

Simulação do Processo de Hidroconformação de Tubos

Roberto Bortolussi

Faculdade de Engenharia Industrial - Departamento de Mecânica
Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972 - São Bernardo do Campo - São Paulo
CEP: 09850-901
roberto@cci.fei.br

Sérgio Tonini Button

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP - Faculdade de Engenharia Mecânica - Departamento de Materiais e Processos
Cidade Universitária Zeferino Vaz - Campinas - São Paulo
CEP: 13083-970
sergio1@fem.unicamp.br

Resumo. *O processo de hidroconformação vem sendo utilizado para a fabricação de peças utilizadas em estruturas veiculares. Estas peças são fabricadas a partir de tubos de aços de baixo carbono ou aços de ARBL (alta resistência e baixa liga) com costura ou tubos extrudados, quando se utiliza tubos alumínio. Os tubos com costura são produzidos a partir de chapas metálicas laminadas, que tem comportamento anisotrópico. Utilizando o método dos elementos finitos de formulação explícita foi simulado o processo de hidroconformação com dois modelos de material diferentes um isotrópico e um anisotrópico, para verificar a influência da anisotropia na seqüência do carregamento de pressão, na deformação da espessura do tubo e na força de conformação.*

Palavras chave: hidroconformação, simulação, elementos finitos

1. Introdução

A indústria automobilística nos últimos anos tem procurado o desenvolvimento de processos de fabricação capazes de produzir peças mais leves e mais resistentes, com capacidade de produção de peças com menor variação dimensional e também mais versáteis e flexíveis para redução dos custos de produção, principalmente das ferramentas.

Dentro deste conceito o processo de hidroconformação de tubos vem sendo utilizado para a produção de peças da estrutura principal da carroceria e peças estruturais de componentes agregados como suporte do motor e eixos dianteiros e traseiros. Este processo utiliza a combinação de deslocamento de pistão e pressão para a conformação das peças até a sua forma final.

Segundo Dohmann e Hartl (1997), o processo de hidroconformação é relativamente novo e vem sendo utilizado em escala industrial desde o final da década de sessenta para a produção de peças hidráulicas.

Na indústria automobilística sua aplicação é mais recente e estão sendo hidroconformadas peças feitas de tubos de aço baixo carbono com costura, aços de alta resistência e baixa liga com costura (ARBL), ambos produzidos a partir de chapas finas laminadas e tubos de alumínio extrudados. O material do tubo deve ter grande capacidade de resistir a esforços multi axiais, especialmente no caso de tubos feitos de chapa fina, são desejáveis no material índices de anisotropia elevados para aumentar a capacidade de resistir a redução da espessura.

Devido ao grande número de variáveis envolvidas, o processo de hidroconformação tem sido simulado utilizando-se métodos numéricos, especialmente o método dos elementos finitos. Através dos modelos numéricos é possível determinar-se os valores de deformação ao final do processo, especialmente a deformação da espessura, e a seqüência de aplicação dos carregamentos para que não ocorra instabilidade plástica ou redução excessiva da espessura.

Mac Donald e Hashmi, (2000), utilizaram o método dos elementos finitos para simular a conformação de uma junta em forma de cruz, feita a partir de tubo de cobre, estudando dois diferentes caminhos de aplicação da pressão. Lei et al, (2001) simularam a conformação de dois produtos, um suporte de suspensão e um suporte de motor determinando qual o melhor caminho que a pressão interna deveria percorrer para que não ocorresse a instabilidade plástica do material. O critério de instabilidade adotado neste trabalho foi do valor da integral I que está em Oyane et al, (1980) e os materiais estudados foram a liga de alumínio 5052 e aço baixo carbono. Lei et al, (2000), determinaram o melhor caminho da pressão para a conformação da carcaça do eixo traseiro para automóveis confeccionados a partir de tubos de aço determinando a força de conformação, a distribuição de deformação e a distribuição de espessura.

Nos trabalhos citados no parágrafo anterior, apesar de serem utilizados tubos de aço com costura, ou de materiais não ferrosos extrudados, não foi levado em consideração o efeito que a anisotropia do material do tubo exerce sobre a capacidade deste resistir à redução da espessura, no aumento da pressão interna e na força para a conformação.

Deste modo, o objetivo deste trabalho é, utilizando o método dos elementos finitos de formulação explícita, determinar a influência da anisotropia na redução da espessura, na seqüência dos carregamentos e na força de conformação de uma peça hidroconformada na forma de "T" feita de tubo de aço de baixo carbono com costura.

Para a comparação foram realizadas simulações com modelos de material com comportamento isotrópico e anisotrópico.

2. O processo de hidroconformação de tubos.

O processo de hidroconformação de tubos é o processo de conformação onde o tubo tem sua forma modificada através da aplicação simultânea de esforços da compressão nas suas extremidades e de aumento da pressão interna.

A compressão na extremidade do tubo tem por finalidade mover o material na direção da conformação evitando que ocorra uma redução excessiva da espessura, simultaneamente ocorre aumento da pressão interna, que pode atingir, segundo Ahmetoglu e Altan (2000), até 600 MPa, sendo reservado ao final do processo a calibração da peça com as pressões mais elevadas para garantir que esta tenha todos os detalhes da ferramenta. O valor da pressão interna na etapa de calibração depende da relação entre o raio interno da peça e a espessura da parede do tubo (Metal Forming Handbook, (1998)). A pressão de conformação é gerada através de fluido, normalmente se utiliza uma unidade externa de pressão comandada pela posição do cilindros de compressão ou então pela força de compressão.

As peças hidroconformadas mais complexas são obtidas através de tubos previamente dobrados que serão submetidos a pressão interna no interior das ferramentas. Algumas peças não apresentam variação de comprimento, somente modificação de suas seções transversais, neste caso a compressão das extremidades é feita somente para garantir a vedação do fluido que fará a conformação, porém deve ser observado que cada seção transversal da peça tenha o mesmo perímetro da seção transversal do tubo que a dará origem. Algumas peças obtidas pelo processo de hidroconformação estão mostradas na Fig. (1).



