



PROCESSO DE CONFORMAÇÃO NÃO CONVENCIONAL DE JUNÇÃO NÃO SIMÉTRICA EM TUBOS DE PAREDE FINA.

Ernandes Roque de Paula Filho.

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Mecânica- Aeronáutica.
roque-sonia@bol.com.br

Lindolfo Araújo Moreira Filho.

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Mecânica- Aeronáutica.
lindolfo@mec.ita.cta.br

Hazim Ali Al-Qureshi.

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Mecânica- Aeronáutica.
hazim@mec.ita.cta.br

Resumo. Técnicas novas, às vezes são desenvolvidas pela necessidade de se alcançar determinado objetivo, aliado à falta de procedimentos usuais ou visando substituir com alguma vantagem determinados processos já existentes. O presente trabalho apresenta um processo de conformação a frio para tubos cilíndricos de parede fina, no qual se deseja obter uma junção não simétrica através de uma técnica não convencional de conformação, onde se utiliza elastômeros. O processo é bastante simples, utiliza-se de ferramentas comuns, é de fácil execução e de baixo custo, se comparado aos processos em uso. Apresenta também um bom acabamento superficial no produto acabado. Neste trabalho, a matriz utilizada para a conformação é de 45°, mas esta técnica pode ser aplicada à conformação de junções com outros ângulos, bastando para isto a confecção da matriz com o ângulo desejado. É apresentado também uma modelagem matemática para previsão das cargas de conformação, baseado na Teoria do Limite Superior (“Upper-bound Theory”), que permite uma avaliação dos equipamentos a serem usados..

Palavras-chave: Junções não simétricas Teorema do Limite Superior. Elastômero.

1-INTRODUÇÃO.

O progresso, a evolução do homem e a modernização têm, ao longo de toda a história, exigido dos estudiosos e pesquisadores uma grande dedicação em busca do desenvolvimento de novas técnicas e criação de novos procedimentos. Na técnica de conformação com a utilização de elastômeros não foi diferente. Houve uma grande evolução ao longo dos tempos e muitos pesquisadores vêm empregando grande parte de seu tempo na busca de novos métodos e processos. Com o desenvolvimento dos elastômeros sintéticos como o avotano, o uretano e o poliuretano, este processo recebeu um grande impulso, pois estes materiais apresentam maior durabilidade e maior resistência a óleos e a solventes, além de maior resistência ao esmagamento e abrasão que a borracha natural, utilizada nos primeiros trabalhos [1 a 4].

O presente trabalho apresenta uma modelagem através de um Método de Energia pelo Teorema do Limite Superior, utilizando-se de diagramas de velocidades, e também procedimentos experimentais para a obtenção da junção não simétrica.

2-MODELAGEM TEÓRICA

Segundo a Teoria do Limite Superior, assume-se a existência de um campo de velocidades cinematicamente admissível para que as cargas responsáveis pela formação desse campo constituam um limite superior às cargas necessárias para a solução real. Objetiva-se com este cálculo obter uma estimativa de força total de conformação, e assim, definir a aparelhagem necessária para o ensaio. Para tal desenvolvimento, é necessária a obtenção da geometria de deformação do processo. A figura 1 mostra a geometria de deformação para o sistema.

