

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA EXPANSÃO HIDROSTÁTICA DE TUBOS DE ALUMÍNIO

Jorge Paiva Abrantes

Laboratório de Engenharia de Fabricação - Dept. de Eng. Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos – EPUSP - Av. Prof. Mello de Moraes, 2231, 05508-900, São Paulo, SP- jorge.abrantes@poli.usp.br

Carlos Eduardo Célia de Lima

Laboratório de Engenharia de Fabricação - Dept. de Eng. Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos – EPUSP - Av. Prof. Mello de Moraes, 2231, 05508-900, São Paulo, SP- carlos.celia@poli.usp.br

Gilmar Ferreira Batalha

Laboratório de Engenharia de Fabricação - Dept. de Eng. Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos – EPUSP - Av. Prof. Mello de Moraes, 2231, 05508-900, São Paulo, SP- gfbatalh@usp.br

Resumo: *A hidroformagem (ou conformação hidrostática) é um processo de conformação que utiliza um meio fluido para conformar através de uma elevada pressurização interna da peça. No caso da hidroformagem de tubos, um blank tubular é colocado entre duas matrizes, é selado e água é introduzida a até 1200MPa, deformando-se a parede do tubo na forma da cavidade das matrizes. As vantagens da hidroformagem sobre o processo tradicional são : a)Redução de peso; b)Aumento da flexibilidade do projeto, tornando possíveis novas formas de peças; c)Aumento da rigidez devido à obtenção de peças tubulares contínuas sem solda; d)Eliminação de regiões unidas por solda ou outros tipos de uniões; e) Melhora da repetibilidade dimensional. A redução de peso obtida pelo processo de conformação hidrostática pode aliar-se a redução de peso pela substituição de materiais de elevada densidade por materiais de baixa densidade. Assim sendo o presente trabalho aliará estes dois assuntos, discutindo a hidroformagem de tubos de alumínio. O principal objetivo deste trabalho será estabelecer o entendimento básico do comportamento de um tubo de alumínio quando submetido à hidroformagem. É feita uma revisão sobre a hidroformagem de ligas de alumínio e a simulação via MEF de dois processos de hidroformagem de tubos: a primeira, para a expansão hidrostática livre de um tubo sem força axial e a segunda, para estudo da expansão hidrostática de tubos de alumínio em matrizes. As duas simulações foram desenvolvidas no programa comercial LS-DYNA, e seus resultados são apresentados e comparados com resultados da literatura obtidos sob as mesmas condições.*

Palavras-chave: *hidroconformação, plasticidade, tubos, alumínio, MEF, enrugamento.*

1. INTRODUÇÃO

O processo de conformação hidrostática de tubos consiste na aplicação conjunta de esforços de compressão (axial e radial) e pressão interna (gerada por fluido hidráulico) a fim de se obter peças tubulares com seções transversais diferentes. Ele é um processo de fabricação utilizado principalmente pelas indústrias automobilística e aeronáutica para a produção de produtos de baixo custo, com peso reduzido e com maior integridade estrutural quando comparado com processos convencionais de conformação [1 -2]. Atualmente se destacam duas técnicas de hidroconformação: a hidroformagem com pressurização seqüenciada, PSH (pressure sequence hydroforming) e a hidroformagem sob alta pressão, HPH (high-pressure hydroforming). Ambas as técnicas foram desenvolvidas para facilitar a conformação de peças mais complexas prevenindo problemas de enrugamento, flambagem e ruptura. Apesar dos nomes fazerem referência a pressão, a verdadeira diferença entre as duas técnicas não está relacionada com a forma de se aplicar pressão e sim em como o blank é posicionado na matriz. A pressão final é consequência do arranjo montado e não se deve confundir o nível de pressão com potencial de conformação da peça e obtenção de peça sem defeitos.

Na primeira parte deste estudo, a expansão hidrostática livre não se utiliza nenhum dos processos especificamente, já que não se levam em conta esforços de compressão realizados pela matriz. Porém pelo nível de pressão atingido pode-se dizer que se trata de HPH. Mais detalhes sobre os dois processos, pode ser obtido em **MORPHY 2002 [3]**.