Figura 1. Peças obtidas pelo processo de hidroconformação. Metal Forming Handbook (1998).

2.1. Hidroconformação de peças em forma de " T "

O processo de hidroconformação de peças em forma de " T " é um dos mais utilizados para análise das variáveis envolvidas na conformação. Inicialmente a peça é colocada entre as duas metades da ferramenta que se fecha garantido uma força de fechamento que evita a expansão do diâmetro do tubo. Posteriormente 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 contrária à direção da expansão. Na Fig.(2) estão mostradas as partes da ferramenta e a seqüência do processo para a obtenção de uma peça em forma de " T ".

A compressão do material pode ser realizada pelos dois cilindros simultaneamente ou eventualmente por apenas um dos cilindros.

A máquina de hidroconformação deve garantir controle sobre a força de fechamento das ferramentas, que deve aumentar conforme aumenta a pressão interna, sobre a força de contra pressão e sobre o deslocamento dos cilindros de compressão. Asnafi (1999), define que o processo de hidroconformação pode ser controlado pelo deslocamento dos cilindros de compressão ou controlado pela força de compressão, sendo que este último tipo de controle depende muito das condições de fornecimento do material, pois variações nas propriedades mecânicas implicará em mudanças na força de compressão. Alterações das condições de atrito durante a vida útil da ferramenta também irão provocar variações na força de compressão, cabe ressaltar que para as elevadas pressões que ocorrem na região reta do tubo, a força de compressão sofrerá grandes variações para pequenas variações de coeficiente de atrito.

2.2. Parâmetros do processo

Na hidroconformação devem-se ser determinadas as forças de conformação e de fechamento, a pressão necessária para início do escoamento e os valores de deformação na qual irá ocorrer a instabilidade plástica do processo. A força de conformação é uma soma dos esforços de compressão, de atrito e da pressão interna.

Asnafi (1999), através do método de equilíbrio determinou expressões para o cálculo da força de conformação, da força de fechamento das ferramentas, da força de atrito, das deformações e da instabilidade plástica no processo de hidroconformação livre de peças em forma de bojo controlados através do deslocamento.

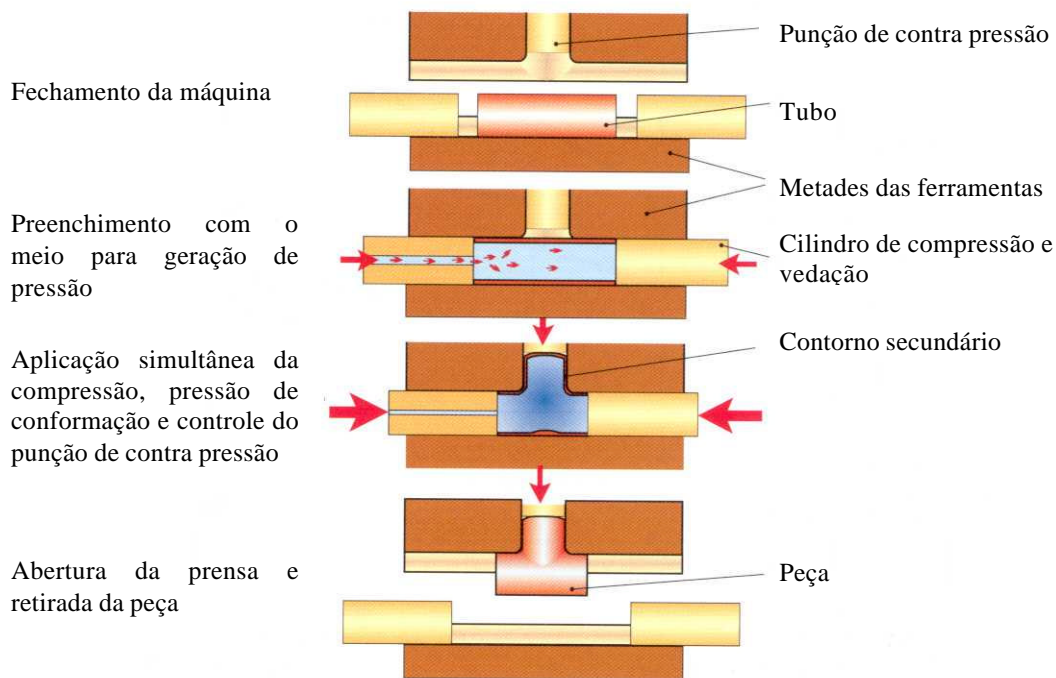


Figura 2. Processo para a fabricação de uma peça em forma de "T". Metal Forming Handbook (1998).

Sokolowski et al (2000), avaliaram a capacidade de deformação de um tubo de aço inoxidável 304 e apresentaram expressões, utilizando também o método de equilíbrio, para o cálculo das tensões atuantes em um elemento situado no centro do tubo no processo de hidroconformação livre de uma peça em forma de bojo. Diferentemente do citado no parágrafo anterior, neste caso não existe variação do comprimento do tubo, sendo a deformação obtida somente através do aumento da pressão interna.

Sheng e Tongai (1995), utilizando o método do limite superior determinaram expressões para o cálculo da força de conformação para peças em forma de " T ", utilizando como meio para a transferência da pressão barras de poliuretano sólido. Este tipo de meio de pressão provoca um atrito elevado na região de contato o que reduz os limites de conformação do material.

Ahmed e Hashmi (1997), utilizando o método do equilíbrio dos elementos para peças com forma de " T " determinaram expressões para o cálculo da pressão interna para início do escoamento, máxima pressão interna, da força de compressão e da força de fechamento.

