sobre as outras;
- Simplesmente por molas (Figura 2.4).

Em chapas finas ($e < 1,2\text{mm}$) é desejável a utilização do prensa-chapas.

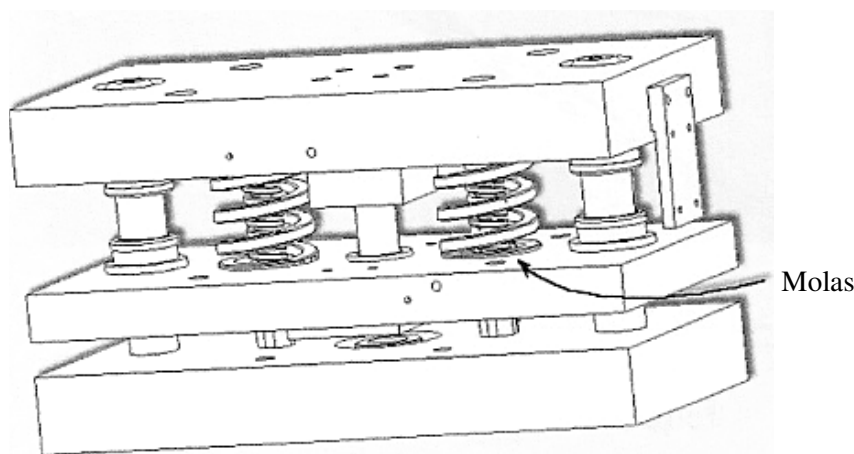


Figura 2.4 – Prensa-chapas acionado por molas.

2.1.4. Estampabilidade dos Materiais Metálicos

Estampabilidade é a capacidade que a chapa metálica tem de adquirir a forma geométrica de uma matriz pelo processo de estampagem, sem se romper ou apresentar qualquer outro tipo de defeito de superfície ou de forma (Chiaverini, 1986).

A avaliação da estampabilidade de uma chapa metálica depende de muitos testes, tais como:

- Ensaios simulativos, por exemplo: *Ensaio Erichsen*, *Olsen*, *Fukui*, etc;
- Ensaios de tração: obtendo-se o limite de escoamento e de resistência, a razão elástica, o alongamento total até a fratura, o coeficiente de encruamento, os coeficientes de anisotropia normal e planar;
- Ensaios de dureza;
- Medida da rugosidade do material;
- Metalografia.

Ainda assim, não se consegue uma análise completa, pois nas operações reais de estampagem ocorre uma combinação complexa de vários tipos de conformação. A estampabilidade torna-se função não somente das propriedades do material, mas também das condições de deformação e dos estados de tensão e de deformação presentes.

2.1.4.1. Anisotropia

A anisotropia resulta da orientação preferencial dos grãos que é produzida por uma deformação plástica severa (Dieter, 1981).

Durante os processos de conformação de chapas, grãos cristalinos individuais são alongados na direção da maior deformação de tração. O alongamento é consequência do processo de escorregamento do material durante a deformação. Nos materiais policristalinos os grãos tendem a girar para alguma orientação limite devido a um confinamento mútuo entre grãos. Este mecanismo faz com que os planos atômicos e direções cristalinas dos materiais com orientação aleatória (materiais isotrópicos) adquiram uma textura (orientação preferencial). Os materiais conformados se tornam anisotrópicos (CIMM).

Uma manifestação prática da anisotropia é a formação de “orelhas” ou deformação não uniforme na estampagem profunda (Dieter, 1981), como mostrado na Figura 2.5.

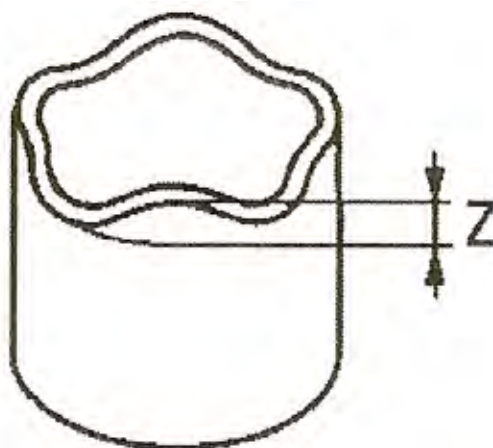


Figura 2.5 – Copo cilíndrico com orelhamento (Schaeffer, 2004).

A figura 2.6 mostra um elemento de volume antes e depois de uma deformação plástica causada por uma força agindo no sentido longitudinal.

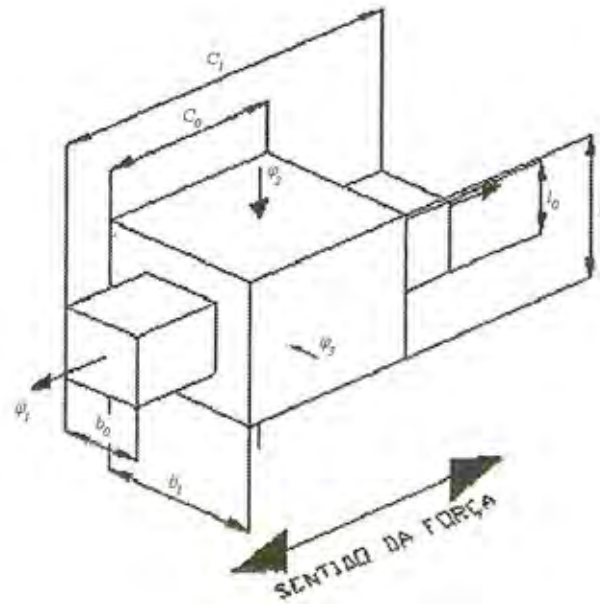


Figura 2.6 – Elemento de volume antes e depois de uma deformação plástica causada por uma força agindo no sentido longitudinal (Schaeffer, 2004).

O cubo com as medidas iniciais l_0 , b_0 e c_0 é deformado sob influência de uma força agindo no sentido longitudinal. A constância do volume faz com que qualquer alongamento em direção l cause uma alteração da geometria do elemento de volume nas outras duas direções, como ilustrado na Equação 2.2.

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (2.2)$$

Um modo de avaliar o grau de anisotropia das chapas quando deformadas plasticamente é através do coeficiente de anisotropia (r), que é a razão entre a deformação verdadeira na largura (φ_2) e na espessura (φ_3) de um corpo-de-prova de tração, após determinada deformação longitudinal pré-definida. A Equação 2.3 mostra o cálculo do coeficiente de anisotropia. Não existe um único coeficiente de anisotropia, mas três em diferentes direções ao sentido de laminação (0° , 45° e 90°) (Schaeffer, 2004).

$$r = \frac{\varphi_2}{\varphi_3} = -\frac{\varphi_2}{(\varphi_1 + \varphi_2)} = \frac{\ln \frac{b_1}{b_0}}{\ln \frac{b_0 \times l_0}{b_1 \times l_1}} \quad (2.3)$$

Onde: φ : Deformação verdadeira ao longo do comprimento;

b_0 : Largura inicial;

b_f : Largura final;

l_0 : Comprimento inicial;

l_f : Comprimento final.

A partir das três razões (r) são calculados os valores da anisotropia média (r_m , equação 2.4a) e da anisotropia planar (Δr , Equação 2.4b).

$$r_m = \frac{1}{4} (r_{0^\circ} + 2.r_{45^\circ} + r_{90^\circ}) \quad (2.4a)$$

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}{2} - 2.r_{45^\circ} \quad (2.4b)$$

Onde: r_{0° , r_{45° e r_{90° são os valores de r medidos a 0° , 45° e 90° com a direção de laminação.

2.2. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

2.2.1. Introdução

A solução analítica de problemas de engenharia é baseada na aplicação clássica das equações diferenciais, que descrevem o equilíbrio da estrutura, gerando expressões e 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 Filho, 2003).

O método dos elementos finitos considera a estrutura dividida em partes ou elementos que não são infinitesimais, unidos entre si em pontos nodais, onde se supõem concentradas todas as forças de ligação entre os elementos. Sendo as solicitações e deformações discretizadas nos nós. O comportamento elástico e mecânico de cada elemento pode ter expressão matemática tão simples quanto a dos elementos infinitesimais da solução clássica.

A composição desses elementos de tamanho finito, para construir a estrutura considerada, dá lugar à um sistema de equações facilmente tratados por via matricial.

É aplicável a uma grande faixa de problemas de valores de contorno em engenharia. Em um problema de valor de contorno, uma solução é procurada na região do corpo (domínio), enquanto nos contornos desta região os valores das variáveis dependentes (ou suas derivadas) são conhecidos.

O processo de análise por elementos finitos é esquematizado na Figura 2.7 (Bathe, 1996). Idealizar um problema físico por um modelo matemático requer hipóteses que conduzem a um conjunto de equações diferenciais que governam o modelo matemático. Sendo o método dos elementos finitos um procedimento numérico, é necessário considerar-se a precisão da solução.

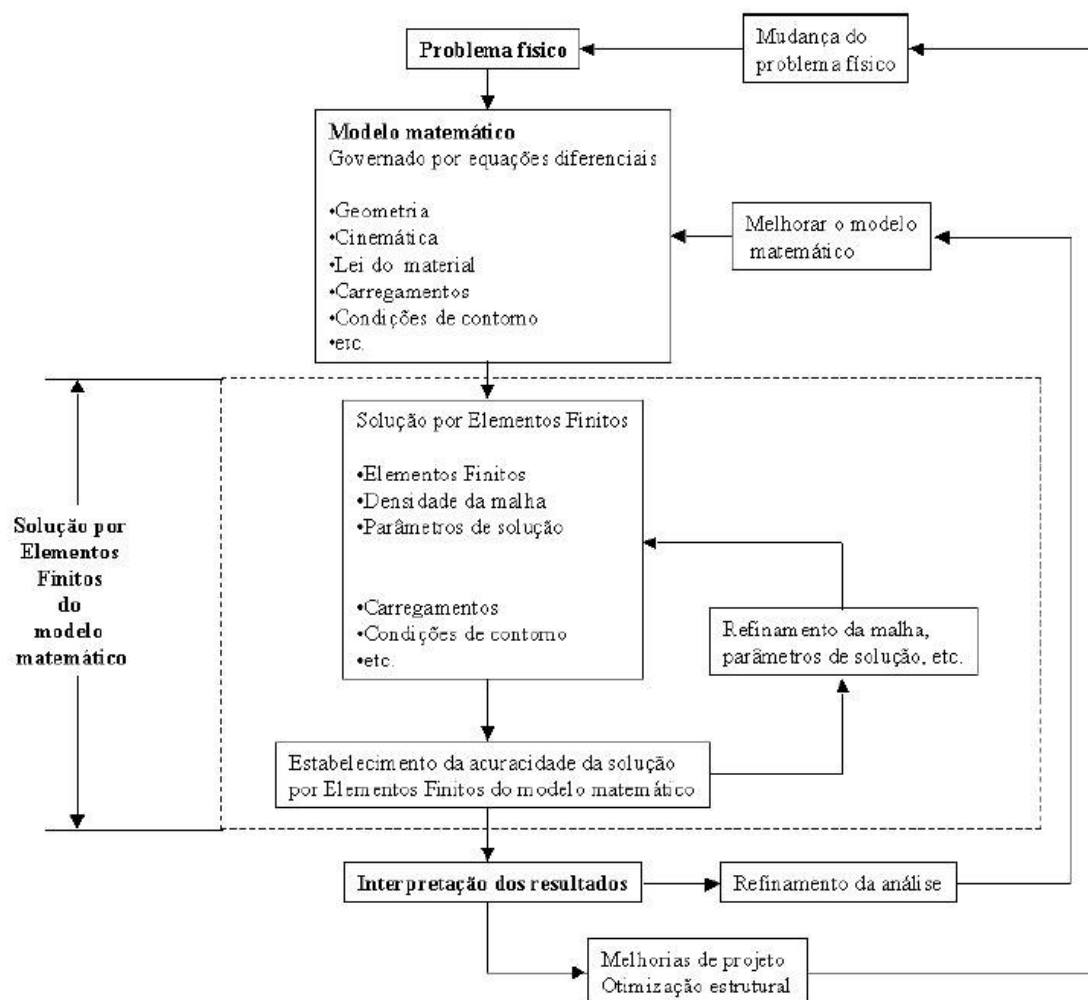


Figura 2.7 – Esquematização do processo de análise por elementos finitos (Bathe, 1996).

2.2.2 Aplicação do método dos elementos finitos a processos de conformação de metais

Em processos práticos de conformação, um número de operações (pré-formação) é necessário para transformar uma geometria “simples” inicial em uma geometria “complexa”, mantendo-se as propriedades e tolerâncias desejadas. Para isso, um método de análise que possa tratar das condições de contorno de matrizes é necessário para aproveitar completamente as vantagens do método dos Elementos Finitos na análise de conformação.

- Método dinâmico explícito: possui como base a equação de equilíbrio dinâmico, o que dá uma grande vantagem, pois 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 demanda menos recursos computacionais 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 com exatidão, mas o número de rugas e sua amplitude são determinados com precisão. Para se diminuir o número de incrementos são aplicados truques numéricos que aumentam a velocidade do punção e a densidade do material, mas isto pode levar a resultados não realísticos, outra desvantagem é que a tensão local e o retorno elástico não são seguramente calculados.
- 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. No entanto necessita de grandes recursos computacionais devido as condições de contato.
- Método estático explícito: de modo a solucionar a questão da convergência, resolvem-se as equações da matriz de rigidez sem iterações em cada passo de integração no tempo, limitando-se o tamanho de cada passo de modo a ser muito pequeno. Um grande número de incrementos é necessário para completar todo o processo de conformação sem acúmulo de erro devido ao desprezo dos termos de ordem elevada na integração no tempo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar os experimentos de estampagem foi utilizado uma máquina de ensaios, modelo Shimadzu AG-X, pertencente ao Departamento Materiais e Tecnologia, FEG-UNESP. Este equipamento é acoplado a um microcomputador que possui um programa para realizar a aquisição de dados. Com este programa é possível obter diretamente a curva de força versus deslocamento, que será comparada com a curva fornecida pelo ANSYS. A máquina possui uma célula de carga com capacidade máxima de 50 [kN]. A Figura 3.1 mostra a máquina em questão.



Figura 3.1 – Máquina de ensaios utilizada.

3.1. ESPECIFICAÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO

O material escolhido e utilizado para a confecção dos corpos-de-prova a serem estampados foi uma chapa de aço carbono classe EEP (Estampagem Extra Profunda), com espessura de 0,65 [mm], fornecida pela Rio Negro S.A.. A Tabela 3.1 apresenta a composição química e as propriedades mecânicas da chapa segundo o fabricante.

Tabela 3.1 – Composição química (%) e propriedades mecânicas.

C	Mn	P	S	Al	Resistência de escoamento [MPa]	Resistência de ruptura [MPa]	Dureza HB
4×10^{-3}	25×10^{-3}	18×10^{-3}	11×10^{-3}	35×10^{-3}	193	312	45

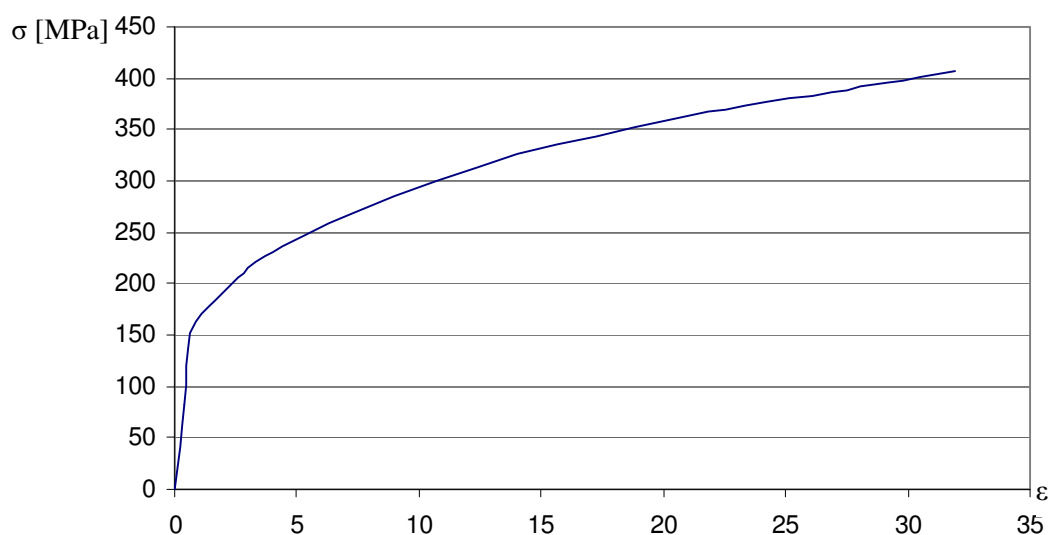
A Tabela 3.2 apresenta os valores da razão plástica (anisotropia).

Tabela 3.2 – Valores da razão plástica (Costa, 2003).

$r_m 0^\circ$	$r_m 45^\circ$	$r_m 90^\circ$	r_m
1,52	1,42	1,76	1,62

3.1.1 – Curva σ versus ε real

O conhecimento da curva σ versus ε real é necessário, pois se trata de um dos dados de entrada referente ao material no programa de simulação. Esta curva será utilizada para construir a curva MISO, que utiliza o critério de escoamento de von Mises com encruamento isotrópico. A Figura 3.2 mostra a curva em questão.

Figura 3.2 – Curva σ versus ε real (Costa, 2003).

3.2. DETERMINAÇÃO DAS MEDIDAS DO *BLANK* E CÁLCULO DA FORÇA DO PRENSA-CHAPAS

Os *blanks* utilizados nos ensaios e também na simulação possuem a forma circular. Suas medidas foram fornecidas automaticamente pelo programa “Estampagem Profunda”, que fornecem estas medidas após o usuário inserir as dados referentes a geometria do ferramental.

Estes cálculos do diâmetro do *blank* baseando-se na lei da conservação da massa, o que implica que o volume de material é constante durante o processo. Uma segunda simplificação pode ser considerada: a operação de estampagem profunda também é feita de modo a manter a espessura da chapa constante.

Sabendo que o volume de uma chapa pode ser calculado multiplicando-se a área A da chapa, pela espessura e da mesma, tem-se a relação entre as dimensões do *blank* e da peça estampada, conforme Equação 3.1:

$$A_{blank}e_{blank} = A_{peça}e_{peça} \quad (3.1)$$

Assim, com espessura constante: $A_{blank} = A_{peça}$. Assim, a área do copo é a soma das áreas do fundo e das paredes do mesmo. As Equações 3.2, 3.3 e 3.4 mostram os cálculos de diâmetro do *blank* para peças estampadas com geometrias mais utilizadas. As peças estampadas com base nessas equações são apresentadas nas Figuras 3.3a, 3.3b e 3.3c, respectivamente.

$$D = \sqrt{d^2 + 4dh} \quad (3.2)$$

$$D = \sqrt{d_2^2 + 4d_1h} \quad (3.3)$$

$$D = \sqrt{d_3^2 + 4d_2(0,57r + h) - 0,56r^2} \quad (3.4)$$

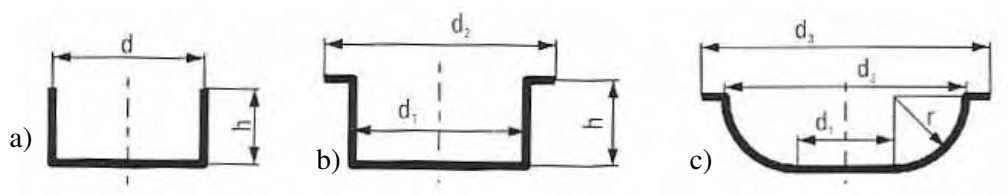


Figura 3.3 – Peças estampadas (Schuler, 1998).

O programa utiliza a Equação 3.4 e uma equação linear alternativa baseada no plano perpendicular da peça acabada, conforme Equação 3.5. A Equação 3.5 é utilizada quando o raio da matriz assume valores maiores que 7 [mm].

$$D = 2r_{matriz} \frac{\pi}{2} + 2r_{punção} \frac{\pi}{2} + (d - 2r_{punção}) + (2h_1 - 2r_{punção} - 2r_{matriz}) \quad (3.5)$$

Onde: h_1 = Profundidade de estampagem.

A força exercida pelo prensa-chapas foi calculada conforme norma ASM 1969, no qual recomenda-se que para chapas de aço seja aplicado uma pressão de 0,98 [MPa] a 1,96 [MPa] .

A Tabela 3.3 mostra os diâmetros dos *blanks* e as forças aplicadas no prensa-chapas utilizados no ensaio, para uma profundidade de estampagem de 30,0 [mm]. O *blank* 5 será estampado até 35,0 [mm] e o *blank* 6 com 40,0 [mm]. Para todos os experimentos foram utilizados punções e matrizes de 50 [mm] e 52,5[mm], respectivamente.

Tabela 3.3 – Dimensões do *blanks* e força aplicada pelo prensa-chapas.

Blank	1	2	3	4	5	6
Diâmetro do blank [mm]	93,0	98,0	100,0	102,0	106,5	109,5
Força no prensa-chapas [kN]	3,36	3,75	4,30	4,40	5,20	5,32
Razão de estampagem β	1,86	1,96	2	2,04	2,13	2,19

3.3. PROJETO DAS FERRAMENTAS

A ferramenta utilizada possui colunas guias e batente com buchas para assegurar que cargas axiais não interfiram nos resultados. A ferramenta é apresentada na Figura 3.4 e é constituída basicamente de três subconjuntos como segue:

- Base: a base contém as colunas, tirantes, mesa e matriz. A base é mostrada separada na Figura 3.5. Cabe salientar que para nos ensaios foram utilizadas duas matrizes com raio de 5 [mm] e 10 [mm].

- 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. Foram utilizados 3 punções com raios de 5 [mm], 10 [mm] e 15 [mm].