Este trabalho busca, tomando como base trabalhos anteriores dos autores com a expansão hidrostática de chapas (**ABRANTES, 2003 [4]**), iniciar agora um estudo do processo de hidroconformação de tubos com esforço radial que ocorre na expansão hidrostática livre, sem matrizes (Figura 1) e também a hidroconformação de tubos em matrizes. Sendo assim, neste primeiro trabalho, pretende-se calibrar o software de simulação, LS-DYNA, que será utilizado nestes estudos. Para atingir este objetivo, os resultados obtidos por **IMANINEJAD 2004 [1]** e **LANG 2004 [5]** serão utilizados para efeito de comparação.

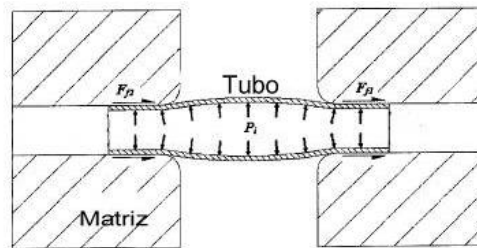


Figura 1. Expansão Hidrostática Livre de Tubo

2. SIMULAÇÃO DA EXPANSÃO HIDROSTÁTICA LIVRE DE TUBOS

De acordo com **MORPHY 2002 [3]**, a pressão teórica para que se inicie o processo de expansão do tubo pode ser determinado pela expressão que se segue:

$$p_0 = \frac{\sigma_y \cdot t}{r} \quad (1)$$

Onde: σ_y é a tensão de escoamento do material do tubo; t é a espessura do tubo e r é o raio médio do tubo. A partir dos dados da tabela 1 e 2, tem-se, para a expansão hidrostática livre simulada neste trabalho: $p_0 = 29,1$ MPa.

2.1. Modelagem MEF da expansão hidrostática livre de tubos

Para a simulação do processo de expansão hidrostática livre foi utilizado o software para análises não-lineares de elementos finitos LS-DYNA (**HALLQUIST 1997 [6]**). A matriz foi modelada com elementos rígidos. Para o tubo, o modelo de material utilizado foi o modelo 36 (MAT_3-PARAMETER_BARLAT) com parâmetro de Lankford igual a 1, considerando o material isotrópico e com lei de encruamento exponencial (Holomon), $\sigma = K \cdot \phi^n$. No total, o modelo contém 258 nós e 205 elementos. Considerando que existe lubrificação entre a matriz e o tubo, utilizou-se o modelo de Coulomb, com coeficiente de atrito $\mu = 0,05$. A Tabela 1 apresenta os dados do modelo criado e a Figura 2 representa o modelo.

Tabela 1. Dados do modelo para a tubo inicial

Espessura, $t(mm)$	Raio Médio, $r(mm)$	Comprimento, $r(mm)$
3,175	17,4625	240

2.2 Condições de Contorno para Modelo MEF da expansão hidrostática livre de tubos

Devido às condições de simetria do modelo, foi modelado apenas 1/8 do tubo, considerando três planos de simetria, sendo a seguir aplicado às condições de contorno necessárias nos nós da parte do tubo modelado de maneira a representar o restante não modelado. As extremidades do tubo estão livres para deslizarem axialmente. A Figura 3 mostra o modelo e as respectivas condições de contorno:

