

# HIDROCONFORMAÇÃO DE TUBOS: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NO PROCESSO

## **Aline Szabo Ponce**

Departamento de Engenharia Mecatronica e de Sistemas Mecânicos - Escola Politécnica da USP  
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 – 05508.900 Sao Paulo – SP - [aline.ponce@poli.usp.br](mailto:aline.ponce@poli.usp.br)

## **Roberto Bortolussi**

Departamento de Engenharia Mecânica - Centro Universitário da FEI – Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, [roberto@fei.edu.br](mailto:roberto@fei.edu.br)

## **Gilmar Ferreira Batalha**

Departamento de Engenharia Mecatronica e de Sistemas Mecânicos - Escola Politécnica da USP  
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 – 05508.900 Sao Paulo – SP - [gfbatalh@usp.br](mailto:gfbatalh@usp.br)

**Resumo.** A hidroconformação de tubos é um processo de fabricação mecânico que atualmente é o foco das atenções de grandes indústrias, como a automobilística. Neste trabalho serão estudados a influência que os parâmetros exercem no processo, e o comportamento da peça em função deles. Para isso foi necessário o projeto e a realização de um dispositivo capaz de monitorar e controlar os parâmetros do processo. A metodologia experimental consistiu em realizar ensaios, conformando tubos de cobre UNSC11000 em juntas “T”, por hidroconformação, no dispositivo mencionado. Com os resultados obtidos será possível estimar os valores ótimos dos parâmetros de processo para conformar a peça.

**Palavras-chave:** hidroconformação, conformabilidade, parâmetros de processo, otimização.

## **1. INTRODUÇÃO**

A indústria vem desenvolvendo nos últimos anos métodos e processos de produção que aumentam a produtividade e reduzem custos de componentes, conjuntos e produtos. Além disso, há uma grande preocupação na redução do tempo de desenvolvimento de novos projetos, devida à grande concorrência, em que atrasos no desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias significam grandes prejuízos <sup>(1)</sup>. Entre tais processos merece destaque o da hidroconformação. Ele consiste na obtenção de peças metálicas por conformação a partir da aplicação simultânea de pressão hidrostática de fluido e esforços de compressão sobre o material a ser conformado (chapas, ou tubos). Seu campo de aplicação é muito variado, por permitir a fabricação de peças das mais complexas geometrias <sup>(2)</sup>, com significativos aumentos da relação resistência mecânica/peso e da economia de mão de obra e material <sup>(3)</sup>. O sucesso das peças hidroconformadas se deve a diversos fatores, dependentes de características inerentes ao material, dos parâmetros adotados, da geometria da peça, etc. Entre as maiores limitações do processo estão os fenômenos de falhas por estrição, enrugamento e ruptura, ilustrados adiante, além de certo desconhecimento das melhores relações entre os parâmetros do processo <sup>(2)</sup>.

O presente trabalho apresenta resultados obtidos na hidroconformação de componentes tubulares e determinação dos parâmetros de processo para tubos de cobre eletrolítico UNS C11000. Serão

realizados ensaios de hidroconformação de um tubo cilíndrico de 28 mm de diâmetro externo, em uma junta “T”. Para a realização destes ensaios projetou-se e construiu-se um dispositivo servo controlado, que acoplado a uma prensa hidráulica permite a operação de hidroconformação do tubo. Os resultados obtidos até agora avaliam as condições oferecidas pelo sistema desenvolvido.

## 2. PROCESSO DE HIDROCONFORMAÇÃO DE TUBOS

A hidroconformação de peças “T” é um dos processos mais utilizados para análise das variáveis envolvidas. Por isso, ela será estudada neste trabalho <sup>(4)</sup>. A figura 1, abaixo, ilustra o processo. Inicialmente, o blank, chapa ou tubo, é colocado em contato com uma ferramenta matriz, cuja geometria será impressa no mesmo. A peça fica entre as duas metades da ferramenta que se fecha, garantido uma força que evita a expansão do tubo no sentido diametral. A seguir, os cilindros de compressão empurram o material e simultaneamente a pressão interna começa a aumentar, mudando a forma do tubo. Neste instante, o cilindro de contra-pressão, colocado na parte superior da ferramenta, evita que ocorra uma redução excessiva de espessura, exercendo uma força oposta à direção da expansão. Na figura 1, estão mostradas as partes da ferramenta e a seqüência do processo para a obtenção de uma peça em forma de “T”. Asnafi <sup>(5)</sup> define que o processo de hidroconformação pode ser controlado ou pela força exercida ou pelo deslocamento dos cilindros de compressão. O primeiro depende do material e das suas condições, pois variações das propriedades mecânicas requerem mudanças na força, mesmo que não se altere as condições do deslocamento. Alterações das condições de atrito durante a vida útil da ferramenta também provocarão variações na força de compressão requerida; cabe ressaltar que, mesmo para pequenas variações de coeficiente de atrito nas elevadas pressões que ocorrem na região reta do tubo, a força de compressão sofrerá grandes variações. Já o deslocamento depende menos destas variações de condições do sistema peça-ferramenta.

### 2.1 Parâmetros do processo

Na hidroconformação deve-se determinar: as forças de conformação da peça, que é a soma dos esforços de compressão, de atrito e da pressão interna, e a força de fechamento da matriz, levando em conta a pressão para início do escoamento e a deformação nos quais irá ocorrer a instabilidade plástica. A adequada relação entre a pressão interna e os deslocamentos dos cilindros axiais é um dos fatores decisivos no sucesso do processo. A figura 2 apresenta um comportamento típico desta relação.