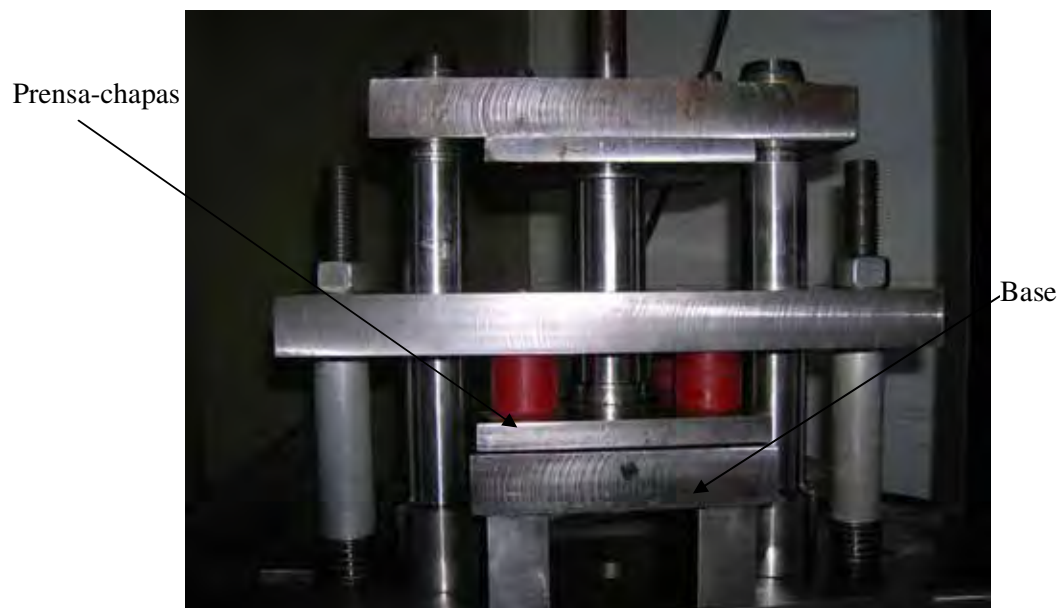


Figura 3.4 – Ferramenta utilizada no ensaio.



Figura 3.5 – Base da ferramenta.

3.4. EXPERIMENTO

Os experimentos foram realizados de acordo com o seguinte procedimento:

1. Corte e preparação dos *blanks*: nesta etapa os *blanks* foram cortados nas dimensões apresentadas na Tabela 3.3, e rebarbados com a utilização de uma lixa 200;
2. Marcação dos *blanks*: os *blanks* receberam um número de rastreamento de acordo com suas medidas e marcação de raios concêntricos a cada 10 [mm] de diâmetro. Estes raios servirão para realizar a medição da variação de espessura da peça estampada. A Figura 3.6 mostra um *blank* com as marcações.



Figura 3.6 – *Blank* com as marcações.

3. Montagem da ferramenta na máquina de ensaios;
4. Ajustes e calibração da ferramenta e da máquina;
5. Lubrificação do *blank*, matriz e punção: foi utilizada uma graxa grafitada para a lubrificação desses componentes;
6. Aplicação da carga sobre o prensa-chapas: a aplicação da carga sobre o prensa-chapas foi realizada com o auxílio de dois cilindros de aço colocados entre o punção e o prensa-chapas, conforme mostrado na Figura 3.7. Após a carga do prensa-chapas atingir o valor desejado as porcas A e B são apertadas, o punção recuado e os cilindros retirados;

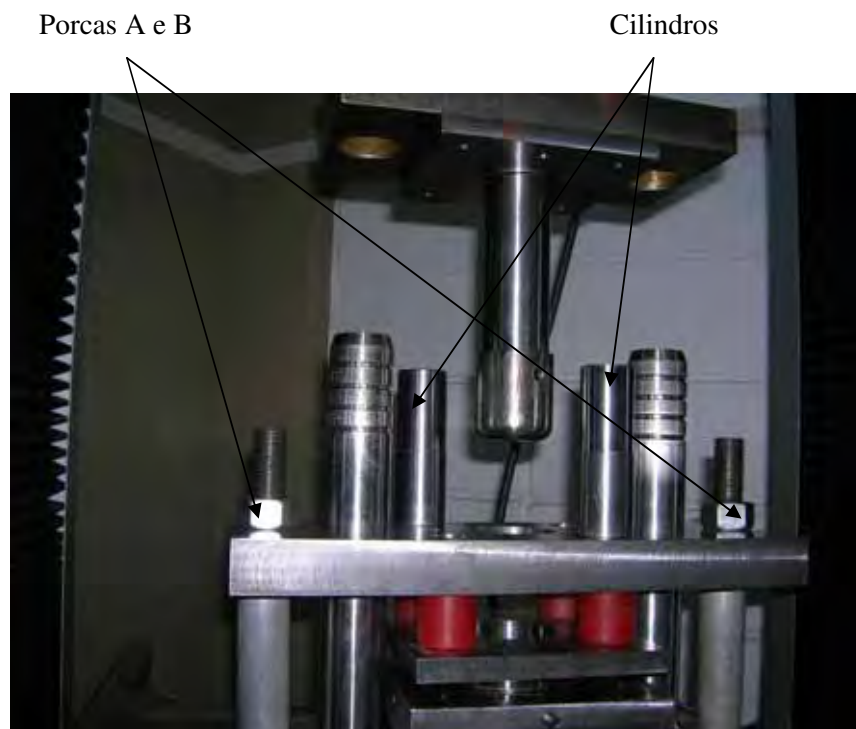


Figura 3.7 – Aplicação da força no prensa-chapas.

7. Descida do punção e estampagem do copo: a velocidade utilizada para realizar a estampagem do copo foi de 10 [mm/min];
8. Salvar os dados do ensaio: o programa de aquisição de dados fornece o diagrama de força versus deformação e destaca a força máxima atingida;
9. Afastamento do punção;
10. Retirada do copo estampado. O copo estampado é mostrado na Figura 3.8;



Figura 3.8 – Copo estampado.

11. Limpeza do copo;
12. Corte do copo utilizando uma serra de fita e remoção das rebarbas, apresentado na Figura 3.9;



Figura 3.9 – Corte do copo estampado.

13. Medição da variação de espessura da peça estampada utilizando um paquímetro digital com precisão de 0,01 [mm].

4. PROGRAMA DE ESTAMPAGEM PROFUNDA

4.1. LINGUAGEM PARAMÉTRICA (APDL)

A modelagem paramétrica consiste em elaborar um programa computacional que quando executado no ambiente do *software* de análise, neste caso o ANSYS® 7.0, construa um modelo partindo de parâmetros pré-definidos

A construção de um programa paramétrico no ANSYS® é realizada utilizando-se uma linguagem de programação especial denominada APDL (*Ansys Parametric Design Language*). Esta linguagem de programação tem como base uma outra, o Fortran. O paramétrico pode ser escrito em um editor de texto qualquer.

Após a construção do programa paramétrico deve-se carregá-lo no *software* ANSYS®, para isto, segue-se a seqüência *Utility Menu > File > Read input from*. Um *Browser* será aberto contendo a localização do arquivo com o programa paramétrico. O ANSYS® lerá o paramétrico automaticamente, não sendo necessário nenhum tipo de intervenção do usuário.

A construção de um programa paramétrico pode ser realizada seguindo alguns passos, que são:

1. A modelagem manual da simulação: neste passo constrói-se o modelo de modo manual, com a utilização de comandos e dos menus do ANSYS® normalmente.
2. Localização do arquivo com extensão “*.log”: deve-se localizar este arquivo e em seguida salvá-lo com extensão “*.txt”. Este arquivo contém as linhas de comando utilizadas na construção do modelo paramétrico.
3. Identificação das variáveis do modelo: neste passo deve-se identificar as variáveis do modelo, como: geometria da peça, propriedades do material utilizado, o elemento utilizado, entre outras. Estas variáveis serão os parâmetros do modelo.
4. Substituição das variáveis do modelo por parâmetros.
5. Entrada de fórmulas e rotinas de programação: pode-se utilizar equações para definir algumas variáveis como: a geometria, o carregamento da peça modelada, etc. Sendo a APDL uma linguagem de programação pode-se utilizar rotinas de programação como: comparação de variáveis como o comando “IF THEN”, geração de *looping* com o comando “DO”, entre outros comandos específicos.

A Figura 4.1 mostra a um fluxograma simplificado contendo as etapas necessárias para construir um programa paramétrico.

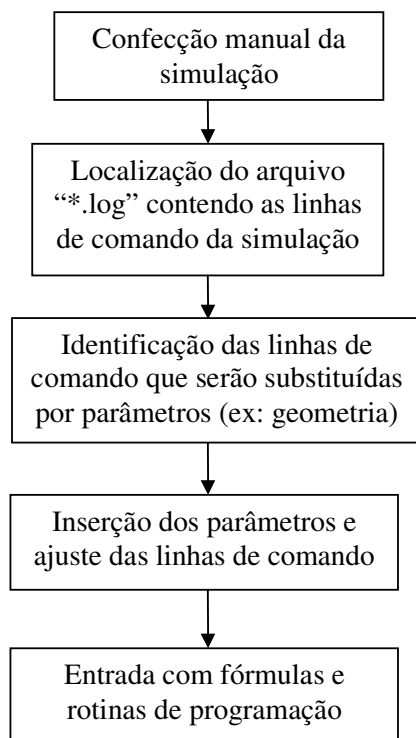


Figura 4.1 – Etapas para a construção de um modelo paramétrico.

4.2. PROGRAMA ESTAMPAGEM PROFUNDA

A modelagem do processo de estampagem profunda utiliza dois programas paramétricos, denominados paramétrico de primeira e segunda etapa. O arquivo paramétrico de primeira etapa é responsável por gerar o modelo de simulação com sua geometria, selecionar o elemento que será utilizado, atribuir as propriedades do material, criar a malha dos elementos finitos, gerar os pares de contato, aplicar as condições de contorno e aplicar a força no prensa-chapas. Após a execução do paramétrico de primeira etapa a chapa estará sob a ação da força do prensa-chapas e o punção estará no limiar de encostar na chapa. O paramétrico de segunda etapa é responsável por controlar o avanço do punção e executar a estampagem, nesta etapa a força aplicada pelo prensa-chapas permanece em contato e também monitora-se os nós pilotos, que geram um arquivo do tipo "*.MNTR", este arquivo grava o monitor dos nós pilotos a cada incremento realizado pelo programa. O monitor acompanha em tempo real o deslocamento e a força do punção e a força exercida pelo prensa-chapas.

Os arquivos paramétricos de primeira e segunda etapa são criados automaticamente por um programa desenvolvido em ambiente de programação DELPHI denominado “Estampagem Profunda”. A interface principal do programa Estampagem Profunda é mostrada na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Interface principal do programa Estampagem Profunda.

Neste programa o usuário deverá inserir apenas os dados solicitados. Após entrar com os dados referentes a geometria o programa irá sugerir um diâmetro de *blank* para o usuário, esta sugestão é baseada em equações inseridas no programa em tempo de programação, cabe salientar que o usuário não necessariamente deverá seguir a sugestão fornecida pelo programa e poderá entrar com seus próprios valores.

Após inserir os dados o usuário deve pressionar o botão “Gerar paramétrico de 1ª etapa” ou no botão “Gerar paramétrico de 2ª etapa”, e assim os programas serão construídos automaticamente. Pode-se utilizar também o *menu* suspenso para gerar os programas paramétricos. A interface do arquivo paramétrico gerado é mostrada na Figura 4.3.

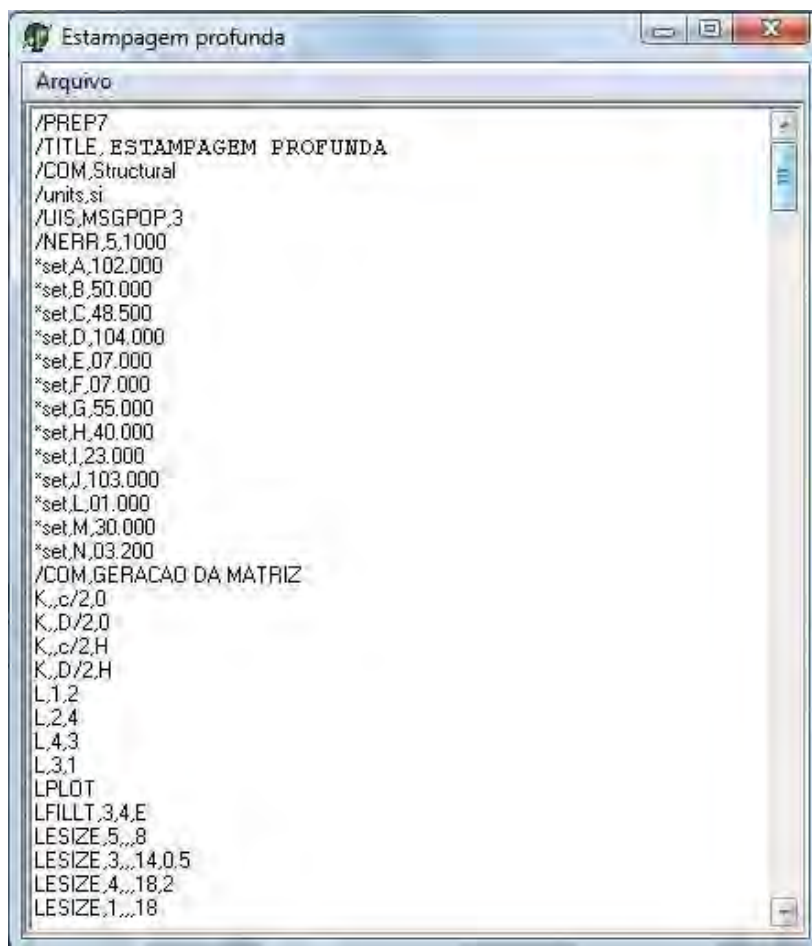


Figura 4.3 – Interface do arquivo paramétrico.

A Figura 4.4 apresenta um fluxograma contendo um resumo do funcionamento do programa.

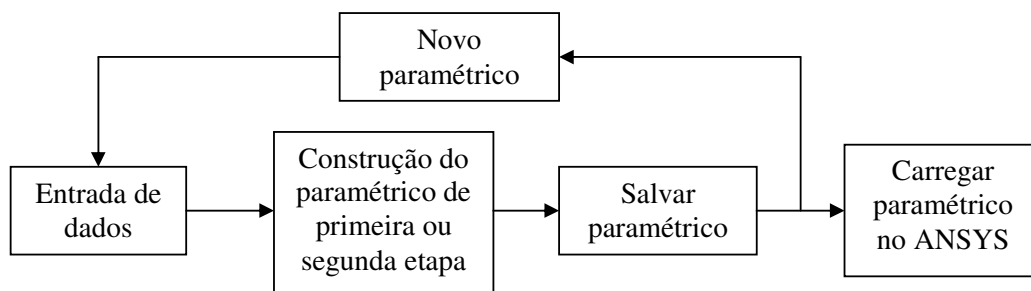


Figura 4.4 – Fluxograma com resumo do funcionamento do programa.

4.3. PRÉ-PROCESSAMENTO

O programa foi construído de maneira paramétrica, portanto as dimensões de sua geometria podem ser facilmente alteradas. Aproveitando as condições de simetria, o modelo é confeccionado utilizando 1/8 do tamanho original, este recurso foi utilizado com o objetivo de diminuir o esforço computacional e agilizar a solução da simulação. A Figura 4.5 mostra a geometria de 1/8 do modelo. A modelagem em 3-D foi escolhida por permitir a detecção dos defeitos de enrugamento do flange.

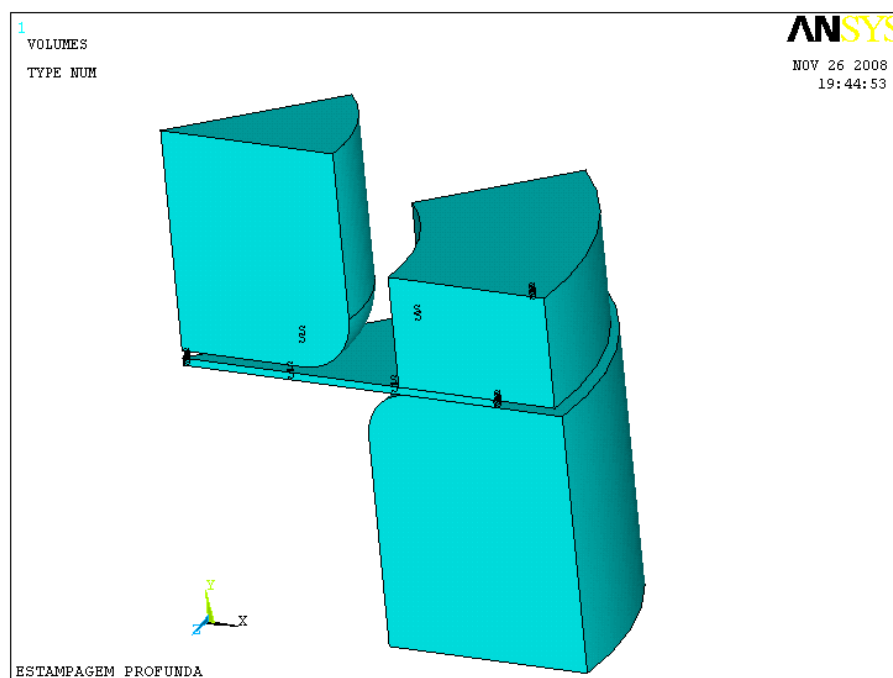


Figura 4.5 – Geometria de 1/8 do modelo.

Foi utilizado o elemento VISCO107 para a chapa e um elemento rígido com apenas uma malha superficial para o punção, matriz e prensa-chapas.

Devido, ao processo de estampagem, as deformações e falhas ocorrem principalmente na chapa, o ferramental foi considerado um corpo rígido sendo aplicado apenas uma malha superficial onde ocorrerá o contato com a chapa, sendo controlado por um nó piloto, onde serão concentrados as condições de contorno destes componentes.

Neste contato rígido/flexível, foi utilizado o elemento CONTA174 para a chapa e o elemento TARGE170 para o ferramental.

Foram utilizados três pares de contato: punção/chapa, matriz/chapa, prensa-chapa/chapa. A Figura 4.6 ilustra os pares de contato.

Na matriz são impedidos os deslocamentos e rotações em todas as direções. A pressão aplicada no prensa-chapas é realizada de maneira uniforme.

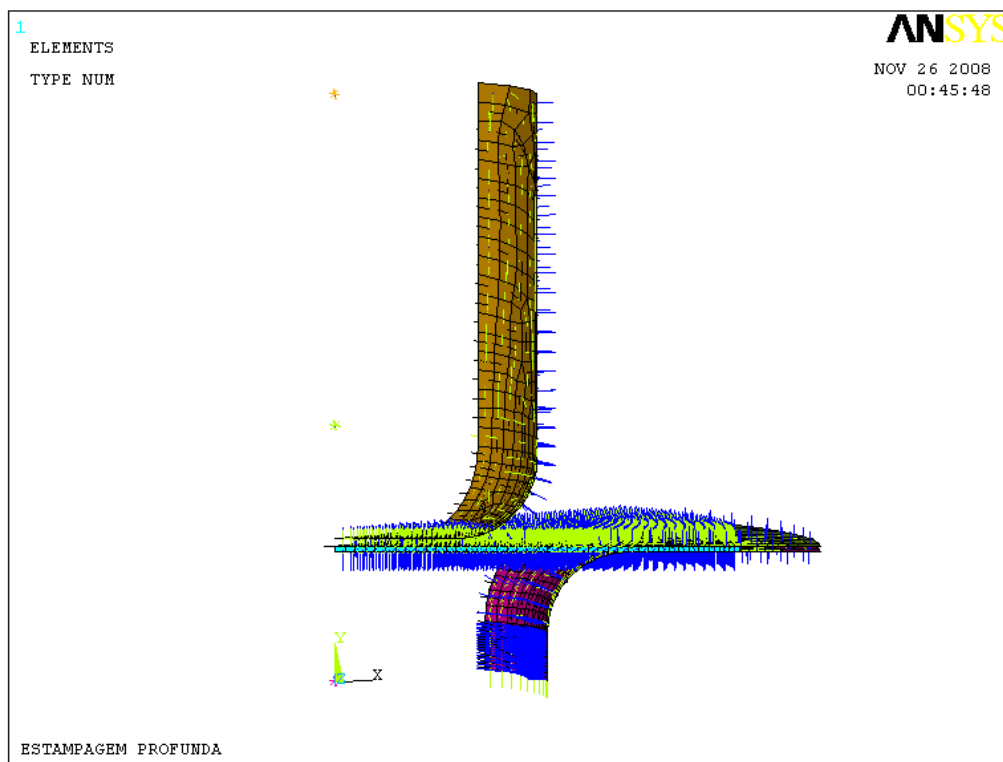


Figura 4.6 – Pares de contato.

Quando o modelo envolve análises com grandes deformações plásticas é necessário a utilização da curva real de tensão versus deformação, pois esta servirá como base para determinar as tensões nos elementos durante o processamento. Por este motivo foi inserido no programa a curva real de tensão versus deformação do material estudado na forma de uma tabela bi-linear (MISO), que utiliza um critério de escoamento de von Mises com encruamento isotrópico. O gráfico originado desta tabela é apresentado na Figura 4.7.

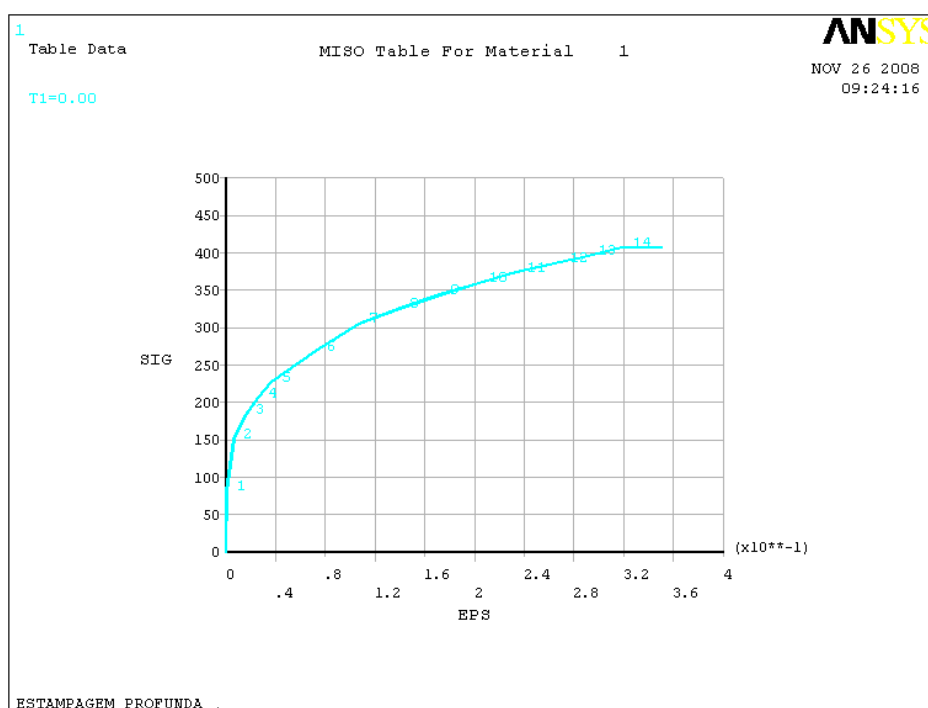


Figura 4.7 – Curva MISO para o material.