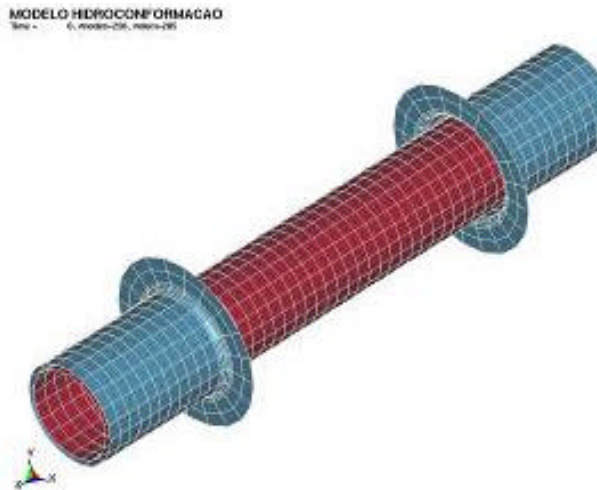


Figura 2. Modelo MEF

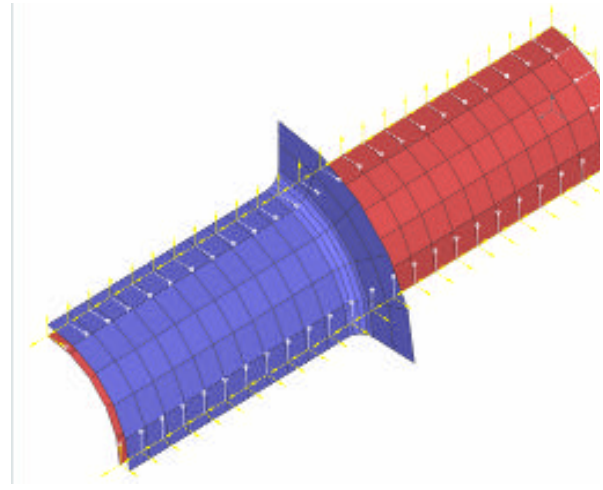


Figura 3. Condições de Contorno

2.3 Propriedades do material e condições de processo de expansão hidrostática livre

O material utilizado na simulação foi o AA6082-T4 relatada por **IMANINEJAD 2004 [1]**, suas propriedades estão representadas na Tabela 2:

Tabela 2. Propriedades mecânicas da liga AA6082-T4

Material	AA6082-T4
Densidade, ρ , g/cm	2,7
Módulo de Elasticidade, E, GPa	71
Coefficiente de Poisson, ν	0,31
Coefficiente de Resistência, K MPa	550
Coefficiente de Encruamento, n	0,25
Tensão de Escoamento, σ , MPa	160

Segundo **LANG 2004 [5]**, existem dois métodos para a aplicação de pressão: o método linear e o método bilinear, ambos envolvem altas taxas de aplicação considerando-se o efeito físico. Neste trabalho a taxa de aplicação de pressão foi acelerada ao máximo para reduzir-se o tempo de cálculo, porém com um controle da energia interna e cinética para não comprometer o significado físico, conforme curva de pressurização na Figura 4.

2.4. Resultados da modelagem MEF da expansão hidrostática livre de tubos

O modelo de material utilizado não inclui critério de falha após o trecho de deformação uniforme, representado pela equação $\sigma = K \cdot \epsilon^n$. para identificar o início da estricção. Usou-se um critério de falha baseado na deformação. Considerou-se a falha quando deformação plástica atingiu 10 % e este valor baseou-se na curva FLD apresentada em **IMANINEJAD 2004 [1]**. Com relação ao aumento do raio ou altura do bojo, a Figura 5 apresenta gráfico do deslocamento máximo (altura do bulbo) pelo tempo até o instante de rompimento do tubo. Deste gráfico pode-se constatar que a altura para o tempo $t=110$ ms atinge 2,05 mm e está dentro da faixa encontrada no mesmo trabalho.

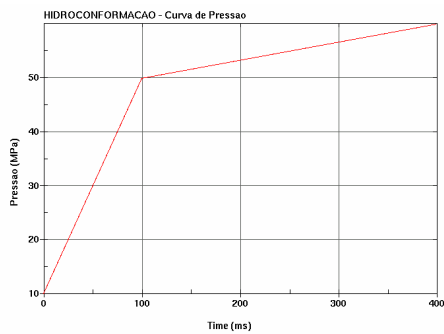


Figura 4. Curva de Pressão vs. tempo

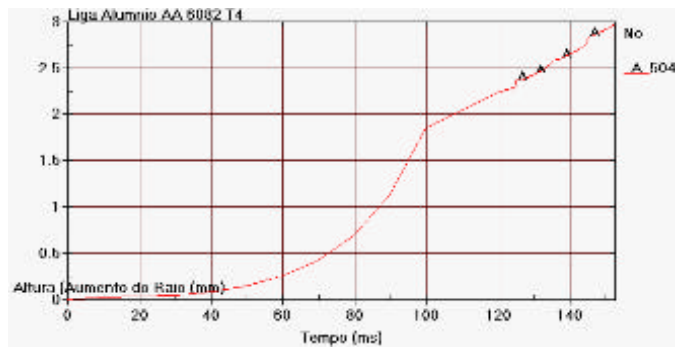


Figura 5. Altura ou aumento do raio do Tubo vs. tempo

Baseado neste critério obteve-se uma pressão (Figura 6) para a ruptura (burst pressure) na simulação de 50,3 MPa, que apresenta 3.5 % de erro em relação à pressão obtida por **IMANINEJAD 2004 [1]**. A Figura 7 apresenta a distribuição de espessuras na peça. Até o instante considerado crítico ocorre uma redução máxima de 5,25% na espessura no tubo. A Tabela 3 apresenta um resumo dos resultados comparativos obtidos na simulação.

