

# SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE HIDROCONFORMAÇÃO DE TUBOS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 316L

**Fernando Cunha Tralli**  
fernandotralli@hotmail.com

**Resumo.** O propósito deste trabalho é simular a hidroconformação de tubos do aço inoxidável AISI 316L submetidos a carga axial e pressão interna simultaneamente e somente a pressão interna utilizando o método dos elementos finitos. Para realizar as simulações foram realizados ensaios de expansão livre ("bulge test") nos tubos para a obtenção das suas propriedades mecânicas. Para comparar os resultados, foram utilizados resultados experimentais e simulações com propriedades obtidas por outros métodos de ensaio presentes na literatura.

**Palavras chave:** Hidroconformação, Ensaio de Expansão Livre (Bulge test), Simulação numérica, Elementos finitos, AISI 316L.

## 1. Introdução

Em razão do crescente custo da energia e matérias-primas, assim como a demanda por um melhor controle ambiental, as indústrias são obrigadas a aperfeiçoarem seus processos de produção (Schmoeckel et al, 1999). Uma das principais alternativas aos tradicionais processos de produção é a conformação através de meio flexível (hidroconformação ou conformação hidrostática) de chapas e tubos.

Diferentemente de processos como a estampagem convencional, ainda falta uma base sólida de conhecimento que pode ser utilizada para o projeto do processo de hidroconformação (Ahmetoglu et al, 2000). Entretanto, bastante esforço no sentido de identificar os principais parâmetros e suas influências nos processos de hidroconformação vem sendo realizado.

O processo de hidroconformação normalmente está inserido em uma cadeia de processos que resultam no produto final. Na Fig. (1) é apresentada uma cadeia de processos que ilustra a produção de componentes hidroconformados. Processos como corte, controle da qualidade, tratamento térmico, estampagem, lubrificação, entre outros são apresentados como integrantes dessa cadeia. Percebe-se a partir da referida cadeia que não é somente importante estudar o processo de hidroconformação, mas também a sua integração na cadeia de processos. Tal visão deve nortear o projeto das ferramentas de hidroconformação de tal forma que seja possível a sua integração na produção.

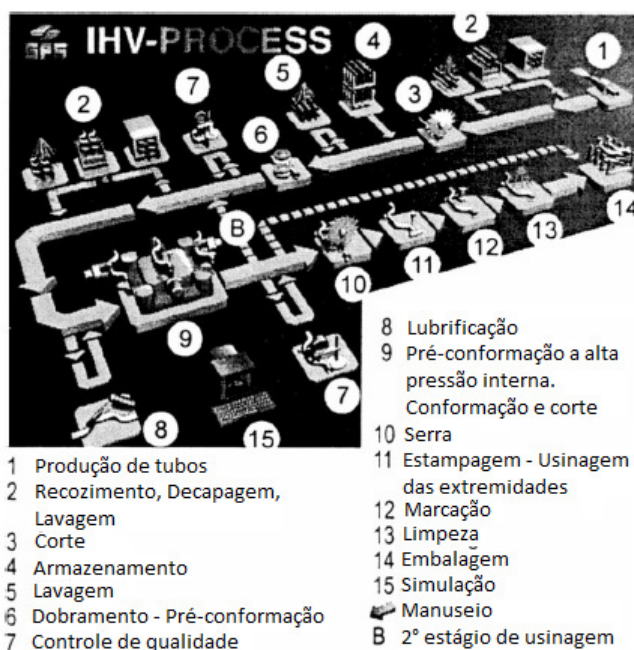


Figura 1. Possíveis processos para a produção de componentes hidroconformados (Schmoeckel et al, 1999).

Para o projeto adequado da ferramenta, ou seja, para que ocorra a expansão hidrostática da peça sem presença de falhas, tem-se utilizado intensivamente o recurso da simulação numérica baseada no método dos elementos finitos. As simulações são utilizadas para garantir que a ferramenta projetada será capaz de produzir as peças antes da sua construção, reduzindo o retrabalho e a utilização do método de "tentativa e erro". Para a simulação do processo é importante que a sua modelagem seja correta e os parâmetros utilizados confiáveis. A Fig. (2) ilustra as variáveis a

serem utilizadas e os resultados obtidos. Assim, torna-se extremamente importante um estudo sobre as reais condições de realização do processo para que a simulação se aproxime do comportamento que acontece de fato no material do tubo. Um dos principais parâmetros, e que é tratado no presente trabalho, é o referente ao material. No início da hidroconformação as propriedades utilizadas eram as obtidas a partir de chapas do mesmo material, produzindo erros consideráveis (Abrantes, 2008) (Abrantes, 2009). Assim, ensaios para caracterização do material na forma tubular foram desenvolvidos, entre eles o ensaio de expansão livre (*Bulge Test*).

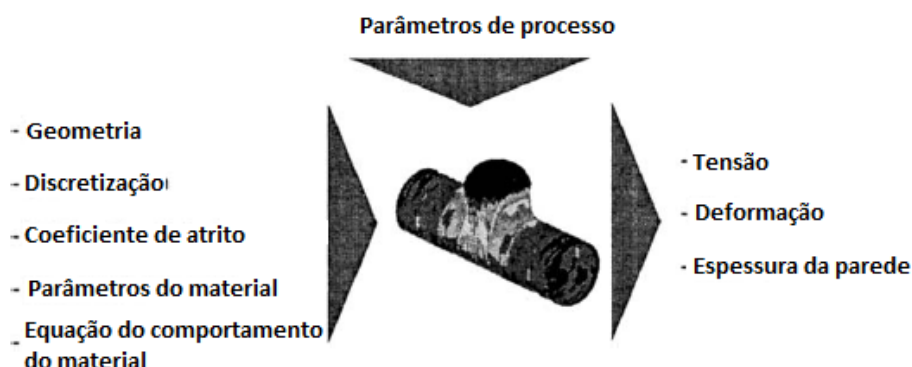


Figura 2. Parâmetros de entrada e saída importantes na simulação por elementos finitos (Schmoeckel et al, 1999)

São vários os exemplos de peças hidroconformadas, entre elas: peças automotivas (longarinas, colunas de carroceria, subestrutura para suporte do motor, eixo de comando de válvulas, eixos do sistema de transmissão, carcaça, eixo da transmissão traseira, tubulação de escape do motor, etc.), juntas tubulares (T's, cotovelos, reduções, etc.).