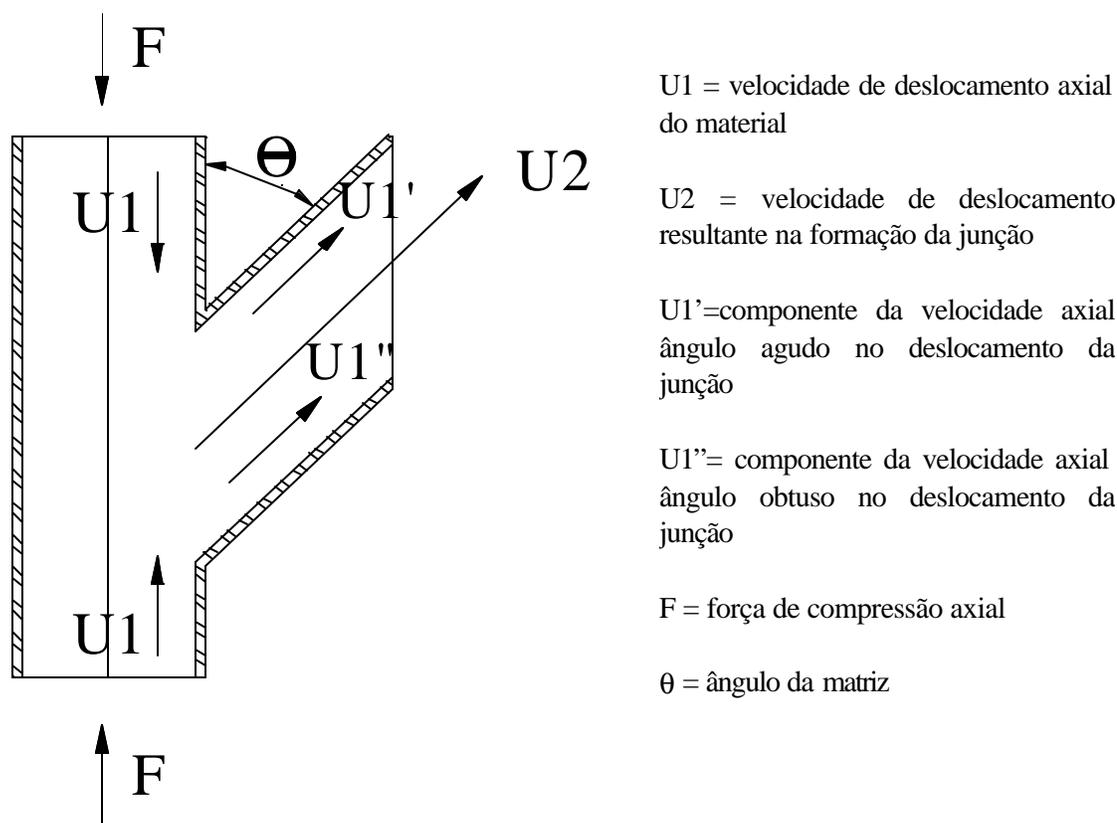


Figura 1 – Geometria de conformação.

A energia total de conformação requerida pelo balanço de energia envolvido no processo é definida como a soma da energia devido às perdas por atrito (tubo-matriz, tubo-elastômero) e necessária para cisalhamento do material w_a e da energia aplicada ao elastômero w_b ,

$$w_e = w_a + w_b \quad (1)$$

2.1 Energia devido às perdas por atrito e necessária para cisalhar o material

A energia devido a perdas por atrito e necessária para cisalhar o material é representada como:

$$\dot{w}_a = \int_s \mathbf{t} U_2 dS \quad (2)$$

Admitindo que a tensão de cisalhamento envolvida no processo seja menor que a tensão de escoamento em cisalhamento do material e constante [5], tem-se:

$$\mathbf{t} = m_t \mathbf{t}_0 \quad (3)$$

Sendo o material do tubo suposto isotrópico, rígido e perfeitamente plástico, escoando de acordo com von Mises, a tensão de cisalhamento envolvida no processo fica:

$$\mathbf{t} = m_t \frac{\bar{\mathbf{s}}}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

Utilizando a hipótese que o deslocamento Y do tubo é igual ao deslocamento X do domo, a área de deslizamento do tubo para a formação da junção, considerada como sendo a área responsável pelo atrito, será dada por:

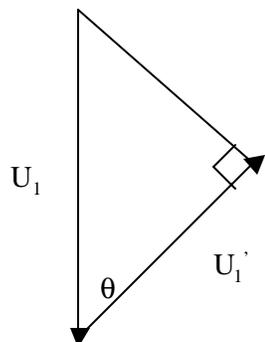
$$S_{Ta} = \int_s dS = p d_0 x \quad (5)$$

onde d_0 é o diâmetro externo do tubo.