4.3.1 Elemento VISCO107

O elemento VISCO107 é utilizado para modelamento de estruturas sólidas 3-D. É definido por oito nós que possuem 3 graus de liberdade cada: translação nos eixos X , Y e Z . O elemento é projetado para ser utilizado em problemas que envolvam grandes deformações plásticas e grandes níveis de tensão. O VISCO107 é utilizado nos processos de solução iterativa desde que para representar comportamentos não-lineares. A Figura 4.8 mostra o elemento VISCO107.

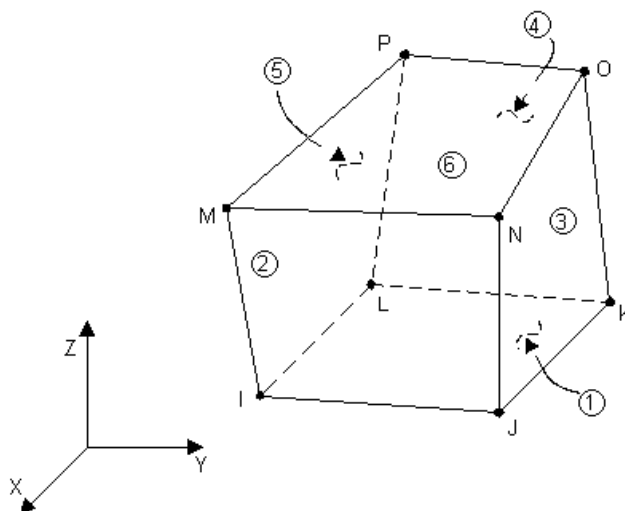


Figura 4.8 – Elemento VISCO107.

4.4. SOLUÇÃO

4.4.1. Carregamento

O carregamento é realizado em duas etapas:

Na primeira etapa é aplicado a força do prensa-chapas na chapa e o punção realiza um pequeno avanço até chegar no limiar de encostar na chapa. O avanço do punção é realizado através de incrementos de tempo, ou seja, quando um novo incremento é iniciado o punção avança. Esta operação é realizada através dos seguintes comandos:

```
TIM_INI=0.05    !* O incremento de tempo assumirá o valor de 0,05.
TIM_FIN=1       !* A operação termina quando o tempo for igual a 1.
TIM_INC=0.95
*DO,TIM,TIM_INI,TIM_FIN,TIM_INC    !* Looping da função TIM.
TIME,TIM
!*
Nsel,s,,,nodef1,nodef1,1,    !* Seleção do nó piloto do punção armazenado na
                             !* variável nodef1.
```

```

D,nodef1,UY,avanco(TIM)    !* Avanço do punção em função de TIM.
!*
Nsel,s,,,nodef2,nodef2,1,  !* Seleção do nó piloto do prensa-chapas armazenado
                             !* na variável nodef2.
F,nodef2,FY,forca(TIM)    !* Aplicação da força exercida pelo prensa-chapas na
                             !* chapa em função de TIM.

!*
ALLSEL                      !* Selecionar tudo.
!*
*ENDDO                      !* Final do looping.

```

A função TIM é responsável pelo avanço incremental e é dependente do tempo.

Na segunda etapa de carregamento a força exercida pelo prensa-chapas permanece constante e o punção avança de maneira incremental conformando a chapa.

```

TIM_INI=0.05               !* O incremento de tempo assumirá o valor de 0,05.
TIM_FIN=31                 !* A operação termina quando o tempo for igual a 31.
TIM_INC=30.95
*DO,TIM,TIM_INI,TIM_FIN,TIM_INC !* Looping da função TIM.
TIME,TIM
!*
Nsel,s,,,nodef1,nodef1,1,  !* Seleção do nó piloto do punção armazenado na
                             !* variável nodef1.

D,nodef1,UY,avanco(TIM)    !* Avanço do punção em função de TIM.
!*
ALLSEL                      !* Selecionar tudo
!*
*ENDDO                      !* Final do looping.
!*

```

4.4.2. Processamento

Diversos parâmetros de controle devem ser ajustados quando é utilizado processamento de uma análise não-linear no ANSYS®. Os comandos a seguir mostram esses parâmetros.

NLGEOM,ON: Responsável por Incluir os efeitos de grandes deformações em análises estáticas;

SSTIF,ON: Controle da inclusão da tensão de rigidez em análise não-linear;

AUTOTS,ON: Especifica o uso de passo de tempo automático;

NEQIT,50: Determina o número máximo de iterações até que a convergência seja alcançada, do contrário a solução é interrompida;

PRED,ON: Ativa um preditor do passo de tempo a cada interação;

NCNV,Kstop,Dlim,Itlim,Etlm,Cplim: Ajusta o término de uma análise;

Kstop = 2: Encerra a análise, mas não a execução do programa se a convergência não é alcançada;

Dlim = 0: Termina a execução do programa se os valores de deslocamentos nodais ultrapassarem o limite de 1×10^6 ;

Itlim = 0: Encerra a execução do programa se o número de iterações acumuladas excede o limite (o padrão é infinito);

Etlm = 0: Encerra a execução do programa se o tempo decorrido excede o limite (o padrão é infinito);

Cplim = 0: Encerra a execução do programa se o tempo de processamento excede o limite (o padrão é infinito);

DELTIM,Dtime,Dtmin,Dtmax,Carry: Especifica o tamanho dos incrementos do passo de tempo que serão utilizados na análise.

Dtime = 0,05: Tamanho do passo de tempo;

Dtmin = 0,005: Tamanho mínimo do passo de tempo;

Dtmáx = 0,05: Tamanho máximo do passo de tempo;

Carry = ON: Utiliza 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: Valores de convergência para análise não-lineares;

Lab = F: Parâmetro de convergência, por exemplo: força;

Value: Valor típico para rótulo da análise;

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

Norm = L2: Seleção da norma de cálculo;

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

4.4.3. Monitor dos nós pilotos

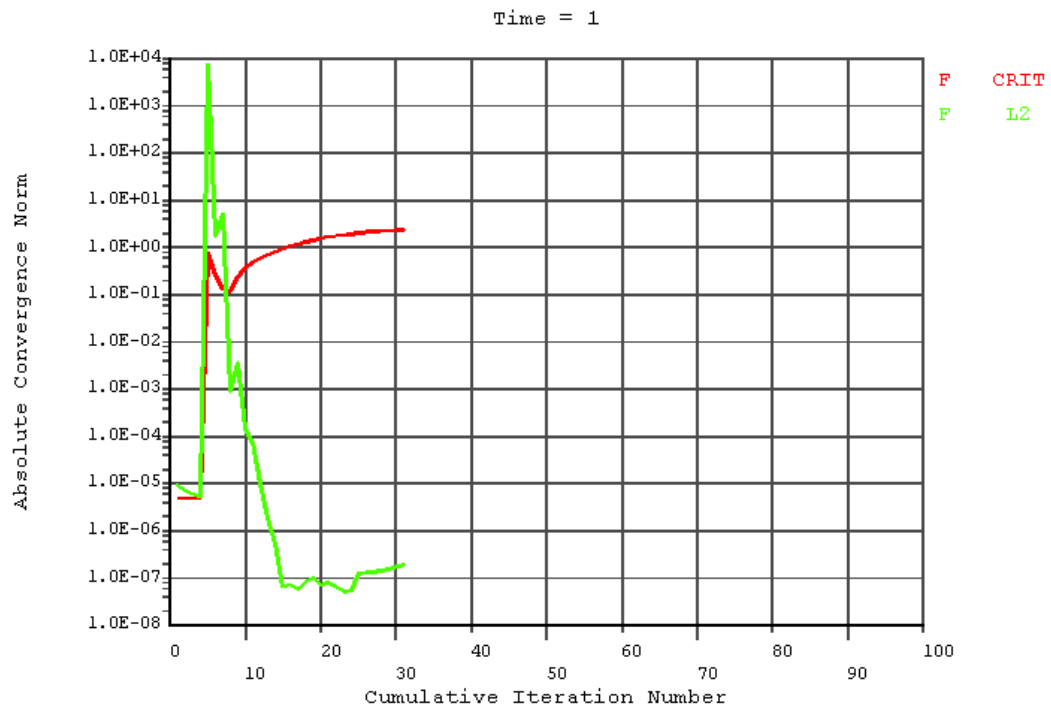
O ANSYS® permite monitorar em tempo real os nós pilotos. Foram monitorados os nós pilotos do prensa-chapas e do punção. O nó piloto do prensa-chapas foi monitorado para garantir que a força exercida por ele permanece constante no decorrer do processo de estampagem. O nó piloto do punção foi monitorado para permitir a construção de uma curva de força de estampagem x deslocamento. Este recurso é utilizado através dos comandos que seguem:

```
!*
NSEL,S,,,nodef1    !*Seleciona o nó piloto armazenado na variável nodef1
MONITOR,1,nodef1,UY    !* Ativa o monitor do nó piloto do punção armazenado
                        !* na variável nodef1 e monitora o deslocamento no eixo
                        !*Y.

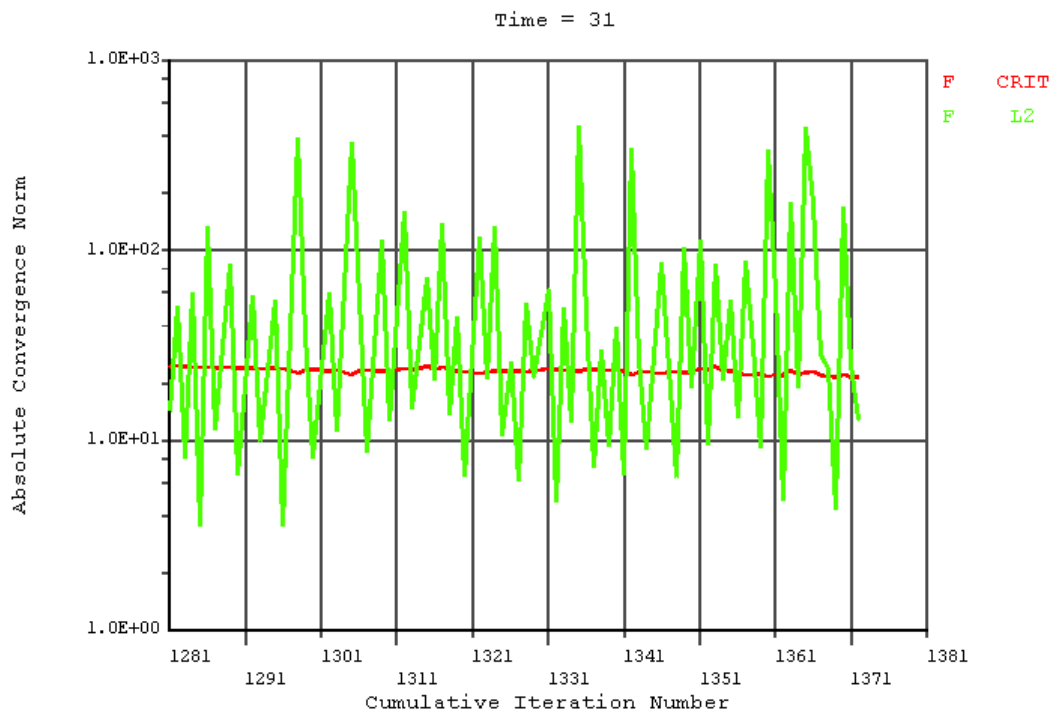
!*
NSEL,S,,,nodef1
MONITOR,2,nodef1,FY    !* Ativa o monitor do nó piloto do punção armazenado
                        !* na variável nodef1 e monitora a força no eixo Y.

!*
```

Quando a solução da simulação é iniciada o ANSYS® gera um gráfico de convergência para que o usuário acompanhe o estado do processamento. Este gráfico é atualizado em tempo real, ou seja, a cada iteração. As Figuras 4.9 e 4.10 mostram os gráficos de convergência de 1ª e 2ª etapas respectivamente. A linha vermelha representa o valor do critério de convergência e a linha verde é o valor de convergência calculado a cada incremento de tempo, estes dois valores são calculados a cada incremento de tempo, sendo necessário que o valor calculado seja menor que o valor do critério para que o programa avance ao próximo incremento (*substep*), são realizadas diversas iterações para que isto ocorra.



Figuras 4.9 – Gráfico de convergência da 1ª etapa de carregamento.



Figuras 4.10 – Gráfico de convergência da 2ª etapa de carregamento.

4.5. PÓS-PROCESSAMENTO

Após a solução ser finalizada o usuário poderá usufruir dos recursos de análise de resultados que o ANSYS® possui, como: diagrama ou tabelas de tensão, deformação, força, entre outros. Com os dados provenientes do arquivo monitoramento dos nós pilotos pode ser construído uma curva de força de estampagem versus deslocamento. Esta curva será apresentada no capítulo 5.

A Figura 4.11 apresenta uma das saídas fornecida pelo ANSYS®: os deslocamentos nodais, para que assim o usuário possa visualizar a chapa estampada. A Figura 4.12 mostra a chapa estampada em modelo expandido por simetria.

A Figura 4.13 mostra um modelo a chapa estampada de um modelo expandido por simetria de uma simulação na qual o produto final apresentou um defeito no flange: o enrugamento.

Para os modelos apresentados nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 a profundidade de estampagem foi de 30 [mm].

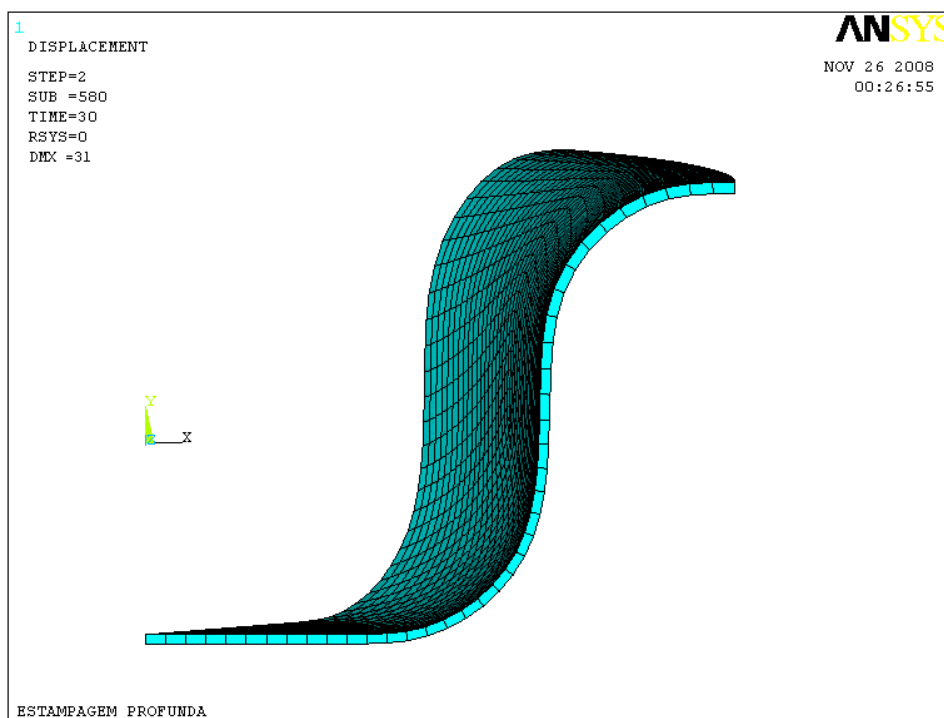


Figura 4.11 – Modelo com 1/8 da chapa deformada.

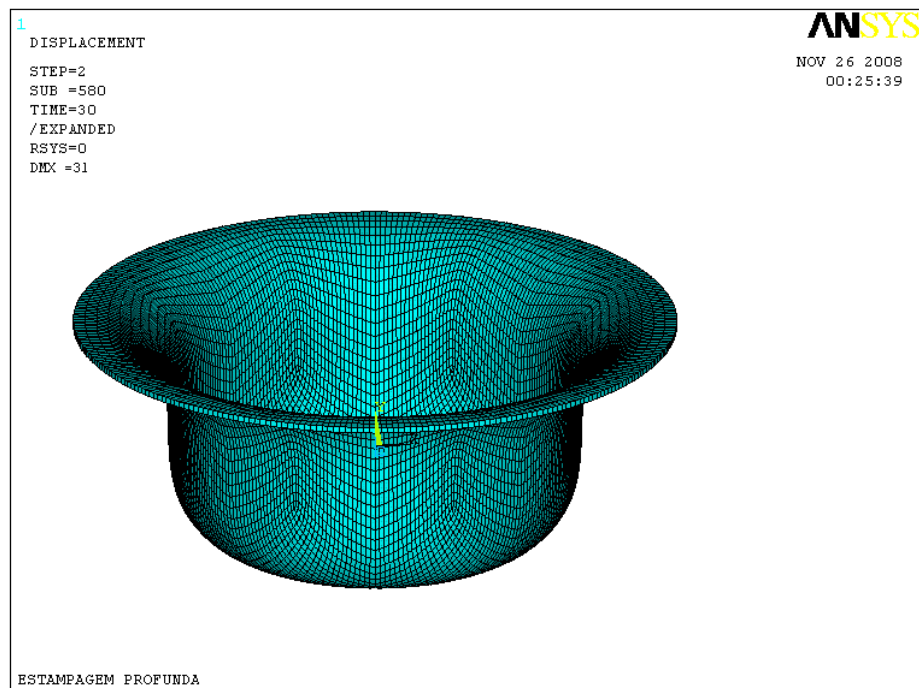


Figura 4.12 – Modelo expandido da chapa deformada.

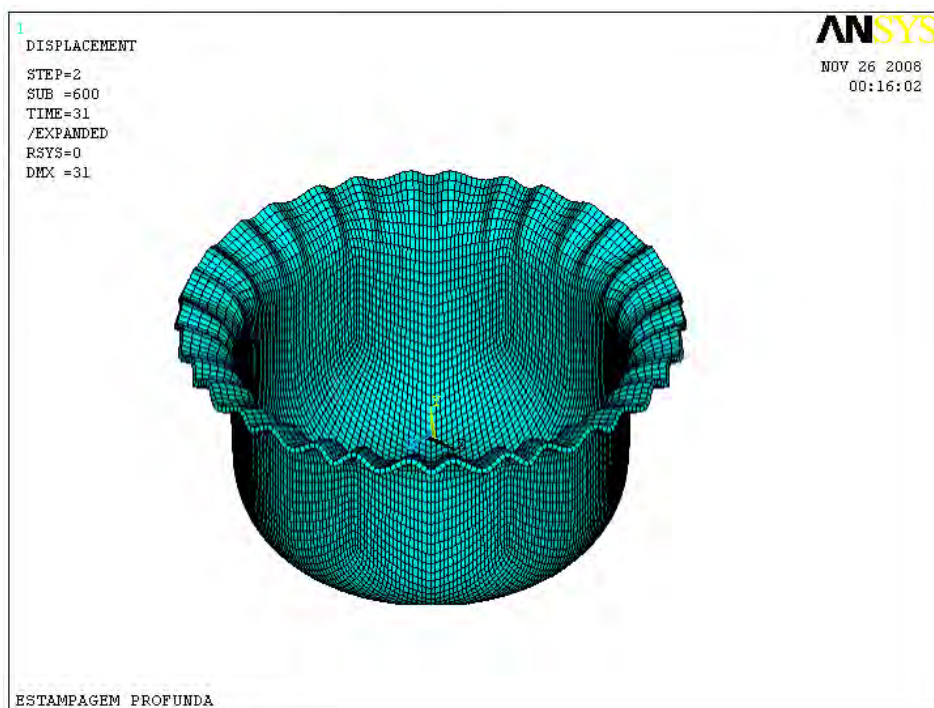


Figura 4.13 – Modelo expandido com defeito de enrugamento no flange.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo é apresentado e discutido os resultados obtidos nas simulações e nos ensaios. Esses são apresentados na forma de curvas que relacionam a força aplicada no punção pelo deslocamento do mesmo e as deformações ocorridas nas espessuras das chapas em relação a posição radial inicial.

Foram utilizadas diversas condições de estampagem de modo a testar a confiabilidade do programa paramétrico. As medidas dos *blanks* e a força aplicada no prensa-chapas foram calculadas de acordo com as dimensões do ferramental, foram usinados três punções com 50 [mm] de diâmetro e raios de 5 [mm], 10 [mm] e 15 [mm] e duas matrizes com 52,5 [mm] de diâmetro interno com raios de 5 [mm] e 10 [mm]. Combinou-se as matrizes e punções. Estas situações são apresentados a seguir. Para cada dimens de *blank* foram realizados três ensaios.

5.1. MATRIZ E PUNÇÃO DE 10 [mm] DE RAIOS

Para combinação de matriz de 10 [mm] com o punção de 10 [mm] foram adotados os seguintes valores de estampagem:

- Profundidade de estampagem: 30 [mm];
- Diâmetro do *blank*: 100 [mm];
- Força exercida pelo prensa-chapas: 4,30 [kN];
- Coeficiente de atrito: 0,15.

A Figura 5.1 mostra a peça estampada no programa ANSYS em uma escala de deformação e a Figura 5.2 apresenta uma peça estampada no ensaio.