3. Anisotropia.

A anisotropia ocorre devido a dois fatores: a formação cristalográfica, onde o próprio cristal que forma o metal apresenta planos preferenciais para sua deformação e aos processos de fabricação que fazem com que a estrutura dos grãos rotacionem gerando um alinhamento na direção do esforço principal. Este alinhamento não provoca grandes variações na tensão limite de escoamento e de resistência do material, mas provoca variações na capacidade de resistir a deformações conforme a direção do esforço, Hosford e Candell (1993). A anisotropia é importante principalmente em chapas laminadas. Em chapas que irão sofrer esforços multi axiais, a anisotropia irá provocar diferentes capacidades de deformação nas diferentes direções.

A medida da anisotropia é realizada através do ensaio de tração com a retirada de corpos de prova de três direções da chapa metálica, na direção da laminação, a 45° e a 90° em relação a direção da laminação. Estes corpos de prova são tracionados dentro do limite de alongamento uniforme. Calcula-se o índice R (coeficiente de anisotropia) através da expressão abaixo para as três direções:

$$R = \frac{\ln \frac{w_f}{w_i}}{\ln \frac{t_f}{t_i}} \quad (1)$$

Onde w_i é a largura inicial, w_f largura final, t_i espessura inicial e t_f espessura final.

Os valores encontrados das razões de deformação plástica em cada direção são utilizados para o cálculo do critério de escoamento de Hill, Slater (1977).

$$2f(\mathbf{s}_{ij}) \equiv F(\mathbf{s}_y - \mathbf{s}_z)^2 + G(\mathbf{s}_z - \mathbf{s}_x)^2 + H(\mathbf{s}_x - \mathbf{s}_y)^2 + 2Lt_{yz}^2 + 2Mt_{zx}^2 + 2Nt_{xy}^2 = 1 \quad (2)$$

Onde \mathbf{s}_x , \mathbf{s}_y e \mathbf{s}_z são tensões normais e t_{xy} , t_{yz} e t_{zx} são tensões de cisalhamento.

Utilizando as equações de Lévy-Mises, os incrementos de deformação plástica considerando a anisotropia são dados por:

$$d\mathbf{e}_x^p = d\mathbf{l} \cdot \{G(\mathbf{s}_x - \mathbf{s}_z) + H(\mathbf{s}_x - \mathbf{s}_y)\} \quad (3)$$

$$d\mathbf{e}_y^p = d\mathbf{l} \cdot \{F(\mathbf{s}_y - \mathbf{s}_z) + H(\mathbf{s}_y - \mathbf{s}_x)\} \quad (4)$$

$$d\mathbf{e}_z^p = d\mathbf{l} \cdot \{G(\mathbf{s}_z - \mathbf{s}_x) + F(\mathbf{s}_z - \mathbf{s}_y)\} \quad (5)$$

$$d\mathbf{g}_{yz}^p = d\mathbf{l}Lt_{yz} \quad (6)$$

$$d\mathbf{g}_{zx}^p = d\mathbf{l}Mt_{zx} \quad (7)$$

$$d\mathbf{g}_{xy}^p = d\mathbf{l}Nt_{xy} \quad (8)$$

Considerando-se que a tensão de escoamento, $\bar{\mathbf{s}} = \mathbf{s}_x$ e que $\mathbf{s}_y = \mathbf{s}_z = 0$ tem-se:

$$\frac{1}{\bar{\mathbf{s}}^2} = G + H \quad (9)$$

Das relações entre tensão e deformação no regime plástico tem-se:

$$R_0 = \frac{H}{G} \quad (10)$$

$$R_{90} = \frac{H}{F} \quad (11)$$

$$R_{45} = \frac{\left\{N - \frac{1}{2}(F + G)\right\}}{(F + G)} \quad (12)$$

Para a chapa, assumindo-se o eixo x como a direção da laminação, os incrementos de deformação plástica são dados por, Slater (1977):

$$d\mathbf{e}_x^p = G + H \quad (13)$$

$$d\mathbf{e}_y^p = -H \quad (14)$$

$$d\mathbf{e}_z^p = -G \quad (15)$$

Para chapas finas:

$$\mathbf{s}_z = \mathbf{t}_{yz} = \mathbf{t}_{zx} = 0 \quad (15)$$

Este critério indica que irão ocorrer deformações diferentes na chapa conforme a direção em que está aplicado o esforço.

Krieg e Brown (1996), propuseram um modelo de material anistorópico que utiliza o critério de Hill, e que leva em consideração os efeitos da taxa de deformação, do endurecimento anisotrópico e sua dependência com a taxa de deformação, este modelo é o adotado pelo *software* MSC/Dytran e foi utilizado nas simulações.

O modelo de curva tensão por deformação usado na simulação é:

$$\bar{\mathbf{s}} = \left[a + b \cdot (\bar{\mathbf{e}}^p + c)^n \right] \left[1 + k \left(\frac{\dot{\mathbf{e}}^p}{\mathbf{e}^p} \right)^m \right] \quad (16)$$

Onde $\bar{\mathbf{s}}$ é tensão de escoamento, a é a constante de tensão, b é a constante de resistência, c é o encruamento inicial, n é o coeficiente de encruamento, k é a constante de sensibilidade da taxa de deformação, m é coeficiente de sensibilidade à taxa de deformação, $\bar{\mathbf{e}}^p$ é a deformação plástica efetiva, $\dot{\mathbf{e}}^p$ é a taxa de deformação plástica efetiva.

4. Simulação do processo de hidroconformação de tubos.

A peça utilizada para a simulação do processo de hidroconformação está mostrada na figura 3.