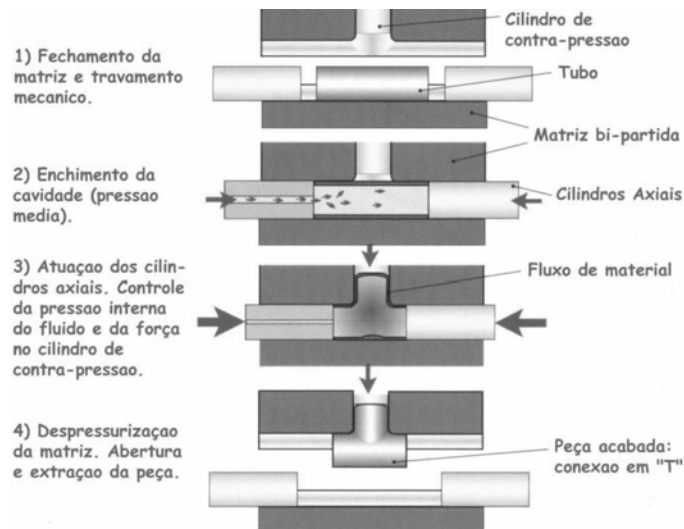


Figura 1: Processo de hidroconformação de um tubo em “T” <sup>(4)</sup>.

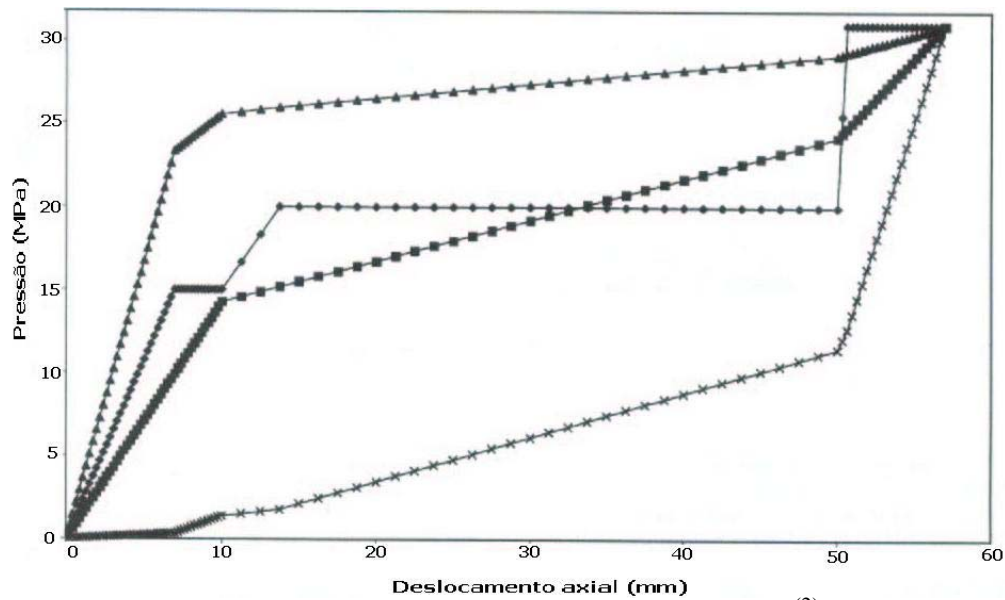


Figura 2: Curva pressão vs. deslocamento axial <sup>(2)</sup>.

O processo de hidroconformação tem sido objeto de estudo dos autores, via simulações MEF e experimentais <sup>(1,6)</sup>. Com os modelos numéricos é possível determinar os valores de deformação ao final do processo, especialmente a deformação da espessura. Com os valores obtidos é possível determinar a seqüência de aplicação dos carregamentos sem que ocorram instabilidade plástica ou redução excessiva da espessura. Segundo Altan e colaboradores <sup>(7-8)</sup>, a gama de pressões hidrostáticas utilizadas na conformação varia entre 5 e 600 MPa, dependendo da geometria da peça, da espessura e do material do blank. Ao longo do processo as pressões aplicadas variam, sendo as mais altas atingidas ao final do ciclo, quando ocorre a calibração da peça, obtendo-se precisão da geometria e dimensões desejadas. 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 <sup>(4)</sup>.

## 2.2 Falhas típicas inerentes ao processo

Durante o processo de hidroconformação de tubos e chapas, há basicamente três classes de defeitos devido à má manipulação dos parâmetros do processo: enrugamento, estrição e ruptura ou fissura.

Flambagem/Enrugamento: ocorrer em tubos, sendo mais freqüente principalmente nas zonas de expansão, quando o deslocamento dos cilindros axiais for muito rápido face ao nível da pressão interna associada <sup>(3)</sup>. A flambagem ocorre num aspecto generalizado, enquanto que o enrugamento é o fenômeno da flambagem localizada. Na figura 3 é apresentado um exemplo de flambagem e um de enrugamento em peças hidroformadas.

Estricção: pode ocorrer em tubos e chapas, provocada pelo estiramento excessivo devido à pressão interna elevada, com redução significativa da espessura da chapa ou da parede do tubo. A estricção pode ser generalizada, quando ocorre por toda a área de deformação, ou localizada, quando ocorre em regiões concentradas. O segundo tipo de estricção é o mais preocupante, pois sua ocorrência leva rapidamente o material à ruptura.

Ruptura ou fissura: pode ocorrer em tubos e chapas, provocada pela pressão interna excessiva, e se verifica quase sempre após a estricção localizada. A figura 3 a) mostra uma fissura de peça hidroformada. Estas falhas podem acontecer devido à instabilidade do material sob carregamentos

inadequados, produzidos por certas relações entre o deslocamento dos cilindros axiais e a pressão interna, principalmente <sup>(9)</sup>. Essa limitação é ilustrada na figura 3 b).

