

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Estratégias de Conformação de Tubos Metálicos através de
Hidroconformação**

**Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia**

**André Simiema Ceschin
Henrique Ponse Cardoso**

Orientador: Gilmar Ferreira Batalha

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica**

**São Paulo
2002**

AGRADECIMENTO ESPECIAL

Ao Prof. Dr. GILMAR FERREIRA BATALHA, pela dedicação e competência com que orientou este trabalho, manifestamos nosso agradecimento.

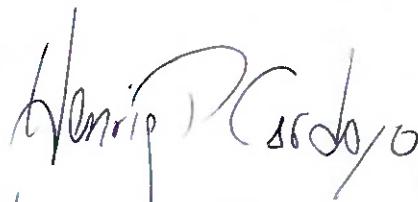
Aos nossos pais e amigos.

AGRADECIMENTO

Agradecemos a mestrande Cristiane Santoni pelo apoio na revisão bibliográfica e fundamentação teórica neste trabalho.



André Simiema Ceschi



Henrique Pôrto Cardoso

de acordo,
Cristiane Santoni

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha pelas diretrizes seguras e permanente incentivo.

Aos nossos pais e amigos que nos apoiaram durante todo os anos de estudos na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e na produção deste trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE SÍMBOLOS.....	10
RESUMO.....	11
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVO.....	2
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE HIDROCONFORMAÇÃO	4
3.2 APLICAÇÕES ATUAIS DA HIDROCONFORMAÇÃO	8
3.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO PROCESSO	10
3.3.1 Vantagens.....	11
3.3.2 Desvantagens	12
3.4 PARÂMETROS DO PROCESSO DE HIDROCONFORMAÇÃO DE TUBOS	13
3.4.1 Material e Formabilidade do Tubo	14
3.4.2 Projeto da Matriz	19
3.4.3 Prensas para Hidroconformação	20
3.4.4 Defeitos Comuns na Hidroconformação de Tubos.....	23
3.4.5 Estimativa da Pressão Interna na Hidroconformação.....	31
3.4.6 <i>Estudos dos Diferentes Meios Transmissores de Energia</i>	33
3.4.7 <i>Aspectos Tribológicos na hidroconformação</i>	35
3.5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM TESTE DE ABAULAMENTO COM PRESSÃO INTERNA E COMPRESSÃO AXIAL	45
3.5.1 Comparação entre um teste real e uma simulação numérica.....	46

3.5.2	Estudo dos Efeitos dos Parâmetros Individuais na Estabilidade da Pressão 48	
3.5.3	Verificação Experimental da Espessura da Peça Final.....	49
4	DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	51
4.1	METODOLOGIA	51
4.2	MÉTODOS DE ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	53
4.3	MATRIZ E FERRAMENTAL	54
4.4	ESPECIFICAÇÃO DO TUBO PARA EXPERIMENTO	58
5	CRONOGRAMA DE TRABALHO	60
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	62
6.1	RESULTADOS PRELIMINARES E PROBLEMAS DE VEDAÇÃO.....	62
6.1.1	<i>Dados sobre os resultados obtidos</i>	<i>64</i>
6.2	RESULTADOS COM A UTILIZAÇÃO DE NEOPRENE COMO MEIO TRANSMISSOR DE ENERGIA.....	65
6.2.1	<i>Dados Sobre Os Resultados Obtidos</i>	<i>67</i>
7	CONCLUSÃO.....	68
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

Lista de Figuras

Figura 1 – Variâncias do processo de hidroconformação: a) hidroformação livre; b) matriz dividida transversalmente; c) matriz dividida longitudinalmente.	5
Figura 2 – Seqüência do processo de hidroconformação. [1]	5
Figura 3 - Curvas características do processo de hidroconformação. [1]	7
Figura 4 – Forças atuantes no processo de hidroconformação. ([2], p. 26).	8
Figura 5 – Tipos de componentes fabricados por hidroconformação.	9
Figura 6 – Componentes do processo de hidroconformação. ([2], p. 27)	14
Figura 7 – Estratégia de desenvolvimento de processo incluindo simulações computacionais na hidroconformação de tubos. ([2], p. 32)	17
Figura 8 – (a) teste de expansão; (b) testes cônicos para tubos. ([2], p. 32)	18
Figura 9 – Teste de abaulamento. ([2], p. 27)	19
Figura 10 – Conceito de prensas de hidroconformação. ([2], p. 31)	21
Figura 11 - Prensa de hidroconformação.	22
Figura 12 – Falhas comuns no processo de hidroconformação. A) enrugamento; B) flambagem; C) ruptura.	26
Figura 13 - Relações entre distância axial x , pressão hidráulica p , e a altura da deformação h .	34
Figura 14 - Resultado da conformação com insuficiência de lubrificante [4].	36
Figura 15 – Principais zonas de atrito. ([2], p. 29)	37
Figura 16 - ferramenta para análise do atrito no processo de alargamento parcial [4].	39
Figura 18 – Influência da Velocidade de deslocamento. [4]	42
Figura 19 – Influência do deslocamento. [4]	44
Figura 20 - Princípio de operação da matriz experimental.	46
Figura 21 – Variação na força axial no experimento e na simulação durante o primeiro processo de hidroconformação.	47
Figura 22 – Variação na pressão da força axial no experimento e na simulação durante o segundo processo de hidroconformação.	48

Figura 23 - (a) Tubo hidroconformado; (b) Medidas da espessura da peça final ao longo do tubo.	50
Figura 24 – Pontos de medição de deformação e espessura do tubo conformado.	53
Figura 25 – Dispositivo experimental para ensaio de hidroconformação.	56
Figura 26 – Conjunto mostrado de forma “explodida”.	57
Figura 27 – Conjunto pronto para ser utilizado para a realização de um ensaio.	57
Figura 28– Tampas com vedação utilizadas nos ensaios.	58
Figura 29 – Fluxograma de Trabalho.	60
Figura 30 – Conjunto montado das tampas de vedação com o tubo, após a realização de um ensaio.	62
Figura 31 – Tubos após a realização de ensaios.	63
Figura 32 – Parâmetros envolvidos no estudo.	64
Figura 33 – Esquema da propriedade do Neoprene.	66
Figura 34 – resultado final com a utilização de Neoprene.	66

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Tempos de processo para diversas peças ([1], p. 429).	10
Tabela 2 – Comparação entre produção do sistema de exaustão por processo convencional e por hidroconformação ([1], p. 430).	11

Lista de símbolos

D – diâmetro do tubo

s, t – espessura da parede do tubo

L – comprimento (livre) do tubo

E – módulo de elasticidade do material

E_t – módulo tangencial do material

σ - tensão normal

σ_θ - tensão tangencial

σ_z – tensão axial

σ_{yp} – tensão de escoamento do material

σ_{cr} - tensão crítica de flambagem

τ - tensão de cisalhamento

F_{cr} - força crítica de flambagem

ε - deformação

ε_r – deformação radial

ε_t – deformação da espessura

ε_θ - deformação tangencial

ε_z - deformação axial

n – expoente de encruamento do material

ν - coeficiente de Poisson

P_i – pressão interna

F_a – força axial

μ - coeficiente de atrito

RESUMO

A hidroconformação é um processo de conformação relativamente novo que vem sendo cada vez mais inserido em processos de fabricação industriais. O método baseia-se em conformar peças metálicas utilizando um fluido como transmissor de energia e, deste modo, produzir peças com excelentes propriedades mecânicas.

Neste trabalho foi utilizado como material de estudo um tubo de alumínio ABNT 6063 T5 sem costura. Este foi ensaiado em um típico teste de abaulamento, onde o objetivo foi abaular o comprimento livre do tubo e fazer algumas medidas da espessura do tubo ao longo do seu comprimento.

Os resultados não foram de acordo com o esperado e pode-se observar o fenômeno de flambagem nos testes devido ao vazamento localizado na vedação entre o tubo e as tampas. Foi utilizado um meio sólido para a transmissão de energia – neoprene – mas, o resultado não foi de acordo com o esperado.

Palavras Chave: conformação mecânica, deformação plástica e teste de abaulamento.

ABSTRACT

The hydroforming is a relatively new forming process that nowadays comes more and more present in processes of manufacture. This process is based on forming tube or sheet metal parts using a fluid as energy transmitting medium to produce workpieces with excellent mechanical properties.

In this work it was used an aluminum ABNT 6063 T5 tube as experimental material. It was tested in a self developed tube bulge test, with the objective of deform the free length of the pipe and measure of the thickness distribution along of its length.

Some problems were as wrinkles lack leakage between the pipe and the caps were discussed, with the aim of an optimization of the tooling development.

The alternatives proposals to solve the problem could be, for example, the use of a solid material for the energy transmission.

Keywords: bulge test, plastic deformation and mechanical forming.

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais objetivos da indústria de processamento de metais é a minimização de seus custos e otimização de seus produtos quanto ao peso e características de resistência mecânica. Na busca de processos de produção alternativos, a hidroconformação, processo de fabricação de peças com geometrias complexas através de fluido pressurizado, têm-se mostrado grande potencial técnico e econômico para os fabricantes.

A crescente necessidade da indústria automobilística de produzir veículos cada vez mais leves contribui para o incentivo à pesquisa na área de hidroconformação, visando a fabricação de peças usando esta tecnologia.^[2] Graças aos avanços nos campos de projeto e controle de dispositivos, a hidroconformação tornou-se uma alternativa economicamente viável para vários processos de estampagem. A disponibilidade de sistemas hidráulicos de alta pressão é essencial para permitir a produção em massa através de hidroconformação. É importante ressaltar que a hidroconformação é economicamente viável apenas para aplicações industriais com alto volume de produção, devido ao custo elevado das máquinas e matrizes utilizadas no processo.

A hidroconformação é um processo relativamente recente, portanto não há ainda uma base tecnológica bem desenvolvida que sirva de fundamento para engenheiros de processo e de produto.

2 OBJETIVO

Este trabalho de formatura tem como objetivo estudar os parâmetros do processo de hidroconformação, tais como pressão interna e força axial, atuantes no resultado da conformação para expansão do diâmetro central (abaulamento) de tubos metálicos.

Para este estudo, será utilizado um dispositivo adaptado. Constituído de um cilindro hidráulico, uma prensa hidráulica e água como fluido de transmissão de pressão. O processo de hidroconformação será aplicado a tubos de alumínio, com espessura aproximada de 0,8 mm e diâmetro externo de 25,4 mm. Deseja-se verificar os níveis de deformação atingidos, com base no máximo diâmetro de abaulamento possível com o processo, os tipos de defeitos e falhas, como ruptura, flambagem ou enrugamento do tubo decorrentes das condições de conformação, e a distribuição de espessura ao longo do comprimento do tubo ao final do processo. Além disso, espera-se levantar a repetitibilidade dos resultados obtidos com este processo hidroconformação (campos de tolerância) e os tempos de fabricação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA^[19]

O livro "Metal Forming Handbook", de T. Altan^[1], em seu capítulo 5, e o artigo "Tube hydroforming: state-of-the-art and future trends", de M. Ahmetoglu e T. Altan^[2], fornecem os mais completos textos sobre os fundamentos da tecnologia de hidroconformação, principalmente sobre tubos. Também discutem como os diversos parâmetros como: propriedades do material do tubo; geometria pré-formada; lubrificação e controle do processo afetam a qualidade e projeto do produto final.

Outro artigo usado como referência, "Prediction of forming limits and parameters in the tube hydroforming process", de autoria de T. Altan e M. Koç^[3], trata da determinação dos parâmetros e limites de processo para hidroconformação. O texto é conduzido através de teorias para tubos de parede fina, plasticidade e membrana. Neste artigo, previsões analíticas foram comparadas com resultados experimentais, verificando-se os principais defeitos observados no processo experimental, como flambagem, enrugamento e ruptura, como também foram monitoradas as forças axiais, a pressão interna, a força do punção de contra pressão e a redução da espessura da parede do tubo.

O artigo "Tribologie der Innenhochdruckumformung", de F. DOHMANN e W. MEYER^[4], relatam sobre experimentos do tribossistema "hidroconformação" e mostra, através de exemplos, a influência dos parâmetros escolhidos no atrito. O exemplo usado foi o processo de alargamento parcial em formato 'T'. Os experimentos foram realizados no laboratório para processos de produção por conformação da universidade de Paderborn graças ao apoio da comunidade alemã de pesquisa (DFG).

Como referência mais específica para o estudo do tipo de hidroconformação a ser analisado neste trabalho cita-se o artigo "Numerical simulation of rotational symmetric tube bulging with inside pressure and axial compression", de Janez Pipan e Franc Kosel^[16]. Este artigo indica a vantagem da superposição de compressão axial e pressão interna na hidroconformação para um estado de tensão mais favorável, maiores níveis

de deformação e menor diminuição da espessura da peça conformada. Além disso, esta referência indica comparação entre simulações computacionais com modelo de elementos finitos e resultados experimentais de ensaios em laboratório, trazendo boas indicações de parâmetros, como características geométricas dos corpos de prova ensaiados, esforços aplicados no processo e situações com risco do surgimento de falha, servindo para o direcionamento da parte experimental deste trabalho de formatura.

Além destes, outros artigos a respeito do tema contribuíram para a formação deste relatório, e encontram-se citados nas referências bibliográficas.

3.1 Descrição do Processo de Hidroconformação

Hidroconformação é um processo de conformação plástica a frio, que utiliza um fluido como modo de transmissão de energia. Esta técnica é utilizada para dar forma a tubos e/ou chapas. Consiste em colocar um tubo ou chapa num molde fechado e em seguida injetar um fluido a alta pressão. O fluido exerce uma força no tubo, que desta forma atinge o seu domínio plástico, deformando-se até as cavidades do molde e atingindo a sua forma final. O processo engloba em geral três etapas: expansão, compressão e calibração.^[1] Esta tecnologia pode ser utilizada em peças de aço e alumínio, contribuindo para reduzir o peso e o custo das mesmas.

Existem diferenças significativas entre a hidroconformação livre e a hidroconformação usando matrizes fechadas.^[1] (figura - 1)

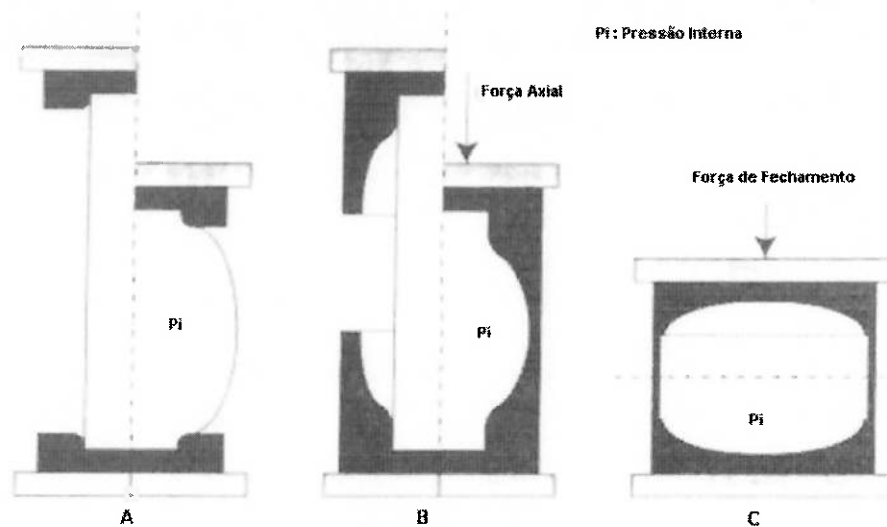


Figura 1 – Variâncias do processo de hidroconformação: a) hidroformação livre; b) matriz dividida transversalmente; c) matriz dividida longitudinalmente.

Segundo os autores^{[1],[2]}, o processo típico de hidroconformação pode ser ilustrado através da figura 2.

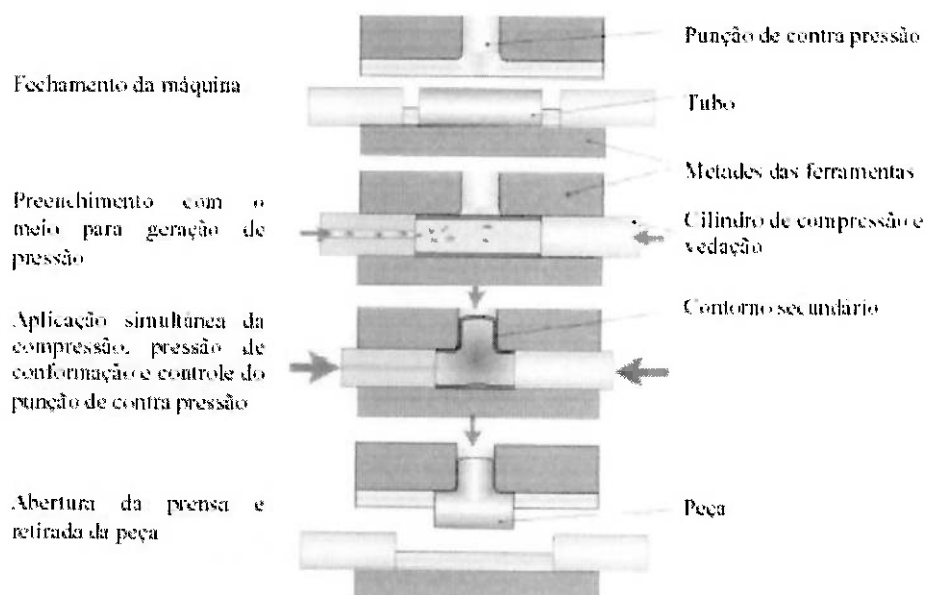


Figura 2 – Sequência do processo de hidroconformação. [1]

O exemplo utilizado é a produção de uma junta "T". Uma prensa hidráulica especial é equipada com uma matriz de duas partes com múltiplas finalidades. Dependendo da peça, as matrizes podem ter dois cilindros hidráulicos horizontais vedantes, posicionados axialmente em relação às extremidades do tubo, e um cilindro superior vertical. A parte tubular pré-formada é posicionada na matriz inferior e a parte superior é então fechada. A pressão interna do fluido é aumentada após o fechamento da matriz, forçando o material para a zona de deformação. As extremidades do tubo são vedadas pelos cilindros horizontais, e o interior do tubo é preenchido com fluido sob pressão. Na verdadeira etapa de conformação, os cilindros comprimem o tubo, enquanto a pressão interna provoca a expansão da peça até as paredes desta entrarem em contato com os contornos da matriz. O cilindro vertical controla simultaneamente o fluxo de material dentro da matriz. Durante este processo, a pressão interna e a força axial devem ser controladas simultaneamente para melhorar a capacidade de conformação do material. A pressão de calibração conforma a peça de tal maneira que o contorno desta corresponda àquele da matriz, com a precisão requerida. Finalmente, a matriz é aberta e a peça final retirada. As curvas características dos parâmetros do processo de hidroconformação (figura - 3) são utilizadas para controlar o processo de conformação.

