ALINE SZABO PONCE

**MODELAGEM EXPERIMENTAL E CONTROLE DO PROCESSO DE
HIDROCONFORMAÇÃO DE TUBOS**

**Dissertação de Mestrado
apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção do Título de Mestre em
Engenharia.**

**São Paulo
2006**

ALINE SZABO PONCE

**MODELAGEM EXPERIMENTAL E CONTROLE DO PROCESSO DE
HIDROCONFORMAÇÃO DE TUBOS**

**Dissertação de Mestrado
apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do Título de Mestre em
Engenharia.**

**Área de concentração:
Engenharia Mecânica**

**Orientador:
Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha**

Este exemplar pode ser revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência do orientador

São Paulo,de.....de 200.....

Assinatura do autor

Assinatura do orientador.....

FICHA CATALOGRÁFICA

Ponce, Aline Szabo

Modelagem experimental e controle do processo de conformação hidrostática de tubos na fabricação de componentes hidroconformados / A.S. Ponce. -- São Paulo, 2006.

172 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Processos de fabricação 2.Conformação plástica

3.Automação e controle

I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

Ao Renato, meu amor, e à Roberta e
Ana Helena, nossos frutos.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Gilmar Ferreira Batalha pela orientação e incentivos.

A FEI, pelo suporte financeiro ao trabalho. Ao Roberto Bortolussi pela orientação e apoio. Aos técnicos do Laboratório de Materiais da FEI, Marcos, Mirom, Geleci, Manoel e Romildo, pela boa vontade e carinho.

Ao Luis Eduardo Leme Gomes pelo apoio com a implantação do sistema de controle.

Aos meus pais pelo amparo e incentivo.

Ao meu Marido, Renato, pela paciência e apoio. Às minhas filhas, pela alegria.

Ao Professor Moyses Szajnbok pela ajuda no modelo matemático e a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

***“Se não puder fazer tudo,
Faça tudo o que puder.”***

(Fundação para uma vida melhor*)

RESUMO

MODELAGEM EXPERIMENTAL E CONTROLE DO PROCESSO DE HIDROCONFORMAÇÃO DE TUBOS

O propósito deste trabalho é a modelagem experimental e estudo do controle do processo de hidroconformação de tubos. Assim, o trabalho visa o projeto e a construção de um dispositivo servo-controlado de hidroconformação de tubos com um sistema de controle digital. O trabalho compreende o projeto e a construção de um dispositivo a ser acoplado em uma prensa hidráulica, a instrumentação dos equipamentos usados e a implantação do sistema de controle automático do processo através de um computador PC e de placas de interface A/D e D/A. Os aplicativos de controle foram desenvolvidos em linguagem de alto nível no sistema operacional Windows. No projeto do aplicativo, inicialmente foram realizadas rotinas para testes do sistema em malha aberta. As demais rotinas são aquelas associadas às funções matemáticas do modelo fenomenológico do sistema de hidroconformação, aquelas destinadas ao controlador de malha fechada. O tipo de estratégia de controle a ser utilizada foi definida no decorrer do projeto e foi baseada em um modelo de processo não linear, linearizado em torno de cada ponto de operação. Para fins de obtenção do modelo nominal para o controlador, os atuadores e sensores tiveram suas dinâmicas desprezadas face a dinâmica do processo e suas curvas de processo foram levantadas experimentalmente.

Palavras-chave: Hidroconformação, Máquinas de Conformação, Automação.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL MODELING AND CONTROL OF TUBE HYDROFORMING PROCESS

This work aims at the experimental modeling of a tube hydroforming (THF) "T" branch, and the THF process automatic control study. Thus, the design and the construction of a servo-controlled hydraulic device for THF, with an automatic digital control system, is embedded in our objectives. Design and construction of the device to append on a hydraulic press, implantation of the measurement equipment and implementation of the control system algorithms through a PC with I/O interface boards is necessary. Control algorithms were developed in Hi-level language for windows operating system. The application design was based on experimental initial tests performed with no feed-backing controlling mode. Routes related to phenomenological mathematical model of the THF process were validated against the literature database, and were devoted to the feed-backing controller mode. Control strategy to employ in final application was defined during the process calibration, based on the non-linear characteristics of the "T" branch THF. To obtain the final load path model sensors and cylinders had their dynamics neglected because the THF dynamic is very much higher, and had their behavior curves experimentally raised.

Key-words: Tube hydroforming, Forming machines, Automation

SUMÁRIO

Lista de símbolos	
Lista de figuras	
Lista de tabelas	
Capítulo 1 - INTRODUÇÃO	01
1.1 Objetivos deste trabalho	04
1.2 Bibliografia do capítulo 1	05
Capítulo 2 – O PROCESSO DE HIDROCONFORMAÇÃO DE TUBOS	07
2.1 Parâmetros do Processo	10
2.2 Aplicações	12
2.3 Vantagens	16
2.4 Limitações	17
2.4.1 Comportamento mecânico da peça hidroconformada	17
2.4.2 Falhas típicas inerentes ao processo	18
2.4.3 Classificação dos processos de hidroconformação	21
2.5 Bibliografia do capítulo 2	25
Capítulo 3 – O ESTADO DA ARTE DO PROCESSO DE HIDROCONFOR-	
MAÇÃO DE TUBOS	27
3.1 Estudos experimentais	28
3.2 Estudos analíticos	30
3.2.1 Plasticidade dos materiais	31
3.2.2 Conformabilidade dos materiais	36
3.2.3 Modelagem da hidroconformação livre	39
3.3 Estudos numéricos	44
3.4 Aspectos tribológicos do processo de hidroconformação	48
3.4.1 Ensaio pertinentes	54
3.5 Bibliografia do capítulo 3	66
Capítulo 4 – O CONTROLE DO PROCESSO DE HIDROCONFORMAÇÃO	
DE TUBOS	71
4.1 Tipos de Sinais Elétricos	73
4.1.1 Sinais Analógicos	73
4.1.2 Sinais Digitais	73
4.2 O Controle na Hidroconformação	74
4.3 Modos de Controle	82

4.4 Bibliografia do capítulo 4	84
Capítulo 5- MATERIAIS E MÉTODOS	86
5.1 Materiais	86
5.2 Métodos	89
5.2.1 Montagem e construção e Ensaio mecânicos do material	89
5.2.2 Cabeamento do sistema	94
5.2.3 Instalação dos componentes	94
5.2.4 Ensaio preliminares em malha aberta e ajuste do dispositivo	99
5.2.5 Desenvolvimento do software supervisor	104
5.2.6 Implantação das curvas	110
5.2.7 Vedação	115
5.2.8 Processo	115
5.2.9 Ensaio em malha fechada	116
5.3 Bibliografia do capítulo 5	116
Capítulo 6- RESULTADOS E DISCUSSÃO	117
6.1 Ensaio preliminares e ajustes	117
6.1.1 Ensaio mecânicos do material	117
6.1.2 Cabeamento do sistema e Leitura dos sensores de posição	118
6.1.3 Instalação dos componentes	119
6.1.4 Ensaio preliminares em malha aberta e ajuste do dispositivo	120
6.1.5 Desenvolvimento do software supervisor	125
6.1.6 Implantação das curvas	128
6.2 Ensaio em malha fechada	134
Capítulo 7- CONCLUSÕES	148
Capítulo 8- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	149
Capítulo 9- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	151
ANEXO I – Desenhos técnicos	158
Desenho #1 Mesa dos cilindros – Placa base	159
Desenho # 2 Mesa dos cilindros – Placa encosto	160
Desenho # 3 Mesa dos cilindros – Placa apoio	161
Desenho # 4 Mesa dos cilindros – Conjunto	162
Desenho # 5 Ferramenta matriz – parte inferior	163
Desenho # 6 Ferramenta matriz – parte superior	164
Desenho # 7 Ponteira dos cilindros – ponteira vazada	165
Desenho # 8 Ponteira dos cilindros – ponteira sólida	166

Desenho # 9 Luva	167
Desenho # 10 Acoplamento do servossistema	168
Desenho # 11 Flange pequena – parte frontal	169
Desenho # 12 Flange pequena – apoio lateral	170
Desenho # 13 Flange pequena – base aparafusada	171
Desenho # 14 Flange pequena – conjunto	172

LISTA DE FIGURAS

Nº	Descrição	Página
1	Ilustração de uma peça típica sendo hidroconformada.	07
2	Seqüência do processo de hidroconformação de uma junta T.	08
3	Métodos de vedação.	09
4	Curvas típicas dos parâmetros do processo de Hidroconformação	11
5	Longarinas hidroconformadas de um pick-up	13
6	Exemplos de peças estruturais hidroformadas da BMW 330 Ci	14
7	Exemplos de metais sanitários que utilizam processo de hidroconformação	15
8	Sistemas de escapamentos de gás automotivos	15
9	Estados de deformações na peça hidroconformada durante processo	17
10	Peças hidroconformadas com defeitos.	19
11	Limitações da hidroconformação	20
12	Curvas dos parâmetros do processo de Hidroconformação	21
13	Esquema de vedação por ponteira cônica.	23
14	Variações do processo de conformação usando pressão hidrostática	24
15	Esquema da máquina de ensaios de atrito na zona guiada	30
16	Curva Limite de Conformação esquemática	37
17	Modelo de chapa de Marciniak-Kuczynski	38
18	Tubo em solicitação	41
19	Parâmetros de entrada e de saída principais em uma simulação pelo MEF	44
20	Fatores que influenciam em conjunto as condições de atrito na hidroc.	49
21	Detalhe da máquina para realizar o ensaio LDH	54
22	Esquema para realização do ensaio que visa medir atrito	58
23	Resultados de Wagoner: experimentais e numéricos	59
24	Esquema do ensaio de empurramento	60
25	Esquemas de ensaios que visam medir coeficiente de atrito na zona guiada	61
26	Esquema do ensaio de matriz aberta em retro-extrusão.	62
27	Esquema do ensaio de expansão em pêra	63
28	Esquemas dos ensaios para medição de atrito	63
29	Diagrama de carregamento possível ao trabalhar com a lógica fuzzy.	75
30	Diagrama representativo da configuração do sistema de malha fechada	82
31	Prensa hidráulica usada neste trabalho.	90
32	Diagrama hidráulico da Unidade Hidráulica Principal.	91
33	Diagrama Hidráulico da Unidade Hidráulica Secundária	91
34	Sistema amplificador de pressão.	92
35	Sistema axial e de contra-pressão.	92
36	Ferramenta Matriz	93
37	Prensa hidráulica com dispositivo de hidroconformação de tubos.	93
38	Tela de instalação do driver da placa PCI-1723 no sistema operacional	95
39	Tela de seleção do tipo de entrada analógica da na placa PCI-1713.	96
40	Tela de instalação do driver da placa PCL-724 no sistema operacional	96
41	Esquema de ligação dos sensores de fim de curso.	98
42	Estágios de funcionamento dos sensores de controle de avanço axial.	99
43	Esquema de ligação dos sensores LVDT.	100

44	Ligação das válvulas proporcional e direcional e servo válvula.	102
45	Ligação da servo válvula ao sistema.	102
46	Planilha de driver do AStudio.	105
47	Tela da simulação inicial dos canais de entrada e saída analógicos.	106
48	Rotina de leitura e de escrita dos sensores e atuadores do sistema axial.	106
49	Rotina de leitura e de escrita dos sensores e atuadores do contra-pressão.	107
50	Rotina de leitura e de escrita do sistema de pressão interna	107
51	Diagrama de blocos das interações do controlador.	108
52	Fluxograma lógico de controle.	109
53	Curvas de escoamento e vedação	111
54	Curvas de escoamento e vedação para os parâmetros de Asnafi	112
55	Escoamento, vedação e enrugamento para os parâmetros de Asnafi	113
56	Escoamento, vedação e enrugamento para os parâmetros deste trabalho	114
57	Curva de tração do tubo de cobre eletrolítico recozido a 500° C @1 h.	117
58	Menor velocidade equalizada para os atuadores axiais.	122
59	Velocidade equalizada intermediária para os atuadores axiais.	122
60	Maior velocidade equalizada para os atuadores axiais.	122
61	Corpo de prova fissurado à 202 bar.	124
62	Curva de calibração da célula de carga.	125
63	Tela do software supervisor.	126
64	Matemática 2, responsável pelo Retorno do Cilindro Central	128
65	Matemática 3, responsável pelo Avanço do Cilindro Central	128
66	Curva de processo estimada para os ensaios em malha fechada.	129
67	Curva de processo, pressão interna x deslocamento axial.	131
68	Matemática do processo automático de avanço dos cilindros	132
69	Tela para obtenção de valores de pressão interna e deslocamento axial.	133
70	Curva de processo dos casos típicos de falha na vedação.	135
71	Corpo de prova flambado.	135
72	Curva de processo para ensaios típicos de picos de pressão.	136
73	Curva característica do cilindro de contra-pressão	137
74	Corpo de prova fissurado	137
75	Curva de processo típica de inércia mecânica com fissura.	139
76	Curva de processo interrompida por diferença grande da curva real.	140
77	Corpos de prova resultantes dos ensaios das curvas das figuras 85 e 86.	140
78	Curva de processo típica de falha por perda de vedação.	141
79	Corpo de prova flambado.	142
80	Curva de processo interrompida por incapacidade do equipamento.	143
81	Corpo de prova com a máxima protrusão atingida.	144
82	Curva de processo com deslocamento assíncrono.	145
83	Corpo de prova com a protrusão descentralizada ou torta	145
84	Curva de processo com instabilidade plástica.	146
85	Corpos de prova flambados ou fissurados.	146

LISTA DE TABELAS

Nº	Descrição	Página
1	Exemplos de aplicações do processo de hidroconformação.	13
2	Parâmetros usados na construção da Janela de processo de Asnafi	111
3	Parâmetros deste trabalho.	113
4	Parâmetros do material Hidroconformado	117
5	Dados lidos da régua potenciométrica Temposonics de curso máximo de 300mm e suas respectivas equivalências.	118
6	Dados lidos da régua potenciométrica Temposonics de curso máximo de 100mm e suas respectivas equivalências.	118
7	Dados lidos da régua potenciométrica Gefran de curso máximo de 100mm e suas respectivas equivalências.	119
8	Dados lidos e escritos pelas placas AD e DA e suas respectivas leituras por instrumentos externos.	120

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

<i>Símbolo</i>	<i>Descrição</i>	<i>Unidade</i>
A	Parâmetro do critério de escoamento de Barlat	-
A	Deslocamento dos cilindros axiais	mm
ax	Soma dos deslocamentos dos cilindros axiais	mm
C	Parâmetros do critério de escoamento de Barlat	-
C	Fator de condição de contorno	-
C	Referência de pressão mediante deslocamento axial	Pa
d, d_o	Diâmetro externo do tubo	mm
E	Módulo de elasticidade	Pa
e	Deformação de engenharia	%
F, F_{conf}	Força de conformação	N
F	Constante do critério de escoamento de Hill	-
F_a, F_{axial}	Força axial	N
F_{at}	Força de atrito	N
F_N	Força normal aplicada	N
F_{ved}	Força de vedação	N
G	Constante do critério de escoamento de Hill	-
H	Constante do critério de escoamento de Hill	-
h	Parâmetro do critério de escoamento de Barlat	mm
I	Momento de inércia da secção transversal	mm ⁴
K₁, K₂	Invariantes de tensão	Pa
K	Coefficiente de resistência de Hollomon	Pa
K	Número de medições de N	Unidade
l, l₀	Comprimento do tubo ou corpo de prova	mm
L₀	Altura de protrusão	mm
L, L₀	Comprimento total	mm
L	Constante do critério anisotrópico de Hill	-
M	Constante do critério de escoamento de Hill	-
N	Constante do critério de escoamento de Hill	-
N	Força de embutimento	Pa
n	Expoente de encruamento	-
p	Parâmetro do critério de escoamento de Barlat	-
p_i	Pressão interna	Pa
R	Relação de Anisotropia	-

$R_{0, 45, 90}$	Relação de Anisotropia medida à 0°, 45° e 90° da dir. lam.	-
r	Raio externo do tubo	mm
s	Deslocamento axial total	mm
t, t_o	Espessura do tubo	mm
X	Tensão de escoamento no direção X	Pa
Y	Tensão de escoamento no direção Y	Pa
Z	Tensão de escoamento no direção Z	Pa

Letras Gregas

<i>Símbolo</i>	<i>Descrição</i>	<i>Unidade</i>
α	Parâmetros de ajuste de Ramberg-Osgood	-
α	Relação entre as tensões principais nas direções 1 e 2	-
ΔR	Anisotropia planar média	-
$\varepsilon, \varepsilon_0$	Deformação verdadeira, def. no limite elástico	-
ε_1	Deformação principal na dir. 1 (largura do corpo-de-prova)	-
ε_2	Deformação principal dir. 2 (espessura do corpo-de-prova)	-
$\bar{\varepsilon}$	Deformação real	-
λ	Rugosidade de uma superfície	μm
μ	Coefficiente de atrito	-
ν	Viscosidade de lubrificante	cst
ν	Coefficiente de Poisson	-
ρ	Raio de curvatura do tubo em expansão hidrostática livre	mm
$\tilde{\sigma}, \tilde{\sigma}_0$	Tensão verdadeira, tensão no limite elástico	Pa
σ	Tensão nominal ou de engenharia	Pa
σ_{LE}	Tensão limite de escoamento	Pa
σ_{LR}	Tensão limite de resistência	Pa
σ_{eq}	Tensão equivalente de Von Mises	Pa
$\sigma_{\{x,y,z\}}$	Tensões normais	Pa
$\sigma_{1, 2, 3}$	Tensão principal	Pa
Σ	Somatória	-
τ	Tensão de cisalhamento	Pa
$\tau_{xy, yz, zx}$	Tensão de cisalhamento nas direções e sentidos principais	Pa

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado um breve histórico do processo de hidroconformação* e serão expostos os fatores econômicos e sociais que o envolvem.

A indústria vem desenvolvendo, nos últimos anos, métodos e processos de produção que aumentam a produtividade e reduzem os custos de produção de componentes, conjuntos e produtos (PONCE & BATALHA, 2003). Além disso, há uma grande preocupação com a redução do tempo de desenvolvimento de novos projetos. Isto ocorre devido à grande concorrência existente no cenário econômico atual, no qual atrasos no desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias significam grandes prejuízos (KOÇ & ALTAN, 2001).

Devido ao custo crescente da energia e da matéria-prima, bem como à crescente demanda de controle ambiental, a indústria da conformação de materiais metálicos se vê obrigada a dar cada vez mais importância aos processos que permitem economizar estes bens (SCHMOECKEL et al., 1999). Um desses processos é o de hidroconformação, que consiste na obtenção de peças metálicas por conformação a partir da aplicação conjunta de esforços de compressão e de pressão hidrostática de fluido sobre o material a ser conformado (chapas ou tubos). Ele vem sendo aplicado para a fabricação de peças utilizadas em uma infinidade de segmentos, discutidos neste trabalho, por permitir a fabricação de peças das mais complexas geometrias (LEJEUNE, BOUDEAU, GELIN, 2003) ainda economizando mão-de-obra, matéria-prima e melhorando a relação resistência mecânica/peso (LEI et al., 2003).

Apesar de o processo de hidroconformação não ser uma tecnologia tão nova – desde a década de 1940 existem notícias da sua aplicação na produção de peças sem responsabilidade mecânica, como tachos e bacias de uso doméstico (KOÇ & ALTAN, 2001) – ele vem sendo

* A hidroconformação também é conhecida como hidroformagem (nome originário das aplicações em empresas multinacionais francesas: “hydroformage”), THF (sigla que vem do inglês “tube hydroforming”), IHU ou AHU (siglas utilizadas com frequência nas multinacionais alemãs: “Innerhochdruckumformen” “Ausdruckumformen”) e também pela sua forma mais antiga de denominação: conformação por pressão hidrostática.

utilizado em escala industrial desde o final da década de sessenta para a produção de peças hidráulicas, como juntas em Y, em T e cruzetas, entres outras (BORTOLUSSI, 2001).

Na indústria automobilística sua aplicação é ainda mais recente, sendo utilizado na produção de peças com responsabilidade mecânica, como longarinas de chassi, colunas laterais, assentos e quadros de motos, suporte de assentos, entre outros. Estão sendo usados na hidroconformação de tais peças: chapas e tubos com costura de aço baixo carbono, aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) e tubos de alumínio extrudados. Estes últimos são aplicados principalmente no setor aeronáutico (MOREIRA FILHO, 1998).

O material utilizado no processo deve ter grande capacidade de resistir a esforços multiaxiais, especialmente no caso do uso de chapas finas ou de tubos feitos a partir de chapa fina. São características desejáveis no material: índices de anisotropia elevados para aumentar a capacidade de resistir à redução da espessura e características tribológicas que favoreçam a deformação minimizando dispersão de energia através do atrito entre peça e ferramenta e da geração de calor causada pela deformação do material.

Devido ao grande número de variáveis envolvidas, o processo de hidroconformação tem sido estudado numericamente utilizando-se o método dos elementos finitos (RAY & Mac DONALD, 2004), experimentalmente através de ensaios padronizados de expansão hidrostática (Bulge test) (JOHNSON et al., 2004), e analiticamente, através da abordagem fenomenológica do processo utilizando as leis para escoamento e deformação dos materiais (ASNAFI, 1999). Através dos modelos numéricos é possível determinar os valores de deformação ao final do processo, especialmente a deformação que ocorre no sentido da espessura, e a seqüência de aplicação dos carregamentos para que não ocorra instabilidade plástica ou redução excessiva da espessura.

Alguns autores trabalham com o estudo da hidroconformação de juntas “T” alegando que esta é uma das geometrias mais comuns dentre os produtos hidroconformados (KOÇ et al., 2000) e

também porque talvez ela seja a peça mais simples que envolva uma região de expansão que não é axissimétrica, o que é característica da maioria das peças hidroconformadas na indústria de hoje (KOÇ et al., 2000).

Este trabalho está dividido em sete capítulos distintos, sendo este o primeiro capítulo. Na sequência encontra-se a definição do processo de hidroconformação de tubos, com seu princípio de funcionamento, suas aplicações, suas vantagens e limitações. No terceiro capítulo o estado-da-arte do processo é discutido, mostrando o que se encontra na literatura atual a respeito de estudos experimentais, analíticos e numéricos sobre ele, e também alguns aspectos tribológicos do processo. No capítulo quarto aborda-se a questão do controle do processo e de seus modos. No capítulo cinco encontra-se a descrição dos materiais utilizados na fase experimental do trabalho e os métodos seguidos na construção, calibração do equipamento e na modelagem do controlador e na obtenção das curvas de processo. Os resultados e sua discussão estão apresentados no sexto capítulo e, no sétimo, as conclusões. O oitavo capítulo é inteiramente dedicado à bibliografia geral consultada durante este trabalho. Os anexos contêm os desenhos técnicos que foram necessários na concepção do dispositivo construído.

1.1 Objetivos deste trabalho

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Compreender e dominar o processo de hidroconformação de tubos, em seus aspectos teóricos, fenomenológicos e experimentais.
- Projetar e construir dispositivo servocontrolado para ser acoplado em uma prensa hidráulica de 40 tf vertical, capaz de realizar a hidroconformação de um tubo de cobre UNS C 11000 de 28 mm de diâmetro externo, 80 mm de comprimento e espessura de parede de 0,6 mm, em uma junta T com até 50 mm de comprimento final, mantendo o diâmetro externo inicial constante.
- Conceber a instrumentação e o controle automático do dispositivo implantado à máquina, para exercer controle em malha fechada do processo de hidroconformação de tubos.
- Realizar a modelagem experimental do processo.

1.2 Bibliografia do capítulo 1

- ASNAFI, 1999: ASNAFI, N. *Analytical modeling of tube hydroforming*, Thin Walled Structures, V. 34, p. 295-330, 1999.
- BORTOLUSSI, 2001: BORTOLUSSI, R. *Análise numérica e experimental da hidroconformação de produtos tubulares*. 2001. 122 p. Tese (Doutorado) – FEM-UNICAMP - São Paulo, 2001.
- JOHNSON et al., 2004: JOHNSON, K. I., NGUYEN, B. N., DAVIES, R. W., GRANT, G. J., KHALEEL, M.A. *A numerical process control method for circular-tube hydroforming prediction*, International Journal of Plasticity, V. 20, p. 1111-1137, 2004.
- KOÇ & ALTAN, 2001: KOÇ, M.; ALTAN, T., *An overall review of the tube hydroforming (THF) Technology*, Journal of Materials Processing Technology, V. 108, p. 384-393, 2001.
- KOÇ et al., 2000: KOÇ, M., ALLEN, T., JIRATHERANAT, S., ALTAN, T., *The use of FEA and design of experiments to establish design guidelines for simple hydroformed parts*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, V. 40, p. 2249-2266, 2000.
- LEI et al., 2003: LEI, L. P., KIM, J., KANG, S. J., KANG, B. S., *Rigid-plastic finite element analysis of hydroforming process and its applications*, Journal of Materials Processing Technology, V. 139, p. 187-194, 2003.
- LEJEUNE, BOUDEAU, GELIN, 2003: LEJEUNE, A., BOUDEAU, N., GELIN, J. C., *Influence of material and process parameters on bursting during hydroforming process*, Journal of Materials Processing Technology, V. 143-144, p.11-17, 2003.
- MOREIRA FILHO, 1998: MOREIRA FILHO, L. A., *Modelagem teórica e automatização de processo de conformação de junções em tubos metálicos de parede fina*, Tese de doutorado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Área de Materiais e Processos de Fabricação. Curso de Engenharia Aeronáutica e Mecânica. 1998.
- PONCE & BATALHA, 2003: PONCE, A. S., BATALHA, G. F., *Conformação hidrostática de tubos e chapas*, In: VI CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS, 2003, Porto Alegre. VI Conferência Nacional de Conformação de Chapas, p. 165-176, 2003.