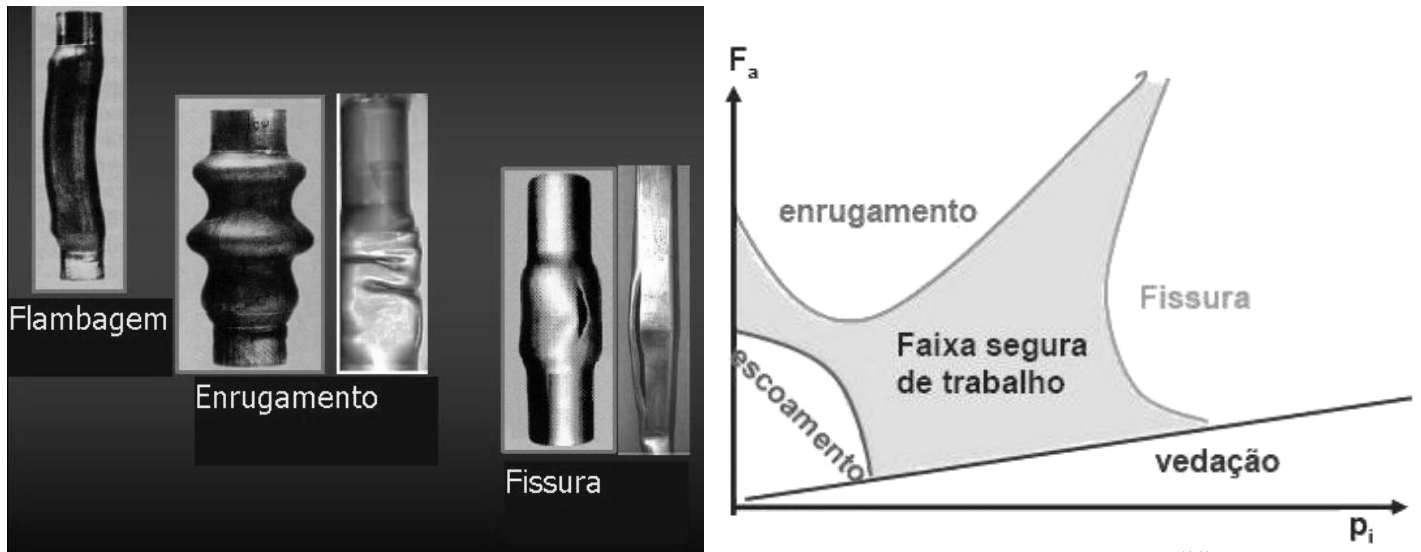


Figura 3: a) Defeitos na hidroconformação <sup>(10)</sup>.

b) Janela do processo <sup>(11)</sup>.

Na figura 3 b) se observa que nas regiões onde a pressão interna é muito maior do que o deslocamento axial, a vedação falha. Nas regiões onde tanto pressão quanto os 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, fissura e/ou estricção podem ocorrer <sup>(12)</sup>. Assim, o processo está limitado à faixa ótima, centro da fig. 3 b).

### 3. CONTROLE DO DISPOSITIVO PARA HIDROCONFORMAÇÃO

#### 3.1 Necessidades do sistema a controlar

Por ser um processo de alta precisão, e baseado em fenômenos complexos como a plasticidade dos materiais, a hidroconformação exige um controle rápido, preciso e ágil. A velocidade de aquisição, manipulação e saída dos dados devem ser relativamente altas por questões de segurança. A pressão interna de fluido está sujeita aos grandes picos ou quedas abruptas na presença de qualquer deslocamento axial indesejado. Sendo assim, a precisão da leitura dos sensores que irão monitorar estes deslocamentos deve ser adequada. Bem como o tempo de resposta da variável que controla esta pressão deve ser o menor possível para corrigir a pressão em caso de acréscimos ou decréscimos indesejados. Caso o ajuste e o controle destas variáveis não sejam conduzidos de modo simultâneo e preciso, torna impossível realizar o processo.

#### 3.2 Descrição do sistema a controlar:

O dispositivo de hidroconformação de tubos em juntas “T” é composto por uma ferramenta matriz, dois cilindros axiais, um de contra-pressão e um de fechamento, duas unidades hidráulicas independentes, uma para a alimentação dos cilindros, outra para o fornecimento do fluido pressurizado, válvulas direcionais comuns, proporcionais, servoválvula e sensores. Os diagramas hidráulicos das figuras 4, 5, e 6 ilustram a configuração do sistema hidráulico.

No diagrama da figura 4 pode-se notar a presença de duas unidades hidráulicas distintas, onde as siglas significam: AX- cilindros axiais, CP- contra-pressão, F-fechamento, AP-amplificador de pressão, UH1-unidade hidráulica principal do sistema, UH2- unidade hidráulica do sistema amplificador de pressão. As duas unidades estão mostradas em maiores detalhes nas figuras 5 e 6.