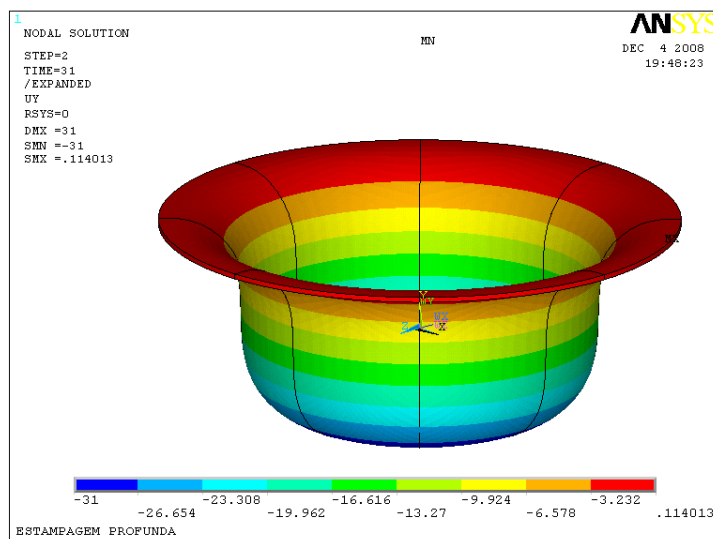


Figura 5.1 – Peça estampada na simulação.



Figura 5.2 – Peça estampada no ensaio.

A Figura 5.3 apresenta os dados referentes as curvas de força de estampagem aplicada no punção versus deslocamento do mesmo. Neste gráfico observa-se a comparação dos dados provenientes da simulação e do ensaio. A força máxima de estampagem é de 29,45 [kN] e 30,50 [kN] para a simulação e média dos ensaios, respectivamente, resultando em uma diferença de 3,57%.

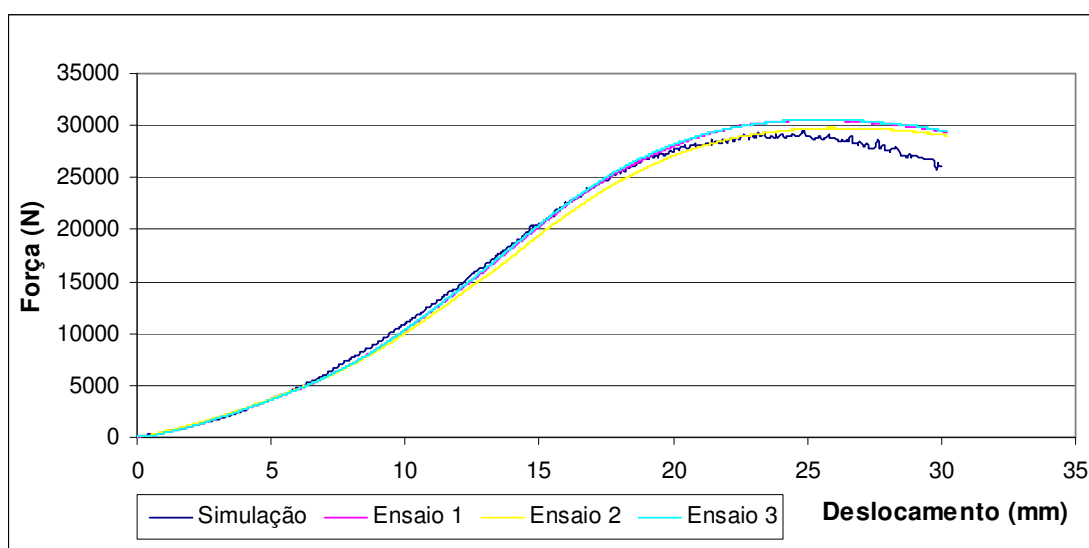


Figura 5.3 – Curvas de força de estampagem aplicada no punção versus deslocamento.

A Figura 5.4 apresenta uma curva da variação de espessura em relação a posição radial inicial ocorrida após a estampagem realizada na simulação.

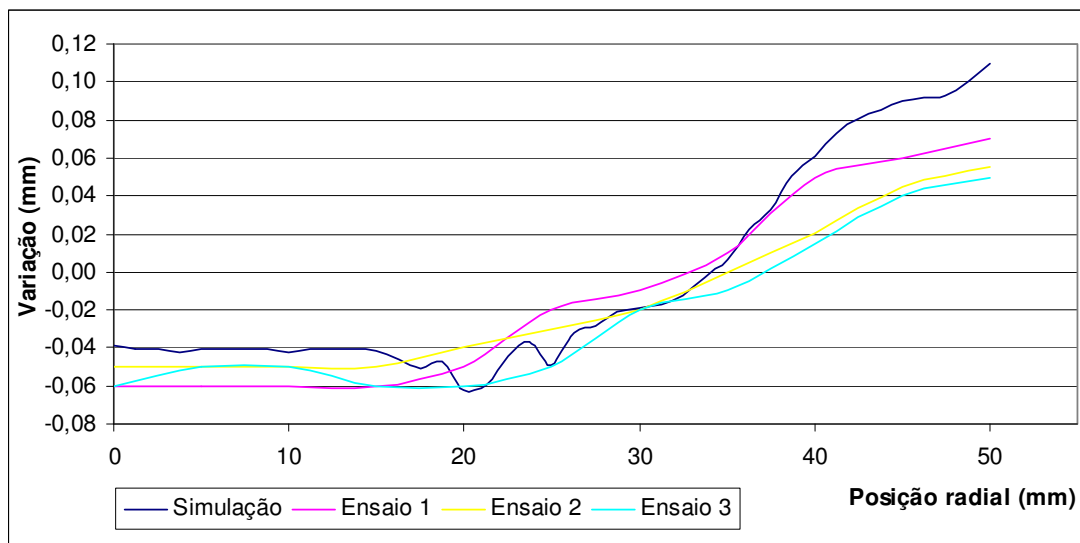


Figura 5.4 – Curva da variação de espessura em relação a posição radial inicial da simulação.

Como pode ser observado na simulação a maior diminuição de espessura ocorreu próximo ao fundo e no raio do fundo do copo com variação máxima de 0,06 [mm] e na média dos ensaios a maior redução foi de 0,05 [mm], enquanto que no flange a espessura aumentou com valor máximo de 0,11 [mm] e 0,07 [mm] na simulação e média dos ensaios respectivamente.

5.2. MATRIZ DE 10 [mm] E PUNÇÃO DE 5 [mm] DE RAIO

Para combinação de matriz de 10 [mm] com o punção de 5 [mm] foram utilizados os seguintes valores de estampagem:

- Profundidade de estampagem: 30 [mm];
- Diâmetro do *blank*: 102 [mm];
- Força exercida pelo prensa-chapas: 4,40 [kN];
- Coeficiente de atrito: 0,15.

A Figura 5.5 mostra a peça estampada no programa ANSYS em uma escala de deformação e a Figura 5.6 apresenta uma peça estampada no ensaio.

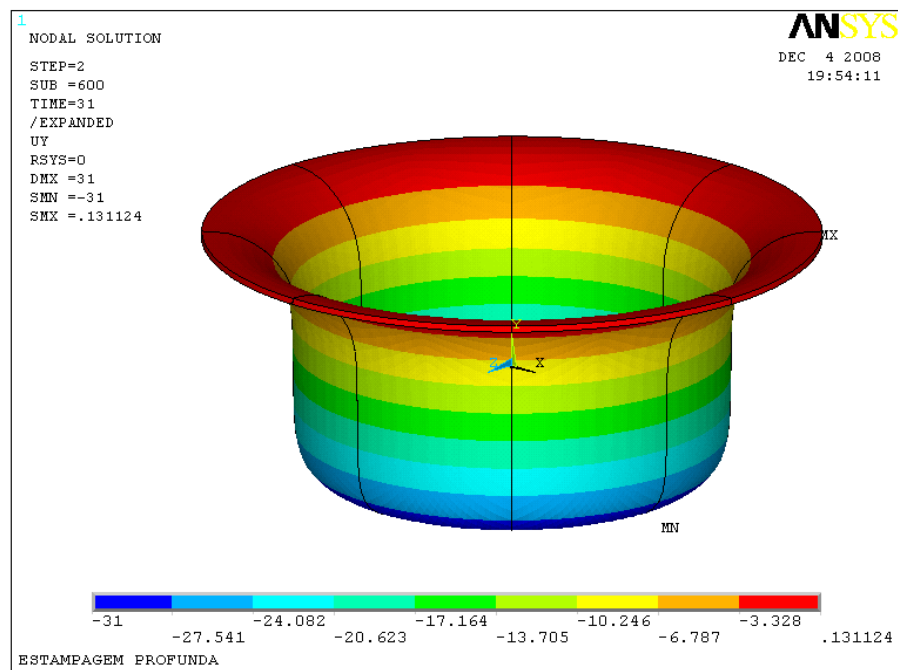


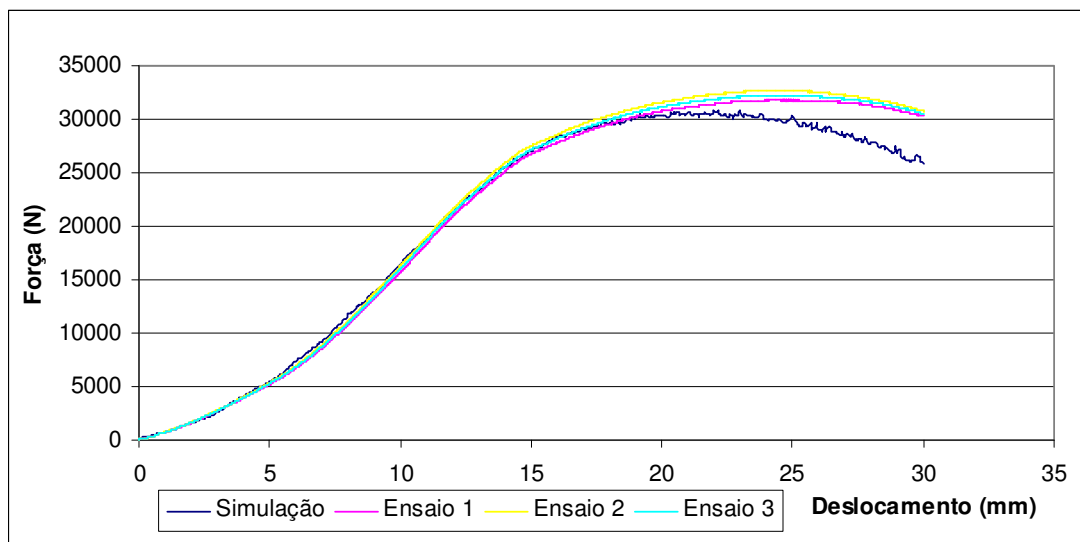
Figura 5.5 – Peça estampada na simulação.



Figura 5.6 – Peça estampada no ensaio.

Assim como mostrado no item 5.1, a Figura 5.7 apresenta os dados referentes as curvas de força de estampagem aplicada no punção versus deslocamento do mesmo, só que para o conjunto de matriz com raio de 10 [mm] e punção com raio de 5 [mm]. A força

máxima de estampagem foi 30,86 [kN] e 31,98 [kN] para a simulação e média dos ensaios, respectivamente, resultando em uma diferença de 3,63%.



A Figura 5.7 – Curvas de força de estampagem aplicada no punção versus deslocamento.

A Figura 5.8 apresenta uma curva da variação de espessura em relação a posição radial inicial ocorrida após a estampagem realizada na simulação.

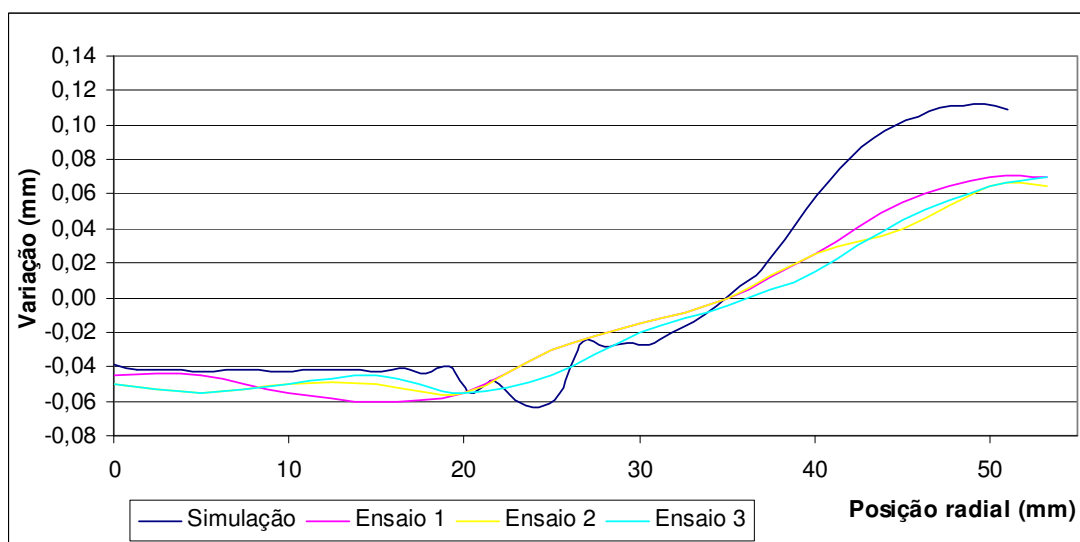


Figura 5.8 – Curva da variação de espessura em relação a posição radial inicial da simulação.

Ocorreu a maior redução de espessura próximo ao fundo e no raio do fundo do copo com variação máxima de 0,06 [mm] e 0,05 [mm] para a simulação e média dos experimentos, respectivamente, enquanto que o maior aumento da espessura ocorreu no flange com valores de 0,11 [mm] para a simulação e 0,07 [mm] para a média dos experimentos.

5.3. MATRIZ E PUNÇÃO DE 5 [mm] DE RAIO

Para combinação de matriz de 5 [mm] com o punção de 5 [mm] foram utilizados os seguintes valores de estampagem:

- Profundidade de estampagem: 35 [mm];
- Diâmetro do *blank*: 106,5 [mm];
- Força exercida pelo prensa-chapas: 5,20 [kN];
- Coeficiente de atrito: 0,15.

A Figura 5.9 mostra a peça estampada no programa ANSYS em uma escala de deformação e a Figura 5.10 apresenta uma peça estampada no ensaio.

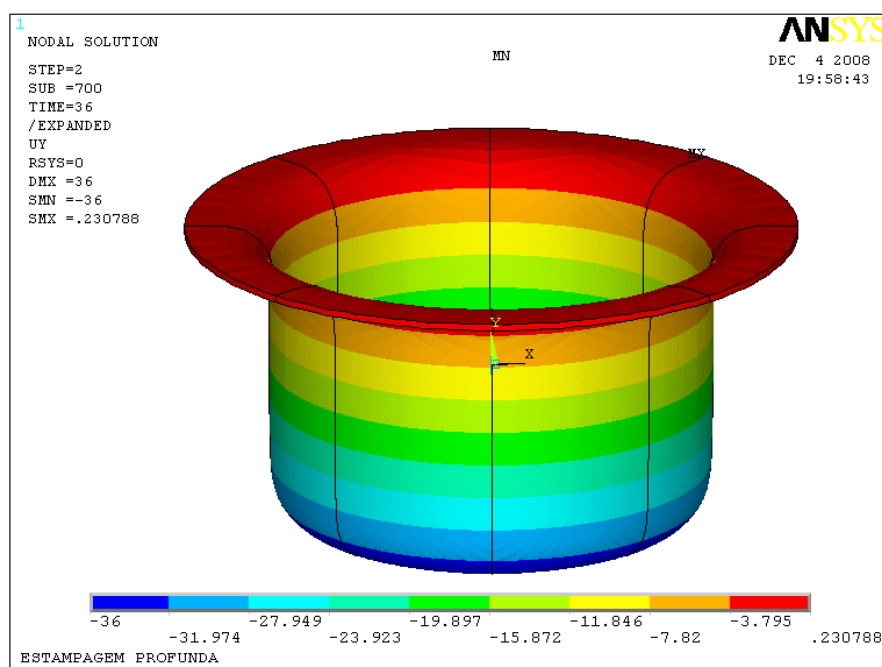


Figura 5.9 – Peça estampada na simulação.



Figura 5.10 – Peça estampada no ensaio.

A Figura 5.11 mostra um detalhe do flange, destacando o início do enrugamento ocorrido na simulação. A Figura 5.12 apresenta o flange de uma peça ensaiada sob as mesmas condições utilizadas na simulação, na qual observa-se que também ocorre o início do defeito de enrugamento.

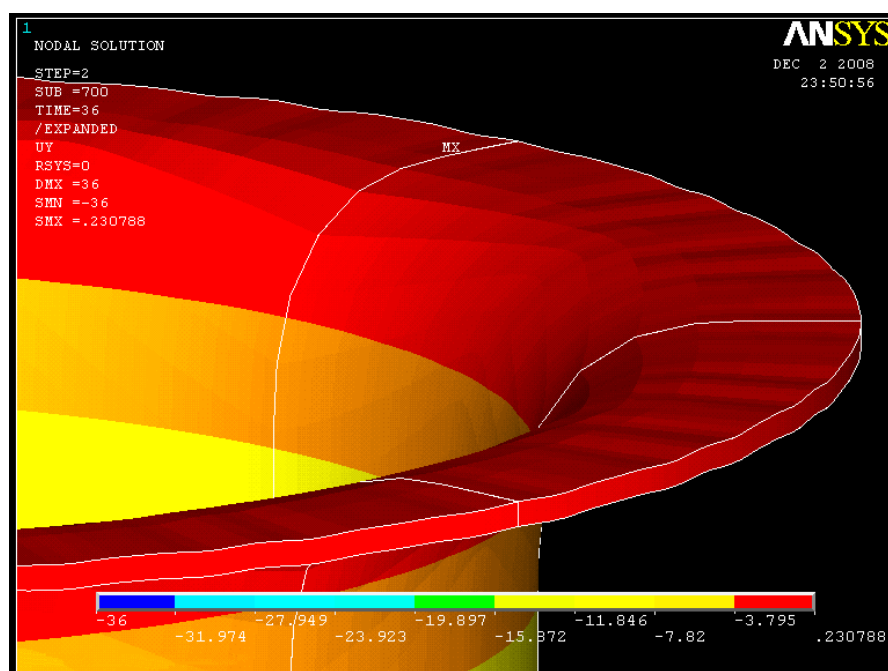
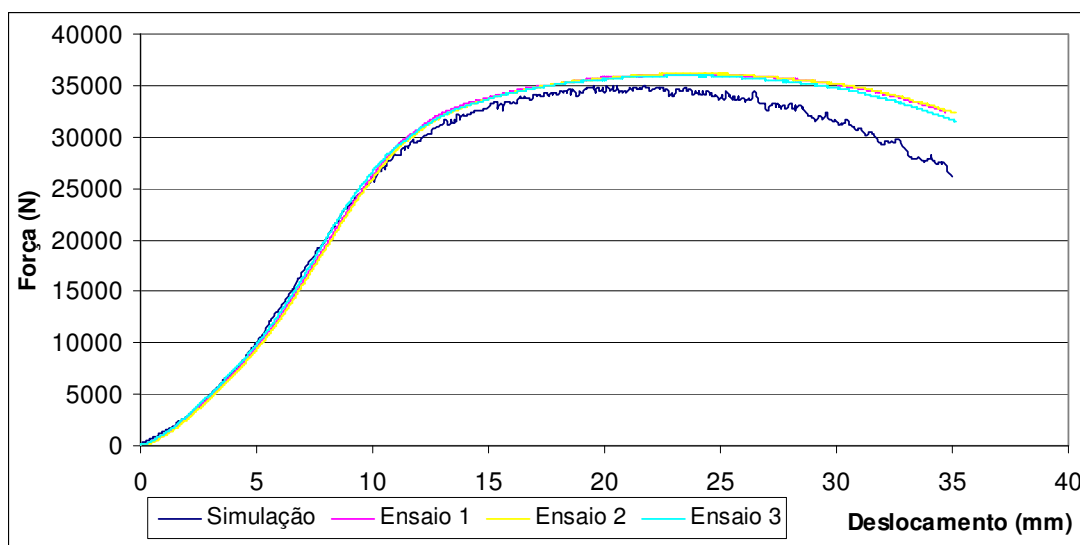


Figura 5.11 – Detalhe do flange na simulação.



Figura 5.12 – Detalhe do flange da peça ensaiada.

A Figura 5.13 apresenta os dados referentes as curvas de força de estampagem aplicada no punção versus deslocamento do mesmo. A força máxima de estampagem encontrada foi de 35,03 [kN] e 36,10 [kN] para a simulação e média dos ensaios, respectivamente, resultando em uma diferença de 3,05 %.



A Figura 5.13 – Curvas de força de estampagem aplicada no punção versus deslocamento.

A Figura 5.14 apresenta uma curva da variação de espessura em relação a posição radial inicial ocorrida após a estampagem realizada na simulação.

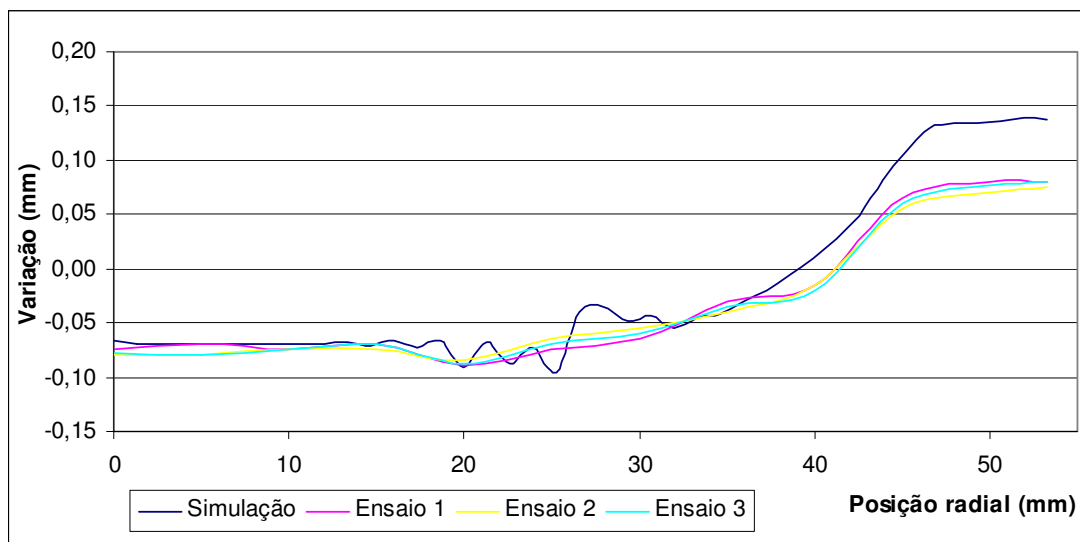


Figura 5.14 – Curva da variação de espessura em relação a posição radial inicial da simulação.