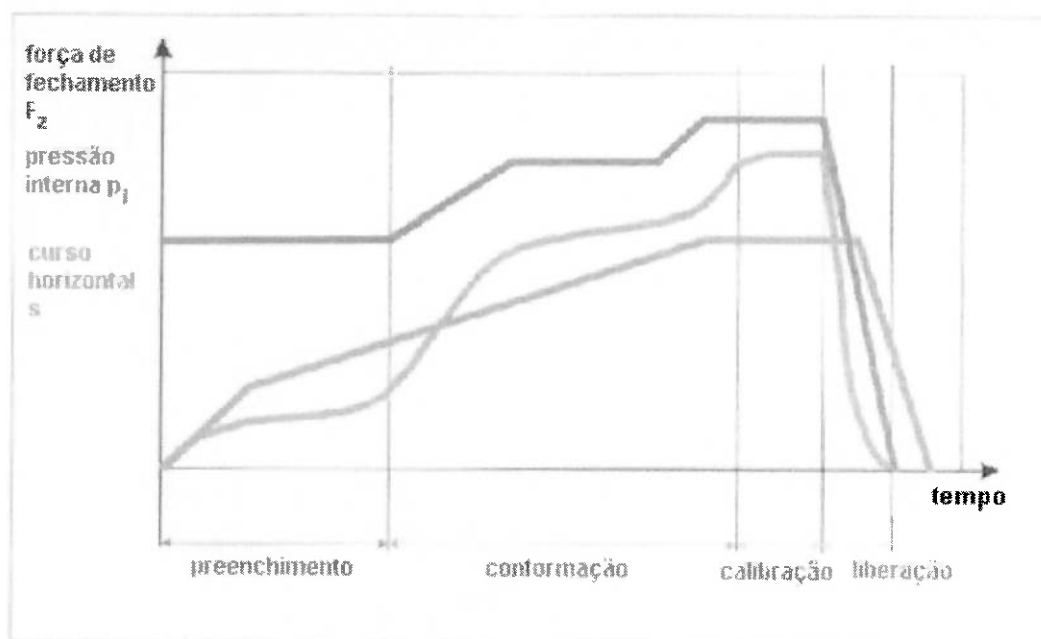


Figura 3 - Curvas características do processo de hidroconformação. [1]

Deve-se lembrar que são requeridas altas pressões internas para conformar cantos com pequeno raio. Ao final do processo, a calibração, ou seja, a etapa que vai desde o contato da peça com a matriz até sua conformação na geometria final, ocorre pela expansão do material nos cantos com pequeno raio devido à pressão interna. Por outro lado, pelo fato da pressão interna ser elevada, não é possível levar mais o material à zona de deformação devido ao surgimento de altas forças de atrito.

A figura 4 mostra as principais forças envolvidas no processo de hidroconformação de um tubo. No processo de hidroconformação em matriz fechada, as forças de conformação atuantes são exercidas tanto pelos elementos da matriz como pela pressão interna. A expansão surge sob fluxo axial de material, o qual é acompanhado por compressão na direção radial ou axial.

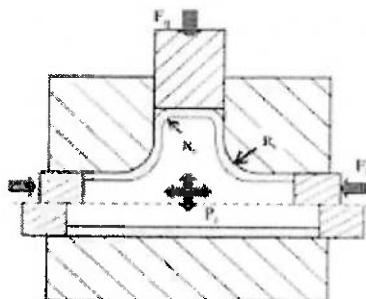


Figura 4 – Forças atuantes no processo de hidroconformação. ([2], p. 26).

Há outras versões do processo de hidroconformação nas quais usa-se fluido a baixa pressão durante o fechamento da matriz, levando o material aos cantos da matriz e possibilitando a formação geometrias com raios relativamente pequenos, com uma menor variação da espessura do tubo e menor pressão interna.^[2]

Após a hidroconformação, a peça conformada apresenta uma alta estabilidade dimensional e altos valores de resistência mecânica. Resultante do estado tri-axial de tensão, combinado com um elevado componente hidrostático de tensão. Quando é comparado o processo de hidroconformação com o processo de estampagem, o primeiro atinge maiores níveis de deformação.^[1]

3.2 Aplicações Atuais da Hidroconformação

Com base principalmente na geometria da peça e atrito existe uma diferença básica com relação aos componentes hidroconformados, pelo fato deste processo permitir as seguintes condições:

- Expansão e compressão contínuas;
- Expansão e compressão apenas parciais;
- Apenas calibração.

Os componentes sujeitos a expansão e compressão caracterizam-se por alto grau de deformação devido ao fluxo axial de material presente em todo o contorno da peça. Enquanto aqueles formados por expansão e compressão parciais, juntamente com calibração local, caracterizam-se por abaulamentos distribuídos localmente. O fluxo axial de material, resultante da compressão, tem efeito apenas nas extremidades da peça. Finalmente, no caso de peças formadas por pura calibração, não é possível aplicar forças axiais. A conformação resulta apenas pela alteração da espessura da parede da peça.

Diversas aplicações da hidroconformação de tubos podem ser encontradas, por exemplo: nas indústrias aeronáuticas, automotivas e de tubos e conexões. Pode-se citar aplicações automotivas em peças do sistema de exaustão, eixo de comando de válvulas, partes do radiador, eixos dianteiros e traseiros, virabrequins, estruturas de assento e estruturas da carroceria.^[2] A figura seguinte ilustra as variedades de componentes que podem ser obtidos através da tecnologia de hidroconformação.



Figura 5 – Tipos de componentes fabricados por hidroconformação.

3.3 Vantagens e Desvantagens do Processo

Em qualquer comparação entre o processo de hidroconformação e outros processos, como fundição, estampagem, forjamento ou união de tubos dobrados, deve-se considerar todos os aspectos econômicos e técnicos. Quantidade de etapas de processo necessárias antes e depois, bem como as propriedades da peça final, também devem ser incluídas nesta avaliação. A produção de componentes por hidroconformação pode parecer inviável economicamente para pequenos volumes de produção, quando se levam em conta apenas o custo de fabricação e o tempo de processo. No entanto, comparando-se as propriedades técnicas da peça hidroconformada com àquelas fabricadas por outros processos, a desvantagem inicial não é mais tão relevante. Nos casos de produção em média e alta escala, as vantagens da hidroconformação podem ser tão grandes que eliminam qualquer consideração para o uso de outra técnica de conformação similar.

Tabela 1 – Tempos de processo para diversas peças ([1], p. 429).

Componente	Automação	Peças por ciclo	Tempo de processo
Tubo do sistema de exaustão	Sim	2 - 4	15 – 20 s
Peça lateral para pick-up	Sim	2	40 s
Barra do painel de instrumentos	Sim	1	35 s
Juntas "T"	Sim	Mais de 25	13 s

A tabela abaixo traz uma comparação entre a fabricação de um sistema de exaustão por um processo convencional e por hidroconformação.

Tabela 2 – Comparação entre produção do sistema de exaustão por processo convencional e por hidroconformação ([1], p. 430).

	Produção convencional	Produção por hidroconformação
Número de partes individuais	17	9
Vida útil da peça	700 – 1000 h	Mais de 1500 h
Custos de manufatura	100%	85%
Tempo de desenvolvimento	100%	33%
Tipo de flange	Vários	Único
Peso	100%	100%
Refugo	-	Menos de 0,5%

3.3.1 Vantagens

O processo de hidroconformação de tubos apresenta, portanto, muitas vantagens frente aos tradicionais processos de fabricação por estampagem e soldagem. Nas referências^{[1],[2]} relatam-se as seguintes **vantagens** industriais do processo de hidroconformação:

- Redução da possibilidade de corrosão por menor quantidade de regiões soldadas;
- Permite alcançar espessuras uniformes;
- Material com maior resistência mecânica, como consequência das deformações plásticas;
- Permite a substituição de peças fabricadas de forma independente e soldadas entre si, por uma operação única, sem soldas, a partir de uma peça oca;

- Redução de peso devido a maior eficiência no projeto da seção transversal, consegue-se conformar peças com menor espessura em comparação com fundição e outros processos;
- Aumento da resistência estrutural e tenacidade;
- Menor custo de ferramentas;
- Redução nas operações secundárias (não se requer soldagem de seções e furos podem ser feitos durante o processo de hidroconformação);
- Pequenos campos de tolerância e baixa relaxação;
- Usando-se a mesma matriz consegue-se usar e testar tubos de diferentes espessuras e diâmetros iniciais, dentro de certos limites, permitindo a otimização destes parâmetros;
- Redução de refugo de material (praticamente não há retirada de material da peça).

3.3.2 Desvantagens

Os autores^{[1],[2]} listam também algumas **desvantagens** do processo de hidroconformação:

- Alto custo do equipamento;
- Falta de conhecimento tecnológico e experimental suficiente para fundamentar o projeto do processo e de ferramentas.

O deslocamento de grandes volumes de fluido para a abertura e fechamento das matrizes, a movimentação da peça para montagem e desmontagem dentro da matriz e a pressurização dos tubos são alguns fatores que causam lentidão ao tempo de processo. No entanto, o fator principal de limitação de produção é a operação anterior de dobramento ou pré-formação.

Assim, a viabilidade do processo de hidroconformação frente aos processos convencionais de estampagem e soldagem deve ser estudada, tanto economicamente como mecanicamente, para cada peça em separado.

A redução do ciclo de tempo de fabricação de uma peça por hidroconformação muitas vezes envolve a integração de operações secundárias, como flexão do tubo e perfurações, dentro do próprio processo de hidroconformação.

3.4 Parâmetros do Processo de Hidroconformação de Tubos

Os componentes de um sistema típico de hidroconformação são ilustrados através da figura 6. Estes componentes variam desde a geometria inicial do tubo e o material do mesmo até a qualidade do produto final, ou seja, distribuição de espessura e precisão dimensional. Cada um destes componentes tem um importante papel na eficácia do processo e devem ser levados em conta durante a etapa de desenvolvimento do projeto. Alguns dos principais tópicos são:

- Preparação dos tubos (seleção do material, qualidade do tubo inicial);
- Projeto do pré-formado e método de fabricação;
- Projeto da peça para hidroconformação;
- Soldagem e união dos componentes hidroconformados;
- Performance em impacto e tenacidade das junções;
- Seleção do lubrificante, o qual deve manter suas propriedades mesmo sob altas pressões.

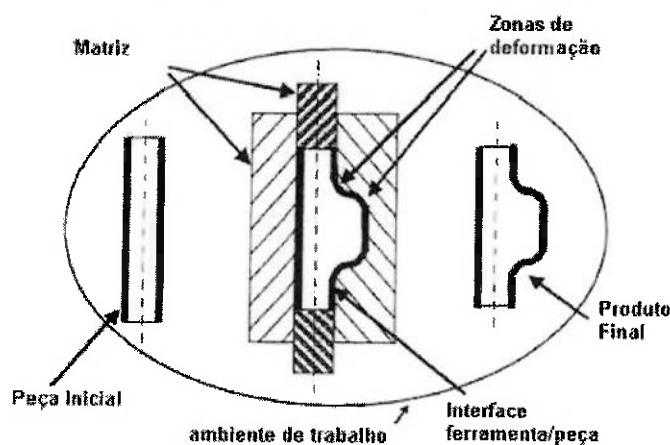


Figura 6 – Componentes do processo de hidroconformação. ([2], p. 27)

3.4.1 Material e Formabilidade do Tubo

Muitos fatores são importantes para a seleção do material do tubo para hidroconformação, incluindo as propriedades da peça final, processo de formação e capacidade de deformação, disponibilidade e custo. Por exemplo, pode-se usar aço HSLA (alta resistência baixa liga) para reduzir o peso da peça, sem prejudicar a tenacidade em componentes estruturais. Por outro lado, este material é caro e relativamente de difícil conformação. Alguns materiais usados em hidroconformação são aços baixo carbono (SAE 1006/1008, 1010) e HSLA para carroceria e chassis, aços temperados (SAE 1015, SAB 1045) para comando de válvulas e eixos de transmissão, aços inoxidáveis (AISI 304, AISI 309) para componentes de exaustão, ligas de alumínio (AA 1050, AA 5019, AA 6260) para aplicações em carroceria e chassis também, e cobre para juntas “T” e outros.^[2]

A altura máxima atingível na conformação de um abaulamento em uma peça tubular reta é notavelmente maior do que em uma peça pré-flexionada, pelo fato do deslocamento do material nesta última estar limitado pela geometria da parte flexionada.^[1] Em princípio, deve-se evitar cantos

muito agudos e bordas no projeto de um componente hidroconformado. Os raios de curvatura devem ser ajustados de acordo com a espessura da parede, ressaltando que a conformação de peças de maior espessura de parede exige a disponibilidade de maiores pressões internas. Aconselha-se prever transições arredondadas e suaves entre diferentes seções transversais da peça, observando as limitações do projeto.

A qualidade do tubo inicial é extremamente importante para o sucesso do processo de hidroconformação. As propriedades do material, como composição, tipo de solda, tensão de escoamento, tensão de ruptura, alongação percentual, e as dimensões - diâmetro e espessura principalmente - devem ser determinados com base nas especificações da peça final e precisam ser monitoradas durante o processo de fabricação. Basicamente os mesmos materiais usados para outros processos de conformação a frio, como estampagem profunda, são adequados para uso em hidroconformação. Normalmente, o material deve ter uma microestrutura de grãos refinados e ser tratado com um leve recozimento. Os melhores resultados de conformação são conseguidos em materiais com alto grau de máxima alongação. Para atingir deformação plástica total em toda a peça e, conseqüentemente, para reduzir a relaxação, o perímetro do tubo deve ser ligeiramente menor do que a geometria da matriz em cada seção transversal.

A fabricação e pré-formação do tubo provocam um efeito de encruamento que deve ser eliminado em algumas peças através de recozimento antes do processo de hidroconformação. Se os limites de formabilidade do material forem ultrapassados durante alguma etapa de produção, a conformação deve ser realizada progressivamente, com recozimento intermediário. Esta solução de tratamento térmico, no entanto, envolve custos adicionais e só deve ser aplicada quando todas as outras possibilidades, como otimização do projeto ou alteração do material utilizado, não forem mais possíveis. O método de tratamento térmico mais favorável depende de cada caso, de acordo com o tipo de aço utilizado (austenítico ou ferrítico) e o histórico de formação do material.

Assim, as condições de conformação e os limites de deformação precisam ser determinados no desenvolvimento da peça e do processo, para se evitar defeitos de conformação (ver item 3.4.4 Defeitos Comuns na Hidroconformação de Tubos). As estimativas iniciais dos parâmetros podem ser obtidas através de cálculos analíticos ou de simulações computacionais. Há vários pacotes de *softwares* capazes de simular o processo de hidroconformação, por exemplo, programas de elementos finitos como INDEED, LS-DYNA e PAM-STAMP.^[2] A simulação computacional pode auxiliar o projeto no período inicialmente posterior a definição da peça, com intuito de analisar inicialmente as deformações para evitar áreas críticas na peça, até em processos mais adiante, para ajustar com mais detalhes os parâmetros do processo e o projeto da ferramenta. Para se obterem resultados confiáveis nas simulações computacionais, é necessário fornecer dados precisos do material, como tensão de escoamento, espessura, diâmetro e anisotropia, e informações do processo, como pressão interna, força axial, força de contra pressão e atrito.^[2] A figura 7 traz um exemplo de estratégia de desenvolvimento completo de processo para hidroconformação.

Além disso, limites de conformação determinados em ensaios de laboratório podem ser usados eficientemente em simulações computacionais para identificação de áreas críticas na hidroconformação e corrigi-las antes de iniciar o demorado e custoso desenvolvimento do processo.