RAY & Mac DONALD, 2004: RAY, P., Mac DONALD, B. J., *Determination of the loading path for tube hydroforming processes using a fuzzy load control algorithm and finite element analysis*, Finite Element Analysis and Design, V. 41, p. 173-192, 2004.

SCHMOECKEL et al., 1999: SCHMOECKEL, D., HIELSCHER, C., HUBER, R., GEIGER, M., *Metal forming of tubes and sheets with liquid and other flexible media*, In: Annals of the CIRP, V. 48, p.497-513, 1999.

2. O PROCESSO DE HIDROCONFORMAÇÃO DE TUBOS

Nesta seção é descrito o processo de hidroconformação e ressaltadas suas aplicações principais, suas vantagens e suas limitações. Também é discutido o comportamento mecânico da peça hidroconformada e demonstradas as falhas típicas inerentes ao processo e a classificação dos processos de hidroconformação.

O processo de hidroconformação em tubos acontece modificando a forma do tubo através da aplicação simultânea de esforços da compressão nas suas extremidades e de aplicação da pressão hidrostática interna à sua cavidade.

A compressão na extremidade do tubo tem por finalidade mover o material na direção da conformação, evitando que ocorra uma redução excessiva da espessura, e é realizada por atuadores corretamente posicionados de acordo com a geometria desejada. A figura 1 exemplifica este tipo de esforço imposto a certa geometria.

Figura 1: Ilustração de uma peça típica sendo hidroconformada. As setas exemplificam os esforços de compressão (adaptada de SCHULER, 1998).

Nos casos em que não há fluxo de material na direção axial do tubo, os cilindros axiais têm apenas a função de garantir a vedação do fluido interno à sua cavidade.

O preenchimento da cavidade do tubo geralmente ocorre com o auxílio de uma bomba, e durante o seu funcionamento o ar que ocupa o interior da cavidade é expulso por uma pequena folga entre os punções e a peça. Com a cavidade preenchida, os punções avançam para vedar o tubo, e a pressão interna começa a aumentar (SCHMOECKEL et al., 1999).

Simultaneamente ao esforço axial ocorre aumento da pressão interna, cuja função também é a de evitar defeitos como rugas, exercida através de certos tipos de sistemas amplificadores de pressão, usando geralmente soluções à base de água, como as de etilenoglicol. Ao final do processo ocorre a calibração da peça, sob as pressões mais elevadas, para garantir que esta adquira todos os detalhes da ferramenta. O valor da pressão interna na etapa de calibração depende da relação entre o raio interno da peça e a espessura da parede do tubo (SCHULER, 1998). A figura 2 apresenta a seqüência completa do processo para a conformação de uma junta T.

Figura 2: Seqüência do processo de hidroconformação de uma junta T (adaptada de SCHULER, 1998).

As peças hidroconformadas mais complexas são obtidas através de tubos previamente dobrados, que serão submetidos à pressão interna no interior das ferramentas. Algumas peças não apresentam variação de comprimento, somente modificação de suas seções transversais; neste caso a compressão das extremidades é feita somente para garantir a vedação do fluido que fará a conformação, porém deve ser observado que cada seção transversal da peça tenha aproximadamente o mesmo perímetro da seção transversal do tubo que lhe dará origem (BORTOLUSSI, 2001).

Uma condição básica para este processo ser realizado é a de perfeita vedação. Qualquer vazamento do líquido gerador da pressão interna ocasiona a perda da peça conformada. A figura 3 apresenta o esquema dos três métodos mais usados para vedar o processo (SCHMOECKEL et al., 1999).

Figura 3: Métodos de vedação. Nota-se a compatibilidade entre métodos e a geometria do blank (espessura de parede) (adaptado de SCHMOECKEL et al., 1999).

O método que usa vedação através de O-ring tem sido um meio satisfatório de conseguir vedação nos processos realizados na área de pesquisa, pois ele garante vedação de um modo simples. Porém este método não é o ideal para o uso industrial devido ao desgaste rápido dos O-rings (SCHMOECKEL et al., 1999).

O método mais utilizado nas aplicações práticas é o de ponteiros cônicos. Ele promove a vedação através da deformação plástica nas extremidades internas do tubo, se a transmissão de força entre os punções axiais e o tubo se mantiver estável durante a operação (SCHMOECKEL et al., 1999).

Outro dispositivo para vedação, bastante usado na conformação de tubo com parede grossa, é o conhecido como ponteira com anel de faca. Ele tem um anel com uma aresta pontiaguda cujo diâmetro coincide aproximadamente com o diâmetro médio do tubo. Esta aresta penetra na extremidade do tubo, conseguindo a vedação através da sua deformação. Assim como na vedação com ponteiros cônicos, neste dispositivo também é necessário manter estável a transmissão de força entre ponteiros e tubo durante o processo (SCHMOECKEL et al., 1999).

2.1 Parâmetros do processo

Na hidroconformação devem-se determinar: as forças de conformação e de fechamento, a pressão necessária para início do escoamento e os valores de deformação nos quais ocorre a instabilidade plástica do processo. A força de conformação é uma soma dos esforços de compressão, de atrito e da pressão interna.

A relação pressão interna x deslocamento dos cilindros axiais é um dos fatores decisivos no sucesso do processo. A figura 4 mostra o comportamento típico destas variáveis para o sucesso do processo de hidroconformação do tubo em T.

Figura 4: Curvas dos parâmetros do processo de hidroconformação de um tubo de 40,8 mm de diâmetro interno, 2,1 mm de espessura e 150 mm de comprimento em uma junta “T” (adaptada de LEJEUNE, BOUDEAU, GELIN, 2003).

Devido ao grande número de variáveis envolvidas, o processo de hidroconformação tem sido simulado utilizando-se métodos numéricos, especialmente o método dos elementos finitos (MEF) (BORTOLUSSI, 2001). Através dos modelos numéricos é possível determinar os valores de deformação ao final do processo, especialmente a deformação da espessura, e a sequência de aplicação dos carregamentos para que não ocorra instabilidade plástica ou redução excessiva da espessura. A pressão hidrostática de fluido utilizada na conformação pode apresentar valores de $5 \cdot 10^6$ até $2,6 \cdot 10^9$ Pa, segundo AHMETOGLU E ALTAN (2000), dependendo da geometria da peça, espessura e material do blank. As pressões mais altas são atingidas ao final do ciclo do processo, sendo reservado à calibração da peça, para garantir que esta tenha com precisão a geometria e dimensões desejadas. O valor da pressão interna na etapa de calibração depende também da relação entre o raio interno da peça e a espessura da parede do tubo (SCHULER, 1998).

2.2 Aplicações

A hidroconformação já tem mais de meio século de existência, como se deduz dos relatos de seu uso por Koç e Altan (KOÇ & ALTAN, 2001), que referem o seu emprego já nos anos 40 do século passado, na conformação de produtos com poucos requisitos de responsabilidade funcional. Indo ainda mais além, Schmoeckel (SCHMOECKEL et al., 1999) menciona aplicações da hidroconformação para realizar o dobramento de tubos sob pressão interna em meados da década de 1890. Devido à complexidade tecnológica dos equipamentos envolvidos no processo, ele ficou restrito a estes tipos de aplicações durante um bom tempo. Somente veio a ser utilizado em escala industrial, para a produção de peças hidráulicas, ao final da década de sessenta.

As primeiras aplicações deste processo foram direcionadas na confecção de juntas hidráulicas. As tão conhecidas juntas “T” hoje são feitas em diâmetros que variam de 10 a 600 mm, atingindo uma produção de até 100 peças por minuto usando ferramentas de múltiplas cavidades (SCHMOECKEL et al., 1999).

Atualmente, há esforços para melhor conhecimento do processo, pela necessidade de controlá-lo, tendo em vista seu emprego na fabricação de conjuntos e componentes em diversos setores industriais, que variam de metais sanitários até peças tecnológicas para construção automotiva. A tabela 1 contém alguns exemplos de aplicação para o processo.

Tabela 1: Exemplos de aplicações do processo de hidroconformação.

Setor Industrial	Conjunto	Componentes
Automobilística	Chassis, sistemas de admissão e escape, sistema de direção, suspensão, etc.	Barras, frames e subframes, eixos de engrenagens, spoilers, colunas A/B/C, etc.
Química, Gás, Petróleo	Tubulação, tanques de armazenagem	Conexões em geral, reduções, etc.
Ar-condicionado e Ventilação	Acessórios	Reduções, conexões, perfis tubulares especiais.
Óptica	Telescópios	Estrutura externa
Bombas e acessórios	Carcaça	Tubo de entrada
Processamento	Construção de estruturas, tubos semi-acabados, etc.	Tubos calibrados, juntas articuladas, arcos para coberturas, elementos estruturais, etc.
Ciclismo	Acessórios tubulares	Estruturas, uniões, pedais, etc.

Exemplo que merece ser citado é a hidroconformação das longarinas do chassi da pick-up Chevrolet SSR, (figura 5). Do processo resultaram maior precisão, aumento da resistência mecânica e da rigidez para um menor peso em relação aos outros processos. A redução do material atingiu 20% na mudança do processo de fabricação, de estampagem e soldagem para a hidroconformação. Nota-se a geometria complexa ao longo do componente (www.schuler-hydroforming.de acessado em outubro de 2003).

Figura 5: Longarinas hidroconformadas de uma pick-up (www.schuler-hydroforming.de acessado em outubro de 2003).

Entre os exemplos da indústria automobilística, pode-se citar as partes estruturais da coluna A da BMW 330Ci, como pode ser observada na figura 6.

Figura 6: Exemplos de peças estruturais hidroconformadas da BMW 330 Ci (SCHULER, 1998).

Outras peças que podem empregar o uso da hidroconformação são empregadas na tecnologia sanitária, como as demonstradas na figura 7.

Na produção de peças tubulares cuja linha de centro não fica reta – como exemplo a figura 8 mostra peças do sistema de escapamento de caminhões e caminhonetes – pode-se usar operações de pré-conformação, mas também existe a possibilidade de conformar peças como esta em uma etapa apenas. Ela existe devido às diversas variações do processo de conformação usando pressão hidrostática. A variante em questão é o processo de hidroconformação com esforços de cisalhamento. A figura 14 mostra algumas destas variações (SCHMOECKEL et al., 1999).

Ainda sobre a peça da figura 8, ela não usa somente a conformação com cisalhamento, mas também nota-se a presença de expansão hidrostática. Assim, a peça é produzida utilizando combinações das variantes do processo.

Figura 7: Exemplos de metais sanitários que utilizam o processo de hidroconformação (cortesia da DOCOL - SP).

Figura 8: Sistemas de escapeamento de gás automotivos (www.rmtrucks.com acessado em maio 2004).

2.3 Vantagens

Segundo BORTOLUSSI, 2001, entre as vantagens que este processo oferece sobre os processos convencionais de fabricação estão as seguintes:

- *Economia de etapas no processo de fabricação*: o processo de hidroconformação permite obter peças de geometrias complexas em uma só etapa, com boa precisão dimensional.
- *Economia em material*: nos processos em que o componente é estampado e a seguir soldado, a hidroconformação elimina desperdícios de material, principalmente os perdidos na forma de recortes, rebarbas e fundidos.
- *Preservação das propriedades originais do material*: os componentes soldados possuem uma zona afetada pela solda; já o componente hidroconformado, embora possa apresentar encruamento por ser realizado a frio, conserva seu material com propriedades mecânicas mais próximas às originais, pois não apresenta grandes mudanças microestruturais se comparado ao primeiro caso. Além disso, o encruamento pode ser interessante, pois aumenta a resistência mecânica.
- *Diminuição de número de componentes de um conjunto*: a hidroconformação permite obter peças muito mais complexas do que as obtidas pelos processos clássicos.

2.4 Limitações

2.4.1 Comportamento mecânico da peça hidroconformada

O material a ser conformado por este processo deve ter grande capacidade de resistir a esforços multiaxiais, e principalmente deve apresentar ductilidade. Também é desejável no material índice de anisotropia elevado para aumentar a capacidade de resistir a possíveis reduções de espessura. No exemplo da junta em “T”, o tubo também deve apresentar pequenas tolerâncias dimensionais no diâmetro, forma e espessura, pontas do tubo escovadas por problemas de vedação durante o processo e extremidades perpendiculares ao eixo longitudinal (KOÇ e ALTAN, 2001). Na hidroconformação existem diferentes estados de deformação em cada região da peça. No exemplo adotado, a região da conformação central, no eixo perpendicular ao eixo natural do tubo ocorre tração e compressão na parede superior e compressão no sentido da espessura; já na região das extremidades, as paredes são comprimidas contra o molde, enquanto a pressão de fluido tende a aumentar seu diâmetro. A figura 9 representa estes estados de deformações.

Figura 9: Estados de deformações na peça hidroconformada, durante processo (BORTOLUSSI, 2001).

Assim, durante o processo o material sofre esforços de estiramento (tração biaxial) e embutimento (tração em um eixo, compressão em outro) simultaneamente.

Ainda deve ser mencionado o atrito no processo de hidroconformação, pois reduz a capacidade de deformação do material e prejudica seu escoamento no interior da matriz, restringindo o processo. Na hidroconformação de um tubo em “T” este fator, associado à alta pressão aplicada, ainda pode aumentar o desgaste da ferramenta, forças axiais, riscos de flambagem da peça e afetar a variação de espessuras (LEI et al., 2003).

Para minimizar o efeito do atrito, devem ser aplicados lubrificantes ao processo que sejam capazes de resistir a pressões oscilantes e sejam compatíveis com o meio utilizado para transmitir pressão.

Os esforços de compressão envolvidos no processo têm por finalidade facilitar o escoamento de material na direção da conformação, evitando que ocorra uma redução excessiva de espessura tratando-se de tubos (ASNAFI & SKOGSGARDH, 2000), ou segurar o blank para que não forme rugas (prensa-chapas), no caso de chapas (SIEGERT et al., 2000).

2.4.2 Falhas típicas inerentes ao processo

O processo de hidroconformação é basicamente fortemente dependente de dois parâmetros – a pressão interna e a força ou o deslocamento axial – e é controlado de tal maneira que a relação entre esses parâmetros seja favorável à formação de uma peça livre de defeitos (SCHMOECKEL et al., 1999).

Durante o processo de hidroconformação de tubos e chapas, há basicamente três classes de defeitos devido à má manipulação dos parâmetros do processo:

Enrugamento: Pode ocorrer em tubos e chapas, mas em tubos é mais freqüente a sua presença, principalmente nas zonas de expansão, se o deslocamento dos cilindros axiais for muito

rápido para o nível associado de pressão interna (LEI et al.). A figura 10.a) apresenta exemplos de rugas em peças hidroconformadas.

Estricção: Ocorre em tubos e chapas, provocada pelo estiramento excessivo devido à pressão interna muito alta; representa uma redução significativa da espessura da chapa ou parede do tubo. Pode ser generalizada quando ocorre por toda a área de deformação ou localizada quando ocorre em regiões concentradas. O segundo tipo de estricção citado é o fenômeno mais preocupante, pois sua ocorrência leva o material à ruptura. A figura 10.b) apresenta um caso de estricção em uma peça hidroconformada.

Ruptura ou Fissura: Fenômeno presente em tubos e chapas. Em sua maioria ocorre após a estricção localizada e é provocada pela pressão interna excessiva. A figura 10.c) apresenta uma fissura de peça hidroconformada.

Figura 10: Peças hidroconformadas com defeitos (http://nsmwww.eng.ohio-state.edu/THF_Automotive_Appln_Dr_G_Mississippi.pdf acessado em novembro 2003).

Estas falhas podem acontecer devido à instabilidade do material sob carregamentos inadequados, produzidos por certas relações entre o deslocamento ou a força dos cilindros axiais e a pressão interna, principalmente (LEJEUNE, BOUDEAU, GELIN, 2003). Essa limitação é ilustrada na figura 11.

Figura 11: Limitações da hidroconformação (adaptado de ASNAFI, 1999).

Na figura 11 se observa que nas regiões onde a pressão interna é muito maior do que o deslocamento axial, a vedação falha. Nas regiões onde a pressão e o deslocamento são baixos, não há escoamento do material da peça. Quando o deslocamento axial é maior do que a pressão interna, pode ocorrer enrugamento e/ou flambagem, e quando ambos são muito altos, podem ocorrer fissura e/ou estrição (PONCE & BATALHA, 2003).

Deste modo, o processo está limitado a uma faixa otimizada, localizada no centro da figura 11. Esta faixa também é fortemente influenciada pela conformabilidade do material, pelas condições tribológicas do processo e pela geometria da peça (SCHMOECKEL et al., 1999).

Mesmo possuindo uma região tão limitada de ocorrência segura do processo, é possível trabalhar com relações lineares entre seus parâmetros. As figuras 4 e 12 apresentam tipos de relações utilizadas em alguns processos de hidroconformação de peças.

Figura 12: Curvas dos parâmetros do processo de hidroconformação (BORTOLUSSI, 2001).

2.4.3 Classificação dos processos de hidroconformação

Segundo Gao (GAO et al., 2002), o processo de hidroconformação de tubos foi classificado em quatro grupos, de acordo com a sensibilidade aos parâmetros do processo, portanto, de acordo com a geometria das peças e do modo mais comum de falhas. Esta divisão é explicitada a seguir.

a) Hidroconformação de tubos conduzida pela pressão

É o processo de hidroconformação que não necessita de forças e deslocamentos axiais (e quando existentes são muito pequenos) para acontecer, onde ocorre pouco estiramento. Com isso o risco de enrugamento ou de flambagem é mínimo. Porém há maiores riscos de vazamentos devido à grande força exercida pela pressão interna nos cilindros axiais que

fazem a vedação. O exemplo típico de peça que se encaixa nesta classificação é um assento de motor. O meio de falha mais comum neste grupo é a ruptura ou fissura (GAO et al., 2002).

b) Processo de hidroconformação sob predomínio da pressão

Nesta classificação, a expansão é maior do que na primeira, então é necessário escoamento axial de material do *blank* a fim de obter um estiramento bem-sucedido da peça. Embora a deformação seja feita pela pressão, o deslocamento axial deve existir para acumular material na área de estiramento sob a forma de “rugas removíveis”. Uma vez envolvido maior deslocamento axial, o risco de flambagem e de enrugamento é bem maior. Além disso, devido à tendência de uma grande expansão, a deformação pode acabar excedendo o ponto de instabilidade. Com isso, o risco de estricção e ruptura aumentam sensivelmente, visto que existe a chance de ocorrer drástica expansão de material mesmo sem o aumento da pressão interna. E ainda mais: a expansão descontrolada pode gerar um movimento de retração nas extremidades do tubo, originando pontos de vazamento.

c) Hidroconformação de tubos com predomínio de deslocamento

Já nesta área, as peças conformadas apresentam pequenas regiões de estiramento, enquanto o deslocamento axial é muito mais significativo em relação à expansão, e essencial para a conformação bem-sucedida. Exemplos típicos são juntas conformadas em T, Y e X. A principal diferença entre este grupo e o anterior é que o deslocamento axial não é apenas possível, mas necessário, e com baixo risco de enrugamento. Também aqui se apresenta uma gama de pressões possíveis de trabalho bem maior, afinal é possível trabalhar com um nível mais baixo de pressão interna do que nos outros tipos de processo, sem ocorrer enrugamento ou flambagem.

d) Hidroconformação de tubos conduzida pelo deslocamento axial.

Já para peças classificadas neste grupo, a pressão interna serve como uma pressão de reserva, e a principal função do sistema de bombeamento e pressurização de fluido é a de encher a cavidade do tubo com fluido. A pressão para conformação em si pode ser gerada pelo deslocamento axial, que comprime o fluido.

De acordo com GAO, MOTSCH E STRANO (2002), as peças como juntas em “T” apresentam redução do volume interno durante o processo. Neste caso, o deslocamento axial está fortemente ligado à pressão interna. Sem deslocamento não há pressurização. E com isso o risco de vazamento é muito reduzido, assim um cilindro com ponteira cônica (vide figura 13) pode vedar com eficiência o sistema durante o processo.

Figura 13: Esquema de vedação por ponteira cônica.

Para que o deslocamento necessário possa ocorrer, é necessário retornar um pouco de fluido ao sistema de fornecimento, ou então a pressão interna subirá rapidamente podendo provocar a ruptura do blank antes de o processo terminar. Para minimizar isso pode ser usada uma válvula de alívio conectada à linha de fornecimento de fluido pressurizado, regulada para um valor constante de pressão.

Outra forma de analisar de maneira qualitativa o processo de hidroconformação é separar os tipos de esforços impostos à peça. A figura 14 ilustra as variações do processo de hidroconformação segundo este conceito.

Figura 14: Variações dos processos de conformação que usam pressão hidrostática (adaptado de SCHMOECKEL et al., 1999).

2.5 Bibliografia do capítulo 2

- AHMETOGLU & ALTAN, 2000: AHMETOGLU, M., ALTAN, T., *Tube hydroforming: state-of-the-art and future trends*, Journal of Materials Processing Technology, V. 98, p. 25-33, 2000.
- ASNAFI, 1999: ASNAFI, N. *Analytical modeling of tube hydroforming*, Thin Walled Structures, V. 34, p. 295-330, 1999.
- ASNAFI & SKOGSGARDH, 2000: ASNAFI, N.; SKOGSGARDH, A., *Theoretical and experimental analysis of Stroke-controlled tube hydroforming*, Materials Science and Engineering, A279, p. 95-110, 2000.
- BORTOLUSSI, 2001: BORTOLUSSI, R. *Análise numérica e experimental da hidroconformação de produtos tubulares*. 2001. 122 p. Tese (Doutorado) – FEM-UNICAMP - São Paulo, 2001.
- GAO et al., 2002: GAO, L., MOTSCH, S., STRANO, M., *Classification and analysis of tube hydroforming processes with respect to adaptive FEM simulations*, Journal of Materials Processing Technology, V. 129, p. 261-267, 2002.
- KOÇ & ALTAN, 2001: KOÇ, M., ALTAN, T., *An overall review of the tube hydroforming (THF) Technology*, Journal of Materials Processing Technology, V. 108, p. 384-393, 2001.
- LEI et al., 2003: LEI, L. P., KIM, J., KANG, S. J., KANG, B. S., *Rigid-plastic finite element analysis of hydroforming process and its applications*, Journal of Materials Processing Technology, V. 139, p. 187-194, 2003.
- LEJEUNE, BOUDEAU, GELIN, 2003: LEJEUNE, A., BOUDEAU, N., GELIN, J. C., *Influence of material and process parameters on bursting during hydroforming process*, Journal of Materials Processing Technology, V. 143-144, p.11-17, 2003.
- PONCE & BATALHA, 2003: PONCE, A. S., BATALHA, G. F., *Conformação hidrostática de tubos e chapas*, In: VI CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS, 2003, Porto Alegre. VI Conferência Nacional de Conformação de Chapas, p. 165-176, 2003.

- SIEGERT et al., 2000: SIEGERT, K., HÄUSSERMANN, M., LÖSCH, B., RIEGER, R., *Recent developments in hydroforming technology*, Journal of Materials Processing Technology, V. 98, p. 251-258, 2000.
- SCHMOECKEL et al., 1999: SCHMOECKEL, D., HIELSCHER, C., HUBER, R., GEIGER, M., *Metal forming of tubes and sheets with liquid and other flexible media*, In: Annals of the CIRP, V. 48, p. 497-513, 1999.
- SCHULER, 1998: SCHULER, Metal Forming Handbook, Alemanha. Ed. Springer, 1998.

3. O ESTADO-DA-ARTE DO PROCESSO DE HIDROCONFORMAÇÃO DE TUBOS

O estado-da-arte do processo é discutido neste capítulo, com exemplos numéricos, analíticos e experimentais do que vem sendo estudado em relação a ele. Nesta seção ainda se aborda a questão da tribologia e de sua influência no processo em questão, e também é possível encontrar exemplos de ensaios e procedimentos experimentais que são atualmente usados nesta área de estudo do processo.

Desde 1980, a maior parte das pesquisas tem focado principalmente no entendimento do processo de hidroconformação através do método da tentativa e erro (RAMA et al., 2003). Dohman e Hartl (DOHMAN & HARTL, 1996) publicaram suas tentativas de entender a mecânica do processo e de identificar e ressaltar os fundamentos básicos para especificar seu controle, introduzindo os conceitos de usar a teoria das cascas para analisar processos de hidroconformação.

Como o uso do processo de hidroconformação em escala industrial é ainda recente, existe pouco conhecimento organizado nesta área (RAMA et al., 2003). A hidroconformação ainda é nova tecnologia, embora esteja sendo crescentemente aplicada na indústria automotiva (DOHMAN & HARTL, 1996).

As áreas de intensa pesquisa neste tema incluem o desenvolvimento de modelos de plasticidade anisotrópicos avançados (BARLAT et al., 2003; STOUGHTON, 2002; WU, 2002) e previsão de curvas limite de conformação (CLCs) (vide item 3.2.2) (YAO & CAO, 2002; KNOCKAERT et al., 2002; SMITH et al., 2003, entre outros).

Vários autores consideram geometrias mais simples para prever os parâmetros do processo de hidroconformação de tubos através de métodos analíticos (ASNAFI, 1999; ASNAFI & SKOGSGARDH, 2000; RIMKUS et al. 2000; KOÇ & ALTAN, 2001). Asnafi (ASNAFI, 1999) analisou tubos cilíndricos em estado plano de tensões e usou a teoria da plasticidade

para estimar a pressão interna e a força axial necessárias para hidroconformar geometrias axissimétricas sob diferentes relações tensão-deformação. Asnafi e Skogsgardh (ASNAFI & SKOGSGARDH, 2000) fizeram simulações com o método dos elementos finitos (MEF) e ensaios experimentais usando curvas de processo que foram previstas por Asnafi (ASNAFI, 1999). Concluíram que o MEF simulou com precisão as geometrias resultantes dos ensaios experimentais, embora ambos os resultados fossem diferentes das geometrias assumidas nos cálculos das curvas otimizadas de processo. Observaram também que o caminho de deformações é dependente das geometrias intermediárias durante o processo.