A maior diminuição de espessura ocorreu próximo ao fundo e no raio do fundo do copo com variação máxima de 0,10 [mm] para a simulação e na média dos ensaios a maior redução foi de 0,07 [mm], enquanto que no flange houve um aumento na espessura com valor máximo de 0,14 [mm] e 0,08 [mm] na simulação e média dos ensaios respectivamente.

5.4. MATRIZ E PUNÇÃO DE 10 [mm] DE RAIO

Para combinação de matriz de 10 [mm] com o punção de 10 [mm] foram utilizados os seguintes valores de estampagem:

- Profundidade de estampagem: 40 [mm];
- Diâmetro do *blank*: 109,5 [mm];
- Força exercida pelo prensa-chapas: 5,32 [kN];
- Coeficiente de atrito: 0,15.

A Figura 5.15 mostra a peça estampada no programa ANSYS em uma escala de deformação e a Figura 5.16 apresenta uma peça estampada no ensaio.

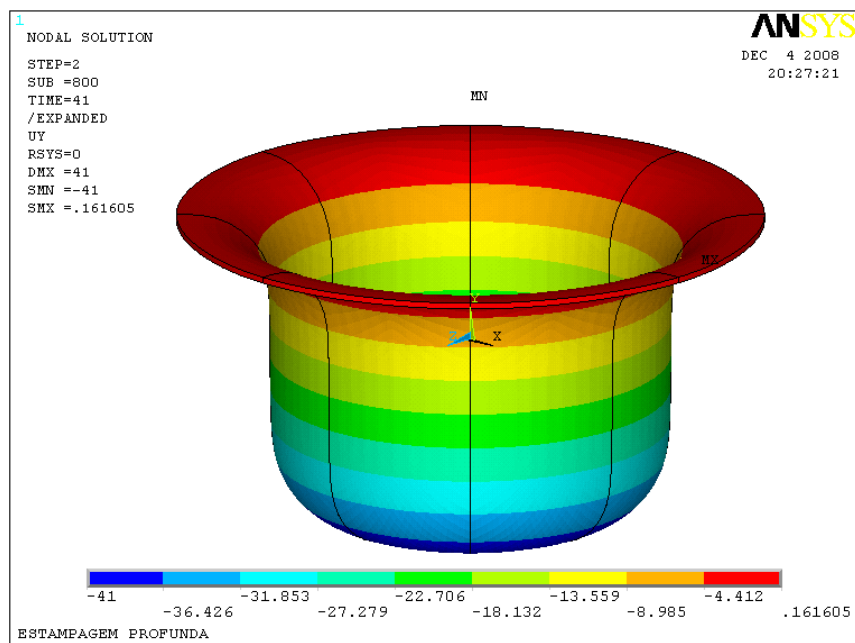


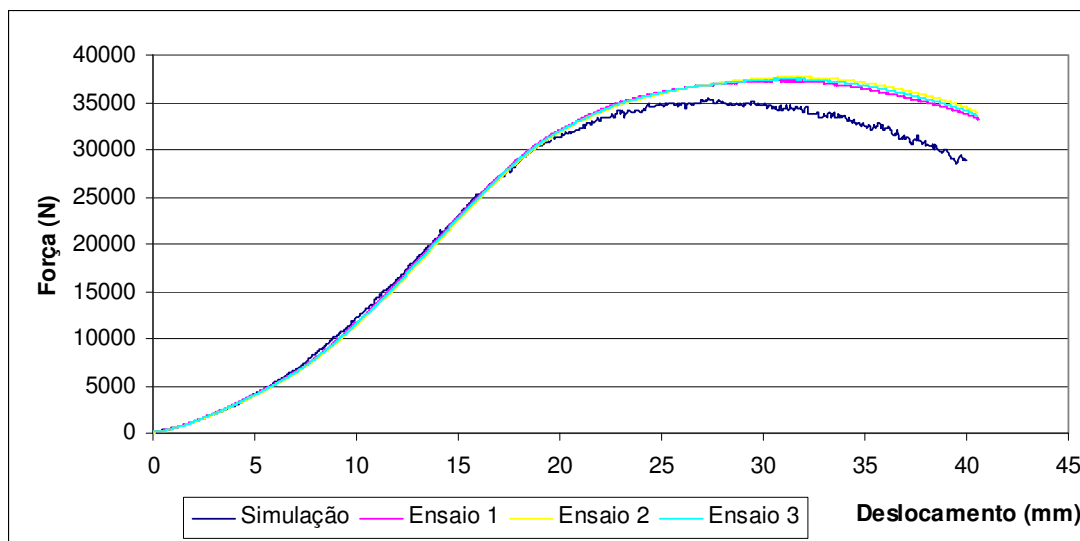
Figura 5.15 – Peça estampada na simulação.



Figura 5.16 – Peça estampada no ensaio.

A Figura 5.17 apresenta os dados referentes as curvas de força de estampagem aplicada no punção versus deslocamento do mesmo para o conjunto de matriz com raio de 10

[mm] e punção com raio de 10 [mm]. A força máxima de estampagem foi 35,43 [kN] e 37,30 [kN] para a simulação e média dos ensaios, respectivamente, resultando em uma diferença de 5,27 %.



A Figura 5.17 – Curvas de força de estampagem aplicada no punção versus deslocamento.

A Figura 5.18 apresenta uma curva da variação de espessura em relação a posição radial inicial ocorrida após a estampagem realizada na simulação.

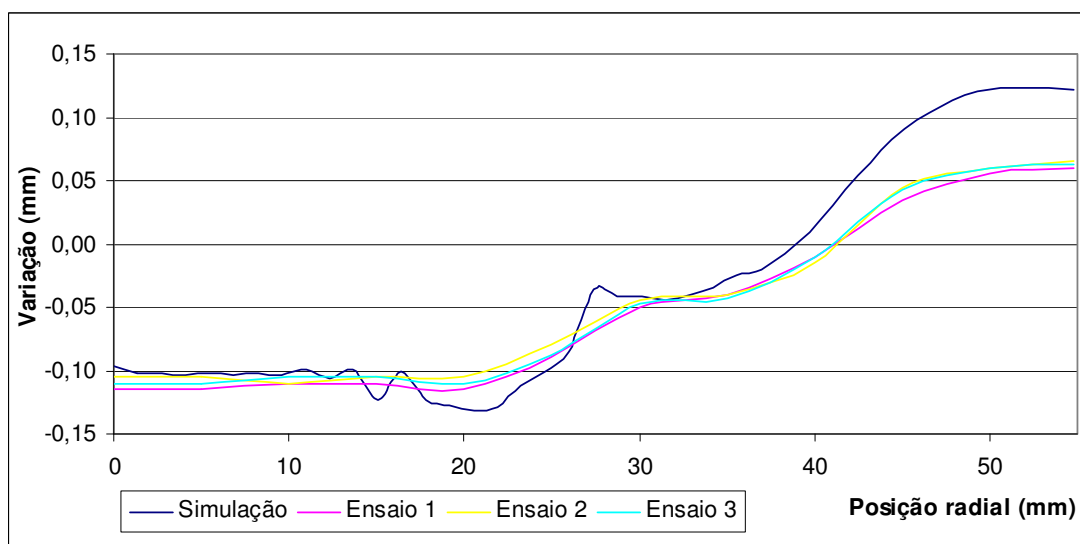


Figura 5.18 – Curva da variação de espessura em relação a posição radial inicial da simulação.

Ocorreu uma diminuição máxima de espessura próximo ao fundo e no raio do fundo do copo com variação máxima de 0,13 [mm] e 0,11 [mm] para a simulação e média dos experimentos, respectivamente, enquanto que o maior aumento de espessura ocorreu na flange onde aumentou 0,12 [mm] na simulação e 0,06 [mm] nos experimentos.

5.5. MATRIZ DE 5 [mm] E PUNÇÃO DE 10 [mm] DE RAIOS

Para combinação de matriz de 5 [mm] com o punção de 10 [mm] foram utilizados os seguintes valores de estampagem:

- Profundidade de estampagem: 30 [mm];
- Diâmetro do *blank*: 98 [mm];
- Força exercida pelo prensa-chapas: 3,60 [kN];
- Coeficiente de atrito: 0,15.

A Figura 5.19 mostra a peça estampada no programa ANSYS em uma escala de deformação e a Figura 5.10 apresenta uma peça estampada no ensaio.

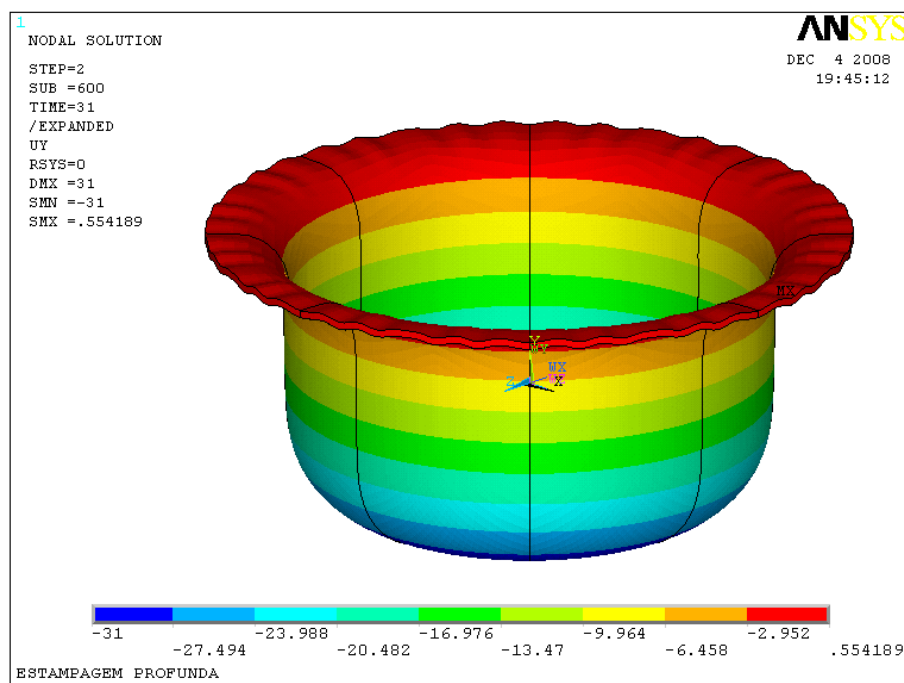
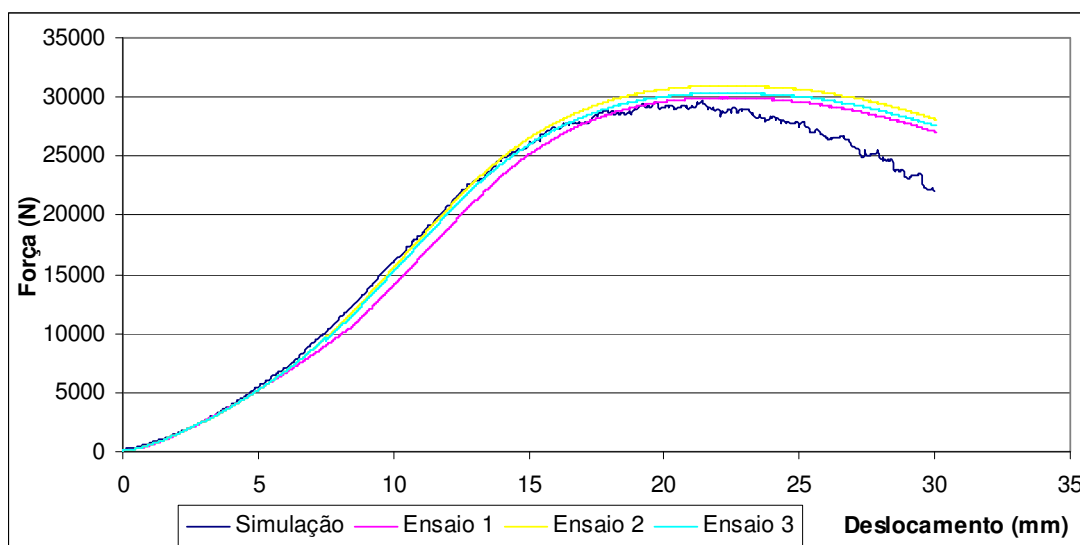


Figura 5.19 – Peça estampada na simulação.



Figura 5.20 – Peça estampada no ensaio.

A Figura 5.21 apresenta os dados referentes as curvas de força de estampagem aplicada no punção versus deslocamento do mesmo para o conjunto de matriz com raio de 5 [mm] e punção com raio de 10 [mm]. A força máxima de estampagem foi 29,65 [kN] e 30,37 [kN] para a simulação e média dos ensaios, respectivamente, resultando em uma diferença de 2,43 %.



A Figura 5.21 – Curvas de força de estampagem aplicada no punção versus deslocamento.

A Figura 5.22 apresenta uma curva da variação de espessura em relação a posição radial inicial ocorrida após a estampagem realizada na simulação.

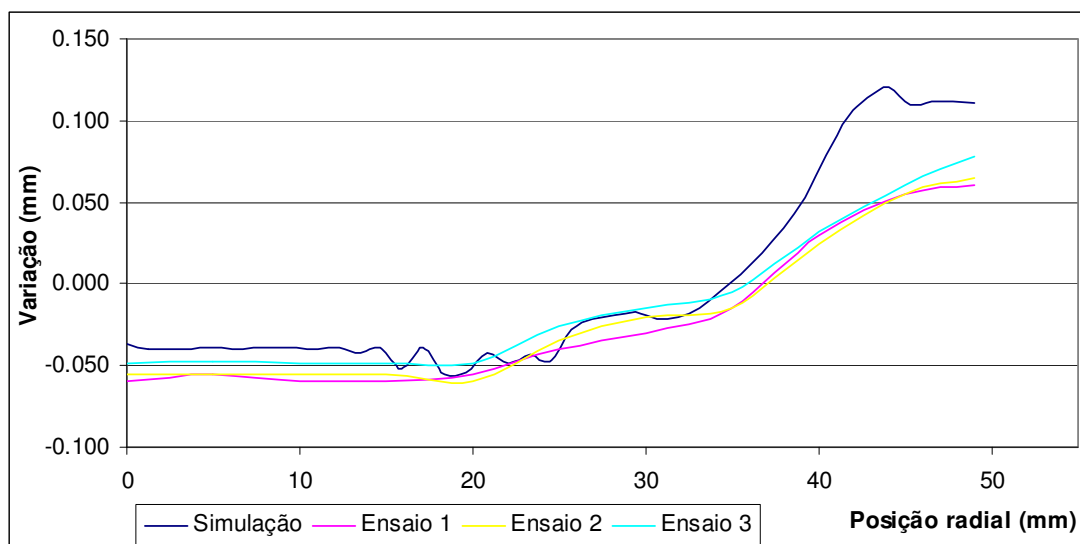


Figura 5.22 – Curva da variação de espessura em relação a posição radial inicial da simulação.

A maior diminuição de espessura ocorreu próximo ao fundo e no raio do fundo do copo no valor de 0,05 [mm] para a simulação e na média dos ensaios a maior redução foi de 0,05 [mm], enquanto que no flange houve um aumento na espessura com valor máximo de 0,12 [mm] e 0,07 [mm] na simulação e média dos ensaios respectivamente.

5.6. MATRIZ DE 5 [mm] E PUNÇÃO DE 15 [mm] DE RAIOS

Para combinação de matriz de 5 [mm] com o punção de 15 [mm] foram utilizados os seguintes valores de estampagem:

- Profundidade de estampagem: 30 [mm];
- Diâmetro do *blank*: 93 [mm];
- Força exercida pelo prensa-chapas: 3,36 [kN];
- Coeficiente de atrito: 0,15.

A Figura 5.23 mostra a peça estampada no programa ANSYS em uma escala de deformação e a Figura 5.24 apresenta uma peça estampada no ensaio.

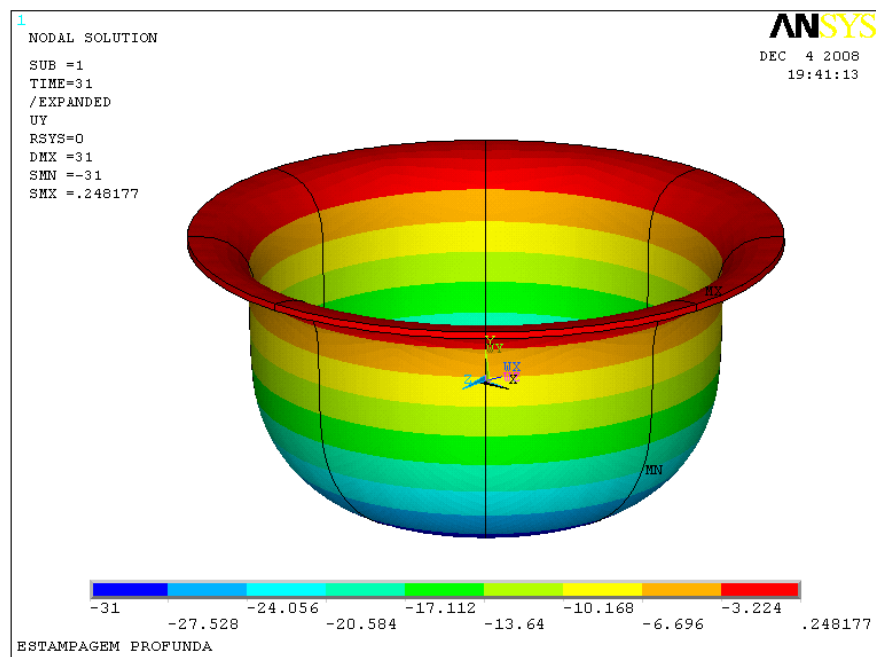


Figura 5.23 – Peça estampada na simulação.



Figura 5.24 – Peça estampada no ensaio.

A Figura 5.25 apresenta os dados referentes as curvas de força de estampagem aplicada no punção versus deslocamento do mesmo para o conjunto de matriz com raio de 5 [mm] e punção com raio de 15 [mm]. A força máxima de estampagem foi 27,02 [kN] e 28,70 [kN] para a simulação e média dos ensaios, respectivamente, resultando em uma diferença de 6,22 %.

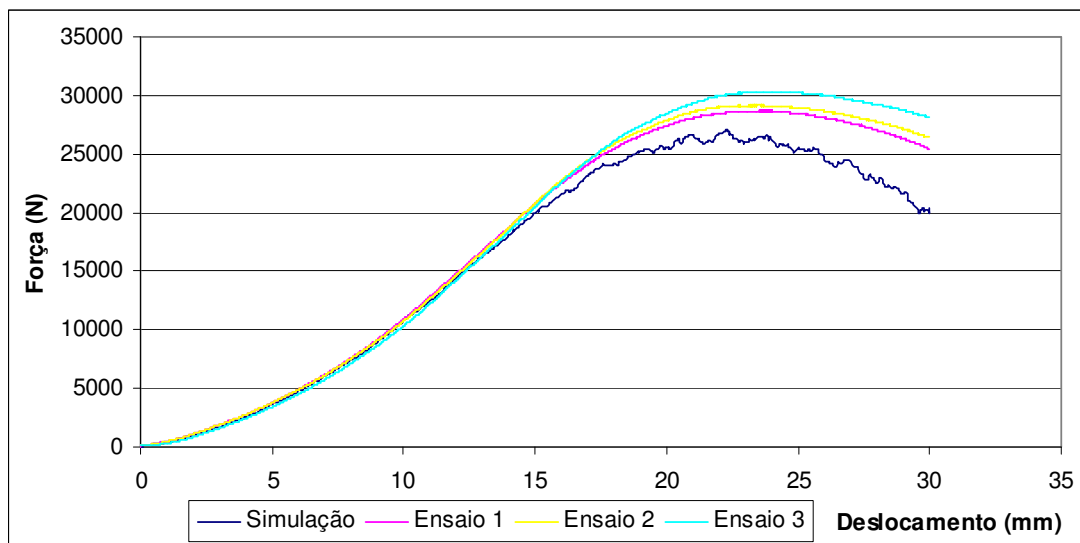


Figura 5.25 – Curvas de força de estampagem aplicada no punção versus deslocamento.

A Figura 5.26 apresenta uma curva da variação de espessura em relação a posição radial inicial ocorrida após a estampagem realizada na simulação.

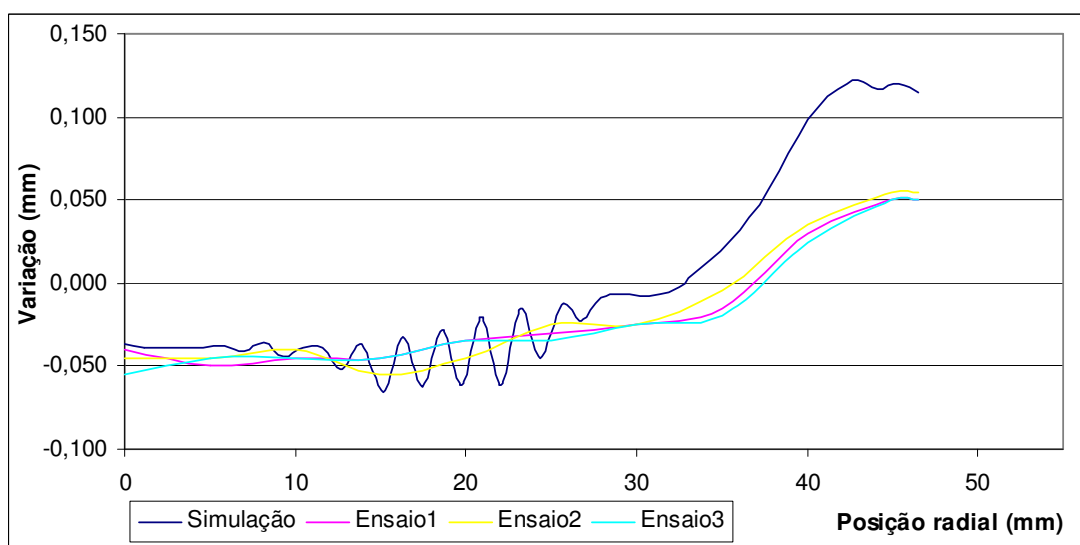


Figura 5.26 – Curva da variação de espessura em relação a posição radial inicial da simulação.