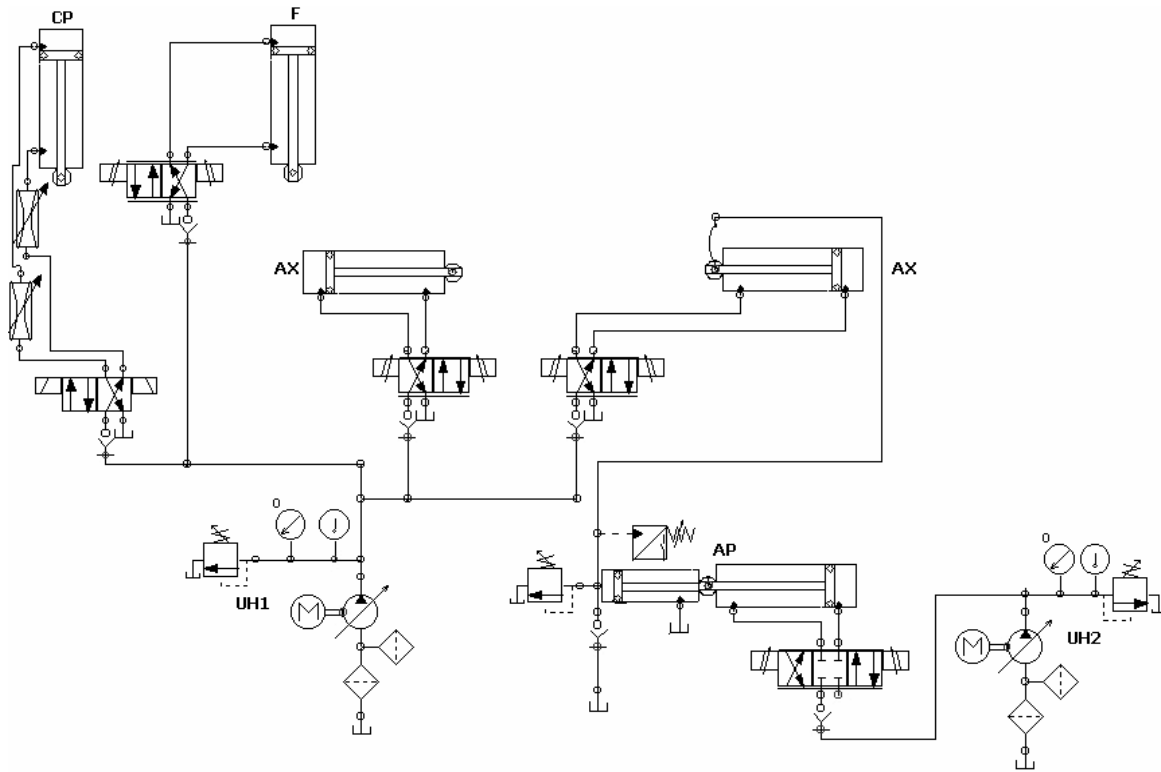


Figura 4: Diagrama geral simplificado do equipamento

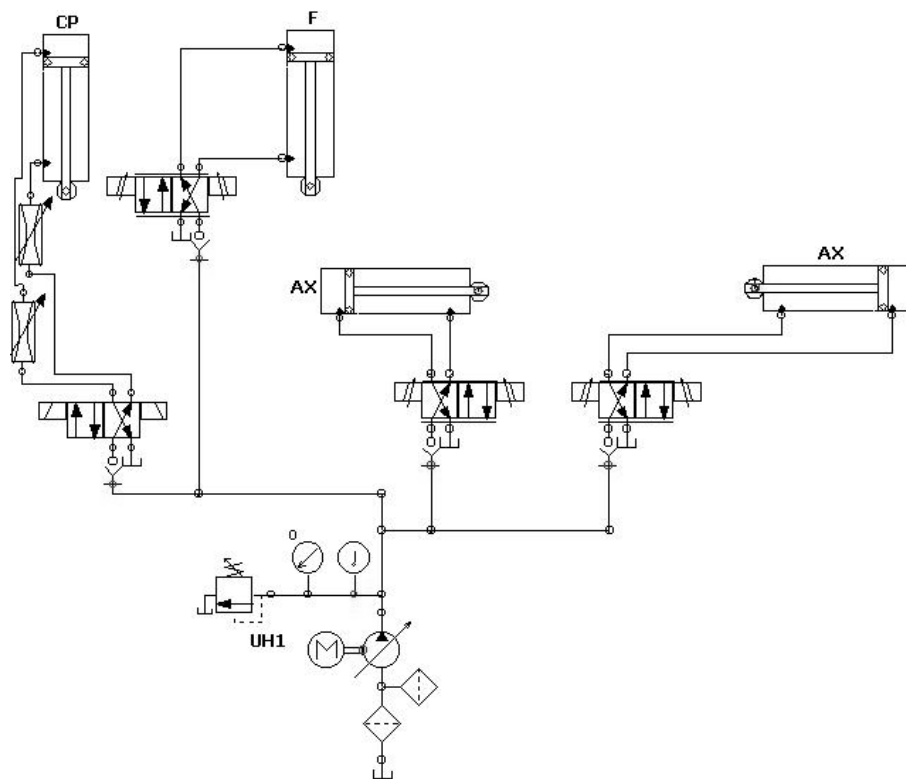


Figura 5: Diagrama hidráulico da unidade básica.

Na figura 5, que trata da unidade hidráulica básica, o cilindro de fechamento, responsável pela força de fechamento é controlado por uma válvula direcional de vazão, manualmente acionada através de uma botoeira. Ainda nesta figura observa-se que os cilindros axiais, que atuam nas duas forças axiais, são controlados cada um por uma válvula proporcional de vazão. O cilindro de contra-pressão, equipado com uma célula de carga, é controlado por uma válvula direcional comum, auxiliada por controladores de vazão manuais. Na figura 6, a unidade amplificadora de vazão é composta por servo atuador e servo-válvula, com capacidade de fornecer até 210 bar de pressão interna. As fotos do equipamento podem ser observadas na figura 7.

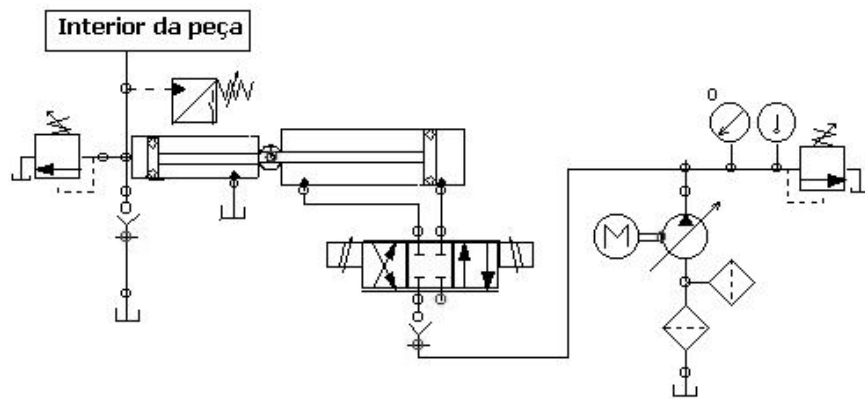


Figura 6: diagrama hidráulico da unidade amplificadora.

