UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Simulação Numérica do Processo de Perfilação de Chapas para Minimizar o Enrugamento

Autor: Marcelo Cavaguti Orientador: Prof. Dr. Janito Vaqueiro Ferreira

07/05

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DEPARTAMENTO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL

Simulação Numérica do Processo de Perfilação de Chapas para Minimizar o Enrugamento

Autor: Marcelo Cavaguti Orientador: Prof. Dr. Janito Vaqueiro Ferreira

Curso: Engenharia Mecânica Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2005 S.P. – Brasil

WIND - water francesson
CHAMADA
EX
pageographic strategy and a second strategy
ABO BC/ 64093
x 16123-06
DK
VORDATIONAL AND
100 LM
noi lui
$A _{Y} A A$

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

C313s	Cavaguti, Marcelo Simulação numérica do processo de perfilação de chapas para minimizar o enrugamento / Marcelo CavagutiCampinas, SP: [s.n.], 2005.	
	Orientador: Janito Vaqueiro Ferreira Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.	61319
	 Simulação (Computadores). Deformação e tensões. Métodos dos elementos finitos. Ferreira, Janito Vaqueiro. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título. 	200

Titulo em Inglês: Numerical simulation of sheet roll forming process to minimize the corrugation Palavras-chave em Inglês: Roll forming, Simulation, Stress, Strain and stresses e Finite element analysis Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e projeto Mecânico Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica Banca examinadora: Renato Pavanello e José Divo Bressan

Data da defesa: 26/07/2005

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DEPARTAMENTO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

Simulação Numérica do Processo de Perfilação de Chapas para Minimizar o Enrugamento

Autor: Marcelo Cavaguti Orientador: Prof. Dr. Janito Vaqueiro Ferreira

Prof. Dr. Janito Vaqueiro Ferreira, Presidente Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Prof. Dr. Renato Pavanello Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Prof. Dr. José Divo Bressan Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Campinas, 26 de julho de 2005

Dedicatória:

A meus pais, Nariaqui e Maria, pelo apoio e incentivo desmedido de sempre as decisões por mim tomadas, e por serem eternas inspirações para que o destino de minha vida seja conduzido por uma trajetória acadêmica;

A meus irmãos Eduardo, Ana Paula e Ana Carolina e sobrinho Lucas, por não me possibilitarem definir uma concepção da palavra solidão ao longo de minha vida;

A meus padrinhos Boya (in memorian) e Mari, pelos preciosos tempos que abstiveram de suas vidas para educar a minha.

Agradecimentos

À Deus, sempre;

Ao Prof. Dr. Janito Vaqueiro Ferreira, pela paciência e humildade em aceitar mudanças e pela orientação profissional ao mesmo tempo que amigável;

Aos professores do Departamento de Mecânica Computacional, que me apoiaram e auxiliaram para que este trabalho fosse concluído;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa que me foi concedida;

À Empresa Duaço Esquadrias Metálicas Ltda. por ter fornecido o material analisado experimentalmente neste trabalho e também por permitir uma documentação fotográfica de sua linha de produção;

Ao Prof. Dr. Sérgio Tonini Button, pela indicação e liberação da licença do Software MSC SuperForm 2002, utilizado neste trabalho para realizar as simulações numéricas;

Aos meus tios e primos de São Paulo, pela atenção e carinho inestimáveis de sempre, tornando os caminhos de minha vida acadêmica menos tortuosos possíveis;

Ao meu primo Carum, pelo valioso empréstimo de sua câmera digital a qualquer momento

que fosse necessário, pois sem a qual, as fotos e os vídeos contidos neste trabalho não seriam apresentados;

À Maria Helena, secretária do DMC, pela atenção e bom humor de sempre;

Aos meus amigos do departamento, Cornelis, Marcos Pinho, Beli, Geraldo, Simone, Luiz e Ilson, pela amizade nos momentos das dúvidas e das festas.

Resumo

CAVAGUTI, Marcelo, Simulação Numérica do Processo de Perfilação de Chapas para Minimizar o Enrugamento, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2005. 181 p. Dissertação (Mestrado)

O processo de perfilação a frio é usado na indústria de fabricação de metal por aproximadamente 100 anos e seu desenvolvimento se deu com a experiência adquirida pelos operadores das perfiladeiras através do método de tentativa e erro, mas com a evolução das máquinas e da informática, surgiu a tecnologia das simulações computacionais que tem sido amplamente desenvolvida, fornecendo modelos capazes de predizer o comportamento do material de trabalho durante sua conformação mecânica e minimizando o tempo antes gasto com o método de tentativa e erro. Neste estudo, o processo de perfilação a frio foi simulado numericamente através do software MSC SuperForm 2002 baseado no método de elementos finitos com o intuito de analisar o comportamento da tensão longitudinal na região da base da chapa simulada buscando compreender os motivos pelos quais os furos pré-estampados na região da base das chapas de metal perfiladas industrialmente estavam apresentando um estreitamento de sua largura devido ao deslocamento transversal que suas arestas laterais sofriam durante a conformação mecânica do material, e com os resultados das simulações analisados, propor uma novo modelo geométrico para o ferramental da perfiladeira real

Palavras Chave

Perfilação, Simulação, Tensão, Elementos Finitos.

Abstract

CAVAGUTI, Marcelo, Numerical Simulation of Sheet Roll Forming Process to Minimize the Corrugation, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2005. 181 p. Dissertação (Mestrado)

The cold roll-forming process has been applied in the metal industry for about a hundred years and its development is due to the fact that this experience was acquired by the roll-forming operators through the trial-and-error method. Later, with the evolution of the machines and information technology, it was possible to create a new technology for computer simulations, which has been highly developed, so that it could supply models not only able to predict the behaviour of the work material during its metal forming process but also minimizing the length of time initially spent on the trial-and-error method. In this study, the cold roll-forming process was numerically simulated by MSC Superform 2002 software based on a finite element method with the purpose of analyzing the longitudinal stress behaviour in the region of the simulated sheet web, this study aims for a better understanding about the reasons why the pre-notched holes in the industrially roll-formed metal sheet web were presenting a narrowing in the width due to a tranversal displacement that their lateral edges were suffering during the metal forming process of the material, and also, with the results of the simulations analized, proposes a new geometric model for the tooled real roll forming.

Key Words

Roll Forming, Simulation, Stress, Finite Elements

Índice

Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	Х
Nomenclatura	xi
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Processo de Perfilação a Frio	2
1.1.1 Perfiladeira	6
1.1.2 Rolos Moldadores	7
1.1.3 Gabinetes de Sustentação	9
1.1.4 Linha de Centro de Rotação	10
1.1.5 Passe	11
1.1.6 Ângulo de Dobra	12
1.1.7 Diagrama Flower	13
1.1.8 Material de Trabalho	14
1.1.9 Linha de Dobra	14
1.1.10 Aba e Base na Chapa Perfilada	15
1.1.11 Perfil	15
1.1.12 Defeitos	16
a) Torção	16
b) Ondulação	17
c) Empenamento Vertical	17
d) Empenamento Lateral	18
e) Erro de Abertura Final	18

1.1.13 Eliminando ou Minimizando os Defeitos da Perfilação	19
1.1.14 Vantagens e Limitações do Processo de Perfilação a Frio	20
1.1.15 Aplicações	21
1.2 Objetivos	22
1.3 Organização da Dissertação	24
Capírulo 2 – Revisão da Literatura	25
Capítulo 3 – Análise Experimental	32
3.1 Características do Processo de Perfilação a Frio Real	32
3.2 Medições Experimentais	34
3.2.1 Medições dos Desvios entre os Perfis	36
Capítulo 4 – Análise Numérica	40
4.1 Método dos Elementos Finitos	40
4.2 Modelagem Geométrica	46
4.2.1 Simulações do Processo de Perfilação a Frio	50
a) Perfil Longitudinal Retilíneo – PLR	51
b) Perfil Longitudinal Curvilíneo 1 Ideal – PLC1Id	56
c) Perfil Longitudinal Curvilíneo 2 – PLC2	61
d) Perfil Longitudinal Curvilíneo 3 – PLC3	64
e) Perfil Longitudinal Curvilíneo 4 – PLC4	67
f) Perfil Longitudinal Curvilíneo 5 – PLC5	70
g) Perfil Longitudinal Curvilíneo 5 Otimizado – PLC5Ot	73
4.2.2 Simulações com a Chapa Pré-Estampada	80
a) Análise dos Resultados das Simulações com a Chapa Pré-Estampada	85
Capítulo 5 – Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos	87
Referências Bibliográficas	90
Anexo I – Soluções de Sistemas de Equações Lineares e Não-Lineares	93
Anexo II – Princípio dos Trabalhos Virtuais	100
Anexo III – Critério de Escoamento de von Mises e Modelo de Encruamento Isotrópico	102
Anexo IV – Elementos Finitos	111
Anexo V – Tensão e Deformação Verdadeiras e Formulação Elasto-Plástica	120
Anexo VI – Tensor Gradiente de Velocidade	127

Apêndice A – Processo de Dobramento da Chapa Simulada	130
Apêndice B - Resultados das Tensões Longitudinais em cada Passe	133
Apêndice C – Programa para Geração da Simulação da Configuração PLR	148

Lista de Figuras

1.1: Esquema simplificado do processo de perfilação a frio	2
1.2: Esquema simplificado de uma linha de produção no processo de perfilação	3
1.3: Desbobinador com a bobina	4
1.4: Fluxo do material do desbobinador para a operação secundária	4
1.5: Prensa de pré-estampagem	4
1.6: Chapa com os furos logo após sua passagem pela prensa de pré-estampagem	4
1.7: Perfiladeira	5
1.8: Prensa de corte	5
1.9: Etapa de saída da peça perfilada	6
1.10: Formas Perfiladas: (a) Aberta; (b) Vazada.	6
1.11: Tipos de perfiladeiras: (a) Perfiladeira com mancais externos; (b) Perfiladeira com	1 mancais
internos.	7
1.12: Tipos de rolos moldadores: (a) Horizontais; (b) Verticais.	8
1.13: Gabinete de sustentação	10
1.14: Painel de comando da perfiladeira	10
1.15: Corrente usada para transferir a rotação do eixo principal da perfiladeira ao si	stema de
engrenagem	10
1.16: Eixos cardans interligando o sistema de engrenagens da perfiladeira aos eixos d	e rotação
sustentados pelos gabinetes de sustentação.	10
1.17: Gabinete de sustentação com sua linha de centro de rotação.	11
1.18: Comprimento do passe (L).	11

1.19: Representação dos ângulos de dobra inicial e de saída de um passe, da linha de dobra	e da
linha de centro vertical em uma chapa sendo perfilada	12
1.20: Diagrama "Flower": (a) Desenho das seções transversais em cada gabinete de sustenta	ação
em imagem tridimensional; (b) Desenho das seções transversais sobrepostas em ima	gem
bidimensional	13
1.21: Regiões da aba e da base em uma chapa de metal sendo perfilada	15
1.22: Alguns tipos de perfis que podem ser obtidos através do processo de perfilação	16
1.23: Defeito tipo torção	17
1.24: Defeito tipo ondulação	17
1.25: Defeitos do tipo empenamento: (a) Vertical longitudinal; (b) Vertical transversal;	; (c)
Lateral	18
1.26: Defeito tipo erro de abertura final.	19
1.27: Alinhador na extremidade de entrada da perfiladeira	20
1.28: Produção de portas de metais com componentes estruturais produzidos pelo processo	o de
perfilação a frio: (a) Batentes; (b) Montagem; (c) Produto final.	22
2.1: Curva do ângulo de dobra, onde o comprimento da região deformada define a região B.	26
3.1: Ondulações nas arestas laterais dos furos pré-estampados nas regiões da base e das abas	32
3.2: Perfil em canal em U, onde "a" representa a largura da aba e "w" a largura da base	33
3.3: Chapa de metal na perfiladeira sem os rolos moldadores superiores	34
3.4: Chapa de metal retirada da perfiladeira com as amarras	34
3.5: Perfil longitudinal curvilíneo da linha de centro vertical em uma chapa de metal retirad	a da
perfiladeira	35
3.6: Marcas realizadas nas chapas indicando o posicionamento de cada gabinete de sustenta	ação
	36
3.7: Direção e sentido dos eixos do sistema de coordenadas cartesianas adotado para este trab	alho
	36
3.8: Equipamento utilizado para medir as os desvios entre os perfis	37
3.9: Chapa sustentada para medições	37
3.10: Posicionamento da caneta a lazer na marca referente ao primeiro gabinete de sustentação	o 37
3.11: Esquema de como foram feitas as medições dos desvios entre os perfis	37
3.12: Detalhe da projeção do feixe de lazer na etiqueta branca colada na régua	38

3.13: Pontos marcados na etiqueta para que as distâncias possam ser medidas através de	uma
régua graduada	38
3.14: Gráfico dos desvios entre os perfis	39
4.1: Curva representativa da relação tensão-deformação obtida em um ensaio de tr	ação
unidimensional	41
4.2: Posição do sistema de coordenadas cartesianas nas simualçoes	46
4.3: 9 gabinetes de sustentação gerados nas simulações com seus respectivos ângulos de dobr	a 47
4.4: Nomenclatura adotada para identificação dos rolos moldadores nas simulações: super	fície
tipo 1 = rolo superior; superfície tipo 2 = rolo inferior; superfície tipo 3 = rolo lateral	: (a)
vista lateral; (b) vista frontal; (c) vista em perspectiva	48
4.5: Dimensões características dos rolos moldadores cilíndricos definidas pelo seu diâmetro e	e sua
altura	48
4.6: Perfil final das chapas simuladas com simetria.	49
4.7: Representação das dimensões da chapa simulada	49
4.8: Chapa simulada discretizada por 6000 elementos finitos: (a) chapa completa; (b) detalh	ie da
chapa com ângulo de dobra igual a 90°	49
4.9: Representação da configuração PLR: (a) vista lateral; (b) vista em perspectiva.	51
4.10: Perfil longitudinal da chapa durante o processo de dobramentol: (a) chapa liberada	a do
ferramental; (b) posicionamento inicial dos rolos superior e inferior; (c) deslocament	o na
vertical dos rolos superiores mantendo fixo os rolos inferiores; (d) chapa com o p	erfil
longitudinal retilíneo devido as restrições dos rolos moldadores	52
4.11: Configuração final da perfiladeira com a chapa posicionada entre os rolos moldadores,	após
o processo de dobramento	52
4.12: Nível da tensão longitudinal $\sigma_{_{11}}$ em MPa presente na chapa simulada para a configur	ação
PLR de perfiladeira: (a) Ao final do processo de dobramento; (b) Após um deslocam	iento
longitudinal de 330 mm.	55
4.13: Nível da tensão longitudinal σ_{11} em MPa presente na superfície inferior da chapa simu	ılada
para a configuração PLR de perfiladeira ao final do processo de dobramento	56
4.14: Representação da configuração PLC1Id: (a) vista lateral; (b) vista em perspectiva.	57
4.15: Tipos de gabinetes de sustentação aplicados às simulações: (a) tipo real: (b) tipo ideal.	59

- 4.16: Nível da tensão longitudinal σ_{11} em MPa presente na chapa simulada para a configuração **PLC1Id** de perfiladeira: (a) Ao final do processo de dobramento; (b) Após um deslocamento longitudinal de 330 mm. 60
- 4.17: Nível da tensão longitudinal σ_{11} em MPa presente na superfície inferior da chapa simulada para a configuração **PLC1Id** de perfiladeira ao final do processo de dobramento 61
- 4.18: Representação da configuração PLC2: (a) vista lateral; (b) vista em perspectiva. 61
- 4.19: Nível da tensão longitudinal σ_{11} em MPa presente na chapa simulada para a configuração **PLC2** de perfiladeira: (a) Ao final do processo de dobramento; (b) Após um deslocamento longitudinal de 330 mm. 63
- 4.20: Representação da configuração PLC3: (a) vista lateral; (b) vista em perspectiva. 64
- 4.21: Nível da tensão longitudinal σ_{11} em MPa presente na chapa simulada para a configuração **PLC3** de perfiladeira: (a) Ao final do processo de dobramento; (b) Após um deslocamento longitudinal de 330 mm. 66
- 4.22: Representação da configuração PLC4: (a) vista lateral; (b) vista em perspectiva. 67
- 4.23: Nível da tensão longitudinal σ_{11} em MPa presente na chapa simulada para a configuração **PLC4** de perfiladeira: (a) Ao final do processo de dobramento; (b) Após um deslocamento longitudinal de 330 mm. 69
- 4.24: Representação da configuração PLC5: (a) vista lateral; (b) vista em perspectiva. 70
- 4.25: Nível da tensão longitudinal σ_{11} em MPa presente na chapa simulada para a configuração **PLC5** de perfiladeira: (a) Ao final do processo de dobramento; (b) Após um deslocamento longitudinal de 330 mm. 72
- 4.26: Representação da configuração **PLC5Ot**: (a) vista lateral; (b) vista em perspectiva. 73
- 4.27: Nível da tensão longitudinal σ_{11} em MPa presente na chapa simulada para a configuração **PLC5Ot** de perfiladeira: (a) Ao final do processo de dobramento; (b) Após um deslocamento longitudinal de 330 mm. 75

4.28: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} em MPa na região da base para a chapa simulada ao final do processo de dobramento. 76

4.29: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} em MPa na região da base para a chapa simulada após um deslocamento longitudinal de 330 mm. 77

4.30: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} em uma escala de -150 MPa a 0 MPa na região	o da
base para a chana simulada anós um deslocamento longitudinal de 330 mm	78
4.31: Dimensões do furo pré-estampado na região da base da chapa simulada.	80
4.32: Deslocamento do furo na perfiladeira através do gabinete de sustentação de 30°: (a) pos	sicão
1; (b) posição 2; (c) posição 3.	81
4.33: Tensão longitudinal σ_{11} presente na chapa pré-estampada: (a) posição 1; (b) posição 2	; (c)
posicão 3	82
4.34: Deslocamento transversal em Z da aresta lateral do estampo: (a) posição 1: (b) posição	io 2:
(c) posição 3.	83
4.35: Visualização do deslocamento transversal em Z da aresta lateral do estampo: (a) posiçã	ĭo 1;
(b) posição 2; (c) posição 3.	84
4.36: Comparação visual do estreitamento da largura do furo: (a) chapa de metal perfi	lada
industrialmente; (b) chapa simulada em uma configuração com perfil longitudinal retilí	neo.
	86
III.1: (a) Superfície de escoamento para materiais isotrópicos no espaço de tensão 3-D;	; (b)
Superfície de escoamento de von Mises projetada sobre o plano π	107
III.2: (a) Trajetória de carregamento; (b) Superfícies de escoamento de Von Mises con	n os
respectivos pontos da trajetória de carregamento	108
IV.1: Elemento hexaédrico linear de 8 nós no sistema de coordenadas de referência (ξ,η,ζ)	110
A.1: Sequência do processo de dobramento	132
B.1: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o pas	se 2
ao final do processo de dobramento.	134
B.2: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o pas	ise 3
ao final do processo de dobramento.	135
B.3: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o pas	se 4
ao final do processo de dobramento.	136
B.4: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o pas	ise 5
ao final do processo de dobramento.	137
B.5: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o pas	sse 6
ao final do processo de dobramento.	138

B.6: Resultados da tensão longitudinal $\sigma_{\scriptscriptstyle 11}$ na região da base da chapa simualada para o pas	sse 7
ao final do processo de dobramento.	139
B.7: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o pas	se 8
ao final do processo de dobramento.	140
B.8: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o pas	sse 2
após seu deslocamento longitudinal de 330 mm.	141
B.9: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o pas	sse 3
após seu deslocamento longitudinal de 330 mm.	142
B.10: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o pa s	sse 4
após seu deslocamento longitudinal de 330 mm.	143
B.11: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o pa s	sse 5
após seu deslocamento longitudinal de 330 mm.	144
B.12: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o pa s	sse 6
após seu deslocamento longitudinal de 330 mm.	145
B.13: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o pa s	sse 7
após seu deslocamento longitudinal de 330 mm.	146
B.14: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o pa s	sse 8
após seu deslocamento longitudinal de 330 mm.	147

Lista de Tabelas

3.1: Posicionamento de cada gabinete de sustentação na perfiladeira com seus re	espectivos
ângulos de dobra	33
3.2: Valores dos desvios entre os perfis para cada chapa medida	39
4.1: Ângulos de dobra e posicionamento longitudinal dos gabinetes de sustentação ap	licados às
simulações.	47
4.2: Dimensões geométricas da configuração PLR.	51
4.3: Valores aproximados da média dos desvios entre os perfis em cada gabinete de su	ıstentação
utilizados nas simulações.	57
4.4: Dimensões geométricas da configuração PLC1Id.	58
4.5: Dimensões geométricas da configuração PLC2.	62
4.6: Dimensões geométricas da configuração PLC3.	64
4.7: Dimensões geométricas da configuração PLC4.	67
4.8: Dimensões geométricas da configuração PLC5.	70
4.9: Dimensões geométricas da configuração PLC5Ot.	73
B.1: Intervalos de cada passe nas perfiladeiras simuladas.	133

Nomenclatura

Letras Latinas

A	Área da seção transversal atual	$[mm^2]$
A_0	Área não deformada da seção transversal	$[mm^2]$
[<i>B</i>]	Matriz das derivadas das funções de forma obtida das relações cinemáticas	
[C]	Matriz constitutiva ou das propriedades do material obtida das relações cor	nstitutivas
C^{e}	Matriz constitutiva elástica	
C^{ep}	Matriz constitutiva elasto-plástica	
[D]	Matriz diagonal	
D	Tensor taxa de deformação	
Ε	Módulo de Young ou de Elasticidade	$[N \cdot mm^{-2}]$
F	Função de escoamento	
$\{F\}$	Vetor das forças generalizadas aplicadas aos nós	
$\{f_s\}$	Vetor das forças de superfície	
$\{f_V\}$	Vetor das forças de volume	
$\left\{f ight\}^{el}$	Vetor das forças generalizadas aplicadas aos nós do elemento de referência	L
G	Módulo de Elasticidade Transversal	$[N \cdot mm^{-2}]$
Н	Inclinação de encruamento	
J	Jacobiano	
J_s	Jacobiano de uma superfície	
<i>J</i> ₁ , <i>J</i> ₂ , <i>J</i> ₃	Invariantes do tensor de tensão de Cauchy	

<i>J</i> ₁ ', <i>J</i> ₂ ', <i>J</i> ₃ '	Invariantes do tensor de tensão desviador	
[K]	Matriz de rigidez global ou de coeficientes do sistema	
$[k_i]^{el}$	Matriz de rigidez elementar	
[L]	Matriz triangular inferior	
L	Tensor gradiente de velocidade	
l	Comprimento final	[mm]
l_0	Comprimento inicial	[mm]
[N]	Matriz das funções de forma	
Р	Carga axial	[N]
Р	Tensão ou pressão hidrostática	$[N \cdot mm^{-2}]$
q	Força de volume	$[N \cdot mm^{-3}]$
r	Raio da superfície de escoamento cilíndrica de von Mises	[mm]
$\{R\}$	Vetor da função resíduo	
[S]	Matriz triangular superior	
S	Tensor de tensão desviador	
S_1, S_2, S_3	Tensões principais do tensor de tensão desviador	
$\{U\}$	Vetor das incógnitas ou dos deslocamentos nodais	
<i>{u}</i>	Vetor dos deslocamentos nodais elementar	
и	Deslocamento	[mm]
û	Deslocamento virtual	
\vec{v}	Vetor velocidade	$[\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}]$
W	Tensor rotação	
X,Y,Z	Coordenadas do sistema cartesiano	[mm]

Letras Gregas

$\delta_{_{ij}}$	Delta de Kroenecker
Е	Deformação verdadeira ou logarítmica
Ê	Deformação nominal

\mathcal{E}^{e}	Deformação elástica	
${\cal E}^{p}$	Deformação plástica	
${\cal E}_e^{p}$	Deformação plástica efetiva	
λ	Multiplicador plástico	
V	Razão de Poisson	
σ	Tensão verdadeira	[MPa]
$\hat{\sigma}$	Tensão nominal	[MPa]
$\sigma_{_e}$	Tensão equivalente	[MPa]
σ_{y}	Tensão de escoamento	[MPa]
σ_y^0	Tensão de escoamento inicial	[MPa]
$\dot{\sigma}$	Tensor taxa de tensão de Cauchy	
$\dot{\sigma}^{\scriptscriptstyle J}$	Tensor taxa de Jaumann	
$\dot{\sigma}^{\scriptscriptstyle T}$	Tensor taxa de Truesdell	
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensões principais	[MPa]
$ec{\sigma}$	Representação vetorial do tensor de tensão no espaço de tensões principais	s 3-D com
(coordenadas ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$)	

ξ,η,ζ Coordenadas do sistema de referência [mm]

Abreviações

3-D	Espaço tridimensional
PLR	Perfil Longitudinal Retilíneo
PLC1Id	Perfil Longitudinal Curvilíneo 1 Ideal
PLC2	Perfil Longitudinal Curvilíneo 2
PLC3	Perfil Longitudinal Curvilíneo 3
PLC4	Perfil Longitudinal Curvilíneo 4
PLC5	Perfil Longitudinal Curvilíneo 5
PLC5Ot	Perfil Longitudinal Curvilíneo 5 Otimizado

Capítulo 1

Introdução

Perfilação a frio é um processo contínuo no qual uma chapa de metal a temperatura ambiente é passada através de uma série de pares de rolos moldadores. Cada par de rolos instalado em gabinetes de sustentação na perfiladeira tem uma função particular na produção das pecas que apresentam formas longitudinais e secões transversais que variam conforme a aplicação. O conjunto de rolos moldadores, ou seja, o ferramental cilíndrico dobra inicialmente uma chapa plana que progressivamente vai sendo conformada pela ação dos rolos à forma final desejada. A espessura da chapa sofre uma leve mudança durante o processo de perfilação nas regiões onde ocorrem as dobras, de forma que esta variação possa ser desprezada nas simulações. A força de atrito entre o ferramental cilíndrico e a chapa é que move esta através da perfiladeira. Uma ampla escala de produtos é produzida através do processo de perfilação a frio de chapas metálicas. Os perfis dos rolos moldadores, o número de gabinetes de sustentação e o arranjo do ferramental cilíndrico necessários devem ser decididos considerando não somente as características geométricas do produto final, mas também as propriedades mecânicas e as características de deformação do material da chapa a ser perfilado. Devido à complexidade do processo de deformação tridimensional, nenhum método técnico para otimizar o projeto dos perfis dos rolos e a sequência dos passes esteve disponível por um longo período, sendo o processo de perfilação considerado mais uma arte do que uma ciência. Pode-se dizer que a perfilação foi posto em prática meramente com base nos conhecimentos experimentais fragmentados, enquanto que seus fenômenos físicos permaneciam teoricamente desconhecidos. Os projetos dos perfis dos rolos moldadores, das següências dos passes e dos produtos perfilados

eram baseados na confiança dos conhecimentos práticos adquiridos pelos projetistas ao longo dos anos. Para mudar este conceito, e devido ao rápido crescimento da produção e a necessidade por produtos variados geometricamente e de alta qualidade, cientistas têm desenvolvido modelos capazes de simular o processo de perfilação a fim de se poder predizer o comportamento da chapa e a distribuição das tensões e deformações durante todo processo. Com isso, os projetistas podem otimizar o projeto das perfiladeiras, minimizando o surgimento de defeitos e aumentando assim a qualidade do produto final.

1.1 Processo de Perfilação a Frio

O processo de perfilação a frio, altamente desenvolvido nos anos recentes, é uma operação de dobra contínua e progressiva onde uma longa chapa ou tira de metal plana é deformada plasticamente ao longo de um eixo linear por meio de uma série de rolos moldadores montados seqüencialmente de forma que a seção transversal da chapa atinja o perfil final desejado devido as restrições geométricas dos perfis dos rolos moldadores impostas ao movimento longitudinal da chapa (Figura 1.1).



Figura 1.1: Esquema simplificado do processo de perfilação a frio. Fonte: DeGarmo (1984).

Devido à maneira progressiva na qual a conformação mecânica ocorre, há uma pequena ou nenhuma mudança na área da seção transversal do material trabalhado, ou seja, uma característica deste processo é considerar que a chapa de metal não apresenta variação em sua espessura, permitindo uma precisão em suas tolerâncias, produzindo peças com formas e dimensões adequadas a suas aplicações. A perfilação é ideal para produção de peças de longos comprimentos ou de grandes quantidades de produtos, sua velocidade de produção varia entre 30 e 3000 $mm \cdot s^{-1}$ dependendo da configuração desejada, das operações secundárias (pré-estampo, soldagem e outras) na linha de produção, assim como do material a ser modelado.

A linha de produção de um processo de perfilação a frio (Figura 1.2) pode ser divido em quatro etapas principais que são: a etapa de entrada do material, a etapa de modelagem do material, que é a etapa de perfilação propriamente dita, a etapa de corte do material já modelado buscando assim o comprimento desejado e pré-estabelecido das peças e, por fim, a etapa de saída das peças.



Figura 1.2: Esquema simplificado de uma linha de produção no processo de perfilação. Fonte: Precision Metalforming Association (1995).