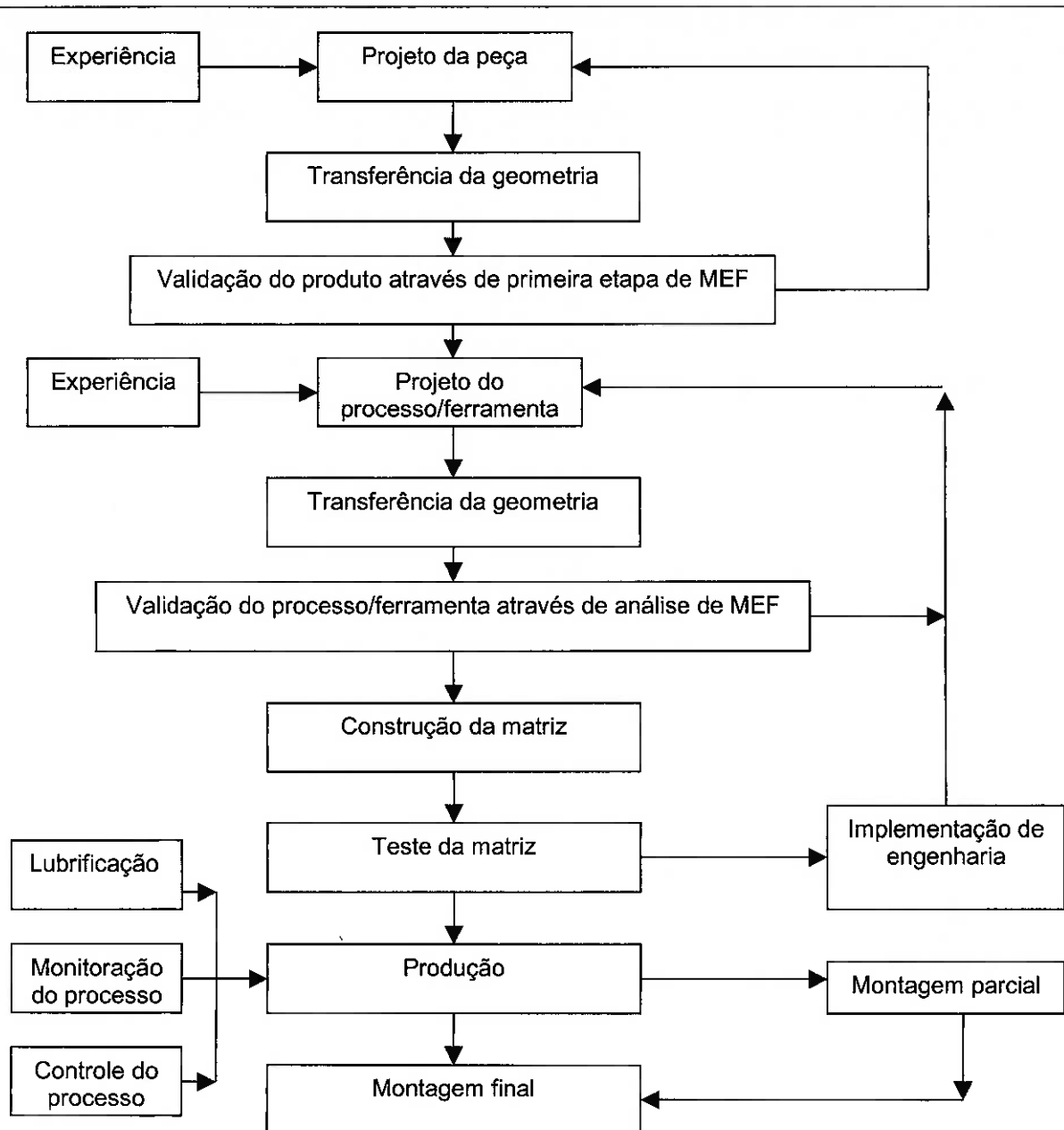


Figura 7 – Estratégia de desenvolvimento de processo incluindo simulações computacionais na hidroconformação de tubos. ([2], p. 32)

Muitos testes são usados na indústria para a determinação das propriedades do material. O mais difundido deles é o teste de tração,

realizado em corpos de prova planos retirados das chapas, antes destas serem formadas em tubo. Porém, devido ao encruamento durante a fabricação, flexão e pré-formação do tubo antes deste entrar no processo de hidroconformação, ocorrem mudanças no material e parte de sua formalidade já foi usada. Assim, é necessário determinar as propriedades do material na etapa que antecede a hidroconformação. Dentre estes testes, encontram-se testes de expansão e testes de cone, mostrados na figura 8. Estes testes, apesar de fornecerem alguma informação a respeito da elongação do tubo, ficam limitados devido ao atrito gerado na interface entre o tubo e a ferramenta usada para expandi-lo.

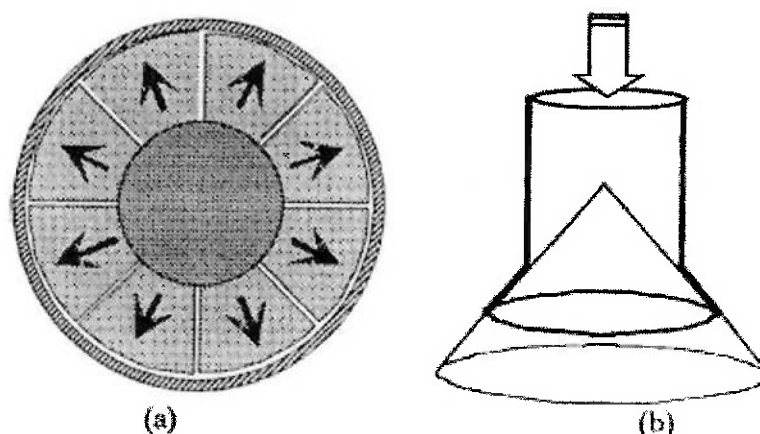


Figura 8 – (a) teste de expansão; (b) testes cônicos para tubos. ([2], p. 32)

Um outro procedimento que proporciona a obtenção de resultados mais realistas a respeito das propriedades do material, por ser um teste que se aproxima das características do processo de hidroconformação. Trata-se do **Teste de Abaulamento**^[2] (Hydraulic Bulge Test), ilustrado na figura 9. Neste teste, o tubo é fixado em ambas as extremidades e expandido livremente através de pressão hidráulica interna. Este teste permite avaliar o material sob condição de deformação bi-axial pura, sem força axial aplicada. Outros

testes tornam-se necessários para avaliar condições como aplicação de forças axiais juntamente com a pressão interna atuante.

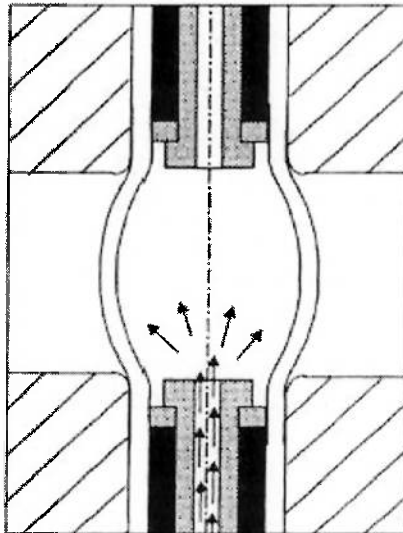


Figura 9 – Teste de abaulamento. ([2], p. 27)

3.4.2 Projeto da Matriz

No que se refere à definição da matriz para o processo de hidroconformação, um ponto importante é chegar a uma matriz que permita flexibilidade para implementação da geometria requerida do componente, bem como o ajuste dos diversos atuadores, como cilindros horizontais ou outras ferramentas que estejam incluídas no processo^[19]. O objetivo é minimizar custos, tempos de troca de ferramental e tempo requerido para manutenção. Além disso, durante a fase de desenvolvimento, torna-se possível realizar o processo usando-se tubos de diferentes materiais e espessuras sem alterar a matriz, permitindo testes com várias geometrias pré-formadas com o mínimo de custo e trabalho. As etapas usuais desde o protótipo da ferramenta até sua versão para produção em série são^[1]:

- Desenvolvimento da geometria básica do componente ou peça;

- Integração de operações suplementares, como punção de furos;
- Produção de peças e partes adicionais à matriz original.

Os seguintes parâmetros influenciam na seleção do material do ferramental e do revestimento ou tratamento superficial necessário:

- Geometria do componente ou peça a ser hidroconformada;
- Material da peça;
- Pressão interna máxima durante o processo;
- Sistema de vedação;
- Aplicação (prototipagem ou produção em massa).

3.4.3 Pressas para Hidroconformação

As principais funções de pressas para hidroconformação são abrir e fechar a matriz, prover a força de aperto durante o processo de conformação para evitar deflexões elásticas e separação das matrizes. Em geral, a prensa deve ser capaz de fornecer altas forças de aperto. Pressas usadas na hidroconformação são especialmente projetadas e normalmente incluem:

- Sistemas eletrônicos;
- Sistemas óleo-hidráulicos;
- Fluido hidráulico de pressão e sistema de controle;

O tipo construtivo específico de cada prensa depende dos requisitos de hidroconformação e da acessibilidade da matriz, controle do processo e troca dos componentes da matriz. Em geral, a força de fechamento é aplicada por meio de atuadores verticais ou cilindros diferenciais. Unidades adicionais necessárias para completar o processo são comumente encontradas, como cilindros de força axial e intensificadores de pressão. Fatores específicos do processo irão determinar:

- Configuração dos atuadores e cilindros diferenciais;
- A força e diâmetro dos cilindros horizontais e de controle de pressão;
- Dimensionamento do intensificador de pressão.

A figura 10 ilustra alguns equipamentos desenvolvidos para o processo.

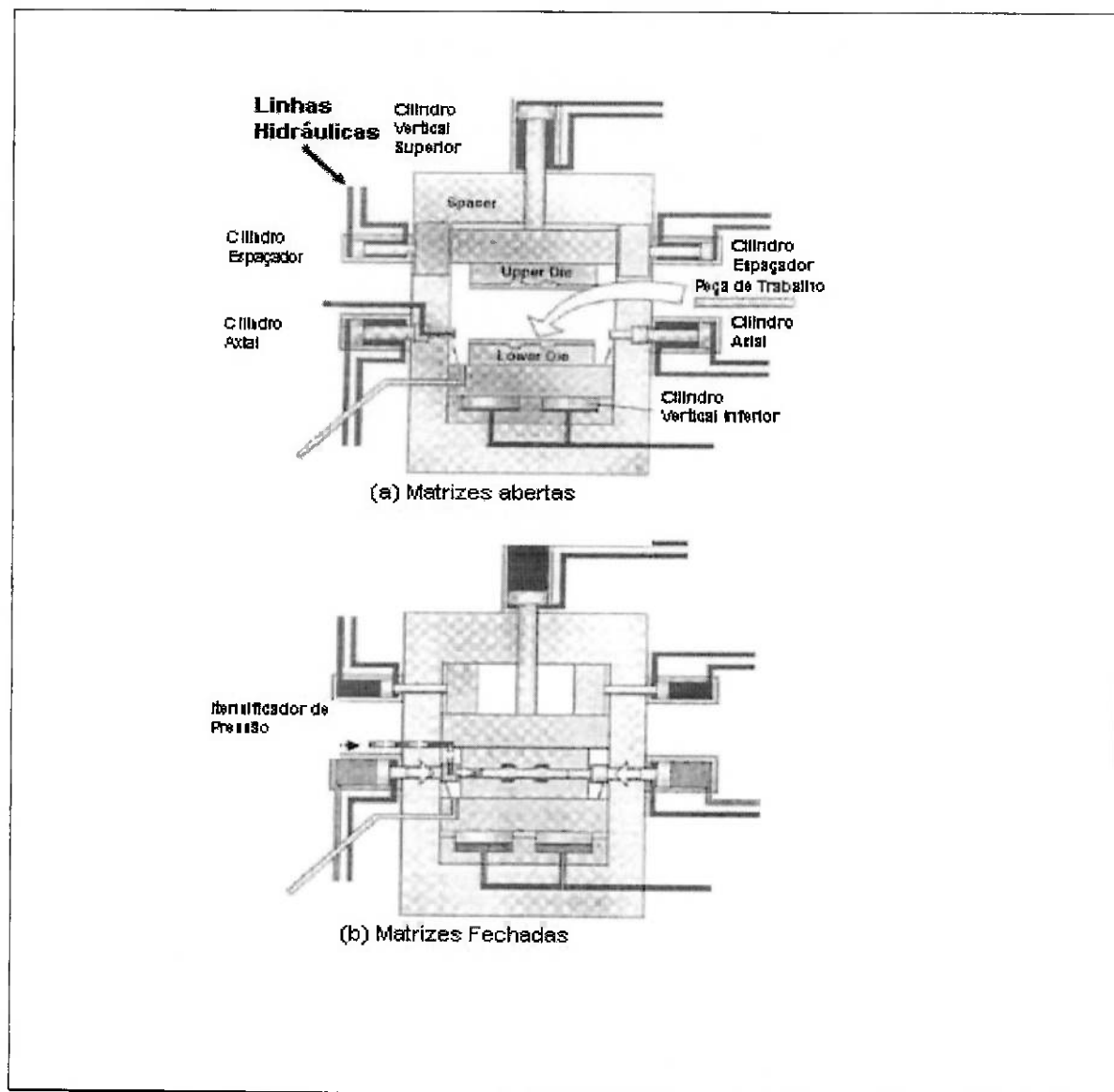


Figura 10 – Conceito de prensas de hidroconformação. ([2], p. 31)

Bombas de fluxo controlável preenchem as peças com fluido até uma pressão inicial pré-definida. Pressões acima desta são usualmente atingidas através de intensificadores de pressão. A linha de controle é normalmente constituída de, no mínimo, quatro eixos controlados, sendo um intensificador de pressão, dois cilindros horizontais e um cilindro de controle de pressão. Todos estes elementos podem ser monitorados durante o processo de conformação.

A figura 11 abaixo mostra uma prensa de hidroconformação^[19].

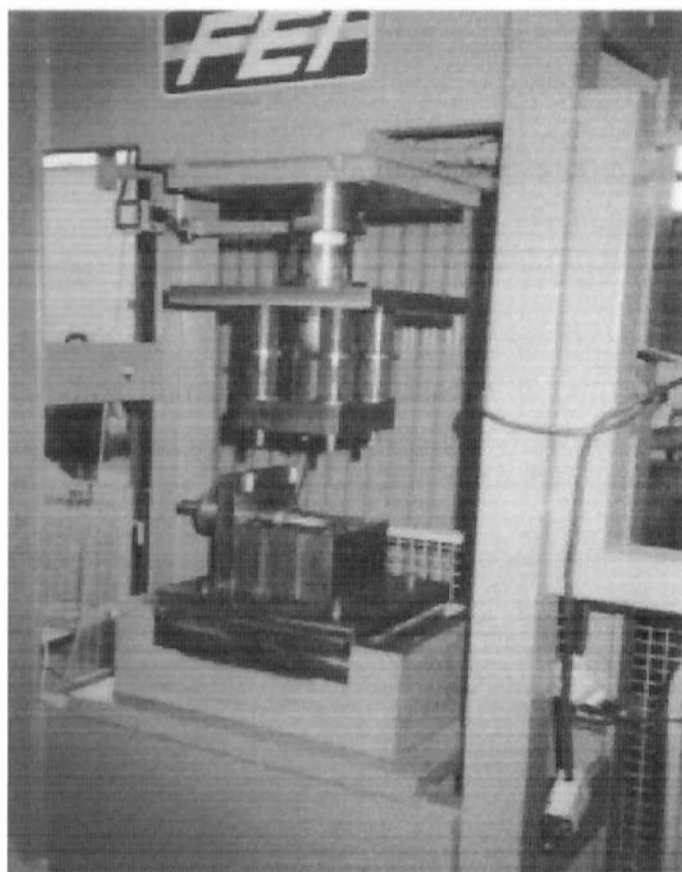


Figura 11 - Prensa de hidroconformação.

3.4.4 Defeitos Comuns na Hidroconformação de Tubos

Na hidroconformação de tubos, o principal objetivo é conformar um tubo preliminar, normalmente de seção transversal uniforme, em uma matriz de forma complexa sem permitir o surgimento de quaisquer instabilidades de conformação como flambagem, redução excessiva da seção transversal ("empescoçamento"), enrugamento ou ruptura da parede do tubo. Alguns procedimentos e medidas, tais como alteração do projeto da peça (transições suaves, reduções do perímetro da seção transversal, raios de arredondamento acima de valores críticos), alteração dos parâmetros iniciais do processo (diâmetro inicial do tubo, espessura, comprimento, material) e alteração no processo (pressão interna, força axial, forças de contra pressão nas regiões de abaulamento) ajudam a contornar estes problemas.

Em geral, no processo de hidroconformação são usados tubos pré-formados de seção transversal circular. Algumas características dos pré-formados devem ser levadas em conta para evitar problemas posteriores no processo. Flutuações na espessura do tubo ao longo do perímetro deste resultam em um alto número de refugos, podendo até levar à ruptura da peça. A concentricidade do tubo é importante para que se evite cisalhamento indesejado durante o fechamento das matrizes. Os tubos devem estar livres de lascas ou defeitos, os quais podem ocasionar danos no ferramental, erros de conformação ou marcas na superfície da peça. Como os desvios da forma cilíndrica são comuns, tornam-se necessários os processos de pré-formação também. A definição do processo de flexão ou dobramento do tubo depende do raio de dobramento, diâmetro do tubo e espessura da parede. Devido a problemas de continuidade que podem surgir desde danos superficiais, devido aos dispositivos de fixação, até a ruptura do tubo os erros de dobramento, como enrugamentos no interior das dobras e impressões nos tubos, devem ser evitados, principalmente em componentes de parede de pouca espessura. A pré-formação do tubo dentro da própria matriz de hidroconformação representa uma boa solução caso ela seja capaz de eliminar outras etapas do processo.

No caso de componentes tubulares retilíneos, o processo é restringido pelo risco de ruptura por escoamento generalizado ou de flambagem. A probabilidade de flambagem aumenta de acordo com o comprimento da seção expandida. Com o comprimento de flambagem menor ou igual a duas vezes o diâmetro do tubo inicial, e se a peça processada apresentar uma seção transversal simétrica radialmente, pode-se assumir que a deformação atingível ficará bem abaixo da elongação máxima do material^[1]. Em componentes com eixos curvos, o deslocamento axial do material ocorre sem problemas, desde que o raio de curvatura seja superior a cinco vezes o diâmetro inicial.^[1] Peças com seções transversais assimétricas e com contornos de pequeno raio podem ser conformadas quando o material for capaz de deslocar-se axialmente no contorno. Transições brutas de contorno podem levar a rupturas prematuras na parede do tubo.