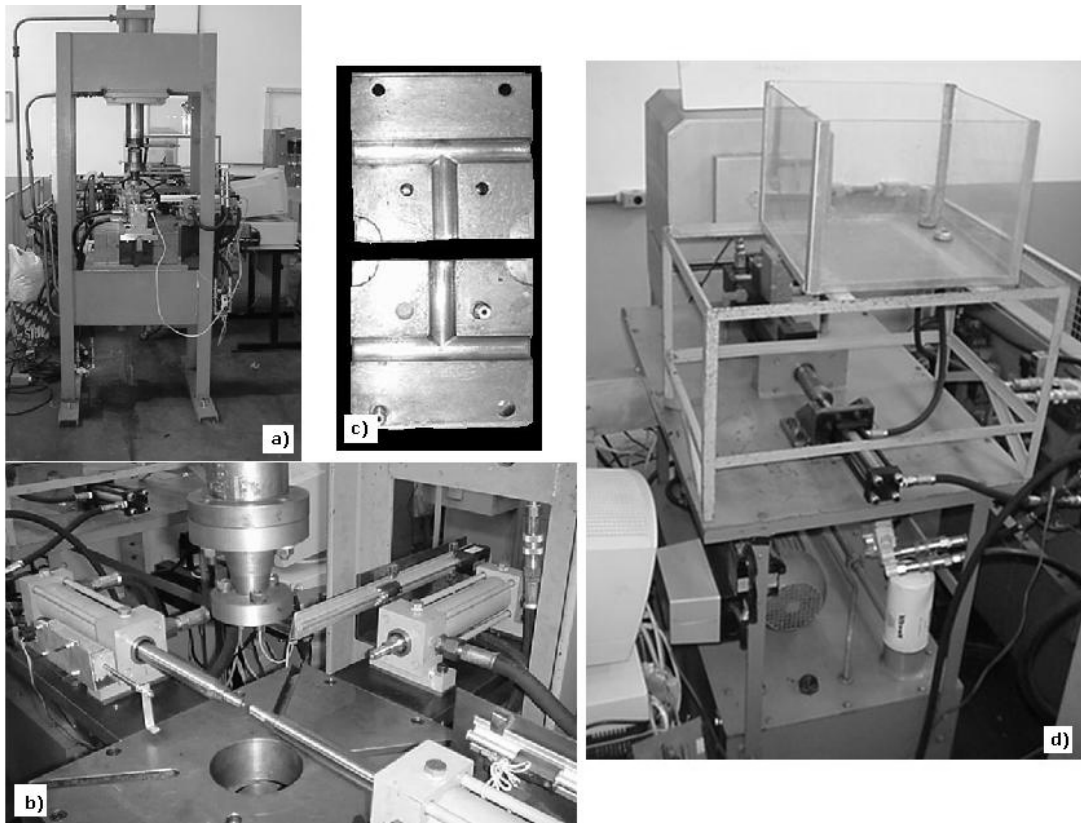


Figura 7: Dispositivo de hidroconformação a) vista da prensa completa; b) Cilindros axiais e de contra-pressão e seus transdutores de posição; c) Ferramenta matriz; d) Cilindros amplificadores de pressão.

Uma descrição pouco mais detalhada de cada componente do dispositivo para hidroconformação de tubos pode ser observada nas tabelas 1, 2 e 3.

Tabela 1: elementos controladores do sistema.

Qtd.	Descrição	Características
01	Servo-Válvula de vazão MOOG – Resp.: 450 Hz	Tensão alimentação: +24V Entrada: 0 a 10V CC
02	Válv. proporcional de vazão YUKEN Resp.: 30 Hz	Tensão de alimentação: +24VCC Entrada: 0-5V CC

Tabela 2: sensores do sistema.

Qtd.	Descrição	Características
01	LVDT GEFTRAN Régua potenciométrica	Tensão de alimentação: +12V CC Saída: 0-10 mA
01	Transdutor de pressão - Extensômetro de resistência	Tensão de alimentação: +12V CC Saída: 0-20 mA
01	Transdutor de pressão- Extensômetro de resistência	Tensão de alimentação: +12V CC Saída: 0-20 mA
01	Célula de carga - Extensômetro de resistência	Tensão alimentação: +5VCC Saída: 2mV/V máx def.
01	LVDT MTS Temposonics - Régua potenciométrica	Tensão de alimentação: +24V CC Saída: 4-20 mA

Tabela 3: elementos responsáveis pela aquisição de dados e comandos do sistema.

Qtd.	Descrição	Características
01	Placa Advantech PCI 1713 Entrada	32 canais analógicos de entrada ou 16 canais analógicos diferenciais.
01	Placa Advantech PCI 1723 Entrada/Saída	8 canais analógicos (Saída) 16 canais digitais (I/O) Saída +12 e +5V CC

Para que o processo seja controlado com sucesso, existe a necessidade de implantar ao sistema rotinas de leitura, comparação e escrita, nas quais os algoritmos de controle são implementados. Os elementos sensores têm a função de monitorar o sistema durante todos os momentos do processo e informar ao algoritmo de controle o estado instantâneo de cada variável que está sendo lida. Os elementos atuadores atuam no sistema conforme recebem sinais da placa controladora. Um elemento supervisorio é utilizado e permite informar ao operador do dispositivo todas as situações do processo, e ainda permite a intervenção do mesmo sobre o processo a qualquer momento. O supervisorio usado neste trabalho é o software Advantech Studio, em versão demonstrativa, fornecido pela própria empresa. Essa relação dinâmica estabelecida pelas rotinas entre os sensores, atuadores e supervisorio pode ser observada nos fluxogramas de rotinas exibidos na figura 8. Pode-se observar que os elementos sensores (dispostos em azul) enviam informações ao software através da placa de aquisição de sinais (em verde). O Software envia as ordens para a placa de escrita de sinais (em amarelo) que por sua vez, envia sinais aos elementos atuadores (representados em vermelho). Nota-se ainda na figura 8 que há um sistema de retro-alimentação em malha fechada entre os elementos atuadores, placas e o software. O primeiro pfluxograma é o relacionado com a válvula proporcional, que controla o deslocamento dos cilindros axiais. O segundo é o relacionado com a válvula direcional que controla o deslocamento do cilindro de contra-pressão e o terceiro se refere a servo-válvula, a qual atua na pressão interna de fluido. Desta forma, o controlador recebe e envia sinais ao sistema da forma prevista no diagrama da figura 9 a).