Na etapa de entrada, a primeira na linha de produção do processo de perfilação, embora o material deva ser transportado de forma plana e reta, ele é conduzido através de um desbobinador contínuo (Figura 1.3), que pode ser com ou sem motorização, diretamente para uma operação secundária antecedente a modelagem (Figura 1.4), tal como a pré-estampagem. Muitos sistemas incorporam ao processo de perfilação dispositivos de manejo de material para armazenamento em linha de 3 a 5 bobinas que são determinados comprimentos de chapa de metal enrolado na forma de rolo. Esses sistemas servem para aumentar a eficiência de produção, minimizando o tempo ocioso necessário para a troca das bobinas a serem perfilados. Alguns dos sistemas mais

eficientes para longas jornadas de produção, incluem na linha de produção, acumuladores de bobinas e soldador para as extremidades finais das chapas, assegurando um fluxo de material não-interrompido para o processo, eliminando de forma definitiva o tempo de troca do material de trabalho.



Figura 1.3: Desbobinador com a bobina.



Figura 1.4: Fluxo do material do desbobinador para a operação secundária.

Uma operação secundária, ou seja, uma operação que ocorre fora do processo de perfilação principal, muito utilizada na linha de produção é o corte por estampagem. A prensa para préestampo (Figura 1.5) é utilizada para realizar furos com geometrias de dimensões préestabelecidas (Figura 1.6) no material antes que este sofra a conformação, tornando possível a localização destes furos em posições que seriam difíceis ou impossíveis de serem realizados, após a chapa ter sido completamente perfilada, devido à complexidade de sua configuração final.



Figura 1.5: Prensa de pré-estampagem.



Figura 1.6: Chapa com os furos logo após sua passagem pela prensa de pré-estampagem.

A segunda e principal etapa na linha de produção é a perfilação propriamente dita, que ocorre na perfiladeira (Figura 1.7). É neste estágio que ocorre a conformação mecânica da chapa de metal, que chega à próxima etapa já com o perfil final desejado da seção transversal. Durante a modelagem dos produtos não há perdas e desperdícios do material de trabalho.



Figura 1.7: Perfiladeira.



Figura 1.8: Prensa de corte.

Uma outra etapa importante na linha de produção do processo de perfilação é a etapa de corte, onde a seção contínua é cortada em comprimentos pré-definidos através de uma prensa de corte (Figura 1.8) mecânica ou hidráulica do tipo guilhotina. Devido à natureza contínua do processo, esta etapa de corte é sempre utilizada. Para alguns casos, como em modelagem de peças pesadas de material de grande espessura, a linha de produção deve ser realmente interrompida enquanto a seção perfilada é cortada em comprimentos. O corte pode ser realizado anteriormente a operação de modelagem ou após o material ter sido modelado, chamado de précorte e pós-corte respectivamente. O sistema de pós-corte é o mais utilizado, eficiente e consistente tipo de operação de corte.

A etapa de saída (Figura 1.9) do processo de perfilação é o quarto e último estágio na linha de produção. Normalmente antes do processo de corte das peças perfiladas, estas são sustentadas por uma mesa, um suporte ou um conjunto de rolos condutores. Após o corte, para finalizar o processo de perfilação, a saída da peça é realizada manualmente por um operário ou de forma automatizada através de rolos condutores.

As formas das peças perfiladas podem ser abertas (Figura 1.10.a) ou vazadas (Figura 1.10.b) desde que apresentem seção transversal constante ao longo de seu eixo longitudinal. Se

uma peça vazada deve ser produzida, uma variedade de métodos pode ser usada para unir as extremidades laterais livres das tiras, como por exemplo, a soldagem por resistência, por indução elétrica e a laser ou através de técnicas que unem as extremidades livres mecanicamente.



Figura 1.9: Etapa de saída da peça perfilada.





(a) (b) Figura 1.10: Formas Perfiladas: (a) Aberta; (b) Vazada.

Devido à flexibilidade e a velocidade de produção através do processo de perfilação todas as indústrias podem ser beneficiadas por este processo, sendo que muitas das companhias que utilizam as peças perfiladas às fazem por necessitarem da precisão oferecida no processo.

1.1.1 Perfiladeira

A perfiladeira é a máquina responsável em modelar a chapa plana no perfil desejado numa peça longa. Ela é constituída de gabinetes de sustentação, posicionados seqüencialmente em linha reta, onde são montados os rolos moldadores.

As perfiladeiras possuem duas categorias, perfiladeiras com mancais externos e perfiladeiras com mancais internos. Na perfiladeira com mancais externos (Figura 1.11.a) ambas as extremidades dos eixos de rotação onde os rolos moldadores são acoplados são sustentados pelos mancais de rolamento montados em gabinetes de sustentação. Na perfiladeira com mancais internos (Figura 1.11.b) os eixos de rotação são sustentados em apenas uma das extremidades através dos mancais de rolamentos que estão posicionados diretamente na perfiladeira sem

utilizar os gabinetes de sustentação. A perfiladeira com mancais internos apresenta como vantagem a melhor acessibilidade ao material durante sua modelagem além da facilidade da troca do ferramental cilíndrico e é normalmente usada para modelar materiais finos ou para modelar as extremidades laterais de tiras.





Figura 1.11: Tipos de perfiladeiras: (a) Perfiladeira com mancais externos; (b) Perfiladeira com mancais internos. Fonte: www.daltec.ind.br, acessado em 15/11/04.

1.1.2 Rolos Moldadores

O rolo moldador é a ferramenta responsável em conformar mecanicamente o material de trabalho. O conjunto dos rolos moldadores utilizado na perfiladeira é chamado de ferramental cilíndrico do processo de perfilação a frio. Os rolos moldadores são projetados e usinados especificamente para se obter um determinado perfil. Portanto, para cada tipo de seção transversal final desejada há a necessidade de um conjunto de rolos moldadores diferente, o que torna o custo do ferramental do processo relativamente alto. Eles são acoplados aos eixos de rotação que são sustentados pelos gabinetes de sustentação na perfiladeira de forma a se obedecer a seqüência necessária para a conformação progressiva da chapa de metal até que o perfil final seja obtido da maneira mais estável possível.

Mudando os rolos moldadores, uma única perfiladeira pode ser adaptada para produzir diferentes tipos de perfis de peças longas. Uma vez que a troca, a montagem e o ajuste dos rolos moldadores podem levar horas, gerando um custo elevado devido à produtividade perdida, então não é economicamente viável utilizar a perfiladeira por aproximadamente menos de 3000 metros

de produtos gerados.

O rolo moldador é classificado quanto à direção de seu eixo de rotação, ou seja, se ele possui o eixo de rotação na direção horizontal é dito rolo moldador horizontal (Figura 1.12.a) e se a direção do eixo de rotação for na vertical, temos o rolo moldador vertical (Figura 1.12.b).





Figura 1.12: Tipos de rolos moldadores: (a) Horizontais; (b) Verticais.

Sempre que um rolo moldador realiza uma volta completa, todos os pontos em sua superfície percorrem uma trajetória circular, portanto, diferentes partes do rolo moldador apresentam diferentes velocidades lineares dependendo da distância de suas localizações ao seu centro de rotação. Obviamente, que certas partes do material escorregam contra o movimento dos rolos e algumas partes dos rolos se deslocam com a mesma velocidade da peça, uma vez que esta se move através da perfiladeira sempre na mesma velocidade linear. Quando um engenheiro projeta os rolos moldadores, ele seleciona os pontos sobre o rolo moldador que apresentarão a mesma velocidade linear com qual a peça se moverá na perfiladeira. Esses pontos são chamados de pontos de guia referencial e o diâmetro do círculo formado pela rotação destes pontos é chamado de diâmetro de guia referencial. Em geral, para cada passe, os diâmetros dos rolos moldadores do gabinete de sustentação de saída do passe são aumentados em 0,5 a 1% em relação aos rolos do gabinete de sustentação inicial do mesmo passe. Esta prática aumenta a velocidade linear dos pontos de guia conforme a peça vai sendo modelada progressivamente. O objetivo deste aumento progressivo da velocidade linear dos pontos de guia referencial na perfiladeira é fazer com que a chapa de metal esteja levemente tracionada durante sua modelagem para evitar o surgimento de defeito do tipo ondulação. Sem a combinação das velocidades dos pontos de guia referencial sobre os rolos superiores e inferiores em um dado gabinete de sustentação, os rolos brigariam entre si, tentando guiar o material em velocidades diferentes e quando isto ocorre, ranhuras podem ser vistas na superfície da peça perfilada.

Os rolos moldadores são projetados e desenvolvidos para uma espessura de material, que é a espessura máxima que poderá ser passada através dos rolos. Esta espessura é chamada de **folga de projeto**. Se processarmos um material com espessura maior que a folga de projeto, pode resultar em trincas ou quebras de algumas partes dos rolos moldadores, além de que pressões excessivas nos rolos podem gerar uma diminuição de algumas seções na chapa perfilada. Alternativamente, modelar material mais fino do que a folga de projeto reduz a precisão das peças produzidas.

1.1.3 Gabinetes de Sustentação

Os gabinetes de sustentação através de mancais de rolamento sustentam um sistema de eixos onde os rolos moldadores estão acoplados (Figura 1.13). Um gabinete de sustentação apresenta parafusos de ajuste na sua parte superior através dos quais com suas rotações, o eixo superior onde está acoplado o rolo moldador superior pode se deslocar verticalmente tornando possível uma regulagem precisa da folga de projeto. Esse deslocamento na direção vertical não é possível ser realizado nos eixos de rotação dos rolos moldadores inferiores. Quando o material ainda não foi alimentado à perfiladeira são os parafusos de ajuste que mantém apoiados o peso dos mancais de rolamento, dos eixos de rotação e dos rolos moldadores superiores.

O sistema de eixos de rotação é responsável por transferir aos rolos moldadores suas velocidades angulares de forma que a chapa possua sempre a mesma velocidade linear de avanço ou mesma taxa de alimentação do processo de perfilação. A velocidade angular imposta ao processo é especificada pelo operador através de um painel de comando (Figura 1.14), que controla o sistema cinemático da perfiladeira. O movimento principal de uma perfiladeira se dá na forma da rotação de um eixo central, que através de um sistema de guias transfere sua energia cinética de rotação aos rolos moldadores. Essa transferência de energia cinética é realizada por duas etapas: na primeira, a energia de rotação do eixo central da perfiladeira é transferida para o

sistema de engrenagens incorporada à perfiladeira através de uma corrente (Figura 1.15), na segunda etapa, as rotações das engrenagens são transferidas aos eixos de rotação dos rolos moldadores por meio de eixos cardans (Figura 1.16).



Figura 1.13: Gabinete de sustentação.



Figura 1.15: Corrente usada para transferir a rotação do eixo principal da perfiladeira ao sistema de engrenagem.



Figura 1.14: Painel de comando da perfiladeira.



Figura 1.16: Eixos cardans interligando o sistema de engrenagens da perfiladeira aos eixos de rotação sustentados pelos gabinetes de sustentação.

1.1.4 Linha de Centro de Rotação

A linha de centro de rotação (Figura 1.17) dos rolos moldadores é uma linha imaginária

utilizada para facilitar a compreensão e visualização de outras definições que serão apresentadas mais tarde. A linha de centro de rotação é uma linha que passa pelos centros de rotação dos rolos moldadores superior e inferior em um determinado gabinete de sustentação, portanto para cada gabinete de sustentação há uma linha de centro de rotação (Figura 1.18).



Figura 1.17: Gabinete de sustentação com sua linha de centro de rotação.



Figura 1.18: Comprimento do passe (L).

1.1.5 Passe

O passe é o intervalo entre dois gabinetes de sustentação consecutivos. Considerando que normalmente o primeiro gabinete de sustentação na entrada de uma perfiladeira é utilizado apenas para sustentar e alinhar o deslocamento do material, não fornecendo qualquer tipo de restrição geométrica ao avanço da chapa de metal por parte dos rolos moldadores, portanto não havendo deformação, então uma perfiladeira que utilize "**n**" gabinetes de sustentação modelará a chapa plana até o perfil final desejado da seção transversal em "**n-1**" passes. O número de gabinetes de sustentação necessário no processo de perfilação a frio é determinado pelo perfil final que se deseja obter, pelo tipo de metal do material de trabalho e por sua espessura.

O comprimento entre dois gabinetes de sustentação, ou melhor, entre duas linhas de centro de rotação consecutivas é determinado de **comprimento do passe** (L) (Figura 1.18). Este

determina o quão rápido um perfil pode ser modelado. Mudar os rolos moldadores para uma perfiladeira que tenha o comprimento do passe diferente da qual eles foram projetados e desenvolvidos não necessariamente significará que eles não trabalharão. Entretanto, com a redução da distância pode ocorrer que uma ou mais parcela da chapa de metal se torne permanentemente alongada ao mover-se de um gabinete de sustentação para outro. Por outro lado, quando a distância é aumentada, o perfil pode se abrir entre os passes, necessitando que o próximo passe feche-o de volta a sua posição original antes que a conformação adicional seja executada. Portanto, parâmetros muito importantes de serem compreendidos para que haja sucesso no processo de perfilação a frio são a distância entre os gabinetes de sustentação e o número ou seqüência de passes em uma perfiladeira.

1.1.6 Ângulo de Dobra (θ)



Figura 1.19: Representação dos ângulos de dobra inicial e de saída de um passe, da linha de dobra e da linha de centro vertical em uma chapa sendo perfilada. Fonte: Panton et al (1992).

O ângulo de dobra (θ) é o valor do ângulo imposto pelas formas geométricas dos perfis dos rolos moldadores em cada gabinete de sustentação em um processo de perfilação a frio ao material a ser modelado. Os ângulos de dobra variam em cada gabinete de sustentação de forma

crescente ao longo da seqüência dos passes a fim de se obter o perfil final da seção transversal após a passagem da chapa pelo último gabinete de sustentação. Como definido anteriormente um passe é o intervalo entre dois gabinetes de sustentação consecutivos, portanto, o ângulo de dobra do gabinete de sustentação que inicia um passe é denominado de **ângulo de dobra inicial** (θ_i) e o ângulo do gabinete de sustentação seguinte é denominado **ângulo de dobra de saída** do passe (θ_s) (Figura 1.19) e conseqüentemente a diferença entre eles, ou seja, θ_s - θ_i é definido como o **incremento do ângulo de dobra** de um passe ($\Delta \theta$).

1.1.7 Diagrama Flower

A progressão do ângulo de dobra em uma perfiladeira pode ser analisada antes do início da produção das peças, isto é feito através de programas computacionais que geram diagramas conhecidos como "flower", que descrevem o fluxo antecipado do material de trabalho através dos rolos moldadores. O diagrama "flower" (Figura 1.20) consiste de uma sobreposição dos desenhos das seções transversais definidos pela montagem dos rolos moldadores em cada gabinete de sustentação. O desenvolvimento e análise de um diagrama "flower" auxilia a assegurar um fluxo suave do material de trabalho do primeiro ao último passe, permitindo o controle máximo sobre as dimensões pré-determinadas da chapa enquanto a mesma é perfilada.



Figura 1.20: Diagrama "Flower": (a) Desenho das seções transversais em cada gabinete de sustentação em imagem tridimensional; (b) Desenho das seções transversais sobrepostas em imagem bidimensional.

Estes programas computacionais podem aumentar a produtividade dos projetistas dos rolos moldadores, permitindo que eles façam modificações nos perfis dos rolos moldadores, observando os efeitos que estes novos perfis terão sobre a forma final do processo sem que haja a

necessidade de mexer no ferramental cilíndrico da perfiladeira, reduzindo significativamente o custo e o tempo gasto com a fabricação de rolos moldadores desnecessários ou com perfis inadequados para obtenção de uma determinada seção transversal.

1.1.8 Material de Trabalho

Quase todos os materiais que podem ser obtidos na forma de bobinas ou chapas podem ser perfilados. O material deve ser tão dúctil quanto resistente para que cantos vivos possam ser modelados e que a conformação mecânica ocorra facilmente. Alguns dos materiais mais comuns são: aço galvanizado, aço inoxidável, aço carbono, latão, cobre, zinco, titânio, alumínio, bronze e ligas de metais. O processo de perfilação a frio também é ideal para modelar metais pintados e revestidos.

A alimentação do material de trabalho ao longo da linha de produção do processo de perfilação a frio se dá através do atrito existente entre as superfícies do ferramental cilíndrico e da chapa de metal, e sua velocidade linear deve ser a mesma dos pontos de guia referencial dos rolos moldadores. A velocidade de avanço ou taxa de alimentação depende do tipo de material que a chapa é composta, por exemplo, um alumínio pode ser modelado muito mais rapidamente do que o titânio, para se obter a mesma forma final de seção transversal. Portanto, conhecer as propriedades do material com que se está trabalhando é fundamental para se obter a otimização do processo.

1.1.9 Linha de Dobra

Durante o processo de perfilação a frio o material de trabalho sofre uma conformação mecânica contínua e progressiva, assim, se fixarmos um determinado ponto na chapa de metal onde irá ocorrer a deformação da mesma antes de sua entrada à perfiladeira e seguirmos sua trajetória retilínea durante o avanço do material até sua saída pelo último passe, veremos que esta trajetória define uma linha na chapa de metal ao longo do processo. Esta linha é a chamada **linha de dobra** (Figura 1.19). Uma outra linha, agora imaginária, é a **linha de centro vertical** (Figura
1.19), esta representa os pontos da chapa que estarão sempre na mesma posição vertical ao longo da perfiladeira e serve como referência para o posicionamento dos pontos de guia referencial no projeto dos rolos moldadores, portanto, a velocidade de avanço ou taxa de alimentação em um processo de perfilação a frio corresponde à velocidade linear da linha de centro vertical na chapa de metal.

1.1.10 Aba e Base na Chapa Perfilada

Durante o processo de perfilação a frio de um perfil em U duas regiões distintas podem ser observadas na chapa sendo perfilada: a região da **base** e a região da **aba** (Figura 1.21). Elas são separadas pela linha de dobra. A aba é a região da chapa que está sendo dobrada através das restrições geométricas impostas pelos rolos moldadores ao deslocamento do material. Outros parâmetros importantes no processo de perfilação a frio são a largura da base (**w**) e a largura da aba (**a**).



Figura 1.21: Regiões da aba e da base em uma chapa de metal sendo perfilada.

1.1.11 Perfil

O processo de perfilação a frio oferece uma ampla variedade com relação às seções transversais que podem ser obtidas, desde que a peça finalizada tenha o perfil constante ao longo de seu comprimento. Na Figura 1.22 são mostrados alguns dos vários tipos de perfis possíveis de

serem obtidos na perfiladeira.



Figura 1.22: Alguns tipos de perfis que podem ser obtidos através do processo de perfilação.

1.1.12 Defeitos

Perfilação a frio é um processo muito eficiente de conformação mecânica de metal, preciso e flexível, usado para produzir uma variedade de perfis de seções transversais. Infelizmente, alguns defeitos podem ocorrer durante o processo, tais como: torção, ondulação, empenamento vertical, empenamento lateral e erro de abertura final. Devido a grande variedade de perfis produzidos e materiais usados, não existem soluções simples para solucionar estes problemas. O método de tentativa e erro é o método mais comumente utilizado para se buscar um uma produção livre de defeitos, mas infelizmente este método consume muito tempo, reduzindo a eficiência do processo. Por esse motivo, há uma corrida incessante por pesquisas nesta área com intuitos de formular métodos científicos capazes de solucionarem estes problemas da perfilação. A chave está em compreender o comportamento da deformação que o material sofre durante a sua conformação. Com este conhecimento em mãos, o projeto do ferramental cilíndrico, assim como a montagem da seqüência dos passes na perfiladeira podem ser aprimorados na busca de soluções que evitam a presença de defeitos na peças perfiladas, reduzindo o tempo antes gasto com o método de tentativa e erro, tornando o processo de perfilação a frio mais eficiente.

a) Torção

Torção é o termo usado para definir o defeito quando a peça apresenta um aspecto que se assemelha com um saca-rolha, ou seja, a peça está levemente torcida (Figura 1.23). Isto é freqüentemente causado pela excessiva pressão de conformação na peça perfilada final, e este tipo de defeito normalmente é encontrado em perfis assimétricos.

b) Ondulação

A ondulação das abas laterais (Figura 1.24) da chapa de metal é o defeito mais comum encontrado no processo de perfilação a frio, principalmente quando um material de alta resistência e/ou de espessura fina é utilizado. Além do tipo do material de trabalho, um projeto inadequado do ferramental cilíndrico e um número insuficiente de passes na seqüência pode contribuir com o surgimento deste tipo de defeito.



Figura 1.23: Defeito tipo torção. Fonte: Duggal et al (1996).



Figura 1.24: Defeito tipo ondulação. Fonte: Watari e Ona (1998).

c) Empenamento Vertical

O empenamento vertical pode ocorrer tanto em peças simétricas quanto assimétricas, ele é um tipo de curvatura que a peça perfilada pode apresentar em seu perfil longitudinal ou transversal. Se a curvatura apresentada pela peça ocorrer em seu perfil longitudinal em relação a um plano vertical teremos o **empenamento vertical longitudinal** (Figura 1.25.a), agora, se a curvatura presente na peça for em seu perfil transversal em relação a um plano vertical ou horizontal, então teremos o **empenamento vertical transversal** (Figura 1.25.b). Este tipo de defeito pode ser causado pelo projeto impróprio do ferramental ou pela sobre carga aplicada à chapa de metal durante a perfilação.

d) Empenamento Lateral

O empenamento lateral (Figura 1.25.c) é um tipo de defeito como o empenamento vertical longitudinal, só que neste caso a curvatura apresentada pelo perfil longitudinal da peça perfilada é em relação ao plano horizontal. O empenamento lateral pode ser causado tanto pelo alinhamento horizontal incorreto dos rolos moldadores, quanto por uma pressão de modelagem desigual ao longo do processo.



Fonte: Duggal et al (1996).

e) Erro de Abertura Final

Erro de abertura final (Figura 1.26) é a deformação que pode ocorrer nas extremidades de entrada e saída de uma peça perfilada a frio. Dependendo do perfil da seção transversal e do projeto do ferramental cilíndrico, o erro de abertura final na extremidade de entrada da peça pode ser bem diferente da extremidade de saída. Normalmente, o erro de abertura final de entrada é caracterizado por uma conformação em excesso, enquanto que o de saída exibe uma conformação em escassez.



Figura 1.26: Defeito tipo erro de abertura final. Fonte: Duggal et al (1996).

1.1.13 Eliminando ou Minimizando os Defeitos da Perfilação

A solução para os problemas presentes no processo de perfilação a frio pode ser examinada de duas perspectivas: a primeira é analisando o processo como um todo, de forma global e a segunda é analisando a deformação de seções transversais ao longo do processo, de maneira local. Para um dado perfil, um possível problema de conformação mecânica, tal como torção ou ondulação, pode ser examinado em perspectiva global, considerando todos os estágios ou passes do processo baseando-se no projeto do ferramental cilíndrico ou em perspectiva local, ou seja, após o ferramental cilíndrico ter sido testado sobre uma perfiladeira, as modificações devem ser realizadas em cada gabinete de sustentação para eliminar ou minimizar o problema.

Normalmente, quando os operadores vêem uma perfiladeira se esforçando para modelar perfis aceitáveis, eles tendem a iniciar uma forma de eliminar os defeitos fazendo ajustes na extremidade de saída da máquina, isto pode levar a perfiladeira a produzir peças ainda piores. Se foi constatado que os rolos moldadores são capazes de produzir o perfil correto, e estão montados sobre uma perfiladeira correta, então os problemas apresentados nas peças perfiladas são gerados nos passes iniciais que não estão ajustados corretamente para realizarem suas tarefas no processo. Portanto, deve-se buscar eliminar ou reduzir os defeitos na extremidade de entrada da perfiladeira, como, por exemplo, utilizando ou ajustando o alinhador (Figura 1.27), que pode remover defeitos como o empenamento vertical e o empenamento lateral ao longo do comprimento da peça e também eliminar a torção em perfilação de peças assimétricas.



Figura 1.27: Alinhador na extremidade de entrada da perfiladeira.

As ondulações freqüentemente ocorrem quando são perfiladas peças de materiais de espessura fina. Para evitar este tipo de problema, deve-se determinar e buscar manter uniforme a deformação longitudinal através de toda a seção transversal. A quantidade excessiva de conformação mecânica sofrida pela chapa em cada gabinete de sustentação também afeta a formação das ondulações, portanto um projeto adequado pode minimizar a diferença de deformação longitudinal entre a aresta lateral livre da aba e a linha de centro vertical da chapa, melhorando a retidão da peça produzida.

O erro de abertura final é causado pela mudança na restrição geométrica imposta ao material nas extremidades de entrada e saída da peça perfilada. Um método simples para minimizar este tipo de problema é reduzir a quantidade na mudança de restrições, ou seja, reduzir os incrementos do ângulo de dobra em cada passe, conseqüentemente aumentando o número de passes para obter o mesmo perfil final desejado. Uma outra abordagem para se conseguir eliminar este tipo de defeito é minimizar a quantidade de conformação mecânica no último passe da perfilação.

1.1.14 Vantagens e Limitações do Processo de Perfilação a Frio

As peças modeladas por perfilação a frio possuem como característica a precisão em suas dimensões além do ótimo acabamento superficial o que freqüentemente elimina a necessidade de um acabamento superficial adicional.

O processo de perfilação a frio é extremamente versátil quanto às formas e perfis finais

possíveis de serem obtidas nas peças produzidas. Entretanto, este processo não pode ser utilizado para produzir peças com seções transversais que variem ao longo de seu comprimento ou que apresentem dimensões diferentes na extremidade de entrada em relação à de saída, mesmo que o perfil da seção transversal seja mantido igual.

A natureza contínua do processo de perfilação a frio aliada à alta velocidade conseguida no mesmo, o torna um meio de produção econômico para grandes volumes de peças.

É quase ilimitado o comprimento das peças possíveis de serem perfiladas. Essas limitações são impostas pela capacidade de manejo e remessa do material de uma determinada indústria.

Operações secundárias podem ser incorporadas à linha de produção do processo, reduzindo os custos de manejo e processo. Por exemplo, prensas de pré-estampagem, antecedendo a perfilação, permitem que furos sejam feitos no material que será perfilado em locais prédeterminados, isso se torna vantajoso ao processo, pois se esses furos estiverem localizados em áreas de difícil acesso na peça perfilada, sua realização em um processo posterior a perfilação seria muito difícil ou impossível.

Um mesmo ferramental cilíndrico pode ser utilizado para perfilar diferentes materiais.

Quase todos os materiais dobráveis podem ser perfilados, sendo o processo limitado a materiais com espessura constante dentro de uma escala entre 0,2 mm e 6,0 mm.

1.1.15 Aplicações

O processo de perfilação a frio é capaz de produzir peças precisas com os mais variados perfis de seções transversais possíveis para os mais diversos tipos de aplicações, atendendo muitos segmentos da indústria, tais como: de construção civil, automobilística, de instalações comerciais, de fabricantes de esquadrias, de carrocerias e de equipamentos industriais, entre outras. Na Figura 1.28 é mostrada uma porta de metal onde todos os seus componentes estruturais foram produzidos através do processo de perfilação a frio.



Figura 1.28: Produção de portas de metais com componentes estruturais produzidos pelo processo de perfilação a frio: (a) Batentes; (b) Montagem; (c) Produto final.

1.2 Objetivos

Observando o processo de perfilação a frio de chapas de metal pré-estampadas foi possível constatar no momento em que a perfiladeira parava o avanço da chapa para que o corte da peça pudesse ser realizado que as arestas laterais dos furos pré-estampados na região da base da chapa de metal apresentavam ondulações gerando um estreitamento da largura do estampo (Figura 3.1). Assim, traçamos como objetivo deste trabalho analisar através de simulações numéricas do processo de perfilação a frio a distribuição da tensão longitudinal presente na região da base das chapas durante sua modelagem a fim de compreender os motivos pelos quais as arestas laterais dos furos furos estavam ondulando.

Primeiramente simulamos numericamente o processo de perfilação a frio com as mesmas características geométricas e parâmetros da perfiladeira real onde foram observadas as ondulações nas chapas perfiladas. Nesta simulação, como na perfiladeira real, o perfil longitudinal é retilíneo da linha de centro vertical.

Após analisarmos os resultados das tensões longitudinais presentes na região da base da chapa simulada, tivemos a idéia de simular o processo de perfilação a frio com um perfil longitudinal curvilíneo, idêntico ao apresentado pelas chapas colhidas para análise experimental. Assim, utilizando os dados obtidos nas medições experimentais, que serão abordadas no Capítulo

3, realizamos uma nova simulação adotando o perfil longitudinal curvilíneo e analisamos novamente o comportamento da tensão longitudinal na região da base da chapa simulada para podermos comparar com os resultados da simulação com o perfil longitudinal retilíneo.

Após realizarmos as comparações dos resultados, criamos e realizamos novas simulações que apresentassem configurações de arranjo e montagem dos rolos moldadores possíveis de serem aplicados à perfiladeira real mantendo o perfil longitudinal curvilíneo.