As transições de contorno devem ser projetadas com o maior raio de curvatura possível. Mudanças bruscas na direção do deslocamento do material causam a formação de enrugamentos transversais (flambagem) na peça, agindo como obstáculo para o fluxo de material na direção axial. Diante destes problemas, alguns pontos devem ser observados na configuração das peças para o processo de hidroconformação.

A razão ótima entre o diâmetro do tubo “D” e a espessura da parede do tubo “s” ($\frac{D}{s}$) é em torno de 20 a 45, e mesmo nesta situação o comprimento livre de flambagem deve ser menor ou igual a duas vezes o diâmetro inicial.^[1] Se a razão D/s for maior de 45, existe o risco de ocorrer flambagem ou ruptura, o que pode ser prevenido reduzindo-se o comprimento de flambagem. Se a razão $\frac{D}{s}$ for menor que 20, o comprimento de flambagem pode ser aumentado, conforme o acréscimo de espessura de parede. A redução da espessura pode ser evitada através de deslocamento axial de material, no entanto, o mesmo deslocamento pode levar à compressão da parede. Existe apenas um pequeno risco de flambagem neste caso.

A aplicação excessiva de forças axial no início do processo, antes das paredes do tubo entrarem em contato com a superfície da matriz, pode causar flambagem também. Por outro lado, pressões internas muito elevadas podem ocasionar ruptura e forças axiais insuficientes podem levar à redução da espessura em regiões de expansão da peça, tornando a peça final inaceitável para alguns requisitos de performance como impacto e fadiga.

Modos de instabilidade de conformação, como os citados acima, ocorrem quando o estado de tensão-deformação em um componente atinge um nível crítico no qual o equilíbrio entre as forças externas aplicadas e a resistência interna do material não pode mais ser mantido.

Basicamente, a flambagem ocorre quando a tensão axial compressiva em um elemento da peça ultrapassa os limites de resistência do material. A flambagem no processo de hidroconformação surge durante as etapas iniciais de deformação, quando os níveis de deformação são ainda baixos.

O enrugamento do tubo é observado durante tanto a fase inicial quanto a fase intermediária, sob a forma de abaulamentos simétricos. Apesar da causa do enrugamento ser também devida a carga axial excessiva, outros modos de falha como flambagem e enrugamento acontecem dependendo da configuração geométrica do componente tubular. A flambagem é normalmente característica em tubos longos com paredes relativamente espessas, ou seja, baixas razões D/s , enquanto que o enrugamento aparece em tubos longos e curtos, com paredes relativamente finas, ou seja, altas razões D/s .

A ruptura é uma consequência da estrição, instabilidade que surge sob altas tensões de tração.

A figura 12 mostra os modos de falha comuns no processo de hidroconformação.

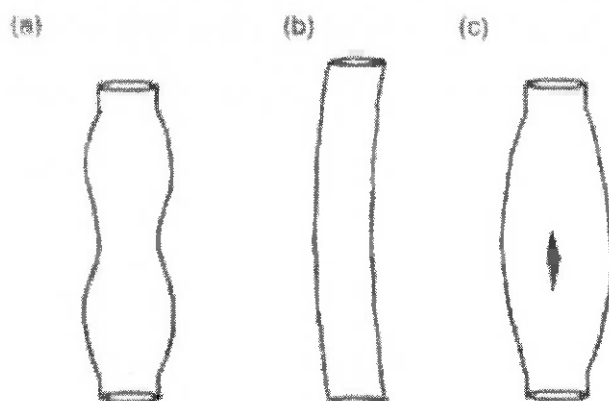


Figura 12 – Falhas comuns no processo de hidroconformação. **A)** enrugamento; **B)** flambagem; **C)** ruptura.

Flambagem e enrugamento

Deve-se lembrar que os estudos a respeito dos fenômenos de flambagem e enrugamento de tubos sob carga axial compressiva em conjunto com pressão interna são muito limitados comparados com a vasta informação disponível sobre tubos submetidos a apenas cargas axiais ou pressão externa.^[3] A maioria dos estudos disponíveis envolvem tubos com altas razões de diâmetro com relação a espessura ($\frac{D}{s}$), por serem tipos de estruturas bastante usadas nas indústrias de óleo e refinaria e aeronáutica. Portanto, para as situações de hidroconformação diferentes destas foram usadas hipóteses e simplificações para garantir a aplicabilidade da teoria já desenvolvida.

Muitos autores^[3] sugeriram a aplicação da teoria de flambagem de vigas para os casos de tubos com razões $\frac{D}{s}$ relativamente pequenas. No entanto, para estudo dentro do processo de hidroconformação, é preciso investigar a variação das tensões ou forças críticas de flambagem no regime

plástico. Para facilitar a análise, o módulo de elasticidade (E) é substituído pelo módulo tangencial do material (E_t), definido como a inclinação da curva de tensão em regime plástico^[3]:

$$E_t = \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}} = nK\bar{\epsilon}^{n-1} \quad (1)$$

partindo do seguinte modelo de tensão-deformação:

$$\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n \quad (2)$$

A carga e a tensão crítica de flambagem podem ser escritas como:

$$\sigma_{cr} = 2\pi^2 E_t \left(\frac{r}{L} \right)^2 \quad (3)$$

$$F_{cr} = 4\pi^3 E_t \frac{r^3}{L^2} t \quad (4)$$

onde:

F_{cr} – carga crítica de flambagem;

σ_{cr} – tensão crítica de flambagem;

E_t – módulo tangencial do material;

r – raio da peça;

l – comprimento da peça;

t – espessura do tubo.

No caso de enrugamento, as seguintes equações teóricas foram desenvolvidas com intuito de prever a tensão axial compressiva crítica que causa a formação de defeitos deste tipo. As hipóteses adotadas para se chegar a estas equações foram homogeneidade e isotropia do material tubular, carregamento uniforme e concêntrico, extremidades planas e sem defeitos.^[3]

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} E \frac{t}{r} \quad (5)$$

Assumindo o valor de 0,3 para o coeficiente de Poisson, para materiais tubulares de aço, e novamente introduzindo o módulo tangencial do material E_t para consideração dos efeitos em regime plástico, tem-se^[3]:

$$\sigma_{cr} = \frac{2}{3} (E_t) \frac{t}{r} \quad (6)$$

$$F_{cr} = \frac{4\pi}{3} (E_t) t^2 \quad (7)$$

onde:

ν - coeficiente de Poisson do material;

E - módulo de elasticidade do material;

t - espessura do tubo;

r - raio do tubo.

Pode-se notar que este modelo não indica nenhuma influência do comprimento do tubo no enrugamento. Resultados experimentais mostraram valores entre 30% a 70% dos valores teóricos^[3]. Estes desvios podem ser explicados pela anisotropia e heterogeneidade dos materiais, carregamentos não-uniformes e excêntricos, e condições imperfeitas das extremidades dos tubos.

Ruptura

No caso de partes tubulares sob ação de pressão interna (P_i) e força axial compressiva (F_a), o estado de tensão-deformação precisa ser determinado para que se atinja a expansão necessária antes da redução da seção (estricção) iniciar. A redução de seção na direção tangencial pode ser definida através de sua relação com a força tangencial por unidade de comprimento da espessura do tubo. A instabilidade de tração nesta direção é dada por^[3]:

$$\frac{dF_{\theta}}{dt} = 0 \quad (8)$$

e a força tangencial pode ser escrita como:

$$F_{\theta} = t\sigma_{\theta} \quad (9)$$

resultando em:

$$\frac{dt}{t} = -\frac{d\sigma_{\theta}}{\sigma_{\theta}} \quad (10)$$

onde:

$$\frac{dt}{t} = \varepsilon_r = \varepsilon_t = \ln\left(\frac{t}{t_o}\right) \quad (11)$$

Introduzindo-se a deformação da espessura, a partir das relações de plasticidade, chega-se a^[3]:

$$d\varepsilon_r = -\frac{(1+\alpha)}{2\sqrt{1-\alpha+\alpha^2}} d\bar{\varepsilon} \quad (12)$$

onde

$$\alpha = \frac{\sigma_z}{\sigma_{\theta}} \quad (13)$$

Manipulando-se estas expressões e considerando-se outras relações conhecidas, tem-se:

$$\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} = \frac{(1+\alpha)}{2\sqrt{1-\alpha+\alpha^2}} \bar{\sigma} \quad (14)$$

O modelo de tensão do material pode ser expresso por^[3]:

$$\bar{\sigma} = K\bar{\varepsilon} \quad \text{ou} \quad (15)$$

$$\bar{\sigma} = K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon})^n \quad (16)$$

Derivando-se as expressões acima, substituindo-se na equação (14), a deformação efetiva na condição de instabilidade, respectivamente para ambos os modelos de tensão acima, ficam definidos por^[3]:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2n\sqrt{1-\alpha+\alpha^2}}{(1-\alpha)} \quad (17)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2n\sqrt{1-\alpha+\alpha^2}}{(1-\alpha)} - \varepsilon_0 = 2n - \varepsilon_0 \quad (18)$$

onde $\alpha=0$.

A deformação efetiva que o material tubular pode suportar antes de ocorrer estricção depende da pré-deformação do material devido a trabalho a frio anterior, do expoente de encruamento do material (n) e da razão de tensões α . Pode-se concluir que não ocorre redução da espessura da parede para condição de carregamento de $\alpha = -1$.^[3]

Substituindo-se a equação (17) na equação (12), e assumindo-se nenhuma pré-deformação do material, a deformação máxima da espessura, nas condições de estricção, é igual ao expoente de encruamento do material:

$$\varepsilon_r = -n \quad (19)$$

já que $\varepsilon_z + \varepsilon_\theta + \varepsilon_r = 0$.

Concluindo, pode-se afirmar que altas deformações tangenciais podem ser obtidas desde que seja provocada deformação axial suficiente na

região de expansão e mantendo a deformação total abaixo do valor do expoente n , caso contrário, irá ocorrer estricção na região^[3].

3.4.5 Estimativa da Pressão Interna na Hidroconformação

Com intuito de fabricar uma peça sem defeitos e dentro das tolerâncias dimensionais especificadas, as curvas de pressão interna em função do tempo precisam ser calculadas e definidas em paralelo com as curvas de outras forças no processo. Basicamente, a pressão interna deve atender os seguintes requisitos^[3]:

- Alta o suficiente para prevenir flambagem devido a força axial excessiva nas primeiras etapas de hidroconformação. Este valor será denominado $(P_i)_{min}$;
- Alta o suficiente para iniciar a deformação das paredes do tubo nas etapas iniciais de deformação. Este valor será denominado $(P_i)_{yp}$ e é definido pelo limite de escoamento do material;
- Alta o suficiente para conformar o material tubular nas cavidades da matriz. Este valor, $(P_i)_{max}$, depende do limite de ruptura, raio de arredondamento dos cantos e espessura;
- Alta o suficiente para evitar enrugamento causado por elevadas forças axiais de compressão, nos estágios intermediários do processo;
- Baixa o suficiente para que não cause instabilidade por redução da seção resistiva. Este valor de $(P_i)_n$ pode ser estimado usando-se o critério de instabilidade explicado no item 3.4.4. Depende do limite de ruptura do material tubular, expoente de encruamento (n), espessura (t), raio do tubo (r), e outros parâmetros de carregamento.

A pressão interna mínima pode ser obtida equacionando-se as forças que agem na parede do tubo^[3]:

$$(P_i) = (F_a) \left(\frac{t}{\pi r l^2} \right) \quad (20)$$

Assumindo a força axial como sendo força de vedação inicial nas paredes do tubo:

$$F_s = 2\pi r t \sigma_{yp} \quad (21)$$

A pressão mínima resulta em^[3]:

$$(P_i) = 2 \left(\sigma_{yp} \left(\frac{t}{l} \right)^2 \right) \quad (22)$$

que depende do limite de escoamento, da espessura de parede e do comprimento do tubo.

Usando-se a teoria de membrana, pode-se relacionar a pressão interna com as tensões tangencial e longitudinal, a qual fica reduzida a:

$$P_i = \sigma_{\theta} \frac{t_1}{r_1} \quad (23)$$

As deformações tangencial e radial em um componente tubular são da seguinte forma:

$$\varepsilon_z = \ln \frac{l_1}{l_0} \varepsilon_{\theta} = \ln \frac{d_1}{d_0} \varepsilon_r = \ln \frac{t_1}{t_0} \varepsilon_t \quad (24)$$

O raio e a espessura ao final do processo são expressos por:

$$r_1 = r_0 e^{\varepsilon_0} t_1 = t_0 e^{\varepsilon_0} = t_0 \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^{\frac{1+\alpha}{\alpha-2}} \quad (25)$$

onde:

$$\alpha = \frac{\sigma_z}{\sigma_\theta} \quad (26)$$

A pressão interna, portanto, por este método, fica:

$$P_i = \frac{\sigma_f}{\sqrt{1 - \alpha + \alpha^2}} \frac{t_0}{r_0} e^{r - r_0} \quad (27)$$

3.4.6 Estudos dos Diferentes Meios Transmissores de Energia

3.4.6.1 Meio Transmissor de Energia Sólido

Materiais como: microesferas de borracha ou aço, areia e neoprene. Podem ser utilizados para o processo de hidroconformação, afim que, possam resolver o problema da vedação no equipamento utilizado no processo de hidroconformação.

De acordo com o autor Kurt Lange^[17] a utilização de microesferas de borracha podem ter alguns problemas, porque ensaios mostram que o calor gerado através do atrito entre as microesferas tende a inutilizar-las para outros ensaios. Aditivos para reduzir o atrito como talco não são efetivos. Além disso, como as microesferas após o ensaio ficam todas grudadas e não são facilmente removidas.

A utilização de microesferas de aço deixa a peça final com marcas que podem ser desejadas como, por exemplo, decoração.

3.4.6.2 Meio Transmissor de Energia Líquido

Pode-se utilizar como meios líquidos: água, óleo, gel, entre outros. A utilização destes materiais requer cuidados maiores com a vedação do equipamento de hidroconformação.

Uma das vantagens da utilização de meios líquidos é a distribuição uniforme de pressão no material a ser abaulado. Deste modo, o material começa a ser deformado em locais onde a espessura é menor ou onde a tensão de escoamento for menor. Nestes casos podem ocorrer pequenas deformações localizadas que aumentam o risco de causar a falha da peça testada.

Alguns processos industriais utilizam força axial combinada com pressão interna para que a peça seja empurrada para dentro da zona de deformação e deste modo deformações maiores podem ser atingidas. A figura 13 mostra as relações entre distância axial x , pressão hidráulica p , e a altura da deformação h . A pressão hidráulica tem que estar entre as curvas a e b . Se a pressão exceder a curva a o material irá romper. Pressões abaixo da curva b podem causar empescoçamento ou flambagem da peça.

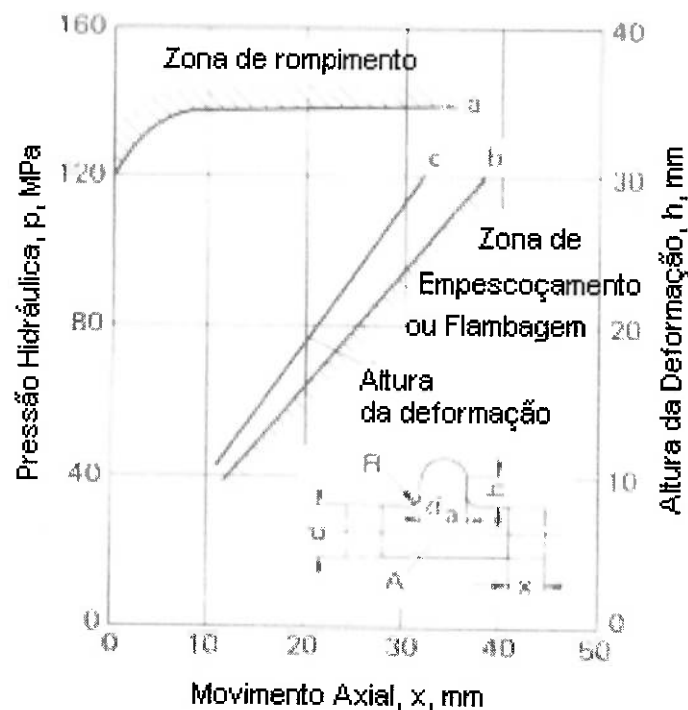


Figura 13 - Relações entre distância axial x , pressão hidráulica p , e a altura da deformação h .

3.4.7 Aspectos Tribológicos na hidroconformação

No processo de hidroconformação, assim como em outros processos de conformação a frio, as condições de atrito e lubrificação são críticas, principalmente, em situações nas quais exigem-se altas forças axiais. Os parâmetros essenciais de influência no atrito dentro do processo de hidroconformação são o lubrificante, o material do tubo (textura superficial e tensão de escoamento) e a superfície da matriz (acabamento superficial, dureza, tratamento superficial e revestimento).

A influência dos seguintes parâmetros de condições tribológicas na hidroconformação deve ser examinada em detalhes para melhorar a conformação de peças complexas^[8]:

- Lubrificantes;
- Revestimento da matriz;
- Pressão superficial;
- Velocidade de deslizamento;
- Materiais da matriz e da peça;
- Condições superficiais da peça;
- Efeito da linha de repartição no processo de conformação (nas direções transversal e longitudinal).