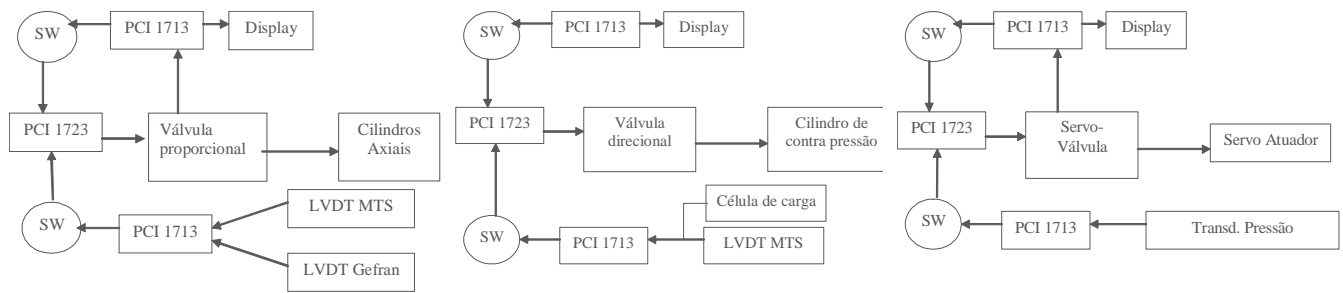


Figura 8: Rotinas de leitura dos sensores e escrita nos atuadores. A sigla SW denota software.

Estas relações dinâmicas obedecem a um algoritmo lógico básico representado pelo fluxograma lógico da figura 9 b). Aplicando estes algoritmos e rotinas ao sistema, este atenderá aos comandos fornecendo uma resposta, que será mostrada na próxima seção.

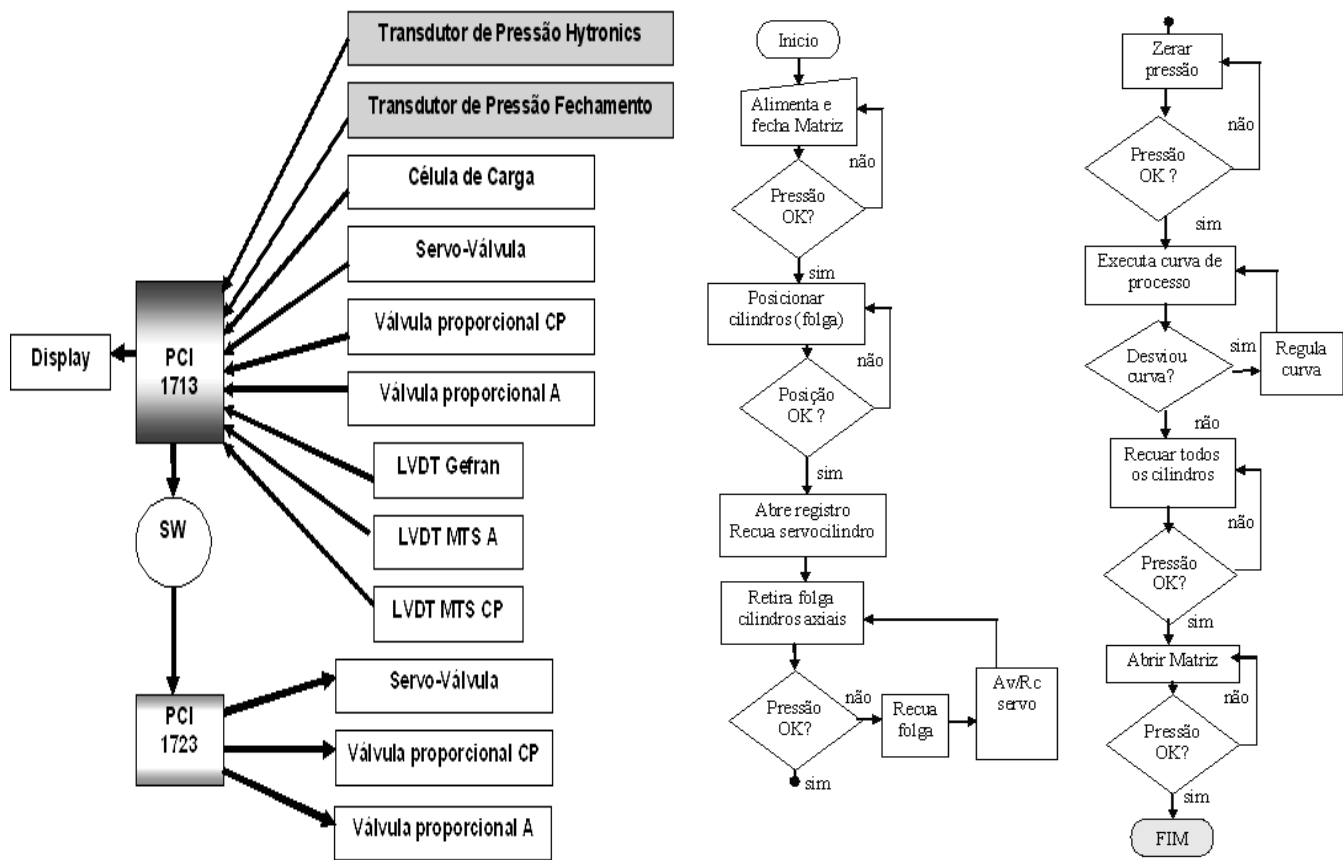


Figura 9: a) Projeto do controlador.

b) Fluxograma do algoritmo do controlador.

#### 4. RESULTADOS PRELIMINARES

Todo sistema mecânico controlado eletronicamente apresenta um comportamento característico de respostas mediante o estímulo ou comando. Este comportamento é função da inércia tanto do sistema mecânico, que depende da natureza e da qualidade de seus atuadores, quanto do sistema eletrônico, que depende da qualidade, da disposição dos seus componentes como também da distância física entre o módulo de controle e o fenômeno controlado. É sabido que podem existir divergências entre