Tendo analisado e comparado os resultados de todas as configurações de perfiladeiras simuladas, adotamos uma determinada configuração para otimizá-la através do método de tentativa e erro nas simulações numéricas, ou seja, buscamos minimizar o tipo de tensão longitudinal encontrada na região da base da chapa simulada com o perfil longitudinal retilíneo da linha de centro vertical, até então supondo que estas fossem responsáveis pela ondulação das arestas laterais dos furos pré-estampados na região da base da chapa de metal perfilada industrialmente.

Para que as suposições feitas em torno do tipo de tensão responsável pelo deslocamento transversal das arestas laterais dos furos pudessem ser comprovadas, foram realizadas as duas últimas simulações numéricas, agora com a presença do furo pré-estampado na região da base das chapas simuladas, uma para o perfil longitudinal retilíneo da linha de centro vertical e outra para o perfil longitudinal curvilíneo.

Por fim, os resultados das duas últimas simulações foram analisados e comparados para que nossas suposições quanto ao tipo de tensão responsável pelo deslocamento transversal das arestas laterais dos furos localizados na base das chapas perfiladas fossem confirmadas.

1.3 Organização da Dissertação

Neste Capítulo 1 são apresentados: uma breve introdução do processo de perfilação a frio, as definições básicas envolvidas neste tipo de processo de conformação mecânica e por fim, os objetivos.

No Capítulo 2 é mostrado um levantamento bibliográfico dos principais trabalhos relacionados ao assunto, destacando os resultados mais importantes obtidos por cada um.

No Capítulo 3 é relatado como o procedimento das medições experimentais das chapas de metal retiradas da perfiladeira fora realizado.

No Capítulo 4 são descritos: a formulação aplicada ao software MSC Superform 2002, as simulações do processo de perfilação a frio realizadas e os resultados obtidos.

No Capítulo 5 as conclusões baseadas nas análises dos resultados das simulações numéricas são expostas e para que este estudo possa ter continuidade, trabalhos futuros foram propostos.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

O estudo do processo de perfilação a frio tem evoluído graças ao desenvolvimento de técnicas numéricas. Alguns pesquisadores desenvolvem seu próprio programa computacional enquanto que outros usam pacotes comercialmente disponíveis para realizarem simulações do processo de perfilação a frio a fim de analisar o comportamento do material durante sua conformação mecânica.

Um dos pioneiros neste campo foi Kiuchi (1989). Para analisar o comportamento da superfície conformada da chapa de metal, ele desenvolveu um sistema de simulação computadorizada para o processo de perfilação a frio, onde uma função de forma senoidal foi utilizada para descrever o deslocamento da extremidade lateral da superfície localizada no meio da espessura da chapa ao longo de dois gabinetes de sustentação consecutivos. A energia de deformação dissipada foi minimizada em relação aos parâmetros geométricos para obter a forma otimizada nesta abordagem cinemática. Esse sistema de simulação foi desenvolvido para otimizar os perfís dos rolos moldadores, suas geometrias e as seqüências dos passes. Através da análise das linhas de fluxo dos elementos da extremidade da aba da chapa, pode-se prever se surgirá ou não defeitos nesta região como ondulação, que é uma forma de flambagem. Este tipo de defeito geralmente ocorre quando excessivos alongamentos na extremidade da aba da chapa estão presentes durante o processo de perfilação a frio e uma vez ocorrido essas ondulações, no caso de tubos perfilados, a soldagem de ambas as extremidades se torna muito difícil ou até impossível. Portanto, é muito importante fazer com estas deformações longitudinais nas extremidades laterais

da chapa sejam tão pequenas quanto possíveis. Kiuchi mostrou que conforme a distância entre os gabinetes de sustentação aumenta, a deformação longitudinal sofrida pelas extremidades da aba da chapa diminui, e que quanto maior o número de gabinetes de sustentação, mantendo constante a distância entre eles, menor será também a deformação longitudinal nas extremidades da aba da chapa de metal para se obter a mesma seção transversal no produto final. Em um artigo mais recente Kiuchi et al. (1995), utilizando o mesmo sistema de simulação, mostraram que as maiores deformações transversais ocorrem nas linhas de dobra e essas deformações transversais aumentam com o aumento da largura da chapa de metal conformada.



Figura 2.1: Curva do ângulo de dobra, onde o comprimento da região deformada define a região B. Fonte: Panton et al (1992).

Panton et al. (1992) introduziram a chamada curva do ângulo de dobra (Figura 2.1), um novo método para indicar a severidade no processo de perfilação, que descreve a variação do ângulo de dobra em função da distância longitudinal na região da aba da chapa entre dois gabinetes de sustentação consecutivos. Eles definiram através desta curva do ângulo de dobra que o comprimento do passe pode ser dividido em 3 regiões (Figura 1.19): região I, onde o ângulo de dobra na aba da chapa permanece constante, região II, onde o ângulo de dobra varia, mas a chapa não está em contato com os rolos e a região III, onde o ângulo de dobra varia como uma função da geometria do rolo. A região II somada a região III, ou seja, a região B da Figura 2.1, define um comprimento chamado por Bhattacharyya et al. (1984) de comprimento da região deformada. Eles mostraram que a deformação longitudinal na aba da chapa apresenta valores maiores nas regiões mais afastadas da linha de dobra (Figura 1.19), ou seja, mais próximas da extremidade

lateral da chapa, e estas deformações longitudinais, em perfilação de canais, apresentam um pico na seção transversal da chapa de metal, onde esta entra em contato com o rolo moldador, ou seja, no ponto de contorno entre as regiões II e III (Figura 1.19). Este pico da deformação longitudinal é reduzido quando o diâmetro dos rolos moldadores é aumentado. Os resultados analíticos foram idênticos aos obtidos nos experimentos e observados na prática da perfilação. Zhu et al. (1996) usaram este método para analisar o efeito das variáveis geométricas tal como a espessura da chapa, o ângulo de dobra e o diâmetro dos rolos moldadores sobre a deformação longitudinal sofrida pela aba das chapas de metal perfiladas. Eles concluíram que o comprimento da região deformada é maior em materiais mais finos, que aumentando o incremento do ângulo de dobra entre dois gabinetes de sustentação aumenta o pico da deformação longitudinal, aumentando também o comprimento da região deformada. É por essa razão que na prática não se usa incrementos muito grandes do ângulo de dobra em um único passe. Mostraram que em uma operação onde o ângulo de dobra é aumentado sempre por um mesmo valor, ou seja, onde o incremento do ângulo de dobra é constante, os picos de deformação longitudinal serão maiores conforme o ângulo de dobra inicial se aproxima de 90°, por esta razão pequenas conformações devem ser deixadas para os últimos passes e por fim mostraram que aumentando o diâmetro do rolo moldador inferior, consequentemente aumentando o comprimento de contato entre a chapa e o rolo moldador, diminui a severidade da perfilação reduzindo o pico da deformação longitudinal.

Nefussi e Gilormini (1993) propuseram uma abordagem cinemática, ou seja, com deslocamento longitudinal da chapa, para predizer a forma otimizada e o comprimento da região deformada de uma chapa de metal durante a perfilação a frio antes do primeiro gabinete de sustentação, aplicado em material rígido-plástico considerando o encruamento. A superfície da chapa foi gerada pela simulação entre dois gabinetes de sustentação consecutivos e o campo de velocidade foi então definido sobre esta superfície. Eles analisaram o comportamento do comprimento da região deformada em relação à variação do incremento do ângulo de dobra e à largura da aba em um único passe, ou seja, o ângulo de dobra variou de 0° ao valor imposto no primeiro gabinete de sustentação, e mostraram que para o incremento do ângulo de dobra variando de 20° a 60°, o comprimento da região deformada sofreu pequenas variações, em torno de 1 milímetro para um total de 24 milímetros de comprimento da região deformada, e que este

atingiu seu valor máximo para o incremento do ângulo de dobra igual a 40°. Mostraram também que se mantendo constante o valor do incremento do ângulo de dobra em 30° o comprimento da região deformada é quase linearmente proporcional à largura da aba. Em um artigo mais recente Nefussi et al. (1997) estenderam este método cinemático para materiais elásto-plásticos utilizando o modelo de Prandtl-Reuss, incluindo o critério de escoamento de von Mises, que mais tarde foi aplicado por Nefussi et al (1999) para simular o processo de perfilação a frio de tubos circulares.

Senanayake et al. (1994) usaram um pacote comercial, o "MARC/MENTAT", baseado no método de elementos finitos para simular o processo de perfilação a frio e demonstraram que a maioria das suposições feitas no projeto da perfiladeira poderia ser eliminada tendo um conhecimento suficiente do comportamento das deformações na peça de trabalho. Na parte experimental as deformações elásticas foram medidas usando "strain gauges" enquanto que as deformações plásticas foram determinadas através de uma técnica visual computacional chamada método de "Grid". Eles concluíram que, na região da aba da chapa de metal, tanto as deformações longitudinais quanto as transversais apresentam seus picos nas posições que antecedem as linhas de centro de rotação (Figura 1.17), havendo uma rápida redução dos valores das deformações nas posições logo após cada gabinete de sustentação. Concluíram também que quanto maior o número de passes ou quanto maior o comprimento total entre os gabinetes de sustentação para se obter o perfil final, mais fácil será a operação de conformação progressiva.

Brunet et al. (1996) também desenvolveram um sistema de simulação computadorizada que foi utilizado para analisar o comportamento da deformação na aba da chapa de metal ao longo de todo o processo de perfilação, a fim de se obter uma otimização do projeto dos perfis dos rolos moldadores. O projeto do sistema foi baseado no método de elementos finitos aplicado ao estado plano de deformação para a dobra 2D nos rolos, combinado com a formulação de Kiuchi (1989) para predizer as deformações longitudinais 3D do processo para material elasto-plástico, entre uma série de quatro gabinetes de sustentação. A geometria modelada e a distribuição das deformações preditas pela simulação foram comparadas com resultados de experimentos realizados anteriormente e boas aproximações foram alcançadas. Seções de canais de vários tipos e complexidades foram estudadas. Eles mostraram que a região da base de uma chapa perfilada

com um perfil trapezoidal sofre deflexão na direção longitudinal, e concluíram que em um projeto de uma perfiladeira se deve buscar o máximo de efeito residual de retorno elástico durante o processo de perfilação a frio para evitar a presença de tensão residual longitudinal que é responsável pela deflexão da base na chapa. Com este mesmo sistema, Brunet et al. (1998) mostraram que para um mesmo comprimento de passe, quanto maior o incremento do ângulo de dobra maior será o pico de deformação longitudinal da membrana, esta corresponde à média dos valores das deformações superficiais longitudinais obtidas sobre ambas as superfícies, superior e inferior, na extremidade da aba.

Duggal et al. (1996) desenvolveram outro programa, denominado "Roll Forming Profile Analysis and Simulation Software (RFPASS)", baseado no mecanismo de deformação. Eles não implementaram o método de elementos finitos no código do programa por considerarem que com isso seria necessário um elevado tempo computacional para se obter uma solução para o problema tridimensional, mesmo considerando um único passe. O método desenvolvido para este programa computacional foi o de diferenças finitas com uma formulação elasto-plástica, baseado no modelo matemático de Kiuchi (1989). Os resultados das simulações foram comparados com resultados experimentais encontrados na literatura. Foi mostrado que aumentando o número de gabinetes de sustentação necessário para se perfilar um mesmo perfil final, as deformações longitudinais na aba da chapa são reduzidas. Mostraram também que para obter um perfil de canal em U quanto maior o incremento do ângulo de dobra utilizado maior serão as deformações longitudinais encontradas na região da aba da chapa simulada, já a deformação transversal apresentou seus picos na linha de dobra e foi diretamente proporcional ao valor do ângulo de dobra na chapa.

Heislitz et al. (1996) usaram um programa comercial, o "PAM-STAMP", com um código baseado no método de elementos finitos para simular e projetar o processo de perfilação a frio. Os resultados das simulações foram comparados com resultados de experimentos realizados no "Institute for Prediction Technology" na Universidade de Darmstadt, Alemanha. Nesta simulação a chapa foi puxada através dos rolos com velocidade constante, o atrito entre as superfícies de contato foi desprezado e a rotação dos rolos moldadores também não foi considerada. Eles mostraram que quanto mais afastado da linha de dobra, ou seja, mais próximo da extremidade da aba, maiores serão as deformações longitudinais encontradas na chapa. Mostraram também que essas deformações longitudinais crescem continuamente até alcançarem um valor máximo, chamado de pico, instantes antes da passagem pela linha de centro de rotação do gabinete de sustentação. Logo após, este valor da deformação longitudinal diminui devido à reversão do sentido da deformação e ao efeito residual de mola. Eles gastaram em média 250 horas para finalizar a simulação da perfilação de um canal em U de 0° à 90° através de três de passes utilizando incremento do ângulo de dobra igual a 30°, tornando-o impraticável para aplicações industriais.

Liu et al. (1996) propuseram um método de tira finita baseado em uma função deslocamento na direção longitudinal aplicado para material elásto-plástico para simular a perfilação de tubos. Este método é um tipo de método de elementos finitos onde o elemento pode ser tratado como uma tira e usado para analisar problemas de estrutura. Os resultados foram coerentes com os encontrados experimentalmente. Este método foi utilizado por Han et al. (2000) para estudar as deformações e tensões na membrana nas direções transversal e longitudinal na região da aba de uma chapa de metal com seção transversal final assimétrica, ou seja, com um perfil em U onde uma aba possui a largura "a" (Figura 1.26) maior que a outra. Eles concluíram que a aba de menor largura apresentou maiores valores de deformação transversal na membrana e menores valores para a deformação longitudinal, portanto esta aba está sujeita a maiores tensões transversais e a menores tensões longitudinais em relação a aba maior em uma mesma distância longitudinal. Assim, para evitar que estas diferenças de tensões e deformações provoquem distúrbios nas seções dos produtos finais, o ângulo de dobra na aba menor deve ser maior que o da aba maior em um mesmo passe. Mais tarde, Han et al. (2001) utilizaram o mesmo método para estudar o efeito de parâmetros da perfilação como o incremento do ângulo de dobra, a espessura da chapa, a largura da aba e a distância entre os gabinetes de sustentação sobre a deformação longitudinal na membrana da chapa de metal na região da aba. Eles mostraram que o pico da deformação longitudinal na membrana aumenta com o ângulo de dobra, com a espessura da chapa e com o limite de escoamento do material e diminui com a largura da aba e com o aumento da distância entre os gabinetes de sustentação. Os resultados obtidos foram consistentes aos encontrados na prática e o comportamento da deformação longitudinal em relação aos parâmetros estudados foi análogo ao obtido por Zhu et al. (1996).

Watari e Ona (1998) desenvolveram um estudo que analisou a influência das características geométricas de um furo retangular pré-estampado na região da aba da chapa de metal na formação de ondulação que é um tipo de defeito encontrado no processo de perfilação a frio. Foi mostrado que a ondulação tende a ocorrer com o aumento do comprimento do furo e a aumentar drasticamente com o aumento da largura do furo e que quanto mais afastado o furo estiver da extremidade da aba da chapa, ou seja, mais próximo da linha de dobra, menor a ocorrência de ondulações na chapa.

Hong et al. (2001) desenvolveram um programa de simulação para analisar o processo de perfilação. O programa é baseado no método de elementos finitos tridimensionais sob a condição cinemática de regime permanente. Eles estudaram o comportamento do comprimento da região deformada na chapa ao longo do processo e observaram que o comprimento da região deformada depende da espessura da chapa, das propriedades do material, dos diâmetros dos rolos moldadores, da taxa de deformação da chapa e da taxa de alimentação da chapa. Para validar o programa eles compararam os resultados simulados para a deformação longitudinal com resultados experimentais encontrados na literatura. Eles concluíram que se a distância entre os gabinetes de sustentação for maior que o comprimento da região deformada aumenta o efeito residual de retorno elástico na chapa, enquanto que para uma distância menor que o comprimento da região deformada, as chances de ocorrer ondulações na aba da chapa perfilada são maiores.

Capítulo 3

Análise Experimental

3.1 Características do Processo de Perfilação a Frio Real

Este trabalho foi motivado pela observação do processo de perfilação a frio de chapas de metal pré-estampadas. No momento em que a chapa parava seu avanço na perfiladeira para que o corte da peça pudesse ser realizado era possível observar nitidamente entre os gabinetes de sustentação que as arestas laterais dos furos pré-estampados na região da base da chapa apresentavam ondulações (Figura 3.1), gerando um estreitamento de sua largura ao longo de seu comprimento. Assim, resolvemos que este trabalho seria direcionado ao estudo da região da base da chapa perfilada. Para iniciar, colhemos então algumas chapas de metal sendo perfiladas para analisá-las.



Figura 3.1: Ondulações nas arestas laterais dos furos pré-estampados nas regiões da base e das abas.

As chapas de metal perfiladas e analisadas possuíam um perfil final do tipo canal em U simétrico em relação à linha de centro vertical e foram conformadas mecanicamente por uma perfiladeira com mancais externos através de 7 passes, sendo todos os comprimentos dos passes iguais a 330 mm e com os seguintes ângulos de dobra em cada gabinete de sustentação mostrados na Tabela 3.1.

Gabinete de sustentação	1	2	3	4	5	6	7	8
Posição longitudinal [mm]	0	330	660	990	1320	1650	1980	2310
Ângulo de dobra	0°	7,5°	15°	30°	45°	60°	75°	90°

Tabela 3.1: Posicionamento de cada gabinete de sustentação na perfiladeira com seus respectivos ângulos de dobra.

A velocidade de avanço ou taxa de alimentação do material aplicada ao processo de perfilação a frio foi de 400 mm·s⁻¹.

O canal em U (Figura 3.2) do perfil final da chapa perfilada apresentou as seguintes dimensões: 70 mm de largura das abas (**a**) e 24 mm de largura da base (**w**).



Figura 3.2: Perfil em canal em U, onde a representa a largura da aba e w a largura da base.

O material de trabalho conformado mecanicamente pela perfiladeira foi o aço ABNT 1020 na forma de chapas laminadas a frio com espessuras de 0,60 mm, que foi alimentado da bobina á perfiladeira sem sofrer tratamento térmico.

3.2 Medições Experimentais

Para que a chapa de metal pré-estampada pudesse ser analisada foi preciso retirá-la da perfiladeira, para isso, primeiramente a perfiladeira foi desligada interrompendo o avanço da chapa. Para que as seções transversais da chapa ao longo da perfiladeira fossem mantidas, a chapa foi devidamente imobilizada, em seguida ela foi então cortada nas extremidades de entrada e de saída da perfiladeira. Após a realização dos cortes, os rolos moldadores superiores foram retirados (Figura 3.3) e por fim foi realizada a retirada da chapa da perfiladeira. Para que outras chapas fossem colhidas para análise, os rolos moldadores foram recolocados na perfiladeira, esta foi religada e uma nova quantidade de material foi alimentado ao processo. Assim, repetiu-se o procedimento à partir do desligamento da perfiladeira. Foram colhidas seis chapas para análise, todas elas do mesmo material e com as mesmas dimensões. A Figura 3.4 mostra uma das chapas retirada da perfiladeira para análise.



Figura 3.3: Chapa de metal na perfiladeira sem os rolos moldadores superiores



Figura 3.4: Chapa de metal retirada da perfiladeira com as amarras.

Ao serem apoiadas, pode se constatar que todas as chapas colhidas para análise apresentaram uma leve curvatura no perfil longitudinal da linha de centro vertical em relação ao eixo longitudinal de perfilação, esta curvatura pode ser vista na Figura 3.5 onde a linha azul representa o perfil longitudinal curvilíneo da linha de centro vertical apresentado pela chapa de metal retirada da perfiladeira, a linha vermelha representa o perfil longitudinal retilíneo da linha

de centro vertical quando a chapa está na perfiladeira sendo modelada e a área amarela mostra a diferença entre os dois perfis citados anteriormente. A extremidade da chapa no lado direito da Figura 3.5 corresponde à extremidade de entrada da perfiladeira, ou seja, nesta região a chapa ainda não sofreu conformação mecânica e a extremidade da chapa no lado esquerdo da mesma figura corresponde à extremidade de saída da perfiladeira, portanto nesta região a chapa já está com o perfil final desejado da seção transversal.



Figura 3.5: Perfil longitudinal curvilíneo da linha de centro vertical em uma chapa de metal retirada da perfiladeira.

Para efeito de simplificação a fim de tornar este texto menos repetitivo e cansativo de ser lido a partir deste parágrafo, quando citado perfil longitudinal curvilíneo, perfil longitudinal retilíneo e desvio entre os perfis subentende-se perfil longitudinal curvilíneo da linha de centro vertical da chapa de metal retirada da perfiladeira para análise, perfil longitudinal retilíneo da linha de centro vertical da chapa de metal durante seu processo de perfilação a frio e a distância vertical entre os perfis longitudinais curvilíneo e retilíneo em cada posição dos gabinetes de sustentação da perfiladeira respectivamente.

Com a observação do perfil longitudinal curvilíneo apresentado por todas as 6 chapas imobilizadas e retiradas da perfiladeira, supomos então que quando a chapa se encontra na perfiladeira, onde as restrições geométricas impostas pelos rolos moldadores na direção vertical estão presentes em cada gabinete de sustentação, isso força o perfil longitudional da chapa ser retilíneo, gerando um estado de tensão compressivo na região da base da chapa de metal que seria responsável pelo deslocamento transversal das arestas laterais dos furos pré-estampados apresentado pelas chapas durante o processo de perfilação a frio. Portanto achamos importante medir os valores dos desvios entre os perfis longitudinais para cada chapa colhida para análise. Após as chapas serem retiradas da perfiladeira marcas em azul (Figura 3.6) foram feitas na região da base, obviamente separadas por 330 mm, para indicar o posicionamento da linha de centro de rotação de cada um dos 8 gabinetes de sustentação. Essas marcas foram utilizadas como pontos de referência nas medições dos desvios entre os perfis.

O sistema de coordenadas cartesianas adotado para este estudo teve sua origem fixada no ponto de intersecção da linha de centro vertical da chapa com a linha de centro de rotação do primeiro gabinete de sustentação, onde o ângulo de dobra corresponde a 0°. A direção e o sentido dos eixos X, Y e Z foram posicionados conforme mostra a Figura 3.7, assim, a direção de avanço do material na perfiladeira, definida como direção longitudinal, corresponde ao eixo X do sistema de coordenadas cartesianas, sendo seu sentido positivo o mesmo sentido de deslocamento da chapa durante o processo de perfilação a frio. Desta forma foi possível trabalhar com simetria nas simulações realizadas após as medições experimentais terem sido concluídas, uma vez que as chapas são simétricas em relação ao plano definido pelos eixos X e Y. Vale lembrar que o perfil longitudinal retilíneo é paralelo ao eixo X.



Figura 3.6: Marcas realizadas nas chapas indicando o posicionamento de cada gabinete de sustentação.



Figura 3.7: Direção e sentido dos eixos do sistema de coordenadas cartesianas adotado para este trabalho.

3.2.1 Medições dos Desvios entre os Perfis

Para realizar as medições dos desvios entre os perfis ao longo do eixo X foram utilizados uma caneta a lazer e uma régua em acrílico transparente. A caneta a lazer foi fixada sobre uma pequena barra de metal, que serviu de suporte. O feixe de lazer emitido pela caneta representou a posição do eixo X ao longo da chapa, este feixe foi calibrado com a régua, onde uma etiqueta branca foi colada para que os pontos que indicavam as distâncias dos desvios pudessem ser marcados (Figura 3.8).

A Figura 3.9 mostra como a chapa apoiada para que as medições pudessem ser realizadas, nela podemos observar que a chapa esta apoiada com a seção transversal do tipo canal em U de ponta cabeça, ou seja, se nesta figura pudéssemos ver o sistema de coordenadas cartesianas, o sentido positivo do eixo Y estaria voltado para baixo. Isto foi feito para facilitar as marcações das posições dos gabinetes de sustentação assim como as medições das distâncias dos desvios.



Figura 3.8: Equipamento utilizado para medir as os desvios entre os perfis.



Figura 3.10: Posicionamento da caneta a lazer na marca referente ao primeiro gabinete de sustentação.



Figura 3.9: Chapa sustentada para medições.



Figura 3.11: Esquema de como foram feitas as medições dos desvios entre os perfis.

As medições dos desvios entre os perfis foram realizadas nas posições das marcas que indicam o posicionamento dos gabinetes de sustentação, portanto para cada chapa foram medidos

sete valores de desvio. A caneta a lazer foi posicionada na marca referente ao primeiro gabinete de sustentação (Figura 3.10), pois neste o ângulo de dobra é zero, uma vez que ele foi utilizado apenas para auxiliar no alinhamento vertical da entrada da chapa na perfiladeira.

Os desvios entre os perfis foram medidos posicionando o plano da régua que contém a etiqueta branca perpendicularmente ao plano XZ e paralelo ao plano YZ nas marcas das chapas de maneira que o feixe de lazer pudesse ser projetado na etiqueta (Figura 3.11). Na Figura 3.12 podemos ver em detalhe o ponto do feixe de lazer projetado na etiqueta branca.



Figura 3.12: Detalhe da projeção do feixe de lazer na etiqueta branca colada na régua.



Figura 3.13: Pontos marcados na etiqueta para que as distâncias possam ser medidas através de uma régua graduada.

Após os pontos serem marcados na etiqueta (Figura 3.13), com o uso de uma régua graduada a distância referente a cada gabinete de sustentação foi medida. Este procedimento foi realizado para as seis chapas de maneira idêntica e os valores das distâncias para cada chapa em cada gabinete de sustentação podem ser vistos na Tabela 3.2 e na forma de gráfico na Figura 3.14.

A etapa seguinte deste trabalho foi realizar uma análise numérica através de simulações do processo de perfilação a frio utilizando as mesmas características geométricas e parâmetros apresentados pela perfiladeira real responsável pela conformação mecânica das seis chapas de metal colhidas para medição. A discussão sobre as simulações será tratada no próximo capítulo.

Gabinete Ângulo de de sustentação dobra	Ângulo	Posição	Desvios entre perfis medidos em Y [mm]									
	de dobra	no eixo X			M(P)	Desvio						
	dobra	[mm]	1	2	3	4	5	6	Media	Padrão		
1	0°	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2	7,5°	330	0	0	0	0	0	0	0	0		
3	15°	660	8,5	10,5	11,0	9,5	9,5	8,5	9,6	1,0		
4	30°	990	23,5	25,0	27,0	26,5	24,0	24,5	25,1	1,4		
5	45°	1320	41,0	44,0	45,0	46,5	42,0	45,5	44,0	2,1		
6	60°	1650	62,5	65,0	68,8	68,5	67,0	69,5	66,9	2,7		
7	75°	1980	87,0	90,0	93,5	92,5	93,0	94,5	91,8	2,8		
8	90°	2310	111,5	115,0	118,0	117,0	119,0	120,0	116,8	3,1		

Tabela 3.2: Valores dos desvios entre os perfís para cada chapa medida.



Figura 3.14: Gráfico dos desvios entre os perfis.

Capítulo 4

Análise Numérica

Para dar continuidade a este trabalho, após termos medidos os desvios entre os perfis das seis chapas de metal retiradas da perfiladeira, iniciamos as simulações do processo de perfilação a frio para analisar e compreender o comportamento da região da base na chapa simulada a fim de quantificar e qualificar a tensão longitudinal presente durante sua conformação mecânica. Estas simulações foram realizadas através do software MSC SuperForm 2002 desenvolvido pela MSC Softwares. Este aplicativo é baseado no método dos elementos finitos e é amplamente utilizado para simular os processos de fabricação.

4.1 Método dos Elementos Finitos

A principal finalidade do método dos elementos finitos é solucionar numericamente sistemas físicos complexos onde não haja a possibilidade de se obter uma solução analítica para a equação diferencial parcial que governa o problema. Isto ocorre através da discretização do sistema contínuo por elementos finitos, obtendo assim uma solução aproximada para o domínio analisado, ou seja, a idéia do método está em substituir uma solução complexa para todo o domínio pela superposição de soluções simples em subdomínios. Portanto, o método dos elementos finitos consiste em transformar um sistema de equações diferenciais parciais em um sistema de equações algébricas, que podem ser lineares ou não-lineares.

O processo de perfilação a frio modela o material de trabalho plasticamente, portanto um

software que tenha a capacidade de simular numericamente este tipo de processo de fabricação deve trabalhar com uma formulação apropriada tanto para o domínio linear quanto para o domínio não-linear. Este é o caso do software MSC Superform 2002 que é baseado no método dos elementos finitos. Para a **região elástica**, região I na Figura 4.1, onde a relação tensão-deformação é linear temos a seguinte representação matricial de um sistema de equações algébricas lineares gerado através da discretização de um sistema contínuo por elementos finitos:

$$[K]{U} = {F}$$

$$(4.1)$$

onde [K] é a matriz de rigidez global ou de coeficientes do sistema, $\{U\}$ é o vetor das incógnitas ou dos deslocamentos nodais e $\{F\}$ é o vetor das forças generalizadas aplicadas aos nós.

Para a **região plástica**, região II na Figura 4.1, onde a relação tensão-deformação é nãolinear, a discretização de um sistema contínuo não-linear por elementos finitos gera um sistema de equações algébricas não-lineares representado matricialmente da seguinte forma:

$$[K(U)]{U} = {F}$$
(4.2)

onde a matriz de rigidez global [K(U)] depende das incógnitas ou dos deslocamentos nodais.