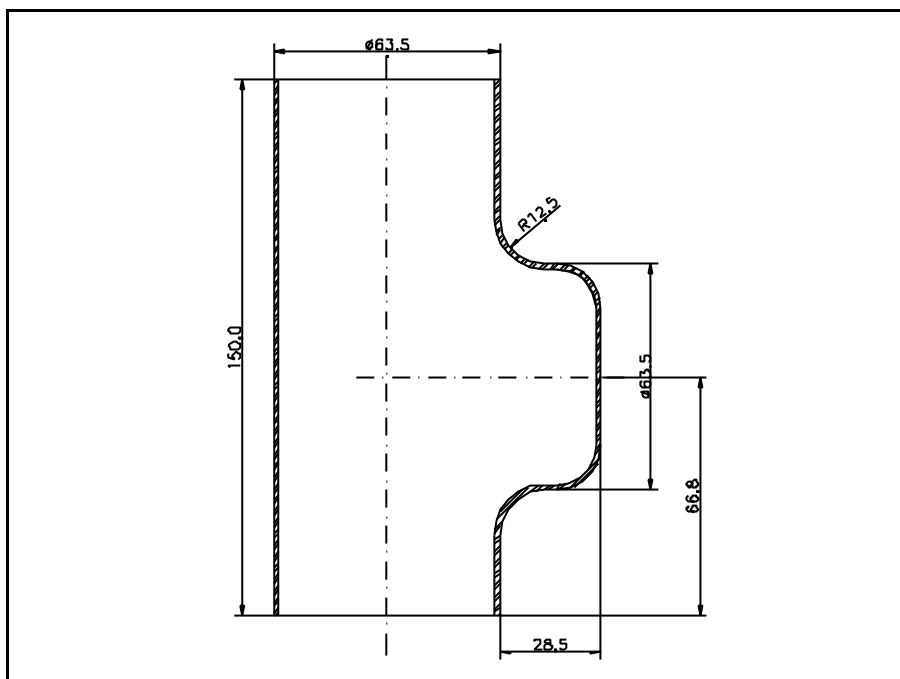


Figura 3. Peça utilizada nas simulações do processo de hidroconformação.

O material do tubo é um aço com 0,04% de carbono com espessura é 1,55 mm, sendo este um tubo com costura. As propriedades mecânicas do material foram obtidas a partir de corpos de prova retirados do tubo, foram cortados 3 corpos de prova na direção da laminação (0°) e três a 90° desta direção, e submetidos a ensaio de tração. Os resultados dos ensaios estão mostrados na Tab. (1).

Para a determinação do coeficiente de anisotropia também foram retirados três corpos de prova de cada direção que foram deformados a tração em 90 % do alongamento uniforme, desta forma procurou-se diminuir a variabilidade dos resultados devido aos efeitos elásticos.

O comprimento inicial do tubo para a geração da peça é de 190 mm e foi obtido pelo cálculo do volume da peça.

Tabela 1. Propriedades mecânicas do material do tubo nas diversas direções. Valores médios de três ensaios em cada direção.

Propriedades do Material	0°	90°
Tensão Limite de escoamento (MPa)	330 ± 19	315 ± 8
Tensão Limite de Resistência a Tração (MPa)	356 ± 13	354 ± 4
Alongamento Uniforme (%)	$15,6 \pm 3,3$	$13,5 \pm 1,9$
Alongamento Total (%)	$36,1 \pm 4,0$	$35,3 \pm 2,9$

Na Tab. (2) estão os valores da coeficiente de anisotropia para três direções, 0° , 45° e 90° em relação a direção de laminação.

Tabela 2 – Coeficiente de anisotropia para três direções.

Direção	0°	45°	90°
Coeficiente de Anisotropia	$2,17 \pm 0,3$	$1,11 \pm 0,19$	$1,95 \pm 0,60$

4.1 - Modelo de elementos finitos

O processo de hidroconformação foi simulado através do método dos elementos finitos de formulação explícita utilizando-se o *software* comercial MSC/Patran para o pré processamento e pós processamento, sendo utilizado o *software* MSC/Dytran para o processamento. O modelo utilizou 2015 elementos de casca com deformação de espessura para modelar o tubo e 3112 elementos rígidos para modelar a ferramenta, o cilindro de compressão e o cilindro de contra pressão, sendo discretizado somente metade do ferramental devido a simetria da peça. Na Fig. (4) está

apresentado o modelo elementos finitos utilizado, externamente está a ferramenta, na extremidade direita o embolo que irá comprimir o tubo e na parte superior o cilindro de controle.

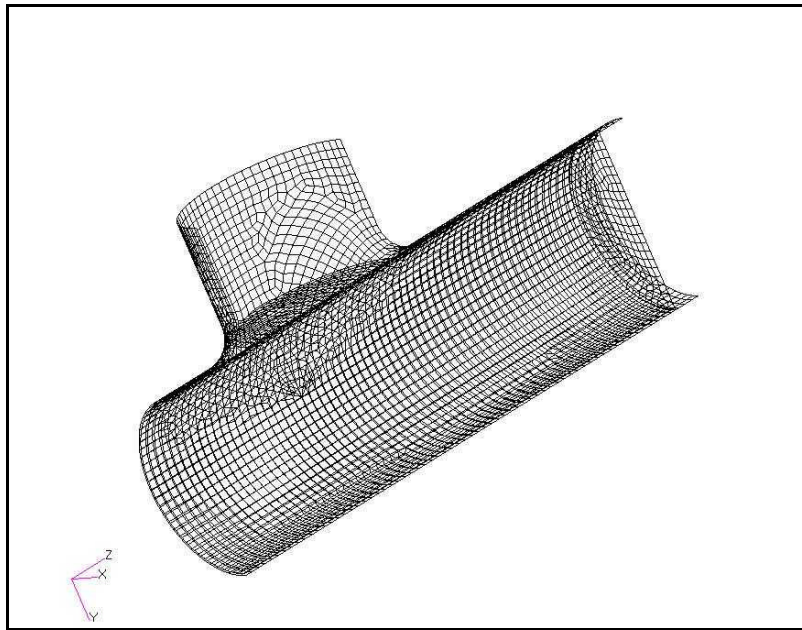


Figura 4. Modelo de elementos finitos utilizado na simulação do processo.