Tabela 3. Resultados comparativos da modelagem

	Este trabalho	Referência [1]	Erro
Pressão de colapso (MPa)	50,33	47,7 – 49,8*	0,35%
Altura de bulbo (mm)	2,05	1,52 – 2,29*	~0
Espessura mínima (mm)	2,97	-	-

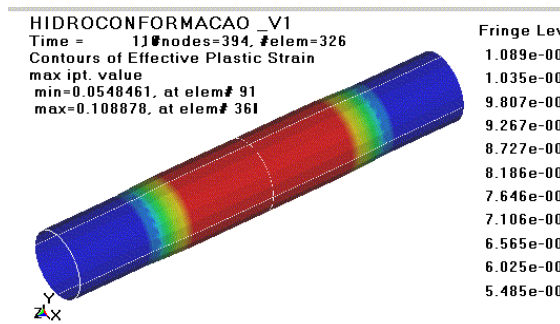


Figura 6. Deformação plástica tubo 6082-T4 para: $t=110\text{ms}$, ($\epsilon = 0,109$), $p=50,3\text{ MPa}$

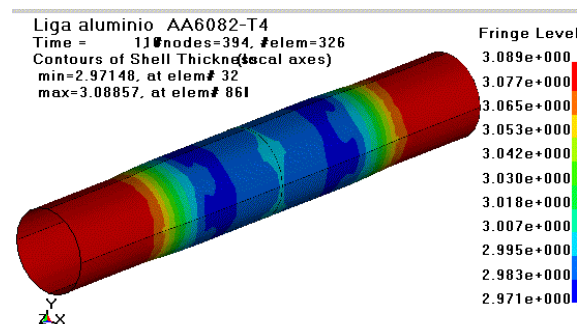


Figura 7. Distribuição de Espessura para o tubo 6082-T4.

3. EXPANSÃO HIDROSTÁTICA LIVRE DE TUBOS EM MATRIZ.

O estudo da hidroconformação de tubos em matriz toma como referência a abordagem de **LANG 2004 [5]**. Na Figura 8 pode-se ver uma descrição do processo.