Figura 4.1: Curva representativa da relação tensão-deformação obtida em um ensaio de tração unidimensional.

Estes sistemas de equações algébricas são solucionados através de procedimentos numéricos. O software Superform 2002 utiliza os métodos diretos, tais como, a decomposição de Crout e de Cholesky para solucionar os sistemas de equações algébricas lineares, já os sistemas de equações não-lineares são solucionados iterativamente pelo método de Newton-Raphson pleno. Estes métodos numéricos citados anteriormente são mostrados no Anexo I.

Para se chegar a esses sistemas de equação algébricas lineares ou não-lineares o software parte da Equação do Equilíbrio aplicada ao domínio:

$$\vec{\nabla} \cdot \boldsymbol{\sigma} + \vec{q} = 0 \tag{4.3}$$

Aplicando à Equação 4.3 o Princípio dos Trabalhos Virtuais (Anexo II) e introduzindo a discretização por elementos finitos, chega-se a seguinte formulação matricial integral global:

$$\int_{\forall} [B]^{T} [C] [B] d \forall \cdot \{U\} = \int_{\forall} [N] \{f_{V}\} d \forall + \int_{S} [N] \{f_{S}\} dS$$

$$(4.4)$$

onde:

$$[K] = \int_{\forall} [B]^{T} [C] [B] d\forall ,$$

$$\{F\} = \int_{\forall} [N] \{f_{V}\} d\forall + \int_{S} [N] \{f_{S}\} dS ,$$

 $\{U\}$ é o vetor das incógnitas ou dos deslocamentos nodais,

[N] é a matriz das funções de forma (Anexo IV),

[B] é a matriz das derivadas das funções de forma obtida das relações cinemáticas,

[C] é a matriz constitutiva ou das propriedades do material obtida das relações constitutivas, e

 $\{f_V\}$ e $\{f_S\}$ são os vetores das força de volume e força de superfície respectivamente.

Uma vez que o domínio \forall está discretizado em sub-domínios v através de elementos finitos então a Equação 4.4 pode ser representada de maneira elementar com a expressão:

$$\int_{v^{el}} [B]^T [C] [B] dv \cdot \{u\} = \int_{v^{el}} [N] \{f_v\} dv + \int_{s^{el}} [N] \{f_s\} ds$$
(4.5)

onde:

$$[k]^{el} = \int_{v^{el}} [B]^{T} [C] [B] dv$$

$$\{f\}^{el} = \int_{v^{el}} [N] \{f_{v}\} dv + \int_{s^{el}} [N] \{f_{s}\} ds$$

Neste trabalho, nas simualções foram utilizados elementos finitos 3-D hexaédricos lineares de 8 nós como pode ser visto no Anexo IV. Os elementos finitos assim como as funções de forma estão no sistema de coordenadas de referência (ξ,η,ζ), portanto a Equação 4.5 é transformada para o sistema de coordenadas de referência (ξ,η,ζ), resultando em:

$$\int_{V'} [B_{\xi}]^{T} ([J]^{-1})^{T} [C_{\xi}] [J]^{-1} [B_{\xi}] \det(J) d\xi d\eta d\zeta \cdot \{u\} = \int_{V'} [N] \{f_{v}\} \det(J) d\xi d\eta d\zeta + \int_{S'} [N] \{f_{s}\} \det(J_{s}) ds$$
(4.6)

onde:

[J] é a matriz Jacobiano mostrada no Anexo IV e det(J) é o seu determinante,

 $det(J_s)$ é o determinante do Jacobiano de uma superfície.

Por fim, para transformar o sistema de equações integrais elementares em um sistema de equações algébricas elementares, as integrais são solucionadas numericamente através do método de integração numérica de Gauss mostrado no Anexo IV. Para o elemento 3-D hexaédrico linear de 8 nós o software Superform 2002 utiliza 8 pontos de integração. Assim, uma vez determinada o sistema de equações algébricas matricial para todos os elementos monta-se o sistema de equações algébricas matricial global, que através de métodos numéricos discutidos no Anexo I o vetor das incógnitas ou dos deslocamentos nodais $\{U\}$ e as forças de reações contidas no vetor das forças generalizadas aplicadas aos nós $\{F\}$ são determinados.

Assim, uma vez determinados os deslocamentos, as deformações são calculadas através das relações cinemáticas e as tensões são calculadas através das relações constitutivas.

Para o domínio elástico, considerando os materiais isotrópicos, no software MSC Superform 2002 as equações constitutivas são governadas pela Lei de Hooke para material isotrópico, que generealizada para um carregamento 3-D é expressa da seguinte forma;

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2G \varepsilon_{ij} \tag{4.7}$$

onde:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \tag{4.8}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{4.9}$$

portanto na região elástica, o comportamento do material isotrópico pode ser completamente definido pelo módulo de Young (E) e pela razão de Poisson (v), esta corresponde a razão entre a deformação lateral e a deformação axial sofrida pelo material em um teste de tração axial. A matriz constitutiva e das derivadas das funções de forma elásticas podem ser vistas no Anexo IV.

As relações constitutivas para o domínio plástico no software Superform 2002 são obtidas para a formulação elasto-plástica considerando a regra de fluxo associado e as equações de Prandtl-Reuss que são desenvolvidas até se chegar a seguinte equação constitutiva:

$$d\sigma = \begin{bmatrix} C^{e} - \frac{\left(C^{e} \cdot \frac{\partial \sigma_{e}}{\partial \sigma}\right) \left(\frac{\partial \sigma_{e}}{\partial \sigma} \cdot C^{e}\right)}{H + \frac{\partial \sigma_{e}}{\partial \sigma} \cdot C^{e} \cdot \frac{\partial \sigma_{e}}{\partial \sigma}} \end{bmatrix} \cdot d\varepsilon$$
(4.10)

onde para a Equação 4.10,

$$[C^{ep}] = \begin{bmatrix} C^{e} - \frac{\left(C^{e} \cdot \frac{\partial \sigma_{e}}{\partial \sigma}\right) \left(\frac{\partial \sigma_{e}}{\partial \sigma} \cdot C^{e}\right)}{H + \frac{\partial \sigma_{e}}{\partial \sigma} \cdot C^{e} \cdot \frac{\partial \sigma_{e}}{\partial \sigma}} \end{bmatrix}$$
(4.11)

onde $[C^{ep}]$ e $[C^{e}]$ são as matrizes constitutivas elasto-plástica e elástica respectivamente, que são implementadas na Equação 4.5. A matriz constitutiva elástica é obtida das Equações 4.7. O procedimento completo para se obter a Equação 4.10 pode ser visto no Anexo V.

Para grandes deformações o software MSC Superform 2002 utiliza o método Lagrangeano Atualizado para obter a relação constitutiva que é formulada em função do tensor taxa de Truesdell da tensão de Cauchy ($\dot{\sigma}^T$) e do tensor taxa de deformação (*D*),

$$\dot{\sigma}_{ij}^{T} = C_{ijkl} D_{kl} \tag{4.12}$$

onde:

$$C_{ijkl} \approx C_{ijkl}^{ep} - \delta_{il}\sigma_{kj} - \sigma_{il}\delta_{kj}$$
(4.13)

onde C_{ijkl} é a matrix constitutiva para grandes deformações e C_{ijkl}^{ep} é a matriz constitutiva dada pela Equação 4.11. As definições dos tensores taxa de Truesdell e taxa de deformação são mostrados no Anexo VI.

Para definir se um determinado estado de tensão se encontra no domínio elástico ou plástico, o software MSC Superform 2002 utiliza o critério de escoamento de material isotrópico de von Mises discutido no Anexo III, onde foi mostrado que:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \sigma_y$$
(4.14)

onde σ_1 , σ_2 e σ_3 são as tensões principais de um tensor de tensão de Cauchy σ que define um

estado de tensão multiaxial e σ_y é a tensão de escoamento. No espaço de tensão 3-D o que antes representava um ponto na curva tensão-deformação para um estado de tensão unidimensional, agora representa uma superfície contínua chamada de superfície de escoamento mostrada no Anexo III. Para o critério de escoamento de von Mises essa superfície é cilíndrica. A superfície de escoamento é o contorno entre o domínio elástico e plástico.

Durante a deformação plástica a superfície de escoamento expande, translada, e distorce no espaço de tensão e esses deslocamentos das superfícies são definidos pelo comportamento do encruamento do material. Existem modelos para descrever a maneira como a superfície de escoamento varia durante a deformação plástica. O software MSC Superform 2002 utiliza o modelo de encruamento isotrópico discutido no Anexo III.

4.2 Modelagem Geométrica

Para simular numericamente o processo de perfilação a frio através do software Superform 2002 aplicamos simetria em relação ao plano XY (Figura 4.2) para reduzir o número de elementos finitos necessários para discretizar a chapa simulada, conseqüentemente reduzindo tempo gasto com as simulações.



Figura 4.2: Posição do sistema de coordenadas cartesianas nas simualçoes.

O ferramental cilíndrico formado pelos rolos moldadores foi considerado ser um corpo rígido e constituído por 9 gabinetes de sustentação (Figura 4.3), portanto 8 passes, onde os gabinetes de sustentação 1 e 2 servem apenas para sustentar a chapa não lhe conferindo deformação, desta forma a análise da tensão longitudinal na região da base das chapas simuladas foi realizada do segundo ao oitavo passe.



Figura 4.3: 9 gabinetes de sustentação gerados nas simulações com seus respectivos ângulos de dobra.

As dimensões dos rolos moldadores, os ângulos de dobra em cada gabinete de sustentação, a seqüência e o comprimento dos passes são os mesmos encontrados na perfiladeira real utilizada na perfilação das 6 chapas de metal medidas que foram discutidas no capítulo anterior.

A posição no eixo X da linha de centro de rotação e o ângulo de dobra para cada gabinete de sustentação aplicados às simulações do processo de perfilação a frio realizadas neste trabalho são dados na Tabela 4.1. A unidade de comprimento adotada nas simulações foi o milímetro, portanto, todas as dimensões geométricas citadas neste capítulo estão em milímetros.

Gabinete de Sustentação	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ângulo de Dobra	0°	0°	7,5°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Posição da linha de centro de rotação [mm]	-330	0	330	660	990	1320	1650	1980	2310

Tabela 4.1: Ângulos de dobra e posicionamento longitudinal dos gabinetes de sustentação aplicados às simulações.

Para facilitar a identificação dos rolos moldadores utilizados nas simulações deste trabalho, foram definidos os seguintes nomes referentes à Figura 4.4: rolo superior, rolo inferior e rolo lateral que correspondem as superfícies cilíndricas tipo 1, tipo 2 e tipo 3 respectivamente. Como pode ser visto na Figura 4.3, os gabinetes de sustentação 1 e 2 possuem apenas os rolos superior e inferior. Cada rolo moldador é definido por dois parâmetros geométricos: o diâmetro da base circular e a altura do cilindro como mostra a Figura 4.5, onde D_{rm} é o diâmetro e H_{rm} é a altura do

rolo moldador.



moldadores nas simulações: superfície tipo 1 = rolo superior;



Figura 4.5: Dimensões características dos rolos moldadores cilíndricos definidas pelo seu diâmetro e sua altura.

superfície tipo 2 = rolo inferior; superfície tipo 3 = rolo lateral: definidas pelo seu diâmetro e (a) vista lateral; (b) vista frontal; (c) vista em perspectiva.
Foram realizadas simulações do processo de perfilação a frio para 7 configurações de perfiladeiras, que diferenciaram entre si pelo posiocionamento vertical dos gabinetes de

perfiladeiras, que diferenciaram entre si pelo posiocionamento vertical dos gabinetes de sustentação ou pelo diâmetro dos rolos inferiores. Assim como no processo real a chapa simulada apresentou o perfil da seção transversal final do tipo canal em U para todas as configurações de perfiladeira simuladas. Com a utilização de simetria, o perfil final das chapas simuladas apresentou as dimensões mostradas na Figura 4.6. Cada configuração de perfiladeira simulada será detalhada mais tarde.

Para realizar as simulações, a chapa apresentou as seguintes dimensões (Figura 4.7) para todas as configurações de perfiladeiras:

Comprimento da chapa simulada (L_{ch}) = 2970 mm,

Largura da chapa simulada (W_{ch}) = 82 mm,

Espessura da chapa simulada (t) = 0,6 mm.



Figura 4.6: Perfil final das chapas simuladas com simetria.

Figura 4.7: Representação das dimensões da chapa simulada.

Na Figura 4.7 pode se ver que devido à simetria em relação ao plano XY a região em amarelo corresponde a região da base e a região em verde a região da aba na chapa simulada. Esta foi discretizada utilizando 6000 elementos finitos 3-D do tipo hexaédrico linear de 8 nós abordado no Anexo IV. Na figura 4.8.a pode se ver a chapa simulada discretizada pelos elementos finitos. A Figura 4.8.b mostra que a chapa está mais refinada próxima à linha de dobra e na região da base da chapa na direção transversal, isto foi feito com o intuito de melhorar a precisão dos resultados obtidos neste trabalho, uma vez que o mesmo foi voltado ao estudo do comportamento da tensão longitudinal na região da base da chapa simulada. Todos os elementos finitos aplicados à malha possuem 0,3 mm de altura (eixo Y), portanto, a chapa simulada também foi discretizada em sua espessura.



Figura 4.8: Chapa simulada discretizada por 6000 elementos finitos: (a) chapa completa; (b) detalhe da chapa com ângulo de dobra igual a 90°.

Nas simulações realizadas pelo software MSC Superform 2002 o efeito da temperatura não foi considerado conseqüentemente não havendo trocas de calor e o material aplicado aos elementos finitos que discretizaram a chapa foi o 1_0402_/C22, homogêneo e isotrópico, que corresponde ao aço ABNT 1020 e possui as seguintes propriedades mecânicas:

Para a região elástica:

- Módulo de Young ou de elasticidade:

 $E = 2,17 \times 10^5 MPa$

- Razão de Poisson:

v = 0,3

Para a região plástica, o software MSC Superform 2002 trabalha com encruamento multilinear possuindo uma base de dados para o material aplicado neste trabalho de forma que as curvas tensão-deformação sejam dependentes da temperatura e da taxa de deformação nas quais o material está sendo conformado nas simulações, assim, as propriedades como tensão de escoamento inicial e coeficiente de encruamento não foram especificadas nesta dissertação por utilizarmos um material selecionado da base de dados de materiais do software MSC Superform 2002 e não um material estabelecido por nós.

4.2.1 Simulações do Processo de Perfilação a Frio

A primeira simulação realizada neste trabalho foi para uma perfiladeira que apresentou as mesmas características geométricas da perfiladeira real. Para facilitar a nomenclatura de cada tipo de configuração de perfiladeira simulada neste trabalho, siglas foram usadas para identificá-las. Esta primeira configuração foi denominada de PLR que quer dizer perfil longitudinal retilíneo. Em todas as configurações de perfiladeiras a folga de projeto, definida na seção 1.1.2, imposta às simulações correspondeu à espessura da chapa simulada, ou seja, 0,6 mm.
a) Perfil Longitudinal Retilíneo - PLR

As dimensões geométricas dos rolos moldadores em cada gabinete de sustentação para a configuração PLR são dadas na Tabela 4.2, nela podemos observar que o diâmetro dos rolos moldadores superiores são todos iguais, ocorrendo o mesmo para os rolos inferiores e laterais. A Figura 4.9 mostra a modelagem geométrica da configuração PLR onde podemos observar o perfil longitudinal retilíneo da perfiladeira simulada como encontrado na perfiladeira real. Na Figura 4.9.a podemos ver que os centros de rotação de todos os rolos superiores estão alinhados verticalmente, ocorrendo o mesmo para os rolos inferiores.

	Gabinetes de Sustentação										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Rolo	Drm	200	200	200	200	200	200	200	200	200	
superior	Hrm	100	100	11	11	11	11	11	11	11	
Rolo	Drm	80	80	80	80	80	80	80	80	80	
Inferior	Hrm	100	100	12	12	12	12	12	12	12	
Rolo	Drm	-	-	80	80	80	80	80	80	80	
Lateral	Hrm	-	-	88	88	88	88	88	88	88	

Tabela 4.2: Dimensões geométricas da configuração PLR.



Figura 4.9: Representação da configuração PLR: (a) vista lateral; (b) vista em perspectiva.

Inicialmente antes de realizar a simulação do processo de perfilação a frio propriamente dito se fez necessário posicionar a chapa entre os rolos moldadores (Figura 4.9). Uma vez que se conseguiu um deslocamento médio máximo da chapa nas simulações de 360 mm e que seria necessário um deslocamento de 2640 mm da chapa para que a mesma entrasse no primeiro

gabinete de sustentação da perfiladeira e saísse pelo último estando assim a chapa em contato com todos os gabinetes de sustentação, tivemos que encontrar uma forma de posicionar a chapa na perfiladeira para que o processo de perfilação pudesse ser simulado e analisado em todos os passes. A solução encontrada foi impor um processo de dobramento à aba da chapa através de placas planas que se deslocaram contra o material, fixado pela base, na direção vertical ou horizontal conforme o ângulo de dobra imposto a aba. Este processo de dobramento foi finalizado com o deslocamento ou posicionamento dos rolos moldadores que formavam a configuração da perfiladeira desejada, estando a chapa posicionada de maneira adequada para que a simulação do processo de perfilação pudesse ser realizada com o início das rotações dos rolos moldadores. Este procedimento para posicionar a chapa entre os 9 gabinetes de sustentação foi aplicado para todas as configurações de perfiladeiras simuladas. O processo de dobramento simulado pode ser visto no Apêndice A.



Figura 4.10: Perfil longitudinal da chapa durante o processo de dobramentol: (a) chapa liberada do ferramental; (b) posicionamento inicial dos rolos superiores e inferiores; (c) deslocamento na vertical dos rolos superiores mantendo fixo os rolos inferiores; (d) chapa com o perfil longitudinal retilíneo devido às restrições impostas pelos rolos moldadores.



Figura 4.11: Configuração final da perfiladeira com a chapa posicionada entre os rolos moldadores, após o processo de dobramento.

Durante o processo de dobramento da chapa simulada foi possível observar que antes da última etapa de posicionamento dos rolos moldadores quando a chapa estava liberada do ferramental ela apresentava uma curvatura do perfil longitudinal (Figura 4.10.a) similar ao observado e medido nas 6 chapas de metal restringidas e retiradas da perfiladeira real. Portanto, antes de iniciar a simulação do processo de perfilação a frio propriamente dito, analisamos o comportamento da tensão longitudinal na região da base da chapa simulada ao final do processo de dobramento ou posicionamento da chapa na perfiladeira (Figura 4.11). Este procedimento foi realizado para todos os tipos de configurações de perfiladeiras simuladas.

Uma vez analisada o comportamento da tensão longitudinal para a chapa apenas dobrada, iniciamos então a simulação do processo de perfilação a frio impondo a rotação aos rolos moldadores. A alimentação ou avanço da chapa foi realizada através da rotação dos rolos moldadores que puxaram a chapa devido ao atrito existente entre suas superfícies de contato. Portanto, a velocidade de avanço da chapa nas simulações corresponde à velocidade linear imposta aos rolos moldadores, que neste trabalho foi de 400 mm·s⁻¹. Este valor de velocidade linear foi o mesmo utilizado na perfiladeira real e aplicado as demais configurações de perfiladeiras simulações foi de 0,1.

Nas simulações do processo de perfilação a frio foi possível obter um avanço máximo da chapa de aproximadamente 360 mm, o que foi suficiente para a realização deste estudo, pois como o comprimento dos passes é de 330 mm em toda a perfiladeira, então o comportamento da tensão sobre a chapa torna-se estável após um deslocamento de 330 mm da mesma, uma vez que a perfilação a frio é um processo contínuo. Assim, devido a esta natureza contínua do processo o nível de tensão encontrado na chapa para um deslocamento de 330 mm será semelhante à de um deslocamento de 660 mm, 990 mm ou maior. Desta forma, neste trabalho a tensão longitudinal foi analisada após a finalização do processo de dobramento e para um deslocamento longitudinal de 330 mm. Este procedimento foi adotado para todas as 7 configurações de perfiladeiras simuladas.

Para a configuração PLR de perfiladeira simulada, o nível da tensão longitudinal, ou seja, a componente do tensor de tensão σ na direção do eixo X (σ_{11}) presente na chapa pode ser visto na Figura 4.12, onde a Figura 4.12.a mostra o nível da tensão longitudional para o final do

processo de dobramento da chapa e a Figura 4.12.b mostra o nível da tensão longitudinal após um deslocamento longitudinal de 330 mm da chapa simulada. A unidade para todos os resultados de tensão apresentados neste trabalho é MPa.

Podemos ver na Figura 4.12 que para a configuração PLR, que representa a configuração da perfiladeira real, nossa hipótese levantada no capítulo 3 de que os deslocamentos transversais das arestas laterais dos furos pré-estampados na região da base das chapas de metal foram causadas pela presença de tensões de compressão nesta região durante a perfilação pode ser verdadeira, uma vez que a tensão longitudinal σ_{11} presente na região da base da chapa simulada tanto para o final do processo de dobramento quanto para um deslocamento longitudinal de 330 mm é compressiva, mas para que nossa hipótese seja realmente validada há a necessidade de se analisar e comparar os resultados para a chapa simulada nas demais configurações de perfiladeiras.

A Figura 4.13 mostra o nível da tensão longitudinal σ_{11} presente na superfície inferior da chapa simulada ao final do processo de dobramento, ou seja, a Figura 4.13 corresponde a Figura 4.12.a com uma rotação de 180° da chapa em torno de seu eixo longitudinal ou eixo X. Comparando a Figura 4.13 com a Figura 4.12.a podemos comprovar que o comportamento da tensão longitudinal é similar em ambas as superfícies da chapa simulada.

Uma vez comprovada nossa hipótese de que em um processo de perfilação a frio para uma perfiladeira com o perfil longitudinal retilíneo a tensão longitudinal presente na região da base é compressiva, tivemos a idéia então de transferir as medições feitas dos desvios dos perfis curvilíneos apresentados pelas 6 chapas analisadas experimentalmente para as simulações, ou seja, resolvemos realizar uma simulação do processo de perfilação a frio onde essa curvatura do perfil longitudinal observado nas chapas de metal retiradas da perfiladeira real fosse apresentada na própria perfiladeira durante a modelagem do material.



Figura 4.12: Nível da tensão longitudinal σ_{11} em MPa presente na chapa simulada para a configuração **PLR** de perfiladeira: (a) Ao final do processo de dobramento; (b) Após um deslocamento longitudinal de 330 mm.



Figura 4.13: Nível da tensão longitudinal σ_{11} em MPa presente na superfície inferior da chapa simulada para a configuração **PLR** de perfiladeira ao final do processo de dobramento

b) Perfil Longitudinal Curvilíneo 1 Ideal – PLC1Id

Depois de analisada os resultados da simulação da configuração PLR, o próximo passo foi desenvolver uma simulação onde a montagem dos rolos moldadores e o posicionamento dos gabinetes de sustentação gerassem uma perfiladeira com um perfil longitudinal curvilíneo da linha de centro vertical da chapa simulada seguindo os valores da média mostrados na Tabela 3.2 buscando validar nossa segunda hipótese de que uma vez que a chapa de metal quando restringida na seção transversal e retirada da perfiladeira real, portanto livre das restrições geométricas imposta pelos rolos moldadores, buscou o equilíbrio apresentando um perfil longitudinal curvilíneo, então se este fosse transferido para a perfiladeira, os níveis das tensões longitudinais compressivas presentes na região da base da chapa simulada seriam reduzidos em relação aos encontrados na simulação para a configuração PLR. Portanto, para esta nova configuração geométrica de perfiladeira os valores da média das 6 chapas dos desvios entre os perfis longitudinal retilíneo e curvilíneo da Tabela 3.2 foram aproximados como mostra a Tabela 4.3 e utilizados para gerar a perfiladeira com perfil longitudinal curvilíneo.

Gabinetes de	Ângulo	Posição da Linha de	Desvios entre perfis medidos em Y [mm]							
Sustentação	de Dobra	Centro de Rotação no Eixo X [mm]	Média	Desvio Padrão	Aproximação dos Valores da Média					
1	0°	-330	0	0	0					
2	0°	0	0	0	0					
3	7,5°	330	0	0	0					
4	15°	660	9,6	1,0	10					
5	30°	990	25,1	1,4	25					
6	45°	1320	44,0	2,1	44					
7	60°	1650	66,9	2,7	67					
8	75°	1980	91,8	2,8	92					
9	90°	2310	116.8	3.1	117					

Tabela 4.3: Valores aproximados da média dos desvios entre os perfis em cada gabinete de sustentação utilizados nas simulações.



Figura 4.14: Representação da configuração PLC1Id: (a) vista lateral; (b) vista em perspectiva.

Esta segunda configuração de perfiladeira simulada foi chamada de PLC1Id (Figura 4.14), nela o perfil longitudinal curvilíneo foi obtido através do deslocamento vertical dos gabinetes de sustentação 4 ao 9 conforme os valores aproximados da média mostrados na Tabela 4.3. As dimensões dos rolos moldadores e os deslocamentos verticais de seus centros de rotação para a configuração PLC1Id são fornecidos na Tabela 4.4. Vale observar que o deslocamento em Y do centro de rotação dos rolos moldadores mostrado na Tabela 4.4 corresponde a um deslocamento vertical positivo em relação a configuração PLR, ou seja, todas as demais configurações de perfiladeira com perfil longitudinal curvilíneo simuladas neste trabalho são modificações da configuração PLR, ora feita através de deslocamentos verticais dos gabinetes de sustentação, ora feita através do aumento dos diâmetros dos rolos inferiores a fim de se buscar o perfil

longitudinal curvilíneo.

]	PLC1Id	Gabinetes de Sustentação										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
	Drm	200	200	200	200	200	200	200	200	200		
Rolo	Hrm	100	100	11	11	11	11	11	11	11		
superior	Deslocamento em Y do centro de rotação	0	0	0	10	25	44	67	92	117		
	Drm	80	80	80	80	80	80	80	80	80		
Rolo	Hrm	100	100	12	12	12	12	12	12	12		
Inferior	Deslocamento em Y do centro de rotação	0	0	0	10	25	44	67	92	117		
	Drm	-	-	80	80	80	80	80	80	80		
Rolo	Hrm	-	-	88	88	88	88	88	88	88		
Lateral	Deslocamento em Y do centro de rotação	-	-	0	10	25	44	67	92	117		

Tabela 4.4: Dimensões geométricas da configuração PLC1Id.

Esta configuração é chamada de Perfil Longitudinal Curvilíneo 1 Ideal porque seus gabinetes de sustentação são considerados ideais devido ao fato deles apresentarem além do deslocamento vertical também são rotacionados em relação ao centro de rotação do rolo superior e este tipo de movimento atualmente não é possível ser adaptado à uma perfiladeira real. Este tipo de gabinete de sustentação pode ser visto na Figura 4.15.b, nela pode ser observado também que a linha de centro de rotação dos gabinetes de sustentação é perpendicular à linha de centro vertical da chapa no passe iniciado pelo respectivo gabinete de sustentação, por exemplo, a linha de centro de rotação do gabinete de sustentação 5 é perpendicular a linha de centro vertical da chapa no quinto passe, isso ocorre devido a rotação que o gabinete de sustentação pode sofrer. Este tipo de gabinete de sustentação foi utilizado apenas nesta configuração de perfiladeira simulada, nas demais simulações os gabinetes de sustentação foram do tipo real (Figura 4.15.a). Este apresenta um deslocamento possível apenas na direção vertical, portanto sua linha de centro de rotação é sempre perpendicular ao plano horizontal ou ao eixo X e pode ser adaptada à perfiladeira real.



Figura 4.15: Tipos de gabinetes de sustentação aplicados às simulações: (a) tipo real; (b) tipo ideal.

Assim como para a configuração PLR os resultados para a configuração foram obtidos ao final do processo de dobramento e após um deslocamento longitudinal de 330 mm da chapa simulada. Esses resultados podem ser vistos na Figura 4.16. Nela podemos observar que o nível da tensão longitudinal σ_{11} compressiva na região da base da chapa simulada para a configuração PLC1Id foi reduzida em relação a apresentada pela configuração PLR (Figura 4.12) para ambas as situações, como esperávamos.

A Figura 4.17 mostra o nível da tensão longitudinal σ_{11} presente na superfície inferior da chapa simulada ao final do processo de dobramento para a configuração PLC1Id, ou seja, a Figura 4.17 corresponde a Figura 4.16.a com uma rotação de 180° da chapa em torno de seu eixo longitudinal ou eixo X. Comparando a Figura 4.17 com a Figura 4.16.a podemos comprovar que o comportamento da tensão longitudinal é similar em ambas as superfícies da chapa simulada da mesma forma como observado para a configuração PLR. Para as demais configurações simuladas este tipo de resultado, ou seja, o nível da tensão longitudinal na superfície inferior da chapa não será mais mostrado uma vez que ficou claro através das Figuras 4.17 e 4.13 que o comportamento da tensão longitudinal para ambas as superfícies da chapa simulada é similar.