## 2. Princípio da Hidroconformação

O processo de hidroconformação consiste na conformação de um material, normalmente chapas ou tubos, através de aplicação de pressão interna através de fluido pressurizado. Um exemplo do princípio de hidroconformação é apresentado na Fig. (3). No caso de hidroconformação de tubos, também há o caso de aplicar força axial de compressão simultaneamente à pressão interna. O processo de hidroconformação pode ser realizado com matrizes abertas ou fechadas. No caso de matrizes aberta, o tubo ou chapa expande livremente, sem contato adicional com as matrizes a não ser o contato inicial de fixação. Para o caso de matrizes fechadas, procura-se que o tubo assuma, ao final do processo, o formato interno das matrizes. A fase em que ocorre o contato entre a peça hidroconformada e a matriz durante a sua expansão é chamada de calibração. Ao atingir essa fase, pode-se aplicar uma pressão interna superior que a pressão de ruptura, uma vez que o material para de se expandir livremente e sofre compressão entre o fluido e a parede da matriz.

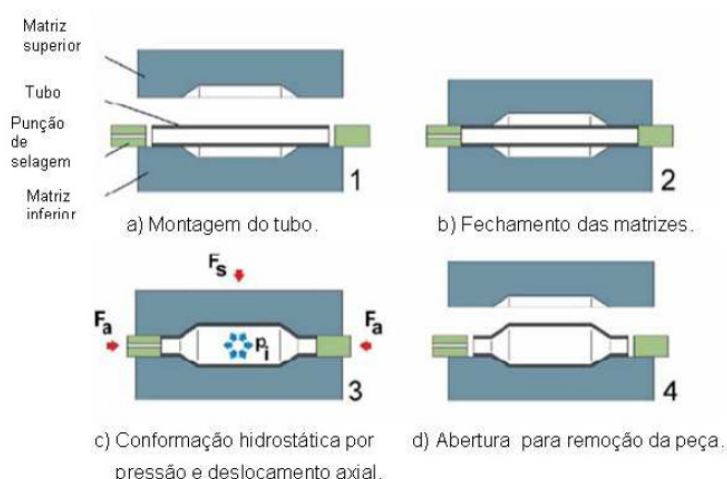


Figura 3. Exemplo de hidroconformação de tubos com fase de calibração (Dohrmann;Hartl, 2004).

## 3. Equipamento utilizado

O equipamento utilizado nos ensaios de expansão livre é apresentado na Fig. (3). A pressão interna ao tubo é fornecida pelo deslocamento do punção interno acionado por uma prensa hidráulica. O fluido utilizado no processo de hidroconformação foi água com adição de etileno glicol. A adição de etileno glicol foi feita para prevenir a corrosão do equipamento.

Para a realização dos ensaios de expansão livre, foi posicionado um cilindro entre as matrizes inferior e superior de forma a suportar a carga axial. Um manômetro foi utilizado para medir a pressão e uma válvula reguladora de pressão foi utilizada para interromper o processo em um determinado nível de pressão.

A formulação utilizada para esse ensaio foi a proposta por Fuchizawa et al (1993). Entretanto, em seu trabalho, Fuchizawa et al (1993) propõe a utilização de vários sensores eletrônico para monitorar o processo e obter uma curva da tensão em função da deformação praticamente contínua. Para esse trabalho, como não foi possível obter os sensores necessários (um sensor de pressão, três sensores de deslocamento e um sensor de espessura), a curva da tensão em função da deformação foi obtida a partir de alguns pontos somente, conduzindo o processo de hidroconformação até determinados níveis de pressão e, então, sendo realizadas as medidas necessárias em cada tubo.

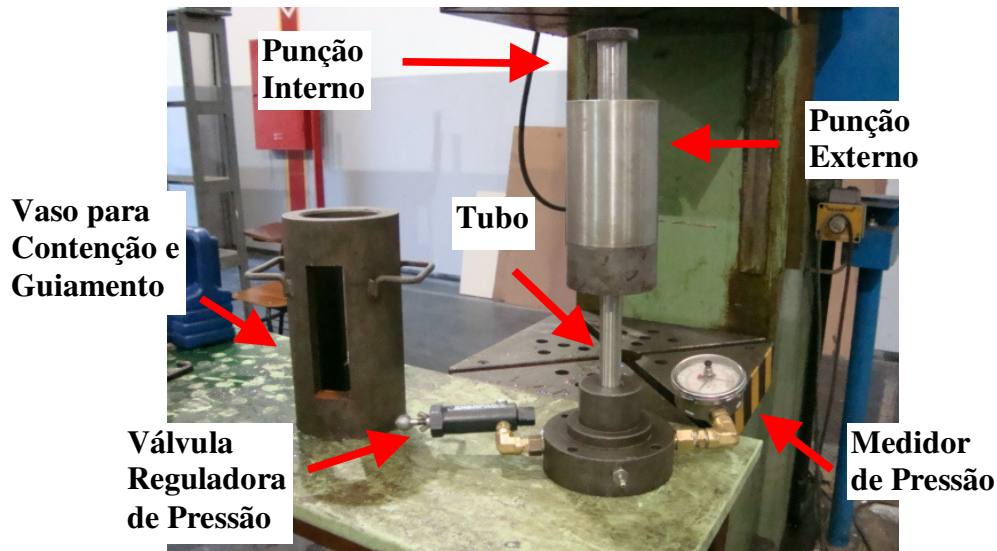


Figura 3. Foto do dispositivo a ser utilizado nos ensaios (Abrantes, 2009).