Nas regiões de contato foi utilizado o modelo de atrito de Coulomb. Entre o tubo e a ferramenta foi adotado um coeficiente de atrito de 0,05, Lei et al, (2001), entre o tubo e o cilindro de compressão o coeficiente de atrito foi de 0,15 e entre o tubo e o cilindro de contra pressão foi adotado o coeficiente de atrito de 0,15, Mac Donald e Hashmi, (2000).

O coeficiente de atrito na região de contato da ferramenta com a peça é menor pois existe uma pequena folga entre a ferramenta e o tubo, o que garante uma maior facilidade de escorregamento entre eles.

4.2 - Propriedades do material e carregamentos de deslocamento e de pressão.

Os valores utilizados na expressão (8) estão mostrados na Tab. (3). Estes valores foram obtidos através do método dos mínimos quadrados com os resultados dos ensaios de tração. Não foram considerados os efeitos da taxa de deformação, portanto os valores referentes a estes termos na expressão são iguais a zero.

Tabela 3. Valores da expressão (8) para o material utilizado no modelo de elementos finitos.

Termos da Expressão (8)	Valor
Constante de Tensão (a)	0
Constante de Resistência (b)	535
Encruamento Inicial	0,016
Coefficiente de Encruamento	0,15
Sensibilidade a Taxa de Deformação	0

Os valores dos coeficientes de anisotropia utilizados para o modelo anisotrópico são os da Tab. (2) e para o modelo isotrópico foram considerados iguais a 1.

O deslocamento total do cilindro de compressão é de 40 mm, sendo que este permanece parado no final do curso para que seja feita a etapa de calibração através do aumento da pressão interna.

Optou-se neste modelo pelo deslocamento de somente um cilindro de compressão, sendo que outra extremidade do tubo permanece parada durante a conformação.

As curvas de pressão de conformação para o modelo isotrópico e anisotrópico estão mostradas na Fig. (5) e a força de contra pressão está mostrada na Fig. (6).

Os valores da pressão interna utilizados no processo devem ser suficientes para garantir a continuidade de escoamento do material durante a conformação. Valores muito elevados de pressão no início do processo irão provocar uma redução de espessura muito grande, o que poderá provocar fratura, pressões baixas não irão eliminar as eventuais rugas que se formam durante a conformação e assim não se terá estabilidade dimensional do produto final. Deve existir no início da conformação uma pressão interna para evitar a ocorrência da flambagem e/ou o enrugamento das paredes do tubo. Neste caso para as duas simulações a pressão interna inicial foi de 20 MPa.

Como pode-se ver na Fig. (5) do material anisotrópico para o material isotrópico ocorreu, durante a fase de conformação, uma redução de 2 MPa na pressão interna e na fase de calibração uma redução de 5 MPa. Esta redução é necessária devido a menor resistência à mudança de forma que o material isotrópico oferece, para manter as dimensões finais do produto.

A força de contra pressão deve ser suficiente para evitar a formação de uma calota esférica com raio muito pequeno quando a pressão interna começa a aumentar, mas não deve impedir o deslocamento do material naquela direção. Esta força deve aumentar significativamente durante a calibração para garantir que não ocorrerá mais escoamento nesta direção.

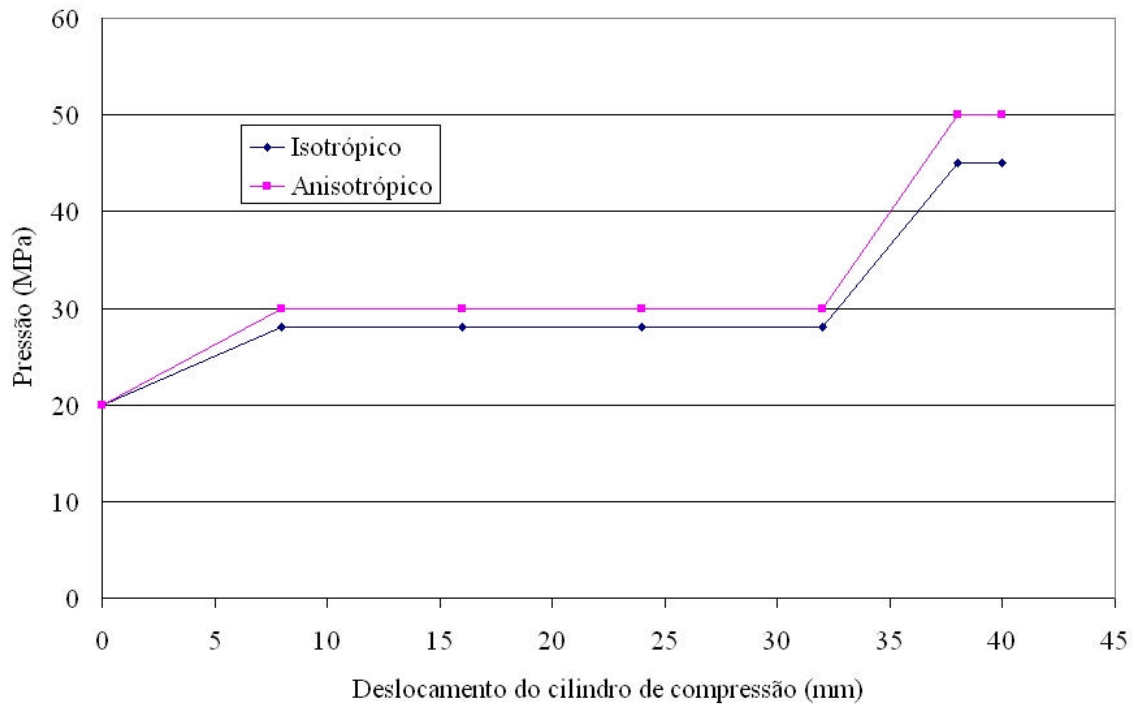


Figura 5. Pressão interna de conformação em função do deslocamento do cilindro de compressão