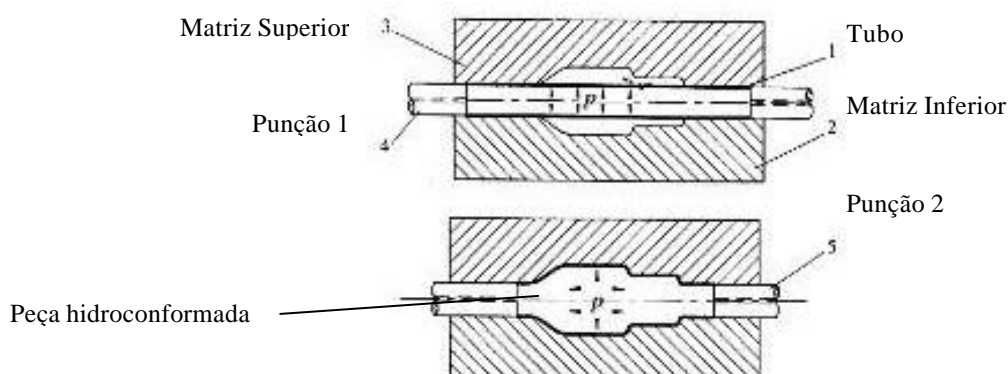


Figura 8. Processo de Conformação de Tubos

Inicialmente o tubo 1 é posicionado na cavidade da matriz inferior, a seguir as matrizes são fechadas a fim de evitar que o tubo movimente-se. A seguir o tubo é preenchido com um líquido por orifício existente nos punções e uma pressão inicial é aplicada. No próximo passo os punções 4 e 5 são movimentados de maneira a flambar o tubo. O ato de flambar depende da pressão do fluido interno do tubo, e rugas formar-se-ão, maiores ou menores. Após os punções atingirem o curso programado a pressão do líquido no interior do tubo é aumentada expandindo o tubo, de maneira até que este assuma as formas das matrizes. Esta operação é denominada geralmente calibração. Em geral existe uma janela de processo onde se combinando o esforço axial com a pressão interna, obtém-se peças isentas de rugas e fraturas. As rugas criadas durante o processo de flambagem do tubo podem ser benéficas ou ruins. No trabalho de LANG 2004 [5], as rugas produzidas no estágio de flambagem são assim classificadas e estão relacionadas ao curso dos punções e a pressão interna inicial. A ruga será benéfica se no estágio de calibração elas forem completamente removidas, já as rugas ruins permanecerão após o estágio de calibração. A ruga será benéfica ou ruim dependendo da pressão interna aplicada ao tubo, à determinação da faixa de pressão que gerará rugas benéficas aliadas ao curso dos punções pode ser determinada através da simulação de elementos finitos e é o que descreveremos a seguir.

3.1 – Propriedade, geometria e condição de hidroformagem de tubo em matriz fechada.

A simulação deste caso toma como referência peça da Figura 9, estudada anteriormente por LANG 2004 [5]. A hidroformagem torna-se mais indicada devido ao diâmetro do tubo igual a 65 mm, e ao diâmetro da peça acabada de 88 mm, resultando num alongamento de 33,4%. Tendo-se a uma razão entre o comprimento da zona de expansão da direção axial ($100 + 2 \times 31,6 = 163,2\text{mm}$) e o diâmetro do tubo (65 mm) de 2,5, isto impossibilita a peça de ser feita pelo processo tradicional de estiramento a quente. Na Tabela 4 estão descritos os dados necessários à simulação.

Tabela 4. Parâmetros e propriedades mecânicas do tubo hidroconformado.

Material	Liga de alumínio resistente a corrosão LF2M
Diâmetro do tubo (<i>mm</i>)	65
Comprimento do tubo, (<i>mm</i>)	250
Espessura (<i>mm</i>)	1,5
Tensão de Escoamento, (<i>GPa</i>)	0,08
Coefficiente de Resistência, <i>K</i> , <i>GPa</i>	0,6
Densidade, ρ , <i>g/cm³</i>	2,7
Módulo de Elasticidade, <i>E</i> , <i>GPa</i>	71
Coefficiente de Poisson, <i>n</i>	0,31
Coefficiente de Encruamento, <i>n</i>	0,25
Coefficiente de Atrito, μ	0,125

O estabelecimento dos parâmetros de pressão interna e pressão axial durante o processo de hidroformagem foram feitos com auxílio do trabalho de LANG 2004 [5]. O gráfico da Figura 10 indica que a mínima pressão interna a ser aplicada no tubo para obtenção de uma peça isenta de rugas é 5,5MPa. São tomadas como referências as pressões de 0 MPa, 3 MPa e 5 MPa, e cursos dos punções acima de 15 mm, para as quais ele relata que todas as peças apresentavam rugas ao final do estágio de calibração. Estes exemplos são tomados para desenvolver-se um modelo MEF via LS-DYNA, a ser calibrado com os resultados relatados para estas três pressões internas.

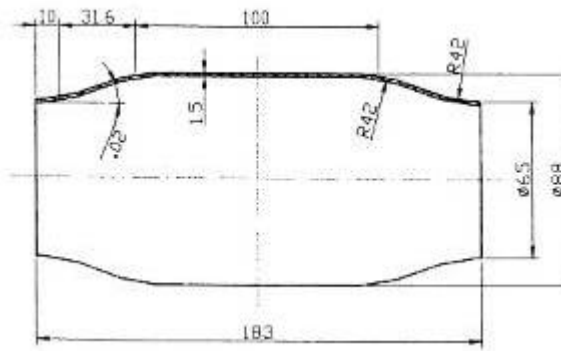


Figura 9. Peça hidroconformada em matriz [4]