Uma vez comprovada a hipótese de que a simulação para uma perfiladeira com perfil longitudinal curvilíneo reduz o nível da tensão longitudinal compressiva em relação à perfiladeira com perfil longitudinal retilíneo, então o próximo passo foi realizar simulações do processo de perfilação a frio para configurações de perfiladeiras que fossem possíveis de serem adaptadas ou transferidas a perfiladeira real.



Figura 4.16: Nível da tensão longitudinal σ_{11} em MPa presente na chapa simulada para a configuração **PLC1Id** de perfiladeira: (a) Ao final do processo de dobramento; (b) Após um deslocamento longitudinal de 330 mm.



Figura 4.17: Nível da tensão longitudinal σ_{11} em MPa presente na superfície inferior da chapa simulada para a configuração **PLC1Id** de perfiladeira ao final do processo de dobramento

c) Perfil Longitudinal Curvilíneo 2 – PLC2



Figura 4.18: Representação da configuração PLC2: (a) vista lateral; (b) vista em perspectiva.

A terceira configuração de perfiladeira simulada foi chamada de PLC2 (Figura 4.18). Esta configuração difere em relação à configuração PLC1Id apenas quanto ao tipo de gabinete de

sustentação utilizado, que neste caso é do tipo real. Esta é uma configuração possível de ser adaptada à perfiladeira real e seu perfil longitudinal curvilíneo foi obtido através do deslocamento vertical dos gabinetes de sustentação. As dimensões geométricas e o deslocamento vertical do centro de rotação dos rolos moldadores para a configuração PLC2 são dados na Tabela 4.5.

	PLC2			(Gabinete	s de Su	stentaçã	0		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Drm	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Rolo	Hrm	100	100	11	11	11	11	11	11	11
superior	Deslocamento em Y do centro de rotação	0	0	0	10	25	44	67	92	117
	Drm	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Rolo	Hrm	100	100	12	12	12	12	12	12	12
Inferior	Deslocamento em Y do centro de rotação	0	0	0	10	25	44	67	8 200 11 92 80 12 92 80 12 92 80 12 92 92 92 92 92 92 92 92 92 92 92 92 92	117
	Drm	-	-	80	80	80	80	80	80	80
Rolo	Hrm	-	-	88	88	88	88	88	88	88
Lateral	Deslocamento em Y do centro de rotação	-	-	0	10	25	44	67	92	117

Tabela 4.5: Dimensões geométricas da configuração PLC2.

Da mesma forma que as configuração anteriores simuladas, nesta também foi analisada o nível da tensão longitudinal σ_{11} presente na região da base da chapa simulada em dois estágios, um logo ao final do processo de dobramento e outro após o deslocamento longitudinal de 330 mm da chapa simulada. Os resultados são mostrados na Figura 4.19, comparando estes resultados com os mostrados na Figura 4.12, podemos observar que esta configuração de perfiladeira também reduziu o nível de tensão longitudinal compressiva presente na região da base da chapa simulada em relação à configuração PLR.

A etapa seguinte foi realizar uma simulação para a perfiladeira com o mesmo perfil longitudinal curvilíneo onde este perfil fosse obtido através do aumento do diâmetro dos rolos inferiores e não mais pelo deslocamento vertical dos gabinetes de sustentação.



Figura 4.19: Nível da tensão longitudinal σ_{11} em MPa presente na chapa simulada para a configuração **PLC2** de perfiladeira: (a) Ao final do processo de dobramento; (b) Após um deslocamento longitudinal de 330 mm.

d) Perfil Longitudinal Curvilíneo 3 – PLC3



Figura 4.20: Representação da configuração PLC3: (a) vista lateral; (b) vista em perspectiva.

	PLC3			(abinete	s de Su	stentaçã	0		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Drm	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Rolo superior	Hrm	100	100	11	11	11	11	11	11	11
	Deslocamento em Y do centro de rotação	0	0	0	10	25	44	67	92	117
Rolo	Drm	80	80	80	100	130	168	214	264	314
	Hrm	100	100	12	12	12	12	12	12	12
Inferior	Deslocamento em Y do centro de rotação	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Drm	-	-	80	80	80	80	80	80	80
Rolo	Hrm	-	-	88	88	88	88	88	88	88
Lateral	Deslocamento em Y do centro de rotação	-	-	0	10	25	44	67	92	117

Tabela 4.6: Dimensões geométricas da configuração PLC3.

A quarta configuração de perfiladeira simulada foi definida como PLC3 (Figura 4.20). Esta configuração difere em relação a configuração PLC2 nos diâmetros dos rolos inferiores, ou seja, o perfil longitudinal curvilíneo da perfiladeira foi induzido pelo aumento progressivo do diâmetro

do rolo inferior em cada gabinete de sustentação de forma que os centros de rotação dos rolos inferiores estivessem alinhados verticalmente, desta forma apenas os rolos superiores e laterais se deslocaram em Y. As dimensões geométricas e os deslocamentos na vertical dos centros de rotação dos rolos moldadores para a configuração PLC3 podem ser vistos na Tabela 4.6. Este tipo de configuração de perfiladeira também é possível de ser transferia a perfiladeira real.

Comparando a Figura 4.21 com a Figura 4.12 observamos que este tipo de configuração de perfiladeira também reduziu o nível da tensão longitudinal compressiva presente na região da base da chapa simulada tanto ao final do processo de dobramento quanto após o deslocamento longitudinal de 330 mm em relação à configuração PLR.

As configurações PLC2 e PLC3 são possíveis de serem adaptadas à uma perfiladeira real desde que esta possua em sua linha de produção um sistema de pré-corte, ou seja, a peça é cortada em comprimento pré-definidos antes de sua modelagem na entrada da perfiladeira devido ao fato de que nessas configurações a entrada do material à perfiladeira ocorre horizontalmente enquanto que a saída da peça se dá inclinadamente como pode ser visto nas Figuras 4.18 e 4.20. Como a maioria das perfiladeiras trabalha com o sistema de pós-corte inclusive a perfiladeira real da qual foram colhidas as 6 chapas de metal analisadas neste trablho e como também o corte deve ocorrer paralelamente à seção transversal da peça produzida então a próxima simulação realizada neste estudo manteve o mesmo perfil longitudinal curvilíneo aplicado as configurações anteriores, mas alterou as formas de entrada e saída da chapa, ou seja, nas próximas configurações de perfiladeiras simuladas a entrada do material à perfiladeira ocorreu inclinadamente e a saída da peça se fez horizontalmente.



Figura 4.21: Nível da tensão longitudinal σ_{11} em MPa presente na chapa simulada para a configuração **PLC3** de perfiladeira: (a) Ao final do processo de dobramento; (b) Após um deslocamento longitudinal de 330 mm.

e) Perfil Longitudinal Curvilíneo 4 - PLC4



Figura 4.22: Representação da configuração PLC4: (a) vista lateral; (b) vista em perspectiva.

	PLC4			(abinete	s de Sus	stentaçã	0		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Drm	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Rolo	Hrm	100	100	11	11	11	11	11	11	11
superior	Deslocamento em Y do centro de rotação	83	58	33	18	8	2	0	0	0
Rolo	Drm	80	80	80	80	80	80	80	80	80
	Hrm	100	100	12	12	12	12	12	12	12
Inferior	Deslocamento em Y do centro de rotação	83	58	33	18	8	2	0	0	0
	Drm	-	-	80	80	80	80	80	80	80
Rolo	Hrm	-	-	88	88	88	88	88	88	88
Lateral	Deslocamento em Y do centro de rotação	-	-	33	18	8	2	0	0	0

Tabela 4.7: Dimensões geométricas da configuração PLC4.

A quinta configuração de perfiladeira simulada foi chamada de PLC4 (Figura 4.22). Esta configuração apresenta a inversão do perfil longitudinal curvilíneo discutido anteriormente de forma que a saída do material da perfiladeira ocorra na horizontal. Vale lembrar que a curvatura do perfil longitudinal nesta configuração é idêntico a das configurações PLC1Id, PCL2 e PLC3 e foi obtido através dos deslocamentos verticais dos gabinetes de sustentação. As dimensões

geométricas e os deslocamentos em Y dos centros de rotação dor rolos moldadores para a configuração PLC4 são mostradas na Tabela 4.7.

Novamente, comparando a Figura 4.23 com a Figura 4.12 pudemos observar que este tipo de configuração de perfiladeira também reduziu o nível da tensão longitudinal compressiva presente na região da base da chapa simulada tanto ao final do processo de dobramento quanto após o deslocamento longitudinal de 330 mm em relação à configuração PLR.

O próximo passo foi realizar a simulação do processo de perfilação a frio para a perfiladeira com o perfil longitudinal curvilíneo, onde este agora foi obtido através da variação do diâmetro dos rolos inferiores e assim como a configuração PLC4, a saída da peça se fez horizontalmente.



Figura 4.23: Nível da tensão longitudinal σ_{11} em MPa presente na chapa simulada para a configuração **PLC4** de perfiladeira: (a) Ao final do processo de dobramento; (b) Após um deslocamento longitudinal de 330 mm.

f) Perfil Longitudinal Curvilíneo 5 – PLC5



Figura 4.24: Representação da configuração PLC5: (a) vista lateral; (b) vista em perspectiva.

	PLC5			C	abinete	s de Su	stentaçã	0		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Drm	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Rolo	Hrm	100	100	11	11	11	11	11	11	11
superior Desloc em Y c de re	Deslocamento em Y do centro de rotação	83	58	33	18	8	2	0	0	0
	Drm	246	196	146	116	96	84	80	80	80
Rolo	Hrm	100	100	12	12	12	12	12	12	12
Inferior	Deslocamento em Y do centro de rotação	0	0	0	0	0	0	0	7 8 200 200 11 11 0 0 80 80 12 12 0 0 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 9 0 0 0	0
	Drm	-	-	80	80	80	80	80	80	80
Rolo	Hrm	_	_	88	88	88	88	88	88	88
Lateral	Deslocamento em Y do centro de rotação	-	-	33	18	8	2	0	7 8 00 200 1 11 0 0 0 80 2 12 0 0 0 80 2 12 0 80 0 80 0 80 0 0 0 0	0

Tabela 4.8: Dimensões geométricas da configuração PLC5.

A sexta configuração de perfiladeira simulada foi chamada de PLC5 (Figura 4.24). Esta configuração também apresentou a inversão do perfil longitudinal e ela difere da configuração PLC4 da mesma forma que a configuração PLC3 difere da PLC4, ou seja, o perfil longitudinal curvilíneo da perfiladeira foi obtido pela variação do diâmetro dos rolos inferiores e não pelo

deslocamento vertical dos gabinetes de sustentação. As dimensões geométricas dos rolos moldadores e os deslocamentos em Y de seus centros de rotação para a configuração PLC5 podem ser vistos na Tabela 4.8.

Comparando os resultados da Figura 4.25 com os da Figura 4.12 pudemos observar que este tipo de configuração de perfiladeira da mesma forma que todas as outras configurações de perfiladeiras com perfil longitudinal curvilíneo também reduziu o nível da tensão longitudinal compressiva presente na região da base da chapa simulada tanto ao final do processo de dobramento quanto após o deslocamento longitudinal de 330 mm em relação à configuração PLR.

Analisando os resultados para as configurações PLC2 (Figura 4.19), PLC3 (Figura 4.21), PLC4 (Figura 4.23) e PLC5 (Figura 4.25) e principalmente levando em consideração que é mais simples adaptar à perfiladeira real uma configuração de perfiladeira onde o perfil longitudinal curvilíneo seja imposto pela variação do diâmetro dos rolos inferiores do que pelo deslocamento vertical dos gabinetes de sustentação, decidimos adotar a configuração PLC5 para ser otimizada. A otimização consistiu em reduzir ao máximo o nível da tensão longitudinal σ_{11} presente na região da base da chapa simulada e foi desenvolvida pelo método de tentativa e erro aumentando gradativamente os diâmetros dos rolos inferiores, a cada simulação realizada, em relação aos aplicados na configuração PLC5.



Figura 4.25: Nível da tensão longitudinal σ_{11} em MPa presente na chapa simulada para a configuração **PLC5** de perfiladeira: (a) Ao final do processo de dobramento; (b) Após um deslocamento longitudinal de 330 mm.

g) Perfil Longitudinal Curvilíneo 5 Otimizado - PLC5Ot



Figura 4.26: Representação da configuração PLC5Ot: (a) vista lateral; (b) vista em perspectiva.

]	PLC5Ot			C	Gabinete	s de Sus	stentaçã	0		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Drm	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Rolo	Hrm	100	100	11	11	11	11	11	11	11
superior Deslocamento em Y do centro de rotação	102	77	52	33	19	9	3	0	0	
	Drm	284	234	184	146	118	98	86	80	80
Rolo	Hrm	100	100	12	12	12	12	12	12	12
Inferior	Deslocamento em Y do centro de rotação	0	0	0	0	0	0	0	8 200 11 0 80 12 0 80 80 80 0 80 0 00	0
	Drm	-	-	80	80	80	80	80	80	80
Rolo	Hrm	_	-	88	88	88	88	88	88	88
Lateral	Deslocamento em Y do centro de rotação	-	-	52	33	19	9	3	0	0

Tabela 4.9: Dimensões geométricas da configuração PLC5Ot.

Por fim, a última configuração de perfiladeira simulada foi definida como PLC5Ot (Figura 4.26). A otimização em relação a configuração PLC5 se deu através de análises dos resultados gerados após cada simulação onde o único parâmetro que foi variado nas simulações através de tentativa e erro até se obter um nível mínimo de tensão longitudinal σ_{11} compressiva presente na

região da base da chapa simulada foi o diâmetro dos rolos inferiores. As dimensões geométricas e os deslocamentos dos centros de rotação dos rolos moldadores para a configuração otimizada são fornecidos na Tabela 4.9.

Comparando a Figura 4.27.a com a Figura 4.25.a pudemos ver que com a otimização conseguimos reduzir o elevado nível de tensão longitudinal σ_{11} compressiva ainda presente na região da base da chapa simulada nos passes finais da configuração PLC5 ao final do processo de dobramento.

Comparando também a Figura 4.27.b com a Figura 4.25.b vimos que para a chapa em movimento com um deslocamento longitudinal de 330 mm as tensões longitudinais σ_{11} compressivas mais acentuadas presentes na região da base da chapa simulada nos passes intermediários à finais da configuração PLC5 também foram reduzidas com a otimização.

Para facilitar uma comparação visual entre os resultados apresentados anteriormente, as Figuras 4.28 e 4.29 mostram os níveis de tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa para todas as configurações de perfiladeiras simuladas ao final do processo de dobramento e após um deslocamento longitudinal de 330 mm respectivamente.

Na Figura 4.30 os níveis de tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa para todas as configurações de perfiladeiras simuladas após um deslocamento longitudinal de 330 mm da chapa também são mostrados, mas nesta figura a escala da tensão vai de -150MPa à 0MPa. Isto feito para mostrar que em certas regiões da base da chapa simualda com um perfil longitudinal curvilíneo a tensão longitudinal compressiva não só é reduzida em relação a configuração de perfiladeira com perfil longitudinal retilíneo mas também é eliminada com a presença de tensão longitudinal trativa, uma vez que a cor cinza na escala de cores corresponde a qualquer nível de tensão σ_{11} positiva, ou seja, de tração. Assim, podemos observar na Figura 4.30 que a configuração PLC5Ot apresentou maiores regiões onde a tensão longitudinal compressiva foi eliminada em relação as demais configurações de perfiladeira.



Figura 4.27: Nível da tensão longitudinal σ_{11} em MPa presente na chapa simulada para a configuração **PLC5Ot** de perfiladeira: (a) Ao final do processo de dobramento; (b) Após um deslocamento longitudinal de 330 mm.



Figura 4.28: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} em MPa na região da base para a chapa simulada ao final do processo de dobramento.



Figura 4.29: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} em MPa na região da base para a chapa simulada após um deslocamento longitudinal de 330 mm.



Figura 4.30: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} em uma escala de -150 MPa a 0 MPa na região da base para a chapa simulada após um deslocamento longitudinal de 330 mm

Os resultados das tensões longitudinais σ_{11} presentes na região da base da chapa simulada para todas as configurações de perfiladeiras simuladas mostrados anteriormente para a chapa completa podem ser vistos de forma segmentada em cada passe através de uma vista superior da perfiladeira no Apêndice B.

Neste trabalho não foram exibidos resultados numéricos ou em forma de gráficos devido ao fato de que nestes tipos de representações para a simulação do processo de perfilação a frio os resultados oscilaram muito pois como o contato entre os rolos moldadores e a chapa na simulação é pontual e a distância na direção de avanço da chapal, entre dois nós consecutivos de cada elemento finito da malha da chapa simulada foi de 11,88 mm, portanto quando os rolos moldadores estão girando e puxando a chapa, nos instantes em que as superfícies dos rolos deixam de estar em contato com os nós dos elementos finitos, a restrição geométrica imposta pelos rolos superior e inferior à chapa deixa de existir e isto é o mesmo que o gabinete de sustentação que contém esses rolos também não existisse momentaneamente gerando uma mudança no nível da tensão longitudinal σ_{11} nos passes que antecede e sucede este gabinete de sustentação em questão. O contato e a restrição voltam a existir quando a chapa através de seu deslocamento faz com que os próximos nós dos elementos encontrem as superfícies dos rolos superior e inferior alterando novamente o nível da tensão longitudinal σ_{11} nesta região. Uma forma de se buscar minimizar a oscilação dos resultados numéricos é aumentar o refinamento da malha da chapa na direção longitudinal, mas infelizmente o tempo gasto para finalizar a simulação também é aumentado, inviablizando um refinamento elevado.

Foi utilizado um micro computador com processador AMD Athlon XP 2000+ com 512 MB de memória RAM para realizar as simulações deste trabalho. O tempo médio gasto para concluir cada simulação foi de aproximadamente 35 horas.

Para ilustrar o programa de uma simulação, foi inserido a este trabalho no Anexo C o código dos comandos utilizados para gerar a simulação do processo de perfilação a frio com a configuração PLR.

4.2.2 Simulações com a Chapa Pré-Estampada

Para finalizar este estudo foram realizadas as duas últimas simulações, uma para perfiladeira com perfil longitudinal retilíneo e outra com curvilíneo. Em ambas, foi realizado um furo na região da base da chapa localizado na entrada do gabinete de sustentação de 30° com as mesmas dimensões (Figura 4.31) do furo existente nas chapas de metal medidas abordadas no capítulo 3. Vale lembrar que estamos trabalhando com simetria nas simulações, portanto a largura do furo na chapa simulada tem 8 mm. A fim de facilitar a compreensão do texto, foi definido de aresta lateral do furo a aresta que corresponde ao comprimento de 142 mm e extremidade do furo a aresta que corresponde a largura de 16 mm.



Figura 4.31: Dimensões do furo pré-estampado na região da base da chapa simulada.

Estas simulações foram realizadas com o intuito de analisar o comportamento da aresta lateral do furo, ou melhor, observar se estas arestas sofrerão ou não deslocamento transversal (deslocamento na direção do eixo Z) sujeitas as tensões longitudinais σ_{11} presentes na região da base da chapa. Os resultados que serão mostrados a seguir foram obtidos para 3 posições diferentes do furo na perfiladeira conseguidas através do deslocamento da chapa simulada. Estas 3 posições são mostradas na Figura 4.32 onde na primeira posição o furo esta localizado instantes antes de sua passagem pelo gabinete de sustentação, na segunda posição metade de seu comprimento já passou pelo gabinete de sustentação e a outra metade está a passar e na terceira posição o furo se encontra logo a frente do gabinete de sustentação após sua passagem pelo mesmo.



Figura 4.32: Deslocamento do furo na perfiladeira através do gabinete de sustentação de 30°: (a) posição 1; (b) posição 2; (c) posição 3.

Primeiramente, foi analisado o comportamento da tensão longitudinal σ_{11} presente ao redor do furo na região da base da chapa simulada para a perfiladeira com perfil longitudinal retilíneo (PLR) e com perfil longitudinal curvilíneo (PLC) nas 3 posições do furo. Este resultado do comportamento da tensão longitudinal pode ser visto na Figura 4.33 onde a escala da tensão vai de -100MPa à 100MPa e que mostra uma vista superior do gabinete de sustentação.

Em seguida, analisamos como se comportou a aresta lateral do furo com as tensões longitudinais σ_{11} presentes na região da base da chapa tanto para a perfiladeira com perfil longitudinal retilíneo (PLR) quanto curvilíneo (PLC). Esta análise foi baseada no deslocamento transversal apresentado pela aresta lateral do furo como pode ser visto na Figura 4.34 onde a escala vai de -0.5mm à 0.5mm e que também mostra uma vista superior do gabinete de sustentação.

Para melhor visualizar o deslocamento transversal das arestas laterais do furo é mostrada a Figura 4.35, onde pode se ver o furo por completo gerado por simetria e as arestas dos elementos finitos utilizados para discretizar o domínio da chapa simulada. Para se chegar a vista do furo mostrada na Figura 4.35, partindo da vista superior mostrada nas Figuras 4.33 e 4.34, foi realizada uma rotação de 90° em relação ao eixo X, depois outra rotação de -90° em relação ao eixo Z.



Figura 4.33: Tensão longitudinal σ_{11} presente na chapa pré-estampada: (a) posição 1; (b) posição 2; (c) posição 3.



Figura 4.34: Deslocamento transversal em Z da aresta lateral do estampo: (a) posição 1; (b) posição 2; (c) posição 3.



Figura 4.35: Visualização do deslocamento transversal em Z da aresta lateral do estampo: (a) posição 1; (b) posição 2; (c) posição 3.

a) Análise dos Resultados das Simulações com a Chapa Pré-Estampada

Os resultados mostrados anteriormente foram obtidos para um deslocamento da chapa simulada de aproximadamente 150 mm. O ideal seria se pudéssemos obter um deslocamento do furo pré-estampado ao longo de toda perfiladeira como ocorre no processo de perfilação a frio real, para que o deslocamento transversal das arestas dos furos na chapa simulada fosse maior e mais visível.

Na Figura 4.33 podemos ver que mesmo com a presença do furo as tensões longitudinais σ_{11} presentes na região da base da chapa simulada são compressivas para a configuração com perfil longitudinal retilíneo próximo a aresta lateral do furo.

Analisando as Figuras 4.34 e 4.35 podemos concluir que as tensões de compressão na aresta lateral do furo para o perfil longitudinal retilíneo foram responsáveis pelo seu deslocamento transversal no sentido da linha de centro vertical ou do plano de simetria do processo, uma vez que para a configuração com perfil longitudinal curvilíneo onde a tensão longitudinal compressiva foi reduzida (Figura 4.33) houve ausência deste tipo de deslocamento transversal para a aresta lateral do furo.

Por fim, apenas para uma comparação visual, colocamos lado a lado a foto da chapa de metal perfilada industrialmente e a imagem da chapa gerada pelo sotfware MSC Superform 2002 para a simulação da perfiladeira com a configuração PLR, ambas com o furo pré-estampado localizado na região da base das chapas (Figura 4.36). Podemos ver que tanto para a chapa de metal quanto para a simulada que próximo à metade do comprimento do furo ocorreu um estreitamento de sua largura.



(b) chapa simulada em uma configuração com perfil longitudinal retilíneo.
Capítulo 5

Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos

Neste trabalho, analisamos o comportamento da tensão longitudinal σ_{11} presente na região da base da chapa simulada para 7 diferentes tipos de configuração geométrica de perfiladeira determinada pelo posicionamento ou dimensão dos rolos moldadores e buscamos mostrar que a tensão longitudinal σ_{11} de compressão deve ser minimizada ou eliminada na região da base da chapa durante o processo de perfilação a frio.

A simulação do processo de perfilação a frio através de uma perfiladeira com um perfil longitudinal retilíneo, denominado neste estudo de PLR, apresentando as características geométricas do ferramental cilíndrico e da chapa assim como os parâmetros de produção iguais ao do processo real, mostrou durante a modelagem, que as tensões longitudinais σ_{11} presentes na região da base da chapa simulada são de compressão.

Nas simulações onde o perfil longitudinal da perfiladeira é curvilíneo, copiando o perfil longitudinal das chapas imobilizadas e retiradas da perfiladeira industrial para medição, que neste estudo foram 5 denominados de PLC1Id, PLC2, PLC3, PLC4 e PLC5, o nível das tensões longitudinais σ_{11} compressivas presentes na região da base das chapas simuladas foi reduzido em relação ao obtido na configuração PLR e até eliminado, uma vez que em certas regiões a tensão longitudinal σ_{11} encontrada foi de tração.

A configuração otimizada denominada de PLC5Ot apresentou uma região maior na base da chapa simulada onde a tensão longitudinal σ_{11} é trativa em relação as demais configurações com perfil longitudinal curvilíneo.

Apesar do furo criar uma ausência de material o nível da tensão longitudinal encontrado próximo à aresta lateral do furo é semelhante ao encontrado para a mesma região na chapa sem o furo, assim pudemos concluir e validar nossa suposição através das simulações de que o deslocamento transversal apresentado pelas arestas laterais dos furos pré-estampados nas chapas de metal durante o processo de perfilação a frio real são causados pela presença de tensão longitudinal compressiva na região onde o furo está localizado, que neste estudo foi a região da base. A validação da suposição foi baseada no fato de que na simulação da perfiladeira com o perfil longitudinal retilíneo ocorreu o deslocamento transversal da aresta do furo localizado na base da chapa simulada, não ocorrendo o mesmo para a simulação com perfil longitudinal curvilíneo.

Portanto, o processo de perfilação a frio deve buscar eliminar a presença de tensão compressiva longitudinal na região da base da chapa de metal para evitar o surgimento de ondulação nas arestas laterais dos furos pré-estampados durante a modelagem do material para que a precisão nas dimensões das peças produzidas não seja reduzida.

Na configuração PLC5Ot o nível da tensão longitudinal σ_{11} presente nas regiões das abas da chapa simulada foi reduzido e mais homogênio em relação ao apresentado na configuração PLR, portanto, podemos concluir também que o processo de perfilação a frio com um perfil longitudinal curvilíneo é igualmente vantajoso para a região das abas da chapa, uma vez que analisando os resultados aprensentados pelos autores citados no capítulo 2, concluimos que em um processo de perfilação a frio deve-se buscar aumentar o comprimento dos passes na perfiladeira e/ou reduzir o incremento do ângulo de dobra aplicado aos passes para se obter o mesmo perfil final para que as tensões longitudinais presentes nas abas da chapa sejam reduzidas durante a modelagem. Para trabalhos futuros destacamos os seguintes:

Realizar simulações para continuar analisando o comportamento da tensão longitudinal variando parâmetros como: a velocidade da alimentação ou avanço da chapa, o comprimento do passe mantendo o mesmo número de gabinetes de sustentação com seus respectivos ângulos de dobra, o incremento do ângulo de dobra para se obter o mesmo perfil tipo canal em U e o coeficiente de atrito entre 0,1 e 0,4.

Elevar a complexidade do perfil final simulado;

Transferir à perfiladeira real as dimensões geométricas da configuração PLC5Ot, para poder comprovar experimentalmente os resultados obtidos através de simulações numéricas neste trabalho.

Referências Bibliográficas

- Bhattacharyya, D. et al. The prediction of deformation length in cold roll forming. *Journal of Mechanical Working Technology*, v.9, pp. 181-191, 1984.
- Brunet, M., Lay, B., Pol, P. Computer aided design of roll-forming of channel sections. *Journal* of Materials Processing Technology, v.60, pp. 209-214, 1996.
- Brunet, M., Mguil, S., Pol, P. Modelling of a roll-forming process with a combined 2D and 3D FEM code. *Journal of Materials Processing Technology*, v.80-81, pp. 213-219, 1998.
- DeGarmo, E. Paul, *Materials and processes in manufacturing*. 6th ed. New York: Macmillan Publishing Company, 1984. p.385-386.
- Dhatt, G., Touzot, G. The finite element method displayed. New York, John Wiley & Sons, 1984, 509 p.
- Duggal, N. et al. Computer aided simulation of cold roll forming a computer program for simple section profiles. *Journal of Materials Processing Technology*, v.59, pp. 41-48, 1996.
- Han, Z., Liu, C., Lu, W. Computer simulation of a non-symmetrical-section steel forming process by the spline finite strip method based on the U.L. method. *Journal of Materials Processing Technology*, v.110, pp. 343-346, 2000.