Numa outra linha de trabalho, Park, Hyun e Cho (PARK & CHO, 1995; HYUN & CHO, 1994) desenvolveram um método de controle auto-explicativo baseado em uma base de dados razoável (357 tentativas de conformação) para otimizar a hidroconformação de chapas.

3.1 Estudos experimentais

Um dos caminhos usados satisfatoriamente na tecnologia da conformação para determinar se um *blank* ou pré-produto está adequado a certo tipo de processo de conformação é o emprego de um método de ensaio de materiais adequado. Como as tensões e as deformações, as condições tribológicas e os pré-produtos usados na hidroconformação são muito diferentes dos outros processos convencionais, torna-se inapropriado recorrer aos resultados de ensaios convencionais (SCHMOECKEL et al., 1999).

Por enquanto não foram encontrados meios de aplicar, nos processos de hidroconformação, os resultados de um ensaio de tração com extensômetro, por exemplo. Se isso for possível, é apenas para uma pequena porção da peça e do processo (SCHMOECKEL et al., 1999).

Por isso, no Instituto para Produção e Engenharia de Máquinas de Conformação (PtU) da Universidade Técnica de Darmstadt (TU Darmstadt) estão sendo conduzidos estudos

experimentais para analisar o comportamento mecânico básico das peças à hidroconformação de tubos.

Ensaio de ruptura (bursting tests) são feitos tentando aproximar o estado de deformações do corpo de prova ao estado da peça real o máximo possível. Eles permitem analisar os vários fatores que influenciam na ocorrência da ruptura. O conhecimento mais aprofundado desses fatores pode colaborar na elaboração das leis fundamentais que regem certas propriedades do material na conformação de uma peça (SCHMOECKEL et al., 1999).

Em cooperação com a Schuler Hydroforming, a Universidade de Darmstadt opera uma máquina de ensaios na qual é possível representar de maneira bem próxima as condições de atrito, tensões e deformações de uma região da peça chamada de zona guiada. Essa região está mais bem detalhada no capítulo 4. Este tipo de ensaio também é conduzido na Universidade Estadual de OHIO (ALTAN & PALANISWAMY, 2005). O esquema da máquina está ilustrado na figura 15.

As limitações deste teste são as dimensões dos corpos de prova, a velocidade e a sincronia de movimentos dos cilindros axiais.

Figura 15: Esquema da máquina de ensaios de atrito na zona guiada (adaptada de ALTAN & PALANISWAMY, 2005).

3.2 Estudos analíticos

Para uma boa compreensão do fenômeno da conformação é necessário conhecer as leis de comportamento dos materiais sob deformação. Para isso, devem ser revistos as teorias e leis de plasticidade e também os conceitos de formabilidade dos materiais.

3.2.1 Plasticidade dos materiais

Tratando-se de conformação mecânica de materiais, é pressuposto que eles tenham capacidade de deformação, ou seja, ductilidade. O melhor modo de definir deformações, bem como tensões, ainda que uniaxiais, é recorrendo à tradicional curva tensão-deformação gerada em um ensaio de tração onde existem três regiões distintas, sendo a primeira de deformação elástica, onde não ocorre escoamento de material, e regida pela lei de Hooke de acordo com a equação 1,

$$\sigma = E \cdot e \quad (\text{eq. 1})$$

onde σ é a tensão nominal ou de engenharia, E é o módulo de elasticidade do material, e e é a deformação de engenharia, que por sua vez é definida por:

$$e = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (\text{eq. 2})$$

sendo l o comprimento final do corpo de prova tracionado, e l_0 o inicial.

A segunda região representa a região de deformação plástica uniforme, onde o escoamento de material ocorre de maneira controlada. Tal trecho da curva, quando transportado para um diagrama em função das tensões e deformações verdadeiras (que serão definidas a seguir), pode ser regido pela relação de Ramberg-Osgood:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o} = \alpha \left(\frac{\tilde{\sigma}}{\tilde{\sigma}_o} \right)^n \quad (\text{eq. 3})$$

onde α é um parâmetro de ajuste que geralmente tem valor igual a 1, n é o expoente de encruamento, ε a deformação verdadeira (definida na equação 4) e $\tilde{\sigma}$ a tensão verdadeira, demonstrada na equação 5; e ε_o e σ_o são respectivamente os valores de deformação e de tensão do limite elástico do material (DOWLING, 1998).

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (\text{eq. 4})$$

$$\tilde{\sigma} = \sigma(1 + e) \quad (\text{eq. 5})$$

A terceira e última região é conhecida como de deformação plástica não uniforme, onde ocorre estricção e, por último, ruptura (BATALHA e ABRANTES, 2003).

A partir desta tensão uniaxial pode ser definido o estado de tensões de um corpo rígido mesmo que o carregamento solicite o componente em várias direções. Basta considerar as tensões nas principais direções de referência do material (σ_x , σ_y , σ_z , ou σ_1 , σ_2 , σ_3), não se esquecendo das tensões de cisalhamento (τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx}) e trabalhar com elas.

Então, com essas tensões e o estado de tensões (uniaxial, biaxial ou plano, multiaxial ou tridimensional) é possível formular critérios de escoamento para materiais isotrópicos. (BATALHA e ABRANTES, 2003).

Critério de escoamento de Tresca

O critério de Tresca propõe que o escoamento de material ocorre se a maior tensão de cisalhamento atinge um valor crítico. Isso pode ocorrer quando uma das tensões principais de cisalhamento τ_x ou y ou z alcançar o valor da tensão limite de escoamento σ_{LE} do material (BATALHA e ABRANTES, 2003).

Critério de escoamento de Von Mises

É interessante lembrar que a tensão equivalente de Von Mises para um sólido em estado triaxial de tensões é calculada por:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (\text{eq. 6})$$

O escoamento segundo esse critério ocorre se, e somente se, a tensão equivalente resultante da fórmula acima atingir a tensão de escoamento do material (BATALHA e ABRANTES, 2003).

Um outro fator que influencia o escoamento de material, e conseqüentemente o sucesso do processo de hidroconformação, é a anisotropia do material, ou seja, a variação das propriedades mecânicas em função da direção em que são medidas, devido à estrutura cristalográfica do material. Macroscopicamente, a anisotropia é provocada pelos processos de fabricação utilizados nas peças mecânicas. Em especial, cita-se caso de chapas laminadas, onde há um alinhamento dos grãos gerando uma orientação preferencial, modificando a capacidade de deformação do material nas diferentes direções em relação à da laminação.

A anisotropia é medida pela relação de anisotropia R , dada pela expressão:

$$R = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (\text{eq. 7})$$

onde ε_1 é a deformação ocorrida na largura de um corpo de prova normalizado, e ε_2 é a deformação responsável pela redução da espessura do mesmo corpo de prova. Levando em conta essas duas medidas pode-se concluir que quanto maior for o valor da razão R (anisotropia média), maior deve ser a capacidade do material de deformar na largura e menor na espessura (BORTOLUSSI, 2001).

Desta forma, a anisotropia é responsável pela variação da espessura na operação de hidroconformação do tubo exemplo deste trabalho. Assim, valores elevados de anisotropia são necessários para aumentar a capacidade de deformação na largura sem grandes reduções de espessura da peça, garantindo maior estabilidade plástica (MONTMITONNET e CHENOT, 1995).

A relação de anisotropia ainda pode ser diferente se a orientação do corte do corpo de prova variar de acordo com o sentido de possíveis orientações da estrutura cristalográfica do material. Os valores comumente encontrados dessas medidas são: R_0 medido a 0° , R_{45} a 45° e R_{90} a 90° . A diferença ou variação entre elas (ΔR) é conhecida como anisotropia média planar.

Critério anisotrópico de Hill

Esta teoria assume que o material é homogêneo em três direções ortogonais chamadas de x, y e z, nas quais as propriedades, a tração e a compressão são iguais, mas variam com a mudança de direção. Considerando uma chapa laminada, x é a direção de laminação, y é a paralela ao plano da chapa, e z é ortogonal a x e y (BATALHA e ABRANTES, 2003).

O critério de Hill é expresso como:

$$F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (\text{eq. 8})$$

onde F , G , H , L , M e N são constantes determinadas em ensaios de tração comuns, e utilizando resultados de ensaios de anisotropia, de forma que:

$$2F = \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{Y^2} \quad (\text{eq. 9})$$

$$2G = \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2} - \frac{1}{Y^2} \quad (\text{eq. 10})$$

$$2H = \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2} \quad (\text{eq. 11})$$

onde X , Y e Z são os valores da tensão de escoamento nas três respectivas direções, x, y e z.

Como é complicado medir a resistência na direção z da espessura da chapa com as seguintes relações é possível torná-la calculável:

$$R_0 = \frac{H}{G} \quad (\text{eq. 12})$$

$$R_{90} = \frac{H}{F} \quad (\text{eq. 13})$$

E finalmente substituindo as equações 12 e 13 em 9, 10 e 11, tem-se:

$$Z = X \sqrt{\frac{R_{90}(1 + R_0)}{(R_{90} + R_0)}} \quad (\text{eq. 14})$$

Resumidamente, o critério quadrático de Hill pode ser expresso da forma abaixo simplificada:

$$F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 = 1 \quad (\text{eq. 15})$$

Critério de escoamento anisotrópico com expoente de maior valor

Semelhante ao critério quadrático de Hill, este critério propõe a seguinte expressão:

$$F|\sigma_y - \sigma_z|^a + G|\sigma_z - \sigma_x|^a + H|\sigma_x - \sigma_y|^a = 1 \quad (\text{eq. 16})$$

onde a assume valores maiores do que 2.

Este critério foi proposto por Hosford (HOSFORD, 1993) a partir da idéia de que Hill superestimou o efeito da anisotropia sobre a forma do escoamento.

Critérios de Barlat para chapas em estado biaxial de tensões

- Isotropia planar

Neste critério a anisotropia planar é nula, e os coeficientes R_0 , R_{90} e R_{45} são idênticos. E assim o critério pode ser resumidamente explicitado por:

$$|K_1 + K_2|^a + |K_1 - K_2|^a + |2K_2|^a = 2Y^a \quad (\text{eq. 17})$$

onde K_1 e K_2 são chamados invariantes da tensão e são expressos como:

$$K_1 = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2}, e \quad K_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2 + \sigma_{xy}^2} \quad (\text{eq. 18})$$

- Anisotropia Planar

Já neste critério, a anisotropia é considerada, e o critério passa a ser representado na forma:

$$A|K_1 + K_2|^a + A|K_1 - K_2|^a + C|2K_2|^a = 2Y^a \quad (\text{eq. 19})$$

onde K_1 e K_2 são expressos como:

$$K_1 = \frac{\sigma_{xx} + h\sigma_{yy}}{2}, e \quad K_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} + h\sigma_{yy}}{2}\right)^2 + p^2\sigma_{xy}^2} \quad (\text{eq. 20})$$

e as constantes A , C e h são calculadas como:

$$A = 2 - 2\sqrt{\frac{R_0 R_{90}}{(1 + R_0)(1 + R_{90})}} \quad (\text{eq. 21})$$

$$C = 2 - A \quad (\text{eq. 22})$$

$$h = \sqrt{\frac{R_0(1 + R_{90})}{(1 + R_0)R_{90}}} \quad (\text{eq. 23})$$

O parâmetro p é calculado, segundo Batalha e Abrantes (BATALHA & ABRANTES, 2003), de um modo implícito e iterativo.

3.2.2 Conformabilidade dos materiais

Conformabilidade pode ser entendida como a capacidade que um material tem de se deformar sem apresentar falhas. Essa capacidade de deformação se refere a deformações impostas por processos de fabricação como estampagem ou estiramento.

Na estampagem é interessante que o material sujeito ao processamento tenha boa ductilidade em todas as direções paralelas ao plano da chapa e também boa resistência ao escoamento, portanto boa capacidade de encruamento na direção da espessura.

Já o estiramento, que se encontra em estado plano de deformações, exige do material grande capacidade de deformação plástica uniforme, portanto grande ductilidade e também altos valores de n (coeficiente de encruamento).

Estes dois tipos de deformação estão presentes simultaneamente no processo de hidroconformação, bem como na maioria dos processos de conformação mecânica. Então a

necessidade de verificar se uma determinada peça pode ser deformada até certo ponto sem falhar passou a ser um dos principais problemas inerentes aos processos.

Pensando em minimizar este problema, foi planejada a construção da curva limite de conformação (CLC). O diagrama CLC é traçado a partir da combinação dos limites máximo e mínimo de deformação e expressa a máxima deformação que se pode atingir em um metal sob conformação, antes de ocorrer falha localizada (estricção, trinca, ruptura). A representação esquemática de um diagrama CLC é ilustrada na figura 16.

Figura 16: Curva Limite de Conformação esquemática.

Sabe-se que a CLC é muito dependente da taxa de deformação e também do estado de deformações, mesmo assim mais de 80% das falhas em processos industriais ocorrem próximas às condições planas de deformação (BRUNET & MORESTIN, 2001).

As primeiras CLCs foram calculadas baseadas no critério de Hill para estrição localizada ao longo de uma direção de extensão infinitesimal. Mas esse critério não é válido para materiais que possuem baixa tensão limite de escoamento sob tração biaxial. Assim o diagrama foi

completado pela curva vinda da teoria da instabilidade de carregamento difuso de Swift, segundo BRUNET & MORESTIN, 2001.

Existem, no entanto, outras teorias e formas de construir a CLC, como o critério de instabilidade ao cisalhamento, a teoria de Storem e Rice, e a mais popular entre elas: o modelo M-K de Marciniak-Kuczynski, a partir do qual surgiram varias formas semi-analíticas de obter a CLC. A análise de M-K assume que um defeito inicial existente na chapa, na forma de um longo entalhe (figura 17), cresce e eventualmente falha durante o estiramento ao longo de uma região linear de deformação. Ainda na análise de M-K, conceitualmente a estricção deverá ser prevista quando a razão entre a profundidade do entalhe e a espessura do material sob conformação atinge um valor crítico nominado C e a magnitude desse valor é independente do estado e taxa de deformações (BRUNET e MORESTIN, 2001).

Figura 17: Modelo de chapa de M-K (SAVOIE et al., 1998).

O modelo de M-K, segundo Brunet e Morestin (2001), traz consigo alguns problemas como incoerências entre resultados experimentais e analíticos devido à superestimação das condições limites de deformação, subestimação do domínio de estado plano de deformações e intensa dependência do valor da anisotropia média R . As CLCs também podem ser

construídas a partir de ensaios de expansão hidrostática de chapas (bulge test) na faixa positiva de deformações, e ainda a partir do critério de estricção (bastando procurar a instabilidade plástica para diferentes históricos de deformação) (HADDAD, VACHER, ARRIEUX, 1999). Ainda segundo estes autores, as CLCs podem também ser construídas a partir de leis de encruamento, o que ensejou a construção de CLCs por este método, e pelo método experimental, para um mesmo material. E seus resultados mostram, além da compatibilidade dos métodos, que quanto maior for a tensão limite de escoamento, menos deformação pode ser aplicada, enquanto que, quanto maior for a tensão de ruptura, maiores deformações permite o material, e quanto menor for a anisotropia planar média, melhor é a conformabilidade do material.

3.2.3 Modelagem da hidroconformação livre

A hidroconformação livre é a fase do processo em que o material é conformado em uma velocidade maior, e o contato da ferramenta com a peça ainda não foi integralmente estabelecido. Esta é a fase onde é maior o risco de ocorrerem falhas.

Sendo assim, é o comportamento do material durante esta fase quem determina a configuração das curvas que limitam a faixa de trabalho ilustrada na figura 11. Essas curvas são baseadas nas relações deduzidas da seguinte modelagem. Admite-se um tubo de parede fina axissimétrico, no qual as tensões principais σ_1 , σ_2 e σ_3 coincidem com as tensões axiais, circunferenciais e perpendiculares (direção da espessura da parede do tubo) respectivamente. O mesmo para as deformações. Despreza-se a última tensão σ_3 ao se supor que o tubo estará em estado plano de tensões (KIM & PARK, 2002).

As tensões e deformações incrementais equivalentes podem ser definidas segundo o critério de escoamento para materiais anisotrópicos de Hill e a teoria de trabalho plástico equivalente, respectivamente, como se segue (KIM & PARK, 2002).

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{1+R} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + R(\sigma_1 - \sigma_2)^2]} \quad (\text{eq. 24})$$

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{1+R}{\sqrt{1+2R}} \sqrt{d\varepsilon_1^2 + d\varepsilon_2^2 + \frac{2R}{1+R} d\varepsilon_1 d\varepsilon_2} \quad (\text{eq. 25})$$

onde R é a anisotropia planar.

Ainda é considerado o encruamento do material através da lei de Hollomon.

$$\bar{\sigma} = K \bar{\varepsilon}^n \quad (\text{eq. 26})$$

onde K é o coeficiente de resistência e n o de encruamento do material.

De acordo com a regra de escoamento e admitindo que o volume de material é sempre constante, podem ser deduzidas as seguintes relações:

$$d\varepsilon_1 = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left[\sigma_1 - \frac{R}{1+R} \sigma_2 \right] \quad (\text{eq. 27})$$

$$d\varepsilon_2 = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left[\sigma_2 - \frac{R}{1+R} \sigma_1 \right] \quad (\text{eq. 28})$$

$$d\varepsilon_3 = -\frac{1}{\sqrt{1+R}} \frac{1+\alpha}{\sqrt{1+\alpha^2 + R(1-\alpha)^2}} \quad \text{sendo} \quad \alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (\text{eq. 29})$$

Considerando o tubo sujeito a uma pressão interna, p_i , e a forças axiais, F , como ilustrado na figura 18, podem ser escritas as equações de equilíbrio:

Figura 18: Tubo em solicitação (ASNAFI, 1999).

$$\sigma_1 = \frac{p_i r}{t} \quad (\text{eq. 30})$$

onde r é o raio médio e t a espessura do tubo, e

$$\sigma_2 = \frac{p_i r}{2t} - \frac{F}{2\pi r t} \quad (\text{eq. 31})$$

onde F é a força de conformação, que pode ser expressa de duas maneiras (ASNAFI, 1999):

$$F = p_i \pi r^2 (1 - 2\alpha) \quad \text{ou} \quad (\text{eq. 32})$$

$$F_{\text{conf}} = F_{\text{axial}} - F_{\text{ved}} - F_{\text{at}} \quad (\text{eq. 33})$$

onde F_{ved} é a força necessária para manter a vedação do tubo expressa na equação 34 e F_{at} a força de atrito, observada na equação 35 (ASNAFI, 1999).

$$F_{\text{ved}} = p_i \pi \left(\frac{di}{2} \right)^2 \quad (\text{eq. 34})$$

onde di é o diâmetro interno do tubo, e

$$F_{\text{at}} = p_i \pi \mu d (l_o - s) \quad (\text{eq. 35})$$

onde μ é o coeficiente de atrito entre a peça e a ferramenta, d o diâmetro externo do tubo, l_o o comprimento inicial do tubo e s o deslocamento axial de cada cilindro.

Com a equação 34 pode-se levantar a curva de vedação observada esquematicamente na figura 11.

Combinando as equações 27, 28, e 30 é obtida a seguinte relação:

$$p_i = \frac{\bar{\sigma}t}{\bar{\varepsilon}r} \left[\frac{\varepsilon_1 + \left(\frac{R}{1+R} \right)}{1 - \left(\frac{R}{1+R} \right)^2} \right] \quad (\text{eq. 36})$$

com a qual é possível levantar a curva de escoamento da figura 11.

As máximas deformações permitidas ao material dependem da sua capacidade de conformação, e podem ser descritas como (KIM & PARK, 2002):

$$\varepsilon_{1,\max} = \frac{n}{1 + \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1}} \quad (\text{eq. 37})$$

$$\varepsilon_{1,\max} + \varepsilon_{2,\max} = n \quad (\text{eq. 38})$$

$$\bar{\varepsilon}_{\max} = \frac{n}{\frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1} + 1} \frac{\sqrt{1+R} \sqrt{1+\alpha^2 + R(1-\alpha)^2}}{1 + R(1-\alpha)} \quad (\text{eq. 39})$$

Substituindo 38 em 36, obtém-se:

$$p_{cr} = \frac{\bar{\sigma}t}{\bar{\varepsilon}_{\max}r} \left[\frac{n - \frac{1}{(R+1)}\varepsilon_{1,\max}}{1 - \left(\frac{R}{1+R} \right)^2} \right] \quad (\text{eq. 40})$$

Usando a relação 40 pode-se construir o limite de fissura que é representado na figura 11.

A flambagem e o enrugamento são fenômenos parecidos de instabilidade do material. Se o tubo for considerado uma coluna, a força crítica que irá causar instabilidade nela, segundo Euler, é (KOÇ & ALTAN, 2002):

$$F_{cr} = C \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (\text{eq. 41})$$

onde E é o módulo de elasticidade do material, L o comprimento do tubo, I o momento de inércia da secção transversal e C um fator devido às condições de contorno das extremidades. No entanto, considerando que o material está solicitado pela compressão axial e pressão interna simultaneamente, e aplicando dentre outras deduções o critério de escoamento de Hill (eq. 24), a tensão crítica, que causaria a instabilidade do sistema, é dada por KIM & PARK, 2002:

$$\sigma_{cr} = -A_c^n K \left[\frac{1}{1+R} \left\{ 1 + \frac{1}{\alpha^2} + R \left(1 - \frac{1}{\alpha} \right)^2 \right\} \right]^{\frac{n-1}{2}} \quad (\text{eq. 42})$$

onde:

$$A_c = \frac{2t}{r\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{\sqrt{n}}{\sqrt{n}+1} \quad (\text{eq. 43})$$

onde n é o coeficiente de Poisson do material.

Assim, a equação 42 pode determinar a curva que limita o enrugamento e/ou flambagem da figura 11.

3.3 Estudos numéricos

A hidroconformação de tubos é ideal para produzir peças cuja produção através dos outros processos é muito complexa, ou mesmo inviável.

Já durante o projeto da peça que será hidroconformada deve-se atentar às propostas de soluções que assegurem um componente adequado ao processo. Assim, a solução adotada deve ser baseada na viabilidade de produção, na função do componente e nos custos de produção (SCHMOECKEL et al., 1999).

Então o processo pode ser implementado e finalmente otimizado. A otimização pode ser feita através de know-how, métodos analíticos plastomecânicos ou simulações numéricas pelo método dos elementos finitos (MEF). Este último modo é um processo iterativo (SCHMOECKEL et al., 1999).

Para obter uma boa reprodução da hidroconformação de tubos nas simulações do MEF, os parâmetros de entrada disponíveis precisam ser o mais precisos possível, ou então haverá grandes discrepâncias entre simulação e realidade. Esses parâmetros de entrada podem ser vistos no esquema da figura 19: coeficiente de atrito, parâmetros do material e leis e critérios de escoamento (SCHMOECKEL et al., 1999).

Figura 19: Parâmetros de entrada (à esquerda e acima) e de saída (à direita) principais em uma simulação pelo MEF.

Os resultados das simulações são as tensões e as deformações resultantes do carregamento e a distribuição de espessuras na parede do tubo. Eles são usados para avaliar a progressão do processo, realizando a simulação para cada passo.

O MEF é usado principalmente para acessar a viabilidade do processo, para estimar os parâmetros requeridos para a conformação e para aperfeiçoar a geometria do componente (SCHMOECKEL et al., 1999).

Para simular a hidroconformação de tubos podem ser usados vários softwares. Dentre eles o ANSYS, LS DYNA, NASTRAN, FORTRAN entre outros. Eles variam de softwares com métodos de cálculo não lineares implícitos ou os explícitos universais, até softwares desenvolvidos especificamente para simular este tipo de processo. Dependendo da aplicação, são usados modelos de materiais isotrópicos, anisotrópicos e plásticos e elastoplásticos.

Para a discretização das peças nas aplicações de interpolação linear, que são maioria, podem-se usar elementos de casca, ou contínuos. As ferramentas geralmente são representadas como corpos rígidos e são introduzidas no modelo como condições de contorno de contato e atrito (SCHMOECKEL et al., 1999).

Muitos autores têm feito longas simulações usando o MEF através de softwares programados com parâmetros de outros processos de conformação, como os de estampagem, para analisar processos de hidroconformação (WU & YU, 1996; RAMA et al., 2003).

Rama (RAMA et al., 2003) desenvolveu vários modelos numéricos para simulação em MEF da hidroconformação de materiais superplásticos e para tubos. Em 2003 desenvolveu um

método numérico bidimensional baseado na teoria das membranas, no qual considerou efeitos do atrito e usou modelos de encruamento para expressar o comportamento à deformação do material. Para isso precisou desprezar o deslocamento axial, assumindo estado plano de deformações na direção axial do tubo. O autor testou o novo método em softwares comerciais como o FORTRAN. Seus resultados mostram que o método é eficiente em termos computacionais e que pode ser uma ferramenta importante no projeto do processamento de peças, para prever e estudar os futuros parâmetros de processo (RAMA et al., 2003). Embora não haja deslocamento axial nessa formulação, ela pode prever a carga requerida de pressão interna e a distribuição de espessuras na peça final para a maioria dos produtos tubulares.

Lei (LEI, KANG, KANG, 2001) e Bortolussi (BORTOLUSSI & BUTTON, 2002) usaram o critério de Oyane (OYANE et al., 1980) no MEF para analisar o processo de hidroconformação.

