

# INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA FORÇA DE CONFORMAÇÃO E DO ATRITO NA FABRICAÇÃO NÃO CONVENCIONAL DE JUNÇÕES METÁLICAS.

**Cristiano Roberto Martins Foli**

ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Praça Mal. Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias  
S.J. Campos (SP) – CEP 1228-900, e-mail : [foli@mec.ita.br](mailto:foli@mec.ita.br)

**Miguel Ângelo Menezes**

Unesp - Universidade Estadual Paulista, Av. Brasil nº56 – Centro -Ilha Solteira (SP) - CEP 15385-000.  
e-mail : [miguel@dem.feis.unesp.br](mailto:miguel@dem.feis.unesp.br)

**Lindolfo Araújo Moreira Filho**

ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Praça Mal. Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias  
S.J. Campos (SP) – CEP 1228-900, e-mail: [lindolfo@mec.ita.br](mailto:lindolfo@mec.ita.br)

**Resumo:** *A grande versatilidade do uso do elastômero como ferramenta flexível na conformação dos metais faz com que possa ser utilizada em processo de dobramento de chapas e tubos, estampagem profunda, corte e na fabricação de junções metálicas. Propõe-se neste trabalho o cálculo da força total de conformação utilizando elastômero para a fabricação de junções em “T” e a medida do atrito envolvido no processo de conformação. Um dos principais fatores que influenciam a força total de conformação é o atrito, tornando sua medida um trabalho complexo uma vez que ele não é constante durante o ensaio devido à elevação da pressão hidrostática do elastômero interno ao tubo e a modificação das condições superficiais de lubrificação durante o processo, sendo assim, foi desenvolvido um dispositivo de medição que simula as condições reais de ensaio. Para previsão da força total de conformação será utilizada a teoria do limite superior (upper-bond theory). O material utilizado para tal investigação será o cobre. Foi implementada uma rotina computacional utilizando o software Matlab a fim de se efetuar a análise gráfica dos resultados.*

**Palavras-chave:** *elastômero, conformação de tubo, conformação de junções, atrito.*

## 1. INTRODUÇÃO.

Nos últimos anos com a globalização, a competitividade industrial vem mobilizando engenheiros e cientistas, a fim de racionalizar a produção industrial, conseguindo assim produtos de qualidade e competitivos tanto no mercado nacional quanto no mercado internacional. Com este pensamento novos processos de fabricação não convencionais vêm sendo desenvolvidos no sentido de otimizar a fabricação de produtos onde os processos convencionais tornam-se inviáveis do ponto de vista econômico.

Com o desenvolvimento dos elastômeros sintéticos como o avotano, o uretano e o poliuretano, vários trabalhos foram publicados utilizando a técnica de conformação de metais por elastômero, como estampagem profunda de chapas metálicas (Al-Quereshi (1972); Maslennikov (1956)), dobramento e furo de tubos (Derweesh & Mellor (1969); Al-Quereshi & Mellor (1967); Limb et all (1970); Al-Quereshi (1971)), e a conformação de junções em “T” de tubo de parede fina. No que diz respeito à conformação de junções utilizando tubos de parede fina, vários trabalhos foram realizados ao longo da última década (Marreco (1979); Moreira Filho (1984), Moreira Filho (1986); Moreira Filho (1998)).

A conformação de tubos é uma tecnologia que sua aplicação está expandindo continuamente, especialmente na indústria automotiva. A principal vantagem da conformação usando elastômeros é o baixo peso e a alta resistência do produto. Por outro lado com a redução do peso do componente a espessura da parede poderá ser reduzida. Isto está relacionado com o aumento do atrito, sendo que as