As dimensões do equipamento e dos tubos são apresentadas na Fig. (4). Os tubos utilizados são de aço inoxidável AISI 316L com diâmetro externo de 28 milímetros, 1,5 milímetro de espessura e 160 milímetros de comprimento. Essas dimensões também foram utilizadas para a construção do modelo a ser simulado numericamente.

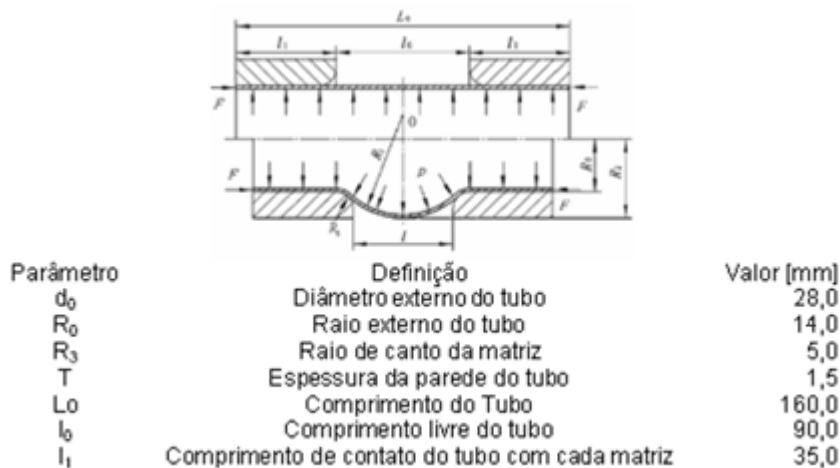


Figura 4. Dimensões do equipamento e tubo ensaiados.

As propriedades obtidas pelo ensaio de expansão livre para o tubo de AISI 316L são apresentados na Tab. (1) no item 4.1.

#### 4. Simulação Computacional

Normalmente, a cadeia de processos para peças produzidas utilizando hidroconformação se inicia com uma operação de dobramento do tubo, depois se executa uma pré-conformação e finalmente a hidroconformação, como apresentado na Fig. (5). A rigor, toda a cadeia de processos deveria ser simulada com auxílio de softwares de elementos finitos a fim de otimizar o projeto das ferramentas e parâmetros envolvidos nos processos. Na Fig. (6) pode-se visualizar um exemplo de simulação dos três processos apresentados na Fig. (5). Assim, detectam-se facilmente problemas futuros que podem ocorrer na peça, sendo possível evitá-los antes da construção das ferramentas,

economizando tempo e recursos. O presente trabalho trata da simulação apenas do processo de hidroconformação. Vários artigos tratam da simulação de todos os processos de cadeia (Haas et al, 2001)(Bauer et al, 2004).

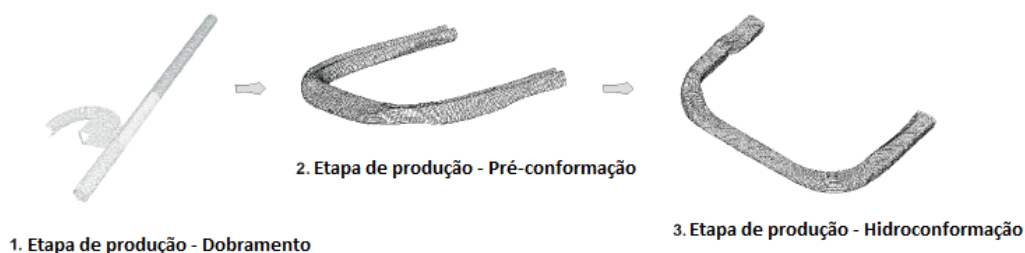


Figura 5. Cadeia de processos contendo dobramento, pré-conformação e hidroconformação (Bauer et al, 2004).

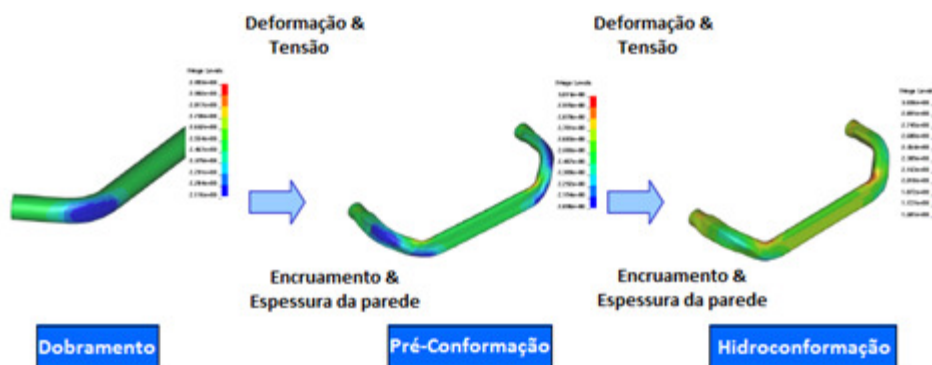


Figura 6. Simulação da cadeia de processos (Bauer et al, 2004).

#### 4.1. Modelo e parâmetros da simulação

O modelo utilizado nas simulações é apresentado na Fig. (7). As dimensões utilizadas são apresentadas na Fig. (4).