- Han, Z. et al. The effects of forming parameters in the roll-forming of a channel section with na outer edge. *Journal of Materials Processing Technology*, v.116, pp. 205-210, 2001.
- Heislitz, F. et al. Simulation of roll forming process with 3-D FEM code PAM-STAMP. *Journal* of Materials Processing Technology, v.59, pp. 59-67, 1996.
- Hong, S., Lee, S., Kim, N. A parametric study on forming length in roll forming. *Journal of Materials Processing Technology*, v.113, pp. 774-778, 2001.
- Huang, S., Khan, A. S. *Continuum theory of plasticity*. New York, Jonh Wiley & Sons, 1995, 421 p.
- Kiuchi, M. CAD System for cold roll-forming. *Manufacturing Technology*, CIRP ANNALS, Switzerland, v.38, n.1, pp.283-286, 1989.
- Kiuchi, M., Abe, K., Onodera, R. Computerized numerical simulation of roll-forming process. *Manufacturing Technology*, CIRP ANNALS, Switzerland, v.44, n.1, pp.239-242, 1995.
- Liu, C., Zhou, V., Lu, W. Numerical simulation of cold roll-forming by B-spline finite strip method. *Journal of Materials Processing Technology*, v.60, pp. 215-218, 1996.
- Nefussi, G., Gilormini, P. A simplified method for the simulation of cold-roll forming. *International Journal of Mechanical Sciences*, v.35, n.10, pp.867-878, 1993.
- Nefussi, G., Proslier, L., Gilormini, P. A simulation of cold-roll forming for elastoplastic materials. *International Journal of Mechanical Sciences*, v.40, n.1, pp.15-25, 1997.
- Nefussi, G., Proslier, L., Gilormini, P. Simulation of the cold-roll forming of circular tubes. Journal of Materials Processing Technology, v.95, pp. 216-221, 1999.

Panton, S. M., Zhu, J. D., Duncan, J. L. Geometric constraints on the forming path in roll

forming channel sections. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* Part B: Journal of Engineering Manufacture, 1992, v.206, n.B2, pp.113-118.

- Precision Metalforming Association. *PMA Desing Guideline for Metal Stampings and Fabrications*, Richmond Heights, Ohio, 1995. pp.83-89.
- Senanayake, R. S., Cole, I. M., Thiruvarudchelvan, S. The application of computational and experimental techniques to metal deformation in cold roll forming. *Journal of Materials Processing Technology*, v.45, pp.155-160, 1994.
- Watari, H., Ona, H. Characteristic features of shape defects occuring in the cold roll forming of pre-notched products. *Journal of Materials Processing Technology*, v.80-81, pp.225-231, 1998.
- Zhu, J. D., Panton, S. M., Duncan, J. L. The effects of geometric variables in roll forming a channel section. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* Part B: Journal of Engineering Manufacture, 1996, v.210, pp.127-134.

Anexo I

Soluções de Sistemas de Equações Lineares

Métodos Diretos

Dado um sistema de equações algébricas representado matricialmente como mostra a Equação I.1:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdots & K_{1N} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdots & K_{2N} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdots & K_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{N1} & K_{N2} & K_{N3} & \cdots & K_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ U_N \end{bmatrix} = \begin{cases} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix}$$
(I.1)

onde [K] é a matriz de rigidez global ou de coeficientes é simétrica. O primeiro passo é obter a triangularização da matriz [K]. Há 2 tipos de matrizes triangulares: a matriz triangular superior [S] e a matriz triangular inferior [L].

O sistema triangular inferior é representado pela Equação I.2:

$$\begin{bmatrix} L_{11} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ L_{21} & L_{22} & 0 & \cdots & 0 \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{N1} & L_{N2} & L_{N3} & \cdots & L_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ U_N \end{bmatrix} = \begin{cases} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix}$$
(I.2)

O sistema é solucionado com a inversão da matriz triangular inferior da seguinte forma:

$$[L]{U} = {F} \Longrightarrow {U} = [L]^{-1}{F}$$

$$(I.3)$$

O sistema triangular superior é representado pela Equação I.4:

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & \cdots & S_{1N} \\ 0 & S_{22} & S_{23} & \cdots & S_{2N} \\ 0 & 0 & S_{33} & \cdots & S_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ U_N \end{bmatrix} = \begin{cases} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix}$$
(I.4)

O sistema também é solucionado com a inversão da matriz triangular superior da seguinte forma:

$$[S]{U} = {F} \Longrightarrow {U} = [S]^{-1}{F}$$
(I.5)

Para o sistema triangular superior a última equação contém somente uma incógnita e é prontamente resolvida, a equação anterior terá 2 incógnitas onde uma delas já foi calculada, assim após a sua substituição, obtemos o valor da incógnita restante. Este processo é repetido sucessivamente para o sistema da linha inferior até a superior.

Uma vez que o determinante das matrizes triangulares superior e inferior é simples de ser obtido, ou seja, basta realizar o produto dos elementos da diagonal principal das matrizes, conseqüentemente a obtenção de suas matrizes inversas também se torna simples. Portanto, o objetivo dos métodos diretos consiste em determinar uma fatorização da matriz de rigidez global [K] da seguinte forma:

$$[K] = [L][S] \tag{I.6}$$

$$[K]{U} = {F}$$
(I.7)

Assim, o sistema de equações algébricas geral pode ser resolvido sem a necessidade de inversão da matriz [K] através de sua substituição da Equação I.6 na Equação I.7, resultando em:

$$[L][S]{U} = {F}$$
(I.8)

fazendo,

$$[S]{U} = {X}$$
(I.9)

substituindo a Equação I.9 na Equação I.8, temos:

$$[L]{X} = {F} \Longrightarrow {X} = [L]^{-1}{F}$$
(I.10)

substituindo $\{X\}$ na Equação I.9 determino $\{U\}$.

Decomposição de Crout

O método de decomposição de Crout consiste em fatorizar a matriz [K] da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \end{bmatrix}^T$$
(I.11)

onde $[L]^{T}$ é a matriz transposta de [L] e [D] é uma matriz diagonal.

$$\begin{bmatrix} D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & D_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & D_{NN} \end{bmatrix}$$
(I.12)

onde os elementos da diagonal D_{ii} correspondem aos autovalores λ_i da matriz de rigidez global [K].

Decomposição de Cholesky

O método de decomposição de Cholesky consiste em fatorizar a matriz [K] da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_C \end{bmatrix}^T$$
(I.13)

onde:

$$\begin{bmatrix} L_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{S_{11}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sqrt{S_{22}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sqrt{S_{NN}} \end{bmatrix}$$
(I.14)

Solução de Sistemas de Equações Não-Lineares

Métodos Iterativos

Dado o sistema de equações algébricas não-lineares abaixo:

$$[K(U)]{U} = {F}$$
(I.15)

Temos como resíduo $\{R(U)\}$ o seguinte:

$$\{R(U)\} = \{F\} - [K(U)]\{U\} = 0$$
(I.16)

O processo de solução de um sistema de equações algébricas não-lineares consiste em encontrar um vetor $\{U\}$ de maneira que o resíduo $\{R(U)\}$ seja o menor possível. Uma solução exata tornaria o resíduo nulo. A procura por uma solução é feita através de métodos iterativos.

Método de Newton-Raphson Pleno

O método de Newton-Raphson pleno consiste em construir uma seqüência de soluções $\{U^0\}, \{U^1\}, ..., \{U^i\}, onde \{U^i\}$ é calculado através do valor anterior $\{U^{i-1}\}$ e da solução do sistema linear:

$$\left[K_{i}\left(U^{i-1}\right)\right]\!\left\{\Delta U^{i}\right\} = \left\{R\left(U^{i-1}\right)\right\}$$
(I.17)

$$\left\{U^{i}\right\} = \left\{U^{i-1}\right\} + \left\{\Delta U^{i}\right\}$$
(I.18)

Algoritmo para o método de Newton-Raphson pleno

Escolho um valor inicial para $\{U^0\}$, em geral tomamos $\{U^0\} = \{0\}$. Construo $\{F\}$ dos valores elementares $\{f\}$.

Para i = 1, 2, 3, ... (para cada iteração):

Faço para cada elemento:

Extraio o vetor deslocamento nodal elementar

 $\left\{ u^{i-1} \right\}$ de $\left\{ U^{i-1} \right\}$

Computo a matriz de rigidez tangente elementar

 $\left[k_t\left(u^{i-1}\right)\right]$

Computo o vetor resíduo elementar

$$\{r\} = \{f\} - [k_t] \{u^{i-1}\}$$

Monto as matrizes globais do sistema linearizado

 $\left[K_{t}^{i-1}\right] \in \left\{R^{i-1}\right\}$

Soluciono o sistema linear para $\{\Delta U^i\}$

 $\left[K_{t}^{i-1}\right]\!\left\{\Delta U^{i}\right\} = \left\{R^{i-1}\right\}$

Atualizo o vetor deslocamento nodal global

$$\left\{U^{i}\right\} = \left\{U^{i-1}\right\} + \omega\left\{\Delta U^{i}\right\}$$

Calculo a norma ||n||

$$\left\|\boldsymbol{n}\right\| = \frac{\sqrt{\left\{\Delta U^{i}\right\}^{T} \left\{\Delta U^{i}\right\}}}{\sqrt{\left\{U^{i}\right\}^{T} \left\{U^{i}\right\}}}$$

Verifico a convergência

Se ||n|| < TOLERÂNCIA

Converge

Se
$$||n|| \ge TOLERÂNCIA$$

Nova iteração

i = i + 1

Onde ω é um fator que é utilizado no algoritmo para melhorar a taxa de convergência, mas seu valor numérico depende do problema e é normalmente obtido através experimentação numérica. Em problemas de plasticidade ω é freqüentemente usado com valores entre 1,7 e 1,9.

Anexo II

Princípio dos Trabalhos Virtuais

Seja f(x, y, z) uma função que deve ser nula para todo o domínio Ω :

$$f(x, y, z) = 0 \tag{II.1}$$

Caso não seja zero em todo domínio Ω , o equilíbrio não está satisfeito. Uma forma possível de identificar se uma função é zero em todo ponto do domínio onde ela está definida, consiste em multiplicar esta função por outra função arbitrária $\hat{u}(x, y, z)$ de um domínio arbitrário Ω_{AR} , denominada **deslocamento virtual**, e integrar no domínio Ω :

$$\int_{\Omega} f(\vec{x})\hat{u}(\vec{x})d\Omega \tag{II.2}$$

Se o resultado desta operação é nulo, existem chances de que a função f(x, y, z) que está sendo testada seja zero em todo ponto do domínio Ω . Obviamente que este resultado pode ser devido a escolha particular da função $\hat{u}(x, y, z)$, mas é possível afirmar que a única função f(x, y, z) que submetida a uma integração como a acima descrita fornece como resultado o valor zero quando multiplicada com qualquer função $\hat{u}(x, y, z)$ pertencente ao domínio arbitrário Ω_{AR} , é a função $f(x, y, z) \equiv 0$. Em outras palavras, afirmar que $f(x, y, z) \equiv 0$ equivale a dizer que:

$$\int_{\Omega} f(\vec{x})\hat{u}(\vec{x})d\Omega = 0 \qquad \forall \hat{u}(x, y, z) \in \Omega_{AR}$$
(II.3)

A Equação II.3 fornece a formulação integral no domínio Ω que será posteriormente discretizada por elementos finitos.

Anexo III

Critério de Escoamento

Estado de Tensão

O estado de tensão em qualquer ponto material pode ser caracterizado pelo tensor de tensão de Cauchy σ ,

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$
(III.1)

Podemos então calcular as tensões principais ou os autovalores σ_1 , σ_2 e σ_3 de σ_{ij} usando a equação,

$$\det(\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij}) = 0 \tag{III.2}$$

ou

$$\begin{array}{cccc} \sigma_{11} - \sigma & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} - \sigma & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} - \sigma \end{array} = 0$$
 (III.3)

Expandindo a Equação III.3 chegamos a equação característica do tensor de tensão de

Cauchy,

$$\sigma^{3} - J_{1}\sigma^{2} + J_{2}\sigma - J_{3} = 0 \tag{III.4}$$

onde J_1 , J_2 e J_3 são as invariantes do tensor de tensão de Cauchy dadas em função das tensões principais pelas seguintes expressões:

$$J_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \tag{III.5}$$

$$J_2 = \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1 \tag{III.6}$$

$$J_3 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 \tag{III.7}$$

Na teoria da plasticidade é comum decompor o tensor de tensão de Cauchy em dois tensores da seguinte forma:

$$\sigma = pI + S \tag{III.8}$$

ou

$$\sigma_{ij} = p\delta_{ij} + S_{ij} \tag{III.9}$$

onde p é a tensão ou pressão hidrostática dada por,

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \tag{III.10}$$

sendo $p\delta_{ij}$ chamado de tensor de tensão hidrostático ou esférico responsável pela variação volumétrica e *S* é o tensor de tensão desviador responsável pela deformação plástica.

Da Equação III.9 podemos fazer,

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - p\delta_{ij} \tag{III.11}$$

Agora S_1 , S_2 e S_3 são as tensões principais do tensor de tensão desviador e J_1 ', J_2 ' e J_3 ' são suas invariantes que em função das tensões principais são dadas pelas seguintes expressões:

$$J_1' = S_1 + S_2 + S_3 = 0 \tag{III.12}$$

$$J_{2}' = \frac{1}{2} \left(S_{1}^{2} + S_{2}^{2} + S_{3}^{2} \right)$$
(III.13)

$$J_{3}' = S_{1}S_{2}S_{3} \tag{III.14}$$

Vamos agora expressar a segunda invariante do tensor de tensão desviador em função das tensões principais do tensor de tensão de Cauchy;

$$J_{2}' = \frac{1}{6} \left[(\sigma_{1} - \sigma_{2})^{2} + (\sigma_{2} - \sigma_{3})^{2} + (\sigma_{3} - \sigma_{1})^{2} \right]$$
(III.15)

Critério de Escoamento de von Mises

O critério assume que o escoamento plástico ocorrerá somente quando a segunda invariante J_2 ' do tensor de tensão desviador *S* alcançar um valor crítico k^2 , que é uma propriedade do material, dado pela Equação III.16:

$$J_2' = k^2$$
 (III.16)

ou

$$\frac{1}{6} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right] = k^2$$
(III.17)

Para determinar a constante k, basta realizar um teste de tração uniaxial onde,

$$\sigma_1 = \sigma_y \quad e \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \tag{III.18}$$

onde σ_y é a tensão de escoamento em um teste de tração uniaxial. Substituindo a Equação III.18

na Equação III.17 temos:

$$\frac{1}{3}\sigma_y^2 = k^2 \tag{III.19}$$

portanto,

$$k = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \tag{III.20}$$

Substituindo agora a Equação III.20 na Equação III.17 obtemos uma expressão para o critério de von Mises que relaciona o estado de tensão tridimensional ao qual o material está sujeito com a tensão de escoamento do material:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \sigma_y$$
(III.21)

Superfície de Escoamento

Em uma curva tensão-deformação de um teste de tração unidimensional a tensão de escoamento corresponde a um ponto na curva. Se criarmos um espaço onde as 6 componentes independentes do tensor de tensão simétrico de Cauchy sejam os eixos de coordenadas independentes deste espaço de tensão, todos os estados de tensão que causam escoamento plástico podem ser imaginados constituir uma superfície contínua, chamada de superfície de escoamento que divide o espaço de tensão em domínio elástico e plástico.

Considerando o material homogêneo e desprezando os efeitos térmicos podemos representar matematicamente a superfície de escoamento ou função de escoamento no espaço de tensão da seguinte forma:

$$F(\sigma_{ii}) = f(\sigma_{ii}) - k = 0 \tag{III.22}$$

onde k é uma propriedade do material e quando,

$$F(\sigma_{ii}) < 0$$
 temos o domínio de deformação elástica (III.23)

 $F(\sigma_{ij}) = 0$ podemos ter um carregamento plástico, um carregamento neutro ou um descarregamento elástico (III.24)

Se o material é isotrópico, onde suas propriedades são as mesmas em qualquer direção, somente a magnitude das tensões principais serão necessárias para descrever o comportamento do escoamento, ou seja, a função de escoamento será função apenas das tensões principais σ_1 , σ_2 e σ_3 e estas serão os eixos de coordenadas independentes onde a superfície de escoamento será cilíndrica (Figura III.1.a), assim a Equação III.22 se torna:

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) - k = 0$$
(III.25)

Para o critério de escoamento de von Mises a função de escoamento é escrita da seguinte forma:

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = J_2' - \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} = 0$$
 (III.26)

Se projetarmos a superfície de escoamento cilíndrica e os eixos de coordenadas sobre o plano π mostrado na Figura III.1.a, teremos uma circunferência (Figura III.1.b) que corresponde a área da base do cilindro onde seu raio é dado por:

$$r = \sqrt{2k} \tag{III.27}$$

Substituindo a Equação III.20 na Equação III.27 temos o raio para a superfície de escoamento de Von Mises,

$$r = \sqrt{\frac{2}{3}}\sigma_y \tag{III.28}$$



Figura III.1: (a) Superfície de escoamento para materiais isotrópicos no espaço de tensão 3-D;
(b) Superfície de escoamento de von Mises projetada sobre o plano π.

Para o espaço de tensão 3-D onde os eixos de coordenadas independentes são as tensões principais σ_1 , σ_2 e σ_3 (Figura III.1.a), a tensão e a deformação podem ser representados vetorialmente, $\vec{\sigma} \in \vec{\varepsilon}$, onde suas componentes serão ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) e ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$) respectivamente.

Modelo de Encruamento Isotrópico

Para auxiliar a descrição do modelo de encruamento isotrópico vamos analisar a trajetória de carregamento e descarregamento numa curva de tensão-deformação com encruamento linear mostrado na Figura III.2.a. Primeiramente, o material é carregado elasticamente de um estado livre de tensão (ponto 0) para o ponto de escoamento inicial (ponto 1), depois é continuamente carregado plasticamente até ponto 2, então o material é descarregado do ponto 2 para o ponto 3 seguindo a inclinação elástica definida pelo módulo de Young (E) e novamente ocorre o carregamento elástico do ponto 3 para o ponto 2 e finalmente o material sofre carregamento plástico do ponto 2 ao ponto 4. Agora ocorre o descarregamento elástico do ponto 4 para o ponto

5 seguido de um carregamento plástico reverso do ponto 5 para o ponto 6.

É obvio que a tensão no ponto 1 é igual tensão de escoamento inicial e que as tensões nos pontos 2 e 4 são maiores que a tensão de escoamento inicial devido ao encruamento do material. Durante o descarregamento o estado de tensão permanece no domínio elástico, mas pode alcançar um ponto de escoamento reverso subseqüente como o ponto 5. No encruamento isotrópico assume-se ocorrer o escoamento reverso para um nível de tensão igual ao nível de tensão atual mas na direção inversa, ou seja, se tomarmos como exemplo o ponto 4 da Figura III.2.a o nível da tensão atual é σ_4 , portanto, o escoamento reverso somente ocorrerá em um nível de tensão igual a - σ_4 (ponto 5).



Figura III.2: (a) Trajetória de carregamento; (b) Superfícies de escoamento de Von Mises com os respectivos pontos da trajetória de carregamento.

O modelo de encruamento isotrópico assume que a superfície de escoamento subseqüente é uma expansão uniforme da superfície de escoamento inicial sem que haja variação na posição do centro da superfície de escoamento subseqüente em relação a inicial (Figura III.2.b). Mas como pode ser visto também na Figura III.2.a, o ponto 2 e o ponto 4' apresentam um mesmo nível de tensão mas a história do carregamento é diferente,ou seja, no ponto 2 o material está sujeito a um carregamento plástico e no ponto 4' está sofrendo descarregamento elástico. Para se fazer a distinção quanto ao tipo de carregamento ao qual o material esta submetido, primeiramente a

função de escoamento deve ser analisada da seguinte forma:

Se $F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) - k < 0$ o estado de tensão encontra-se no domínio elástico de deformação,

Se $F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) - k = 0$ o estado de tensão pode definir um carregamento plástico, um carregamento neutro ou um descarregamento elástico.

Portanto, para o caso da função de escoamento ser nula devemos obter sua derivada da seguinte maneira:

$$dF = f(\vec{\sigma} + d\vec{\sigma}) - f(\vec{\sigma}) = \frac{\partial f(\vec{\sigma})}{\partial \vec{\sigma}} \cdot d\vec{\sigma}$$
(III.29)

onde $\vec{\sigma}$ é a representação vetorial do tensor de tensão no espaço de tensões principais 3-D com coordenadas ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$).

No espaço de tensão a direção e o sentido do vetor $\partial f/\partial \vec{\sigma}$ são iguais as do vetor normal \hat{n} da superfície de escoamento. O vetor $\partial f/\partial \vec{\sigma}$ é representado pelo vetor \vec{a} na Figura III.2.b. Assim:

Se dF > 0 significa que o vetor $d\vec{\sigma}$ está apontando para fora da superfície de escoamento, temos então um carregamento plástico, conseqüentemente haverá uma expansão da superfície de escoamento devido ao encruamento do material. Neste caso $d\vec{\sigma}$ é representado pelo vetor \vec{b} na Figura III.2.b.

Se dF = 0 quer dizer que o vetor $d\vec{\sigma}$ é tangente à superfície de escoamento, temos neste caso um carregamento neutro não havendo variação na dimensão da superfície de escoamento mesmo que o material esteja deformando plasticamente. Isto ocorre em materiais perfeitamente plástico. Aqui $d\vec{\sigma}$ corresponde ao vetor \vec{c} na Figura III.2.b.

Se dF < 0 significa que o vetor $d\vec{\sigma}$ aponta para o interior da superfície de escoamento, temos assim um descarregamento elástico. Neste caso $d\vec{\sigma}$ pode ser ilustrado pelo vetor \vec{d} na Figura III.2.b.

Anexo IV

Elementos Finitos

Neste trabalho, para discretizar a chapa nas simulações foram utilizados elementos finitos 3-D do tipo hexaédrico linear de 8 nós (Figura IV.1).



Figura IV.1: Elemento hexaédrico linear de 8 nós no sistema de coordenadas de referência (ξ, η, ζ) .

Para este tipo de elemento foram adotadas 8 funções de forma *N* no sistema de coordenadas de referência (ξ, η, ζ) mostradas a seguir:

$$N_{1} = \frac{1}{8} (1 - \zeta)(1 - \eta)(1 - \zeta)$$
$$N_{2} = \frac{1}{8} (1 + \zeta)(1 - \eta)(1 - \zeta)$$

$$N_{3} = \frac{1}{8} (1 + \xi)(1 + \eta)(1 - \zeta)$$

$$N_{4} = \frac{1}{8} (1 - \xi)(1 + \eta)(1 - \zeta)$$

$$N_{5} = \frac{1}{8} (1 - \xi)(1 - \eta)(1 + \zeta)$$

$$N_{6} = \frac{1}{8} (1 + \xi)(1 - \eta)(1 + \zeta)$$

$$N_{7} = \frac{1}{8} (1 + \xi)(1 + \eta)(1 + \zeta)$$

$$N_{8} = \frac{1}{8} (1 - \xi)(1 + \eta)(1 + \zeta)$$

Para uma aproximação da geometria temos as seguintes relações:

$$\begin{aligned} x(\xi,\eta,\zeta) &= N_i(\xi,\eta,\zeta) x_i \\ y(\xi,\eta,\zeta) &= \overline{N}_i(\xi,\eta,\zeta) y_i \\ z(\xi,\eta,\zeta) &= \overline{N}_i(\xi,\eta,\zeta) z_i \end{aligned}$$
(IV.2)

onde x_i , y_i , z_i são as coordenadas cartesianas dos i nós do elemento real.

E para a aproximação do problema físico temos a expressão abaixo:

$$u(\xi,\eta,\zeta) = N_i(\xi,\eta,\zeta)u_i \tag{IV.3}$$

onde u_i são as variáveis nodais do elemento real.

Quando as funções de formas utilizadas para a aproximação geométrica são as mesmas usadas para a aproximação física temos uma aproximação isoparamétrica, assim:

$$\overline{N}_i = N_i \tag{IV.4}$$

Matriz das Funções de Forma

Para o elemento finito adotado em um espaço 3-D com 3 graus de liberdade, temos a seguinte matriz de funções de Forma:

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & \cdots & N_8 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & \cdots & 0 & N_8 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & \cdots & 0 & 0 & N_8 \end{bmatrix}_{3 \times 24}$$
(IV.5)

Matriz Constitutiva Elástica

As relações constitutivas para o domínio elástico são governadas pela Lei de Hooke para material isotrópico, que generealizada para um carregamento 3-D é expressa da seguinte forma;

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2G \varepsilon_{ij} \tag{IV.6}$$

onde:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \tag{IV.7}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{IV.8}$$

Substituindo as Equações IV.7 e IV.8 na Equação IV.6 e desenvolvendo-a, temos a seguinte relação constitutiva na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{14} \end{bmatrix} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{1-\nu} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{1-\nu} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{1-\nu} \end{bmatrix} . \quad (IV.9)$$

onde a matriz constitutiva elástica é;

$$\left[C^{e}\right] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0\\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0\\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{1-\nu} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{1-\nu} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{1-\nu} \end{bmatrix}_{6\times6}$$
(IV.10)

Matriz das Derivadas das Funções de Forma

Para o domínio elástico, temos as seguintes relações cinemáticas:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(u_{i,j} + u_{j,i} \right) \tag{IV.11}$$

Desenvolvendo a Equação IV.11, podemos representá-la matricialmente da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_3} \\ \frac{1}{2} \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_2} & \frac{1}{2} \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_1} & 0 \\ \frac{1}{2} \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_3} & 0 & \frac{1}{2} \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_1} \\ 0 & \frac{1}{2} \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_3} & \frac{1}{2} \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}$$
(IV.12)

Para o elemento finito com 8 nós, usando a Equação IV.3 e conjunto com a Equação IV.5 e substituindo na Equação IV.12, temos:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_3} \\ \frac{1}{2} \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_2} & \frac{1}{2} \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_1} & 0 \\ \frac{1}{2} \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_3} & 0 & \frac{1}{2} \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_1} \\ 0 & \frac{1}{2} \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_3} & \frac{1}{2} \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & \cdots & N_8 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & \cdots & 0 & N_8 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & \cdots & 0 & 0 & N_8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1^1 \\ u_2^1 \\ u_2^2 \\ u_3^2 \\ \vdots \\ u_1^8 \\ u_2^8 \\ u_3^8 \end{bmatrix}$$
(IV.13)

Assim, temos da Equação IV.13 a expressão para a matriz das derivadas das dunções de forma:

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_{1}} & 0 & 0\\ 0 & \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_{2}} & 0\\ 0 & 0 & \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_{3}}\\ \frac{1}{2}\frac{\partial(\cdot)}{\partial x_{2}} & \frac{1}{2}\frac{\partial(\cdot)}{\partial x_{1}} & 0\\ \frac{1}{2}\frac{\partial(\cdot)}{\partial x_{3}} & 0 & \frac{1}{2}\frac{\partial(\cdot)}{\partial x_{1}}\\ 0 & \frac{1}{2}\frac{\partial(\cdot)}{\partial x_{3}} & \frac{1}{2}\frac{\partial(\cdot)}{\partial x_{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N_{1} & 0 & 0 & N_{2} & 0 & \cdots & N_{8} & 0\\ 0 & N_{1} & 0 & 0 & N_{2} & 0 & \cdots & 0 & N_{8} & 0\\ 0 & 0 & N_{1} & 0 & 0 & N_{2} & \cdots & 0 & 0 & N_{8} \end{bmatrix}$$

$$(IV.14)$$

ou

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x_1} & 0 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x_1} & 0 & 0 & \cdots & \frac{\partial N_8}{\partial x_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x_2} & 0 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x_2} & 0 & \cdots & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial x_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x_3} & 0 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x_2} & \cdots & 0 & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial x_3} \\ \frac{1}{2} \frac{\partial N_1}{\partial x_2} & \frac{1}{2} \frac{\partial N_1}{\partial x_1} & 0 & \frac{1}{2} \frac{\partial N_2}{\partial x_2} & \frac{1}{2} \frac{\partial N_2}{\partial x_1} & 0 & \cdots & \frac{1}{2} \frac{\partial N_8}{\partial x_3} & \frac{1}{2} \frac{\partial N_8}{\partial x_1} & 0 \\ \frac{1}{2} \frac{\partial N_1}{\partial x_3} & 0 & \frac{1}{2} \frac{\partial N_1}{\partial x_1} & \frac{1}{2} \frac{\partial N_2}{\partial x_3} & 0 & \frac{1}{2} \frac{\partial N_2}{\partial x_1} & \cdots & \frac{1}{2} \frac{\partial N_8}{\partial x_3} & 0 & \frac{1}{2} \frac{\partial N_8}{\partial x_1} \\ 0 & \frac{1}{2} \frac{\partial N_1}{\partial x_3} & \frac{1}{2} \frac{\partial N_1}{\partial x_2} & 0 & \frac{1}{2} \frac{\partial N_2}{\partial x_3} & \frac{1}{2} \frac{\partial N_2}{\partial x_2} & \cdots & 0 & \frac{1}{2} \frac{\partial N_8}{\partial x_3} & \frac{1}{2} \frac{\partial N_8}{\partial x_1} \\ \end{bmatrix}_{3\times 24}$$
(IV.15)

Transformação das Integrais

Para transformar o sistema de equações integrais obtidas através do Princípio dos Trabalhos Virtuais e discretizados por elementos finitos do sistema de coordenadas cartesianas (x,y,z) para o sistema de coordenadas de referência aplicamos a seguinte relação:

$$\iiint f(x, y, z) dx dy dz = \int_{\xi=-1}^{\xi=1} \int_{\eta=-1}^{\eta=-1} \int_{\zeta=-1}^{\zeta=1} f(x(\xi, \eta, \zeta), y(\xi, \eta, \zeta), z(\xi, \eta, \zeta)) \det(J) d\xi d\eta d\zeta$$
(IV.16)

onde det(J) é o determinante da matriz Jacobiano J,

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix}$$
(IV.17)