Com isto, a energia devido às perdas por atrito pode ser expressa da seguinte forma:

$$\dot{w}_a = \frac{p}{\sqrt{3}} m_t d_0 x \bar{\mathbf{s}} U_2 \quad (6)$$

Para que o deslocamento da junção seja igual em todos os pontos, U_1' deve ser igual a U_1'' . Na figura 2 pode ser observada a relação entre as velocidades na direção longitudinal do tubo e na direção de formação da junção:



$$U_1' = U_1 \cos \mathbf{q} \quad (7)$$

$$U_2 = 2U_1 \cos \mathbf{q} \quad (8)$$

que será considerada constante ao longo de toda a junção

Figura 2 – Relação entre as velocidades

Com isto pode-se determinar a energia despendida para vencer o atrito e causar o cisalhamento no material através da expressão:

$$\dot{w}_a = \frac{2p}{\sqrt{3}} m d_0 x \bar{S} U_1 \cos q \quad (9)$$

$$\dot{F}_a = \frac{2p}{\sqrt{3}} m d_0 x \bar{S} \cos q \quad (10)$$

2.2 – Energia aplicada à compressibilidade do elastômero

A energia utilizada durante o processo de compressão do elastômero é dada por:

$$w_b = F_b U_1 \quad (11)$$

onde F_b é a força aplicada ao elastômero.

A compressão do elastômero pode ser dividida em três parcelas, estando a barra de elastômero sujeita a três diferentes tipos de deslocamentos, mostrados na figura 3.

$$(Y_T = Y_1 + Y_2 + Y_3) \quad (12)$$

onde: Y_1 corresponde ao deslocamento inicial da barra do elastômero para preencher a folga existente entre o elastômero e o tubo;

Y_2 corresponde ao deslocamento provocado pela compressibilidade do elastômero;

Y_3 corresponde ao deslocamento necessário para a conformação do domo.

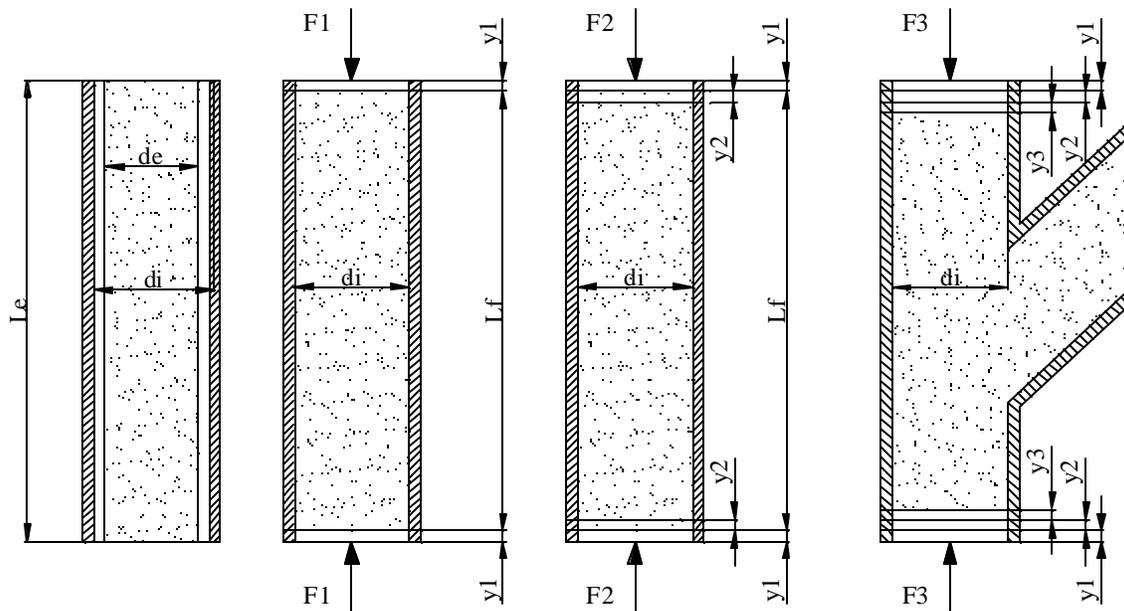


Figura 3 – Deslocamentos do elastômero.

$$F_b = F_1 + F_2 + F_3 \quad (13)$$

2.2.1 - Determinação da Força F_1

$$F_1 = A_0 E_f \frac{Y_1}{L_e} \quad (14)$$

E_f é o módulo de elasticidade aparente do elastômero após a compressão, ao ser aplicada F_1 . E_f é dado por:

$$E_f = E_o (1 + 2S^2) \quad (15)$$

$$E_f = E_o \left[1 + 2 \left(\frac{d_e}{4L_e} \right)^2 \right] \quad (16)$$

2.2.2 - Determinação da Força F_2 [6]

$$F_2 = \frac{E^* A_i Y_2}{L_f} = \frac{E^* A_i L_f F_T K}{L_f A_i} \quad (17)$$

$$F_2 = KE^* F_T \quad (18)$$

2.2.3 - Determinação do módulo de Elasticidade Aparente E^*

Após preenchida a folga, o módulo de elasticidade aparente deve ser recalculado em virtude da mudança do fator de forma.