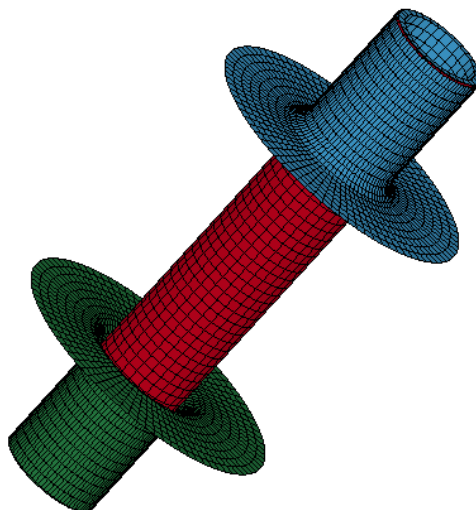


Figura 7. Modelo utilizado nas simulações.

O software de elementos finitos que utilizado nesse trabalho para a simulação do processo de hidroconformação é o LS-DYNA, desenvolvido pela Livermore Software Technology Corporation. O LS-DYNA é um programa de elementos finitos voltado para a simulação de dinâmica de estruturas e aplicações que envolvem grandes deformações (comportamento plástico), sendo assim adequado ao processo de hidroconformação. Seu principal método de solução é baseado no método explícito de integração que consiste no método mais adequado para a simulação da hidroconformação.

As condições de contorno definidas foram que todos os movimentos da matriz inferior fossem restringidos e que a matriz superior somente poderia se deslocar no sentido do eixo do tubo.

O contato entre o tubo e as matrizes é do tipo “frictional” e foi simulado utilizando o comando “\*Contact\_Automatic\_Surface\_to\_Surface” com valor de coeficiente de atrito dinâmico e estático de 0,05 (Abrantes, 2009).

Todo o modelo geométrico foi construído como elemento do tipo “shell”, onde a sua geometria é definida com as dimensões médias e a suas espessuras definidas. Tal elemento é bastante adequado quando se estuda a variação da espessura do modelo.

O modelo de material utilizado para o tubo é o “\*Mat\_Piecewise\_Linear\_Plasticity”, que consiste em um modelo elasto-plástico onde se pode definir um curva arbitrária de tensão em função da deformação, no caso a obtida pelo ensaio de expansão livre. Também pode ser definida uma deformação máxima de ruptura a ser atingida para interromper a simulação que foi utilizada como sendo 50% de deformação plástica. O modelo de material utilizado para as matrizes é do tipo “\*Mat\_Rigid” uma vez que estão sujeitas apenas a deformação elástica. A importância de definir as propriedades do material das matrizes, principalmente o módulo de elasticidade, é que são utilizadas para a iteração do contato entre tubo e matriz.

A força axial foi aplicada na matriz superior utilizando o comando “\*Load” e a pressão interna ao tubo foi aplicada utilizando o comando “\*Airbag” que considera a inserção de massa de fluido no interior do tubo provocando o aumento da pressão interna. Pode-se fornecer a vazão de massa a ser inserida no volume de controle, no caso, o tubo, ou fornecer a curva de variação de pressão e o programa calcula a vazão necessária para atender essa pressão. A vantagem desse comando é que, como o tubo está se deformando, a direção normal da superfície é atualizada a cada iteração do cálculo, corrigindo o sentido de aplicação da força devido à pressão interna. Para o caso de aplicação de pressão interna e força axial simultânea, seus valores estão relacionados pela geometria do equipamento utilizado. A razão entre a força axial e a pressão interna aplicada é igual a 346,4 N/MPa.

Tabela 1. Propriedades do aço AISI 316L obtidas através de diferentes ensaios.

| Ensaio          | Tensão de escoamento (MPa) | Coefficiente de encruamento | Constante de Rigidez Plástica (MPa) | Módulo de Elasticidade (GPa) | Fonte           |
|-----------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------|-----------------|
| Expansão Livre  | 365                        | 1,125                       | 1524                                | 155                          | -               |
| Tração de tubo  | 341                        | 0,819                       | 1424                                | 179                          | Abrantes (2008) |
| RHTT            | 317                        | 0,5487                      | 1013                                | 155                          | Tralli (2009)   |
| Tração de chapa | 258                        | 0,746                       | 1294                                | 178                          | Abrantes (2009) |

#### 4.2. Resultados das simulações

Foram simuladas duas condições de carregamento diferentes, aplicação de força axial de compressão e pressão interna simultânea e somente pressão interna, para cada conjunto de propriedades apresentadas na Tab. (1).

Nas Fig. (8) e (9) são apresentados os caminhos de expansão dos tubos para ambos os casos considerados com as propriedades obtidas pelo ensaio de expansão livre. É perceptível a diferença entre ambos os caminhos de expansão. Enquanto o tubo sujeito apenas a pressão interna expande com uma curvatura regular bem definida, o tubo sujeito a pressão interna e força axial de compressão apresenta rugas nas regiões próximas às matrizes e a sua parte central não apresenta curvatura, a não ser na pressão de 63 MPa, quando já está próximo da ruptura.