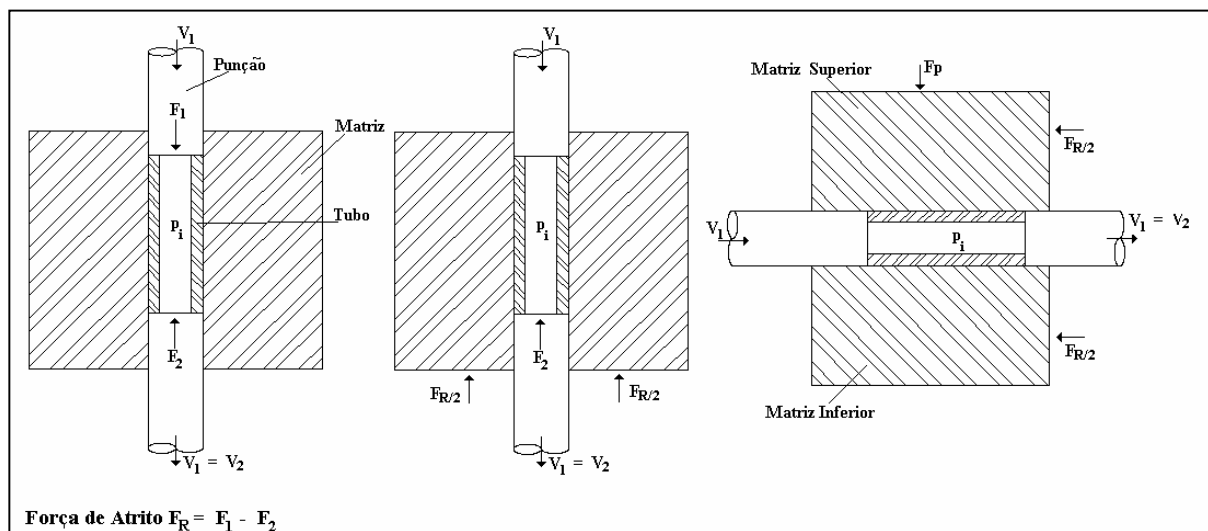
forças de atrito são responsáveis pelo decréscimo da seção transversal durante o processo de conformação. A pressão de contato é alta e a superfície de contato é grande, as forças de atrito representam uma porção dominante na força do punção. Por isso o coeficiente de atrito deve ser medido, por outro lado, capacitando o desenvolvimento de estratégias para a redução do coeficiente de atrito, Vollertsen & Plancak (2002).

Existem dois tipos diferentes de zonas de conformação, a chamada zona de alimentação e a zona de conformação. A zona de alimentação é importante por ser um tipo de reservatório para o material que está sendo empurrado para a zona de conformação. A condição de deformação interna na região de alimentação é caracterizada por uma pequena tensão de deformação na direção circunferencial. Dependendo da condição de atrito, a deformação remanescente permanecerá constante ou aumenta durante a ação de conformação.

Na zona de conformação, deformações tridimensionais ocorrem. Dependendo da razão da tensão axial, produzida pela força do punção e reduzida pela força de atrito na região de alimentação, e a tensão tangencial gerado pela pressão interna, um aumento ou diminuição da parede do tubo pode acontecer, Vollertsen & Plancak (2002).

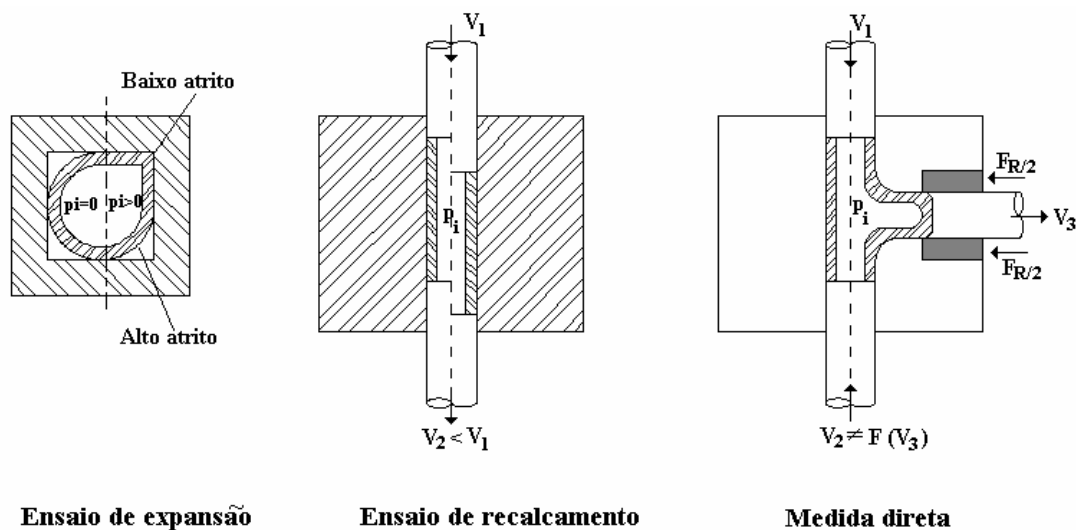
### 1.1. Princípio para medir o coeficiente de atrito.