O lubrificante é um elemento de extremo auxílio para a eficiência do processo, por minimizar o atrito nos locais onde há movimentos relativos entre a peça e a matriz. Muitos componentes só podem ser conformados dentro de sua especificação geométrica com o uso de lubrificante apropriado. A presença de lubrificante permite a obtenção de uma distribuição de espessura de parede mais uniforme ao longo da peça, simplifica a conformação de ramificações tubulares, melhoram a conformação em áreas onde não é possível deslocamento de material por forças axiais, além de prevenir a adesão da peça à matriz, reduzir o desgaste da mesma e diminuir o risco de flambagem.

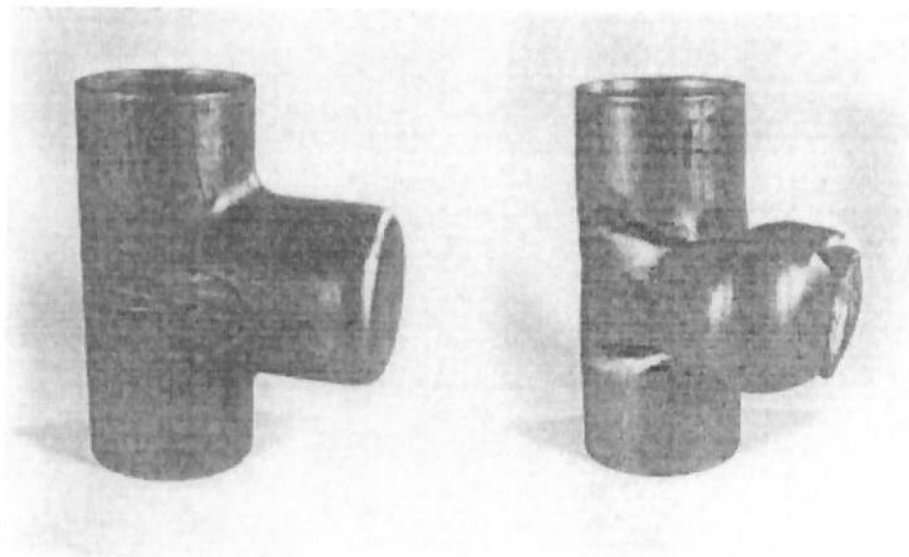


Figura 14 - Resultado da conformação com insuficiência de lubrificante [4].

Para seleção do lubrificante para o processo de hidroconformação, os seguintes critérios devem ser levados em conta^[8]:

- Lubrificação para evitar atrito de deslizamento entre a matriz e a superfície do tubo;
- Durabilidade sob altas pressões na interface entre tubo e matriz para evitar adesão;
- Mínima abrasividade para evitar desgaste do ferramental;
- Compatibilidade entre o meio de pressurização e requisitos ambientais;
- Facilidade de aplicação e remoção;
- Custo.

À medida que cresce a pressão interna no processo de hidroconformação, a área de contato na interface peça – matriz aumenta,

podendo começar a ocorrer casos de atrito com adesão. Em situações de baixas pressões, a lei de atrito de Coulomb é válida, portanto, relaciona-se a tensão tangencial (de atrito) com a tensão normal através de um coeficiente de atrito (equação 12). Se a pressão de contato for próxima da tensão de escoamento do material, o modelo de Coulomb não se aplica mais, então outros modelos devem ser aplicados^[1].

$$\mu = \frac{\tau}{\sigma} \quad (12)$$

No que se refere ao atrito, é possível identificar três regiões distintas no processo de hidroconformação: zona guiada, zona de transição e zona de expansão^[2], como mostra a figura 15. Na zona guiada, o material não sofre deformação, este é levado à zona de deformação sob pressão interna através da ação das forças axiais aplicadas pelos cilindros. A zona de transição é onde existe deformação efetivamente, e a zona de expansão é onde o material é calibrado até a geometria da matriz. Estas três zonas devem ser analisadas separadamente do ponto de vista das condições de atrito.

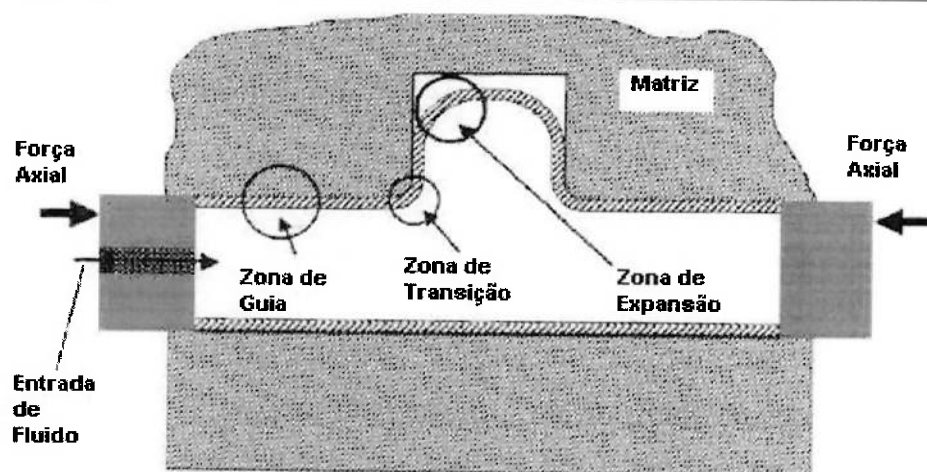


Figura 15 – Principais zonas de atrito. ([2], p. 29)

A pressão superficial, a velocidade de deslizamento e o estado de tensão-deformação são diferentes em cada uma destas regiões^[8]:

- a) *Zona Guiada*: pressão superficial média, alta velocidade de deslizamento, alta pressão axial, pequena expansão da superfície.
- b) *Zona de Transição*: redução ou expansão superficial, menor velocidade de deslizamento do que na Zona Guiada, porém ainda significativa. Tensões variando entre pressão axial e tensão de tração, as tensões de tração no tubo são na direção tangencial.
- c) *Zona de Expansão*: tensões de tração nas direções axial e tangencial são predominantes, velocidade de deslizamento baixa, grande aumento superficial.

A influência do coeficiente de atrito durante o processo, bem como sua influência no produto final de conformação, depende de inúmeros parâmetros, que só podem ser obtidos e quantificados pela realização de inúmeros experimentos muitas vezes muito dispendiosos.

Foram realizados experimentos no laboratório para processos de produção por conformação da Universidade de Paderborn, nos quais o processo escolhido para ser estudado foi o de “alargamento parcial” ^[4]. O objetivo da pesquisa consistiu na determinação da amplitude da influência que o emprego de diferentes parâmetros podem causar à conformação hidrostática e, com base do conjunto de resultados ganhos, calcular a tensão de cisalhamento por atrito relacionado aos parâmetros utilizados e também estabelecer uma regra geral para o atrito na conformação hidrostática ^[4].

Para isso foi criada uma ferramenta com geometria “T”, mostrada na figura 16 ^[4]. Juntamente à medição das forças axiais foi feita uma medição do atrito na zona de alargamento. Para isso foi colocado na matriz um sensor em forma de anel para medição da força de atrito. Foi projetado também um apoio para escorar a barriga formada no alargamento da peça que é acionado por um cilindro hidráulico anexo à ferramenta ^[4].

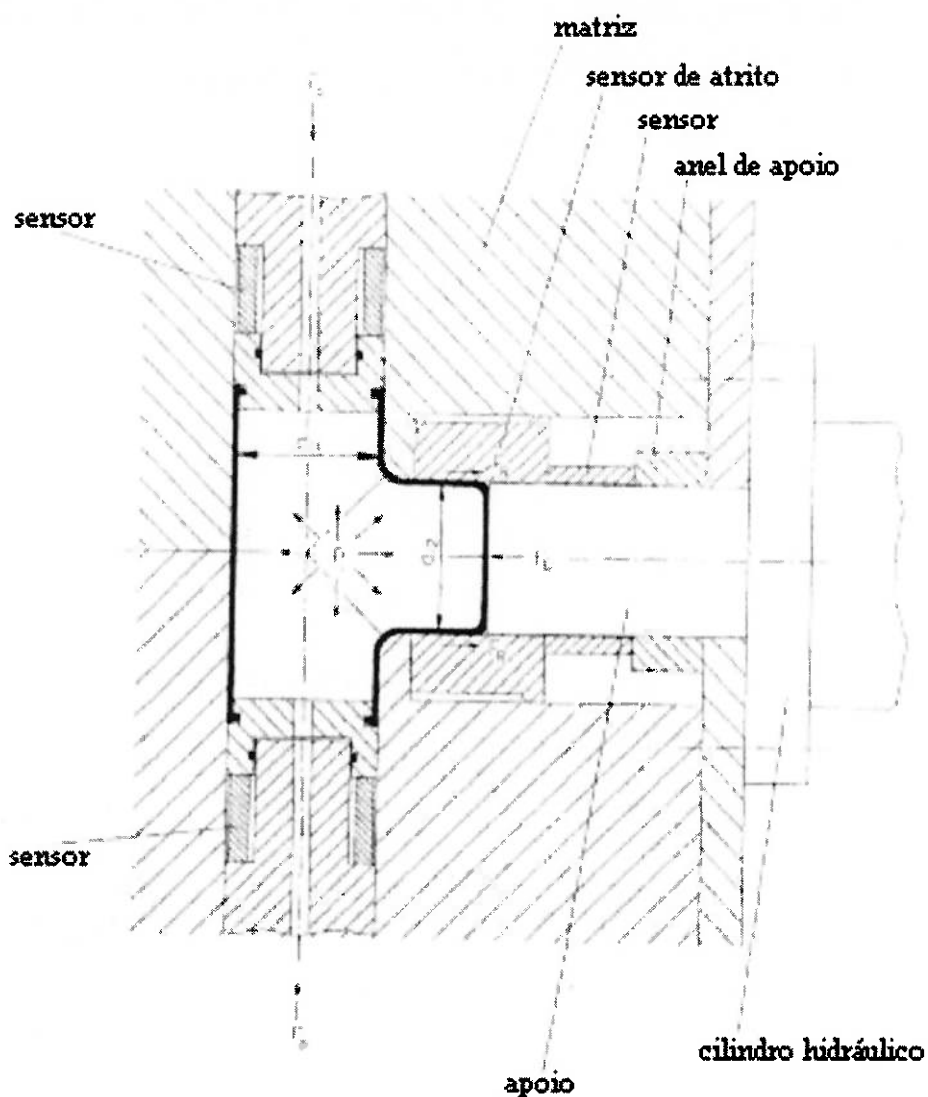


Figura 16 - ferramenta para análise do atrito no processo de alargamento parcial [4].

Para a análise do atrito estabeleceram-se as seguintes variações de parâmetros^[4]:

- Material: Tubo de aço carbono ABNT 1010 (~ St 34-2 NBK)
- Tubo de aço inoxidável ABNT 304 (~ DIN X4CrNi: 1810)
- Tubo de liga de alumínio AA 6016 (~ AlMgSi 0,5);

- diâmetro do tubo: 40 – 70 mm;
- diâmetro de separação: 40 – 70 mm;
- espessura da parede do tubo: 1,5 – 6,0 mm;
- pressão interna: 0 – 200 MPa;
- força axial: 0 – 1000 kN.

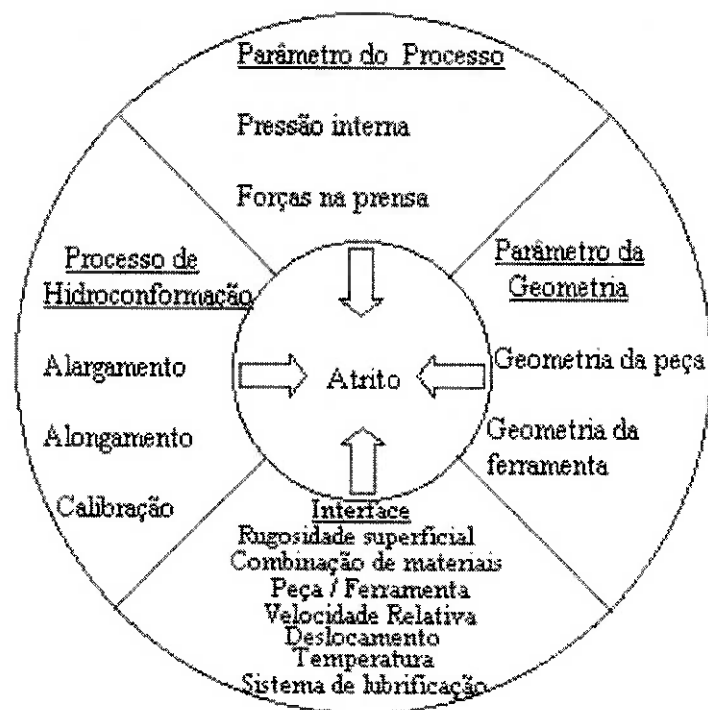


Figura 17 – Influência do atrito na conformação hidrostática com alta pressão interna [4].

3.4.7.1 Influência do Lubrificante

Uma vasta variedade de lubrificantes pode ser considerada para aplicação na hidroconformação. Dependendo de sua composição, estes são agrupados da seguinte forma^[1]:

- Lubrificantes sólidos, geralmente baseados em grafite ou MoS₂;

- Lubrificantes a base de polímeros;
- Graxas e óleos;
- Emulsões.

Cada grupo de lubrificantes apresenta vantagens e desvantagens em termos de performance, aplicação, remoção compatibilidade e custo. Lubrificantes sólidos aparentam ser mais eficazes quanto à redução do atrito e ao aumento da vida do ferramental. Sua aplicação é fácil e consistente desde com instrumentação adequada, no entanto sua remoção requer fluidos especiais de limpeza. Os lubrificantes sólidos são mais caros que os líquidos quando se levam em conta os custos de tempo de secagem e processos de remoção e aplicação, além dos custos originais. Por outro lado, lubrificantes líquidos são mais viáveis em termos de custo, apresentam facilidades de remoção e são compatíveis com os fluidos de pressurização em geral, porém não apresentam o mesmo desempenho de lubrificação.^[8]

Deve-se ter cuidado para garantir um revestimento uniforme de lubrificante. A espessura ideal da camada de lubrificante deve ser determinada experimentalmente, por tentativa e erro.

A figura 18 mostra a influência da velocidade de deslocamento na dependência do material da ferramenta e do lubrificante, na tensão de cisalhamento por atrito na fenda entre o tubo e a parede do sensor.^[4]

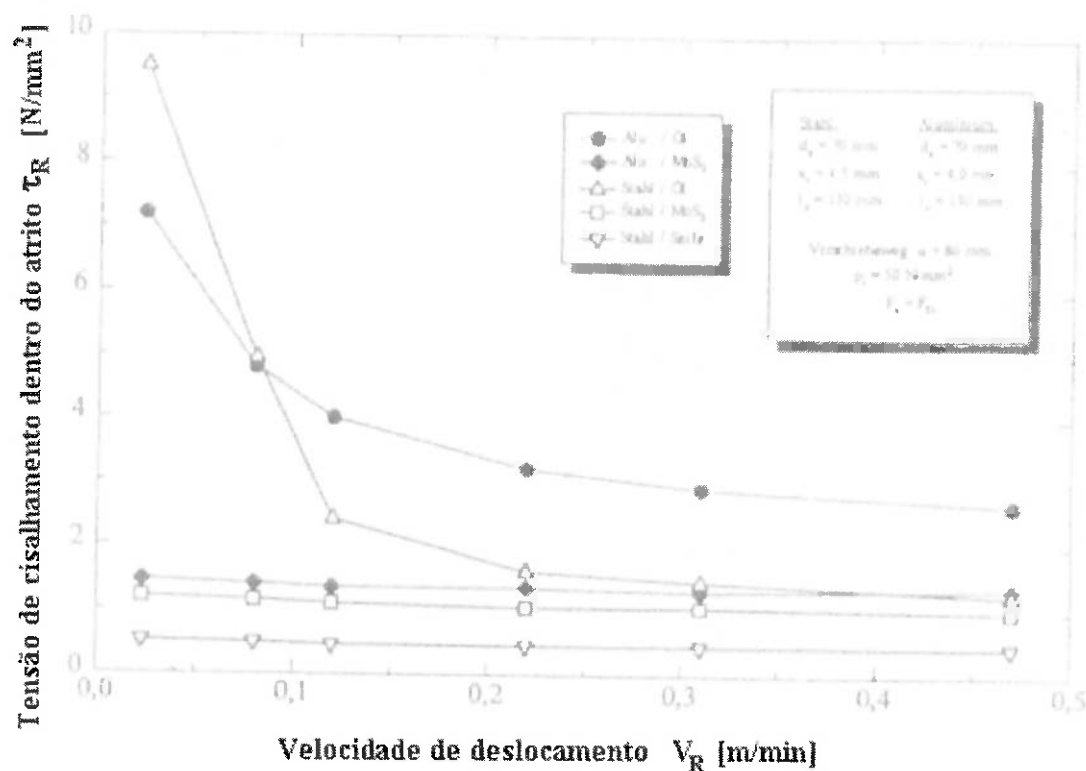


Figura 18 – Influência da Velocidade de deslocamento. [4]

Para as pesquisas da influência da utilização de um lubrificante foram empregados lubrificantes típicos usados na prática. Os lubrificantes óleo e sulfito de molibdênio (MoS_2) são espalhados diretamente na superfície da peça, uma camada de 5 a 6 g/m^2 para o MoS_2 . No caso do sabão é utilizada uma camada de 12 a 15 g/m^2 junto com o emprego de uma camada de fosfato para consolidar a camada de sabão na superfície.^[4]

No MoS_2 e sabão não foi perceptível nenhuma influência na velocidade. Porém quando é empregado um lubrificante viscoso como óleo mineral foi possível perceber uma queda significativa da tensão de cisalhamento por atrito com um aumento da velocidade. Essa queda é resultante do aumento da influência dos efeitos hidrodinâmicos do lubrificante.^[4]

O alcance de uma lubrificação puramente hidrodinâmica não é possível na conformação hidrostática com as velocidades de deformação utilizadas.