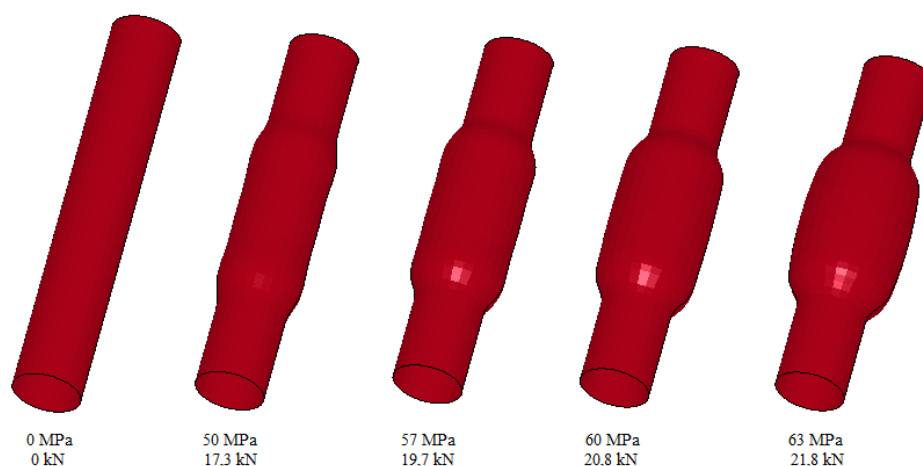


Figura 8. Evolução da expansão do tubo submetido à pressão interna e força axial de compressão.



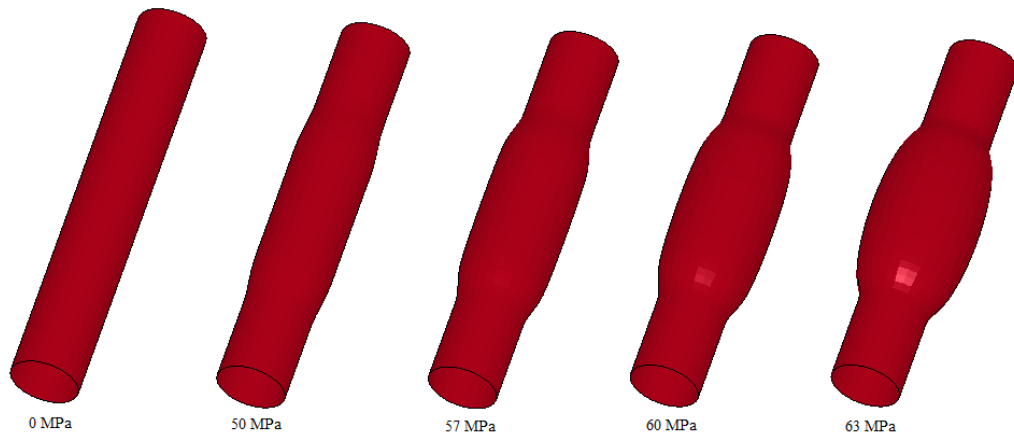


Figura 9. Evolução da expansão do tubo submetido à pressão interna.

Os resultados da distribuição de espessura com as propriedades obtidas a partir do ensaio de expansão livre são apresentados na Fig. (10) para o nível de pressão de 63 MPa. A diferença de espessura entre os dois casos se deve ao fato de haver maior alimentação de material para a região de deformação quando força axial é aplicada, resultando numa menor redução de espessura.

Os resultados também foram comparados com dados experimentais presentes no trabalho de Abrantes (2009). Assim, os dados resultantes de comprimento, diâmetro máximo e espessura mínima do tubo para cada nível de pressão são apresentados na Fig. (11), para o caso de aplicação simultânea de pressão interna e força axial, e na Fig. (12), para o caso de aplicação de somente pressão interna. Os desvios para a pressão de 60 MPa são apresentados na Fig. (13), para o caso de aplicação simultânea de pressão e força axial, e na Fig. (14), para o caso de aplicação de somente pressão interna. O nível de pressão de 60 MPa foi escolhido para ser analisado porque seria o nível de parada de processo de uma peça real, uma vez que é o último estágio de pressão avaliado antes da pressão de ruptura.

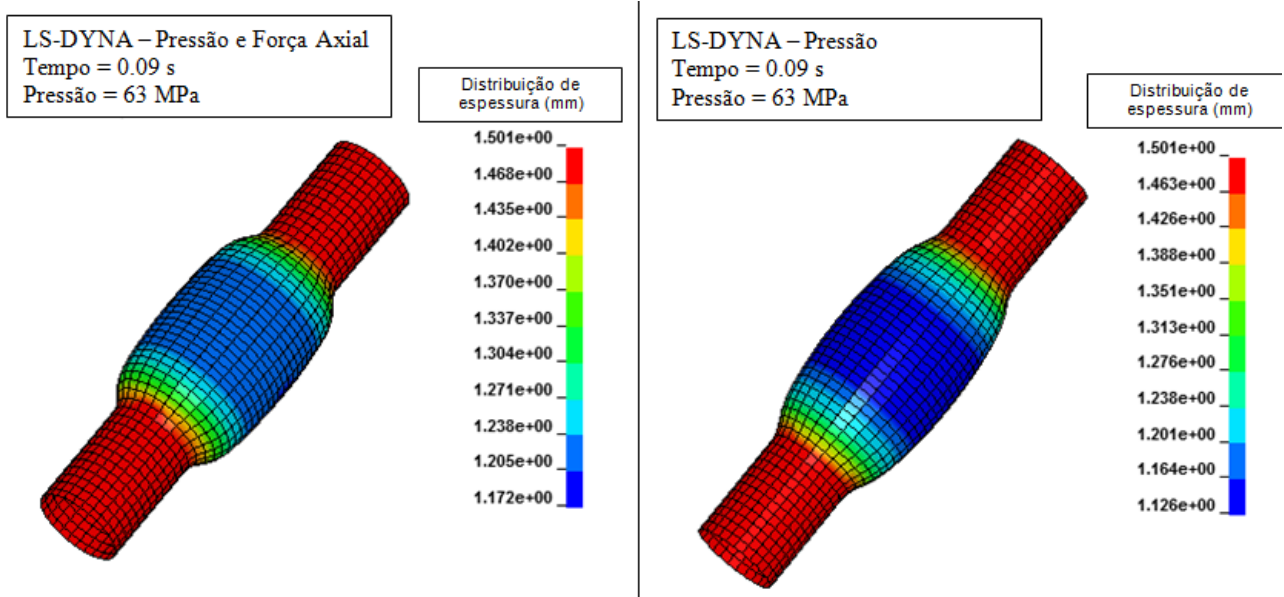


Figura 10. Distribuição de espessura para as simulações realizadas com as propriedades do ensaio de expansão livre.