Lei (LEI, KANG, KANG, 2001), usando tal critério, calculou os limites de conformação do processo e discutiu o efeito de seus parâmetros. Seus resultados mostram-se razoáveis, e baseado neles melhorou a formabilidade da peça neste processo. Dois anos mais tarde, Lei (LEI et al., 2003) desenvolveu um programa de MEF, o HydroFORM-3D, para analisar e projetar processos de hidroconformação de tubos. O autor aplicou seu software em conjunto com um critério de fratura dúctil. O programa é baseado no modelo de comportamento rígido-plástico, e seus resultados têm sido satisfatórios. Os possíveis locais de falha previstos se mostram-se compatíveis com as situações experimentais encontradas.

Já Bortolussi (BORTOLUSSI & BUTTON, 2002) simulou o processo de hidroconformação de um tubo de aço em uma junta em T utilizando dois modelos de comportamento de

materiais diferentes: um isotrópico e um anisotrópico. O objetivo do autor é verificar a influência da anisotropia na seqüência de carregamentos de pressão, na deformação da espessura do tubo e na força total de conformação. Nas regiões de contato é utilizado o modelo de atrito de Coulomb, e o atrito na área de contato entre a peça e a ferramenta é considerado mais baixo do que na área de contato da peça com os cilindros, devido a uma pequena folga existente no primeiro contato. O autor verifica que as deformações na espessura do material isotrópico são maiores do que as do outro, especialmente nas regiões onde predominam esforços de tração.

3.4 Aspectos tribológicos do processo de hidroconformação

O processo de hidroconformação depende fortemente do contato entre materiais metálicos que se deformam (peça) ou não (ferramenta). Do contato e da deformação que ocorrem durante o processo são gerados calor, forças e tensões.

Esse contato entre o molde e a peça é crítico com respeito às forças de atrito geradas nestas interfaces. O atrito na interface peça-ferramenta é responsável pela má distribuição de espessuras de parede ao longo do perfil da peça, defeitos de superfície como rachaduras, e mais profundos como rasgos e até fissuras.

Mesmo assim, a respeito das condições de atrito entre peça e ferramenta há apenas uma quantidade muito escassa de informações. E as informações nem sempre são obtidas de forma adequada. Na hidroconformação quase não há indicações quantitativas ao coeficiente de atrito μ . Também o conhecimento dos fatores que influenciam o coeficiente de atrito e a influência que o atrito exerce no comportamento do material à conformação estão disponíveis apenas a uma pequena parte da peça.

Além dos parâmetros de contato como tensão normal, viscosidade de lubrificantes e velocidade de deslizamento, o coeficiente de atrito depende de outros parâmetros como a textura das superfícies de contato, acabamento do material, juntas na ferramenta, entre outros.

O diagrama da figura 20 apresenta alguns fatores que influenciam as condições tribológicas na conformação.

Figura 20: Fatores que influenciam em conjunto as condições de atrito na hidroconformação.

No meio destes fatores destaca-se a tensão normal ou pressão de contato. Ela depende dos seguintes parâmetros do processo:

- Pressão interna;
- Força ou deslocamento axial.

E dos seguintes parâmetros do sistema:

- Material da peça;
- Geometria da peça (espessura de parede);
- Geometria da ferramenta (mecanismo de vedação).

Na hidroconformação os parâmetros tecnológicos como pressão de contato e velocidade de deslizamento estão em constante mudança. Isto causa grandes mudanças no sistema tribológico a todo tempo e em toda região da peça durante o processo (SCHMOECKEL et al., 1999).

Destas informações pode-se entender que não é possível uma análise matemática das condições tribológicas neste sistema, embora seja absolutamente necessário saber o que está acontecendo tribologicamente durante o processo. Sem o conhecimento do coeficiente de atrito nos vários focos de contato e sobre as diversas condições tribológicas não se pode realizar nenhum estudo numérico ou analítico do processo (SCHMOECKEL et al., 1999).

Nos dias atuais, um bom meio de tentar encontrar o coeficiente de atrito e conduzir estudos sobre a interdependência entre este coeficiente e os parâmetros de processo e de sistema é criar um modelo apropriado para casos de hidroconformação (SCHMOECKEL et al., 1999). A formação do modelo começa pela divisão da peça em várias áreas de deformação. As características que distinguem estas áreas são os parâmetros de tensão normal e velocidade de deslizamento que ocorrem nelas e os seus estados de tensões e de deformações. Isto resulta basicamente na seguinte divisão:

- Zona guiada;
- Zona de transição;
- Zona de expansão.

Na zona guiada prevalecem tensões medianas de contato e também velocidades de deslizamento de nível médio a alto. Não há aumento da superfície. O atrito é alto, pois peça e matriz estão em contato e compressão e sob forças tangenciais (axiais). O movimento relativo de material é mais intenso (varia entre 50 e 100 mm/s.), e existe pouca expansão (menor que 5%).

Na zona de transição a superfície pode aumentar. A velocidade de deslizamento é menor do que na zona anterior, mas ainda é notável. Começam aqui a ocorrer tensões de tração na direção circunferencial do tubo. Peça e matriz estão em contato e compressão, mas a peça está em estado triaxial de tensões. O fluxo de material é menos intenso, variando a velocidade de escorregamento entre 10 e 30 mm/s.

Na zona de expansão ocorrem tensões de tração nas direções axial e tangencial ao mesmo tempo, enquanto a velocidade de deslizamento tende a zero, e o aumento da superfície atinge seu ápice. Há uma expansão substancial (maior que 20%), onde a peça se encontra em estado biaxial de tensões, o fluxo material é predominantemente circunferencial. Prevalecem tensões

de tração, e a velocidade de escorregamento é mínima (menor que 10 mm/s) (SCHMOECKEL et al., 1999) (KOÇ, 2003).

O conhecimento das condições de atrito não serve somente para melhorar as limitações do processo, mas também para permitir a sua configuração e otimização através do uso do MEF (SCHMOECKEL et al., 1999).

O sistema tribológico na hidroconformação consiste de:

- a) condições superficiais da matriz e do tubo;
- b) área de contato e estado de tensões associados a ela;
- c) pressão interna aplicada ao tubo;
- d) velocidade de escorregamento entre peça e ferramenta;
- e) materiais do tubo e da matriz e suas propriedades mecânicas;
- f) recobrimento da matriz e lubrificantes (ALINGER, VAN TYNE, 2001);
- g) posicionamento da linha de partição.

Tudo isso fica difícil de modificar a fim de controlar o sistema tribológico, uma vez que a ferramenta e os tubos já foram confeccionados (ALINGER, VAN TYNE, 2001). Exceto através de lubrificantes. Estes podem (KOÇ, 2003):

- a) separar o blank da superfície da matriz para protegê-la;
- b) reduzir o atrito na interface;
- c) auxiliar o fluxo de material para preencher completamente a matriz;
- d) minimizar a redução de espessura;
- e) prolongar a vida da matriz, reduzindo as tensões de contato.

Na hidroconformação, com o crescimento da pressão interna, a área de contato aumenta também, o que torna o atrito um fator dominante (KOÇ, 2003), daí o papel do lubrificante ser tão significativo.

Se o filme de lubrificante for espesso o suficiente para garantir a separação entre peça e ferramenta, o atrito torna-se baixo, o que diminui os esforços de conformação, mas produz peças com superfícies mais rugosas, limitando a deformação da peça. Se o filme é fino, as asperezas da matriz e peça têm maior contato, o que aumenta muito o atrito, os esforços e o desgaste da ferramenta, mas produz peças com melhor acabamento superficial (KOÇ, 2003).

A seleção adequada do lubrificante e do recobrimento é essencial para superar o atrito de escorregamento, prevenir a adesão de partículas na ferramenta, reduzir a força axial e o risco de estricção (LAZZAROTTO et. al., 1998). Peças estruturais, por exemplo, com muitas variações na seção transversal e que precisam de muito deslocamento axial para formar as cavidades sem exceder a redução de espessura permitida, dependem fortemente do atrito (KOÇ, 2003).

Por isso alguns autores desenvolveram métodos especialmente para a seleção do lubrificante adequado. Dentre eles, destaca-se Koç (KOÇ, 2003), que usa os seguintes critérios:

- lubrificidade para reduzir atrito;
- durabilidade sob pressão;
- mínima abrasividade;
- compatibilidade com os fluidos pressurizados;
- facilidade de aplicação e remoção;
- custo.

Ele classifica os lubrificantes como:

- a) Sólidos: baseados em borax, sabão em pó, polímeros, (que são geralmente mais eficientes em desempenho de redução do atrito [RAO, WEI, 2001] e aumentam a vida da ferramenta. Sua aplicação ainda pode ser automatizada, resultando em lubrificação limpa, prática e rápida, com custo relativamente baixo [EICKMEIER et al., 1996]).

- b) Líquidos: baseados em óleo, água (apresentam menores custos dentre todos e são fáceis de remover. Sua aplicação exige maior cuidado, não sendo ideal para automatização. Entretanto o seu desempenho não é tão bom como o dos sólidos [EICKMEIER et al.,1996]).
- c) Pastosos: óleos de muita viscosidade, graxas.

Para avaliar lubrificantes, Ngaile (NGAILE, JAEGER, ALTAN, 2004) conduz experimentos de LDH (altura limite da capa esférica) e compara os resultados com o MEF para avaliar lubrificantes.

3.4.1 Ensaios pertinentes

O ensaio LDH consiste em deformar uma chapa cuja espessura é previamente determinada em simulações via MEF para que o estado de tensões e as pressões de interface nela se assemelhem com o que ocorre na zona de transição do processo de hidroconformação de tubos. A figura 21 ilustra a máquina para realizar o ensaio LDH.

Figura 21: Detalhe da máquina para realizar o ensaio LDH (adaptada de NGAILE, JAEGER, ALTAN, 2004).

O lubrificante é avaliado medindo LDH, simulando o processo usando coeficientes de atrito aproximados e convergindo resultados para coeficientes de atrito de melhor valor.

Os lubrificantes foram classificados baseando-se no fato de que o melhor lubrificante resulta a máxima redução de espessura o mais próximo do topo da capa esférica do corpo de prova.

Também se usa avaliar condições de atrito e lubrificantes por meio do ensaio de expansão em pêra, que é muito sensível a esses parâmetros. Esse teste avalia os lubrificantes na região de expansão e de calibração do processo em estudo (NGAILE, JAEGER, ALTAN, 2004).

A topografia da matriz e da peça também é muito importante. No início da conformação há picos e vales das superfícies em contato (HU, DEAN, 2000). Assim, as condições de atrito variam muito com a localização na interface peça-ferramenta e também durante o processo (KOÇ, 2003).

Além disso, a variação da rugosidade surte grande efeito no comportamento de peças que irão sofrer intensos trabalhos a frio (HU, DEAN, 2000). O lubrificante ainda separa as superfícies em contato, e conforme a pressão aumenta a peça é deformada e as asperezas tendem a sumir, amenizando o coeficiente de atrito (RASP, WICHERN, 2002) (KOÇ, 2003).

Embora seja mais ameno o coeficiente, o atrito aumenta devido ao aumento da pressão de contato. A pressão na superfície, a velocidade de escorregamento e o estado de tensões e deformações diferem em cada região do processo (RASP, WICHERN, 2002).

Existem alguns modos de modelar a influência do atrito neste processo, de acordo com Koç (KOÇ, 2003), Chenot (CHENOT, FOURMENT, MOCELLIN, 2002), Vollertsen (VOLLERTSEN, PLANCAK, 2002), Wagoner (LEE, KEUM, WAGONER, 2003), entre outros.

Na realidade as condições de atrito variam de acordo com a localização na interface peça-ferramenta e com o tempo durante o processo, como visto anteriormente. Mesmo assim, modelos com atrito constante como os de Coulomb tem sido frequentemente usados na modelagem do atrito nos processos de conformação (LAZZAROTTO et. al., 1998) (KOÇ, 2003).

A maioria dos modelos envolve a lei de atrito de Coulomb, na qual se diz que a tensão tangencial ou de atrito τ é proporcional à tensão normal na interface σ_n , onde a constante de proporcionalidade é o coeficiente de atrito μ (KOÇ, 2003), ou seja:

$$\tau = \mu \sigma_n \quad (\text{eq. 44})$$

O modelo de Chenot (CHENOT, FOURMENT, MOCELLIN, 2002) procura formular as condições de contato entre as superfícies para otimizar o uso do MEF. O autor deduziu uma formulação integral aplicando as equações constitutivas para materiais viscoplásticos e elasto-viscoplásticos.

As condições de contorno podem ser expressas numericamente de diversas maneiras, dentre elas:

- Elementos de contato para computação estrutural (deslocamentos pequenos).
- Modo geométrico nodal, considerada uma primeira aproximação.
- Formulação de funções de penalidades que leva a uma aproximação sistemática, mas podem resultar sistemas ruins.
- Método de Lagrange.
- Formulação discreta em *master-slave* para contatos entre materiais diferentes em problemas 3D.

O algoritmo de resolução no sistema de integração dessas formulações no tempo pode ser o método de Newton–Raphson, entre outras técnicas especiais (CHENOT, FOURMENT, MOCELLIN, 2002).

Sua formulação mecânica é fundamentada nas equações constitutivas da lei de Norton-Hoff.

$$\sigma' = 2K \left(\sqrt{3} \dot{\varepsilon} \right)^{m-1} \dot{\varepsilon} \quad (\text{eq. 45})$$

onde σ' é o tensor desviador de tensões, $\dot{\varepsilon}$ o tensor da taxa das deformações efetivas, K a consistência do material, que é função do encruamento, e m é o índice de sensibilidade à taxa de deformações (CHENOT, FOURMENT, MOCELLIN, 2002).

O autor ainda considera condições de incompressibilidade, ou seja:

$$\text{div}(\mathbf{v}) = 0 \quad (\text{eq. 46})$$

Com a intenção de determinar o coeficiente de atrito, Wagoner (LEE, KEUM, WAGONER, 2003) adotou um método experimental em conjunto com um modelo matemático de atrito usando o método dos mínimos quadrados, baseando-se em dois fatores: a viscosidade do lubrificante e a rugosidade da peça, para uma mesma matriz.

A influência da viscosidade é dada por:

$$\mu = \frac{23.2}{104.5 + \nu^{0.98}} \quad (\text{eq. 47})$$

onde ν representa a viscosidade do lubrificante (LEE, KEUM, WAGONER, 2003).

A influência relativa à rugosidade é:

$$\mu = 0.24\lambda^2 - 0.346\lambda + 0.252 \quad (\text{eq. 48})$$

onde λ é a rugosidade da superfície (LEE, KEUM, WAGONER, 2003).

Para considerar os outros dois fatores usa-se a expressão:

$$\mu = \frac{23.2}{104.5 + \nu^{0.98}} - 5.3 \cdot 10^{-6}(\nu - 56.6)^2 + 0.24(\lambda - 0.76)^2 - 0.112 \quad (\text{eq. 49})$$

Wagoner verificou a validade do seu modelo comparando resultados de simulações realizadas pelo MEF com o seu procedimento experimental. O procedimento foi um ensaio para medição do atrito, cujo esquema é exibido na figura 22, usando sete lubrificantes diferentes, repetidos por três vezes. O coeficiente de atrito μ médio é calculado pela a fórmula (LEE, KEUM, WAGONER, 2003):

$$\mu_{méd} = \frac{\sum_{n=1}^k \mu_n}{K} = \frac{\sum_{n=1}^k \left(\frac{F_n}{2} \times N \right)}{K} \quad (\text{eq. 50})$$

onde N é a força de embutimento, F_n a normal e K o número de medições de N (LEE, KEUM, WAGONER, 2003).

Figura 22: Esquema para realização do ensaio que visa medir atrito (adaptada de LEE, KEUM, WAGONER, 2003).

Para efeitos de comparação apenas, ele ainda usou o modelo de Coulomb nas simulações via MEF. Nos resultados de Wagoner nota-se que seu modelo é mais preciso do que o modelo tradicional baseado na lei de Coulomb, como é observado na figura 23.

Figura 23: Resultados de Wagoner: experimentais (experimental) e numéricos (modelo atual) comparados com o modelo tradicional. O código SPCC significa aço carbono laminado a frio (adaptada de LEE, KEUM, WAGONER, 2003).

Além destes métodos citados, existem vários ensaios para determinar o coeficiente de atrito nos vários estágios da conformação (LE, SUTCLIFFE, 2002).

Para simular o atrito na zona guiada, existe o ensaio de empurramento, cujo esquema pode ser observado na figura 24.

Figura 24: Esquema do ensaio de empurramento (Push through test) (adaptada de VOLLERTSEN, PLANCAK, 2002).

Por esse ensaio podem-se avaliar ainda lubrificantes e recobrimentos. Só não é possível medir exatamente a pressão de contato na interface, mas esta pode ser mais bem determinada via MEF. Neste ensaio pressuriza-se o tubo vedado, e ele é empurrado através de uma matriz na qual um transdutor de força (piezoelétrico, por exemplo) mede a força naquela região, que é considerada a de atrito. Vollertsen (VOLLERTSEN, PLANCAK, 2002) fez este ensaio no equipamento esquematizado na figura 25 e admitiu o modelo de Coulomb para calcular o atrito medido através das forças neste ensaio.

Figura 25: Esquemas de ensaios que visam a medição do coeficiente de atrito na zona guiada (adaptada de VOLLERTSEN, PLANCAK, 2002).

Nos esquemas da figura 25 o esquema da esquerda mede a diferença de forças no punção. O intermediário mede a força na matriz diretamente, o que reduz um pouco a probabilidade de erro. No direito mede-se a força de contato através de células de carga localizadas na extremidade direita da matriz (VOLLERTSEN, PLANCAK, 2002).

Ainda existe o ensaio de compressão de anéis para esta região, de contato intenso peça-ferramenta.

O ensaio consiste em medir o diâmetro externo e o interno de um anel metálico (do material que se deseja analisar) e comprimi-lo entre duas placas. Se o atrito é alto, o anel apresenta fluxo de material na direção do diâmetro interno; se for baixo, na direção do externo.

Este ensaio permite levantar curvas de calibração do atrito fazendo relações entre a redução da altura do anel com a variação do seu diâmetro interno (SOFOGLU, GEDIKLI, 2002).

Para simular o atrito na região de transição, Sofoglu apresenta o ODBET, chamado de ensaio de retroextrusão, no qual se comprime um corpo de prova cilíndrico através de uma matriz contendo o furo na parte superior, por onde o material é extrudado.

O esquema deste ensaio é observado na figura 26. A relação entre a altura do extrudado e a altura final do corpo de prova, ou o aumento do diâmetro, também permite a composição das curvas de calibração de atrito (SOFOGLU, GEDIKLI, 2002).

Figura 26: Esquema do ensaio de matriz aberta em retroextrusão (SOFOGLU, GEDIKLI, 2002).

Para simular atrito na região de conformação e calibração, Ngaile (NGAILE, JAEGER, ALTAN, 2004) indica o ensaio em forma de pêra, que é muito sensível ao atrito. Ele está esquematizado na figura 27.

Figura 27: Esquema do ensaio de expansão em pêra (adaptada de NGAILE, JAEGER, ALTAN, 2004).

Além deste existem os esquematizados na figura 28.

Figura 28: Esquemas dos ensaios para medição de atrito (adaptada de VOLLERTSEN, PLANCAK, 2002).

No ensaio quadrado, o atrito define o raio final e a espessura de parede do corpo de prova. Estes parâmetros são medidos e correlacionados no MEF. A vantagem deste ensaio é que ele não cria dependência do processo. A desvantagem é que a pressão de contato aumenta durante o teste (VOLLERTSEN, PLANCAK, 2002).

O ensaio da junta em T, segundo Vollertsen, VOLLERTSEN, PLANCAK, 2002, pode usar células de carga que medem diretamente a força de atrito nesta conformação, mas este método traz problemas relacionados à elasticidade da célula e só é possível realizar medidas depois que o raio é conformado, assim deve haver uma altura mínima da protrusão. Com isso a variação dos parâmetros pressão interna e força axial fica limitada (STEINHOFF, RASP, PAWELSKI, 1996) (VOLLERTSEN, PLANCAK, 2002).

Por último tem-se o ensaio de compressão de tubos. Nele o tubo é comprimido em uma matriz fechada. Existe uma expansão do tubo feita pela pressão interna, mas a espessura da parede aumenta de modo não homogêneo, e seu formato final é uma função do coeficiente de atrito, do coeficiente de resistência K e do expoente de encruamento n de Hollomon, da seguinte maneira (VOLLERTSEN, PLANCAK, 2002):

- A) $\mu=0$, $n=0$: ocorre espessamento homogêneo em todo o tubo, e a espessura da parede final é função apenas da relação de compressão.
- B) $\mu=0$, $n>0$: idem ao caso A.
- C) $\mu>0$, $n=0$: a espessura da parede aumenta linearmente de uma extremidade a outra, onde o lado mais espesso ocorre na extremidade do tubo que está em contato com o cilindro de maior velocidade.
- D) $\mu>0$, $n>0$: a espessura da parede aqui se torna semelhante ao caso C, mas a diferença entre as espessuras ao longo do tubo são menores conforme o expoente de encruamento aumenta.

O princípio deste teste é similar ao de compressão de anéis e ao de retroextrusão, mas neste o coeficiente de atrito é determinado de acordo com a geometria final do corpo de prova usando diagramas originados no MEF (STEINHOFF, RASP, PAWELSKI, 1996) (SOFOGLU, GEDIKLI, 2002).

3.5 Bibliografia do capítulo 3

- ASNAFI, 1999: ASNAFI, N. *Analytical modeling of tube hydroforming*, Thin Walled Structures, V. 34, p. 295-330, 1999.
- ASNAFI & SKOGSGARDH, 2000: ASNAFI, N., SKOGSGARDH, A., *Theoretical and experimental analysis of Stroke-controlled tube hydroforming*, Materials Science and Engineering, A279, p. 95-110, 2000.
- ALINGER, VAN TYNE, 2001: ALINGER, M. J., VAN TYNE, C. J., *Evolution of the tribological characteristics of several forming die materials*, Journal of Materials Processing Technology, V. 111, p. 20-24, 2001.
- ALTAN & PALANISWAMI, 2005: ALTAN, T., PALANISWAMY, H., AUE-U-LAN, Y., *Tube and Sheet hydroforming – Advances in material modeling tooling and process simulation*. In: SHEMET 2005 University of Erlangen, Nuremberg, 2005.
- BARLAT et al., 2003: BARLAT, F., BREM, J. C., YOON, J. W., CHUNG, K., DICK, R. E., LEGE, D. J., POURBOGHRAH, F., CHOI, S. H., CHU, E., *Plane stress yield function for aluminum alloy sheets – part I: Theory*, International Journal of Plasticity, V. 19, p. 1297-1319, 2003.
- BATALHA & ABRANTES, 2003: BATALHA, G. F., ABRANTES, J. P., *Simulação numérica via elementos finitos da conformação de chapas metálicas por pressão hidráulica (bulge test)*, Proc. II COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, ABCM – UFU, Uberlândia – MG, 18 a 21 de maio de 2003.
- BORTOLUSSI, 2001: BORTOLUSSI, R. *Análise numérica e experimental da hidroconformação de produtos tubulares*. 2001. 122 p. Tese (Doutorado) – FEM-UNICAMP - São Paulo, 2001.
- BORTOLUSSI & BUTTON, 2002: BORTOLUSSI, R., BUTTON, S. T., *Prediction of forming limits of tube hydroforming process – simulation and experiments*. In: The fifth International conference and works on numerical simulation of 3D sheet forming process 2002, Jeju, 2002.
- BRUNET, MORESTIN, 2001: BRUNET, M., MORESTIN, F., *Experimental and analytical necking studies of anisotropic sheet metals*, Journal of Materials Processing Technology, V. 112, p. 214-226, 2001.

- CHENOT, FOURMENT, MOCELLIN, 2002: CHENOT, J. L., FOURMENT, L., MOCELLIN, K., *Numerical treatment of contact and friction in FE simulation of forming process*, Journal of Materials Processing Technology, V. 125-126, p. 45-52, 2002.
- DOHMANN & HARTL, 1996: DOHMANN, F., HARTL, Ch., *Hydroforming – a method to manufactures light-weight parts*, Journal of Materials Processing Technology, V. 60, p. 669-676, 1996.
- EICKMEIER et al., 1996: EICKMEIER, J., VOGEL, H. R., REICHERT, J., REHM, M., *Some tribological and environmental aspects in metal drawing*, Tribology International, V. 29, p. 93-197, 1996.
- GAO et al., 2002: GAO, L., MOTSCH, S., STRANO, M., *Classification and analysis of tube hydroforming processes with respect to adaptive FEM simulations*, Journal of Materials Processing Technology, V. 129, p. 261-267, 2002.
- HADDAD, VACHER, ARRIEUX, 1999: HADDAD, A., VACHER, P., ARRIEUX, R., *Numerical determination of forming limit diagrams of orthotropic sheets using the '3G' theory of plasticity*, Journal of Materials Processing Technology, V. 92-93, p. 419-423, 1999.
- HOSFORD, 1993: GRAF, A., HOSFORD, W.F., *Calculations of forming limit diagrams for changing strain paths*. Metallurgical Transactions. A 24, p. 2497.
- HU & DEAN, 2000: HU, Z. M., DEAN, T. A., *A study of surface topography, friction and lubricants in metal forming*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, V. 40, p. 1637-1649, 2000.
- HYUN & CHO, 1994: HYUN, B. S., CHO, H. S., *Prediction of forming pressure curve for hydroforming processes using artificial neural network*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I, Journal of system and control Engineering, V. 208 (2), p. 109-121, 1994.
- KIM & PARK, 2002: KIM, Y. H., PARK, J. J., *Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal*, Journal of Materials Processing Technology, V. 130-131, p. 42-46, 2002.
- KNOCKAERT et al., 2002: KNOCKAERT, R., CHASTEL, Y., MASSONI, E., *Forming limits prediction using rate-independent polycrystalline plasticity*, International Journal of Plasticity, V. 18, p. 231-247, 2002.