Diferentes métodos têm sido aplicados para medir o coeficiente de atrito na conformação de tubos. Um destes métodos é por intermédio do teste do punção, ver Fig. (1). Este teste simula a zona de alimentação na conformação de tubo. O tubo é expandido por uma pressão interna contra a parede da ferramenta. Empurrando o tubo com a ferramenta, a força de atrito da superfície de contato entre o tubo e a ferramenta ocorre. Esta força pode ser medida por qualquer diferença das forças dos punções ou como força resultante na ferramenta, medido na horizontal ou vertical. A medida da força de atrito é dividida pela força de contato nominal, isto é, a área de contato no momento da pressão interna, obtendo o coeficiente de atrito.



**Figura 1. Teste de atrito na área de alimentação**

A Fig. (2) mostra vários princípios para determinação do coeficiente de atrito para a zona de conformação.



**Figura 2. Teste de atrito na zona de conformação**

O primeiro princípio de medida do coeficiente de atrito na zona de conformação é o teste de calibração, ver Fig. (2), um tubo circular é expandido por uma pressão interna numa matriz retangular. Dependendo das condições de atrito desenvolvidas no raio e na espessura da parede a forma final do tubo difere na extremidade. O teste pode ser feito até uma certa pressão, usando a extremidade do raio como medida do coeficiente de atrito. O raio pode ser proporcional ao coeficiente de atrito, Nielsen(2000). Alternativamente, a distribuição da espessura da parede pode ser analisada no final do teste e correlacionada, com o coeficiente de atrito usando o método de elementos finitos.

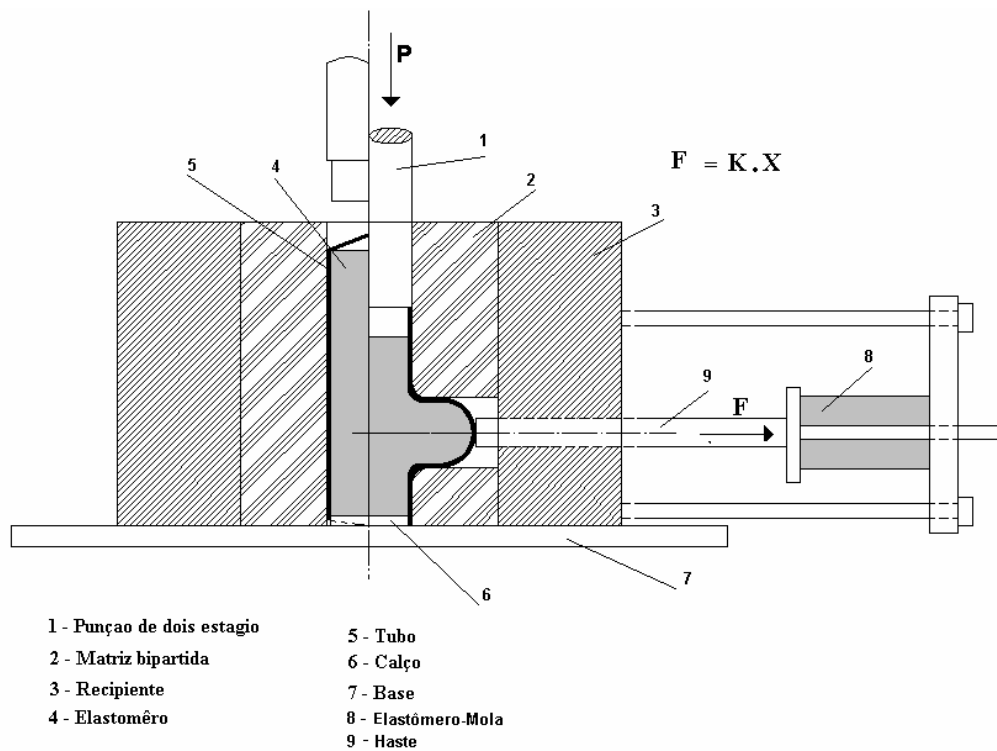
O segundo princípio é uma variação da medida direta da força de atrito na zona de conformação, Vollertsen & Plancak (2002). Um segmento de anel é colocado na posição onde o domo da peça é formado, o que pode ser trocado pela força de atrito contra uma célula de carga. Os problemas que ocorrem com este método são típicos deste tipo de medida, devido a elasticidade da célula de carga, e do afastamento entre a seção do anel e a ferramenta.