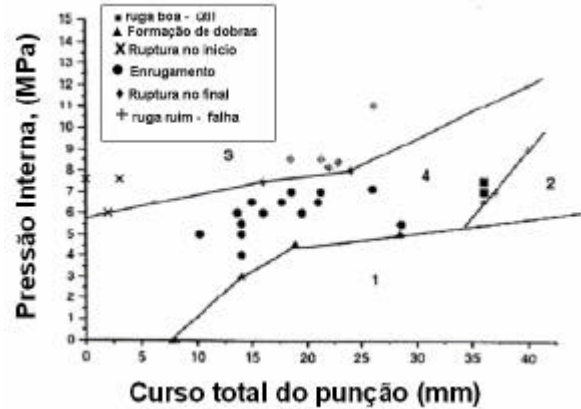


Figura 10. Diagrama de hidroconformação [4]

3.2 – Modelagem pelo MEF da hidroformagem de tubos em matriz fechada

Inicialmente, foi desenvolvido o modelo 1 similar ao descrito em LANG 2004 [5], como mostrado na Figura 11. Este modelo mostrou-se sensível à construção geométrica, apresentando resultados que diferiram dos resultados apresentados em LANG 2004 [5]. Constatou-se que durante a construção geométrica da matriz havia pequenas diferenças em relação aos planos de simetria da peça, levando o tubo a deformar-se diferentemente em cada lado em relação ao plano YZ mostrado na Figura 11. Isto levou ao aparecimento de rugas ruins mesmo para a pressão de 5,5 MPa, apontado, pelo autor, como sendo a mínima pressão a se obter uma peça isenta de rugas. Assim dois caminhos se apresentavam: reconstruir a geometria da matriz e a malha de maneira a eliminar a diferença entre os lados da matriz em relação ao plano YZ ou desenvolver malha de apenas 1/8 do modelo, acrescentando as condições de simetria suficientes para representar o restante do modelo. A última abordagem foi a escolhida, pois apresentava a vantagem de reduzir o tempo de cálculo significativamente e tal procedimento está sendo considerado para futuros desenvolvimentos de peças que apresentem simetria em relação a um dos planos dos eixos de coordenada. O modelo 2 está mostrado na Figura 12.

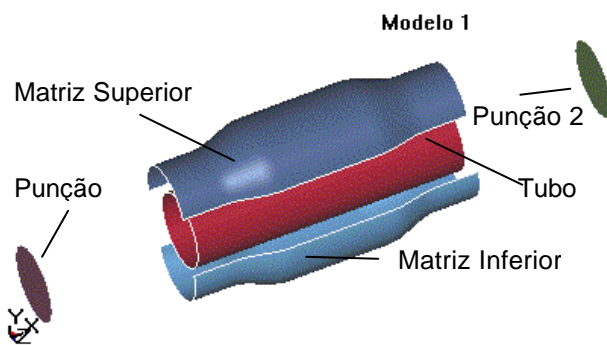


Figura 11. Modelo 1 em Elementos Finitos para Conformação de Tubo em Matriz.

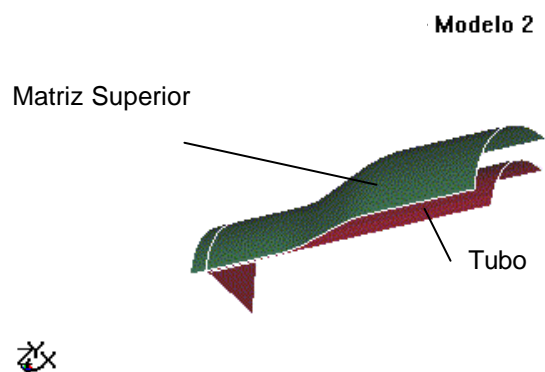


Figura 12. Modelo 2 em Elementos Finitos para Conformação de Tubo em Matriz

3.3 Resultados da simulação MEF para hidroformagem de tubos em matriz fechada

Na Figura 13 estão mostrados os resultados para as pressões de 0,0, 3,0 e 5,5 MPa, todas para um curso de 15 mm do punção. Analisando os resultados em relação ao gráfico da janela de processo relatada por LANG 2004 [5], os resultados da simulação concordam com os resultados obtidos por este autor e comprovam a qualidade do modelo desenvolvido.