Ocorreu uma diminuição máxima de espessura próximo ao fundo e no raio do fundo do copo com variação máxima de 0,06 [mm] e 0,05 [mm] para a simulação e média dos experimentos, respectivamente, enquanto que o maior aumento de espessura ocorreu no flange onde aumentou 0,12 [mm] na simulação e 0,05 [mm] na média dos ensaios.

As Figuras 5.27 (simulação) e 5.28 (ensaio) mostram os resultados quando a força no prensa-chapas é reduzida a 2,70 [kN] quando o mínimo recomendado seria de 3,36 [kN], na qual torna-se evidente o defeito de enrugamento do flange.

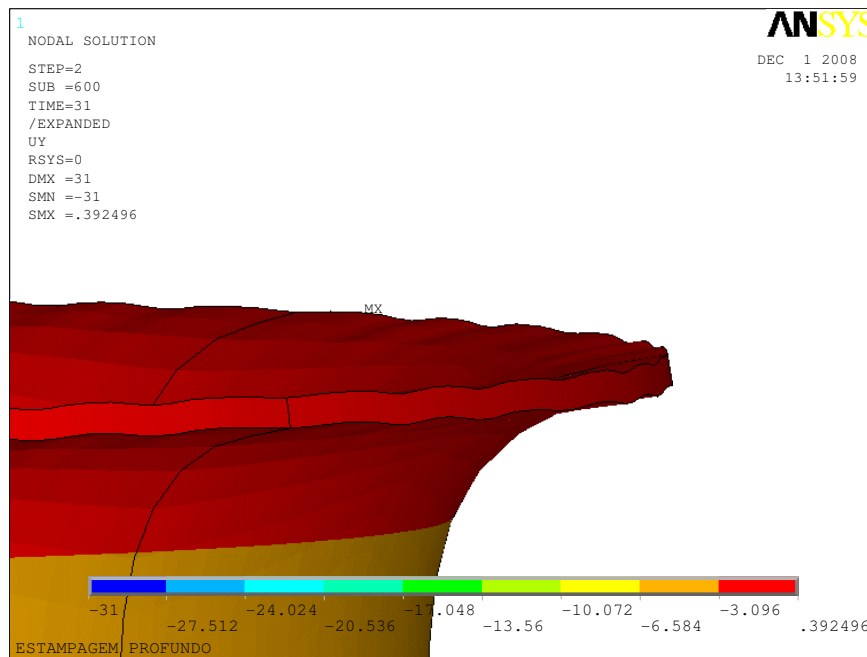


Figura 5.27 – Defeito de enrugamento ocorrido durante a simulação.



Figura 5.28 – Defeito de enrugamento ocorrido durante o ensaio.

5.7. RESUMO E COMENTÁRIOS GERAIS

A Tabela 5.1 apresenta um resumo com os resultados de força máxima sobre o punção obtida na simulação e no ensaio, e a deformação na espessura obtida na simulação, sendo denominada mínima quando ocorreu a diminuição de material e máxima quando se observou um acréscimo de espessura.

Tabela 5.1 – Resumo dos Resultados.

	Força máxima no punção [kN]		Variação da espessura [mm]			
			Simulação		Ensaio	
Conjunto	Simulação	Ensaio	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima
$R_{\text{matriz}} = 5 \text{ [mm]}$ $R_{\text{punção}} = 5 \text{ [mm]}$ Profundidade = 35 [mm] $\phi_{\text{blank}} = 106,5 \text{ [mm]}$	35,03	36,10	0,14	0,10	0,08	0,07
$R_{\text{matriz}} = 10 \text{ [mm]}$ $R_{\text{punção}} = 10 \text{ [mm]}$ Profundidade = 30 [mm] $\phi_{\text{blank}} = 100,0 \text{ [mm]}$	29,45	30,50	0,11	0,06	0,07	0,05
$R_{\text{matriz}} = 10 \text{ [mm]}$ $R_{\text{punção}} = 5 \text{ [mm]}$ Profundidade = 30 [mm] $\phi_{\text{blank}} = 102,0 \text{ [mm]}$	30,86	31,98	0,11	0,06	0,07	0,05
$R_{\text{matriz}} = 10 \text{ [mm]}$ $R_{\text{punção}} = 10 \text{ [mm]}$ Profundidade = 40 [mm] $\phi_{\text{blank}} = 109,5 \text{ [mm]}$	35,43	37,30	0,12	0,13	0,06	0,11
$R_{\text{matriz}} = 5 \text{ [mm]}$ $R_{\text{punção}} = 10 \text{ [mm]}$ Profundidade = 30 [mm] $\phi_{\text{blank}} = 98,0 \text{ [mm]}$	29,65	30,37	0,12	0,05	0,07	0,05
$R_{\text{matriz}} = 5 \text{ [mm]}$ $R_{\text{punção}} = 15 \text{ [mm]}$ Profundidade = 30 [mm] $\phi_{\text{blank}} = 93,0 \text{ [mm]}$	27,02	28,70	0,12	0,06	0,05	0,05

Como observado na Tabela 5.1 a maior força no punção foi encontrada quando aumentou-se a profundidade de estampagem e por consequência o diâmetro do *blank* e a força no prensa-chapas, em contrapartida quando reduzimos estas variáveis obtemos a menor força {conjunto $R_{matriz} = 5$ [mm] e $R_{punção} = 15$ [mm]}. A maior diferença encontrada foi de 6,22 % (um erro pequeno para simulação), o que garante a confiabilidade dos resultados fornecidos pelo programa de simulação. A maior redução de espessura do material foi obtida quando utilizamos a maior profundidade de estampagem.

A diferença observada entre as curvas de força de estampagem aplicada no punção versus deslocamento (por exemplo a Figura 5.3) após aproximadamente 23 [mm] de estampagem, tem como causa principal o pico de força ocasionado pelo prensa-chapas durante o experimento. Este pico ocorreu, pois a estampagem apresenta um aumento de espessura na região do flange da peça (ver Figura 5.4) e o prensa-chapas não se adaptou a este aumento devido às porcas A e B (ver Figura 3.7) limitarem o deslocamento do prensa-chapas para cima, no entanto na simulação houve esta adaptação, pois a força do prensa-chapas foi mantida constante. Também devido a este fato as peças ensaiadas apresentaram menor ganho de espessura na região do flange do que na simulação. Apesar desta limitação exercida pelo prensa-chapas os valores simulados ficaram bem próximos dos valores obtidos nos experimentos.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através da comparação dos resultados obtidos com o programa paramétrico elaborado, com resultados provenientes dos experimentos, foi possível validar a confiabilidade do programa apresentado, pois como foi mostrado os valores foram muito próximos.

Com a utilização do programa paramétrico ocorre uma diminuição drástica no tempo necessário para realizar modelagem da simulação. Torna também mais acessível a construção deste modelo, deixando de ser uma atividade trabalhosa e não necessitando, ao usuário, profundos conhecimentos do programa ANSYS, pois ele necessita apenas entrar com os dados no programa.

A maior força de estampagem foi atingida quando se utilizou o maior *blank* {109,5 [mm]}, isso devido a uma maior área de contato e consequentemente maior força no prensa-chapas. Nesta situação também observou-se a maior variação de espessura do copo estampado.

Analisando os resultados observa-se que quando diminui-se os raios da matriz e do punção acarreta um aumento na força necessária para realizar a estampagem, pois são condições de trabalho mais severas e também ocorre um aumento na área de contato do *blank*. No entanto a redução do raio da matriz ocasiona um aumento maior na força de estampagem quando comparado a diminuição no raio do punção, isso ocorre, pois quanto menor o raio maior será a área de contato entre a chapa e o prensa-chapas, e consequentemente maior será força exercida pelo mesmo.

As maiores reduções de espessura das peças estampadas ocorreram no fundo e no raio inferior do copo. O aumento de espessura foi mais sensível na região do flange do copo cilíndrico.

A utilização de um elemento isotrópico VISCO 107 não comprometeu os resultados fornecidos pelo programa, como pode ser observado nas comparações apresentadas no capítulo 5, pois o material possui uma anisotropia moderada.

Como proposta para trabalhos futuros é interessante realizar estudos para incrementar os dados inseridos no arquivo paramétrico, como: um banco de dados contendo uma biblioteca de materiais de *blank* e condições de lubrificação, originando assim a escolha automática do fator de atrito. Outra proposta é a parametrização de outras geometrias dos produtos acabados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRANTES, J. P.; BATALHA G. F. **Finite Element Method Numerical Simulation of Metal Sheet Forming by Hidraulic Pressure (Bulge Test)**. Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia, 2003.

AHMED M.; SINGH D. **An Adaptive Parametric Study on Mesh Refinement during Adaptive Finite Element Simulation of Sheet Forming Operations**. Turkish J. Eng. Env. Sci., 2008, 163 – 175.

ALVES FILHO, A. **Elementos finitos : a base da tecnologia CAE**. 2.ed. Recife: Editora Erica, 2003. 292p.

ANSELMO, F. A. **Desvendando o Caminho das Pedras**. 1997, 70p. Disponível em < <http://www.delphix.br2.net/Default.php>> Acesso em em 12 Jun. 2007.

ANSYS, **COMMAND MANUAL, ANSYS User's Manual**. ANSYS, Inc. 2003.

ANSYS. **Examples supplement for revision 5.0A**. Houston: Swanson Analysis Systems. Inc, 1993. cap.2, p.1 – 5.

ARAGÃO, R. R.; OLIVEIRA, S. A. G. **Análise da força máxima de embutimento de copos cilíndricos utilizando o método dos elementos finitos**. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, João Pessoa, 2002.

ASSIS, A. M.; LORENTE, G. F. **Rotas de estampagem de um disco de roda automotiva por simulação numérica**. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, João Pessoa, 2002.

BARROS, E.A.R. **Delphi para Universitários**. São Paulo: Editora e Gráfica Páginas & Letras, 1999.

BATHE, K. J. **Finite Element Procedures**. Prentice-Hall, 1996.

BOUBAKAR M. L.; BOLMANCE L.; GELIN J. C. **Finite element modeling of the stamping of anisotropic sheet metals**. 1996, 143-171.

BUTTON, S. T.; BORTOLUSSI, R. **Finite Element Analysis of Cups Deep Drawing Process**. RBCM, 1999, 355-363.

CANTÚ, M. **Dominando o Delphi 6: a Bíblia**. São Paulo: Makron Books, 2002. 934p.

CARRETEIRO, R.P.; MOURA, C. R. S. **Lubrificantes e lubrificação**. São Paulo : Makron Books, 1998. 493P.

CENTRO de Informação Metal Mecânica, Disponível em: <
http://www.cimm.com.br/portal/noticia/index_geral/?src=/material/conformacao>.
 Acesso em 5 Ago. 2008.

CHEN, F. K. **Three-dimensional finite element mesh generation from measured data of a stamping die.** Journal of Materials Processing Technology, 2003, 129-135.

CHEN, W. F.; ZHANG, H. **Strutural Problems, and CAE Software.** Springer Verlag New York Inc., New York, 1991, 248 pág.

CHEROAUT, A.; GIRAUD-MOREAU, L.; BOROUCHALI, H. **Adaptive Refinement procedure For Sheet metal Forming.** American Institute of Physics, 2007.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica Vol. II Processos de Fabricação e tratamento.** 2ª ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

COOK, R.; MALKUS, D.; PLESHA, M. E. **Concepts an Applications of Finite Element Analysis.** Wiley, 1989.

COSTA, A. R. **Análise do Processo de Estampagem de Caixas Utilizando Elementos Finitos.** 2003. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Projetos e Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2003.

COSTA, A. R., GUIDI, E. S.; SILVA, F. A. **Estudo da força máxima de embutimento de caixas quadradas utilizando elementos finitos.** Congresso Corte & Conformação, São Paulo, 2007.

DAMOULIS, C. L.; BATALHA, G. F. **Development of IndustrialSheet MetalForming Process Using Computer Simulation as an Integrated Tool in the Car Body Development.** Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia, 2003.

DEJARDIN, S.; THIBAUD, S.; GELIN, J.C. **Experimental and Numerical Investigations in Single Point Incremental Sheet Forming.** Materials Processing and Design: Modeling, Simulation and Applications, American Institute of Physics, 2007.

DEMIRCI, H. IBRAHIM et al. **The theoretical and experimental investigation of blank holder forces plate effect in deep drawing process of AL 1050 material.** Materials and Design, 2008, 526 – 532.

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica.** 2ª edição, McGraw-Hill Inc., Rio de Janeiro, 1981, 653 pág.

EVANGELISTA, S. H.; LIRANI, J. **Estudo de casos de estampagem de chapas metálicas através do método dos elementos finitos e diagramas de limite de conformação**. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, João Pessoa, 2002.

FILHO, R. A. C. **Avaliação das deformações das chapas finas e curvas de limite de escoamento para diferentes geometrias de punções**. 2004. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Setor de Tecnologia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

FIRAT, M. **Computer aided analysis and design of sheet metal forming processes: Part I – The finite element modeling concepts**. Materials and Design, 2007, 1298 – 1303.

GOMES, G. B. **Apostila de Delphi 7.0**. cap.10, p.1-7 Disponível em <https://www.redes.unb.br/daniel/Disciplinas/Uneb/LPI/Aula/Ap_Delphi7_04.pdf>. Acesso em 05 Set. 2007.

HELMAN, H.; CETLIN, P. R. **Fundamentos da Conformação Mecânica de Metais**. Artliber Editora, São Paulo, 2005, 260 pág.

HOFFNANN, H.; MEINHARDT, J.; VON SCHWERIN, M. L.; HEINLE, I. **Cadeia virtual integra engenharia de processos, simulação e projeto do ferramental**. Corte & Conformação dos Metais, n.40, 30 – 37. 2008.

KOBAYASHI, S.; OH, S. I.; ALTAN, T. **Metal forming and the finite-element method**. New York : Oxford University Press, 1989. 377p.

LAJARIN, S. F.; LOURENÇO, H. J.; MARCONDES, P. V. P. **Estudo compara o desempenho de lubrificante líquidos e sólidos na conformação de chapas**. Corte & Conformação dos Metais, n.38, 70 – 79, jun. 2008.

LEDOUX, Y.; SERGENT, A.; ARRIEUX, R. **Impact Of The Material Variability On The Stamping Process: Numerical And Analytical Analysis**. Materials Processing and Design: Modeling, Simulation and Applications, American Institute of Physics, 2007.

MALEKANI, J. et al. **Numerical and Experimental Investigation on Die and Blank Holder Shape in deep Drawing Process**. Journal of Applied Sciences, Asian Network for Scientific Information, 2008, 2153 – 2157.

MANUAL DO USUÁRIO DO DELPHI 7.0. Microsoft.

MOAVENI, S. **Finite element analysis : theory and application with ANSYS**. Upper Saddle River : Prentice-Hall, 1999.

MOREIRA, L. P.; FERRON G. **Análise Numérica do processo de estampagem profunda**. Congresso Corte & Conformação, São Paulo, 2007.

MORENO, M. E. **Development of a methodology to obtain the ideal blank shape in deepe drawing process using finite element analysis.** Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, João Pessoa, 2002.

OWEN, D. R. J.; HINTON, E. **Finite Elements in plasticity: theory and practice.** Swansea. Pineridge Press, 1986.

PALMEIRA, A. A.; HABIBE, A. F.; JACOME, P. A. D. **Técnicas de Modelagem de Conformação de Chapas por Elementos Finitos.** Cadernos UniFOA, Volta Redonda, n. 1, jul. 2006.

PARSA, M. H.; POURNIA, P. **Optimization of initial blank shape predicted based on inverse finite element method** *Finite Elements in Analysis and Design.* 2007, 218 – 233.

SAANOUNI, K.; BADREDDINE, H. **Damage Prediction in Sheet Metal Forming.** Materials Processing and Design: Modeling, Simulation and Applications, American Institute of Physics, 2007.

SANTOS, R. A. **Avaliação de estampabilidade do aço DC05 (DIN 10152) e validação das deformações verdadeiras obtidas via simulação.** 2007. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Setor de Tecnologia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica.** Imprensa Livre, Porto Alegre, 2004. 167p.

SCHULER **Metal Forming Handbook.** Springer, New York, 1998. 563p.

SHENG, Z.Q.; JIRATHEARANAT, S.; ATLAN, T. **Adaptive FEM simulation for prediction of variable blank holder force in conical cup drawing.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 487–494.

SILVA, C. S. **Análise da simulação numérica do ensaio de Nakazima via método dos elementos finitos.** 2005. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Setor de Tecnologia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

SILVA, G. C.; CARVALHO, G. D. C.; JUNIOR, J. L. **Método avalia a influencia do coeficiente de atrito na estampagem.** Corte & Conformação dos Metais, 78 – 90, out. 2008..

SILVA, H. C. **Análise da Simulação Numérica do Ensaio de Nakazima via Método dos Elementos Finitos.** 2005.

TEKKAYA, A. E. **State-of-art of Simulation of Sheet Metal Forming.** Journal of Materials Processing Technology, 2000, 14 – 22.

TZOU, GOW-YI et al. **Study on the Hemisphere Deep Drawing Process of Metal Sheet Based on the FEM Simulation.** Materials Processing and Design: Modeling, Simulation and Applications, American Institute of Physics, 2007.

YOSHIHARA, SHOICHIRO et al. **Optimisation of magnesium alloy stamping with local heating and cooling using the finite element method.** Journal of Materials Processing Technology, 2004, 319 – 322.

ZHANG, J. **Optimization of contact forces in tailor-welded blanks forming process.** Int J Adv Manuf Technol, 2007, 460 – 468.

ZIENKIEWICZ, O. C. **The Finite Element Method in Engineering Science.** McGraw-Hill, 1977. 787p.

APÊNDICE A

APLICANDO A TEORIA DA PLASTICIDADE – RELAÇÕES NÃO-LINEARES (ANSYS® 7.0)

A plasticidade é caracterizada por 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, independentem do tempo.

A teoria da plasticidade provê as relações matemáticas que caracterizam a resposta elasto-plástica dos materiais. Estas relações são regidas por 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. As deformações podem ser definidas pela Equação A.1:

$$\{\mathcal{E}^{el}\} = \{\mathcal{E}\} - \{\mathcal{E}^{th}\} - \{\mathcal{E}^{pl}\} - \{\mathcal{E}^{cr}\} - \{\mathcal{E}^{sw}\} \quad (\text{A.1})$$

Onde:

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

$\{\mathcal{E}\}$ = vetor de deformação total;

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

$\{\mathcal{E}^{pl}\}$ = vetor de deformação plástica;

$\{\mathcal{E}^{cr}\}$ = vetor de deformação *creep*;

$\{\mathcal{E}^{sw}\}$ = vetor de deformação inchamento (*Sweling*).

A.1. CRITÉRIO DE ESCOAMENTO

O critério de escoamento determina o nível de tensões no qual o material inicia o escoamento. Para tensões que possuem mais de uma componente, é representada como uma função dos componentes individuais, $f(\{\sigma\})$, que pode ser interpretada como uma tensão equivalente σ_e mostrada na Equação A.2:

$$\sigma_e = f(\{\sigma\}) \quad (\text{A.2})$$

onde: $\{\sigma\}$ é o vetor tensão.

Quando a tensão equivalente é igual ao parâmetro de escoamento σ_y , o material desenvolve deformações plásticas, Equação A.3.

$$f(\{\sigma\}) = \sigma_y \quad (\text{A.3})$$

Quando σ_e é menor do que σ_y , o material é elástico e as tensões irão desenvolver-se de acordo com as relações tensão versus deformação.

A Equação A.3 pode ser representada no espaço de tensões como mostra a Figura A.1 para alguns casos de deformação plástica. As superfícies são conhecidas como superfícies de escoamento e todo estado de tensão no interior da superfície é elástico, isto é, não causam deformações plásticas.

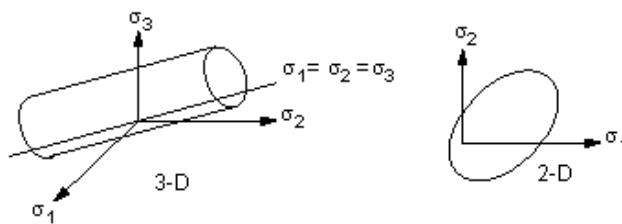


Figura A.1 – Superfície de escoamento anisotrópica.

A.2. REGRA DO FLUXO

A regra de fluxo determina a direção das deformações plásticas e é mostrada na Equação A.4.

$$\{d\epsilon^{pl}\} = \lambda \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \quad (\text{A.4})$$

Onde:

λ = 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. Neste caso a regra de fluxo é denominada associada e as deformações plásticas ocorrem na direção normal a superfície de escoamento.

A.3. 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 A.3, sendo assim o incremento de deformação plástica é calculado.