- KOÇ, 2003: KOÇ, M., *Tribological issues in the tube hydroforming process - Selection of a lubricant for robust process conditions for an automotive structural frame part*, Transactions of the ASME, V. 125, p. 484-492, 2003.
- KOÇ & ALTAN, 2001: KOÇ, M., ALTAN, T., *An overall review of the tube hydroforming (THF) Technology*, Journal of Materials Processing Technology, V. 108, p. 384-393, 2001.
- LAZZAROTTO et al., 1998: LAZZAROTTO, L., DUBAR, L., DUBOIS, A., RAVASSARD, P., BRICOUT, J. P., OUDIN, J., *A selection methodology for lubricating oils in cold metal forming processes*, Wear, V. 215, p. 1-9, 1998.
- LE, SUTCLIFE, 2002: LE, H. R., SUTCLIFFE, M. P. F., *Measurements of friction in strip drawing under thin film lubrication*, Tribology International, V. 35, p. 123-128, 2002.
- LEE, KEUM, WAGONER, 2003: LEE, B. H., KEUM, Y. T., WAGONER, R. H., *Modeling of friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming*, Journal of Materials Processing Technology, V. 130-131, p. 60-63, 2003.
- LEI et al., 2003: LEI, L. P., KIM, J., KANG, S. J., KANG, B. S., *Rigid-plastic finite element analysis of hydroforming process and its applications*, Journal of Materials Processing Technology, V. 139, p. 187-194, 2003.
- LEI, KANG, KANG, 2001: LEI, L. P., KANG, S. J., KANG, B. S., *Prediction of forming limit in hydroforming processes using the finite element method and a ductile fracture criterion*, Journal of Materials Processing Technology, V. 113, p. 673-679, 2001.
- MONTMITONNET & CHENOT, 1995: MONTMITONNET, P., CHENOT, J. L., *Introduction of anisotropy in viscoelastic 2D and 3D finite-element simulations of hot forging*, Journal of Materials Processing Technology, V. 53, p. 662-683, 1995.
- NGAILE, JAEGER, ALTAN, 2004: NGAILE, G., JAEGER, S., ALTAN, T., *Lubrication in tube hydroforming (THF). Part I: Lubrication mechanisms and development of model tests to evaluate lubricants and die coatings in the transition and expansion zones*, Journal of Materials Processing Technology, V. 146, p. 108-115, 2004.
- NGAILE, JAEGER, ALTAN, 2004: NGAILE, G., JAEGER, S., ALTAN, T., *Lubrication in tube hydroforming (THF). Part II: Performance evaluation of lubricants using LDH test and pear-shaped tube expansion test*, Journal of Materials Processing Technology, V. 146, p. 116-123, 2004.

- OYANE et al., 1980: OYANE, M., SATO, T., OKIMOTO, K., SHIMA, S., *Criteria for ductile fracture and their applications*, Journal of Mechanical Working Technology, V. 4, p. 65-81, 1980.
- PARK & CHO, 1995: PARK, H. J., CHO, H. S., *CMAC-based learning controller for pressure tracking control of forming processes*, ASME Journal of Engineering for Industry, V. 117, p. 197-303, 1995.
- RAMA et al., 2003: RAMA, S. C., MA, K., SMITH, L. M., ZHANG, J. M., *A two-dimensional approach for simulation of hydroforming expansion of tubular cross-sections without axial feed*, Journal of Materials Processing Technology, V. 141, p. 420-430, 2003.
- RAO, WEI, 2001: RAO, K. P., WEI, J. J., *Performance of a new dry lubricant in the forming of aluminum alloy sheets*, Wear, V. 249, p. 86-93, 2001.
- RASP, WICHERN, 2002: RASP, W., WICHERN, C. M., *Effects of surface-topography directionality and lubrication condition on friction behavior during plastic deformation*, Journal of Materials Processing Technology, V. 125-126, p. 379-386, 2002.
- RIMKUS et al., 2000: RIMKUS, W., BAUER, H., MIHSEIN, M. J. A., *Design of load curves for hydroforming applications*, Journal of Materials Processing Technology, V. 108, p. 97-105, 2000.
- SAVOIE, J. et al., 1998: SAVOIE, J., JAIN, M., CARR, A. R., WU, P.D., NEALE, K.W., ZHOU, Y., JONAS, J. J., *Predictions of forming limit diagrams using crystal plasticity models*, Materials Science and Engineering A257, p. 128-133, 1998.
- SCHMOECKEL et al., 1999: SCHMOECKEL, D., HIELSCHER, C., HUBER, R., GEIGER, M., *Metal forming of tubes and sheets with liquid and other flexible media*, In: Annals of the CIRP, V. 48, p. 497-513, 1999.
- SMITH et al., 2003: SMITH, L. M., AVERILL, R. C., LUCAS, J. P., STOUGHTON, T. B., MATIN, P. H., *Influence of transverse normal stress on sheet metal formability*, International Journal of Plasticity, V. 19, p. 1567-1583, 2003.
- SOFOGLU, GEDIKLI, 2002: SOFOGLU, H., GEDIKLI, H., *Determination of friction coefficient encountered in large deformation processes*, Tribology International, V. 35, p. 27-34, 2002.
- STEINHOFF, RASP, PAWELSKI, 1996: STEINHOFF, K., RASP, W., PAWELSKI, O., *Development of deterministic-stochastic surface to improve the tribological conditions of sheet forming processes*, Journal of Materials Processing Technology, V. 60, p. 355-361, 1996.

- STOUGHTON, 2002: STOUGHTON, T. B., *A non-associated flow rule for sheet metal forming*, International Journal of Plasticity, V. 18, p. 687-714, 2002.
- VOLLERTSEN & PLANCAK, 2001: VOLLERTSEN, F., PLANCAK, M., *On possibilities for determination of the coefficient of friction in hydroforming of tubes*, Journal of Materials Processing Technology, V. 125-126, p. 412-420, 2002.
- WU, 2002: WU, H. C., *Anisotropic plasticity for sheet metals using the concept of combined isotropic-kinematic hardening*, International Journal of Plasticity, V. 18, p. 1661-1682, 2002.
- WU & YU, 1996: WU, L., YU, Y., *Computer simulations of forming automotive structural parts by hydroforming processes*, In: Proceedings of the International Conference NUMISHEET'96, Dearborn, MI, p. 324-329, 1996.
- YAO & CAO, 2002: YAO, H., CAO, J., *Prediction of forming limit curves using an anisotropic yield function with pre-strain induced backstress*, International Journal of Plasticity, V. 18, p. 1013-1038, 2002.

4. O CONTROLE DO PROCESSO DE HIDROCONFORMAÇÃO DE TUBOS

Este capítulo contém uma breve revisão sobre controle de processos em geral, revisando os tipos de sinais elétricos, como os analógicos e os digitais. Em seguida discute-se especificamente o controle na hidroconformação e os modos de controle encontrados até hoje. A idéia de tornar funções antes realizadas manualmente em autônomas vem da necessidade de minimizar os esforços humanos, e de tornar processos mais precisos, mais eficazes. A automatização possibilita que tarefas árduas, repetitivas ou de alta periculosidade sejam efetuadas por máquinas que, através de programação compatível, possibilitem a interação do homem.

Desde a década de 70, pelo desenvolvimento dos microprocessadores em larga escala, cada vez mais instrumentos digitais vêm substituindo a instrumentação analógica. Isto possibilita que computadores interpretem sinais, que o operador tenha todas as informações de diversos instrumentos em uma única tela de programa e também que haja interação da programação envolvida no processo, seja através de alarmes sonoros, luminosos ou até diretamente em válvulas analógicas ou atuadores digitais ligados ao computador (SILVEIRA & SANTOS, 1999).

O aumento da produção de uma indústria depende da flexibilidade com que ela está adequada às necessidades do mercado. Os computadores vêm ocupando espaço na automatização de processos justamente porque permite flexibilidade na alteração de processos automatizados e conectividade a bancos de dados que gerenciam índices de produção. A disponibilidade de computadores mais baratos possibilita o aumento do uso deste tipo de equipamento na indústria. A padronização de programas e de linguagens de programação desenvolvidas para computadores viabiliza o aumento da disponibilidade de mão-de-obra especializada e vem a contribuir para que as indústrias utilizem cada vez mais computadores como poderosas

ferramentas de controle. Os programas padronizados, também chamados de sistema de supervisão e controle, trabalham com processamento de imagens, controle de estoque, controle de variáveis industriais, já que ele tem a possibilidade de coletar dados de um determinado processo analógico ou digital, processamento de textos, bancos de dados, planilhas de dados, simulação de eventos, supervisão de processos e cálculos matemáticos e estatísticos (SILVEIRA & SANTOS, 1999).

O termo automatização se difundiu com a construção das primeiras máquinas automáticas e se consolidou com a revolução industrial, e está fortemente ligado à sugestão de movimentos repetitivos e mecânicos. Por reproduzir ações mecânicas, a automatização também é sinônimo de mecanização. Caso a mecanização implique somente uma ação cega, sem correção, tem-se um sistema no qual a variável de entrada independe da saída, ou seja, não existe uma relação entre o valor desejado na saída de um processo e o valor real monitorado. Este tipo de controle é conhecido por malha aberta. Neste caso, geralmente o sistema terá sempre o mesmo comportamento esperado, pois na maioria das vezes ele é determinado por leis físicas associadas ao *hardware* utilizado. O hardware pode ter natureza mecânica, elétrica, térmica, hidráulica, eletrônica ou outra. Processos de deslocamento de embalagens em uma esteira transportadora é um exemplo de hardware que pode ser automatizado, ou seja, independentemente de quantas embalagens, tamanho ou posição em que a embalagem se encontra, se a opção desvio for selecionada, por exemplo, ela será deslocada da esteira principal independentemente de qualquer uma das características já citadas (SILVEIRA & SANTOS, 1999).

A automação é um conceito e um conjunto de técnicas com as quais se constroem sistemas ativos. Estes sistemas são capazes de atuar em um processo industrial com eficiência usando informações recebidas do sistema sobre o qual atuam. Com base nas informações recebidas, o sistema calcula a ação corretiva mais apropriada para a execução da ação e esta é uma

característica de sistemas em malha fechada, conhecidos como sistemas com realimentação. Ou seja, o sistema mantém uma relação expressa entre o valor desejado na saída de um processo em relação ao valor da variável de entrada, corrigindo eventuais valores na entrada quando os da saída estiverem fora dos valores desejados. Para isso, são utilizados controladores que, através da execução de algoritmos que comparam o valor atual da variável com o valor desejado, efetuam as correções devidas. O valor desejado também é conhecido como *setpoint* (SILVEIRA & SANTOS, 1999).

4.1 Tipos de sinais elétricos

4.1.1 Sinais analógicos

Um sinal é dito analógico quando pode assumir infinitos valores dentro de um intervalo qualquer (amplitude). Com isto, qualquer instrumento que indique as variáveis usando ponteiros ou formas de onda grafadas em tubos de imagens ou em papel são exemplos de dispositivos analógicos, como, por exemplo, velocímetro de automóvel, sismógrafos, relógios de ponteiro, e outros (SILVEIRA & SANTOS, 1999).

4.1.2 Sinais digitais

Um sinal digital é aquele que assume uma quantidade finita de valores. Com isto, qualquer instrumento que indique as variáveis através de números ou dígitos são exemplos de dispositivos digitais, tais como relógios com saída tipo *display*, chaves *on-off* biestáveis e sensores de presença (SILVEIRA & SANTOS, 1999).

4.2 O controle na hidroconformação

Para realizar o projeto de sistemas de controle é necessário o conhecimento do sistema a controlar (OGATA, 2003). Porém, para automatizar um processo que usa um equipamento ou uma ferramenta, é necessário, além do conhecimento do processo, dividi-lo em etapas, colher informações e colocá-las em um dispositivo capaz de interagir com o equipamento conforme necessário. Assim, uma das tarefas naturais é a modelagem do sistema. Existem dois tipos básicos de modelagem: a fenomenológica (OGATA, 2003) e a empírica (MATHWORKS, 1992 a). A abordagem a ser utilizada neste projeto é a fenomenológica. Contudo, ela não está livre da fase de identificação de parâmetros. Será sempre necessário ajustar os coeficientes da modelagem com os dados experimentais e prioridades de interação do processo para que haja a garantia da qualidade e eficiência do ajuste dos parâmetros. Programas de simulação como o Matlab (MATHWORKS, 1992 b) e outros podem ser usados para esta tarefa. Estima-se que as equações a serem obtidas na modelagem não sejam lineares e, portanto, não são adequadas ao projeto de controladores lineares. Desta forma, é necessário tornar o modelo linear. Isto pode ser feito através de aproximações em torno de um ponto de trabalho, usando-se a aproximação por série de Taylor ou teoria do lugar das raízes (OGATA, 2003).

Por ser um processo de alta precisão, e baseado em fenômenos complexos como a plasticidade dos materiais, a hidroconformação exige um controle capaz de interagir a variações bruscas de pressão e deslocamentos de forma a garantir a integridade dos corpos de prova e a integridade do mecanismo de hidroconformação. Para tal, a velocidade de aquisição, manipulação e saída dos dados deve atender às solicitações do processo.

Também não é possível desenvolver algoritmos de regulação e de controle do processo generalizados. A maioria dos algoritmos de controle utilizados nos processos industriais são

encontrados através do método de tentativa e erro. Eles são aplicáveis apenas aos sistemas envolvidos e, em particular, sob as condições tribológicas locais fornecidas.

Para garantir a segurança do processo, ele precisa estar longe o suficiente de suas limitações ou o controle da máquina necessita ser capaz de responder às mudanças das condições tribológicas que ocorrem durante seu andamento (SCHMOECKEL et al., 1999).

A possibilidade disso acontecer ocorre, dentre outras maneiras, com o uso de um sistema de controle sequencial, baseado na lógica fuzzy. Isso traz a vantagem de poder produzir diversas peças, com pré-produtos e condições tribológicas diferentes, usando o mesmo algoritmo de controle.

O comportamento do controle fuzzy fica muito visível a partir de diagramas de processo. Não há nele progressões lineares como na maioria dos casos em que se usa controle convencional. Como o fuzzy adapta as características e os parâmetros de entrada individualmente ao componente que está sendo conformado, a progressão resultante pode ter formatos variados, como, por exemplo, o ilustrado na figura 29 (SCHMOECKEL et al., 1999).

Figura 29: Diagrama de carregamento possível ao trabalhar com a lógica fuzzy.

O uso da lógica fuzzy tem mostrado que a definição do algoritmo de controle com ela envolve menos esforço. E com ela é possível conformar peças cujo blank apresenta espessuras de parede variando de 4 a 6,5 mm sem modificar a configuração do controle (SCHMOECKEL et al., 1999).

Além disso, as condições tribológicas do processo são diferentes a cada instante, e a lógica fuzzy permite que o processo aconteça adaptando-se automaticamente a elas sem a necessidade de interferir em sua configuração (SCHMOECKEL et al., 1999).

A história do sistema fuzzy começa no primeiro artigo de Zadeh¹, embora o nome fuzzy ainda não existia. O artigo de Goguen de 1968-1969² fala em lógica de conceitos inexatos, e o termo lógica fuzzy surge aí. O trabalho de Goguen é bem geral e introduz álgebras que são conhecidas por *clog*. Como exemplo, ele apresenta o intervalo real unitário $[0,1]$ com seus produtos e resíduos (HAJEK, 2006).

Embora suas investigações avançaram muito nestes últimos anos, não existe ainda limites formais dessa classe de lógicas (BEHOUEK CINTULA, 2006).

Estes autores (BEHOUEK CINTULA, 2006) também delimitam, com foco em aspectos informais do problema, a classe de lógica fuzzy.

A noção de um sistema lógico é tão abrangente e flexível que é muito difícil ser capturado por uma definição formal. Ainda não foram obtidos todos os tipos possíveis de formalismo nos quais a lógica fuzzy possa ser enquadrada. Há apenas uma delimitação de classes de lógicas fuzzy, dentro das quais algumas são classes básicas e bem definidas, que são grandes o suficiente para conter muitos outros sistemas de lógica (BEHOUEK CINTULA, 2006).

Existem sistemas de lógica fuzzy de primeira ordem (BEHOUEK CINTULA, 2006).

A diferença básica entre a LF e as outras está no nível proposicional, na interpretação das conectividades proposicionais. Lógica proposicional significa uma lógica com estilo clássico

¹de linguagem dado por uma relação conseqüente entre premissas e conclusões, fechadas sob substituições arbitrárias (BEHOUEK CINTULA, 2006).

Zadeh (ZADEH, 1974) escreve sobre lógica fuzzy desde 1974, quando usava conexões da lógica de Łukasiewicz. Para Zadeh, lógica fuzzy usa algumas lógicas de múltiplos valores, mas ele trabalha com valores de fuzzy verdadeiros e suas variáveis lingüísticas. Ele entende lógica fuzzy como funcional verdadeira, i.e. tem algumas funções verdadeiras para conexões que determinam o valor real de uma formula componente construída usando exclusivamente uma conexão do valor verdadeiro da formula com aquele que o conectivo é aplicado (ZADEH, 1974).

Desde que Zadeh¹ propôs o conceito de conjunto fuzzy, tem sido relatados e publicados, durante 40 anos, grande número de artigos e trabalhos baseados neste conceito de diversas áreas de pesquisa, como engenharia e tecnologia, matemática, gestão, ciências sociais e computacionais, entre outros. A aprovação, oposição e o acompanhamento deles ocorrem como com todas as novidades, logo de início. As teorias e aproximações baseadas na lógica fuzzy são tratadas com um jogo sem virtudes em todos os tempos, ou como a solução para tudo de tempos em tempos. Em 1994⁶, foram esclarecidos alguns desentendimentos entre os pesquisadores da lógica fuzzy, e o seu desenvolvimento e a sua aplicação foram melhorados (MA, CHEN, XU, 2006).

Normas triangulares (*t-norms*) entram neste cenário a partir da década de 80, e Dubois e Prade³ as definiram como um bom modelo de intersecção teórica fuzzy, ou equivalente de uma função de conjunto em lógicas de múltiplos valores. Desde então as *t-norms* se tornaram a ferramenta padrão dos conjuntos fuzzy (HAJEK, 2006).

1. Para aprofundar este assunto veja: L. Zadeh, Fuzzy sets. Inform. And Control 8 (1965) 338-353.

2. Para se aprofundar neste assunto, veja: J. A. Goguen, The logic of inexact concepts, Synthese 19 (1968-1969) 325-373.

Aparentemente, sistemas baseados em *t-norms* são de grande importância. Num senso geral, aberto a diversas alternativas, o autor oferece uma noção de lógica matemática fuzzy baseada em *t-norms* com suas duas semânticas, a padrão (com álgebras de função de verdadeiro e falso, dadas por *t-norms*) e geral (que trabalha com variações das álgebras padrão) (HAJEK, 2006).

A Lógica fuzzy de senso apurado e a de senso grosseiro, segundo Hájek, se diferenciam da seguinte maneira: a primeira desenvolve sistemas dedutivos de fuzzy como uma lógica de múltiplos valores, com noção comparativa de verdadeiro ou falso em seu estilo de lógica matemática clássica; a segunda é uma disciplina que usa a noção de lógica fuzzy conectiva e outras noções de teoria de conjuntos fuzzy que desenvolvam métodos de raciocínio aproximado (HAJEK, 2006).

Por isso parece razoável denominar a Lógica fuzzy de senso apurado de lógica matemática fuzzy.

O trabalho básico sobre isso é de Hajek ⁴, em 1998; Gottwald⁵ escreveu um tratado sobre lógica de múltiplos valores que contém uma parte dedicada à lógica matemática fuzzy (HAJEK, 2006). Hájek (HAJEK, 2006) define a lógica fuzzy com uma das ramificações ² da lógica matemática.

Após o famoso livro de Hájek⁴ ficou claro que existem vários sistemas formais de lógica fuzzy bem estabelecidos que podem ser a verdadeira lógica fuzzy. Entre estes vários sistemas possíveis destacam-se aqueles que são capazes de preencher todos os requisitos do plano de trabalho dos conjuntos fuzzy.

3. Veja: D. Dubois, H. Prade, A theorem on implication functions defined from t-norms, *Stochastics VIII* (1984) 267-279.

4. P. Hajek, *Mathematics on fuzzy logic*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 1998.

5. S. Gottwald, *A treatise on many-valued logic*, Research Studies Press, 2000.

A história da Lógica fuzzy está no trabalho de Hájek, de uma forma reduzida, e sobre ela, Novák (NOVAK, 2006) faz a seguinte caracterização informal: “Lógica fuzzy é uma lógica especial, de múltiplos valores que endereça o fenômeno da vagueza e desenvolve ferramentas para sua modelagem via graus de verdade tomados em uma escala ordenada.” Espera-se preservar as propriedades da lógica clássica o máximo possível (NOVAK, 2006).

Esta caracterização enfatiza as razões da LF e pré-determina o caminho que um sistema adequado à lógica de múltiplos valores pode ser desenvolvido inicialmente.

Os conceitos dominantes são graus de verdade e vagueza. Vagueza também pode ser definida com lógica de conceitos inexatos. Sobre vagueza, Novak (NOVAK, 2006) ressalta a seguinte opinião:

O fenômeno da vagueza surge da tentativa de agrupar objetos que tenham certa propriedade φ . O resultado é um agrupamento de objetos, semelhante a um conjunto como $X = \{o / o \text{ tem a propriedade } \varphi\}$ (NOVAK, 2006).

Este conjunto X não poderá ser definido como um conjunto, se a propriedade φ for vaga. Pode se tornar impossível caracterizar precisamente e sem ambigüidade o agrupamento X se não forem claramente distinguíveis os elementos que certamente possuem a propriedade φ dos que certamente não a possuem. Também podem existir os elementos de borda, para os quais não é claro quando eles possuem a propriedades φ ou não. Consequentemente, torna-se obscura a conclusão de quando este elemento pertence a X ou não (NOVAK, 2006).

Ma, Chen e Xu (MA, CHEN, XU, 2006) apresentam uma opinião sobre a lógica fuzzy sob o ponto de vista da inteligência artificial, baseada nas suas práticas e pesquisas.

Lógica é o estudo das leis que governam a mente. Em geral, um sistema lógico consiste de sintaxe e semântica, ou seja, um sistema formal para a descrição de estados de afazeres, e uma teoria de teste para deduzir a interligação de um conjunto de sentenças (MA, CHEN, XU, 2006).

As lógicas clássicas, a fuzzy e as não clássicas são ferramentas eficientes criadas pelas pessoas para modelar instruções de todos os tipos de coisas, e as interações entre objetos no mundo real. A lógica fuzzy admite a existência de estados intermediários e assume que cada afirmação tem um grau de verdade que varia de 0 a 1 (zero para falso, 1 para verdadeiro) (MA, CHEN, XU, 2006).

As informações incertas são associadas muitas vezes a dois tipos de incertezas: uma que está no objeto procurado em si, outra que está na clareza da informação procurada. A última resulta da primeira, e é mais complexa do que ela. Para manipular a incerteza na clareza da informação, ela é dividida em vários níveis. Assim ela pode ser processada dentro de uma ou várias fases, de acordo com a demanda (MA, CHEN, XU, 2006).

Lógica fuzzy admite estágios intermediários de uma tarefa e adota um mecanismo relativamente flexível de *soft matching*, (suave semelhança) de inferência que é conveniente na análise e na aplicação da incerteza de uma maneira natural. As lógicas, clássica, não clássica e fuzzy, são investigadas hoje, no mundo, por diversas metodologias e respaldo filosófico. Todas elas têm suas características específicas dedicadas a problemas particulares (MA, CHEN, XU, 2006).

As regras de inferência precisam estar de acordo com a situação corrente. Se a máquina inteligente deve agir e pensar como uma pessoa, ela deve ter um mecanismo flexível de inferências a fim de se adaptarem as mudanças do ambiente ou de outros conhecimentos. Na lógica clássica, a inferência é um princípio, ou seja, é regida completamente por regras de inferências pré-definidas (MA, CHEN, XU, 2006).

Na lógica fuzzy a inferência permite que as suas premissas se tornem ligeiramente diferente das anteriores, de acordo com as necessidades dos sistemas através do tempo. Assim, podem se incorporar ao sistema novos conhecimentos sem muitas restrições.

A lógica fuzzy oferece um modelo matemático para representar o sentido do conceito de vagueza (MA, CHEN, XU, 2006).

Os principais requisitos para a aplicação da lógica fuzzy são (NOVAK, 2006):

- a) Precisa ser bem estabelecida num sistema formal para justificar suas aplicações;
- b) Deve ser um sistema aberto. Deve ser possível expandí-lo usando novos conectores e com quantificadores em geral. Também devem ser expressivos os fenômenos específicos de linguagem semântica natural, como a não comutatividade de conjunção e disjunção, por exemplo.
- c) Tem seu programa de trabalho específico, técnicas e conceitos próprios. Entre eles, podem ser notados: avaliação de expressões lingüísticas, variáveis lingüísticas, regras IF-THEN fuzzy, desfuzzyficação, quantificação fuzzy, igualdade fuzzy, etc.
- d) Deve ser capaz de desenvolver esquemas especiais de inferência, incluindo esquemas sofisticados como os de raciocínio humano (NOVAK, 2006).