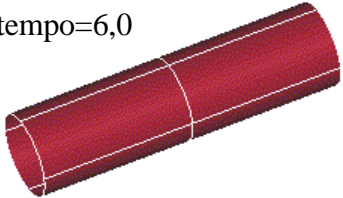
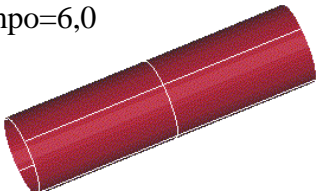
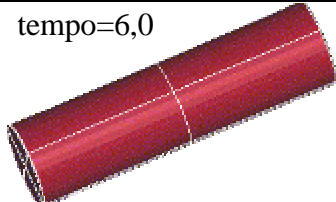
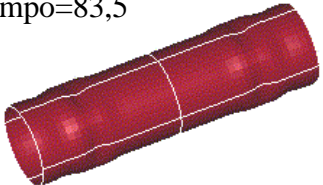
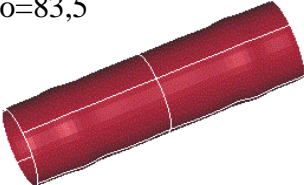
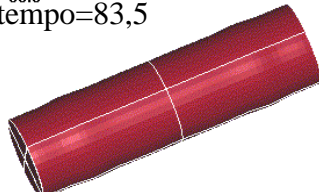
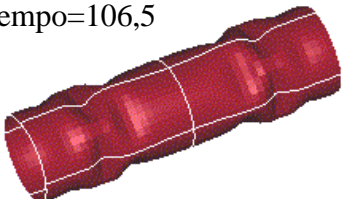
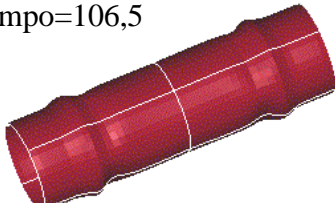
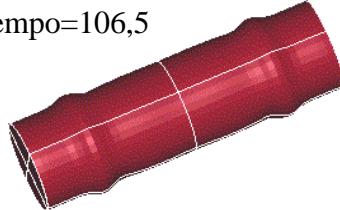
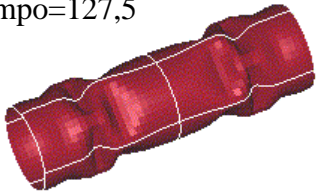
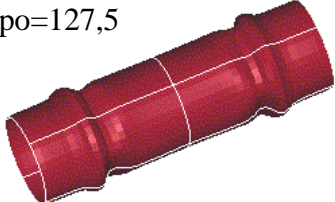
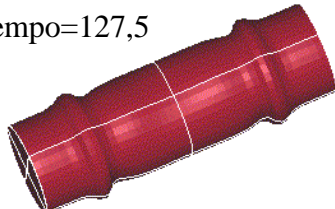
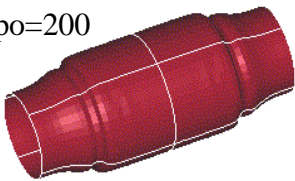
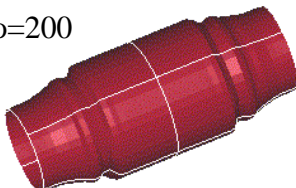
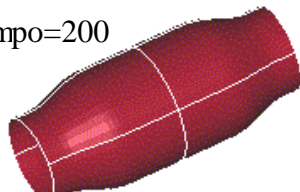
tempo=6,0 	tempo=6,0 	tempo=6,0 
tempo=83,5 	tempo=83,5 	tempo=83,5 
tempo=106,5 	tempo=106,5 	tempo=106,5 
tempo=127,5 	tempo=127,5 	tempo=127,5 
tempo=200 	tempo=200 	tempo=200 
Pressão = 0 MPa Peça Reprovada	Pressão = 3 MPa Peça Reprovada	Pressão = 5,5 MPa Peça Aprovada

Figura 13. Evolução da simulação da hidroconformação de tubo em matriz (tempo em ms)

4. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Neste trabalho utilizou-se o software LS-DYNA para modelar com sucesso via MEF as expansões hidrostáticas livre e em matriz de tubos de alumínio; estando os resultados em concordância com resultados da literatura.