O estado da regra de encruamento e o critério de escoamento mudam de acordo com o encruamento isotrópico e ou com o encruamento cinemático. Incorporando estas dependências a Equação A.3, essa pode ser reescrita na Equação A.5.

$$F(\{\sigma\}, \kappa, \{\alpha\}) = 0 \quad (A.5)$$

Onde : κ = trabalho plástico;

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

Os termos κ e $\{\alpha\}$ são os termos internos ou variáveis de estado. Especificamente, o trabalho plástico é a soma do trabalho plástico realizado com o histórico de carregamento, Equação A.6.

$$\kappa = \int \{\sigma\}^T [M] \{d\varepsilon^{pl}\} \quad (A.6)$$

Onde:

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

A translação da superfície de escoamento também é dependente do histórico de carregamento e é mostrada na Equação A.7:

$$\{\alpha\} = \int C \{d\varepsilon^{pl}\} \quad (A.7)$$

Onde : C = parâmetro do material;

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

A Equação A.5 pode ser diferenciada para uma condição de consistência, como mostrado na Equação A.8:

$$dF = \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T [M] \{d\sigma\} + \frac{\partial F}{\partial \sigma} d\kappa + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \alpha} \right\}^T [M] \{d\alpha\} = 0 \quad (\text{A.8})$$

Diferenciando as Equações A.6 e A.7 temos a Equação A.9 e A.10 respectivamente.

$$d\kappa = \{\sigma\}^T [M] \{d\epsilon^{pl}\} \quad (\text{A.9})$$

$$\{d\alpha\} = C \{d\epsilon^{pl}\} \quad (\text{A.10})$$

Substituindo as Equações A.9 e A.10 na Equação A.8 temos a Equação A.11.

$$dF = \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T [M] \{d\sigma\} + \frac{\partial F}{\partial \sigma} \{\sigma\}^T [M] \{d\epsilon^{pl}\} + C \left\{ \frac{\partial F}{\partial \alpha} \right\}^T [M] \{d\epsilon^{pl}\} = 0 \quad (\text{A.11})$$

O incremento de tensão pode ser calculado via relações tensão versus deformação expresso na Equação A.12.

$$\{d\sigma\} = [D] \{d\epsilon^{el}\} \quad (\text{A.12})$$

Onde: $[D]$ = matriz tensão versus deformação, com:

$$\{d\epsilon^{el}\} = \{d\epsilon\} - \{d\epsilon^{pl}\} \quad (\text{A.13})$$

O incremento total de deformações pode ser dividido em duas partes: plástica e elástica. Substituindo a Equação A.3 nas Equações A.10 e A.13e combinando as Equações A.11, A12 e A.13 podemos isolar λ resultando na Equação A.14:

$$\lambda = \frac{\left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T [M] [D] \{d\epsilon\}}{-\left\{ \frac{\partial F}{\partial \kappa} \right\} \{\sigma\}^T [M] \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} - C \left\{ \frac{\partial F}{\partial \alpha} \right\}^T [M] \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T [M] [D] \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\}} \quad (\text{A.14})$$

O incremento plástico é então calculado utilizando a Equação A.4.

A.4. IMPLEMENTAÇÃO

Um esquema de retorno de Euler é usado para forçar a condição de consistência apresentado na Equação A.3. Isto assegura que as tensões atualizadas, deformações e variáveis internas agirão sobre a superfície de escoamento. O algoritmo procede como:

1. O parâmetro de material σ_y apresentado na Equação A.3 é determinado para este passo de tempo considerado;
2. As tensões são computadas baseadas na deformação de ensaio $\{\epsilon^t\}$ (Equação A.15), a qual é obtida subtraindo a deformação plástica do ponto no tempo anterior da deformação total;

$$\{\epsilon_n^{tr}\} = \{\epsilon_n\} - \{\epsilon_{n-1}^{pl}\} \quad (A.15)$$

Onde: Todos os termos referem-se ao mesmo ponto temporal. A deformação de ensaio é calculada conforme a Equação A.16.

$$\{\sigma^{tr}\} = [D]\{\epsilon^{tr}\} \quad (A.16)$$

3. A tensão equivalente σ_e é avaliada a este nível de tensões pela Equação A.2. Se σ_e é menor que σ_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 λ é determinado por um procedimento de interação local de Newton-Rapson;
5. $\{\Delta\epsilon^{pl}\}$ é calculado utilizando a Equação A.4;
6. A deformação plástica corrente é atualizada:

$$\{\epsilon_n^{pl}\} = \{\epsilon_{n-1}^{pl}\} + \{\Delta\epsilon^{pl}\} \quad (A.17)$$

Onde: $\{\epsilon_n^{pl}\}$ = Deformações plásticas correntes.

A deformação elástica é computada conforme a Equação A.18.

$$\{\epsilon^{el}\} = \{\epsilon^{tr}\} - \{\Delta\epsilon^{pl}\} \quad (A.18)$$

Onde: $\{\varepsilon^{el}\}$ = Deformações elásticas.

O vetor de tensão é calculado utilizando a Equação A.19:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^{el}\} \quad (A.19)$$

Onde: $\{\sigma\}$ = Tensão.

7. Os incrementos do trabalho plástico $\Delta\kappa$ e o centro da superfície de escoamento $\{\Delta\alpha\}$ são computados via a Equação A.11 e A.12 e os valores correntes são atualizados, resultando nas Equações A.20 e A.21.

$$\kappa_n = \kappa_{n-1} + \Delta\kappa \quad (A.20)$$

$$\{\alpha_n\} = \{\alpha_{n-1}\} + \{\Delta\alpha\} \quad (A.21)$$

Onde: O subscrito n-1 se refere ao valor do ponto no tempo anterior.

8. Como resultados são calculados a deformação plástica equivalente ε^{pl} , o incremento de deformação plástica $\Delta\varepsilon^{pl}$, o parâmetro equivalente de tensões σ_e e a taxa de tensões N são calculados. A taxa de tensões é mostrada na Equação A.22:

$$\{\alpha_n\} = \{\alpha_{n-1}\} + \{\Delta\alpha\} \quad (A.22)$$

Onde: σ_e é avaliado usando a tensão de ensaio $\{\sigma^{tr}\}$. N é, entretanto maior ou igual a

1 quando o escoamento esta ocorrendo e é menor que 1 quando o estado de tensões é elástico. O incremento plástico equivalente é dado pela Equação A.23:

$$\Delta\varepsilon^{pl} = \left(\frac{2}{3} \{\Delta\varepsilon^{pl}\}^T [M] \{\Delta\varepsilon^{pl}\} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (A.23)$$

A.5. REGRA DO ENCRUAMENTO ISOTRÓPICO – MISO

O modelo de plasticidade isotrópica MISO usa o critério de escoamento de von Mises associado com a regra de fluxo e com o encruamento isotrópico.

A tensão equivalente é calculada utilizando a Equação A.24.

$$\sigma_e = \left[\frac{3}{2} \{s\}^T [M] \{s\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.24})$$

Onde: $\{s\}$ = Tensão de desvio, calculada pela Equação A.25:

$$\{s\} = \{\sigma\} - \sigma_m [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (\text{A.25})$$

Onde: σ_m = Tensão hidrostática, calculada pela Equação A.26:

$$\sigma_m = \frac{1}{3} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (\text{A.26})$$

Quando σ_e é igual a tensão de escoamento corrente σ_k assume-se que o material está escoando. Neste caso o critério de escoamento é descrito pela Equação A.27.

$$F = \left[\frac{3}{2} \{s\}^T [M] \{s\} \right]^{\frac{1}{2}} - \sigma_k = 0 \quad (\text{A.27})$$

Para o encruamento, σ_k é uma função da quantidade do trabalho plástico realizado. Para o caso plasticidade isotrópica, σ_k pode ser determinado diretamente da deformação plástica equivalente ϵ^{pl} da Equação A.28.

$$\epsilon^{pl} = \frac{2}{3} \frac{E \cdot E_T}{E - E_T} \quad (\text{A.28})$$

Onde: E = Módulo de *Young*;

E_T = Módulo da tangente do diagrama uniaxial de tensão versus deformação para encruamento isotrópico.

A Figura A.2 apresenta um diagrama uniaxial de tensão-deformação para encruamento isotrópico.

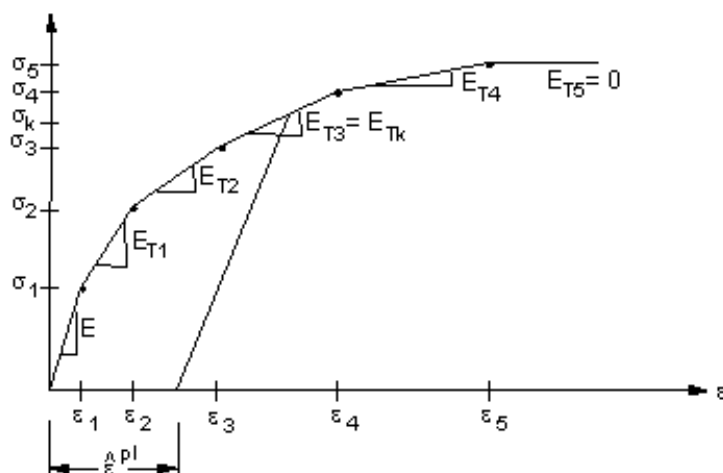


Figura A.2 – Diagrama uniaxial de tensão-deformação para encruamento isotrópico.

A.6. Procedimento de Newton-Rapson

O processo de discretização por elementos finitos do escoamento necessita de um conjunto de Equações:

$$[K]\{u\} = \{F^a\} \quad (A.29)$$

Onde: $[K]$ = Matriz de coeficientes;

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

$\{F^a\}$ = Vetor dos carregamentos aplicados.

Se a matriz de coeficientes $[K]$ é uma função dos valores graus de liberdades desconhecidos (ou de suas derivadas) então a Equação A.29 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 conforme as Equações A.30 e A.31 (Bathe, 1982):

$$[K_i^T]\{\Delta u_i\} = \{F^a\} - \{F_i^{nr}\} \quad (\text{A.30})$$

$$\{u_{i+1}\} = \{u_i\} + \{\Delta u_i\} \quad (\text{A.31})$$

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

i = Subscrito que representa a interação do equilíbrio corrente;

$\{F_i^{nr}\}$ = Vetor de retorno do carregamento correspondente ao elemento de carregamentos interno.

Ambos $[K_i^T]$ e $\{F_i^{nr}\}$ são avaliados com base nos valores dados por $\{u_i\}$. O lado direito da Equação 2.34 é o resíduo ou o desbalanceamento do vetor de carregamento, por exemplo, uma parte do sistema que está desequilibrada. Uma solução de uma iteração simples é apresentada graficamente na Figura A.3, para um modelo com 1 grau de liberdade. Em análise estrutural, $[K_i^T]$ é a matriz tangente de rigidez, $\{u_i\}$ é o vetor de deslocamento e $\{F_i^{nr}\}$ é o vetor de restauração das forças calculadas das tensões dos elementos.

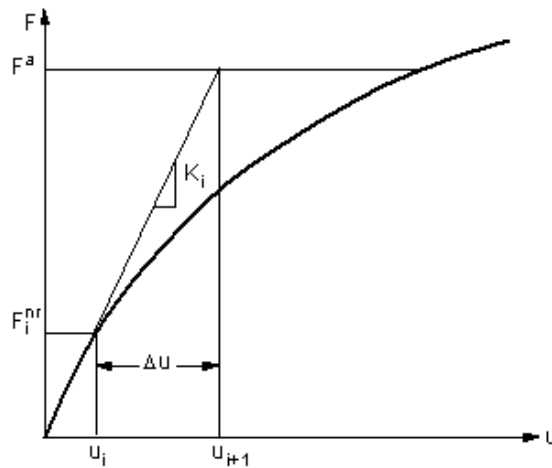


Figura A.3 – Solução de Newton-Rapson para uma iteração simples.

Para a obtenção da convergência da solução é necessário mais que uma iteração de Newton-Rapson. O algoritmo geral procede da seguinte maneira:

1. Assume um valor de $\{u_0\}$. $\{u_0\}$ é normalmente a solução de convergência do passo de tempo anterior. No primeiro passo $\{u_0\} = 0$.

2. Calcula a atualização da matriz tangente $[K_i^T]$ e o restabelecimento do carregamento $\{F_i^{nr}\}$ da configuração $\{u_i\}$.
3. Calcula $\{\Delta u_i\}$ da Equação A.30
4. Adiciona $\{\Delta u_i\}$ em $\{u_i\}$ para obter a próxima aproximação $\{u_{i+1}\}$ conforme Equação A.31.
5. Repete os passos de 2 a 4 até que a convergência seja obtida.

A Figura A.4 apresenta a solução da próxima interação (i+1) do exemplo mostrado na Figura A.3. As interações subsequentes serão processadas de maneira similar.

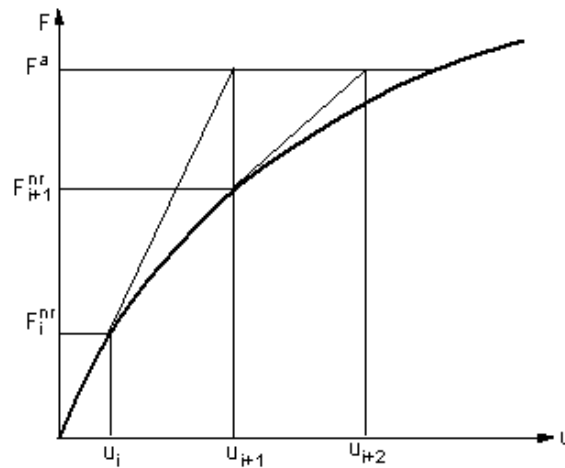


Figura A.4 – Solução de Newton-Rapson para a próxima interação.

A solução obtida ao final do processo de interação corresponderá ao nível de carregamento $\{F^a\}$. A solução final convergida estará em equilíbrio, como o vetor de retorno do carregamento $\{F_i^{nr}\}$. Nenhuma das soluções intermediárias estará em equilíbrio.

Se a análise inclui o caminho de dependência não-linear (como a plasticidade), então o processo de solução requer que alguns passos intermediários em equilíbrio para seguir corretamente o caminho do carregamento. Isto é efetivamente realizado especificando uma análise incremental passo por passo, por exemplo, o vetor final de carregamento $\{F^a\}$ é encontrado pela aplicação de cargas por meio de incrementos e realizando interações de Newton-Rapson a cada passo, conforme Equação A.32:

$$[K_{n,i}^T]\{\Delta u_i\} = \{F_n^a\} - \{F_{n,i}^{nr}\} \quad (\text{A.32})$$

Onde : $[K_{n,i}^T]$ = Matriz tangente para o passo de tempo n na interação i ;

$\{F_n^a\}$ = Vetor do carregamento total aplicado no passo de tempo n ;

$\{F_{n,i}^{nr}\}$ = Vetor de retorno do carregamento para o passo tempo n na interação i .

O processo descrito é o procedimento incremental de Newton-Rapson e é apresentado na Figura A.5. 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, a aproximação incremental é algumas vezes utilizada para obter uma solução que corresponde ao nível final de carregamento.

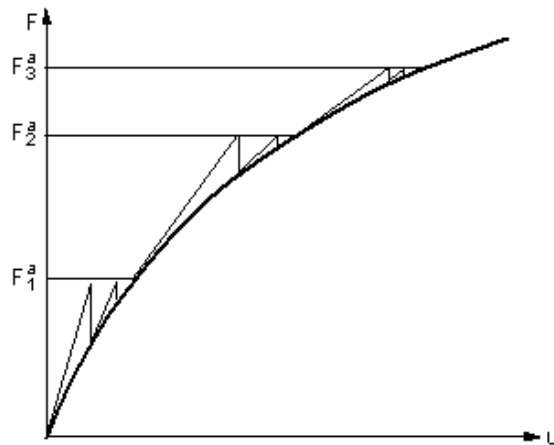


Figura A.5 – Procedimento incremental de Newton-Rapson.

O processo de atualização da matriz de rigidez a cada interação é denominado “Procedimento de solução de Newton-Rapson completo”. Alternativamente a matriz de rigidez pode ser atualizada com menos frequência 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 sub-passo, respectivamente. O uso do procedimento de rigidez inicial previne algumas atualizações da matriz de rigidez. O procedimento de rigidez inicial modificado de Newton-Rapson converge mais lentamente do que o procedimento de Newton-Rapson completo, mas ele requer poucas reformulações e inversões da matriz.

A.7. CONVERGÊNCIA

O processo de interação apresentado no item A.1.6 continua até que a convergência seja atingida.

O processo converge quando o equilíbrio de saída converge (Equação A.33) e/ou os elementos dos graus de liberdade convergem (Equação A.34).

$$\|\{R\}\| < \varepsilon_R R_{ref} \quad (A.33)$$

$$\|\{\Delta U_i\}\| < \varepsilon_R U_{ref} \quad (A.34)$$

Onde: $\{R\}$ é o vetor residual e é expresso pela Equação A.35

$$\{R\} = \{F^a\} - \{F^{nr}\} \quad (A.35)$$

O lado direito da Equação de Newton-Rapson $\{\Delta ui\}$ (A.30) é o vetor dos incrementos dos graus de liberdades, ε_R e ε_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 (desequilíbrio) é menor que a tolerância de um valor de referência naquele tempo e/ou quando o tamanho do incremento dos graus de liberdade é menor que a tolerância de um valor de referência naquele tempo. O normal é utilizar a convergência do equilíbrio de saída apenas para verificação. O valor da tolerância normal é 0,001 (para ε_R e ε_u).

Existem 3 normas: norma infinita, norma L1 e norma L2, apresentadas nas Equações A.36, A.37 e A.38.

$$\|\{R\}\|_{\infty} = \max |R_i| \quad (A.36)$$

$$\|\{R\}\|_1 = \sum |R_i| \quad (A.37)$$

$$\|\{R\}\|_2 = \left(\sum R_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (A.38)$$

A norma infinita é simplesmente o valor máximo do vetor (residual máximo ou máximo incremento dos graus de liberdade), a norma L1 é o somatório dos valores absolutos dos termos e a norma L2 é a raiz quadrada da soma dos quadrados (SRSS) dos termos, também chamada norma Euclidiana. A norma padrão é a L2, sendo esta norma adotada neste trabalho.

A.8. CONTATO

Em problemas envolvendo contato entre dois corpos, a superfície de um deles é convencionalmente chamado de superfície alvo e a superfície do outro corpo chamada de superfície de contato. Para contato rígido-flexível, a superfície alvo é sempre a superfície rígida e a superfície de contato é a superfície que será deformada.

O contato superfície-superfície no ANSYS é realizado normalmente através dos pontos de integração de Gauss, os quais geralmente fornecem resultados mais precisos que o esquema de detecção nodal, o qual usa seus próprios nós como pontos de integração. A Figura A.6 apresenta o método de detecção através dos pontos de integração de Gauss.

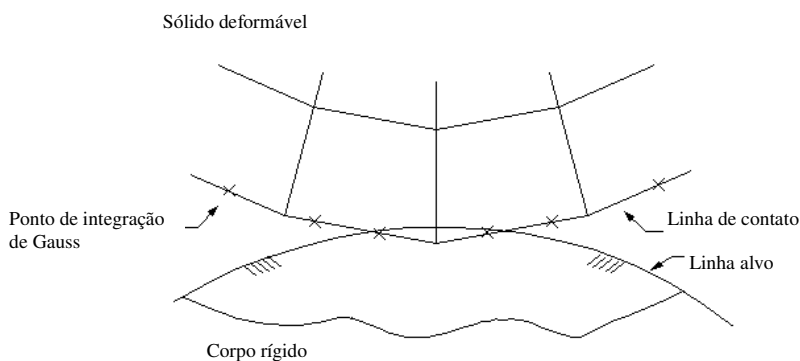
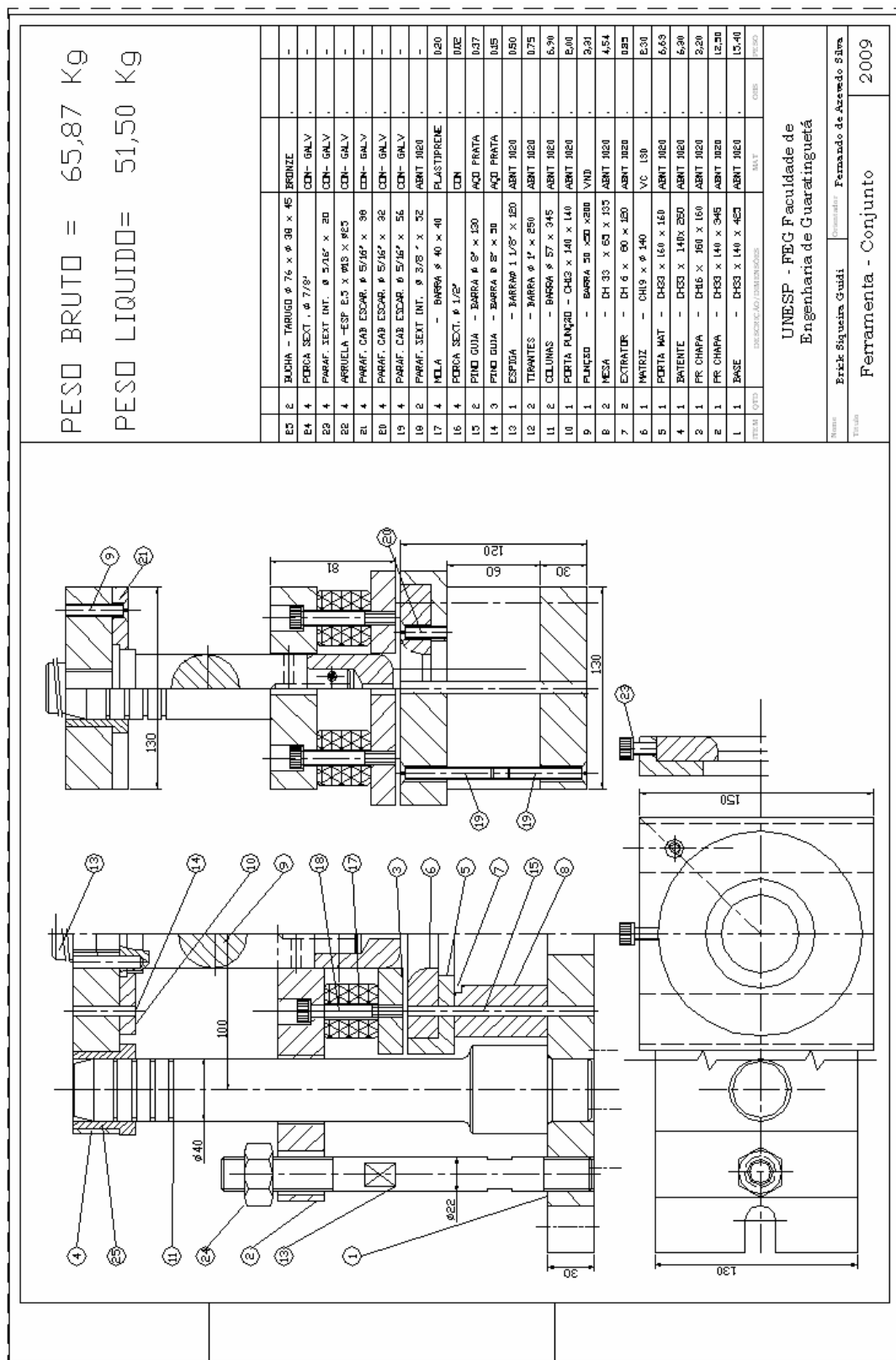


Figura A.6 – Método de detecção através dos pontos de integração de Gauss.