equipamentos eletrônicos que, mesmo sendo idênticos apresentam comportamento diferente. No sistema deste trabalho, uma das variáveis essenciais para a realização do processo é o deslocamento axial. Ele irá promover o fluxo de material na direção do trecho em expansão, evitando a excessiva redução de espessura do material. Por esta variável necessitar de controle preciso, é monitorada por LVDTs e atuada por duas válvulas proporcionais de controle de vazão YUKEN. Os cilindros, no entanto, apresentam comportamento diferente um do outro, quando atuados com uma válvula ou a outra. Com isso, foi necessário levantar curvas de equivalência entre as válvulas, a fim de obter curvas de resposta do sistema em função do sinal de escrita, assim permitindo comandar os deslocamentos igualmente. Se os deslocamentos dos cilindros axiais não forem muito próximos, a junta T apresenta dois defeitos: descentralização da protuberância; tendência a inclinação da protuberância para o lado de maior velocidade. É possível visualizar estas situações nas figuras 10 a), b) e c). Visualiza-se na figura 10 a) que a protuberância ainda em seu início, está descentralizada. O lado marcado em azul se deslocou com maior velocidade do que o lado em vermelho. A figura 10 b) mostra que o corpo de prova sofreu enrugamento (rugas ressaltadas pelas setas pretas), o que denota excessiva compressão axial em relação ao aumento da pressão interna ao tubo. Também se observa a tendência da protuberância se inclinar para o lado que deformou com maior velocidade. Observa-se na figura 10 c) que neste corpo de prova uma ocorrência de fratura devido a excessiva pressão interna. E flambagem após a depressurização. As curvas de resposta dos cilindros até equalização em três velocidades distintas estão nas fig. 11 a 13.

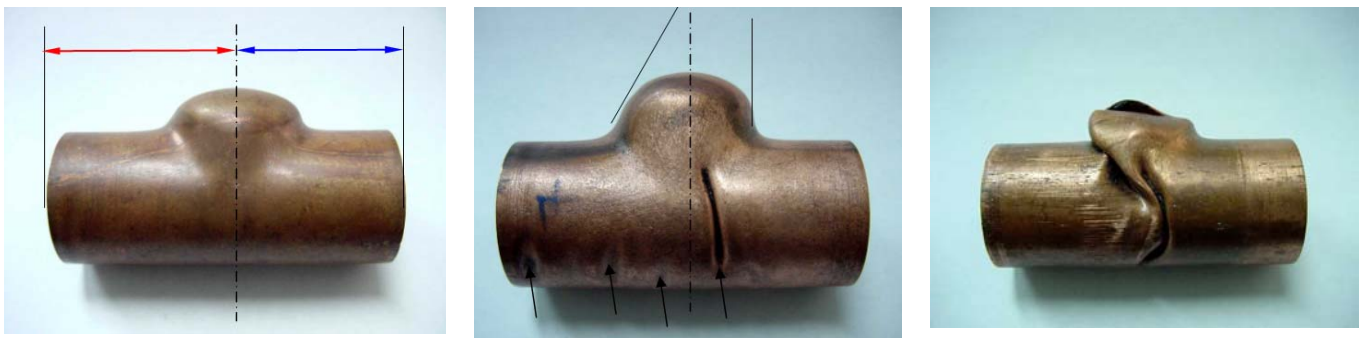


Figura 10: a) Peça descentralizada; b) Peça com rugas; c) Flambagem e fratura.

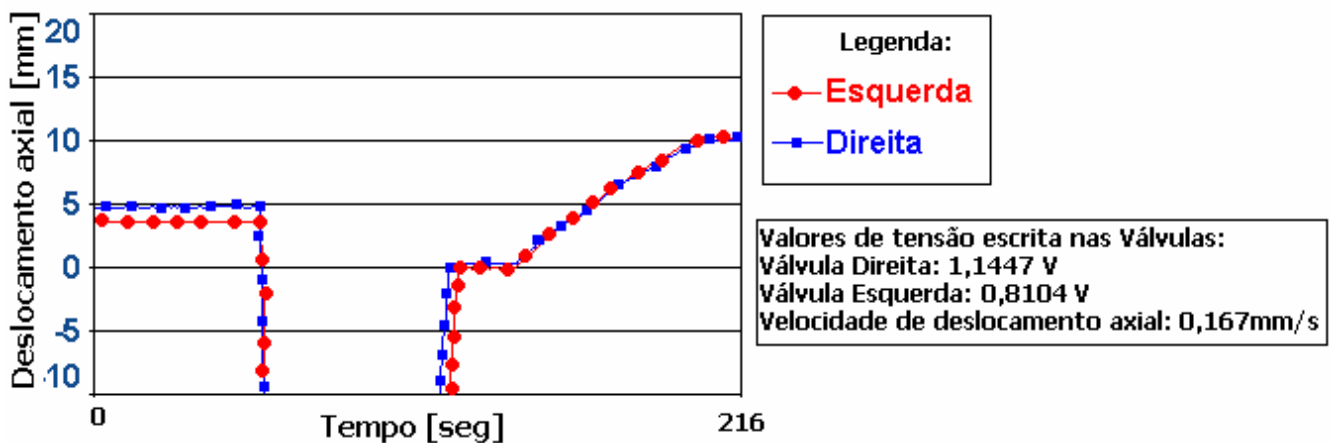


Figura 11: Menor velocidade equalizada para os atuadores axiais.

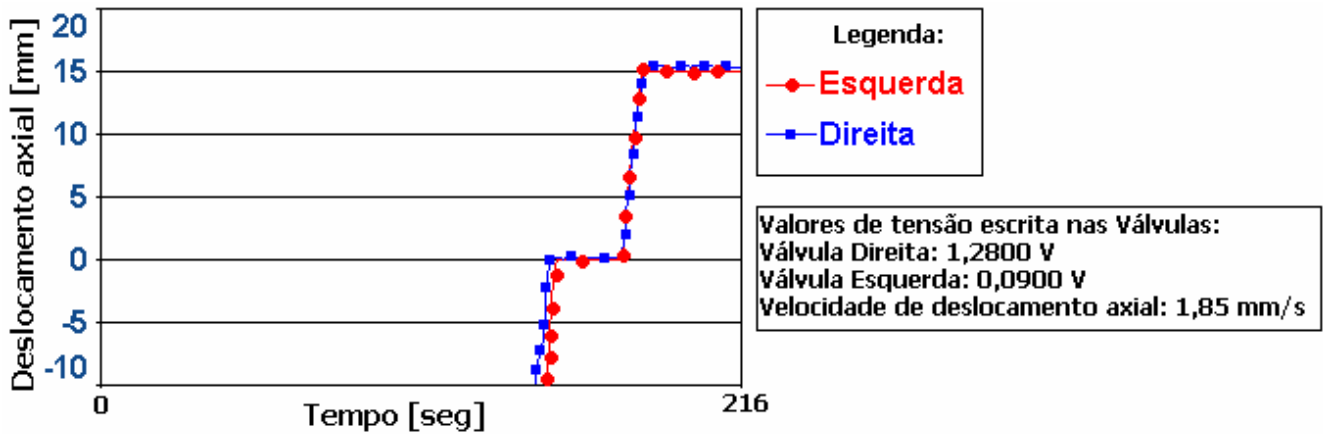


Figura 12: Velocidade intermediária para os atuadores axiais.