O sucesso dessa primeira etapa de calibração do modelo pelo software LS-DYNA, permite se iniciar, as etapas seguintes, que prevêm estudar os fenômenos que ocorrem no processo de conformação hidrostática e peças de geometria mais complexas utilizadas na indústria automobilística e aeronáutica. No caso da expansão de tubos em matrizes, a formação de rugas mesmo que benéficas leva ao dobramento e desdobramento de regiões do tubo, levando a um retorno elástico diferenciado ao longo eixo longitudinal do tubo, causando distorções na peça após remoção da mesma da matriz.

Futuros trabalhos aprofundarão o estudo do fenômeno do retorno elástico na conformação hidrostática e estudarão a possibilidade de se eliminar o retorno elástico, aplicando e controlando-se simultaneamente a pressão e o movimento dos punções, de maneira a evitar a formação de rugas, e buscando eliminar o retorno elástico proveniente das mesmas. A findar a primeira etapa deste projeto, concluiu que o software LS-DYNA e o modelo criado estão calibrados para que novas simulações sejam realizadas.

5. REFERÊNCIAS

1. IMANINEJAD, M; SUBHASH, G; LOUKUS, A. Experimental and Numerical investigation of free-bulge formation during Hydroforming of aluminum extrusions. *Journal of Materials Processing Technology*, 147, 2004, (247-254).
2. MANABE, K.; NAKAMURA, S. Finite element simulation of hydroforming process of pre-bent circular tubes. In *Numisheet '99-13-17*. Besançon, França, 1999, (503-8).
3. MORPHY, G. The hydroforming design flexibility. *The Tube and Pipe Journal*, May 16, 2002. <http://www.thefabricator.com/xp/Fabricator/Articles/Esperts/>
4. ABRANTES, J. P. Simulação numérica via elementos finitos da conformação de chapas metálicas por pressão hidrostática (bulge test). Tese de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2003. S. Paulo.
5. LANG, L.H. DANCKERT, J. NIELSEN K.B. WANG, Z.R. WANG, X.S. YUAN, S. Experimental and numerical investigation into useful wrinkling during aluminum alloy internal high-pressure forming. *Proc. Instn. Mech. Engrs., Part B: J. Engineering Manufacture*, 2004, 218, 43-49.
6. HALLQUIST, J.O. *LS-DYNA3D User's Manual, Version 940*, June 1997 (Livermore Software Technology Corporation).

NUMERICAL SIMULATION OF ALUMINUM TUBE HYDROFORMING

Jorge Paiva Abrantes

Laboratório de Engenharia de Fabricação - Dept. de Eng. Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos – EPUSP - Av. Prof. Mello de Moraes, 2231, CEP 0580-900, São Paulo, SP- jorge.abrantes@poli.usp.br

Carlos Eduardo Célia de Lima

Laboratório de Engenharia de Fabricação - Dept. de Eng. Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos – EPUSP - Av. Prof. Mello de Moraes, 2231, CEP 0580-900, S. Paulo, SP- carlos.celia@poli.usp.br

Gilmar Ferreira Batalha

Laboratório de Engenharia de Fabricação - Dept. de Eng. Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos – EPUSP - Av. Prof. Mello de Moraes, 2231, CEP 0580-900, S. Paulo, SP- gfbatalh@usp.br

Abstract: *Hydroforming is the fabrication process that uses a fluid medium to form a piece by using high internal pressure. In tube hydroforming, a tubular blank is placed between two dies, sealed and pressurized water up to 1200MPa is injected, deforming the tube walls in the cavity form of the dies. The advantages of the hydroforming over the traditional process are: a)Weight reduction; b)Project flexibility increase, making possible to create new piece shapes; c)Rigidity increase by obtaining tube pieces without weld; d)Unions regions elimination; e)Dimensional repeatability. The weight reduction obtaining by the hydroforming process can be allied to the weight reduction by the substitution of materials of high density by material of low density. As for this paper collects these two matters and discuss the aluminum tube hydroforming. The main objective of this paper is establishing the basic understanding of the behavior of a aluminum tube when it is submitted to the hydroforming process. A review of the aluminum alloys hydroforming and the simulation via FEM of two hydroforming process is made: for the first simulation, the hydroforming of a free aluminum tube without axial force and for the second one, the study of the hydroforming of a tube in a die. Both simulations were developed with the commercial software LS-DYNA and the results are presented and compared with the results of the references in the same conditions.*

Keywords: *hydroforming, plasticity, tube, aluminum, FEM, wrinkling.*