Os valores da tensão de cisalhamento por atrito para o alumínio (AlMgSi 0,5) estão acima dos valores para o aço (St34-2) por causa do baixo valor do limite de escoamento e da superfície rugosa da peça.^[4]

Para peças longas, como, por exemplo, vigas de eixo ou peças de estrutura de caixilho, o emprego de camadas de lubrificantes de separação em zonas sensíveis ao atrito pode ser benéfico, uma vez que nesse espectro de peça por regra está presente uma baixa velocidade de deslocamento. Nesse ponto o emprego de lubrificante de separação pode reduzir sensivelmente a tensão de cisalhamento por atrito, em comparação com o lubrificante viscoso.^[4]

Em outros estudos, foram feitas experimentações com diversos tipos de lubrificantes, como filme de PTFE, grafite coloidal e spray de Rocol RTD. Em condições de lubrificação insuficiente, o efeito de abaulamento no topo da protusão em T tornou-se mais pronunciado; já com lubrificação adequada obteve-se uma superfície mais plana no topo do T conformado ^[8].

3.4.7.2 Influência do Deslocamento

A conformação hidrostática também é influenciada pelo deslocamento. Essa influência é dependente do tipo de lubrificação utilizado. A figura 19 mostra a influência do deslocamento na tensão de cisalhamento por atrito em dependência de diferentes lubrificantes ^[4].

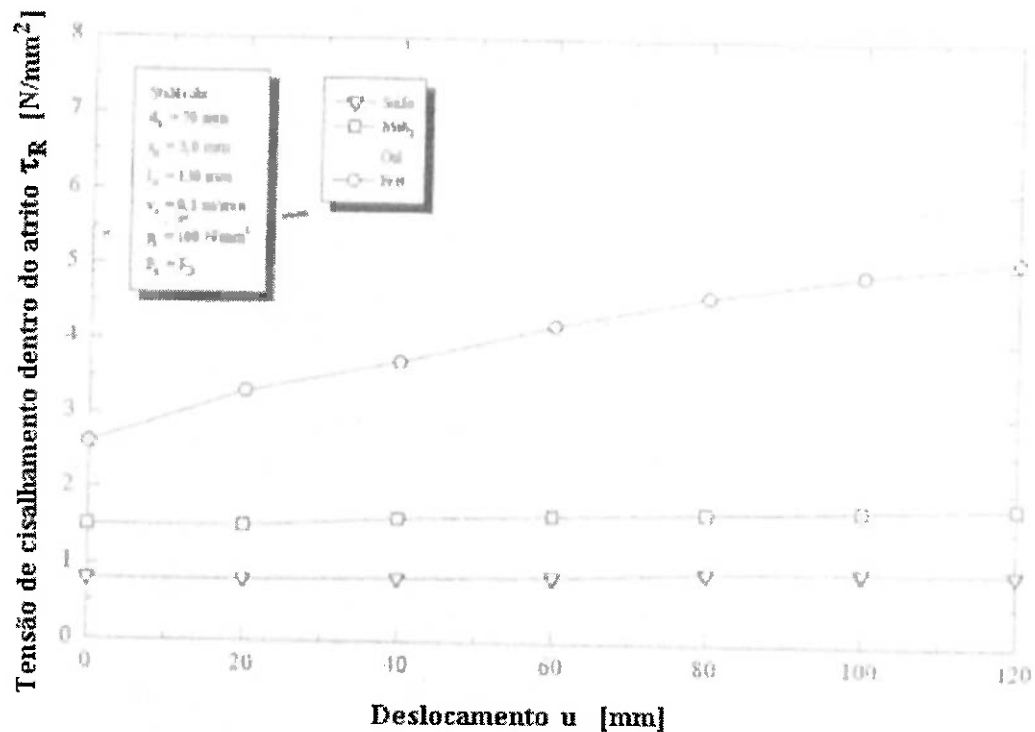


Figura 19 – Influência do deslocamento. [4]

No emprego de MoS_2 e de sabão foi possível perceber apenas um pequeno aumento da tensão de cisalhamento por atrito. Análises microscópicas das superfícies do lubrificante MoS_2 sob deslocamento crescente comprovaram uma perda da superfície do tubo revestida com o lubrificante^[4].

Sob um deslocamento de 120 mm, a parte da superfície do tubo que ficou sem lubrificação é de cerca de 6%. Para esse pedaço de superfície fica perceptível uma alta tensão de cisalhamento por atrito, a qual se reduz com o aumento da força de atrito medida e com a tensão de cisalhamento por atrito resultante na superfície de contato. Para um deslocamento de 120 mm a influência da redução da camada de lubrificante pode ser considerada como insignificante^[4].

Para os lubrificantes à base de óleo e gordura, resultaram valores de início visivelmente altos. Assim como um aumento claro da tensão de cisalhamento por atrito no deslocamento. Para esses lubrificantes existe já no começo do deslocamento uma condição de mistura de atrito que conduz aos altos valores de início^[4].

Com deslocamento crescente o excedente de lubrificante do tubo é deslocado, fazendo com que apenas os valores de rugosidade da superfície de contato fiquem à disposição como reservatórios de lubrificante. Isso dá por resultado que, com o emprego de lubrificantes de separação, a estrutura superficial dos parceiros de contato tem uma importância menor do que no uso de lubrificantes viscosos^[4].

Em comparação aos lubrificantes viscosos, os lubrificantes de separação possuem vantagens quando aplicados em peças com superfícies com grandes zonas de absorção, pois os valores para a tensão de cisalhamento por atrito são nitidamente pequenos e praticamente constantes durante o deslocamento.^[4]

3.5 Simulação Numérica de um Teste de Abaulamento com Pressão Interna e Compressão Axial

A utilização de força axial concomitantemente com a pressão interna no tubo contribui para que a deformação do material seja mais favorável. Desta forma tem-se uma maior área limite de deformação e uma espessura constante e com menos riscos de rompimento devido à diminuição desta.

Devido a esta constatação pode-se dar prioridade à força axial em detrimento a pressão interna, mas os efeitos de empescoamento e enrugamento durante o processo aumentam.

Neste modelo de hidroconformação deve-se observar dois fatores, a espessura e o comprimento do tubo, porque de acordo com o tipo de matriz que se está usando pode ser necessária a construção de uma peça com formas muito complexas, e estes dois fatores são essenciais para os parâmetros da peça final.

3.5.1 Comparação entre um teste real e uma simulação numérica

No teste comparativo foi utilizada uma matriz como a mostrada na figura 20. A comparação entre um teste real e uma simulação numérica tem algumas diferenças, porque foi assumido que o tubo é simétrico longitudinalmente, o que na prática não é verdade. Devido a essa assimetria nos testes reais foi notado um empescoçamento assimétrico.

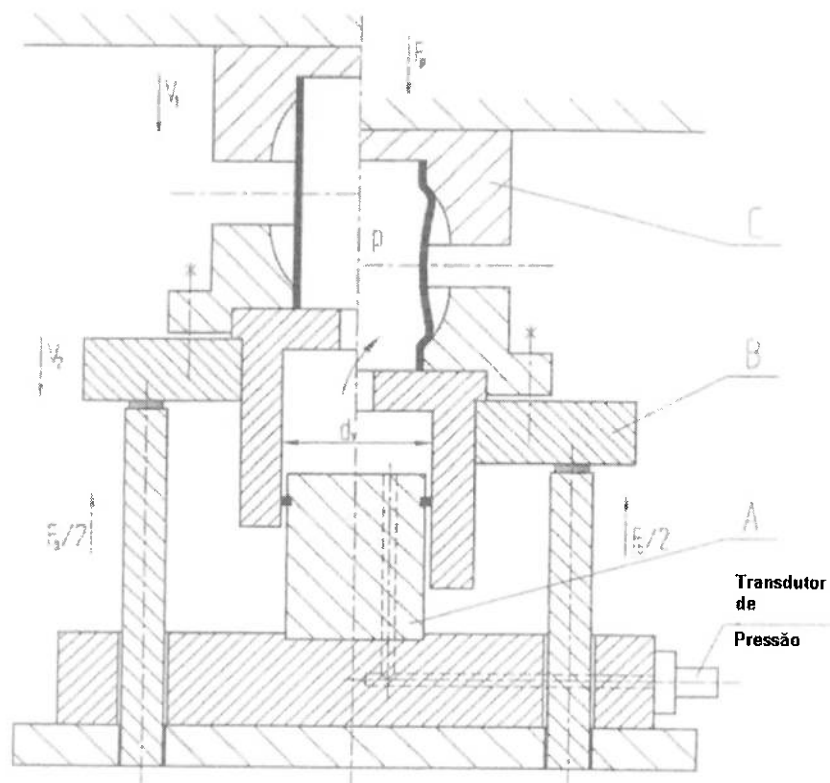


Figura 20 - Princípio de operação da matriz experimental.

A correção deste problema pode ser feita uma correção no modelo. O tubo pode ser movido na direção do eixo do tubo. No trabalho de Janez Pipan e Franc Kosel^[1] foi movido 0,045mm na direção do eixo do tubo.

Deste modo, a nova variação da força axial, mostrada nas figuras 21 e 22, corresponde com a medida da variação de força mesmo, quando houve instabilidade no processo. Este modelo apresentado é preciso o bastante em termos de simulação de forças e na forma final da peça.

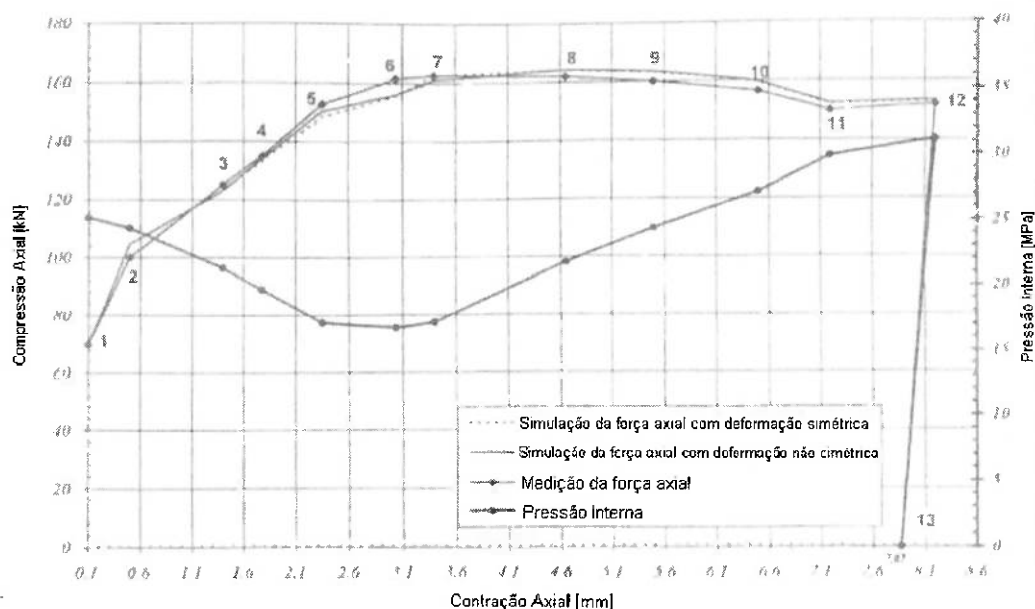


Figura 21 – Variação na força axial no experimento e na simulação durante o primeiro processo de hidroconformação.

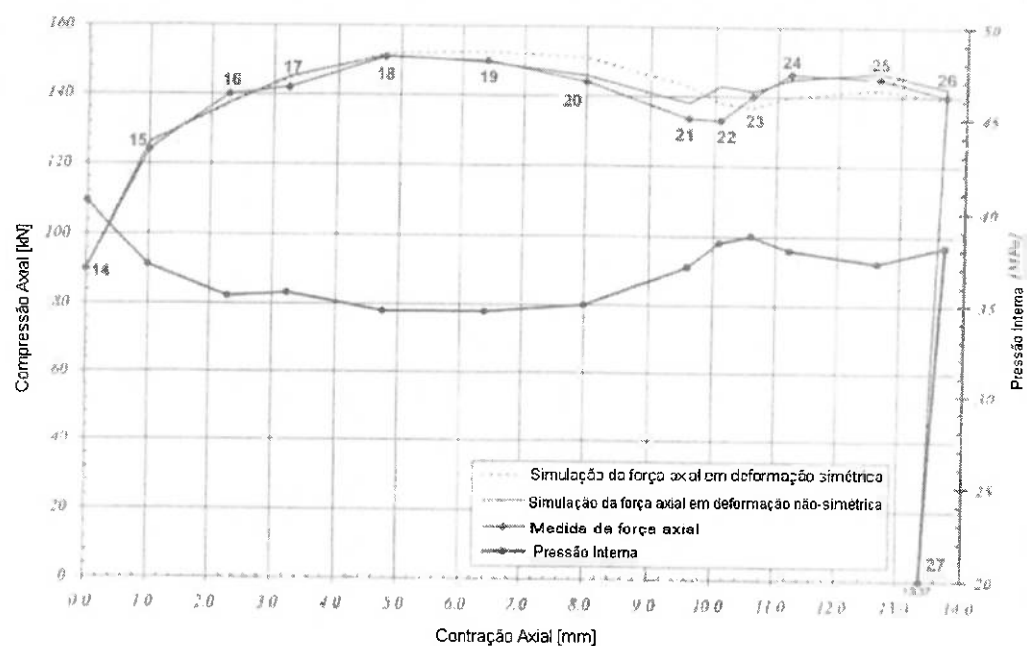


Figura 22 – Variação na pressão da força axial no experimento e na simulação durante o segundo processo de hidroconformação.

3.5.2 Estudo dos Efeitos dos Parâmetros Individuais na Estabilidade da Pressão

Para que fossem estudados os efeitos dos parâmetros individualmente foram feitos ensaios em que eram diferentes com a relação dos seus parâmetros ou as suas combinações e as variações de força. Deste modo, foram obtidos alguns resultados tendo o objetivo de manter a pressão estável ao longo do processo. Abaixo estão alguns resultados:

- Razão entre o comprimento livre inicial e o diâmetro do tubo: $L_0/D_0 = 1,51; 2,0; 2,5;$
- Razão entre a espessura e o diâmetro do tubo: $t_0/D_0 = 0,031; 0,051; 0,082;$

- Razão entre o diâmetro máximo da cavidade da matriz e o diâmetro inicial do tubo: $D_{\max}/D_0 = 1,4; 1,65$;
- Ângulo da cavidade da matriz: $\beta = 30^\circ, 45^\circ$;
- Razão entre as forças $\alpha = \sigma_2/\sigma_3 = \text{constante} = -1/6, -1/4, -1/2, -1, -2$.

Através do controle dos parâmetros dados acima podemos calcular a influência de algumas características da peça final, como por exemplo:

- Com o controle sobre a razão de força é possível através da força axial e a pressão interna controlar a curvatura da parede na parte central da peça;
- Com uma relativa espessura de parede t_0/D_0 e a razão entre as forças α , a estabilidade da compressão é possível com uma gama limitada de t_0/D_0 . Um valor crítico é quando é aumentada a espessura da parede e diminuída o valor absoluto da razão de forças;
- Quanto maior o ângulo β maior é a curvatura e também é a diferença entre o maior e o menor diâmetro do tubo. Mas, em contrapartida, este aumento do ângulo β acarreta em uma maior diferenças de espessura ao longo do tubo.

3.5.3 Verificação Experimental da Espessura da Peça Final

Na variação das cargas atuantes, o objetivo é que a espessura do tubo fique uniforme ao longo do mesmo. Na figura 23 pode-se observar esta variação.