$$E^* = E_o [1 + 2\text{sen}^2(\theta)] \quad (19)$$

Substituindo a expressão (19) na expressão (18), F_2 ficará:

$$F_2 = E_o [1 + 2\text{sen}^2(\theta)] K F_T \quad (20)$$

2.2.4 - Determinação da Força F_3

Assumindo que o volume deslocado para a formação do domo é igual ao volume devido ao deslocamento Y_3 , conclui-se que o deslocamento x na direção da junção é igual ao deslocamento Y_3 .

Então:

$$F_3 = A_i E^* \frac{Y_3}{L_f} \quad (21)$$

Substituindo (14), (20) e (21) em (13), e fazendo as devidas simplificações tem-se F_b :

$$F_b = \frac{p d_i^2 E_f}{4} \left(\frac{d_i^2 - d_e^2}{d_i^2} \right) + KE^* F_T + \frac{p}{4} d_i^2 E^* \frac{x}{L_f} \quad (22)$$

2.3 - Força total aplicada ao sistema

A força total aplicada ao sistema é a soma da força devida ao atrito com a força aplicada ao elastômero.

$$F_T = \frac{\frac{2p \cos(\theta) \bar{m} \bar{s} d_o x}{\sqrt{3}} + \frac{E_f p d_e^2 (d_i^2 - d_e^2)}{4d_i^2} + \frac{E^* p d_i^2 x}{4L_f}}{1 - E^* K} \quad (23)$$

$$E_f = E_o \left[1 + 2 \left(\frac{d_e}{4L_e} \right)^2 \right] \quad (24)$$

$$E^* = E_o [1 + 2 \sin^2(\theta)] \quad (25)$$

$$L_f = l_e \left[1 - \frac{(d_i^2 - d_e^2)}{d_i^2} \right] \quad (26)$$

3-PARTE EXPERIMENTAL

3.1 - Dispositivos e Procedimentos

3.1.1 - Descrição do Equipamento

Para a realização da conformação foi utilizado um equipamento que consiste basicamente de uma estrutura rígida em forma de quadro, mostrado na figura 4. São montados opostos e horizontalmente dois cilindros hidráulicos, com capacidade de 30 toneladas, que são acionados manualmente durante o processo de conformação. Em sua parte central tem-se um cilindro em cujo interior a matriz é introduzida. Dois tampões-guias são montados nas extremidades do cilindro, com a finalidade de centralizar os dois punções. O cilindro possui, ainda, um orifício com 6 milímetros de diâmetro para permitir a saída de ar e também para verificação do crescimento da junção.

Para a execução da conformação foi projetada e construída uma matriz, que é bipartida para permitir a remoção do tubo após a operação de conformação. Possui suas duas metades pinadas com a finalidade de não permitir o deslocamento de uma parte em relação à outra. O diâmetro externo do conjunto da matriz é igual ao diâmetro interno do cilindro. O cilindro, os punções e os tampões-guias foram manufaturados em aço ABNT ou AISI (VM-40 – Vilares) e tratados termicamente para adquirir uma dureza Rockwell C 43-45. Com relação aos punções, estes apresentam dois estágios, podendo ser observado na figura 5. O primeiro estágio é responsável pela pressurização inicial do elastômero para o preenchimento da folga existente entre o tubo e ele próprio. Já o segundo estágio é responsável pela compressão axial do tubo, fornecendo material para a formação da junção.