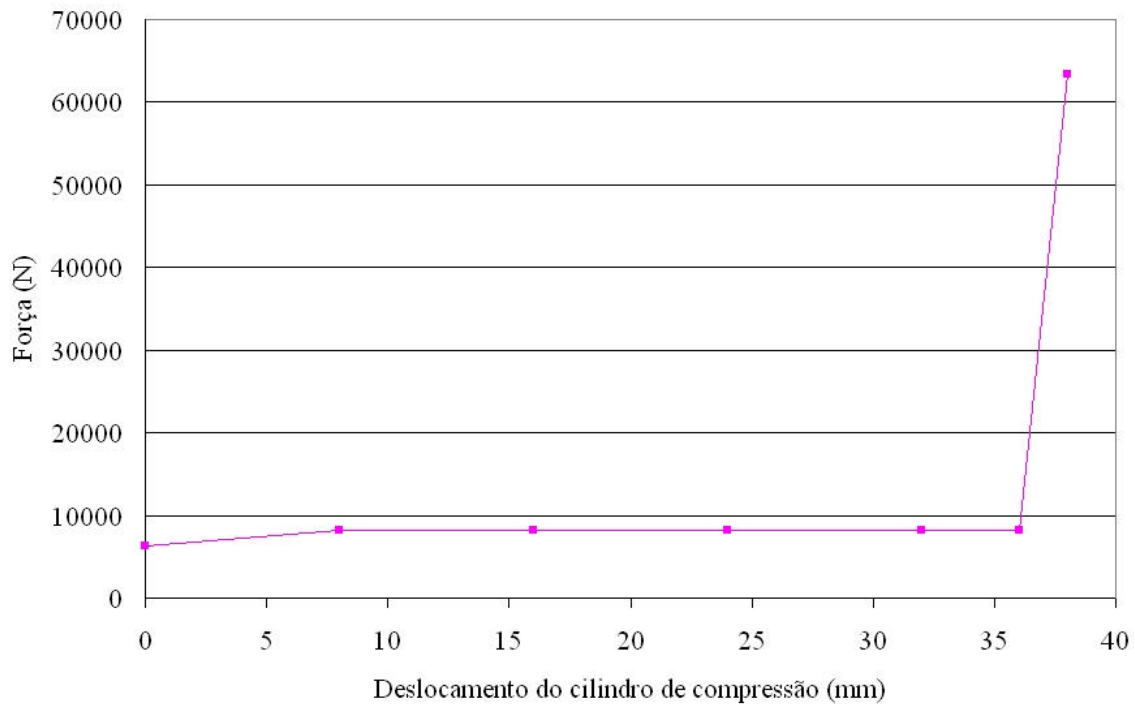


Figura 6. Força de contra pressão em função do deslocamento do cilindro de compressão

5. Resultados obtidos.

Na Fig. (7) está a distribuição da espessura para a peça modelada com material anisotrópico e na Fig. (8) a distribuição da espessura para a peça modelada com material isotrópico.

O efeito da compressão na extremidade do tubo irá provocar, para os dois modelos de material, um aumento na espessura nas regiões que não sofreram mudança de forma. Na região de deslocamento perpendicular ao deslocamento do cilindro de compressão existe uma redução de espessura mais acentuada, sendo esta a região provável de falha.

Através da análise da Fig. (9) nota-se, para os dois modelos de material que nas regiões onde predominam esforços de compressão as deformações tem valores muito próximos, nas regiões onde predominam esforços de tração o material anisotrópico apresenta menores valores de deformação na espessura, garantindo assim um menor risco de falha do processo. Este tipo de comportamento é semelhante ao que ocorre nos processos de estampagem profunda. A região de maior deformação para os dois modelos é a região do raio superior esquerdo pois não foi feito nenhum controle de forma da peça nesta região da ferramenta.