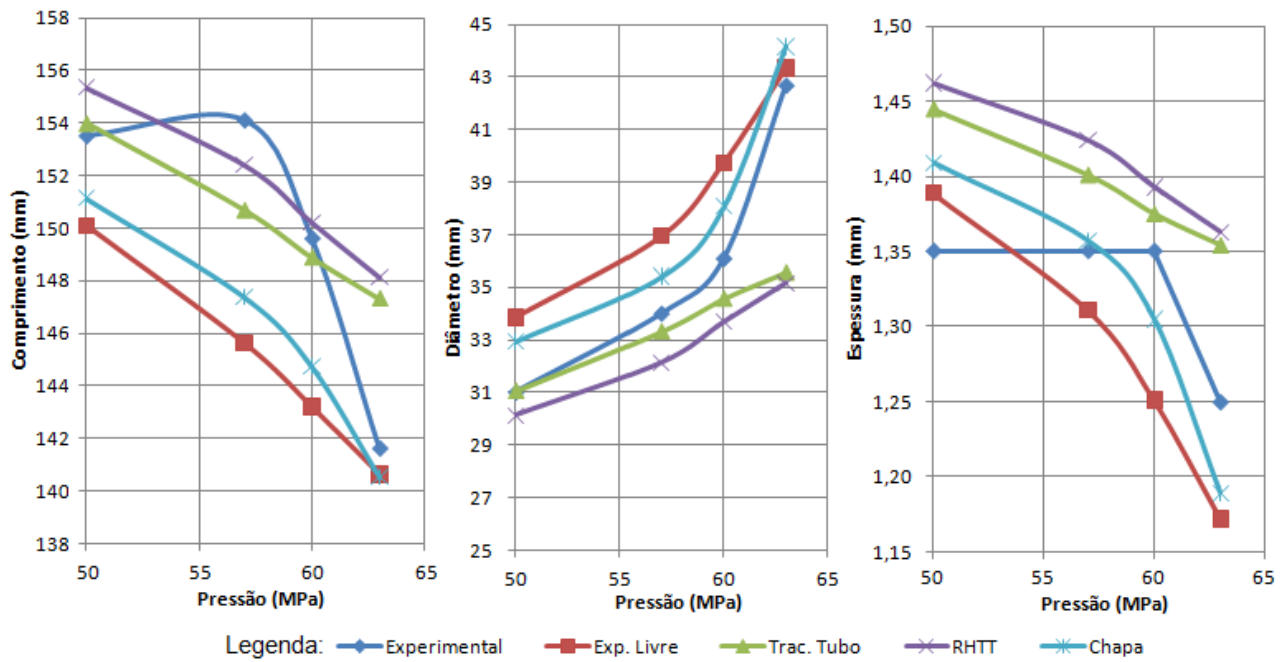


Figura 11. Comparação dos dados obtidos para o caso de aplicação simultânea de força axial e pressão interna.

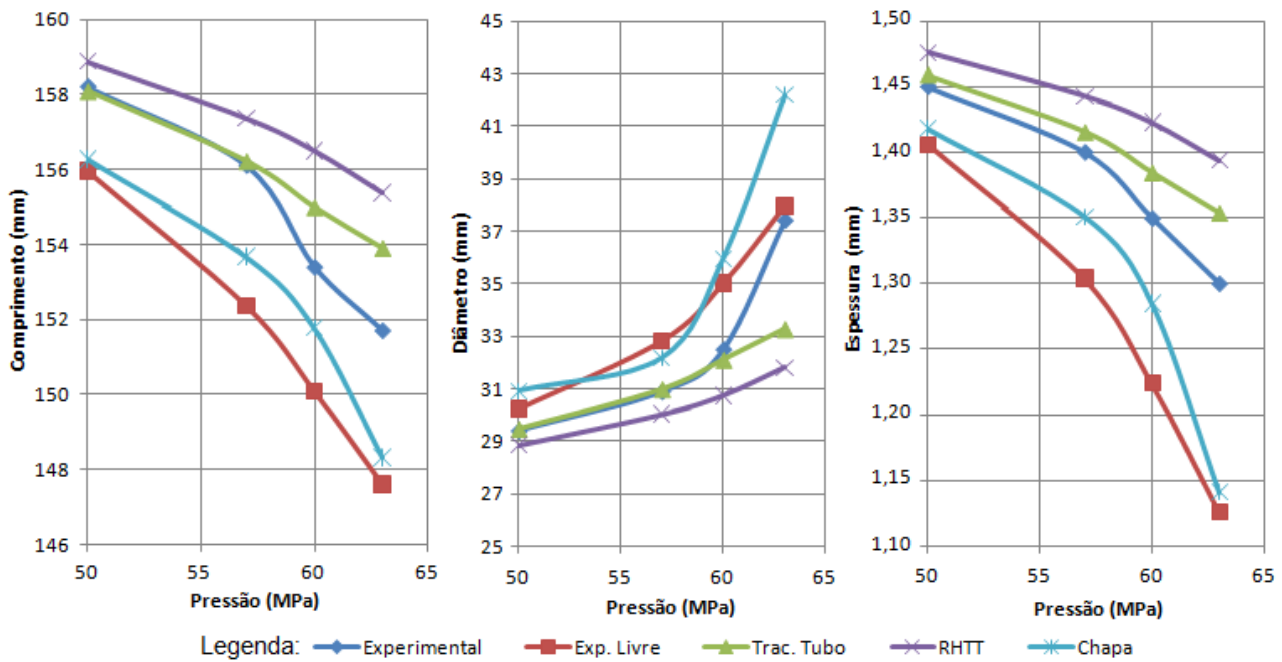


Figura 12. Comparação dos dados obtidos para o caso de aplicação de somente pressão interna.