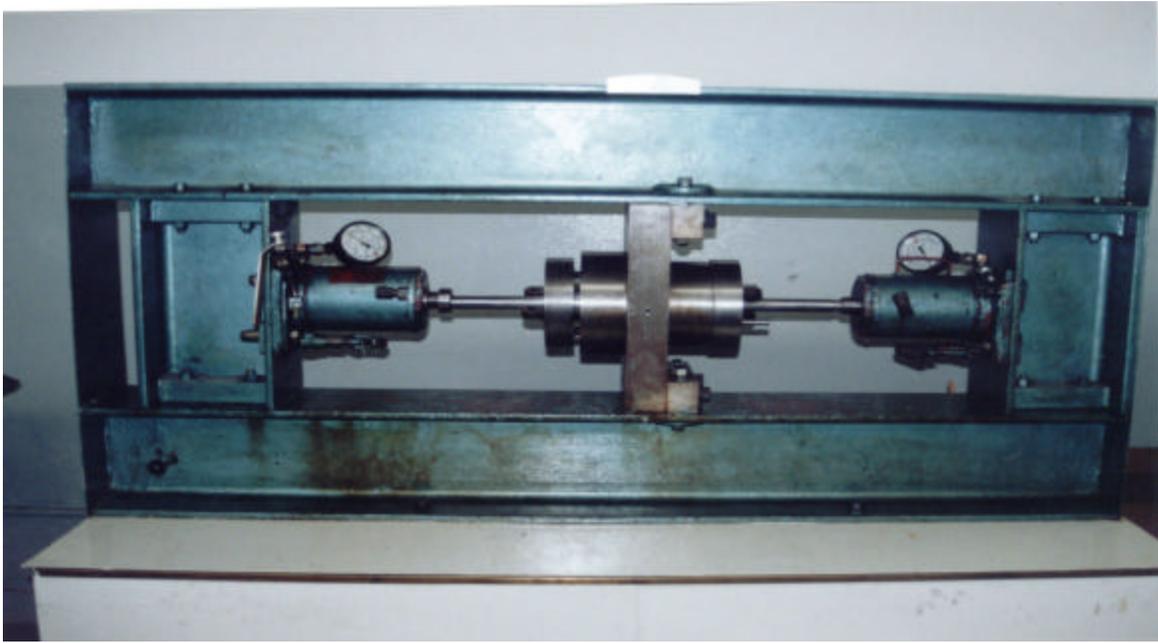


Figura 4 – Equipamento Montado.



Figura 5 – Punções com dois estágios.

Para o controle do avanço do crescimento da junção durante o processo de conformação, foi utilizado um paquímetro, que tinha sua haste introduzida no orifício de controle de avanço da junção, conforme mostrado nas figura 6.

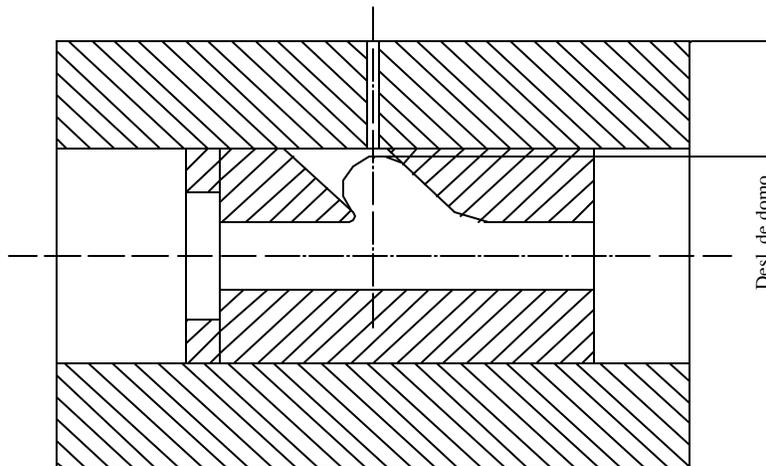


Figura 6 – Medição do avanço do domo.

3.1.2 - Processo de Conformação

Para que haja um perfeito desenvolvimento do processo, é necessário que a pressão desenvolvida pelo elastômero no interior do tubo, quando este começar a ser comprimido pelo segundo estágio, seja a pressão suficiente para evitar a flambagem do tubo e, ao mesmo tempo, não causar a fratura do domo.