Nota-se que muitos destes requisitos já são preenchidos pelos sistemas de lógica formal. A classificação fundamental da lógica fuzzy é a de senso apurado e de sendo grosseiro. A última classificação foi criada por Zadeh para denotar todos os tipos de sistemas que possam usar a lógica fuzzy (NOVAK, 2006).

Um grande número de trabalhos em aproximações lingüísticas, baseados em conjuntos fuzzy têm sido aplicados na educação, na análise de mercado, na tomada de decisões, diagnósticos clínicos entre outras. Durante as duas últimas décadas, as teorias e estudos sobre incertezas e raciocínio automatizado desenvolveram alguns detectores práticos e desenvolveram sistemas de controle gerando teorias e métodos fuzzy (MA, CHEN, XU, 2006).

Cintula⁷ introduz classe de lógicas implicativas fracas, que é uma extensão da conhecida lógica implicativa de Rasiowa^{8,3}.

6. L. Shastri, Guest Editor's introduction, IEEE Expert 9 (4) (1994) 2-49.

7. P. Cintula, Weakly implicative (fuzzy) logics I: basic properties, Arch. Math. Logic 2005.

A lógica implicativa fraca pode ser entendida usando lógica de matrizes parcialmente ordenadas. Desta lógica, seleciona-se aquelas que podem ser chamadas de fuzzy.

Behouek e Cintula (BEHOUEK CINTULA, 2006) defendem o ponto de vista de que lógica fuzzy é aquela que é completa de matrizes totalmente ordenadas.

4.3 Modos de controle

Dentre os modos de controle existentes, e citados anteriormente, o controle em malha fechada é aqui melhor explicitado. O sistema de controle em malha fechada, também chamado de retroação, é capaz de detectar a evolução da variável controlada e responder com uma ação corretiva no caso de afastamento do valor desejado (BISHOP, 2000). A retroação provê, portanto, um sistema com capacidade de se adaptar a variações do ambiente. Uma configuração característica de um sistema em malha fechada pode ser observada na figura 30.

Figura 30: Diagrama representativo da configuração do sistema de malha fechada (BISHOP, 2000).

Apesar das vantagens referidas, a característica reativa da retroação exclui a possibilidade de ações de antecipação, de modo a contrariar o efeito de perturbações, ou seja, o sistema de controle só atua após o efeito da perturbação se manifestar na variável manipulada. Esta característica é indesejável, principalmente quando as perturbações podem ser medidas antes de afetarem o sistema. Daí a existência de ações de controle complementares, como, por

exemplo, a ação por antecipação, tendo como base dados experimentais do processo e respectivos pontos críticos. Desta forma podem-se prever situações em que se tem dados suficientes para que um problema seja corrigido, antes mesmo que ocorra (BISHOP, 2000). Por exemplo, se a pressão interna não pode ultrapassar 150 bar antes de 25% do deslocamento axial para conformação, ele deve ser controlado até que a pressão se enquadre em um valor pré-definido correspondente a um deslocamento de 25%.

O tempo de interação com o mecanismo e influência de ruídos no sistema de controle também devem ser analisados. A ocorrência de atrasos no transporte da leitura e comando das variáveis pode originar comportamentos oscilatórios de resposta do sistema, causando efeitos indesejáveis, principalmente no controle com retroação. Desta forma, é necessário que o processo respeite o tempo de amostragem dos sensores interligados a ele. O processo de hidroconformação não depende exatamente do tempo que ocorre, mas sim de seu “status” em relação às ações aplicadas aos atuadores na máquina. Desse modo, não deve haver atrasos na resposta do sistema, mediante uma modificação das variáveis do processo que se distancie da relação padrão, ou relação ideal (curva de processo) entre elas (PONCE & BATALHA, 2003).

Outros ruídos podem perturbar o controle, como a influência de campos magnéticos ou elétricos gerados por componentes externos ao sistema, como rede elétrica local, motores elétricos que estejam próximos aos cabos, e outros.

4.4 Bibliografia do capítulo 4

- BEHOUEK, CINTULA, 2006: BEHOUEK, L., CINTULA, P., *Fuzzy logics as the logics of chains*, Fuzzy sets and systems, V157, p. 604-610, 2006.
- BISHOP, 2000: BISHOP, R.H., DORPH, R. *Sistemas de controle modernos*, São Paulo, Ed. LTC, 2000.
- HAJEK, 2006: HAJEK, P., *What is mathematical fuzzy logic* Fuzzy sets and systems V 157 p. 597-603, 2006.
- MA, CHEN, XU, 2006: MA, J., CHEN, S., XU, Y., *Fuzzy logic from the viewpoint of machine intelligence* Fuzzy sets and systems V 157 p. 628-634, 2006.
- MATHWORKS, 1992 a: MATLAB – Identification Toolbox - The Mathworks Inc., 1992.
- MATHWORKS, 1992 b: MATLAB – Non Linear Control Blockset - The Mathworks Inc., 1992.
- NOVÁK, 2006: NOVAK, V., *Which logic is the real fuzzy logic?* Fuzzy sets and systems V157 p. 635-641, 2006.
- OGATA, 2003: OGATA, K., *Engenharia de controle moderno*, 4ª. Edição. São Paulo, Pearson, 2003.
- PONCE & BATALHA, 2003: PONCE, A. S., BATALHA, G. F., *Conformação hidrostática de chapas e tubos*, In: VI CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS, 2003, Porto Alegre. VI Conferência Nacional de Conformação de Chapas, p. 165-176, 2003.
- SILVEIRA & SANTOS, 1999: SILVEIRA, P. R., SANTOS, W. E., *Automação e controle discreto*, 2ª. Edição. p. 21, 23, 34, 90, 92.
- SCHMOECKEL et al., 1999: SCHMOECKEL, D., HIELSCHER, C., HUBER, R., GEIGER, M., *Metal forming of tubes and sheets with liquid and other flexible media*, In: Annals of the CIRP, V. 48, p.497-513, 1999.
- ZADEH, 1975: ZADEH, L., *Fuzzy logic and its application to approximate reasoning* Information Processing V 74 p. 591-594, 1974.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo encontram-se a descrição do material e de todos os equipamentos que foram usados na construção do dispositivo de hidroconformação de tubos deste trabalho. Serão também detalhados todos os passos da fase experimental do trabalho.

5.1 Materiais

Na fase experimental deste trabalho, o Centro Universitário da FEI colocou a disposição os seguintes materiais e equipamentos.

Elementos para o sistema de controle:

- Computador PC com *slots* padrão PCI e sistema operacional Windows NT 4.0 *Service Pack 6*.
- Software de instalação das placas analógicas e digitais ao sistema operacional.
- Placa conversora A/D, marca Advantech, modelo PCI-1713 com 32 canais de entrada analógica de 0 a 10 V DC (*Volts Direct Current*) com resolução de 12 bits, podendo ser configurados até a escala mínima de 0 a 1,25V.
- Placa conversora D/A, marca Advantech, modelo PCI-1723 com 8 canais de saída analógica de 0 a 10 V DC com resolução de 16 bits.
- Placa de entrada e saída digital, marca Advantech, modelo PCL-724 com 24 canais digitais configuráveis (entrada e/ou saída digital) nível TTL.
- Relés de estado sólido, também chamados de optoisoladores, OD-025DC ligados às saídas digitais da placa PCL-724, que possibilitam que uma saída em nível TTL (0 ou 5 V

DC com baixa corrente limite) acione dispositivos de até 40 V DC com correntes de até 2 ampères.

- Relés de uso geral NA/NF acionados com sinais de 24 V DC utilizados no auxílio do gerenciamento das válvulas do dispositivo de hidroconformação.
- Um software de gerenciamento e controle chamado AStudio™.
- Uma fonte regulável de 0 a 10 V DC e um multímetro digital para a conferência dos dados lidos e escritos pelas placas A/D e D/A.

Elementos do dispositivo de hidroconformação de tubos:

- Servoválvula de Vazão com tensão de alimentação necessária para o seu funcionamento de 24 V DC e variação de deslocamento de zero a 100% do comprimento do cilindro. A variação é dada por um sinal analógico de 0 a 10 V DC. Esta válvula foi disponibilizada com um servoatuador de diâmetro de 50,8 mm, constituindo o denominado sistema servoválvula – servoatuador ou servossistema.
- Válvula Proporcional com tensão de alimentação necessária para o seu funcionamento de 24 V DC e variação proporcional de abertura que produz o recuo máximo e o avanço máximo através de um sinal analógico recebido variando de -5 a +5 V DC.
- Válvula Direcional, que é acionada por um sinal de 24 V DC, proporcionando vazão máxima, e na ausência desse sinal, vazão nula.
- Válvula Reguladora de vazão manual.
- Régua Potenciométrica tipo LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*), marca Gefran, que trabalha com uma tensão de alimentação de 5 V DC e proporciona uma saída analógica de 0 a 5 V DC proporcional ao deslocamento do cilindro, com curso de 0 a 100 mm.

- Régua Potenciométrica tipo LVDT, marca Temposonics (MTS), que trabalha com uma tensão de alimentação de 24 V DC e proporciona uma saída analógica de 4 a 20 mA proporcional ao deslocamento do cilindro, com curso 0 a 100 mm.
- Régua Potenciométrica tipo LVDT, marca Temposonics (MTS), que trabalha com uma tensão de alimentação de 24 V DC e proporciona uma saída analógica de 4 a 20 mA proporcional ao deslocamento do cilindro, com curso de 0 a 300 mm.
- Transdutor de pressão que necessita de uma tensão de alimentação 10 a 30 V DC e proporciona uma saída analógica de 0 a 10 V DC proporcional a pressões empregadas ao instrumento de 0 a 300 bar.
- Célula de carga alimentada por uma tensão de 5 V DC, proporcionando uma variação de tensão de 0 a 7,4 mV proporcional a cargas de 0 a 1000 kg.
- Prensa hidráulica com 40 tf de fechamento vertical, com controle manual através de botoeiras.
- Unidade hidráulica para alimentação do sistema servoválvula – servoatuador.
- Servoatuador com diâmetro de 25,4 mm para atuar no fornecimento da pressão interna.
- Três atuadores com diâmetro de 50,8 mm para atuar no sistema axial e contrapressão do tubo em conformação.
- Ferramenta Matriz para a conformação do tubo de cobre de diâmetro externo 28 mm, e as ponteiros deslizantes adaptadas aos atuadores (usinagem cortesia da Fábrica de Buzinas Araponga ®).
- Tubos de cobre eletrolítico Eluma ®, classe E, linha *Hidrolar*, com 28 mm de diâmetro externo e 0,6 mm de espessura de parede.

5.2 Métodos

5.2.1 Montagem e construção e ensaios mecânicos do material

- Montagem e construção:

O dispositivo para realizar o processo de hidroconformação foi montado em uma prensa hidráulica de 40 tf de força vertical, ilustrada na figura 31. Para melhor explicitar a configuração do equipamento, é adotada a seguinte divisão e nomenclatura:

Unidade hidráulica principal (UHP): é a unidade hidráulica original da prensa, composta por bomba hidráulica de deslocamento variável e duas ramificações de saída. A figura 32 apresenta o diagrama hidráulico que representa a UHP.

Unidade hidráulica secundária (UHS): é a unidade hidráulica que alimenta exclusivamente o sistema servoválvula – servoatuador. Está ilustrada no diagrama hidráulico da figura 33.

Sistema amplificador de pressão: é o esquema responsável pelo fornecimento de fluido pressurizado à cavidade do corpo-de-prova. É composto pelo sistema servoválvula – servoatuador com mais um servoatuador ainda, denominado de cilindro amplificador de pressão; pelo reservatório de fluido (solução aquosa de etilenoglicol); pelo transdutor de pressão conectado à ponteira vazada do cilindro axial (vide anexo 1 desenho #6). A figura 34 apresenta a disposição do equipamento.

Sistema axial e de contrapressão: é composto pelos três atuadores que realizam a hidroconformação em si, com sensores de posição, duas válvulas proporcionais de vazão (axiais) e uma válvula direcional convencional com dois reguladores de vazão manuais (contrapressão). A figura 35 mostra a disposição do equipamento.

Figura 31: Prensa hidráulica usada neste trabalho. A seta indica sua direção e sentido da força de fechamento (40 tf).

Ferramenta de conformação: é a ferramenta matriz usada na conformação do tubo de cobre. Foi gentilmente usinada na Fábrica de Buzinas Araponga ®. A figura 36 apresenta a ferramenta usinada a partir do desenho #6 do anexo 1.

O equipamento inteiro montado está ilustrado na figura 37. Nela encontram-se inclusive os elementos do sistema de controle.

Figura 32: Diagrama hidráulico da Unidade Hidráulica Principal (UHP). As siglas AX correspondem aos atuadores axiais, CP à contrapressão e F ao fechamento.

Figura 33: Diagrama hidráulico da Unidade Hidráulica Secundária (UHS).

Figura 34: Sistema amplificador de pressão.

Figura 35: Sistema axial e de contrapressão.

Figura 36: Ferramenta matriz

Figura 37: Prensa hidráulica com dispositivo de hidroconformação de tubos.

- Ensaios mecânicos do material:

O tubo de cobre Eluma classe E da linha Hidrolar é extrudado e por isso vem com elevado encruamento. Para adequar o material ao uso deste trabalho foi necessário fazer um recozimento dos corpos-de-prova, a 500° C por 1 h, e resfriamento em água.

Após recozido, foi realizado ensaio de tração convencional do tubo, e seu resultado está disposto no capítulo 6.

5.2.2 Cabeamento do sistema

Para que as informações cheguem dos sensores ao dispositivo de leitura, é necessária a interligação entre eles. Utilizaram-se cabos metálicos blindados visando minimizar os ruídos gerados pelos motores elétricos das bombas hidráulicas envolvidas no processo, ou ruídos de rede elétrica.

5.2.3 Instalação dos componentes

Para melhor interação do sistema de controle, os componentes foram instalados de modo a se comunicarem o mais diretamente possível entre si.

- Interfaceamento entre as placas, o sistema operacional e o software de gerenciamento:

O primeiro passo a ser executado é a instalação das placas no computador e a instalação dos *drivers* para que o sistema operacional reconheça-as. Os parâmetros de configuração são

reconhecidos automaticamente e podem ser verificados nos exemplos das figuras 38, 39 e 40.

Detalhes quanto às referências de instalação estão circutados nas imagens.

Figura 38: Tela de instalação do driver da placa PCI-1723 no sistema operacional e respectivas configurações.

Figura 39: Tela de seleção do tipo de entrada analógica a ser utilizada na placa PCI-1713 (“Single Ended” = zero a 10 V DC , “Diferential” = -10 a + 10 V DC).

Figura 40: Tela de instalação do driver da placa PCL-724 no sistema operacional e respectiva configuração.

A verificação da interação entre as placas e o software foi executada através de fontes reguláveis ligadas às entradas analógicas e multímetros ligados às saídas analógicas. A verificação inicial foi feita através do próprio software de instalação das placas, onde a entrada analógica da placa A/D foi ligada à fonte regulável em paralelo com o multímetro, e os valores empregados na saída da fonte puderam ser conferidos tanto no multímetro como no software. De forma similar, foi ligado um multímetro em paralelo à saída analógica da placa D/A, e os valores empregados no software foram conferidos no multímetro. Após este teste, as entradas digitais foram ligadas diretamente às saídas digitais para a verificação do funcionamento das interfaces, através do mesmo software.

- Instalação dos sensores de fim de curso:

Foram instalados sensores de fim de curso, impedindo o avanço das hastes dos cilindros em alguns pontos através de ligações elétricas que interrompem o sinal de acionamento da válvula proporcional. O posicionamento dos sensores foi definido de acordo com a necessidade do processo. Eles foram inicialmente fixados em pontos próximos aos aferidos de início e fim de processo e posteriormente ajustados com maior precisão durante o funcionamento do mecanismo. O esquema de ligação deles é representado na figura 41, e as suas etapas de funcionamento são exemplificadas na figura 42. Nesta última se observa que no início do processo os sensores transmitem o sinal do ponto A ao ponto B (ambos em ligação normal fechada). Desta forma o sinal de avanço enviado pela saída analógica à válvula proporcional responsável pela movimentação da haste do cilindro axial, por exemplo, é recebido por ela sem nenhum desvio até que o primeiro sensor seja acionado, inibindo o avanço do cilindro, pois o relé auxiliar ligado à ela recebe com isso o sinal nulo no contato A. Esta primeira interrupção no avanço é a de posicionamento inicial do processo. Seguindo o processo manual, aciona-se a saída digital ligada ao relé auxiliar, que transfere novamente o sinal de avanço ao ponto C do primeiro sensor e em

consequência permite a movimentação do eixo axial até que o segundo sensor é acionado interrompendo definitivamente o movimento de avanço axial. Ao acionar o sensor 2, a única possibilidade de movimentação do cilindro é o seu retorno, pois a válvula proporcional passa a receber o sinal analógico de uma saída distinta da anterior, sendo dedicada exclusivamente ao retorno dos cilindros, mediante solicitação do software. Ou seja, enquanto um sinal analógico não for inserido nesta saída auxiliar, o cilindro permanecerá parado na posição de acionamento do segundo sensor. A figura 45 exemplifica os quatro estágios de funcionamento dos sensores de controle de avanço axial. A posição *A* refere-se ao início do processo; a posição *B* refere-se ao acionamento do primeiro sensor; a posição *C*, ao avanço mediante saída digital auxiliar acionada; e a posição *D*, ao acionamento do segundo sensor, aguardando o sinal analógico auxiliar de recuo. A linha tracejada representa o curso do eixo axial.

Figura 41: Esquema de ligação dos sensores de fim de curso.

Figura 42: Estágios de funcionamento dos sensores de controle de avanço axial.

5.2.4 Ensaios preliminares em malha aberta e ajuste do dispositivo

- Simulação com a fonte regulável e com o multímetro:

Foram colocados sinais de 0 a 5 V DC nas entradas analógicas das placas e lidos em multímetros valores analógicos provenientes das saídas da placa, confirmando a integridade dos dados em relação à leitura.

- Teste de leitura dos sensores de posição LVDT:

Constatado o funcionamento das placas, foram instaladas as réguas potenciométricas em entradas analógicas. O esquema usado nesta ligação está na figura 43. Observa-se que o ponto A é a saída analógica da régua potenciométrica Gefran de 0 a 5 V DC, onde a segunda linha que liga o sensor ao ponto A representa o retorno de sinal. As saídas analógicas dos outros dois sensores Temposonics, B e C, só podem estar ligadas às entradas analógicas usando um resistor de precisão de 125 Ohms, para que o sinal da saída seja a queda de tensão sob o resistor, na faixa de 0 a 5 V DC. Os pontos D representam a alimentação de 24 V DC.

Figura 43: Esquema de ligação dos sensores LVDT.

A placa de entradas analógicas recebe sinais com variação de níveis de tensão. Como os sensores Tempsonics apresentam saídas em níveis de corrente na gama de 4 a 20 mA, utilizaram-se resistores de 125 ohms ligados em paralelo na entrada analógica da placa para que ela receba a queda de tensão no resistor utilizado, possibilitando assim a leitura da grandeza dentro dos limites da placa.

- Testes das válvulas:

Os testes nas válvulas proporcionais e na servoválvula iniciaram-se após os cabos serem instalados nelas. Os sinais gerados pelas saídas analógicas possibilitaram inicialmente verificar o funcionamento das válvulas proporcionais, mesmo sem o funcionamento da unidade hidráulica. As lâmpadas tipo *led* indicativas se acendiam quando a válvula proporcional recebia sinal

proveniente da saída analógica da placa. Os sinais enviados à servoválvula e às válvulas proporcionais foram confirmados também através de multímetros.

As válvulas direcionais foram testadas inicialmente também sem o funcionamento da unidade hidráulica, verificando o simples acionamento das bobinas solenóides através das saídas digitais do computador ligadas aos relés optoisoladores. A figura 44 apresenta o esquema geral de ligação utilizados nas válvulas. Os sinais aplicados aos pontos *A* e *B* são sinais que variam de -5 a $+5$ V DC, proporcionando o retorno e o avanço do eixo do cilindro respectivamente. Por intermédio dos relés optoisoladores (*C*) as saídas TTL (*D* e *E*) acionam a válvula direcional com o uso dos 24 V DC fornecidos pelo ponto *F*. O ponto *G* ilustra a via de entrada do fluido pressurizado na cavidade do corpo-de-prova . Este é o fluido do reservatório do sistema amplificador de pressão, conforme ilustrado na figura 45 e apresentado na figura 34. O sinal que proporciona o avanço e recuo da servoválvula neste sistema é um sinal analógico de 0 a 10 V DC, proveniente também da saída analógica da placa D/A .

Figura 44: Ligação das válvulas proporcional e direcional e servoválvula.

Figura 45: Ligação da servoválvula ao sistema.

- Teste de deslocamento axial sem carga de prova:

Com os sensores de fim de curso instalados, executaram-se os testes das válvulas com o funcionamento da unidade hidráulica, provocando real deslocamento dos cilindros. Tais testes foram iniciados sem corpos de prova (cargas), mas com o uso de um elastômero na ferramenta de hidroconformação, visando analisar o deslocamento dos eixos, velocidades de avanço e recuo e comportamento dos sensores na lógica empregada, e que será explicada posteriormente.

- Testes com carga de prova, implementando leituras de pressão, executados em malha aberta:

A função exata da servoválvula é gerar a pressão interna no corpo-de-prova, pressão esta que garante que a peça seja conformada. Assim, esta pressão deve ser controlada para permitir a conformação da peça sem atingir a ruptura (*bursting*) do material. O sensor de pressão tem a função de levar ao software a informação dos valores instantâneos de pressão e permitir que ele controle o avanço ou recuo do servoatuador, através dos comandos dados à servoválvula.

Concluídos os testes sem carga, colocou-se o primeiro corpo-de-prova para possibilitar os testes da servoválvula e então efetuar as leituras de pressão interna ao tubo.

- Testes com a célula de carga:

A célula de carga mede a força aplicada no eixo de contrapressão. O deslocamento do cilindro central está diretamente relacionado ao avanço dos eixos axiais através de uma relação matemática detalhada no capítulo 6. O sinal analógico proveniente da célula de carga deve medir as forças de reação durante os vários estágios do processo de hidroconformação.

5.2.5 Desenvolvimento do software supervisor

- Instalação do software de gerenciamento e elaboração do supervisor inicial:

Foi instalado o software de supervisão e controle AStudio em uma versão de demonstração, que permite o trabalho ininterrupto por duas horas, podendo ser reiniciado ao término deste período por mais duas horas. E assim sucessivamente. A limitação crítica do tempo de trabalho era o aquecimento excessivo do óleo, por causa das condições de trabalho às quais ele estava submetido.

Este software permite que todos os canais das placas existentes, sejam entradas ou saídas, analógicas ou digitais, possam ser relacionados em uma tabela, vinculando-os às referências denominadas TAG.

A referência TAG é ilustrada na figura 46. Ela tem um endereço, e para exemplificá-lo observa-se o endereço 1&AO@2 circulado também na figura 46. Ele descreve principalmente o tipo de variável (analógica ou digital) e o canal da placa em que o TAG está vinculado (ADVANTECH, 2002).

Referência que pode ser utilizada para identificar o dispositivo

Description: ☐ Increase priority

Read Trigger: Enable Read when Idle: Read Completed: Read Status:

Write Trigger: Enable Write on Tag Change: Write Completed: Write Status:

Station: Header: ☐ Min: Max:

O número 1 garante que a função escrita se mantenha funcionando com o

	Tag Name	Address	Div	Add
1	AO[1]	1&AO@2		
2	AO[2]	1&AO@3		
3	AO[3]	1&AO@4		
4	AO[4]	1&AO@5		
5				
6				
7				

Tag referente ao endereço

Endereço exemplificado

Figura 46: Planilha de driver do AStudio.

Com os Tags configurados, pode ser iniciado o procedimento de leitura e/ou escrita através do software.

Construiu-se inicialmente uma tela no software onde os dados das entradas analógicas seriam mostrados e valores analógicos de saídas poderiam ser definidos. A figura 47 apresenta esta tela.

Figura 47: Tela da simulação inicial dos canais de entrada e saída analógicos.

As primeiras rotinas implantadas no software foram as de leituras dos sensores e de escrita dos atuadores. Estes componentes necessitam de interação entre si através de relações dinâmicas. Essas relações dinâmicas estabelecidas pelas rotinas entre os sensores, os atuadores e o supervisor podem ser observadas nos fluxogramas de rotinas iniciais exibidos na figura 48, 49 e 50. A figura 48 apresenta o fluxograma para o sistema axial, a figura 49 para o sistema de contrapressão e a figura 50 para o controle da pressão interna.

Figura 48: Fluxograma da rotina de leitura e de escrita dos sensores e atuadores do sistema axial.

Figura 49: Fluxograma da rotina de leitura e de escrita dos sensores e atuadores do sistema de contrapressão.

Figura 50: Fluxograma da rotina de leitura e de escrita dos sensores e atuadores do sistema de pressão interna.

Desta forma, o controlador deve receber e enviar sinais ao sistema da forma prevista no diagrama da figura 51.

Figura 51: Diagrama de blocos das interações do controlador.