APÊNDICE B. DESENHO DA FERRAMENTA



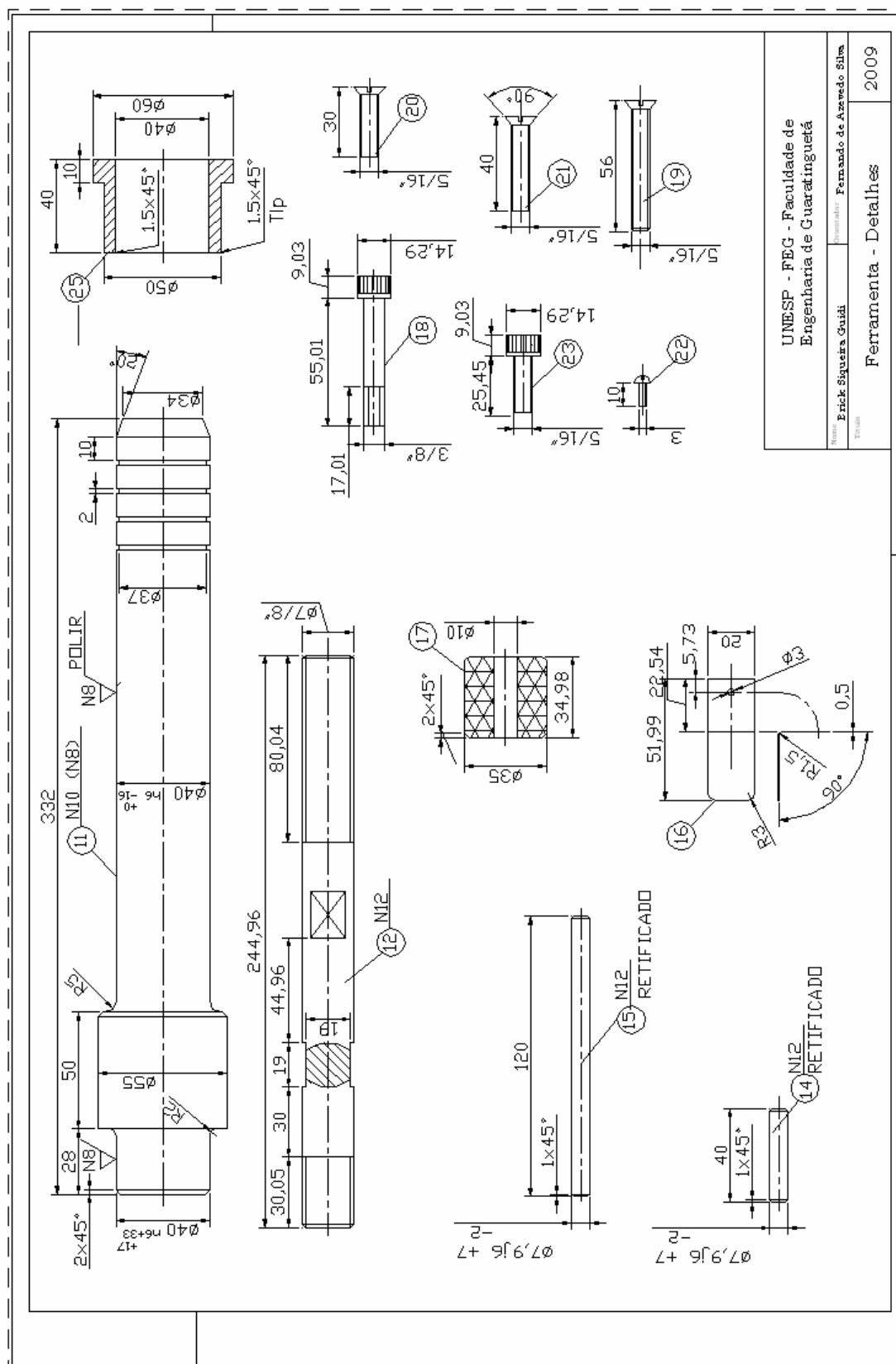
UNESP - FEG Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

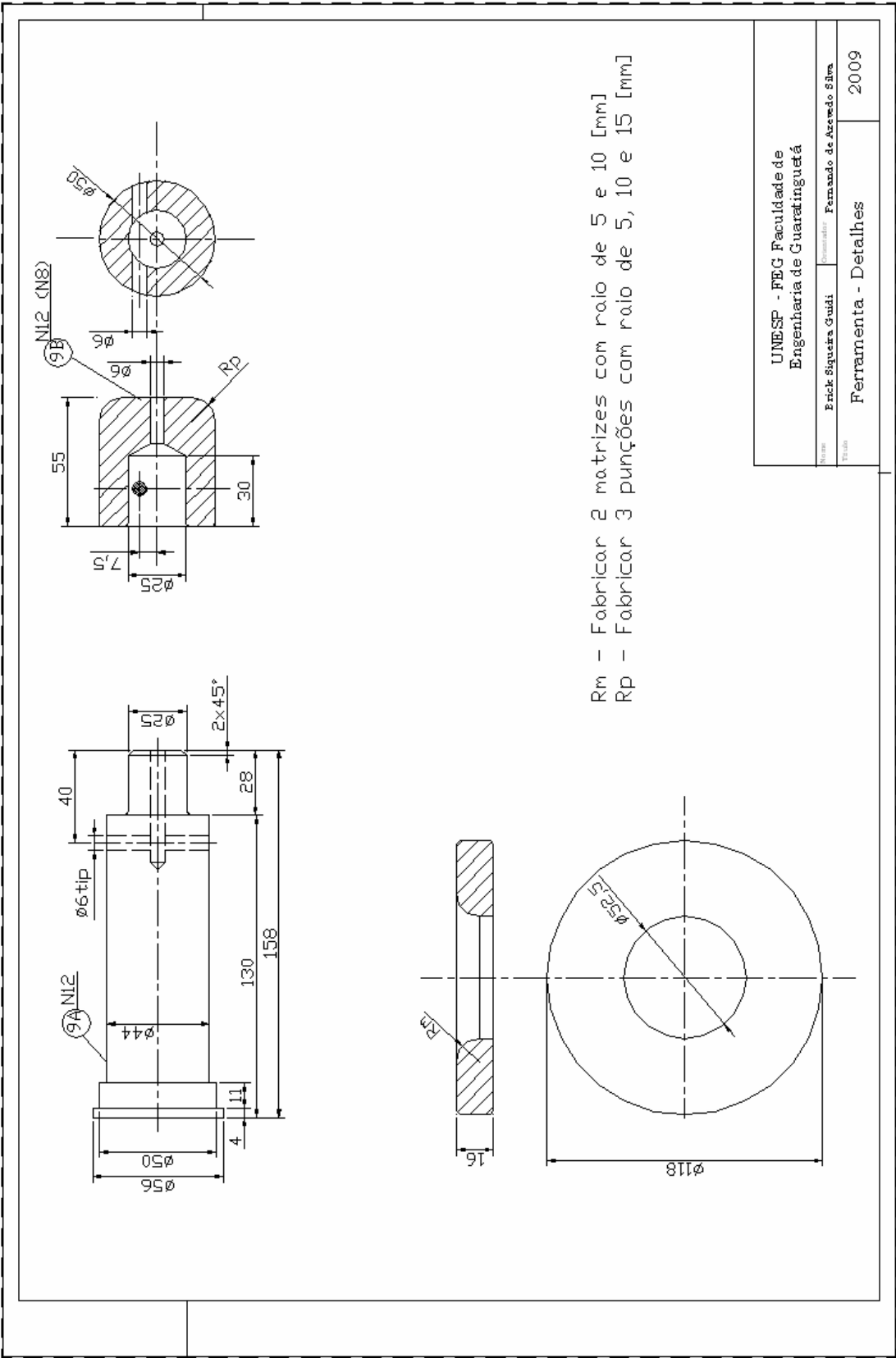
Nome: Erick Siqueira Guadalupe

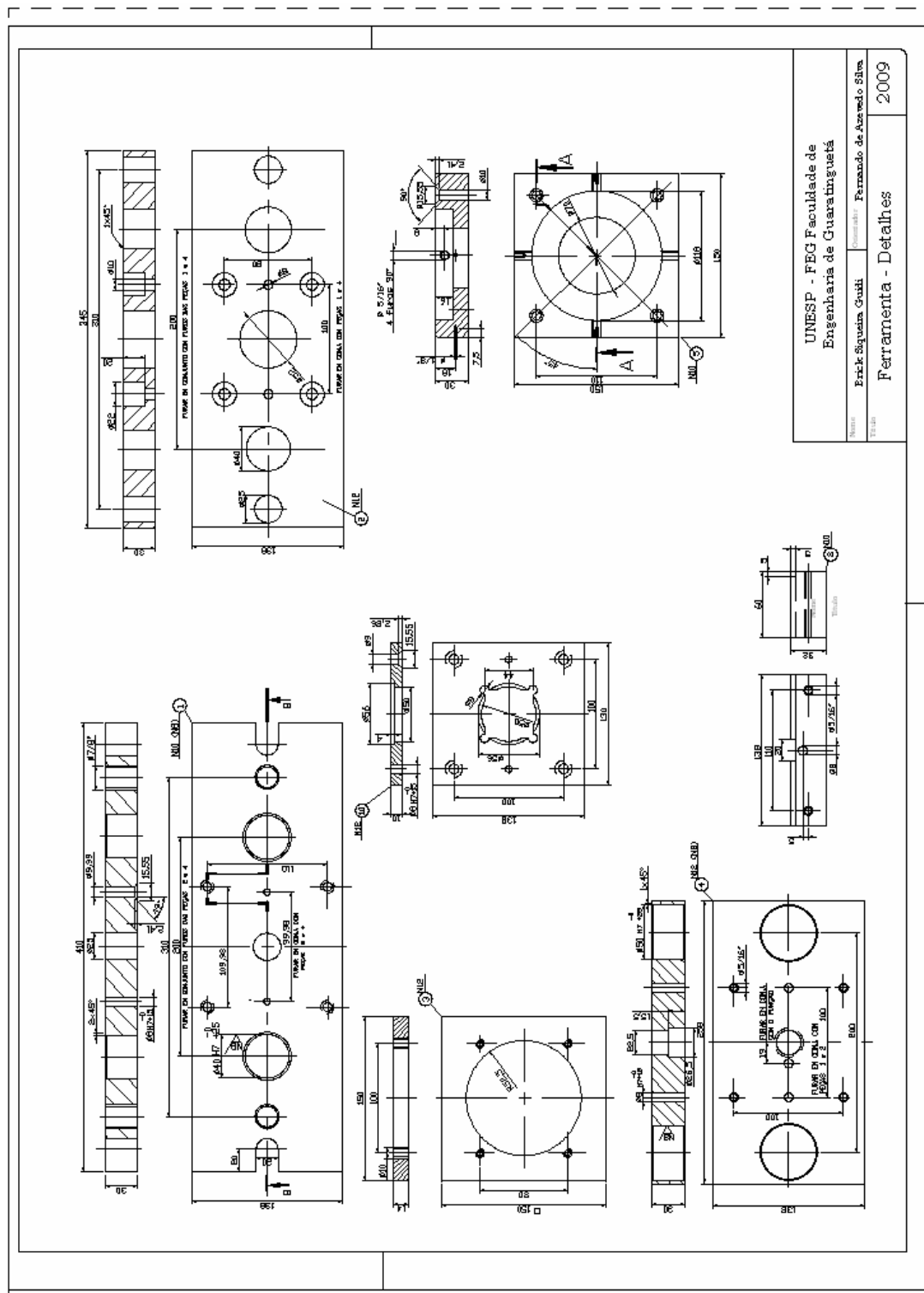
Disciplina: Ferramenta de Aço

2009

Ferramenta - Conjunto







APÊNDICE C

ARQUIVO PARAMÉTRICO FONTE

C.1. ARQUIVO PARAMÉTRICO DE 1ª ETAPA

```
/PREP7
/TITLE,ESTAMPAGEM PROFUNDA
/COM,Structural
/units,si
/UIS,MSGPOP,3
/NERR,5,1000

/COM, DECLARAÇÃO DOS VALORES DOS PARÂMETROS NO PLANO
*set,A,100.00
*set,B,50.000
*set,C,52.500
*set,D,120.000
*set,E,10.00
*set,F,10.00
*set,G,55.000
*set,H,16.000
*set,I,15.000
*set,J,120.000
*set,L,0.650
*set,M,30.000
*set,N,540.00
*set,O,00.0

/COM,GERAÇÃO DA GEOMETRIA DA MATRIZ NO PLANO
K,,c/2,0
K,,D/2,0
K,,c/2,H
K,,D/2,H
L,1,2
L,2,4
L,4,3
L,3,1
LPLOT
LFILLT,3,4,E
LESIZE,5,,,8
LESIZE,3,,,14,0.5
LESIZE,4,,,18,2
LESIZE,1,,,18
LESIZE,2,,,22
AL,4,1,2,3,5

/COM,GERAÇÃO DA GEOMETRIA DA CHAPA NO PLANO
K,,0,H
K,,A/2,H
```

```

KGEN,2,7,8,1,,L
L,7,8
L,8,10
L,10,9
L,9,7
LESIZE,6,,,40
LESIZE,8,,,40
LESIZE,7,,,1
LESIZE,9,,,1
AL,8,9,6,7
APLOT

```

```

/COM,GERAÇÃO DA GEOMETRIA DO PRENSA CHAPA NO PLANO
K,,B/2+E,H+L
K,,J/2,H+L
KGEN,2,11,12,1,,I
L,11,12
L,12,14
L,14,13
L,13,11
LPLOT
LESIZE,10,,,10
LESIZE,13,,,8,0.3
LESIZE,11,,,8,3.3333
LESIZE,12,,,6
AL,10,11,12,13
APLOT

```

```

/COM,GERAÇÃO DA GEOMETRIA DO PUNCAO NO PLANO
K,,0,H+L+1
K,,B/2,H+L+1
K,,0,H+L+G+1
K,,B/2,H+L+G+1
L,15,16
L,16,18
L,18,17
L,17,15
LFILLT,14,15,F
LESIZE,18,,,9
LESIZE,14,,,8
LESIZE,15,,,19
LESIZE,17,,,24
LESIZE,16,,,8
AL,16,17,14,18,15
!*

```

```

/COM,GERAÇÃO DO EFEITO EM 3-D
FLST,2,4,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-4

```

```

FLST,8,2,3
FITEM,8,15
FITEM,8,17
VROTAT,P51X, , , , ,P51X, ,45, ,
!*
vsel,s,volu,,1,1
cm,matriz,volu

vsel,s,volu,,2,2
cm,Chapa,volu

vsel,s,volu,,3,3
cm,PRENSCHP,volu

vsel,s,volu,,4,4
CM,puncao,VOLU

ALLSEL,ALL
/REPLOT

!*
k,,0,0,0
k,,0,L+H+I,0
!*

/COM,GERAÇÃO DA MALHA DA CHAPA
!*
mat,1
ET,1,107
KEYOPT,1,5,2
KEYOPT,1,6,1
KEYOPT,1,7,1
ESYS,0
VSEL,S,,,2
VMESH,chapa
NSEL,ALL
CM,CHAPAN,NODE
!*

/COM,PROPRIEDADES DO MATERIAL
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 ENTRE A CHAPA E A 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,,,5
ASEL,A,,,8
ASEL,A,,,9
CM,_TARGET,AREA
TYPE,5
NSLA,S,1
ESLN,S,0
tshap,qua
AMESH,all
!*
tshap,pilo
ksel,s,,,35,35,1,0
kmesh,35
nodef=node (0,0,0)
!*
ASEL,S,,,8
NSLA,S,1
ESLN,S,1
ESURF,,REVERSE
!*
ASEL,S,,,12
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 ENTRE A CHAPA E O PUNÇÃO
/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,,,21
ASEL,A,,,22
ASEL,A,,,23
CM,_TARGET,AREA
TYPE,7
NSLA,S,1
ESLN,S,0
tshap,qua
AMESH,all
!*
tshap,pilo
ksel,s,,,17,17,1,0
kmesh,17
nodef1=node (0,H+L+G+1,0)
!NSLK,S,17
!*
!*
!*
!*
ASEL,S,,,11
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 ENTRE A CHAPA E O PRENSA-CHAPAS
/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,,,15
CM,_TARGET,AREA
TYPE,9
NSLA,S,1
ESLN,S,0
tshap,QUA
AMESH,all
!*
!*
tshap,pilo
ksel,s,,,36,36,1,0
kmesh,36
nodef2=node (0,L+H+I,0)
!*

!*
! Generate the contact surface
ASEL,S,,,11
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 ANVANÇO DO PUNÇÃO
*dim,Avanco,table,3,1
*set,Avanco(1,1),0,-1,-M
*set,Avanco(1,0),0,1,M
*set,Avanco(0,1),1
!*

/COM,CARREGAMENTO NO PRENSA-CHAPAS
*dim,Forca,table,3,1
*set,Forca(1,1),-N,-N,-N
*set,Forca(1,0),0,1,M
*set,Forca(0,1),1
!*

/COM,CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO
NLGEOM,ON
SSTIF,ON
AUTOTS,OFF
NEQIT,50
PRED,ON
DELTIME,0.05,0.005,0.05,ON
CNVTOL,F,,0.005,2,0.001
NCNV,2,0,0,0,0
!*
!*

/COM,VINCULAÇÃO DA MATRIZ EM UX,UY,UZ
Nsel,s,,,nodef,nodef,1,
D,nodef,,0,,,UX,UY,UZ,,,,
!*
!*

/COM,VINCULAÇÃO DO PUNÇÃO EM UX e UZ
Nsel,s,,,nodef1,nodef1,1,
D,nodef1,,0,,,UX,UZ,,,,,
!*
!*

/COM,VINCULAÇÃO DO PRENSA-CHAPAS EM UX e UY
nsl,s,,,nodef2,nodef2,1,0
D,nodef2,,0,,,UX,UZ,,,,,
!*
!*

```

/COM,VINCULAÇÃO DO CENTRO DA CHAPA

Nsel,s,,,1262,1262,1,

D,1262,,0,,,UX,UZ,,,

!*
.

Nsel,s,,,2,2,1,

D,2,,0,,,UX,UZ,,,

!*
.

ASEL,S,,,2,

NSLA,S,2,

nsl,U,,,1262,1262,1262,

nsl,U,,,2,2,1,

DA,2,SYMM

DTRAN

!*
.

ASEL,S,,,14,

NSLA,S,14,

nsl,U,,,1262,1262,1,

nsl,U,,,2,2,1,

DA,14,SYMM

DTRAN

!*
.

/COM,ELIMINANDO A ROTAÇÃO NOS ELEMENTOS

!*nsl,S,,,CHAPAN

!*D,all,,0,,,ROTX,ROTY,ROTZ,,,

!*
.

/COM,MONTOR DE UY DO PUNÇÃO

NSEL,S,,,nodef1

MONITOR,1,nodef1,UY

!*
.

/COM,MONTOR DE FY DO PUNÇÃO

NSEL,S,,,nodef1

MONITOR,2,nodef1,FY

!*
.

/COM,MONTOR DE UY DO PRENSA-CHAPAS

NSEL,S,,,nodef2

MONITOR,3,nodef2,FY

!*
.

!*
.

/COM,GERAÇÃO DO LOOP DE CARREGAMENTO

TIM_INI=0.05

TIM_FIN=1

TIM_INC=0.95

*DO,TIM,TIM_INI,TIM_FIN,TIM_INC

TIME,TIM

!*
.

```

Nsel,s,,,nodef1,nodef1,1,
D,nodef1,UY,avanco(TIM)
!*
Nsel,s,,,nodef2,nodef2,1,
F,nodef2,FY,forca(TIM)
!*
ALLSEL
!*
*ENDDO
!*
!*

```

C.2. ARQUIVO PARAMÉTRICO DE 2ª ETAPA

```

!*
/solu
!*
/COM,CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO
NLGEOM,ON
SSTIF,ON
AUTOTS,OFF
NEQIT,50
PRED,ON
DELTIME,0.05,0.005,0.05,ON
CNVTOL,F,,0.005,2,0.001
NCNV,2,0,0,0,0
!*
!*
/COM,VINCULAÇÃO DA MATRIZ EM UX,UY,UZ
Nsel,s,,,nodef,nodef,1,
D,nodef,,0,,,,UX,UY,UZ,,,,
!*
!*
/COM,VINCULAÇÃO DO PUNÇÃO EM UX e UZ
Nsel,s,,,nodef1,nodef1,1,
D,nodef1,,0,,,,UX,UZ,,,,
!*
!*
/COM,VINCULAÇÃO DO PRENSA-CHAPAS EM UX e UY
nset,s,,,nodef2,nodef2,1,0
D,nodef2,,0,,,,UX,UZ,,,,
!*
!*
/COM,VINCULAÇÃO DO CENTRO DA CHAPA
Nsel,s,,,1262,1262,1,
D,1262,,0,,,,UX,UZ,,,,
!*
Nsel,s,,,2,2,1,
D,2,,0,,,,UX,UZ,,,,
!*

```

```

ASEL,S,,,2,
NSLA,S,2,
nsl,U,,,1262,1262,1262,
nsl,U,,,2,2,1,
DA,2,SYMM
DTRAN
!*

```

```

ASEL,S,,,14,
NSLA,S,14,
nsl,U,,,1262,1262,1,
nsl,U,,,2,2,1,
DA,14,SYMM
DTRAN
!*

```

```

/COM,ELIMINANDO A ROTAÇÃO NOS ELEMENTOS
!*nsl,S,,,CHAPAN
!*D,all,0,,,ROTX,ROTY,ROTZ,,,
!*

```

```

/COM,MONTOR DE UY DO PUNÇÃO
NSEL,S,,,nodef1
MONITOR,1,nodef1,UY
!*

```

```

/COM,MONTOR DE FY DO PUNÇÃO
NSEL,S,,,nodef1
MONITOR,2,nodef1,FY
!*

```

```

/COM,MONTOR DE UY DO PRENSA-CHAPAS
NSEL,S,,,nodef2
MONITOR,3,nodef2,FY
!*
!*

```

```

/COM,GERAÇÃO DO LOOP DE CARREGAMENTO
TIM_INI=0.05
TIM_FIN=30
TIM_INC=29.95
*DO,TIM,TIM_INI,TIM_FIN,TIM_INC
TIME,TIM
!*
Nsel,s,,,nodef1,nodef1,1,
D,nodef1,UY,avanco(TIM)
!*
ALLSEL
!*
*ENDDO
!*

```