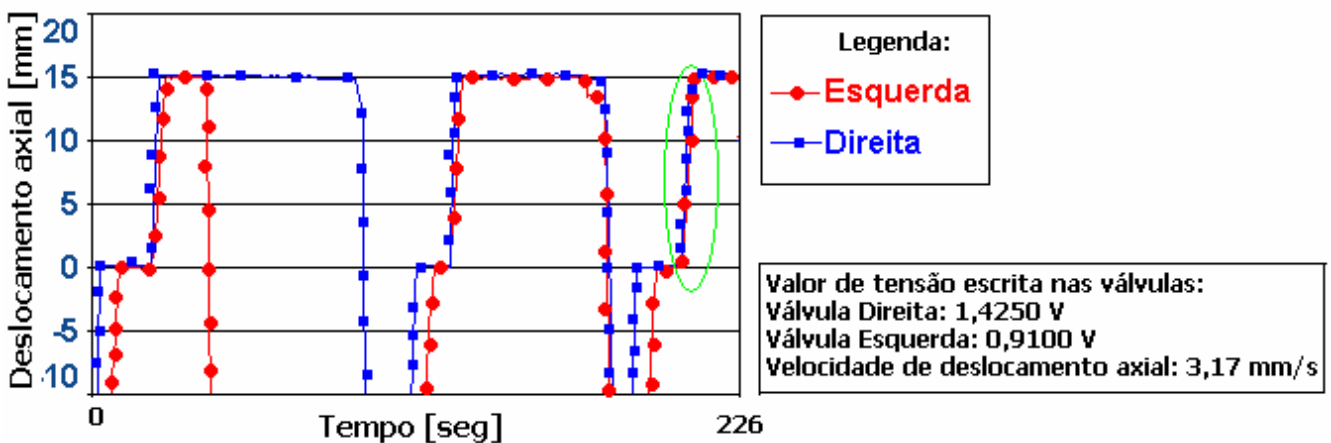


Figura 13: Circulo verde a mais aproximada equivalência de velocidades para os dois atuadores axiais

É possível notar que enquanto que a válvula denominada direita inicia seu deslocamento em mínima velocidade a partir de 1,0 V de sinal de entrada, enquanto que a esquerda começa logo a partir de 0,8 V. Foi medida com o auxílio de um multímetro de precisão a tensão de chegada fisicamente na válvula, e comparou-se este valor com o valor na saída do sistema de controle. O erro devido a resistência elétrica dos cabos causou amplitude de variação de tensão na 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.

## 5. CONCLUSÕES PRELIMINARES

- Concluiu-se que a inércia do sistema como um todo deve ser considerado na concepção das curvas de controle do processo.
- Também se verificou que componentes eletrônicos idênticos podem apresentar variações na resposta ao comando.
- O equipamento projetado e construído permite um controle preciso dentro do tempo necessário para o processo de hidroconformação realizado.
- A partir das curvas de equivalência é possível programar parâmetros de processo iguais no sistema axial de deslocamentos.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário FEI a colaboração e por proporcionar todas as condições para a construção do dispositivo deste trabalho.

## 7. REFERÊNCIAS

1. BORTOLUSSI, R. **Análise Numérica e Experimental da Hidroconformação de Produtos Tubulares**. 2001. 122p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas / Faculdade de Engenharia Mecânica, São Paulo, 2001.
2. LEJEUNE, A.; BOUDEAU, N.; GELIN, J. C., 2002, Influence of material and process parameters on the development of necking and bursting in flange and tube Hydroforming, **Journal of Material Processing Technology**, 125-126, 849-55.
3. LEI, L. P. et al., 2003, Rigid-plastic finite element analysis of Hydroforming process and its applications. **J. Materials Processing Technology**. 139, 187-194, 2003
4. SCHULER GROUP, 2003, **Metal Forming Handbook**, Alemanha. Springer Verlag, 1998
5. ASNAFI, N., 1999, Analytical modeling of tube hydroforming, **Thin Walled Structures**, 34, 295-330.
6. ABRANTES, J. P. & BATALHA, G. F. 2003, - **Simulação numérica via elementos finitos da conformação de chapas metálicas por pressão hidráulica (Bulge Test)** In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2 COBEF.. Uberlândia, 2003. : ABCM, 2003
7. KOÇ, M. & ALTAN, T., 2001, An overall review of the tube hydroforming (THF) Technology, **Journal of Materials Processing Technology** , 108, 384-93, 2001
8. AHMETOGLU, M. & ALTAN, T., 2000, Tube hydroforming: state-of-the-art and future trends **Journal of Materials Processing Technology** , 98, 25-33
9. LEJEUNE, A.; BOUDEAU, N.; GELIN, J. C., 2003, Influence of material and process parameters on bursting during hydroforming process. **J. Materials Processing. Technology**, 143-144, 11-7.
10. OSU 2004 - [http://nsmwww.eng.ohio-state.edu/THF\\_Automotive\\_Appln\\_Dr\\_G\\_Mississippi.pdf](http://nsmwww.eng.ohio-state.edu/THF_Automotive_Appln_Dr_G_Mississippi.pdf)
11. ASNAFI, N.; SKOGSGARDH, A. Theoretical and experimental analysis of Stroke-controlled tube hydroforming **Materials Science and Engineering**, A279 p.95-110, 2000.
12. PONCE, A. S., BATALHA, G. F., 2003, “Conformação hidrostática de chapas e tubos” VI Conferência nacional de conformação de chapas”, Porto Alegre, UFRGS, p. 165-176, 2003.