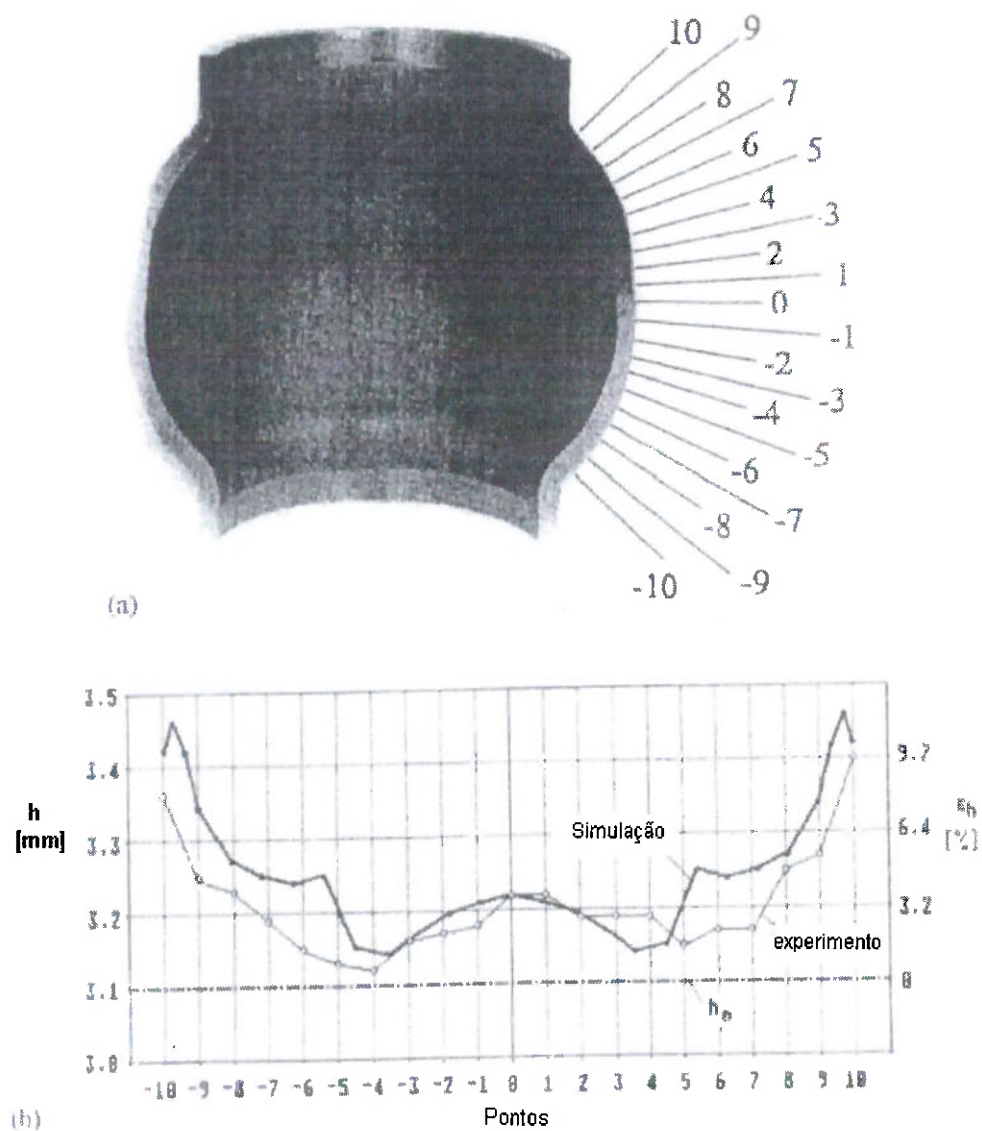


Figura 23 - (a) Tubo hidroconformado; (b) Medidas da espessura da peça final ao longo do tubo.

4 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Metodologia

Serão utilizados como corpos de prova, primeiramente, tubos de parede fina de alumínio ABNT 6063 T5 (ver item 4.4). Este tubo será preso nas suas extremidades por duas tampas, sendo este conjunto encaixado dentro de um cilindro hidráulico. A tampa superior terá um furo que permite a comunicação entre o interior do tubo e o fluido pressurizado, e a tampa inferior será fechada. Será colocado manualmente um volume de fluido, que no caso será água a temperatura ambiente, suficiente para completar o interior do tubo não deformado e um acréscimo, necessário para provocar e preencher a expansão do tubo. Após isso, será montado o pistão, provido de devida vedação. O dispositivo será fechado e instalado em prensa hidráulica, de capacidade de 25 toneladas, a qual fornecerá a força necessária para compressão do fluido e aplicação conseqüente de força axial, caracterizando um processo de hidroconformação auxiliado por compressão axial. O conceito deste processo de hidroconformação pode ser exemplificado através da figura 20 (item 3.5.1).

O motivo principal para que se inicie o projeto com tubos de alumínio de parede fina é a possibilidade de se utilizar pressões internas não tão altas para se obter a deformação, o que é importante uma vez que a vedação do ferramental é um dos pontos críticos do processo.

O processo de hidroconformação, da forma como concebido neste experimento, apresenta um fator limitante, que é o fato da força axial atuante no tubo ser dependente da pressão interna aplicada pelo pistão. Assim, não será possível variar a magnitude da força axial de forma independente durante o processo, o que impede uma análise mais detalhada da variação deste parâmetro no resultado do processo de hidroconformação do tubo metálico. Cálculos preliminares apontaram valores para a pressão interna necessária da ordem de 8,0 MPa para a conformação deste tubo de aço carbono.

Caso seja notado, nessa fase de testes, que o ferramental está se comportando adequadamente, será possível que se iniciem experimentos utilizando materiais mais resistentes e com pressões mais elevadas, simulando assim um processo mais próximo do industrial. Caso contrário, será necessário partir para a busca de um novo dispositivo de vedação.

Ao inflar a água dentro do tubo, surgirá uma pressão interna que provocará o escoamento do tubo, que poderá se conformar até que sua parede externa encoste-se ao interior da cavidade do cilindro hidráulico, formando um abaulamento parcial na parte central do tubo.

As implicações serão: escoamento adequado do material durante a conformação, vedação adequada para resistir a vazamentos internos e cálculo da pressão mínima de água. As medidas tiradas são: deformação do material, tempo de deformação, pressão máxima atingida durante o processo, redução do comprimento total do tubo e a qualidade da peça final, quanto ao diâmetro alcançado, simetria, distribuição de espessura, falhas devido a flambagem ou ruptura do material e campos de tolerância atingíveis.

O estudo das forças, deslocamentos, tensões e deformações no processo será realizado mediante modelagem experimental dos parâmetros envolvidos.

No ferramental que está sendo construído pretende-se, futuramente, colocar sensores para que se possa medir a influência da variação desses parâmetros no produto final. Será colocado a princípio, por exemplo, um relógio comparador com a função de medir a deformação do tubo formado. Estuda-se também a utilização futura de células de carga para a obtenção de algumas medidas.

O procedimento que será adotado para o estudo consiste na variação dos parâmetros tais como pressão aplicada, material e geometria do tubo (diâmetro, espessura, comprimento livre), curso do pistão e uma posterior medição do produto final. As medições das espessuras serão registradas seccionando-se o tubo conformado e fazendo a utilização de um micrômetro para a obtenção dos valores. Os dados do perfil do abaulamento

conformado, da altura do bojo e da espessura serão médias das várias localizações.

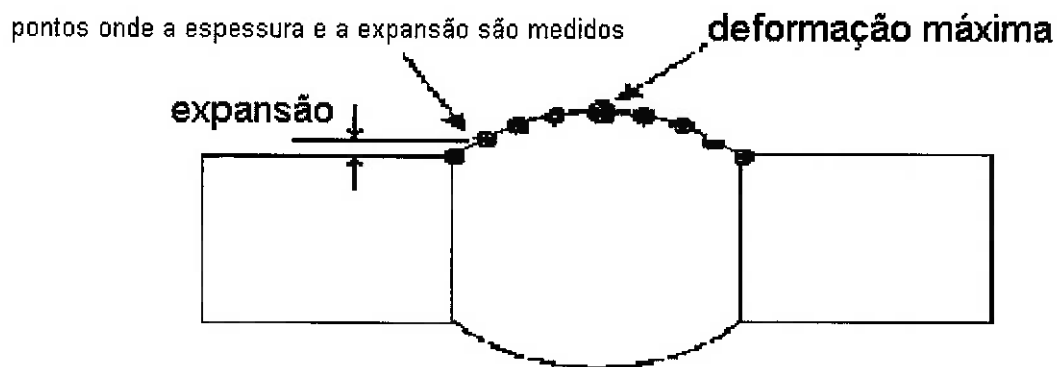


Figura 24 – Pontos de medição de deformação e espessura do tubo conformado.

4.2 Métodos de análise dos resultados

Os resultados obtidos experimentalmente serão comparados com os modelos teóricos, modelos desenvolvidos através de método de elementos finitos e resultados experimentais relatados em referência bibliográfica abrangendo este tipo de processo de hidroconformação, para que se possa verificar a validade dos resultados^[16].

A altura do abaulamento (h) e as medidas das espessuras (t_i) são tomadas em localizações coincidentes, desse modo as deformações podem ser determinadas através do volume constante como segue:

$$\varepsilon_z + \varepsilon_\theta + \varepsilon_t = 0 \quad (1)$$

onde,

$$\varepsilon_z = \ln \frac{l_1}{l_0} \varepsilon_\theta = \ln \frac{d_1}{d_0} \varepsilon_r = \ln \frac{t_1}{t_0} \varepsilon_t \quad (24)$$

$$r_1 = r_0 e^{\varepsilon_\theta} t_1 = t_0 e^{\varepsilon_\theta} = t_0 \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^{\frac{1+\alpha}{\alpha-2}} \quad (25)$$

onde:

$$\alpha = \frac{\sigma_z}{\sigma_\theta} \quad (26)$$

Os dados registrados da pressão interna e as deformações circunferenciais (ε_θ), axiais (ε_z) e da espessura (ε_t) podem ser usadas para o cálculo do coeficiente de resistência (K) e do expoente de encruamento (n) como usado na Lei de Krupkowsky:

$$\bar{\sigma} = K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon})^n \quad (17)$$

onde σ é a tensão de escoamento, ε_0 é a pré deformação no material, e ε é a deformação efetiva calculada no material.

4.3 Matriz e Ferramental

Será utilizada uma matriz aplicada especificamente como ferramenta experimental para realização deste trabalho de formatura. Esta ferramenta experimental consiste em um cilindro hidráulico, cuja camisa apresenta diâmetro interno de 50,8 milímetros e espessura de 4,7 milímetros, devidamente adaptada para funcionar no processo de hidroconformação. Como citado anteriormente, o tubo será montado por suas extremidades em duas tampas, cujo material é aço ferramenta, providas de vedação, sendo que a tampa superior permite a passagem, através de um furo, do fluido pressurizado. Este conjunto, por sua vez, será encaixado na parte interior da camisa do cilindro hidráulico. A tampa superior possui rebaixo para colocação de vedação do tipo gaxeta, pois haverá movimento relativo à

superfície interna da camisa, devido à força axial aplicada para compressão do tubo. A tampa inferior apresenta rebaixos para colocação apenas de anéis “o’ring”, já que esta permanecerá imóvel durante o processo. Deve-se lembrar que a vedação das tampas é um ponto crítico do processo para que se consigam as pressões internas suficientes para a conformação do tubo. A seguir, apresenta-se um esquema completo da matriz construída para utilização na parte experimental (figura 25).

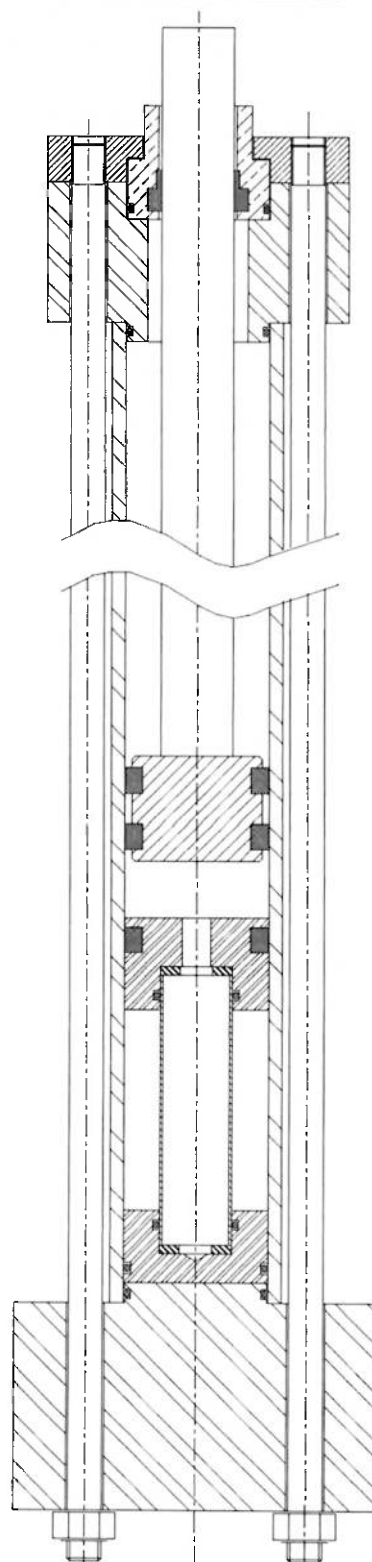


Figura 25 – Dispositivo experimental para ensaio de hidroconformação.

As figuras 26, 27 e 28 abaixo ilustram o equipamento de ensaio, em configurações explodida (desmontado), pronto para o ensaio na prensa hidráulica (montado) e as tampas superiores e inferiores construídas para os ensaios.



Figura 26 – Conjunto mostrado de forma “explodida”.

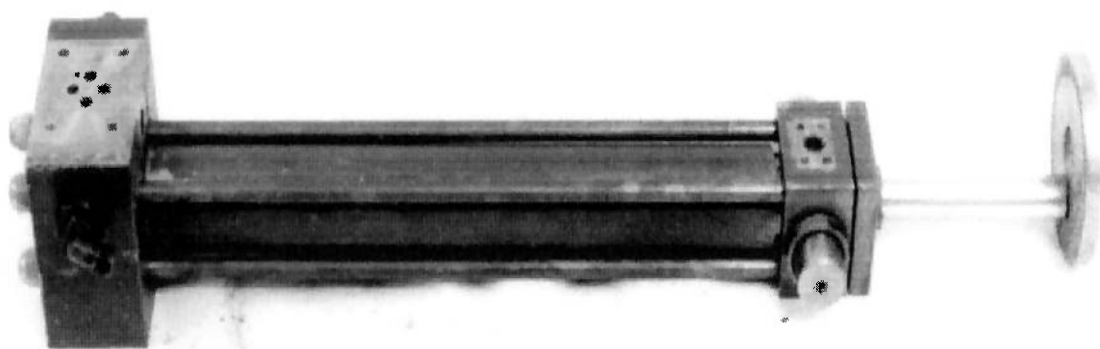


Figura 27 – Conjunto pronto para ser utilizado para a realização de um ensaio.

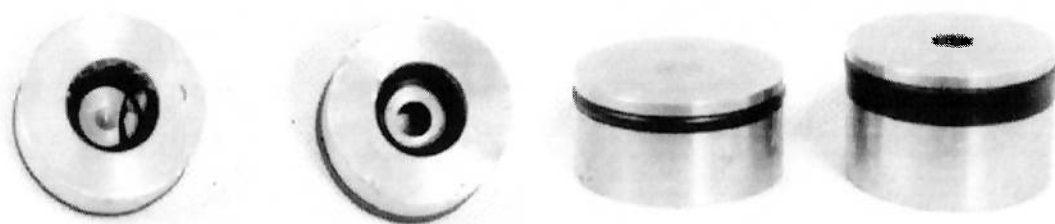


Figura 28– Tampas com vedação utilizadas nos ensaios.

4.4 Especificação do Tubo para Experimento

- **Material:** Alumínio ABNT 6063 T5
- **Composição:** 98,55% Alumínio; 0,35% Ferro; 0,45% Magnésio; 0,30% Silício; 0,10% Cobre; 0,10% Titânio; 0,10% Cromo; 0,15% Outros Materiais.

- **Propriedades Mecânicas:**

Limite de resistência à tração:	154 MPa;
Limite de escoamento:	119 MPa;
Limite de alongamento:	50mm – 8%;
Limite de cisalhamento:	120 MPa;
Dureza Brinell (66):	500/10 kg/mm ² ;
Resistência a fadiga:	10 ⁴ ciclos.

- **Dimensões do Tubo Utilizado:**

Comprimento: 93,5 mm

Espessura: 0,8 mm

Diâmetro: 25,4 mm

Comprimento livre: 69,5 mm

- **Parâmetros do Corpo de Prova:**

$$t_o/D_o = 0,0315 \text{ (} D_o/t_o = 31,7 \text{)}$$

$$L_o/D_o = 2,7$$

$$D_{\max}/D_o = 2,0$$

5 CRONOGRAMA DE TRABALHO

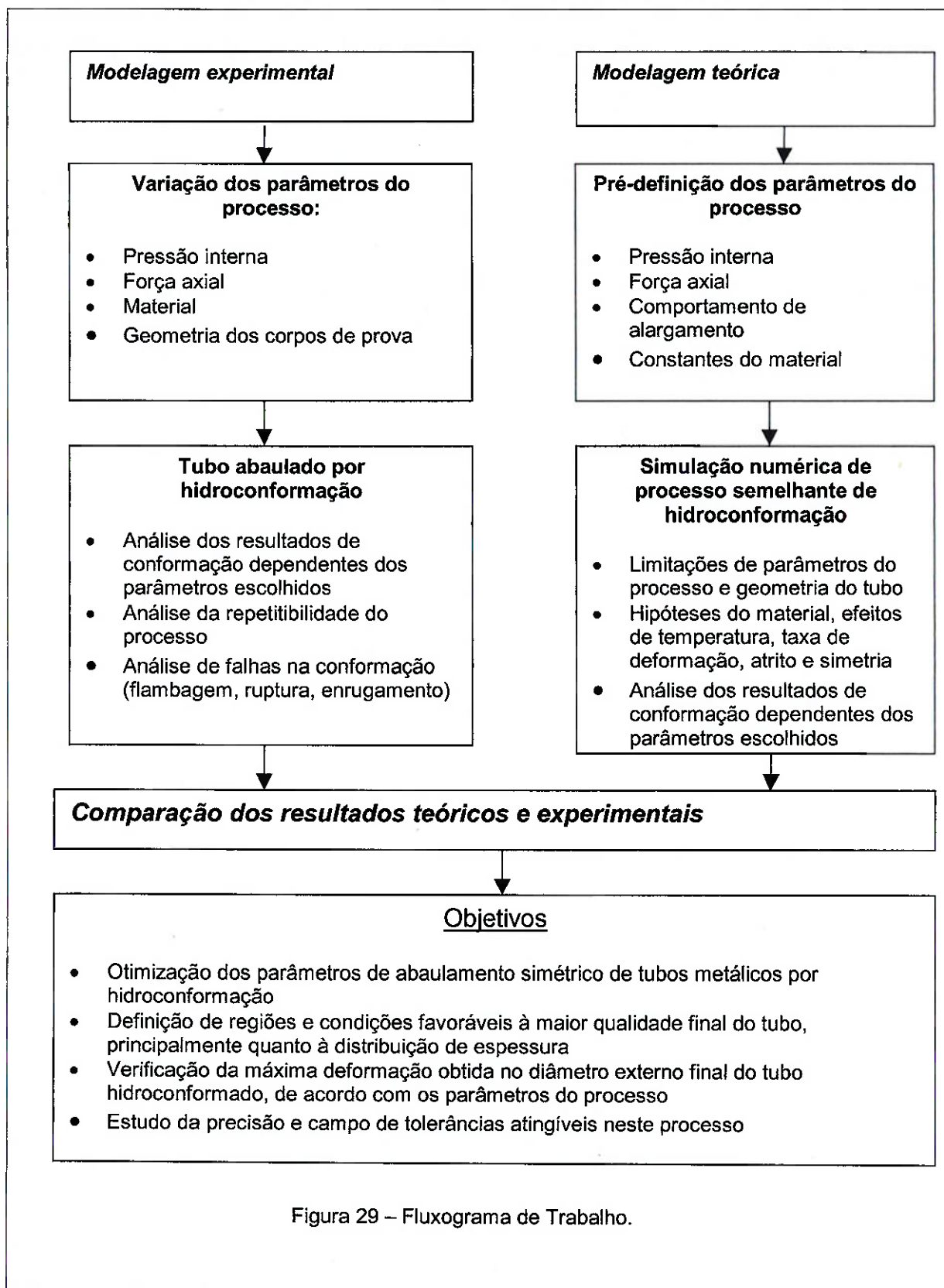


Figura 29 – Fluxograma de Trabalho.