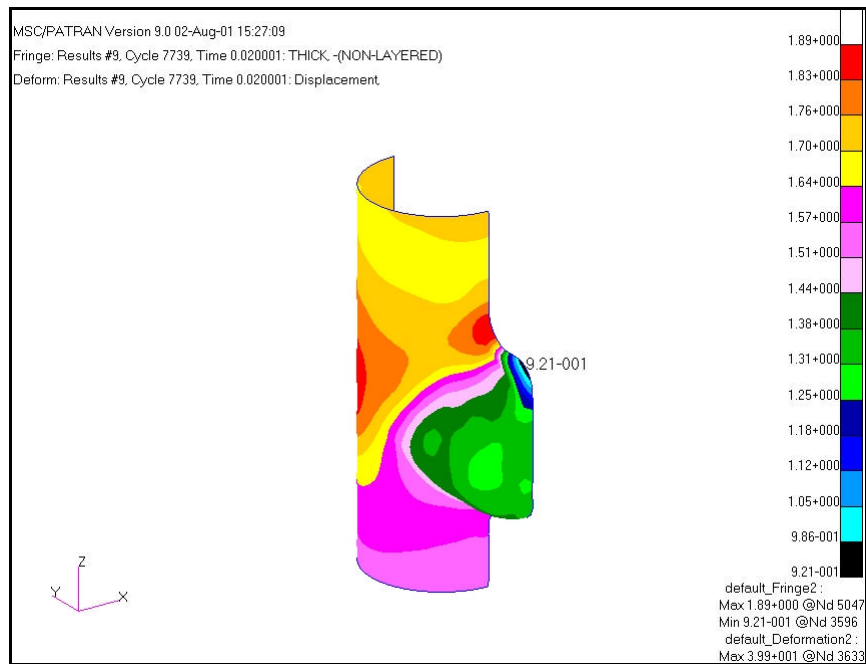


Figura 7. Distribuição de espessura para modelo de material anisotrópico

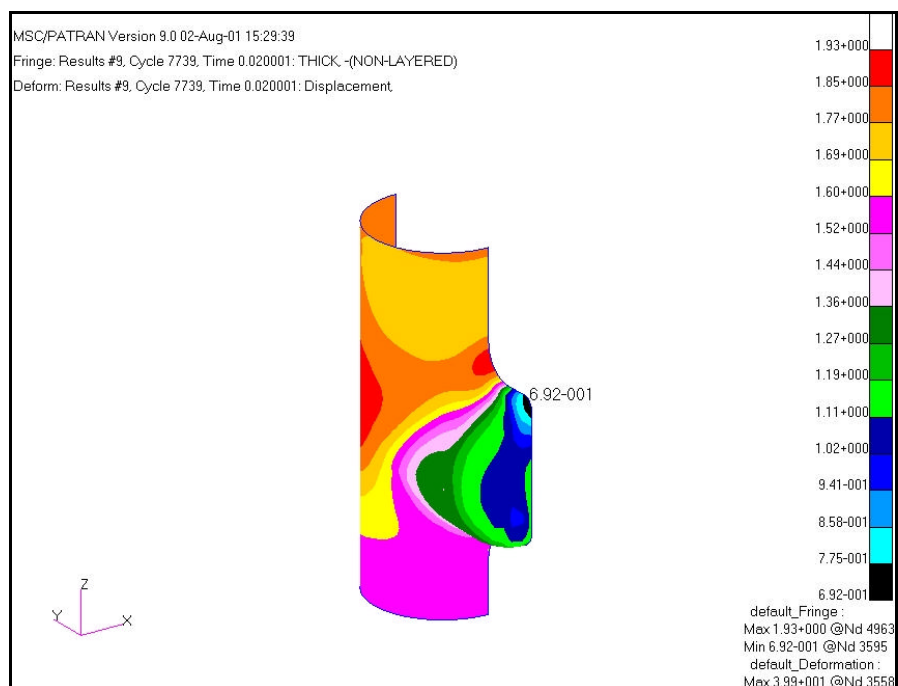


Figura 8. Distribuição de espessura para modelo de material isotrópico

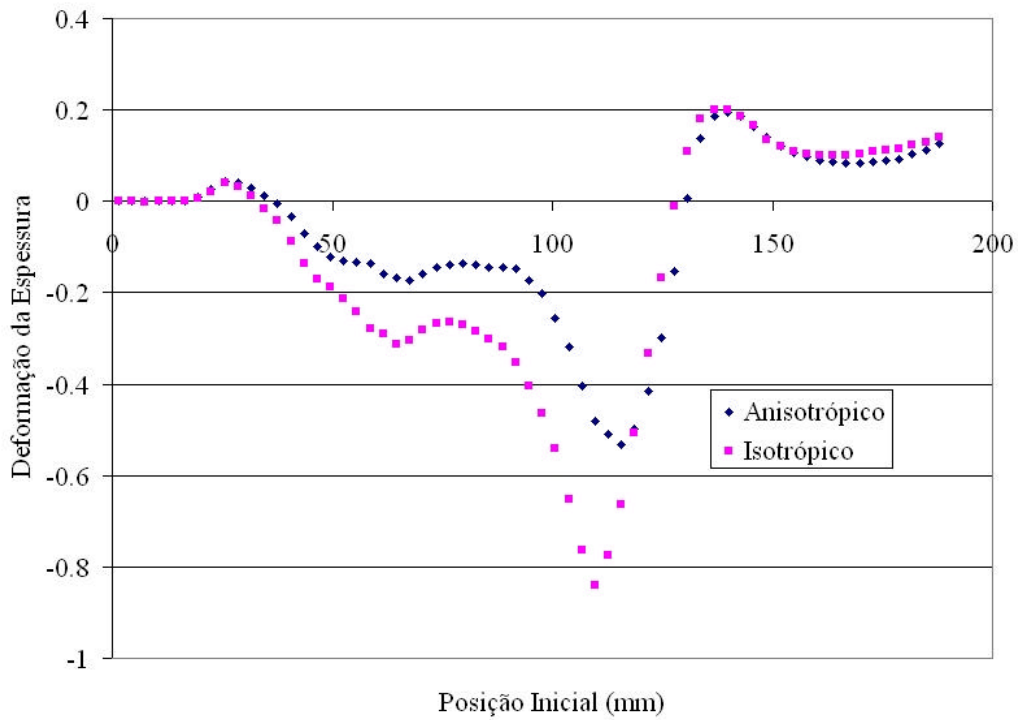


Figura 9. Deformação da espessura

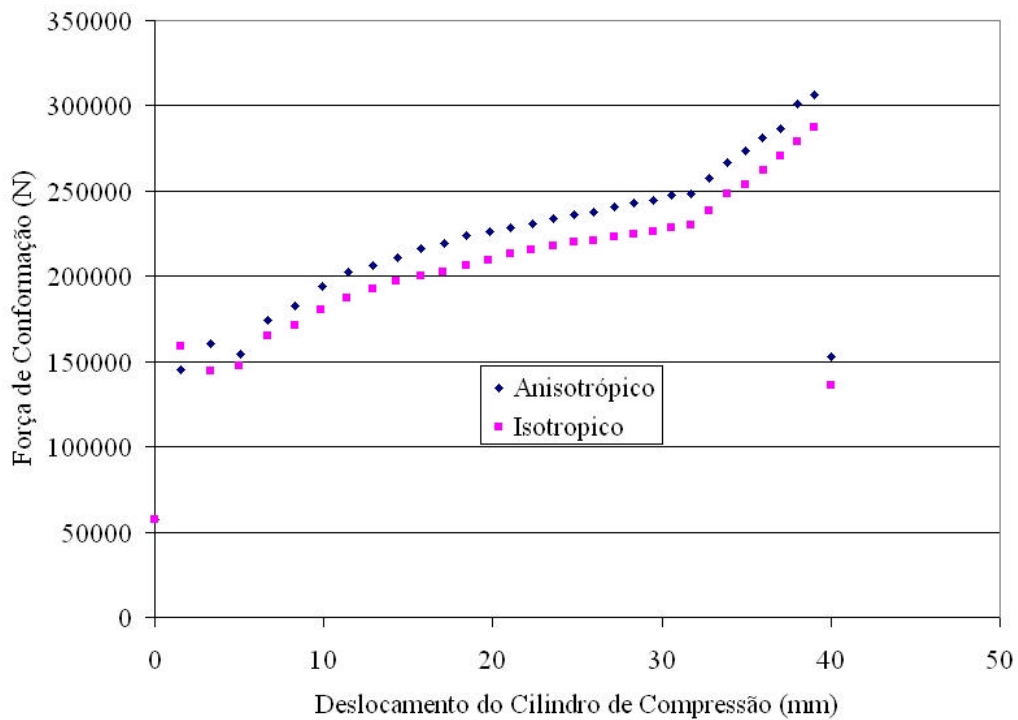


Figura 10. Força de conformação

A força de conformação, como dito anteriormente, é a soma da força de atrito, da força para deformar o tubo e da força devido a pressão interna. Esta força é maior para a conformação do modelo anisotrópico que no modelo isotrópico, isto ocorre pois o material anisotrópico necessita de uma força maior para iniciar o escoamento e também porque a pressão interna de conformação é maior.

6. Conclusões

O processo de hidroconformação foi simulado através do métodos dos elementos finitos de formulação explícita utilizando-se dois modelos de material diferentes um isotrópico e um anisotrópico.

A escolha das pressões e do caminho da deformação deve levar em consideração o modelo de escoamento utilizado.

As deformações na espessura do material isotrópico foram maiores que as do material anisotrópico, especialmente nas regiões onde predominaram esforços de tração. Esta verificação deve agora ser comprovada experimentalmente e deve ser estabelecido um critério de instabilidade plástica para a hidroconformação como existe nos processos de estampagem.

O fato do deslocamento ter sido de apenas um lado do tubo está relacionado a ferramenta que está sendo preparada para a comprovação experimental da simulação.

A força de conformação sofre influência do modelo de escoamento escolhido para o material, devido a força necessária iniciar o escoamento e também devido a variação nos valores das pressões.

7. Referências

- Dohmann, F., Hartl, C., 1996, "Tube Hydroforming - Research and Practical Application", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 71, pp. 174-186.
- Ahmetoglu, M., Altan, T., 2000, "Tube Hydroforming: State of Art and Future Trends", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 98, pp 25-33.
- "Metal Forming Handbook", 1998 - Schuler GmbH, Editora Springer, 563 p.
- Asnafi, N., 1999, "Analytical Modelling of Tube Hydroforming", Thin Walled Structures, Vol. 34, pp 295-330.
- Sokolowski, T., Gerke, K., Ahmetoglu, M., Altan, T., 2000, "Evaluation of Tube Formability and Material Characteristics: Hydraulic Bulge Testing of Tubes", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 98, pp 34-40.