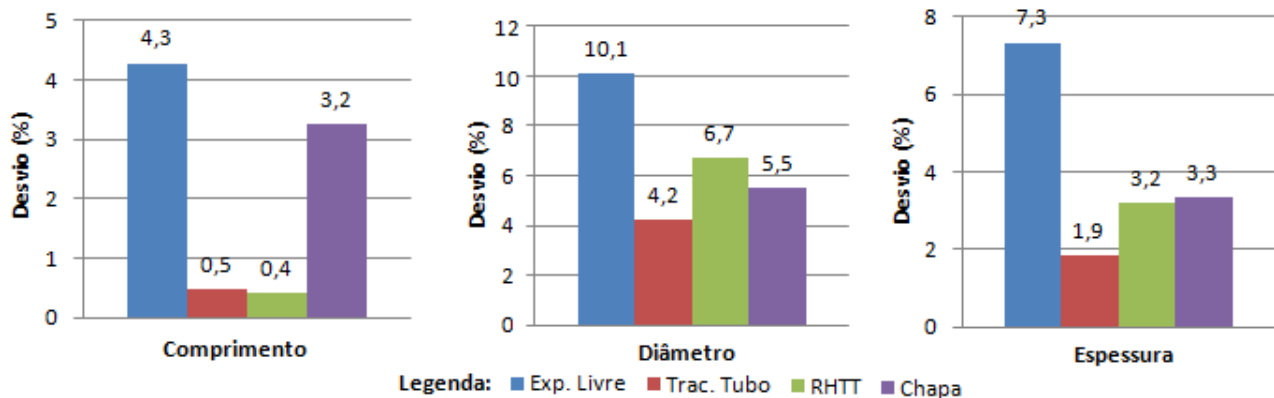


Figura 13. Desvio dos dados obtidos para o caso de aplicação de pressão interna e força axial em comparação com dados experimentais presentes na literatura para o nível de pressão de 60 MPa.

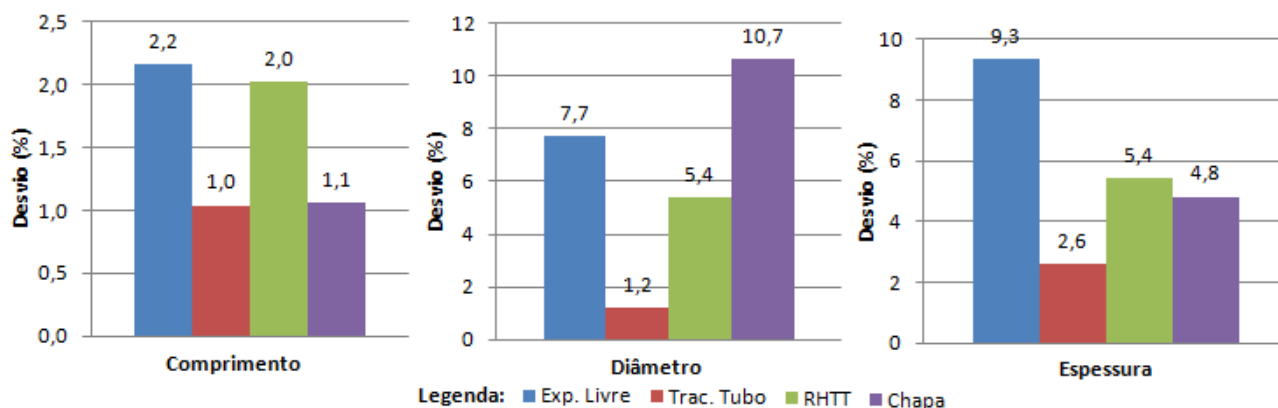


Figura 14. Desvio dos dados obtidos para o caso de aplicação de somente pressão interna em comparação com dados experimentais presentes na literatura para o nível de pressão de 60 MPa.

## 5. Análise dos resultados

A partir das figuras referentes ao caso de aplicação simultânea de força axial e pressão, Fig. (11) e (13), é possível afirmar que os resultados mais próximos do real são os obtidos a partir das propriedades conseguidas tracionando um tubo inteiro. Os resultados conseguidos com as propriedades obtidas pelo RHTT se apresentam como a segunda melhor opção, seguidas pelas obtidas pelas chapas e pelas obtidas pelo ensaio de expansão livre.

Analisando as figuras referentes ao caso de aplicação de somente pressão interna, Fig. (12) e (14), é possível manter as afirmações feitas ao outro caso de carregamento, ou seja, as propriedades obtidas pelo ensaio de tração do tubo obtiveram os melhores resultados, seguido pelas propriedades obtidas pelo RHTT, pela chapa e pelo ensaio de expansão livre, nessa ordem.

As propriedades obtidas pelo ensaio de expansão livre mostraram a maior diferença entre o resultado obtido experimentalmente e o simulado para o caso de aplicação simultânea de força axial e pressão interna. Para o caso de aplicação de somente pressão interna, os resultados se aproximam aos obtidos com as propriedades da chapa.