- Elaboração das rotinas matemáticas definitivas:

As rotinas matemáticas principais foram divididas em duas etapas. A primeira, de parametrização da curva desejada relacionando deslocamento axial com pressão interna ao corpo-de-prova desejada (equação 51); a segunda, controlando o acionamento de avanço dos cilindros axiais em sincronia e proporção com o recuo do eixo central (equação 52), e levando em consideração a relação da primeira rotina matemática. Assim a interação dos cilindros axiais e central somente é permitida caso a pressão interna ao corpo-de-prova esteja de acordo com o valor esperado definido pela curva de processo. Caso a pressão interna não esteja proporcional ao deslocamento empregado pelos cilindros axiais, eles param de avançar até que a pressão interna ao corpo-de-prova seja alcançada mediante uma terceira rotina matemática que compara o valor obtido na primeira rotina matemática, e comanda ou não o avanço ou recuo da servoválvula.

$$C = 10^{-9} \cdot A^5 - 7 \cdot 10^{-7} \cdot A^4 \quad (\text{eq. 51})$$

$$\text{Auto} = \text{If } \text{press} * 0.95 < c < \text{press} * 1.05, 0, 1 \quad (\text{eq. 52})$$

onde C é a referência de pressão mediante deslocamento (bar), A é o deslocamento dos cilindros axiais (mm), $Auto$ é uma função que habilita ou não o avanço dos cilindros axiais e centrais e $Press$ é a pressão lida instantaneamente (bar).

As relações das equações 51 e 52 foram implantadas dentro das ações a serem tomadas, que respeitam o fluxograma lógico de controle apresentado na figura 52.

Figura 52: Fluxograma lógico de controle.

5.2.6 Implantação das curvas

Para implantar as curvas de processo foi necessário levantar as curvas limites de falha do diagrama de processo para os parâmetros deste trabalho. Para isso, foram admitidas as seguintes hipóteses:

- Forças axiais iguais;
- Processo ocorre sem atingir a região de fissura;
- Sem deslocamento axial;
- Processo independente de taxas temporais;

A seguir, para validar o método adotado neste trabalho foi realizada uma comparação entre algumas curvas oferecidas no trabalho de Asnafi (ASNAFI, 1999) e de Koç & Altan (KOÇ & ALTAN, 2001) e algumas curvas levantadas neste trabalho com os parâmetros próprios, mas pelo método sugerido pelos autores.

Confirmando a validade do método de cálculo sugerido, foram realizadas as devidas adaptações dos parâmetros para as condições de pesquisa deste trabalho, e as curvas desejadas pela modelagem foram levantadas e apresentadas a seguir.

A figura 53 exibe as curvas de escoamento e vedação oferecidas por Asnafi (ASNAFI, 1999) baseadas nas seguintes relações deduzidas das equações anteriormente citadas.

$$p_i = \frac{\sigma_{LE}}{\sqrt{1 - \alpha + \alpha^2}} \cdot \frac{2t_o}{d_o - t_o} \quad (\text{eq. 53})$$

$$F = p_i \pi \left[\left(\frac{d_o - t_o}{2} \right)^2 \cdot (1 - 2\alpha) + \left(\frac{d_o - 2t_o}{2} \right)^2 + \mu \cdot d_o \cdot (l_o - s) \right] \quad (\text{eq. 54})$$

Onde:

$$s = -L_o \left(1 - e^{\frac{-\nu \cdot \sigma_{LE}}{E}} \right) \cdot \beta \text{ se } -0,5 \leq \beta \leq 0$$

$$s = \frac{L_o}{2} \left(1 - e^{\frac{(\nu - \alpha) \sigma_{LE}}{E \sqrt{1 - \alpha + \alpha^2}}} \right) \text{ se } -1 \leq \beta \leq -0,5$$

(eq. 55)

Figura 53: Escoamento e vedação (adaptada de ASNAFI, 1999). Curvas baseadas nas equações 53, 54 e 55.

Na Figura 54 se observam as mesmas curvas de escoamento e vedação com os parâmetros de Asnafi (ASNAFI, 1999) observados na tabela 2, levantadas novamente neste trabalho.

Tabela 2: Parâmetros usados na construção da Janela de processo de Asnafi (ASNAFI, 1999).

Curvas	σ_{LE} (MPa)	t_o (mm)	d_o (mm)	μ	L_o (mm)	ν	E (MPa)	l_o (mm)
1 (losango)	141	1,8	60	0,08	400	0,3	205000	140
2 (triângulo)	141	1,8	60	0,08	550	0,3	205000	215

Figura 54: Curvas de escoamento e vedação para os parâmetros de Asnafi (ASNAFI, 1999).

Comparando as duas figuras pode-se notar claramente a validade do método proposto, pois elas são muito semelhantes.

Para os mesmo parâmetros de Asnafi, a curva de enrugamento foi adicionada ao diagrama $F_a \times P_i$, obtendo-se a configuração apresentada na figura 55.

Figura 55: Curvas de escoamento, vedação e enrugamento para os parâmetros de Asnafi (1999), baseadas nas equações 40, 41, 53, 54 e 55.

O mesmo procedimento de obtenção das curvas da figura 55 foi seguido, porém para os parâmetros adotados neste trabalho, dispostos na tabela 3, gerando as curvas da figura 56.

Tabela 3: Parâmetros deste trabalho.

σ_{LE} (MPa)	t_o (mm)	d_o (mm)	μ	L_o (mm)	ν	E (MPa)	l_o (mm)
43	0,9	28	0,08	80	0,3	115000	30

Figura 56: Curvas de escoamento, vedação e enrugamento para os parâmetros deste trabalho (tabela 3), baseadas nas equações 40, 41, 53, 54 e 55.

Como se observa pela comparação das figuras 55 e 56, a região segura para ocorrência do processo no caso deste trabalho apresenta uma área maior do que para os parâmetros da tabela 2, o que era esperado.

O material adotado neste caso (cobre) é mais dúctil do que o material adotado no trabalho de Asnafi (1999) (aço), portanto permite maior variação das curvas F_a x P_i dentro da região segura. O cobre se mostra ainda menos resistente, o que transfere a curva de escoamento para uma região bem reduzida, como se pode notar na figura 56.

5.2.7 Vedação

A vedação dos corpos-de-prova deste trabalho foi feita pelo método das ponteiros cônicas, ilustrado nas figuras 3 e 13, no capítulo 2. A opção pelas ponteiros cônicas foi baseada na espessura do corpo-de-prova, no seu material e na praticidade do processo.

A etapa da vedação dos corpos-de-prova foi realizada manualmente, até que a pressão inicial de processo fosse alcançada. A partir do valor estimado de pressão inicial, o processo começa a ocorrer em malha fechada controlado pelo software supervisor.

5.2.8 Processo

Após a etapa de vedação o processo automaticamente se inicia. O software se baseia na curva de processo padrão e propõe ações corretivas quando os pontos se distanciam mais de 5% do valor estimado para o instante pertinente.

Ao mesmo tempo, o software armazena os pontos do processo real no formato de texto para futuras conferências do histórico do processo, e ainda é possível observar a curva de processo padrão e a curva real durante o experimento.

5.2.9 Ensaaios em malha fechada

Após o posicionamento automático dos punções para o início do processo, a vedação do corpo-de-prova foi ainda feita manualmente. Atingida a pressão inicial, o processo ocorreu da forma descrita no item anterior. Assim foram realizados os ensaios em malha fechada, e seus resultados podem ser observados no capítulo 6.

5.3 Bibliografia do capítulo 5

ASNAFI, 1999: ASNAFI, N. *Analytical modeling of tube hydroforming*, Thin Walled Structures, V. 34, p. 295-330, 1999.

ADVANTECH, 2002: Manual de operação das placas PCI-1713 e PCI-1723.

KOÇ & ALTAN, 2001: KOÇ, M., ALTAN, T., *An overall review of the tube hydroforming (THF) Technology*, Journal of Materials Processing Technology, V. 108, p. 384-393, 2001.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Ensaios preliminares e ajustes

6.1.1 Ensaios mecânicos do material

Observa-se na figura 57 a curva de tração do tubo de cobre recozido utilizado neste trabalho.

Dela podem-se obter os parâmetros do comportamento do material, apresentados na tabela 4.

Figura 57: Curva de tração do tubo de cobre eletrolítico Eluma, recozido a 500° C @ 1 h.

Tabela 4: Parâmetros do material hidroconformado.

K (MPa)	n	E (MPa)	σ_{LE} (MPa)	σ_{LR} (MPa)
508,7	0,465	11500	43	229

O corpo de prova utilizado foi um trecho do tubo de 400 mm de comprimento, para um comprimento útil de 250 mm.

6.1.2 Cabeamento do sistema e leitura dos sensores de posição

Os sinais elétricos dos sensores de posição LVDT foram ligados às entradas analógicas e mostraram-se lineares mesmo com a utilização dos resistores. Os resultados das leituras dos três sensores podem ser observados nas tabelas 5, 6 e 7, nas quais se verificam pequenas diferenças entre os valores lidos pelo software e os valores lidos com multímetro.

Tabela 5: Dados lidos da régua potenciométrica Temposonics de curso máximo de 300 mm e suas respectivas equivalências.

Deslocamento LVDT (mm)	Amplitude do Sinal (mA)	Deslocamento medido (mm)
0	4,000	0,00
25	5,333	24,9
50	6,667	50,0
75	8,001	15,0
100	9,332	99,9
125	10,667	125,0
150	12,001	150,0
200	14,669	200,0
250	17,333	249,9
300	19,998	299,9

Tabela 6: Dados lidos da régua potenciométrica Temposonics de curso máximo de 100 mm e suas respectivas equivalências.

Deslocamento LVDT (mm)	Amplitude do Sinal (mA)	Deslocamento medido (mm)
0	0,000	0,0
10	0,505	10,1
20	1,015	20,3
30	1,505	30,1
40	2,003	40,1
60	3,005	60,1
70	3,499	69,9
80	4,025	80,5
90	4,499	89,9
100	4,999	99,9

Tabela 7: Dados lidos da régua potenciométrica Gefran de curso máximo de 100 mm e suas respectivas equivalências.

Deslocamento LVDT (mm)	Amplitude do Sinal (mA)	Deslocamento medido (mm)
0	4,000	0,0
10	5,614	10,1
20	7,213	20,1
30	8,809	30,0
40	10,450	40,3
60	13,600	60,0
70	15,202	70,0
80	16,878	80,5
90	18,400	90,0
100	20,000	99,9

6.1.3 Instalação dos componentes

- Interfaceamento entre as placas, sistema operacional e software de gerenciamento

A instalação das placas no sistema operacional ocorreu sem problemas. O software de instalação das placas é auto-executável, solicitando apenas a confirmação do local onde os arquivos serão instalados dentro da unidade de armazenamento (disco rígido). Assim que as placas foram instaladas no sistema operacional, o reconhecimento pelo software de supervisão e controle não apresentou problemas, uma vez que tanto a placa como o software obedecem ao formato requerido na documentação fornecida pelo fabricante.

- Instalação dos sensores de fim de curso

Os sensores cumpriram o papel de auxiliar na definição de pontos fixos de início e fim de processo.

6.1.4 Ensaios preliminares em malha aberta e ajuste do dispositivo

- Simulação com a fonte regulada e com o multímetro

As leituras e escritas de dados pelas simulações com fontes reguladas e multímetros constataram uma grande aproximação dos sinais aplicados à leitura dos instrumentos. A comparação dos dados lidos e escritos pelas placas e instrumentos externos utilizados pode ser verificada na tabela 8. A diferença entre o valor aplicado pela fonte variável e lido pela entrada analógica é tolerável para os testes iniciais, visto que a variação de 0,001 V é esperado no uso de placas de aquisição com resolução de 12 bits para converter sinais analógicos em digitais. Já para a saída analógica, uma resolução de 16 bits proporciona leituras mais fiéis ao valor real de saída.

Tabela 8: Dados lidos e escritos pelas placas AD e DA e suas respectivas leituras por instrumentos externos.

Fonte regulada 0 a 5 VDC	Entrada analógica (PCI 1713)	Multímetro (V)	Saída analógica (PCI 1723)
0,0	0,0	0,0	0,0
0,5	0,499	0,5	0,5
1,0	0,999	1,0	1,0
1,5	1,499	1,5	1,5
2,0	1,999	2,0	2,0
2,5	2,499	2,5	2,5
3,0	3,001	3,0	3,0
3,5	3,499	3,5	3,5
4,0	4,001	4,0	4,0
4,5	4,499	4,5	4,5
5,0	4,999	5,0	5,0

- Teste de leitura dos sensores de deslocamento

Os valores mostraram-se lineares, não apresentando variações significativas entre sinais lidos e esperados, como visto nas tabelas 5, 6 e 7.

- Testes das válvulas

Todos os testes preliminares foram efetuados com os sistemas hidráulicos desligados, para certificar-se previamente de que o sistema de controle responde aos comandos empregados em tempo hábil para não causar danos. Os sinais analógicos enviados às válvulas, tanto às proporcionais e à servoválvula, foram monitorados através de multímetros. Assim também para a válvula direcional comum, que recebia sinais digitais. Foi constatada a verificação do funcionamento das válvulas também através do ruído do acionamento das solenóides (direcional) e por meio de *leds* (proporcional). Para a servoválvula só foi constatado seu funcionamento mediante teste com o sistema hidráulico ligado.

- Teste de deslocamento axial sem carga de prova

As válvulas proporcionais não apresentaram comportamento idêntico, pois os mesmos sinais empregados nas válvulas proporcionaram velocidades de deslocamento diferentes. Foi necessário, portanto, calibrar as válvulas com diferentes valores de sinais para garantir uma velocidade de avanço semelhante entre os dois cilindros axiais. Nas figuras 58, 59 e 60 observam-se os valores (em volts) aplicados às válvulas pelo software e às curvas de deslocamento dos cilindros axiais. Cada uma delas apresenta diferentes velocidades de deslocamento dos cilindros. A figura 58 apresenta a menor velocidade equalizada; a figura 59, uma velocidade intermediária; e na figura 60 pode-se verificar o avanço sincronizado com maior velocidade, para ambos os eixos.

Figura 58: Menor velocidade equalizada para os atuadores axiais.

Figura 59: Velocidade equalizada intermediária para os atuadores axiais.

Figura 60: Maior velocidade equalizada para os atuadores axiais.

É possível notar que enquanto a válvula denominada direita inicia seu deslocamento em mínima velocidade a partir de 1,0 V de sinal de entrada, a esquerda começa logo a partir de 0,8 V. A tensão de chegada foi medida fisicamente na válvula com o auxílio de um multímetro de precisão, e comparou-se este valor com o valor na saída do sistema de controle. O erro devido à resistência elétrica dos cabos causou amplitude de variação de tensão da ordem de 0,0005 V. Embora apresentem este desvio de resposta, as válvulas e seus cilindros apresentaram variação linearmente crescente de velocidades no intervalo de 0,8 a 5 V positivos e negativos.

- Testes com carga de prova, implementando leituras de pressão, executados em malha aberta

A pressão interna de fluido está sujeita a grandes picos ou quedas abruptas na presença de qualquer deslocamento axial indesejado. Além disso, é inviável calcular manualmente qual seria a pressão de ruptura de um tubo cujas paredes estão estrangidas e em diferentes condições de solicitação a cada instante; por esse motivo, foram efetuados estudos dos limites de pressão que o corpo-de-prova suportaria. Assim, vedou-se um corpo-de-prova e aumentou-se a pressão interna a ele até atingir a ruptura do material, sem o uso do contrapressão. A pressão limite de trabalho sem a atuação do contrapressão foi medida e resultou em 202 bar. A figura 61 apresenta o corpo-de-prova e a fissura devido à pressão interna aplicada ao corpo.

Figura 61: Corpo-de-prova fissurado a 202 bar.

A presença de trechos enrugados e flambados neste corpo-de-prova se deve à falta de pressão interna com esforço axial no momento da fissura. A queda de pressão é praticamente instantânea, enquanto o comando para cessar o avanço axial só se dá após o software reconhecer a pressão nula. Isso ocorre com um atraso de alguns milissegundos devido ao sistema operacional (Windows). Este tempo é o suficiente para causar este tipo de dano.

- Testes com a célula de carga

A relação força por milivolts (curva de calibração, figura 62) da célula de carga foi levantada manualmente com a utilização de multímetro em uma prensa de molas, externa ao mecanismo. Porém não foi possível compatibilizar a sua saída de sinais com entrada analógica da placa de aquisição de dados. Isso ocorreu porque a variação do sinal de saída da célula, que é da ordem de milivolts ocorre em um fundo de escala de 2,5 Volts. Para efetuar tal leitura, seria necessário um

conversor RTD para 0 a 10 VDC, dispositivo que não foi possível providenciar até o término do trabalho.

Figura 62: Curva de calibração da célula de carga.

6.1.5 Desenvolvimento do software supervisor

- Instalação do software e elaboração do supervisor inicial

A elaboração do supervisor inicial serviu de aprendizado ao desenvolvimento da supervisão e controle com os instrumentos do equipamento de hidroconformação ligados às placas de aquisição de dados. Foram construídas telas simples somente para a verificação dos dados analógicos de entrada e saída das placas. A figura 47 do capítulo 5 ilustra esta fase.

O manuseio do software a ser trabalhado apresenta-se como peça fundamental na construção de sistemas de controle. É necessário o domínio de suas funções para saber se o software atende ou não ao projeto.

- Elaboração das rotinas matemáticas (software de supervisão e controle)

As rotinas foram desenvolvidas no software supervisor. A figura 63 apresenta a tela de operação no estado inicial do processo e seus respectivos valores. Os botões utilizados e os displays de dados disponíveis para leituras instantâneas serão descritos posteriormente.

Figura 63: Tela do software supervisor. Cada região delimitadas é descrita no texto adiante.

Na figura 63 são destacadas oito áreas distintas, identificadas pelas letras de A a H, pertinentes ao controle dos seguintes parâmetros:

A – Controle do cilindro central ou cilindro de contrapressão;

B – Controle da pressão interna do corpo-de-prova;

C – Controle independente dos cilindros axiais por variação de sinal analógico às entradas das servoválvulas;

D – Controle de avanço e recuo automático individual dos cilindros axiais por deslocamento em milímetros;

E – Controle automático do processo, sincronizando os cilindros axiais com a variação de pressão em comparação com a curva já pré-definida;

F – Referência dos sinais analógicos empregados às válvulas axiais e referência dos deslocamentos dos respectivos eixos;

G – Monitoramento da célula de carga (área não utilizada);

H – Região para visualizar pressão interna (à esquerda) e deslocamentos axiais (à direita) versus tempo.

Para melhor compreender os dados da figura 63, faz-se necessário conhecer alguns detalhes da linguagem utilizada. Os caracteres # representam as entradas de dados de onde o computador importa os dados lidos nos sensores e têm formato numérico, sendo o número de dígitos compatível com o número de caracteres #.

Como o software é norte-americano, o caractere “.” (ponto) é utilizado como separador decimal.

As funções matemáticas que determinam o comportamento de cada variável ficam armazenadas no software, numa seção de “matemáticas” numerada. As matemáticas 2 e 3 são ilustradas nas figuras 64 e 65, para exemplificar esta seção.

Figura 64: Matemática 2, responsável pelo retorno do cilindro central.

Figura 65: Matemática 3, responsável pelo avanço do cilindro central.

6.1.6 Implantação das curvas

De acordo com a janela de processo obtida com a metodologia empregada, explicada no capítulo 5, foi prevista uma curva de processo. Essa curva foi baseada nos seguintes critérios:

- Ela deveria “percorrer” um caminho que ficasse dentro do intervalo mais distante possível das curvas limites de processo, assim minimizando a probabilidade de ocorrer a falha antes da ação corretiva do software, em casos de desvios da curva de processo maiores que 5%. Além disso, o modelo utilizado na elaboração da janela de processo não coincide com as condições reais deste trabalho;
- Ela não apresenta a necessidade de ser linear, pois os dispositivos do sistema de controle permitem esta flexibilidade.

Assim, a curva de processo no diagrama deveria ter as características ilustradas na figura 66.

Figura 66: Curva de processo estimada para os ensaios em malha fechada.

Na legenda da curva da figura 66 observa-se a presença da linha de escoamento. No entanto, ela não aparece no gráfico porque a escala dele não permite que isso ocorra, uma vez que ela estaria

localizada em uma pequena região próxima à origem das abscissas e também das ordenadas. Pela mesma razão foi necessário adicionar a linha de tendência da curva de vedação.

A linha de tendência desta curva 1, que é a curva de processo estimada, apresenta a função da equação 58.

$$ax = 10^{-9} p_i^5 - 7 \cdot 10^{-7} p_i^4 + 10^{-4} p_i^3 - 0.0098 p_i^2 + 0.3853 p_i - 0.0943 \quad (\text{eq. 58})$$

onde p_i é a pressão interna de fluido e ax a soma do deslocamento de ambos os cilindros axiais.

Embora teoricamente o sistema de controle permita trabalhar relacionando o deslocamento axial em função da pressão interna, no mecanismo real, é mais seguro trabalhar do modo inverso. Os desvios que ocorrem com a pressão interna são muito mais violentos do que os que ocorrem com o deslocamento dos cilindros. A própria inércia mecânica do sistema é um fator que contribui para isso. Além disso, a ocorrência de compressão de um fluido incompressível confinado provoca modificações imediatas e grandes em sua pressão.

Por isso a curva da figura 66 foi invertida, passando a ser a da figura 67.

Figura 67: Curva de processo, pressão interna x deslocamento axial.

A nova linha de tendência desta curva resultou na equação 59, a qual foi implantada no software supervisor.

$$p_i = -0.2702ax^2 + 15.765ax - 23.198 \quad (\text{eq. 59})$$

onde p_i corresponde à pressão desejada e ax ao deslocamento em milímetros da soma dos eixos axiais.

Na figura 68 pode-se visualizar a função matemática da curva de processo desejada, implantada na seção de matemáticas do software. Esta matemática define ainda que, no caso de diferenças de leituras de pressão superiores a 5% em relação à pressão ideal (de acordo com a equação 59) ao deslocamento axial naquele instante, o avanço dos cilindros é momentaneamente interrompido até que a leitura da pressão esteja de acordo com o esperado. Esta parada momentânea pede ao

sistema que a servoválvula seja acionada e corrija a pressão interna ao corpo-de-prova para os valores desejados.

	Tag Name	Expression
1	press	$((-0.2702) \cdot \text{pow}(a, 2)) + (15.765 \cdot a) - (23.198)$
2	press	$\text{if}(\text{press} \leq 0, 0, \text{press})$
3	run	$\text{if}((0.95 \cdot \text{pressref}) \geq \text{press} \text{ or } \text{press} \geq (1.05 \cdot \text{pressref}), 0, 1)$
4		

Figura 68: Matemática do processo automático de avanço dos cilindros comparando os valores de pressão lidos com os valores desejados.

O gráfico da curva de processo padrão no software pode ser verificado na figura 69, onde o valor numérico dos deslocamentos está destacado pela circunferência. As siglas “ae” e “ad” correspondem ao deslocamento esquerdo e direito dos eixos axiais. A sigla “a” corresponde ao recuo do cilindro central e “press” à pressão medida durante o processo. Quanto à pressão apresentada no display “pressref” é o valor numérico da pressão ideal calculada para o deslocamento axial instantâneo. Quando a diferença entre o valor mostrado em “press” e “pressref” estiver menor do que 5%, a referência “run” fica verde, indicando que o dispositivo está com a pressão ideal de trabalho e, portanto, habilita o processo a continuar.

Figura 69: Tela para obtenção de valores de pressão em relação ao deslocamento axial.

Esta tela da figura 69 foi usada na aquisição dos dados de pressão e deslocamento durante os ensaios em malha fechada. Seus resultados são apresentados e discutidos a seguir.

6.2 Ensaaios em malha fechada

Durante a realização dos 171 ensaios em malha fechada ocorreram muitos problemas e muitas falhas de corpo-de-prova, devido às características do equipamento e do processo.

Os tipos de falha ocorreram em associação com os tipos de problema que incidiam, ora se sobressaindo uns sobre os outros, no equipamento. Para melhor exemplificar os fatos desta fase do trabalho, decidiu-se agrupar os ensaios por suas características típicas. Esta divisão é discutida nos tópicos que se seguem.

- Ensaios típicos de problemas de vedação

Nestes ensaios (87 corpos-de-prova) não se consegue a vedação completa do corpo-de-prova. Há apenas uma falsa vedação, que é suficiente para fornecer a pressão de início de processo, mas com a presença do deslocamento axial ela se perde, produzindo um vazamento do fluido pressurizado e com isso causando a flambagem do corpo-de-prova.

A figura 70 apresenta a curva de processo padrão e a curva de processo real típica destes casos.

Na figura 71 observa-se o efeito desta curva em um corpo-de-prova.

Figura 70: Curva de processo dos casos típicos de falha na vedação.

Figura 71: Corpo-de-prova flambado.

No detalhe ressaltado a direita na figura 71 são apresentadas as extremidades muito deformadas, como evidência da perda de vedação por estes caminhos.

- Ensaios típicos de picos de pressão

Nos 25 casos de picos de pressão durante o processo ocorre fissura dos corpos-de-prova. Um dos fatores que contribuem para as fissuras ocorreu mais facilmente, que foi a ausência do cilindro de contrapressão, que muitas vezes acabava deslocando-se mais do que o ideal, devido ao fato de ser atuado por uma válvula direcional comum, com o uso de reguladores de vazão manuais. Com isso, o sistema se tornou impreciso no controle do cilindro de contrapressão.

A curva típica deste tipo de ensaio é apresentada na figura 72. Na figura 73, são apresentados os dados para o cilindro de contrapressão, também para o mesmo tipo de ensaio. O corpo-de-prova típico deste caso está ilustrado na figura 74.

Figura 72: Curva de processo para ensaios típicos de picos de pressão.

Figura 73: Curva característica do cilindro de contrapressão, curva real comparada com a ideal.

Figura 74: Corpo-de-prova fissurado.

Muitas vezes, além da fissura, o corpo-de-prova apresenta rugas, mas elas ocorreram após a sua fissura, na ausência total de pressão e presença de deslocamento axial devido à inércia mecânica do sistema.