Para o elemento hexaédrico linear de 8 nós usando as Equações IV.1 e IV.2 obtemos as seguintes expressões:

$$\frac{\partial x}{\partial \xi} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(N_1 x_1 + N_2 x_2 + \dots + N_8 x_8 \right)$$
(IV.18)

$$\frac{\partial x}{\partial \xi} = \frac{\partial N_1 x_1}{\partial \xi} + \frac{\partial N_2 x_2}{\partial \xi} + \dots + \frac{\partial N_8 x_8}{\partial \xi}$$
(IV.19)

$$\frac{\partial x}{\partial \xi} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial \xi} & \frac{\partial N_2}{\partial \xi} & \cdots & \frac{\partial N_8}{\partial \xi} \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_8 \end{cases} = \frac{\partial N_n}{\partial \xi} x_n$$
(IV.20)

$$\frac{\partial x}{\partial \xi} = \left[-\frac{1}{8} (1-\eta)(1-\zeta) \quad \frac{1}{8} (1-\eta)(1-\zeta) \quad \cdots \quad -\frac{1}{8} (1+\eta)(1+\zeta) \right] \cdot \begin{cases} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_8 \end{cases}$$
(IV.21)

$$\frac{\partial x}{\partial \xi} = \frac{1}{8} \left(-x_1 + x_2 + x_3 - x_4 - x_5 + x_6 + x_7 - x_8 \right) + \frac{\eta}{8} \left(+x_1 - x_2 + x_3 - x_4 + x_5 - x_6 + x_7 - x_8 \right) + \frac{\zeta}{8} \left(+x_1 - x_2 - x_3 + x_4 - x_5 + x_6 + x_7 - x_8 \right) + \frac{\eta \zeta}{8} \left(-x_1 + x_2 - x_3 + x_4 + x_5 - x_6 + x_7 - x_8 \right)$$
(IV.22)

Analogamente temos:

$$\frac{\partial y}{\partial \xi} = \frac{1}{8} \left(-y_1 + y_2 + y_3 - y_4 - y_5 + y_6 + y_7 - y_8 \right) + \frac{\eta}{8} \left(+y_1 - y_2 + y_3 - y_4 + y_5 - y_6 + y_7 - y_8 \right) + \frac{\zeta}{8} \left(+y_1 - y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6 + y_7 - y_8 \right) + \frac{\eta \zeta}{8} \left(-y_1 + y_2 - x_3 + y_4 + y_5 - y_6 + y_7 - y_8 \right)$$
(IV.23)

$$\frac{\partial z}{\partial \xi} = \frac{1}{8} \left(-z_1 + z_2 + z_3 - z_4 - z_5 + z_6 + z_7 - z_8 \right) + \frac{\eta}{8} \left(+x_1 - z_2 + z_3 - z_4 + z_5 - z_6 + z_7 - z_8 \right) + \frac{\zeta}{8} \left(+x_1 - z_2 - z_3 + z_4 - z_5 + z_6 + z_7 - z_8 \right) + \frac{\eta \zeta}{8} \left(-z_1 + z_2 - z_3 + z_4 + z_5 - z_6 + z_7 - z_8 \right)$$
(IV.24)

Para as derivadas parciais em relação à $\eta,$ temos:

$$\frac{\partial x}{\partial \eta} = \frac{1}{8} \left(-x_1 - x_2 + x_3 + x_4 - x_5 - x_6 + x_7 + x_8 \right) + \frac{\xi}{8} \left(+x_1 - x_2 + x_3 - x_4 + x_5 - x_6 + x_7 - x_8 \right) + \frac{\zeta}{8} \left(+x_1 + x_2 - x_3 - x_4 - x_5 - x_6 + x_7 + x_8 \right) + \frac{\xi\zeta}{8} \left(-x_1 + x_2 - x_3 + x_4 + x_5 - x_6 + x_7 - x_8 \right)$$
(IV.25)

$$\frac{\partial y}{\partial \eta} = \frac{1}{8} \left(-y_1 - y_2 + y_3 + y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8 \right) + \frac{\xi}{8} \left(+y_1 - y_2 + y_3 - y_4 + y_5 - y_6 + y_7 - y_8 \right) + \frac{\zeta}{8} \left(+y_1 + y_2 - y_3 - y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8 \right) + \frac{\xi\zeta}{8} \left(-y_1 + y_2 - x_3 + y_4 + y_5 - y_6 + y_7 - y_8 \right)$$
(IV.26)

$$\frac{\partial z}{\partial \eta} = \frac{1}{8} \left(-z_1 - z_2 + z_3 + z_4 - z_5 - z_6 + z_7 + z_8 \right) + \frac{\xi}{8} \left(+x_1 - z_2 + z_3 - z_4 + z_5 - z_6 + z_7 - z_8 \right) + \frac{\zeta}{8} \left(+x_1 + z_2 - z_3 - z_4 - z_5 - z_6 + z_7 + z_8 \right) + \frac{\xi\zeta}{8} \left(-z_1 + z_2 - z_3 + z_4 + z_5 - z_6 + z_7 - z_8 \right)$$
(IV.27)

Para as derivadas parciais em relação à $\pmb{\zeta},$ temos:

$$\frac{\partial x}{\partial \zeta} = \frac{1}{8} \left(-x_1 - x_2 - x_3 - x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 \right) + \frac{\xi}{8} \left(+x_1 - x_2 - x_3 + x_4 - x_5 + x_6 + x_7 - x_8 \right) + \frac{\eta}{8} \left(+x_1 + x_2 - x_3 - x_4 - x_5 - x_6 + x_7 + x_8 \right) + \frac{\xi \eta}{8} \left(-x_1 + x_2 - x_3 + x_4 + x_5 - x_6 + x_7 - x_8 \right)$$
(IV.28)

$$\frac{\partial y}{\partial \zeta} = \frac{1}{8} \left(-y_1 - y_2 - y_3 - y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8 \right) + \frac{\xi}{8} \left(+y_1 - y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6 + y_7 - y_8 \right) + \frac{\eta}{8} \left(+y_1 + y_2 - y_3 - y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8 \right) + \frac{\xi \eta}{8} \left(-y_1 + y_2 - x_3 + y_4 + y_5 - y_6 + y_7 - y_8 \right)$$
(IV.29)
$$\frac{\partial z}{\partial \zeta} = \frac{1}{8} \left(-z_1 - z_2 - z_3 - z_4 + z_5 + z_6 + z_7 + z_8 \right) + \frac{\xi}{8} \left(+x_1 - z_2 - z_3 + z_4 - z_5 + z_6 + z_7 - z_8 \right) + \frac{\eta}{8} \left(+x_1 + z_2 - z_3 - z_4 - z_5 - z_6 + z_7 + z_8 \right) + \frac{\xi \eta}{8} \left(-z_1 + z_2 - z_3 + z_4 + z_5 - z_6 + z_7 - z_8 \right)$$
(IV.30)

Agora, substituindo as Equações IV.22 à IV.30 na Equação IV.17, obtemos a matriz Jacobiano J.

Transformação das Derivadas

Nas equações integrais discretizadas por elementos finitos a função f(x,y,z) da Equação IV.16 possui na sua expressão derivadas parciais no sistema de coordenadas cartesianas (x,y,z) que devem também ser transformadas em derivadas parciais no sistema de coordenadas de referência (ξ , η , ζ). Para isso usando a regra da cadeia do cálculo obtemos a transformação de derivadas da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix}
\frac{\partial()}{\partial\xi} \\
\frac{\partial()}{\partial\eta} \\
\frac{\partial()}{\partial\zeta}
\end{bmatrix} =
\begin{bmatrix}
\frac{\partial x}{\partial\xi} & \frac{\partial y}{\partial\xi} & \frac{\partial z}{\partial\xi} \\
\frac{\partial x}{\partial\eta} & \frac{\partial y}{\partial\eta} & \frac{\partial z}{\partial\eta} \\
\frac{\partial x}{\partial\zeta} & \frac{\partial y}{\partial\zeta} & \frac{\partial z}{\partial\zeta}
\end{bmatrix} \cdot
\begin{bmatrix}
\frac{\partial()}{\partial x} \\
\frac{\partial()}{\partial y} \\
\frac{\partial()}{\partialz}
\end{bmatrix}$$
(IV.31)

Mas para este trabalho a Equação IV.31 deve ser utilizada na relação inversa, que substitui as derivadas do espaço real para o espaço de referência:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\)}{\partial x} \\ \frac{\partial(\)}{\partial y} \\ \frac{\partial(\)}{\partial z} \end{cases} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{cases} \frac{\partial(\)}{\partial \xi} \\ \frac{\partial (\)}{\partial \eta} \\ \frac{\partial(\)}{\partial \zeta} \end{cases}$$

Integração Numérica de Gauss

Uma vez obtida as equações integrais no sistema de coordenadas de referência, ou seja, o lado direito da Equação IV.16, o próximo passo é desenvolver as integrais e para isso é utilizado o método de integração numérica de Gauss, que constitui em substituir as integrais da função $f(\xi, \eta, \zeta)$ por uma somatória do produto dos pesos ou coeficientes de integração w_i pela função $f(\xi_i, \eta_i, \zeta_i)$ nos pontos *i* em *r* pontos de integração, ou seja,

(IV.32)

$$\int_{\xi=-1}^{\xi=1} \int_{\eta=-1}^{\eta=1} \int_{\zeta=-1}^{\zeta=1} f(\xi,\eta,\zeta) d\xi d\eta d\zeta = \sum_{i=1}^{r} w_i f(\xi_i,\eta_i,\zeta_i)$$
(IV.33)

A Equação IV.33 é a fórmula do método de Gauss para uma integração direta sobre um cubo. Para o elemento hexaédrico linear o software MSC Superform 2002 utiliza 8 pontos de integração, portanto r = 8.

Anexo V

Tensão e Deformação Verdadeiras

Para um teste de tração uniaxial, temos:

$$\hat{\sigma} = \frac{P}{A_0} \tag{V.1}$$

onde $\hat{\sigma}$ é a tensão nominal, *P* é a carga axial aplicada ao material testado e A_0 área não deformada da seção transversal do material testado.

$$\hat{\varepsilon} = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \tag{V.2}$$

onde $\hat{\varepsilon}$ é a deformação nominal, Δl é a variação do comprimento do material testado, l_0 é o comprimento inicial e *l* é o comprimento final.

Como podemos ver a tensão e a deformação nominais são baseadas nas dimensões originais, ou seja, não deformadas. Vamos mostrar agora a tensão e a deformação em função das dimensões atuais.

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{V.3}$$

onde σ é a tensão verdadeira e A é a área da seção transversal do material quando o mesmo está sujeito a carga axial P.

Para obtermos a deformação, fazemos:

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l} \tag{V.4}$$

onde ε é a deformação verdadeira ou logarítmica e l é o comprimento do material quando o mesmo está sujeito a carga axial P. Integrando a Equação V.4 para o comprimento do material variando de l_0 à l, temos:

$$\int d\varepsilon = \int_{l_0}^{l} \frac{dl}{l} \tag{V.5}$$

Portanto,

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{l}{l_0} \right) \tag{V.6}$$

Da Equação V.2 temos que:

$$\frac{l}{l_0} = \hat{\varepsilon} + 1 \tag{V.7}$$

Finalmente substituindo a Equação V.7 na Equação V.6, temos a expressão da deformação logarítmica em função da deformação nominal,

$$\varepsilon = \ln(1 + \hat{\varepsilon}) \tag{V.8}$$

Na teoria da plasticidade é normal assumir que o material seja incompressivel, ou seja, o
seu volume não varia, isso é baseado em evidências experimentais, portanto, podemos através desta hipótese escrever:

$$A_0 l_0 = Al \Longrightarrow A = A_0 \frac{l_0}{l} \tag{V.9}$$

Substituindo a Equação V.9 na Equação V.3, temos:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \frac{l}{l_0} \tag{V.10}$$

Finalmente, substituindo as Equações V.1 e V.7 na Equação V.10, obtemos a expressão da tensão verdadeira em função da tensão e deformação nominais,

$$\sigma = \hat{\sigma}(1 + \hat{\varepsilon}) \tag{V.11}$$

Formulação Elasto-Plástica

Para a teoria clássica da plasticidade o tensor deformação infinitesimal pode ser decomposto da seguinte forma:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \tag{V.12}$$

onde ε é a deformação logarítmica ou verdadeira. Passando a Equação V.12 para a forma diferencial, temos:

$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^p \tag{V.13}$$

esta decomposição é chamada de decomposição aditiva.

Como vimos na Figura 4.1 na região elástica a inclinação da curva tensão-deformação é dada pelo módulo de elasticidade ou de Young E. Na região plástica a inclinação da curva, denominada inclinação de encruamento H é dada pela seguinte relação:

$$H = \frac{\sigma}{\varepsilon^p} = \frac{\sigma_e}{\varepsilon_e^p} = \frac{d\sigma_e}{d\varepsilon_e^p}$$
(V.14)

onde σ_e é a tensão efetiva ou equivalente dada pela Equação V.15 e ε_e^p é a deformação plástica efetiva ou equivalente dada pela Equação V.16:

$$\sigma_{e} = \sqrt{3J_{2}'} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_{1} - \sigma_{2})^{2} + (\sigma_{2} - \sigma_{3})^{2} + (\sigma_{3} - \sigma_{1})^{2} \right]^{\frac{1}{2}}$$
(V.15)

$$\varepsilon_{e}^{p} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\left(\varepsilon_{1}^{p} - \varepsilon_{2}^{p} \right)^{2} + \left(\varepsilon_{2}^{p} - \varepsilon_{3}^{p} \right)^{2} + \left(\varepsilon_{3}^{p} - \varepsilon_{1}^{p} \right)^{2} \right]^{\frac{1}{2}}$$
(V.16)

Segundo a regra de fluxo associado ou regra da normalidade para a plasticidade, temos:

$$d\vec{\varepsilon}^{\,p} = d\lambda \frac{\partial F(\vec{\sigma})}{\partial \vec{\sigma}} \tag{V.17}$$

onde $d\lambda$ é um parâmetro de proporcionalidade que quantifica a deformação plástica e $F(\vec{\sigma})$ é a função de escoamento. Usando o critério de escoamento de von Mises onde a função de escoamento é a segunda invariante do tensor de tensão desviador mostrado no Anexo III, temos:

$$d\vec{\varepsilon}^{\,p} = d\lambda \frac{\partial J_2'}{\partial \vec{\sigma}} \tag{V.18}$$

A Equação V.18 representa às equações de Prandtl-Reuss. Aplicando o critério de escoamento de von Mises chegamos a seguinte expressão para o parâmetro de proporcionalidade:

$$d\lambda = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_e^p}{\sigma_e}$$
(V.19)

Temos ainda que:

$$\frac{\partial J_2'}{\partial \vec{\sigma}} = \frac{2}{3} \sigma_e \frac{\partial \sigma_e}{\partial \vec{\sigma}}$$
(V.20)

Substituindo as Equações V.19 e V.20 na Equação V.18, temos;

$$d\vec{\varepsilon}^{\,p} = d\varepsilon_e^{\,p} \frac{\partial\sigma_e}{\partial\vec{\sigma}} \tag{V.21}$$

Das relações gerais de tensão-deformação para a deformação plástica temos que:

$$d\vec{\sigma} = C^{ep} \cdot d\vec{\varepsilon} \tag{V.22}$$

$$d\vec{\sigma} = C^e \cdot d\vec{\varepsilon}^e \tag{V.23}$$

onde $[C^{e_p}]$ e $[C^e]$ são as matrizes constitutivas elasto-plástica e elástica respectivamente e $\vec{\varepsilon}$ é a representação vetorial do tensor deformação no espaço de deformações principais 3-D com coordenadas ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$). Usando a Equação V.13 na Equação V.23, temos:

$$d\bar{\sigma} = C^e \cdot \left(d\varepsilon - d\varepsilon^p \right) \tag{V.24}$$

$$d\bar{\sigma} = C^e \cdot d\bar{\varepsilon} - C^e \cdot d\bar{\varepsilon}^p \tag{V.25}$$

Substituindo a Equação V.21 na Equação V.25, temos:

$$d\bar{\sigma} = C^e \cdot d\bar{\varepsilon} - C^e \cdot \frac{\partial \sigma_e}{\partial \bar{\sigma}} d\varepsilon_e^p \tag{V.26}$$

Multiplicando ambos os lados da Equação V.26 por $\partial\sigma_{\scriptscriptstyle e}/\partial\vec{\sigma}$, temos:

$$\frac{\partial \sigma_e}{\partial \vec{\sigma}} \cdot d\vec{\sigma} = \frac{\partial \sigma_e}{\partial \vec{\sigma}} \cdot C^e \cdot d\vec{\varepsilon} - \frac{\partial \sigma_e}{\partial \vec{\sigma}} \cdot C^e \cdot \frac{\partial \sigma_e}{\partial \vec{\sigma}} d\varepsilon_e^p \tag{V.27}$$

Lembrando que:

$$d\sigma_e = \frac{\partial \sigma_e}{\partial \vec{\sigma}} \cdot d\vec{\sigma} \tag{V.28}$$

Usando a Equação V.14 na Equação V.28 e substituindo na Equação V.27, temos:

$$Hd\varepsilon_{e}^{p} = \frac{\partial\sigma_{e}}{\partial\vec{\sigma}} \cdot C^{e} \cdot d\vec{\varepsilon} - \frac{\partial\sigma_{e}}{\partial\vec{\sigma}} \cdot C^{e} \cdot \frac{\partial\sigma_{e}}{\partial\vec{\sigma}} d\varepsilon_{e}^{p}$$
(V.29)

$$d\varepsilon_{e}^{p} = \frac{\frac{\partial \sigma_{e}}{\partial \vec{\sigma}} \cdot C^{e} \cdot d\vec{\varepsilon}}{H + \frac{\partial \sigma_{e}}{\partial \vec{\sigma}} \cdot C^{e} \cdot \frac{\partial \sigma_{e}}{\partial \vec{\sigma}}}$$
(V.30)

Substituindo a Equação V.30 na Equação V.26, temos:

$$d\bar{\sigma} = C^{e} \cdot d\bar{\varepsilon} - C^{e} \cdot \frac{\partial \sigma_{e}}{\partial \bar{\sigma}} \left[\frac{\frac{\partial \sigma_{e}}{\partial \bar{\sigma}} \cdot C^{e} \cdot d\bar{\varepsilon}}{H + \frac{\partial \sigma_{e}}{\partial \bar{\sigma}} \cdot C^{e} \cdot \frac{\partial \sigma_{e}}{\partial \bar{\sigma}}} \right]$$
(V.31)

Rearranjando os termos finalmente obtemos a seguinte relação constitutiva:

$$d\vec{\sigma} = \begin{bmatrix} C^{e} - \frac{\left(C^{e} \cdot \frac{\partial \sigma_{e}}{\partial \vec{\sigma}}\right) \left(\frac{\partial \sigma_{e}}{\partial \vec{\sigma}} \cdot C^{e}\right)}{H + \frac{\partial \sigma_{e}}{\partial \vec{\sigma}} \cdot C^{e} \cdot \frac{\partial \sigma_{e}}{\partial \vec{\sigma}}} \end{bmatrix} \cdot d\vec{\varepsilon}$$
(V.32)

onde para a Equação V.22, temos que:

$$[C^{ep}] = \begin{bmatrix} C^{e} - \frac{\left(C^{e} \cdot \frac{\partial \sigma_{e}}{\partial \vec{\sigma}}\right) \left(\frac{\partial \sigma_{e}}{\partial \vec{\sigma}} \cdot C^{e}\right)}{H + \frac{\partial \sigma_{e}}{\partial \vec{\sigma}} \cdot C^{e} \cdot \frac{\partial \sigma_{e}}{\partial \vec{\sigma}}} \end{bmatrix}$$
(V.33)

Anexo VI

Tensor Gradiente de Velocidade (\overline{L})

Dado um vetor velocidade,

$$\vec{v} = v_x \hat{i} = v_y \hat{j} + v_z \hat{k} \tag{VI.1}$$

O seu gradiente é dado por:

$$\overline{\overline{L}} = \frac{1}{2} \left(v_{i,j} + v_{j,i} \right) + \frac{1}{2} \left(v_{i,j} - v_{j,i} \right)$$
(VI.2)

onde:

$$\overline{\overline{D}} = \frac{1}{2} \left(v_{i,j} + v_{j,i} \right)$$
(VI.3)

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) & \frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix}$$

é o tensor Taxa de Deformação, que é simétrico $(\overline{D} = \overline{D}^T)$, e,

$$\overline{\overline{W}} = \frac{1}{2} \left(v_{i,j} - v_{j,i} \right)$$
(VI.4)

$$W_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) & 0 & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) & 0 \end{bmatrix}$$

é o **tensor Rotação**, que é anti-simétrico $(\overline{W} = -\overline{W}^T)$.

Assim, temos que:

$$\overline{\overline{L}} = \overline{\overline{D}} + \overline{\overline{W}}$$
(VI.5)

Tensor Taxa de Jaumann

O tensor taxa de Jaumann da tensão de Cauchy é expresso em função do tensor taxa material da tensão de Cauchy ($\dot{\sigma}$), do tensor de rotação e do tensor de tensão de Cauchy, da seguinte forma:

$$\dot{\sigma}^{J} = \dot{\sigma} - \overline{\overline{W}} \sigma + \sigma \overline{\overline{W}}$$
(VI.6)

Tensor Taxa de Truesdell

O tensor taxa de Truesdell da tensão de Cauchy é expresso em função do tensor taxa material da tensão de Cauchy ($\dot{\sigma}$), do tensor gradiente de velocidade, do tensor de tensão de

Cauchy e do tensor taxa de deformação, da seguinte forma:

$$\dot{\sigma}^{T} = \dot{\sigma} - \overline{L}\sigma + \sigma \overline{L}^{T} + \sigma \cdot tr(\overline{D})$$
(VI.7)

Da Equação VI.6 temos que:

$$\dot{\sigma} = \dot{\sigma}^{J} - \overline{W}\overline{\sigma} + \sigma\overline{W}$$
(VI.8)

Substituindo as Equações VI.5 e VI.8 na Equação VI.7 e rearranjando os termos, obtemos a seguinte espressão para o tensor taxa de Truesdell:

$$\dot{\sigma}^{T} = \dot{\sigma}^{J} - \overline{D}\overline{\sigma} - \sigma\overline{D} + \sigma \cdot tr(\overline{D})$$
(VI.9)

ou

$$\dot{\sigma}_{ij}^{T} = \dot{\sigma}_{ij}^{J} - D_{ik}\sigma_{kj} - \sigma_{ik}D_{kj} + \sigma_{ij}D_{kk}$$

Apêndice A

Processo de Dobramento da Chapa Simulada

A seguir é mostrada uma seqüência de figuras que ilustra como foi realizado o processo de dobramento da chapa simulada para que esta ficasse posicionada entre os rolos moldadores em todos os gabinetes de sustentação de forma que a simulação do processo de perfilação a frio propriamente dito pudesse ser realizada. A seqüência segue em ordem alfabética das figuras.





(g)





(m)





(k)







(l)



(0)



(p)



(s)











(a.h) Figura A.1: Seqüência do processo de dobramento.

Apêndice B

Resultados das Tensões Longitudinais em cada Passe

A seguir são mostrados os resultados dos níveis das tensões longitudinais σ_{11} presente na região da base das chapas simuladas para todas as configurações de perfiladeiras simuladas. Os resultados são mostrados para cada passe e em vista superior da perfiladeira. Em todas as figuras o gabinete de sustentação inicial (ângulo de dobra menor) é o do lado direito enquanto que o gabinete de sustentação final (ângulo de dobra maior) é o do lado esquerdo.

Passe	Gabinete de	Gabinete de	Ângulo de	Ângulo de dobra final
1	1	2		0°
2	2	3	0°	7,5°
3	3	4	7,5°	15°
4	4	5	15°	30°
5	5	6	30°	45°
6	6	7	45°	60°
7	7	8	60°	75°
8	8	9	75°	90°

Tabela B.1: Intervalos de cada passe nas perfiladeiras simuladas.

Nas Figuras B.1 à B.7 os resultados são para o final do processo de dobramento da chapa simulada, nas Figuras B.8 à B.14 os resultados são para um deslocamento longitudinal de 330 mm da chapa simulada e em todas elas a escala do nível da tensão longitudinal é igual em todas as configurações e em todos os passes e vai de -100MPa à 100MPa.



Figura B.1: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o **passe 2** ao final do processo de dobramento.



Figura B.2: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o **passe 3** ao final do processo de dobramento.



Figura B.3: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o **passe 4** ao final do processo de dobramento.



Figura B.4: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o **passe 5** ao final do processo de dobramento.



Figura B.5: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o **passe 6** ao final do processo de dobramento.



Figura B.6: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o **passe 7** ao final do processo de dobramento.



Figura B.7: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o **passe 8** ao final do processo de dobramento.



Figura B.8: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o **passe 2** após seu deslocamento longitudinal de 330 mm.



Figura B.9: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o **passe 3** após seu deslocamento longitudinal de 330 mm.



Figura B.10: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o **passe 4** após seu deslocamento longitudinal de 330 mm.



Figura B.11: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o **passe 5** após seu deslocamento longitudinal de 330 mm.



Figura B.12: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o **passe 6** após seu deslocamento longitudinal de 330 mm.



Figura B.13: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o **passe 7** após seu deslocamento longitudinal de 330 mm.



Figura B.14: Resultados da tensão longitudinal σ_{11} na região da base da chapa simualada para o **passe 8** após seu deslocamento longitudinal de 330 mm.