1 - ETAPA: - Revisão bibliográfica

ATIVIDADES: Proceder a revisão bibliográfica relacionada ao tema processos de fabricação por conformação hidrostática, matrizes e ferramentas.

2 - ETAPA: - Ajuste das condições de funcionamento do ferramental

ATIVIDADES: adequação e ajuste do ferramental para realização dos experimentos de hidroconformação

3 - ETAPA: - Planejamento experimental e preparação dos corpos de prova

ATIVIDADES: - preparação de planejamento experimental - preparação dos corpos de prova

4 - ETAPA: - Instrumentação do ferramental

ATIVIDADES: - instrumentação do ferramental de hidroconformação.

5 - ETAPA: - Realização dos experimentos

ATIVIDADES: proceder ensaios e medições

6 – ETAPA: Avaliação dos resultados e discussão

ATIVIDADES: Proceder análise dos resultados e busca de modelos que propiciem e expliquem o fenômeno estudado

7 - ETAPA: Relatório Final

ATIVIDADES: Preparação de relatório final

6 Resultados e Discussão

6.1 Resultados preliminares e problemas de vedação.

Os resultados obtidos não foram os esperados para este processo de hidroconformação. Como se pode observar nas figuras 30 e 31 o resultado final dos ensaios foi um enrugamento em uma das pontas do tubo, em todos os casos na ponta correspondente a tampa inferior do conjunto.



Figura 30 – Conjunto montado das tampas de vedação com o tubo, após a realização de um ensaio.

Uma explicação plausível para o fenômeno observado é a flambagem do tubo ensaiado.



Figura 31 – Tubos após a realização de ensaios.

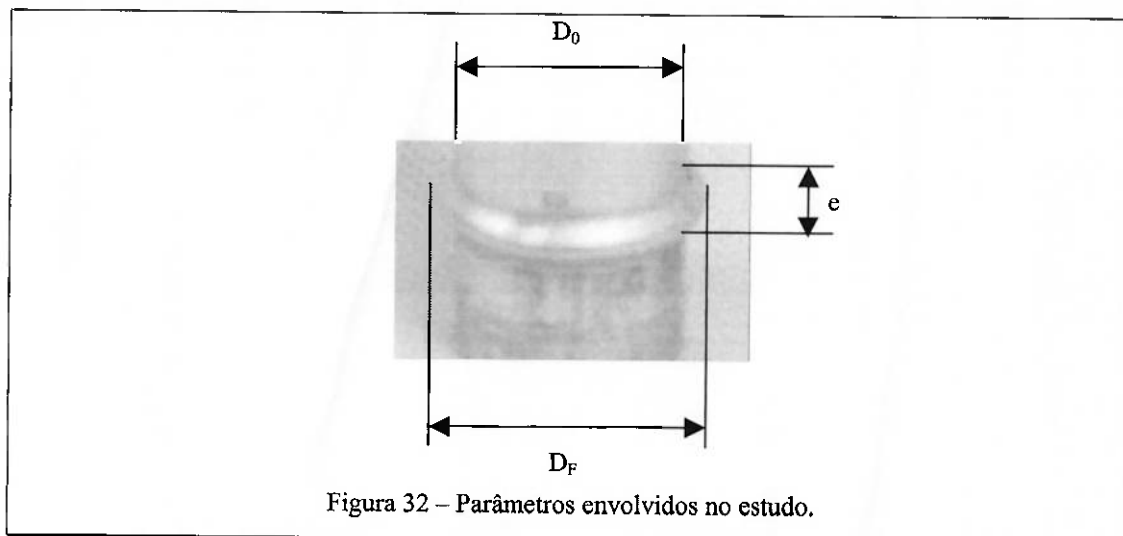
A flambagem ocorreu porque, a vedação localizada entre o tubo e a tampa não suportou a pressão do fluido transmissor de energia contido no interior do conjunto. Devido ao vazamento o fluido que estava localizado entre a tampa superior e o pistão foi deslocado para fora do conjunto. Deste modo, houve o contato direto do pistão com a tampa superior e, portanto, ocorreu uma situação, indesejada, de alta força axial (30kN) e baixa pressão interna.

Dentre os modos de correção deste projeto estariam: a utilização de um meio sólido de transmissão de energia, neoprene, microesferas de borracha ou aço; refazer o sistema de vedação ou utilizar um tubo de material com baixo limite de escoamento combinado com uma espessura menor, que a apresentada neste trabalho.

Para a questão da ocorrência de flambagem no experimento uma correção no comprimento do tubo poderia ser aplicada, de modo que, fosse utilizada uma relação comprimento x diâmetro do tubo menor. As relações 1,51 e 2,0 que foram dadas neste trabalho também poderiam ter sido utilizadas.

6.1.1 Dados sobre os resultados obtidos

Neste item serão explicitados alguns detalhes dos tubos ensaiados.



Tubo 1:

$$D_0 = 25,4\text{mm}$$

$$D_F = 29,7\text{mm}$$

$$e = 5,55\text{mm}$$

$$H_i = 94,0\text{mm}$$

$$H_F = 90,0\text{mm}$$

Tubo 2:

$$D_0 = 25,3\text{mm}$$

$$D_F = 34,0\text{mm}$$

$$e = 2,5\text{mm}$$

$$H_i = 93,0\text{mm}$$

$$H_F = 87,1\text{mm}$$

Tubo 3:

$$D_0 = 25,0\text{mm}$$

$$D_F = 31,8\text{mm}$$

$$e = 3,95\text{mm}$$

$$H_i = 93,5\text{mm}$$

$$H_F = 88,2\text{mm}$$

Tubo 4:

$$D_0 = 25,4\text{mm}$$

$$D_F = 30,4\text{mm}$$

$$e = 3,1\text{mm}$$

$$H_i = 63,5\text{mm}$$

$$H_F = 89,2\text{mm}$$

Sendo, H_i e H_F o comprimento inicial e final do tubo.

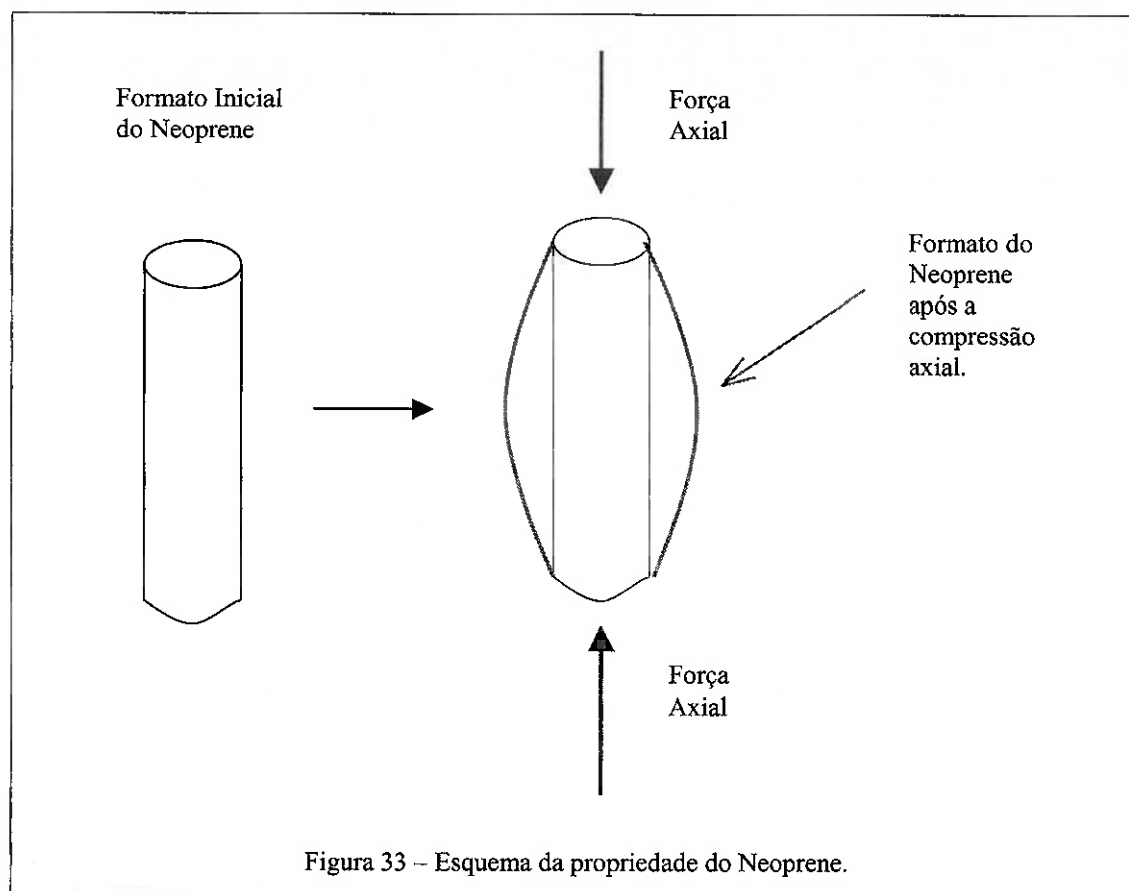
Algumas observações devem ser feitas quanto aos resultados obtidos. Na medida “e” deve-se levar em consideração que no tubo 1 a curvatura da dobra teve um raio maior que os outros tubos. Nos tubos 2, 3 e 4 notou-se que a aparência da dobra era mais achatada.

Os tubos 3 e 4 foram ensaiados com o uso de gel. Os resultados foram semelhantes quando comparados aos tubos 1 e 2. Mas não pode-se estabelecer uma comparação mais efetiva devido às poucas amostras ensaiadas e também por não ser o escopo deste trabalho.

6.2 Resultados com a Utilização de Neoprene Como Meio Transmissor de Energia.

Como o vazamento do fluido durante os ensaios e, deste modo, atingindo resultados não condizentes com um teste de abaulamento. Foi necessário utilizar um meio sólido para transmitir energia.

A escolha do neoprene deu-se a partir de uma propriedade deste material. Quando submetido à força axial este se expande de forma transversal a direção da força, como mostra a figura 32.



A forma final do tubo ensaiado é mostrada pela figura 34.



Analisando os resultados obtidos podemos concluir que o neoprene expande-se como o mostrado na figura 33. Mas, a força de expansão do neoprene não foi suficiente para abaular o tubo de alumínio.

Portanto, o aspecto final do tubo é equivalente a um ensaio de força axial pura.

6.2.1 *Dados Sobre Os Resultados Obtidos*

$$D_o = 25,45\text{mm}$$

$$D_F = 30,6\text{mm}$$

$$H_o = 93,5\text{mm}$$

$$H_F = 82\text{mm}$$

Como foram deformados 11,5mm pode-se notar a formação de uma segunda dobra, o que não aconteceu nos outros ensaios.

Neste tubo ensaiado pode-se observar que as dobras localizam-se mais próximas ao centro quando comparadas aos resultados dos ensaios com fluidos.

7 Conclusão

Pesquisas e experimentos realizados em várias indústrias e universidades durante os últimos 5 anos vêm demonstrando que o processo de conformação hidrostática é de muita utilidade por permitir a conformação de uma grande variedade de peças nos formatos mais variados, e em grande número. Porém, comparado aos processos convencionais de estampagem, o processo de conformação hidrostática é relativamente novo e por esse motivo ainda não há uma base de conhecimento muito extensa desse processo, base esta que precisa ser alcançada para que se possa aproveitar ao máximo o potencial desse novo processo que vêm ganhando cada dia mais espaço nas indústrias.

Parâmetros como a alta pressão utilizada no processo limita a escolha do material das matrizes. Uma variedade de predições mais precisas, tais como, distribuição da espessura do material, pressão interna, forças aplicadas e força de atrito, ainda no modelamento do processo podem ajudar a determinar com antecedência possíveis erros de formato ou mesmo casos de ruptura, o que permitiria que os engenheiros pudessem melhorar, por exemplo, o projeto da matriz antes de sua fabricação.

No trabalho apresentado as influências destes parâmetros foram de vital importância, principalmente, a pressão do fluido transmissor de energia. Este não permitiu que o trabalho fosse completo devido a alta pressão utilizada. O problema da vedação não foi resolvido em tempo hábil para a conclusão deste trabalho.

Uma alternativa utilizada para solucionar o problema da vedação foi a utilização de neoprene como meio de transmissão de energia. Mas como a força de expansão deste material não foi suficiente para abaular o tubo. Podemos concluir que a utilização de outro meio sólido – microesferas de borracha ou aço – pode atuar de forma eficiente para conformar o tubo de alumínio.

Deve-se ressaltar que a contribuição deste trabalho está na descrição da técnica de abaulamentos de tubos através da hidroconformação e,

principalmente, nos relatos dos problemas existentes no processo de forma que os próximos estudos sobre esta área incluam os nossos resultados.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALTAN, T. **Metal Forming Handbook/Schuler**. Berlin: Springer, p. 405-432, 1998.
- [2] AHMETOGLU, M. & ALTAN, T. **Tube Hydroforming: state-of-the-art and future trends**. J. of Materials Processing Technology, 98, p. 25-33, 2000.
- [3] ALTAN, T. & MUAMMER, K. **Prediction of forming limits and parameters in the tube hydroforming process**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 42, p. 123-138, 2001.
- [4] DOHMANN, F. & MEYER, W. **Tribologie der Innenhochdruckumformung**. Blech Rohr und Profile, 10/97, p. 36-39.
- [5] VOLLERTSEN, F. **Accuracy in process chains using hydroforming**. Journal of Materials Processing Technology, 103, p. 424-433, 2000.
- [6] AHMETOGLU, M.; SUTTER, K.; LI, X. J.; ALTAN, T.; **Tube hydroforming: current research, applications and need for training**. J. of Materials Processing Technology, 98, p. 224-231, 2000.
- [7] BORTOLUSSI, R. & BUTTON, S. T.; **Simulação do Processo de Hidroconformação de Tubos**, *Anais XX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM 2001*, Vol. CD-R, Uberlândia, MG, BRASIL, pp.1-1, 2001.
- [8] ALTAN, T. & MUAMMER, K. **An overall review of the tube hydroforming (THF) technology**. Journal of Materials Processing Technology, 108, p. 384-393, 2001.
- [9] **Metals Handbook – Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals**. Volume 2, ninth edition, p. 46, 94-97, American Society for Metals.
- [10] SCHULER. **The Magazine for Metalforming Inform**. 1/2000 – 2/2000.
- [11] **BLECH ROHRE PROFILE**. 10/97

- [12] SIEGERT, K.; HÄUSSERMANN, M.; LÖSCH, B.; RIEGER, R. **Recent developments in hydroforming technology.** Journal of Materials Processing Technology, v. 98, p. 251-258, 2000.
- [13] SOKOLOWSKY, T.; GERKE, K.; AHMETOGLU, M.; ALTAN, T. **Evaluation of tube formability and material characteristics: hydraulic bulge testing of tubes.** Journal of Materials Processing Technology, v. 98, p. 34-40, 2000.
- [14] MAC DONALD, B.J.; HASHMI, M. S. J. **Finite element simulation of forming of a cross-joint from a tubular blank.** Journal of Materials Processing Technology, v. 98, p. 335-342, 2000.
- [15] VARI-FORM. **The ABCs of hydroforming, Tube Hydroforming Principles and Applications.** pp.1-11, VAR-1082 12/99.
- [16] Pipan, J.; Kosel, F. **Numerical simulation of rotational symmetric tube bulging with inside pressure and axial compression.** International Journal of Mechanical Sciences, v. 44, p. 645-664, 2002.
- [17] Kurt Lange. **Handbook of Metal Forming.** p. 23.20 – 27. McGraw-Hill.
- [18] Sites na internet
- http://nsm.eng.ohio-state.edu/THFCapa/Bulge_Test/bulge_test.html
 - <http://www.ptu.tu-darmstadt.de/forschung/forschung.html>
 - <http://www.hydroforming.net>
 - <http://www.hydroforming.mb.uni-magdeburg.de>
 - <http://www.kaup.com/hydro.htm>
 - <http://www.schuler-hydroforming.de>
 - <http://www.alcan.com.br>
- [19] Santoni, Cristiane **Apoio na Revisão Bibliográfica e Fundamentação teórica,** 2002.