Foram realizados diversos ensaios com a finalidade de se estabelecer uma relação entre os comprimentos do elastômero, do tubo e dos primeiros estágios que possibilitasse a realização da conformação desejada sem que ocorressem os defeitos como fratura ou flambagem. Esta relação “R”, é denominada aqui como “razão de controle”. A razão de controle pode ser mais bem entendida a partir da seguinte expressão:

$$R = L_e + 2L_p - L_t \quad (27)$$

onde L_e é o comprimento do elastômero;

L_p é o comprimento do primeiro estágio dos punções e

L_t é o comprimento do tubo.

Durante todo o processo a razão de controle deve ser observada com intuito de não ocorrerem os defeitos citados anteriormente, pois uma razão de controle eficaz no início da conformação pode não ser tão satisfatória após um determinado crescimento da junção, normalmente, provocando a fratura do domo.

Com isto determinou-se, através do método de tentativa e erro, uma razão de controle que permitisse um certo crescimento da junção sem flambagem e também sem levar o domo a fraturar-se.

Após esta evolução da junção, o sistema era desmontado e o tubo, já com uma conformação inicial, removido e levado até ao forno para um novo recozimento, buscando restabelecer seu estado inicial de encruamento.

Em seguida o tubo era novamente colocado no equipamento de conformação e submetido a um novo ciclo de carga até a conformação final da junção, mostrado na figura 7.



Figura 7 – Tubo Conformado.

4-RESULTADOS

4.1 - Resultados Teóricos X Resultados Experimentais

Face às dificuldades em se avaliar previamente o fator de atrito para os processos, em particular para o processo de conformação apresentado por este trabalho, foi realizada a avaliação do coeficiente de atrito existente no processo, com a fixação do valor do mesmo e variando o deslocamento da junção correspondente à conformação do tubo.

Com isto, foram plotadas as curvas para valores diferentes do coeficiente de atrito, curvas estas, que podem ser visualizadas através das figuras 8 e 9, juntamente com o plote das cargas obtidas experimentalmente para os materiais ensaiados, para se confrontar os resultados.

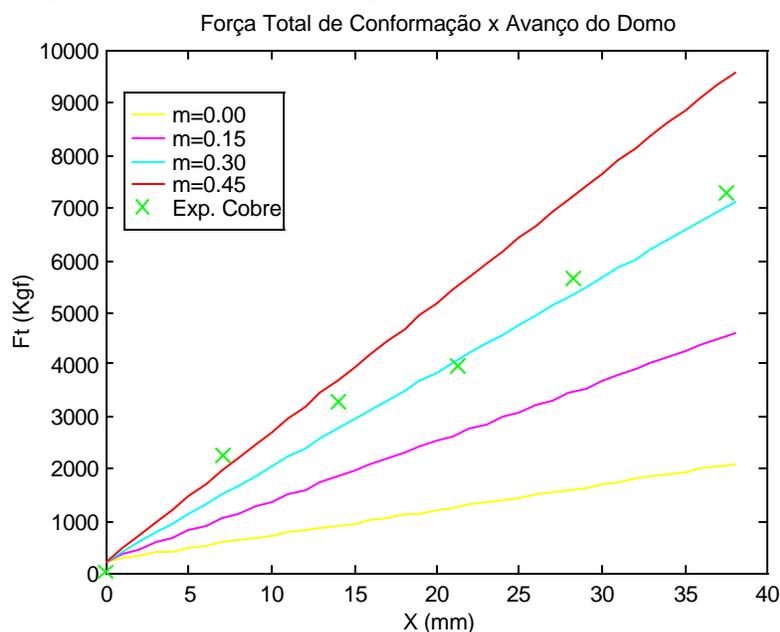


Figura 8 – Comparação Curvas Teóricas e Experimental – Cobre.