Apêndice C

Programa para Geração da Simulação da Configuração PLR

Código dos comandos de entrada para gerar a simulação do processo de perfilação a frio para a configuração PLR.

| Version : MSC.SuperForm 2002

SIMULAÇÃO do PROCESSO de PERFILAÇÃO Variação do ângulo de dobra de 0° à 90°

Configuração PLR

| escolhendo o sistema de unidades

*model_set_material_unit si_mm

escolhendo o tipo de analise

*job_class mechanical, *job_option dimen:three

| criando a superficie que sera o plano de simetria

*add_points -1000 500 0 -1000 -700 0 3500 -700 0 3500 500 0 *add_surfaces | sup 01 simetria 2 3 4 1 *fill_view

| criando as superficies dos rolos

*set_surface_type cylinder *add_surfaces | sup 02 -660 100.6 0 -660 100.6 100 100 100 | sup 03 -660 -40 0 -660 -40 100 40 40 | sup 04 -330 100.6 0 -330 100.6 100 100 100 | sup 05 -330 -40 0 -330 -40 100 40 40 | sup 06 0 100.6 0 0 100.6 100 100 100 | sup 07 0 -40 0 0 -40 100 40 40 | sup 08 330 100.6 0 330 100.6 11 100 100 | sup 09 330 - 40 0 330 - 40 12 40 40 sup 10 330 - 40 12 330 - 40 100 40 40 | sup 11 660 100.6 0 660 100.6 11 100 100 | sup 12 660 -40 0

| dando inclinacao aos rolos laterais de 7,5° à 90°

*set_move_point 330 0 12 *set_move_rotations -7.5 0 0 *move_surfaces 10 # | End of List

*set_move_point

660 0 12 *set move rotations -1500 *move surfaces 13 # | End of List *set_move_point 990 0 12 *set_move_rotations $-30\overline{0}0$ *move_surfaces 16 # | End of List *set move point 1320012 *set_move_rotations $-45\ \overline{0}\ 0$ *move_surfaces 19 # | End of List *set_move_point $165\overline{0}\ 0\ 12$ *set move rotations -60 0 0 *move_surfaces 22 # | End of List *set_move_point 1980 0 12 *set move rotations $-75\overline{0}0$ *move_surfaces 25 # | End of List *set_move_point 2310 0 12 *set_move_rotations -90 0 0 *move surfaces 28 # | End of List *set_move_point 2640 0 12 *set_move_rotations $-90\overline{0}0$ *move_surfaces 31 # | End of List

```
| select das superficies dos rolos
*store_surfaces simetria
1
#
*store_surfaces sup_02
2
#
*store_surfaces sup_03
3
#
*store_surfaces sup_04
4
#
*store_surfaces sup_05
5
#
*store_surfaces sup_06
6
#
*store_surfaces sup_07
7
#
*store_surfaces sup_08
8
#
*store_surfaces sup_09
9
#
*store_surfaces sup_10
10
#
*store_surfaces sup_11
11
#
*store_surfaces sup_12
12
#
*store_surfaces sup_13
13
#
*store_surfaces sup_14
14
#
*store_surfaces sup_15
15
#
*store_surfaces sup_16
16
#
*store_surfaces sup_17
17
#
*store_surfaces sup_18
```

18 # *store_surfaces sup_19 19 # *store_surfaces sup_20 20 # *store surfaces sup 21 21 # *store_surfaces sup_22 22 # *store_surfaces sup_23 23 # *store_surfaces sup_24 24 # *store_surfaces sup_25 25 # *store_surfaces sup_26 26 # *store_surfaces sup_27 27 # *store_surfaces sup_28 28 # *store_surfaces sup_29 29 # *store_surfaces sup_30 30 # *store_surfaces sup_31 31 #

criando a os elementos 3D hexaédricos 8 nós linear da chapa

```
*add_elements
2
7
6
1
3
8
7
2
4
9
8
3
5
10
9
4
*sub_divisions
141
*subdivide_elements
1
#
*sub_divisions
161
*subdivide_elements
4
#
*sub_divisions
250 1 1
*subdivide_elements
all_existing
| eliminando os nós duplicados
*sweep_nodes
all_existing
| expandindo em y os elementos 2D criados no plano xz
| expessura da chapa = 0,6 mm
*set expand translations
0.30
*set_expand_repetitions
2
*expand_elements
all_existing
| eliminando novamente os nós duplicados
*sweep_nodes
all_existing
| select dos elementos da chapa
*store_elements chapa_el
```

all_existing

| renumerando os nós

*renumber_nodes

| criando as superficies das placas para 7,5°

*set surface type quad *add_surfaces | sup 32 point(-660,0,0) point(-660,0,12) point(2350,0,12) point(2350,0,0) | sup 33 point(330,0,12) point(330,0,100) point(2350,0,100) point(2350,0,12) | sup 34 point(-660,0.6,0) point(-660,0.6,11) point(2350,0.6,11) point(2350,0.6,0)

| dando inclinacao a placa lateral de 7,5°

*set_move_point 330 0 12 *set_move_rotations -7.5 0 0 *move_surfaces 33 #

| select das superficies das placas de 7,5°

```
*store_surfaces sup_32
32
#
*store_surfaces sup_33
33
#
*store_surfaces sup_34
34
#
```

| criando as superficies das placas para 15°

*set_surface_type quad *add_surfaces | sup 35 point(-660,0,0) point(-660,0,12) point(2350,0,12) point(2350,0,0) | sup 36 point(660,0,12) point(660,0,100) point(2350,0,100) point(2350,0,12) | sup 37 point(-660,0.6,0) point(-660,0.6,11) point(2350,0.6,11) point(2350,0.6,0)

dando inclinacao a placa lateral de 15°

*set_move_point 660 0 12 *set_move_rotations -15 0 0 *move_surfaces 36 #

| select das superficies das placas de 15°

```
*store_surfaces sup_35
35
#
*store_surfaces sup_36
36
#
*store_surfaces sup_37
37
#
```

| criando as superficies das placas para 30°

*set_surface_type quad *add surfaces | sup 38 point(-660,0,0) point(-660,0,12) point(2350,0,12) point(2350,0,0) | sup 39 point(990,0,12) point(990,0,100) point(2350,0,100) point(2350,0,12) | sup 40 point(-660,0.6,0) point(-660,0.6,11) point(2350,0.6,11) point(2350,0.6,0)
| dando inclinacao a placa lateral de 30°
*set_move_point
990 0 12
*set_move_rotations
-30 0 0
*move_surfaces
39
#
| select das superficies das placas de 30°
*store_surfaces sup_38
38
#
*store_surfaces sup_39
39
#

*store_surfaces sup_40 40 #

| criando as superficies das placas para 45°

*set_surface_type quad *add surfaces | sup 41 point(-660,0,0) point(-660,0,12) point(2350,0,12) point(2350,0,0) | sup 42 point(1320,0,12) point(1320,0,100) point(2350,0,100) point(2350,0,12) | sup 43 point(-660,0.6,0) point(-660,0.6,11) point(2350,0.6,11) point(2350,0.6,0)

| dando inclinacao a placa lateral de 45°

*set_move_point
1320 0 12
*set_move_rotations
-45 0 0
*move_surfaces
42
#

| select das superficies das placas de 45°

*store_surfaces sup_41

41 # *store_surfaces sup_42 42 # *store_surfaces sup_43 43 #

| criando as superficies das placas para 60°

*set_surface_type quad *add_surfaces | sup 44 point(-660,0,0) point(-660,0,12) point(2350,0,12) point(2350,0,0) | sup 45 point(1650,0,12) point(1650,0,100) point(2350,0,100) point(2350,0,12) | sup 46 point(-660,0.6,0) point(-660,0.6,11) point(2350,0.6,11) point(2350,0.6,0)

| dando inclinacao a placa lateral de 60°

```
*set_move_point
1650 0 12
*set_move_rotations
-60 0 0
*move_surfaces
45
#
```

| select das superficies das placas de 60°

```
*store_surfaces sup_44
44
#
*store_surfaces sup_45
45
#
*store_surfaces sup_46
46
#
```

| criando as superficies das placas para 75°

```
*set_surface_type quad
*add_surfaces
```

| sup 47 point(-660,0,0) point(-660,0,12) point(2350,0,12) point(2350,0,0) | sup 48 point(1980,0,12) point(1980,0,100) point(2350,0,100) point(2350,0,12) | sup 49 point(-660,0.6,0) point(-660,0.6,11) point(2350,0.6,11) point(2350,0.6,0) | dando inclinacao a placa lateral de 75° *set move point 1980 0 12 *set move rotations -7500 *move_surfaces 48 # | select das superficies das placas de 75° *store_surfaces sup_47 47 # *store_surfaces sup_48 48 # *store_surfaces sup_49 49 # | posicionando os rolos e as placas de trabalho *move reset *set_move_translations 0-500 *move surfaces 32 33 # *set_move_translations 0 50 0 *move_surfaces 37 # *set_move_translations

0 -50 0

```
*move_surfaces
35
#
*set_move_translations
0 -100 0
*move_surfaces
36
#
*set move translations
0 -100 0
*move_surfaces
38
#
*set_move_translations
0 -150 0
*move_surfaces
39
#
*set_move_translations
0-500
*move_surfaces
43
#
*set_move_translations
0 -150 0
*move_surfaces
41
#
*set_move_translations
0 - 200 0
*move_surfaces
42
#
*set move translations
0 -100 0
*move_surfaces
46
#
*set_move_translations
0 -200 0
*move_surfaces
44
#
| placa de 60 graus movimento lateral em z
*set_move_translations
0 -200 50
```

```
*move_surfaces
45
#
*set_move_translations
0 -150 0
*move_surfaces
49
#
*set move translations
0 -250 0
*move_surfaces
47
#
| placa de 75 graus movimento lateral em z
*set move translations
0 - 250 50
*move_surfaces
48
#
*set_move_translations
0 - 200 0
*move surfaces
04 06 08 11 14 17 20 23 26 29
#
*set_move_translations
0-3000
*move_surfaces
05 07 09 12 15 18 21 24 27 30
#
*set_move_translations
0-3500
*move_surfaces
10 13 16 19 22
#
| rolos laterais de 75 e 90 graus movimento lateral em z
*set_move_translations
0 - 300 50
*move_surfaces
25 28 31
#
*invisible all sets
*visible_set chapa_el
sup 04
sup_05
sup_06
sup_07
sup_08
```

sup_09 sup_10 sup_11 sup 12 sup_13 sup_14 sup_15 sup_16 sup 17 sup_18 sup 19 sup_20 sup_21 sup 22 sup_23 sup_24 sup_25 sup_26 sup 27 sup_28 *fill view | contact da chapa *new contact body *contact body name chapa *add_contact_body_elements all_existing | contact do plano de simetria *new_contact_body *contact body name simetria *contact symmetry *add_contact_body_surfaces 1 # | contact das ferramentas *new_contact_body *contact_body_name sup_04 *contact_rigid, *contact_option control:velocity *add_contact_body_surfaces 4 # *new_contact_body *contact body name sup_05 *contact_rigid, *contact_option control:velocity *add_contact_body_surfaces 5

*new contact body *contact body name sup 06 *contact rigid, *contact option control:velocity *add contact body surfaces 6 # *new contact body *contact body name sup 07 *contact rigid, *contact option control:velocity *add_contact_body_surfaces 7 # *new contact body *contact_body_name sup 08 *contact rigid, *contact option control:velocity *add_contact_body_surfaces 8 # *new contact body *contact body name sup_09 *contact_rigid, *contact_option control:velocity *add_contact_body_surfaces 9 # *new contact body *contact body name sup_10 *contact rigid, *contact option control:velocity *add contact body surfaces 10 # *new contact body *contact_body_name sup 11 *contact_rigid, *contact_option control:velocity *add contact body surfaces 11 # *new_contact body *contact_body_name sup 12 *contact_rigid, *contact_option control:velocity *add_contact_body_surfaces 12 # *new contact body *contact_body_name sup 13 *contact_rigid, *contact_option control:velocity *add_contact_body_surfaces

13 # *new contact body *contact body name sup 14 *contact rigid, *contact option control:velocity *add contact body surfaces 14 # *new_contact_body *contact_body_name sup 15 *contact_rigid, *contact_option control:velocity *add contact body surfaces 15 # *new_contact_body *contact body name sup 16 *contact rigid, *contact option control:velocity *add contact body surfaces 16 # *new_contact_body *contact_body_name sup 17 *contact_rigid, *contact_option control:velocity *add contact body surfaces 17 # *new contact body *contact_body_name sup 18 *contact_rigid, *contact_option control:velocity *add contact body surfaces 18 # *new_contact_body *contact body name sup_19 *contact rigid, *contact option control:velocity *add contact body surfaces 19 # *new contact body *contact body name sup_20 *contact_rigid, *contact_option control:velocity *add contact body surfaces 20 # *new_contact_body *contact_body_name sup 21 *contact_rigid, *contact_option control:velocity

```
*add_contact_body_surfaces
21
#
*new contact body
*contact body name
sup 22
*contact rigid, *contact option control:velocity
*add_contact_body_surfaces
22
#
*new contact body
*contact body name
sup_23
*contact rigid, *contact option control:velocity
*add_contact_body_surfaces
23
#
*new contact body
*contact body name
sup_24
*contact rigid, *contact option control:velocity
*add_contact_body_surfaces
24
#
*new contact body
*contact body name
sup 25
*contact rigid, *contact option control:velocity
*add contact body surfaces
25
#
*new_contact_body
*contact body name
sup 26
*contact rigid, *contact option control:velocity
*add contact body surfaces
26
#
*new_contact_body
*contact_body_name
sup 27
*contact rigid, *contact option control:velocity
*add_contact_body_surfaces
27
#
*new contact body
*contact_body_name
sup_28
*contact rigid, *contact option control:velocity
*add_contact_body_surfaces
28
#
*new contact body
*contact body name
sup_32
```

```
*contact_rigid, *contact_option control:velocity
*add contact body surfaces
32
#
*new contact body
*contact body name
sup 33
*contact_rigid, *contact_option control:velocity
*add contact body surfaces
33
#
*new contact body
*contact body name
sup 34
*contact_rigid, *contact_option control:velocity
*add contact body surfaces
34
#
*new contact body
*contact body name
sup 35
*contact_rigid, *contact_option control:velocity
*add contact body surfaces
35
#
*new contact body
*contact body name
sup 36
*contact rigid, *contact option control:velocity
*add contact body surfaces
36
#
*new contact body
*contact body name
sup 37
*contact rigid, *contact option control:velocity
*add contact body surfaces
37
#
*new_contact_body
*contact body name
sup 38
*contact rigid, *contact option control:velocity
*add_contact_body surfaces
38
#
*new contact body
*contact_body_name
sup 39
*contact_rigid, *contact_option control:velocity
*add contact body surfaces
39
#
*new contact_body
*contact_body_name
```

```
sup 40
*contact rigid, *contact option control:velocity
*add_contact_body_surfaces
40
#
*new contact body
*contact body name
sup_41
*contact rigid, *contact option control:velocity
*add contact body surfaces
41
#
*new_contact_body
*contact body name
sup_42
*contact rigid, *contact option control:velocity
*add_contact_body_surfaces
42
#
*new_contact_body
*contact body name
sup_43
*contact rigid, *contact option control:velocity
*add contact body surfaces
43
#
*new contact body
*contact_body_name
sup 44
*contact rigid, *contact option control:velocity
*add contact body surfaces
44
#
*new contact body
*contact body name
sup 45
*contact rigid, *contact option control:velocity
*add_contact_body_surfaces
45
#
*new contact body
*contact body name
sup 46
*contact rigid, *contact option control:velocity
*add_contact_body_surfaces
46
#
*new_contact_body
*contact body name
sup 47
*contact rigid, *contact option control:velocity
*add_contact_body_surfaces
47
#
*new_contact_body
```

```
*contact body name
sup 48
*contact_rigid, *contact_option control:velocity
*add contact body surfaces
48
#
*new contact body
*contact_body_name
sup 49
*contact rigid, *contact option control:velocity
*add_contact_body_surfaces
49
#
*flip_surfaces
all existing
*flip surfaces
34 37 40 43 46 49
# | End of List
aplicando material a malha da chapa
*material_read 1_0402_
*material type mechanical:isotropic
*material_option isotropic:unit:si_mm
*add material elements
all existing
*fill view
aplicando a CC deslocamento nulo em X na extremidade esquerda da chapa
*apply_type fixed_displacement
*apply_dof x
*apply value x
0
*add apply nodes
1 2 11 12 13 3264 3265 3266 3267 3284 3285 3286 3287 3288 3289
#
| aplicando remalha
*adapg option strainchange crit:on
*adapg_rmsh_body
chapa
editando as superfícies que serão deslocadas
| rolos superiores
*edit contact body
\sup \overline{04}
*set_points on *draw *contact_coordinates_3d cx
-3.3000000000e+002 (-1.49400000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*set points on *draw *contact coordinates 3d bx
 -3.3000000000e+002 (-2.49400000000e+002)+50 0.0000000000e+000
```

```
*contact value az
1
*contact value vrot
4
*edit contact body
sup 06
*set points on *draw *contact coordinates 3d cx
 0.0000000000e+000 (-1.49400000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*set points on *draw *contact coordinates 3d bx
 0.0000000000e+000 (-2.49400000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*contact value az
1
*contact value vrot
4
*edit contact body
sup 08
*set points on *draw *contact coordinates 3d cx
 3.3000000000e+002 (-1.49400000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*set points on *draw *contact coordinates 3d bx
 3.3000000000e+002 (-2.49400000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*contact value friction class 0,
                                   *contact value friction
.1
*contact_value az
1
*contact value vrot
4
*edit contact body
sup 11
*set_points on *draw *contact_coordinates_3d cx
 6.6000000000e+002 (-1.49400000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*set points on *draw *contact coordinates 3d bx
 6.6000000000e+002 (-2.49400000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*contact value friction class 0,
                                   *contact value friction
.1
*contact_value az
1
*contact_value vrot
4.02
*edit contact body
sup 14
*set points on *draw *contact coordinates 3d cx
 9.90000000000e+002 (-1.49400000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*set points on *draw *contact coordinates 3d bx
 9.9000000000e+002 (-2.49400000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*contact value friction class 0,
                                   *contact value friction
.1
*contact value az
1
*contact value vrot
4.04
```

```
*edit contact body
sup 17
*set points on *draw *contact coordinates 3d cx
 1.32000000000e+003 (-1.49400000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*set points on *draw *contact coordinates 3d bx
 1.3200000000e+003 (-2.4940000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*contact value friction class 0,
                                   *contact value friction
.1
*contact value az
1
*contact value vrot
4.06
*edit contact body
sup 20
*set points on *draw *contact coordinates 3d cx
 1.6500000000e+003 (-1.4940000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*set points on *draw *contact coordinates 3d bx
 1.65000000000e+003 (-2.49400000000e+002)+50 0.0000000000e+000
                                   *contact value friction
*contact value friction class 0,
.1
*contact_value az
1
*contact value vrot
4.08
*edit contact body
sup 23
*set points on *draw *contact coordinates 3d cx
 1.9800000000e+003 (-1.49400000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*set points on *draw *contact coordinates 3d bx
 1.9800000000e+003 (-2.4940000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*contact value friction class 0,
                                   *contact value friction
.1
*contact_value az
*contact value vrot
4.10
*edit contact body
sup 26
*set points on *draw *contact coordinates 3d cx
 2.3100000000e+003 (-1.4940000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*set points on *draw *contact coordinates 3d bx
 2.31000000000e+003 (-2.49400000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*contact value friction class 0,
                                   *contact value friction
.1
*contact_value az
*contact value vrot
4.12
| rolos inferiores
*edit_contact_body
```

```
sup 05
*set points on *draw *contact coordinates 3d cx
-3.3000000000e+002 (-3.9000000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*contact value az
-1
*contact value vrot
10
*edit contact body
sup 07
*set points on *draw *contact coordinates 3d cx
 0.0000000000e+000 (-3.9000000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*contact value az
-1
*contact_value vrot
10
*edit contact body
sup 09
*set points on *draw *contact coordinates 3d cx
 3.3000000000e+002 (-3.9000000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*contact value friction class 0,
                                    *contact value friction
.1
*contact_value az
-1
*contact value vrot
10
*edit contact body
sup 12
*set points on *draw *contact coordinates 3d cx
 6.6000000000e+002 (-3.9000000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*contact value friction class 0,
                                    *contact value friction
.1
*contact_value az
-1
*contact value vrot
10.05
*edit contact body
sup 15
*set points on *draw *contact coordinates 3d cx
 9.9000000000e+002 (-3.9000000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*contact value friction class 0,
                                    *contact value friction
.1
*contact value az
-1
*contact_value vrot
10.10
*edit contact body
sup 18
*set points on *draw *contact coordinates 3d cx
 1.3200000000e+003 (-3.9000000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*contact_value friction_class 0,
                                    *contact_value friction
```

```
.1
*contact value az
-1
*contact value vrot
10.15
*edit contact body
sup_21
*set points on *draw *contact coordinates 3d cx
 1.6500000000e+003 (-3.9000000000e+002)+50 0.0000000000e+000
                                    *contact value friction
*contact value friction class 0,
.1
*contact_value az
-1
*contact_value vrot
10.20
*edit contact body
sup 24
*set_points on *draw *contact_coordinates_3d cx
 1.98000000000e+003 (-3.9000000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*contact value friction class 0,
                                    *contact value friction
.1
*contact_value az
-1
*contact value vrot
10.25
*edit contact body
sup 27
*set points on *draw *contact coordinates 3d cx
 2.3100000000e+003 (-3.9000000000e+002)+50 0.0000000000e+000
*contact value friction class 0,
                                    *contact_value friction
.1
*contact_value az
-1
*contact value vrot
10.30
| rolos laterais
*edit contact body
sup 10
*set points on *draw *contact coordinates 3d cx
 3.3000000000e+002 - 3.896577944550e+002 1.722104768880e+001
*set points on *draw *contact coordinates 3d bx
 3.3000000000e+002 (-3.896577944550e+002)+50 1.722104768880e+001
*contact_value friction_class 0,
                                    *contact_value friction
0
*contact value ay
cos(97.5*pi/180)
*contact value az
cos(172.5*pi/180)
*contact value vrot
10
```

```
*edit contact body
sup 13
*set points on *draw *contact coordinates 3d cx
 6.6000000000e+002 -3.886370330516e+002 2.235276180410e+001
*set points on *draw *contact coordinates 3d bx
 6.6000000000e+002 (-3.886370330516e+002)+50 2.235276180410e+001
*contact value friction class 0,
                                    *contact value friction
0
*contact value ay
cos(105*pi/180)
*contact value az
cos(165*pi/180)
*contact value vrot
10.05
*edit contact body
sup 16
*set points on *draw *contact coordinates 3d cx
 9.9000000000e+002 -3.846410161514e+002 3.2000000000e+001
*set points on *draw *contact coordinates 3d bx
 9.9000000000e+002 (-3.846410161514e+002)+50 3.2000000000e+001
*contact value friction class 0,
                                    *contact value friction
0
*contact_value ay
cos(120*pi/180)
*contact value az
cos(150*pi/180)
*contact value vrot
10.10
*edit contact body
sup 19
*set points on *draw *contact coordinates 3d cx
 1.3200000000e+003 -3.782842712475e+002 4.028427124746e+001
*set points on *draw *contact coordinates 3d bx
 1.3200000000e+003 (-3.782842712475e+002)+50 4.028427124746e+001
*contact value friction class 0,
                                    *contact value friction
0
*contact_value ay
cos(135*pi/180)
*contact value az
cos(135*pi/180)
*contact value vrot
10.15
*edit contact body
sup 22
*set points on *draw *contact coordinates 3d cx
 1.6500000000e+003 -3.7000000000e+002 4.664101615138e+001
*set points on *draw *contact coordinates 3d bx
 1.65000000000e+003 (-3.7000000000e+002)+50 4.664101615138e+001
*contact value friction class 0,
                                    *contact value friction
0
*contact_value ay
```

```
cos(150*pi/180)
*contact value az
cos(120*pi/180)
*contact value vrot
10.20
*edit contact body
sup_25
*set points on *draw *contact coordinates 3d cx
 1.9800000000e+003 -3.103527618041e+002 1.006370330516e+002
*set points on *draw *contact coordinates 3d bx
 1.98000000000e+003 -3.103527618041e+002 (1.006370330516e+002)-50
*contact value friction class 0,
                                    *contact value friction
0
*contact_value ay
cos(165*pi/180)
*contact_value az
cos(105*pi/180)
*contact value vrot
10.25
*edit contact body
sup 28
*set points on *draw *contact coordinates 3d cx
 2.31000000000e+003 -3.00000000000e+002 1.0200000000e+002
*set points on *draw *contact coordinates 3d bx
 2.31000000000e+003 -3.00000000000e+002 (1.0200000000e+002)-50
*contact value friction class 0,
                                    *contact value friction
0
*contact value ay
cos(180*pi/180)
*contact_value az
0
*contact value vrot
10.30
placas
*edit contact body
sup_32
*contact value by
50
*edit contact body
sup 33
*contact value by
50
*edit contact body
sup 37
*contact value by
-100
*edit contact body
sup_36
```

*contact_value by 50 *edit contact body sup 40 *contact_value by -100 *edit contact body sup 39 *contact value by 50 *edit_contact_body sup_43 *contact_value by -100 *edit_contact_body sup_42 *contact_value by 50 *edit_contact_body sup_46 *contact value by -100 *edit_contact_body sup 45 *contact_value bz |movimento lateral em z -50 *edit contact body sup 49 *contact_value by -100 *edit_contact_body sup_48 *contact value bz | placa lateral de 75 graus -50 | criando as loadcases | loadcase 1 *new_loadcase *loadcase_type hydraulic_press *loadcase value vel in 1 *loadcase value vel def .05 *loadcase_value vel_out 1 *loadcase_value press_dir_x

0 *loadcase value press dir y *loadcase value press dir z 0 *add loadcase adapgs adapg1 *add loadcase loads apply1 *loadcase_option substage3:off *loadcase option substage4:off *loadcase option substage5:off *add loadcase fcbodies sup 34 *add loadcase mcbodies sup 32 | loadcase 2 *copy_loadcase *loadcase option substage1:off *loadcase_option substage3:on *loadcase option substage4:on *loadcase option substage5:on *add loadcase fcbodies sup 32 *add loadcase mcbodies sup 33 | loadcase 3 *copy loadcase *loadcase value press dir y -1 *loadcase option substage1:on *loadcase option substage4:off *loadcase option substage5:off *remove loadcase fcbodies sup 34 *remove loadcase fcbodies sup 32 *add_loadcase_fcbodies sup_35 *remove loadcase mcbodies sup_33 *add loadcase mcbodies sup 37 loadcase 4 *copy loadcase *loadcase option substage1:off *loadcase option substage4:on *loadcase option substage5:on *loadcase value press dir y 1 *add loadcase fcbodies sup 37 *add loadcase mcbodies sup 36 | loadcase 5 *copy loadcase *loadcase_value press_dir_y -1 *loadcase option substage1:on *loadcase option substage4:off *loadcase option substage5:off *remove loadcase fcbodies sup 35 *remove loadcase fcbodies sup 37 *add_loadcase_fcbodies sup_38

*remove loadcase mcbodies sup 36 *add loadcase mcbodies sup 40 | loadcase 6 *copy loadcase *loadcase value press dir y *loadcase_option substage1:off *loadcase option substage4:on *loadcase option substage5:on *add loadcase fcbodies sup 40 *add loadcase mcbodies sup 39 | loadcase 7 *copy_loadcase *loadcase value press dir y -1 *loadcase option substage1:on *loadcase option substage4:off *loadcase option substage5:off *remove loadcase fcbodies sup 38 *remove_loadcase_fcbodies sup_40 *add loadcase fcbodies sup 41 *remove loadcase mcbodies sup 39 *add_loadcase_mcbodies sup_43 | loadcase 8 *copy loadcase *loadcase value press dir y *loadcase option substage1:off *loadcase_option substage4:on *loadcase option substage5:on *add loadcase febodies sup 43 *add loadcase mcbodies sup 42 | loadcase 9 *copy loadcase *loadcase value press dir y -1 *loadcase option substage1:on *loadcase option substage4:off *loadcase option substage5:off *remove loadcase fcbodies sup 41 *remove_loadcase_fcbodies sup_43 *add loadcase fcbodies sup 44 *remove loadcase mcbodies sup 42 *add_loadcase_mcbodies sup_46 | loadcase 10 *copy loadcase *loadcase_value press_dir_y 0 *loadcase value press dir z -1

*loadcase option substage1:off *loadcase option substage4:on *loadcase option substage5:on *add loadcase fcbodies sup 46 *add loadcase mcbodies sup 45 | loadcase 11 *copy_loadcase *loadcase value press dir y -1 *loadcase value press dir z 0 *loadcase option substage1:on *loadcase option substage4:off *loadcase option substage5:off *remove loadcase fcbodies sup 44 *remove_loadcase_fcbodies sup_46 *add loadcase fcbodies sup 47 *remove loadcase mcbodies sup 45 *add loadcase mcbodies sup 49 | loadcase 12 *copy loadcase *loadcase value press dir y 0 *loadcase value press dir z -1 *loadcase option substage1:off *loadcase option substage4:on *loadcase option substage5:on *add loadcase fcbodies sup 49 *add_loadcase_mcbodies sup_48 | loadcase 15 *copy loadcase *loadcase name lcase15 *loadcase value press dir y -1 *loadcase_value press_dir_z 0 *loadcase option substage1:on *loadcase option substage4:off *loadcase option substage5:off *remove loadcase fcbodies sup 47 *remove loadcase fcbodies sup 49 *add loadcase fcbodies sup 05 *add loadcase fcbodies sup 07 *add loadcase fcbodies sup 09 *add loadcase fcbodies sup 12 *add loadcase fcbodies sup 15 *add loadcase fcbodies sup 18 *add loadcase fcbodies sup 21 *add loadcase fcbodies sup 24 *add_loadcase_fcbodies sup_27

*remove_loadcase_mcbodies sup_48 *add loadcase mcbodies sup 04 *add loadcase mcbodies sup 06 *add loadcase mcbodies sup 08 *add loadcase mcbodies sup 11 *add loadcase mcbodies sup 14 *add loadcase mcbodies sup 17 *add_loadcase_mcbodies sup_20 *add loadcase mcbodies sup 23 *add loadcase mcbodies sup 26 loadcase 16 *copy_loadcase *loadcase name lcase16 *loadcase value press dir y 1 *loadcase option substage1:off *add loadcase fcbodies sup 04 *add loadcase fcbodies sup 06 *add loadcase fcbodies sup 08 *add_loadcase_fcbodies sup_11 *add loadcase fcbodies sup 14 *add loadcase fcbodies sup 17 *add_loadcase_fcbodies sup_20 *add loadcase fcbodies sup 23 *add_loadcase_fcbodies sup_26 *add loadcase mcbodies sup 10 | loadcase 16b *copy_loadcase *loadcase_name lcase16b *add loadcase febodies sup 10 *add loadcase mcbodies sup 13 | loadcase 16c *copy loadcase *loadcase name lcase16c *add loadcase febodies sup 13 *add loadcase mcbodies sup 16 loadcase 16d *copy loadcase *loadcase name lcase16d *add_loadcase_fcbodies sup_16 *add loadcase mcbodies sup 19 | loadcase 16e *copy_loadcase *loadcase name lcase16e *add_loadcase_fcbodies sup_19

*add_loadcase_mcbodies sup_22 loadcase 16f *copy loadcase *loadcase name lcase16f *loadcase value press dir y 0 *loadcase value press dir z -1 *add loadcase fcbodies sup 22 *add loadcase mcbodies sup 25 | loadcase 16g *copy_loadcase *loadcase name lcase16g *add loadcase fcbodies sup 25 *add loadcase mcbodies sup 28 | loadcase 17 rotação dos rolos *new loadcase *loadcase name lcase17 *loadcase_type static *add loadcase adapgs adapg1 *remove loadcase loads apply1

job

*add job loadcases lcase1 *add_job_loadcases lcase2 *add job loadcases lcase3 *add job loadcases lcase4 *add job loadcases lcase5 *add job loadcases lcase6 *add job loadcases lcase7 *add job loadcases lcase8 *add job loadcases lcase9 *add job loadcases lcase10 *add job loadcases lcase11 *add job loadcases lcase12 *add job loadcases lcase15 *add job loadcases lcase16 *add_job_loadcases lcase16b *add job loadcases lcase16c *add job loadcases lcase16d *add_job_loadcases lcase16e *add job loadcases lcase16f *add_job_loadcases lcase16g *add job loadcases lcase17

*add_post_tensor strain *fill_view