- Cheng, S., Tonghai, W., 1995, "Research Into the Bulge Forming of a Tube Under Axial-Radial Compound Forces and Its Application", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 51, pp 346-357.
- Ahmed, M., Hashmi, M. S. J., 1997, "Estimation of Machine Parameters for Hydraulic Bulge Forming of Tubular Components", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 98, pp 9-23.
- Hosford, W. F., Caddell, R. M., 1993, "Metal Forming - Mechanics and Metallurgy", Editora Prentice Hall, 364 p.
- Slater, R. A. C., 1977, "Engineering Plasticity", Editora The Macmillan Press, 422 p.
- Krieg, R. D., Brown, K. H., 1996 "Anisotropic Plasticity with Anisotropic Hardening and Rate Dependence", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 122, N^o 4, pp. 316-324.
- Oyane, M., Sato, T., Okimoto, K., Shima, S., 1980, "Criteria for Ductile Fracture and Their Applications", Journal of Mechanical Working Technology, Vol. 4, pp. 65-81.
- Mac Donald, B. J., Hashmi, M. S. J., 2000, "Finite Element Simulation of Bulge of a Cross Joint From a Tubular Blank", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 103, pp 333-342.
- Lei, L. P., Kim, J., Kang, B. S., 2000, "Analysis and Design of Hydroforming Process for Automobile Rear Axle Housing by FEM", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 40, pp. 1691-1708.
- Lei, L. P., Kang, B. S., Kang, S. J., 2001, "Prediction of the Forming Limit in Hydroforming Processes Using the Finite Element Method and a Ductile Fracture Criterion", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 113, pp 673-679.

Simulation of Tube Hydroforming Process

Roberto Bortolussi

Faculdade de Engenharia Industrial - Mechanical Department

Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972 - São Bernardo do Campo - São Paulo - Brazil

ZIP: 09850-901

roberto@cci.fe.i.br

Sérgio Tonini Button

State University of Campinas - UNICAMP - Mechanical Engineering Faculty - Materials and Processes Department

Cidade Universitária Zeferino Vaz - Campinas - São Paulo

CEP: 13083-970

sergio1@fem.unicamp.br

Abstract. *Hydroforming process has been used to produce parts of automotive structures. These parts use low carbon steel or HSLA (high strength low alloy) tubes welded or aluminum extruded tubes. The welded tubes are produced from sheet metal which have anisotropic behavior. Using the finite element method with explicit formulation the hydroforming process was simulated with two different material models, one isotropic and other anisotropic, to verify the influence of the anisotropy in the pressure load, in thickness strain and the deformation load.*

Keywords. *hydroforming, simulation, finite elements*