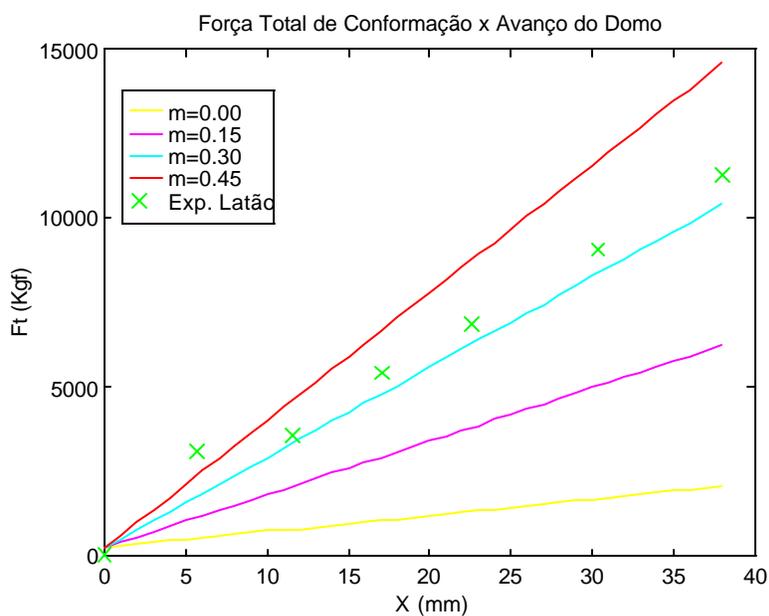


Figura 9 – Comparação Curvas Teóricas e Experimental – Latão.

8-CONCLUSÕES.

Na análise dos processos de conformação mecânica, um dos objetivos principais é a determinação dos esforços necessários para diferentes fases pelos quais passa o material até a obtenção do produto na sua forma final, permitindo o dimensionamento racional dos equipamentos ou otimização da operação de equipamentos já existentes.

O modelo matemático apresentado neste trabalho oferece previsões de cargas satisfatórias, o que pode ser observado nos gráficos comparativos de cargas teóricas e experimentais.

Verifica-se que o coeficiente de atrito existente no processo, tanto para o cobre quanto para o latão foi basicamente o mesmo, resultado que era esperado em virtude de os materiais pertencerem à mesma família.

5-REFERÊNCIAS.

- 1 – Al-Qureshi, H. A. 1972, Feasibility of a rubber-forming techniques. Machinery and Product Engineering, v. 119, p. 189-196.
- 2 – MOREIRA FILHO, L. A.; AL-QURESHI, H.A. 1984. Unconventional tee forming on metal tubes. THE WINTER ANNUAL MEETING OF ASME. Dec. , Louisiana, N Orleans. p. 123-135.
- 3 – MOREIRA FILHO, L. A.; AL-QURESHI, H. A.; MARRECO, D. B. 1985. Recent development in elastomer forming technique. In: INTERNATIONAL MACHINE TOOL DESIGN AND RESEARCH CONFERENCE, 25., Birmingham. Proceedings ... Birmingham: The University of Birmingham, 1985.
- 4 - MOREIRA FILHO, L. A; AL-QURESHI, H.A.; MENEZES, J. C. 1996. Otimização de um processo não convencional de conformação de tubos. In: CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, Rio de Janeiro, 1996. Anais... Rio de Janeiro: [s.n.], p.361-364.
- 5 – AVITZUR, D. 1977. Metal forming: processes and analysis. New Delhi: Tata McGraw-Hill. 1977.
- 6 - AL-QURESHI, H. A. 1997. Elastomer: metalforming die. São José dos Campos: ITA, 1997. 462p.

PROCESS OF UNCONVENTIONAL FORMING OF NON SYMETRICAL JOINTS IN THIN-WALLED TUBES.

Ernandes Roque de Paula Filho.

Institute Technological of Aeronautics, Department of Mechanical Engineering.
roque-sonia@bol.com.br

Lindolfo Araújo Moreira Filho.

Institute Technological of Aeronautics, Department of Mechanical Engineering.
lindolfo@mec.ita.cta.br

Hazim Ali Al-Qureshi.

Institute Technological of Aeronautics, Department of Mechanical Engineering.
hazim@mec.ita.cta.br

Abstract: *New techniques are sometimes developed out of necessity or to achieve certain objectives due to the absence of usual behavior or to substitute existing methods to obtain advantages. The present work presents a technique for the cold forming of thin-walled cylindrical tubes, aimed at obtaining a non symmetrical joint with an unconventional forming technique, using elastomer rod. The technique is simple, common tools are used, easily performed and cheap, when compared with conventional techniques. This technique presents a good surface finish of the product. In this work, the die has a 45° joint, but this technique can be applied in forming of joints with other angles. A mathematical model is presented to predict the forming loads, based upon the “Upper-bound Theory”, which permits an evaluation of equipment to be used.*

Keywords: *non symmetrical joints, thin-walled tubes, elastomer.*