- Ensaios típicos de problemas de inércia

A inércia se deve ao uso de equipamentos inadequados, como os cilindros axiais e o de contrapressão. Pela agilidade de movimento exigida destes membros num processo tão complexo como o de hidroconformação de uma junta “T”, eles deveriam ser atuadores especiais, com baixíssimo peso no êmbolo e nas hastes, baixíssimo atrito interno e acabamento interno com rugosidade constante ao longo de toda a camisa, como um servoatuador. Como não havia servoatuadores disponíveis, mas sim cilindros comuns de fabricação de uma pequena empresa particular, a falta de recursos obrigou a usar estes últimos. Não foi possível modificar o equipamento para fazer as alterações necessárias para aproximá-los de servoatuadores por dois fatores: tempo hábil e autorização da instituição para modificar características mecânicas dos equipamentos.

Outro problema encontrado foi a histerese. Ela causa o mesmo efeito da inércia nas curvas de processo e nos corpos-de-prova. A histerese se deve ao sistema operacional utilizado no controle do processo: o Windows NT 98 Service Pack 6, processado por um processador Pentium 266 MHz. Para receber e enviar dados para as placas de aquisição e controle, eles eram obrigados a passar pelo gerenciador de tarefas do Windows, uma vez que o software trabalhava a partir dele, e não no DOS diretamente. Já as placas de aquisição e controle tinham um tempo de resposta estimado pelo fabricante de 2 a 8 milissegundos. Somando este tempo com o tempo de resposta do Windows, que, quando não priorizava outras tarefas ao invés da necessária, podia variar de 5 a 12 milissegundos, a resposta se tornava lenta demais para a necessidade do processo.

Inércia para descompressão do tubo

Quando a inércia do sistema incidia mais sobre o processo do que os outros problemas, na presença de um desvio da curva maior do que 5% o sistema ordenava a pausa nos deslocamentos axiais, e ao mesmo tempo ordenava o aumento da pressão interna pela servoválvula. Como o deslocamento axial continuava ocorrendo por cerca de um milímetro a mais em cada cilindro, e a pressão era incrementada demais, ou ocorria novamente a fissura do corpo-de-prova, ou, antes disso, o sistema parava o processo porque ao invés de diminuir a diferença entre a curva real e a ideal ela aumentava, alcançando mais de 20% de diferença.

As curvas típicas da ocorrência deste ensaio estão nas figuras 75 e 76. E na figura 77 os corpos-de-prova resultantes desse ensaio.

Foram realizados 19 ensaios com esse comportamento.

Figura 75: Curva de processo típica de inércia mecânica com fissura.

Figura 76: Curva de processo típica de inércia mecânica interrompida por diferença grande da curva real.

Figura 77: Corpos-de-prova resultantes dos ensaios das curvas das figuras 85 e 86. À esquerda encontra-se o corpo-de-prova fissurado e à direita enrugado.

Perda de vedação (histerese)

Já quando a histerese incidia de maneira mais implacável no processo, na presença do desvio maior que 5% da curva ideal, os cilindros eram pausados e pela inércia eletrônica a pressão interna não aumentava ao ponto de fissurar o corpo-de-prova; em compensação, a demora pela retomada do esforço axial causava vazamento de fluido pressurizado, e com isso a flambagem novamente ocorria assim que o deslocamento axial recomeçava.

Foram realizados 15 ensaios com este comportamento.

Na figura 78 se observa a curva típica deste tipo de processo e na 79 o corpo-de-prova.

Figura 78: Curva de processo típica de falha por perda de vedação.

Figura 79: Corpo-de-prova flambado.

- Ensaios típicos de limitações da capacidade do equipamento.

Em alguns ensaios a curva de processo foi pouco desviada da ideal, possibilitando quase a conformação completa da junta “T”. Mas infelizmente o processo chegou a um determinado ponto, antes do final, em que cessou o movimento axial e atingiu o limite de pressão interna, ficando estável nas condições de máxima vazão (e pressão) das válvulas. Assim, a conformação ocorreu até que todas as forças e condições não previstas no projeto do equipamento tomaram uma dimensão maior do que o máximo previsto.

Essas forças podem ser, dentre outras, a de atrito entre peça e ferramenta, que, além de ser difícil de medir, aumenta com a ação da pressão interna em proporções nada fáceis de prever ou calcular. Mais ainda, as condições de atrito também dependem do estado superficial das partes em contato, o que também era modificado pela deformação da peça; a força resistiva resultante do encruamento do cobre, que era diferente em cada zona do corpo-de-prova, sendo a zona de expansão a mais rápida a encruar; e não menos importantes, as forças de atrito entre as ponteiros

dos cilindros e a ferramenta, que também se modificava tal qual a velocidade de escorregamento entre as superfícies.

Dos 5 ensaios que ocorreram nestas condições, o mais importante é o que está ilustrado nas próximas duas figuras.

A figura 80 apresenta a curva de processo interrompida, e na figura 81 pode ser observado o corpo-de-prova com a maior protrusão conseguida.

Figura 80: Curva de processo interrompida por limitações do equipamento.

Figura 81: Corpo-de-prova com a máxima protrusão atingida.

Ainda nos casos deste tópico, ocorreram ensaios onde o avanço axial foi assíncrono.

Quando as condições tribológicas se modificavam preferencialmente em uma região da peça, ou depois de algumas horas de trabalho, em que o óleo da unidade hidráulica principal se superaquecia, os cilindros axiais, mesmo depois de calibrados, apresentaram deslocamentos assíncronos, causando protrusões descentralizadas e rugas no corpo-de-prova. A velocidade de um lado do tubo era diferente da do outro. E isso implicava algumas falhas do sistema de controle. Algumas vezes a soma dos deslocamentos, mesmo diferentes entre si, resultava em valores coerentes com os de pressão para a curva de processo. Sendo assim, o processo continuava ocorrendo, até que atingia o ponto máximo de capacidade do equipamento, ou então a instabilidade do corpo-de-prova, ao enrugar, causava ou pico de pressão, fissurando o domo do tubo, ou perda da vedação por deformação localizada nas extremidades do tubo, flambando-o.

A figura 82 apresenta um exemplo de curva que atingia o ponto máximo do equipamento e a figura 83 apresenta corpos-de-prova típicos deste ensaio.

Figura 82: Curva de processo com deslocamento assíncrono.

Figura 83: Corpo-de-prova com a protrusão descentralizada (esquerda) ou torta (direita).

- Ensaios com a ocorrência de instabilidade do corpo-de-prova

A instabilidade plástica de corpos-de-prova ocorreu em 18 ensaios. A figura 84 apresenta a curva de processo na ocorrência de instabilidade plástica do corpo-de-prova, que ou fissurava com pico

de pressão interna ou flambava com a perda de vedação. Na figura 85 pode-se observar os corpos-de-prova relativos a esses casos.

Figura 84: Curva de processo com instabilidade plástica.

Figura 85: Corpo-de-prova flambado (esquerda) ou fissurado (direita).

Nota-se em todas as figuras que mostram os corpos-de-prova falhados, principalmente os flambados, que os vários tipos de falha na curva de processo causaram um defeito físico na peça de aspecto muito próximo. Se não fosse a identificação numérica dos corpos-de-prova, e a dos ensaios, seria impossível definir a olho nu qual é o defeito proveniente de que tipo de processo. Ainda assim, uma análise mais precisa sobre o que acontecia durante o processo só foi possível através dos gráficos salvos em formato numérico, visto que o processo em si ocorria rapidamente.

7. CONCLUSÕES

Em relação aos objetivos propostos no início do trabalho pode-se concluir que:

- O processo de hidroconformação de tubos foi estudado, e este estudo foi compreendido em seus aspectos teóricos, fenomenológicos e experimentais.
- O dispositivo servocontrolado para ser acoplado em uma prensa hidráulica de 40 tf vertical foi projetado e construído, capaz de realizar a hidroconformação de um tubo de cobre UNS C 11000 de 28 mm de diâmetro externo, 80 mm de comprimento e espessura de parede de 0,6 mm, em uma junta T com altura máxima de protrusão de 16 mm. O sistema opera com máxima pressão de $21 \cdot 10^6$ Pa e velocidades de deslocamento de 0 a 25 mm/s.
- A instrumentação e o controle automático do dispositivo implantado à máquina, para exercer controle em malha fechada do processo de hidroconformação de tubos obtiveram sucesso.
- A modelagem experimental do processo foi concluída com a ajuda dos ensaios que eram conduzidos em malha aberta. Assim, foi possível modelar experimentalmente a curva de processo.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para que o equipamento conforme uma junta “T” com 30 mm de altura de protrusão a partir do tubo usado neste trabalho, deve-se considerar o encruamento do material e todas as condições tribológicas do sistema (atrito e temperatura peça x ferramenta, atrito interno dos cilindros, temperatura de trabalho do óleo hidráulico dos cilindros, etc.) no dimensionamento das unidades hidráulicas.

Sugere-se também analisar as alterações microestruturais e o encruamento que o corpo de prova sofre durante o processo.

As condições tribológicas entre a peça e a ferramenta são informações necessárias na concepção do equipamento, e suas constantes mudanças devem ser estudadas e levadas em consideração na previsão dos parâmetros do processo de hidroconformação.

O tempo de resposta da variável que controla a pressão interna de fluido deve ser o menor possível para corrigir a variação da pressão em caso de acréscimos ou decréscimos indesejados, evitando problemas com a histerese do sistema.

Para realizar os deslocamentos axiais e de contrapressão são necessários servoatuadores ou atuadores cujo atrito interno seja desprezível e cuja massa dos componentes internos (haste e êmbolos) também seja desprezível, a fim de evitar os problemas causados pela inércia mecânica do equipamento.

Embora o controle pelo deslocamento pareça uma solução mais barata, o controle axial pela força seria uma solução mais segura na hora de evitar defeitos de enrugamento e flambagem, pois na literatura a previsão da janela de processo que usa a força como parâmetro foi desenvolvida com mais frequência e possui um modelo de cálculo mais simples do que a que usa o deslocamento.

Assim, seria melhor usar válvulas proporcionais de pressão, e não de vazão, para realizar os movimentos axial e de contrapressão do processo.

A precisão da leitura dos sensores que irão monitorar os deslocamentos deve ser adequada, e a resolução da placa de aquisição de sinais analógicos deve ser suficiente para reconhecer esta precisão.

Sobre o controle do cilindro de contrapressão, ficou claro que o meio mais adequados de fazê-lo não é em função do deslocamento axial, mas sim em função da força de contato entre a peça e o punção. A ocorrência do deslocamento axial não significa que esteja havendo o crescimento da protrusão, visto que o corpo-de-prova pode estar, na realidade, sendo enrugado ou flambado. Por isso, na maioria das vezes, não se observa nos espécimes a marca de contato com o contrapressão. Sendo assim, o uso da célula de carga seria imprescindível.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADVANTECH, 2002: Manual de operação das placas PCI 1713 e PCI 1723.
- AHMETOGLU & ALTAN, 2000: AHMETOGLU, M., ALTAN, T., Tube hydroforming: state-of-the-art and future trends *Journal of Materials Processing Technology* V.98 p.25-33, 2000.
- ALINGER, VAN TYNE, 2001: ALINGER, M. J.; VAN TYNE, C. J., *Evolution of the tribological characteristics of several forming die materials*, *Journal of Materials Processing Technology*, V.111, p 20-24, 2001.
- ALTAN & PALANISWAMI, 2005: ALTAN, T., PALANISWAMY, H., AUE-U-LAN, Y., *Tube and Sheet hydroforming – Advances in material modeling tooling and process simulation*. In: SHEMET 2005 University of Erlangen, Nuremberg, 2005.
- ASNAFI, 1999: ASNAFI, N. *Analytical modeling of tube hydroforming*, *Thin Walled Structures*, V.34 p.295-330, 1999.
- ASNAFI & SKOGSGARDH, 2000: ASNAFI, N.; SKOGSGARDH, A., *Theoretical and experimental analysis of Stroke-controlled tube hydroforming* *Materials Science and Engineering*, A279 p.95-110, 2000.
- ASTM E0008-04 Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
- BARLAT et al., 2003: BARLAT, F., BREM, J. C., YOON, J. W., CHUNG, K., DICK, R. E., LEGE, D. J., POURBOGHRAH, F., CHOI, S. H., CHU, E., Plane stress yield function for aluminum alloy sheets – part I: Theory, *International Journal of Plasticity*, V. 19, p. 1297-1319, 2003.
- BATALHA & ABRANTES, 2003: BATALHA, G. F., ABRANTES, J. P., *Simulação Numérica via elementos finitos da conformação de chapas metálicas por pressão hidráulica (bulge test)*, Proc. II COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, ABCM – UFU, Uberlândia – MG 18 a 21 de maio de 2003.
- BEHOUEK, CINTULA, 2006: BEHOUEK, L., CINTULA, P., *Fuzzy logics as the logics of chains*, *Fuzzy sets and systems*, V157, p. 604-610, 2006.
- BISHOP, 2000: BISHOP, R.H; DORPH, R. *Sistemas de Controle Modernos*, São Paulo, Ed. LTC, 2000.

- BORTOLUSSI, 2001: BORTOLUSSI, R. *Análise Numérica e Experimental da Hidroconformação de Produtos Tubulares*. 2001. 122p. Tese (Doutorado) – FEM-UNICAMP - São Paulo, 2001.
- BORTOLUSSI & BUTTON, 2002: BORTOLUSSI, R., BUTTON, S. T., *Prediction of forming limits of tube hydroforming process – simulation and experiments*. In: The fifth International conference and works on numerical simulation of 3D sheet forming process 2002, Jeju, 2002.
- BRUNET, MORESTIN, 2001: BRUNET, M.; MORESTIN, F., *Experimental and analytical necking studies of anisotropic sheet metals*, Journal of Materials Processing Technology, V.112, p.214-226, 2001.
- CHENOT, FOURMENT, MOCELLIN, 2002: CHENOT, J. L.; FOURMENT, L.; MOCELLIN, K., *Numerical treatment of contact and friction in FE simulation of forming process*, Journal of Materials Processing Technology, V.125-126, p 45-52, 2002.
- DOHMANN & HARTL, 1996: DOHMANN, F., HARTL, Ch., *Hydroforming – a method to manufacture light-weight parts*, Journal of Materials Processing Technology, V. 60, p. 669-676, 1996.
- EICKMEIER et al.,1996: EICKMEIER, J.; VOGEL, H. R.; REICHERT, J.; REHM, M., *Some tribological and environmental aspects in metal drawing*, Tribology International, V.29, p193-197, 1996.
- GAO et al., 2002: GAO, L., MOTSCH, S., STRANO, M., *Classification and analysis of tube hydroforming processes with respect to adaptive FEM simulations*, Journal of Materials Processing Technology, V.129 p.261-267, 2002.
- HADDAD, VACHER, ARRIEUX, 1999: HADDAD, A.; VACHER, P.; ARRIEUX, R., *Numerical determination of forming limit diagrams of orthotropic sheets using the '3G' theory of plasticity*, Journal of Materials Processing Technology, V. 92-93 p. 419-423, 1999.
- HAJEK, 2006: HAJEK, P., *What is mathematical fuzzy logic* Fuzzy sets and systems V 157 p. 597-603, 2006.
- HOSFORD, 1993: GRAF, A., HOSFORD, W.F., *Calculations of forming limit diagrams for changing strain paths*. Metallurgical Transactions. A 24, p. 2497.

- HU & DEAN, 2000: HU, Z. M.; DEAN, T. A., *A study of surface topography, friction and lubricants in metal forming*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, V.40, p 1637-1649, 2000.
- HYUN & CHO, 1994: HYUN, B. S., CHO, H. S., *Prediction of forming pressure curve for hydroforming processes using artificial neural network*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I, Journal of system and control Engineering, V. 208 (2), p. 109-121, 1994.
- JOHNSON et al., 2004: JOHNSON, K. I., NGUYEN, B. N., DAVIES, R. W., GRANT, G. J., KHALEEL, M.A. *A numerical process control method for circular-tube hydroforming prediction*, International Journal of Plasticity, V. 20 p. 1111-1137, 2004.
- KIM & PARK, 2002: KIM, Y. H., PARK, J. J., *Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal*, Journal of Materials Processing Technology, V. 130-131, p. 42-46, 2002.
- KNOCKAERT et al., 2002: KNOCKAERT, R., CHASTEL, Y., MASSONI, E., *Forming limits prediction using rate-independent polycrystalline plasticity*, International Journal of Plasticity, V.18, p. 231-247, 2002.
- KOÇ, 2003: KOÇ, M., *Tribological Issues in the tube Hydroforming Process- Selection of a Lubricant for Robust Process Conditions for an Automotive Structural Frame Part*, Transactions of the ASME, V.125, p484-492, 2003.
- KOÇ & ALTAN, 2001: KOÇ, M.; ALTAN, T., *An overall review of the tube hydroforming (THF) Technology*, Journal of Materials Processing Technology, V.108 p.384-393, 2001.
- KOÇ et al., 2000: KOÇ, M., ALLEN, T., JIRATHERANAT, S., ALTAN, T., *The use of FEA and design of experiments to establish design guidelines for simple hydroformed parts*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, V. 40 p. 2249-2266, 2000.
- LAZZAROTTO et al., 1998: LAZZAROTTO, L., DUBAR, L., DUBOIS, A., RAVASSARD, P., BRICOUT, J. P., OUDIN, J., *A selection methodology for lubricating oils in cold metal forming processes*, Wear, V.215, p 1-9, 1998.
- LE, SUTCLIFE, 2002: LE, H. R.; SUTCLIFFE, M. P. F., *Measurements of friction in strip drawing under thin film lubrication*, Tribology International, V.35, p 123-128, 2002.
- LEE, KEUM, WAGONER, 2003: LEE, B. H.; KEUM, Y. T.; WAGONER, R. H., *Modeling of friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming*, Journal of Materials Processing Technology, V.130-131, p 60-63, 2003.

- LEI et al., 2003: LEI, L. P., KIM, J., KANG, S. J., KANG, B. S., *Rigid-plastic finite element analysis of hydroforming process and its applications*, Journal of Materials Processing Technology, V. 139 p. 187-194, 2003.
- LEI, KANG, KANG, 2001: LEI, L. P., KANG, S. J., KANG, B. S., *Prediction of forming limit in hydroforming processes using the finite element method and a ductile fracture criterion*, Journal of Materials Processing Technology, V. 113 p. 673-679, 2001.
- LEJEUNE, BOUDEAU, GELIN, 2003: LEJEUNE, A., BOUDEAU, N., GELIN, J. C., *Influence of material and process parameters on bursting during hydroforming process*, Journal Materials Processing Technology, V. 143-144, p.11-17, 2003.
- MA, CHEN, XU, 2006: MA, J., CHEN, S., XU, Y., *Fuzzy logic from the viewpoint of machine intelligence* Fuzzy sets and systems V 157 p. 628-634, (2006)
- MATHWORKS, 1992 a: MATLAB – Identification Toolbox - The Mathworks Inc., 1992.
- MATHWORKS, 1992 b: MATLAB – Non Linear Control Blockset - The Mathworks Inc., 1992.
- MONTMITONNET & CHENOT, 1995: MONTMITONNET, P.; CHENOT, J. L., *Introduction of anisotropy in viscoelastic 2D and 3D finite-element simulations of hot forging*, Journal of Materials Processing Technology, V.53 p.662-683, 1995.
- MOREIRA FILHO, 1998: MOREIRA FILHO, L. A., *Modelagem teórica e automatização de processo de conformação de junções em tubos metálicos de parede fina*, Tese de doutorado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Área de Materiais e Processos de Fabricação. Curso de Engenharia Aeronáutica e Mecânica. 1998.
- NBR- ISO 2768-1 Tolerâncias gerais - Parte 1.
- NBR 10068/1987 Folha de desenho – Leiaute e dimensões.
- NBR 10582/1988 Apresentação da folha para desenho técnico.
- NGAILE, JAEGER, ALTAN, 2004: NGAILE, G.; JAEGER, S.; ALTAN, T., *Lubrication in tube hydroforming (THF). Part I: Lubrication mechanisms and development of model tests to evaluate lubricants and die coatings in the transition and expansion zones*, Journal of Materials Processing Technology, V.146, p 108-115, 2004.
- NGAILE, JAEGER, ALTAN, 2004: NGAILE, G.; JAEGER, S.; ALTAN, T., *Lubrication in tube hydroforming (THF). Part II: Performance evaluation of lubricants using LDH test and pear-shaped tube expansion test* Journal of Materials Processing Technology, V.146, p 116-123, 2004.

- NOVAK, 2006: NOVAK, V., *Which logic is the real fuzzy logic?* Fuzzy sets and systems V157 p. 635-641, 2006.
- OGATA, 2003: OGATA, K., *Engenharia de Controle Moderno*, 4a Edição. São Paulo, Pearson, 2003.
- OYANE et al., 1980: OYANE, M., SATO, T., OKIMOTO, K., SHIMA, S., *Criteria for ductile fracture and their applications*, Journal of Mechanical Working Technology, V. 4, p. 65-81, 1980.
- PARK & CHO, 1995: PARK, H. J., CHO, H. S., *CMAC-based learning controller for pressure tracking control of forming processes*, ASME Journal of Engineering for Industry, V. 117, p. 197-303, 1995.
- PONCE & BATALHA, 2003: PONCE, A. S., BATALHA, G. F., *Conformação hidrostática de tubos e chapas*, In: VI CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS, 2003, Porto Alegre. VI Conferência Nacional de Conformação de Chapas, p. 165-176, 2003.
- RAMA et al., 2003: RAMA, S. C., MA, K., SMITH, L. M., ZHANG, J. M., *A two-dimensional approach for simulation of hydroforming expansion of tubular cross-sections without axial feed*, Journal of Materials Processing Technology, V. 141, p. 420-430, 2003.
- RAO, WEI, 2001: RAO, K. P.; WEI, J. J., *Performance of a new dry lubricant in the forming of aluminum alloy sheets*, Wear, V.249, p 86-93, 2001.
- RASP, WICHERN, 2002: RASP, W.; WICHERN, C. M., *Effects of surface-topography directionality and lubrication condition on friction behavior during plastic deformation* Journal of Materials Processing Technology, V.125-126, p 379-386, 2002.
- RAY & Mac DONALD, 2004: RAY, P., Mac DONALD, B. J., *Determination of the loading path for tube hydroforming processes using a fuzzy load control algorithm and finite element analysis*, Finite Element Analysis and Design, V. 41, p. 173-192, 2004.
- RIMKUS et al., 2000: RIMKUS, W., BAUER, H., MIHSEIN, M. J. A., *Design of load curves for hydroforming applications*, Journal of Materials Processing Technology, V. 108, p. 97-105, 2000.
- SAVOIE, J. et. al., 1998: SAVOIE, J., JAIN, M., CARR, A. R., WU, P.D., NEALE, K.W., ZHOU, Y., JONAS, J. J., *Predictions of forming limit diagrams using crystal plasticity models*, Materials Science and Engineering A257 p.128-133, 1998.

- SIEGERT et al., 2000: SIEGERT, K., HÄUSSERMANN, M., LÖSCH, B., RIEGER, R., *Recent developments in hydroforming technology*, Journal of Materials Processing Technology, V.98, p. 251-258, 2000.
- SILVEIRA & SANTOS, 1999: SILVEIRA, P. R., SANTOS, W. E., *Automação e Controle Discreto*, 2^a Edição. p 21, 23, 34, 90, 92.
- SCHMOECKEL et al., 1999: SCHMOECKEL, D., HIELSCHER, C., HUBER, R., GEIGER, M., *Metal forming of tubes and sheets with liquid and other flexible media*, In: Annals of the CIRP, V. 48, p.497-513, 1999.
- SCHULER, 1998: SCHULER, Metal Forming Handbook, Alemanha. Ed. Springer, 1998.
- SMITH et al., 2003: SMITH, L. M., AVERILL, R. C., LUCAS, J. P., STOUGHTON, T. B., MATIN, P. H., *Influence of transverse normal stress on sheet metal formability*, International Journal of Plasticity, V. 19, p. 1567-1583, 2003.
- SOFOGLU, GEDIKLI, 2002: SOFOGLU, H.; GEDIKLI, H., *Determination of friction coefficient encountered in large deformation processes*, Tribology International V.35, p. 27-34, 2002.
- STEINHOFF, RASP, PAWELSKI, 1996: STEINHOFF, K.; RASP, W.; PAWELSKI, O., *Development of deterministic-stochastic surface to improve the tribological conditions of sheet forming processes*, Journal of Materials Processing Technology, V.60, p. 355-361, 1996.
- STOUGHTON, 2002: STOUGHTON, T. B., *A non-associated flow rule for sheet metal forming*, International Journal of Plasticity, V. 18, p. 687-714, 2002.
- VOLLERTSEN & PLANCAK, 2001: VOLLERTSEN, F.; PLANCAK, M., *On possibilities for determination of the coefficient of friction in hydroforming of tubes*, Journal of Materials Processing Technology, V.125-126, p. 412-420, 2002.
- WU, 2002: WU, H. C., *Anisotropic plasticity for sheet metals using the concept of combined isotropic-kinematic hardening*, International Journal of Plasticity, V.18, p. 1661-1682, 2002.
- WU & YU, 1996: WU, L., YU, Y., *Computer simulations of forming automotive structural parts by hydroforming processes*, In: Proceedings of the International conference NUMISHEET'96, Dearborn, MI, p. 324-329, 1996.

- YAO & CAO, 2002: YAO, H., CAO, J., *Prediction of forming limit curves using an anisotropic yield function with pre-strain induced backstress*, International Journal of Plasticity, V. 18, p. 1013-1038, 2002.
- ZADEH, 1975: ZADEH, L., *Fuzzy logic and its application to approximate reasoning* Information Processing V 74 p. 591-594, 1974.

ANEXO – I

DESENHOS TÉCNICOS