## 6. Conclusões e Recomendações

O ensaio de expansão livre foi realizado em tubos de aço inoxidável AISI 316L (Ø28x1,5) e suas propriedades foram obtidas de acordo com a teoria proposta por FUCHIZAWA e NARAZAKI (1993). Com as propriedades obtidas foram conduzidas simulações numéricas utilizando o software LS-Dyna. Além dos valores experimentais para comparação dos resultados, foram realizadas simulações com propriedades obtidas de formas diferentes para o mesmo material: obtidas através do ensaio chamado RHTT; obtidas através do ensaio de tração de um tubo inteiro; obtidas através de uma chapa.

Os resultados simulados mais próximos do experimental foram obtidos com as propriedades do tubo tracionado, apresentando um máximo de desvio em torno de 4%.

As propriedades obtidas pelo ensaio de expansão livre não possibilitou diminuir a diferença entre os resultados simulados e experimentais, apresentando um desvio máximo em torno de 10%. Assim, como o principal objetivo desse trabalho era verificar se essa nova abordagem possibilitaria uma melhor aproximação dos resultados experimentais, pode-se afirmar que para tubos de aço inoxidável AISI 316L, com as dimensões utilizadas, o ensaio de expansão livre não é uma alternativa viável. Apresenta-se como a melhor alternativa as propriedades obtidas pelo ensaio de tração de um tubo inteiro.

Alguns dos possíveis fatores que podem ter influenciado negativamente na determinação das propriedades pelo ensaio de expansão livre, causando essa diferença de 10%, são listados abaixo:

- Em algumas amostras não houve alinhamento correto entre as matrizes inferior e superior, acarretando na perda da linha de centro axial do tubo e um prejuízo na precisão da determinação da curvatura dos tubos;
- O sensor de pressão (manômetro) não apresentou a repetibilidade esperada para cada abertura determinada do regulador de pressão, ou seja, há uma falta de precisão relacionada ao manômetro que pode ser evitada com utilização de um sensor de pressão mais confiável;
- Cada amostra foi ensaiada com uma taxa de aplicação de pressão e força axial diferente, uma vez que a prensa utilizada nos ensaios não permite a regulação da sua velocidade de descida.

Assim, com esses fatores apresentados, algumas propostas de trabalhos futuros são sugeridas:

- Conduzir ensaio de expansão livre com a utilização de sensores eletrônicos para aquisição de dados do ensaio e de prensa com regulação de velocidade;



- Realizar experimentos e simulações com ferramentas de hidroconformação que tenha um estágio de calibração, ou seja, ocorrência de contato entre o tubo e matrizes fechadas com o formato final que o tubo deve ter;
- Avaliar a utilização de outros modelos de material para as simulações de hidroconformação no software LS-Dyna.
- Avaliar a utilização de outros modelos de atrito entre tubo e matriz para as simulações de hidroconformação no software LS-Dyna.

## 7. Referências

- Abrantes, J. P. (2008) “Relatório de Estágio PDEE na Ecole Centrale de Lille – Convênio Capes-Cofecub. – Fevereiro de 2008 - Processo: BEX0215/07-4
- Abrantes, J.P. (2009) “Uma Contribuição à Modelagem Experimental e Teórica do Processo de Conformação Hidrostática de Tubos de Aço Inoxidável AISI 316 L”. Dissertação de doutorado apresentada à Escola Politécnica da USP.
- Ahmetoglu, M., Sutter, K., Li, X. J., Altan, T. (2000) “Tube Hydroforming: current research, applications and need for training”. *Journal of Materials Processing Technology*, 98, pp. 224-231.
- Bauer, H., De Silva, A. K. M., Gantner, P., Harrison, D. K. (2004) “FEA – Simulation of Bending Processes with LS-DYNA”. 8th International LS-DYNA Conference, Detroit 2004. Disponível no link: <http://www.dynalook.com/international-conf-2004/02-5.pdf>.
- Dohrmann, F., Hartl, C., (2004) “Hydroforming-applications of coherent FE-simulations to the development of products and process”, *Journal of Materials Processing Technology*, 150, pp. 18-24.
- Fuchizawa, S., Narazaki, M. (1993) “Bulge test for determining stress-strain characteristics of thin tubes”, *Advanced Technology of Plasticity 1993*, pp.488-493.
- Haas, A., Bauer, H., Lerch, I., Mihsein, M., Hall, R., Böhm, A. (2001) “State-of-art in the use of (LS-DYNA) forming simulation in hydroforming and preceding processes”, 3rd European LS-DYNA Conference, Paris 2001. Disponível no link: <http://www.dynalook.com/european-conf-2001/54.pdf>.
- Schmoeckel, D., Hielscher, C., Huber, R., (1999) “Metal Forming of Tubes and Sheets with Liquid and Other Flexible Media”, *Annals of CIRP*, v. 48/2/1999 – pp.497-513.
- Tralli, F. C. (2009) “Caracterização de materiais tubulares através de ensaios de tração”, Relatório de iniciação científica. Apresentado no SIICUSP 2009 e SENAFOR 2009;

## 8. Direitos autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## NUMERICAL SIMULATION OF TUBE HYDROFORMING PROCESS OF AISI 316L STAINLESS STEEL

**Fernando Cunha Tralli**

fernandotralli@hotmail.com

**Abstract.** The aim of this work is the numerical simulation of tube hydroforming of AISI 316L stainless steel through the finite element method. Two cases of free expansion were studied: tubes under high internal pressure and tubes under high internal pressure and axial compression load. Free expansion tests, also known as Bulge tests, were performed to obtain the tube properties. These properties and others present in literature were used in the simulations. The results were compared with experimental data to evaluate the accuracy of each test to simulate tube hydroforming.

**Keywords.** *Tube Hydroforming, Free Expansion Test (Bulge Test), Numerical Simulation, Finite element method, AISI 316L.*