O terceiro teste mostrado na Fig. (2), é o teste do “upsetting”, foi desenvolvido para superar estas dificuldades. A pressão interna é medida por um transdutor de pressão. Durante o aumento da pressão, ambos os punções são movimentados para dentro da matriz com a mesma velocidade. As forças de atrito resultantes são medidas com um transdutor pizoelétrico de força. Estas medidas promovem informações sobre a força de atrito em função da pressão interna, Vollertsen & Plancak (2002).

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O ferramental utilizado no processo é mostrado esquematicamente na Fig. (3). A matriz é bipartida para permitir a remoção do tubo após a conformação; uma de suas partes possui um furo lateral, de diâmetro igual ao do tubo, onde será formada a junção em “T” com o auxílio de um tarugo interno de poliuretano; as duas partes da matriz são montadas em um recipiente cilíndrico robusto. Uma haste colocada no domo transmite uma força de compressão no elastômero-mola permitindo a medida da força “F”.

O processo de conformação consiste, assim, na aplicação gradual de carga ao punção que, inicialmente, produz apenas compressão no elastômero; continuando o ciclo de carregamento, o segundo estágio do punção faz contato com a parte superior do tubo. A operação é interrompida ao ocorrer um determinado incremento de penetração do tubo no orifício da matriz; a carga é então, removida.



**Figura 3. Dispositivo de conformação e medida de atrito**

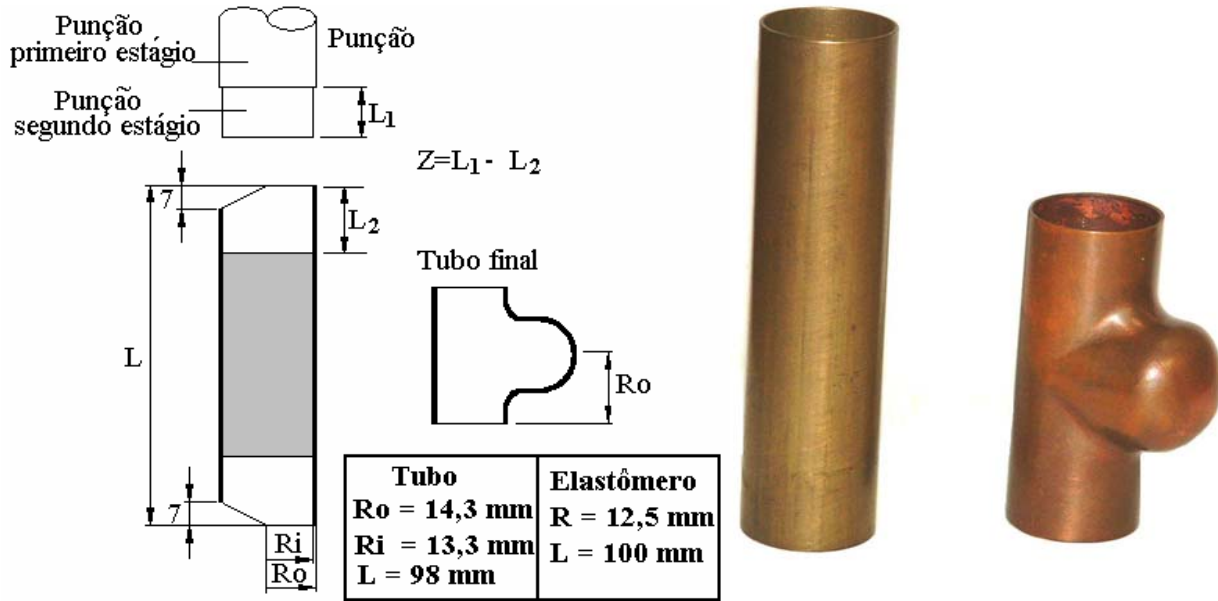


**Figura 4. Dispositivo para medida do fator de atrito**

A proporção entre os dois estágios do punção, alterada pela deformação do tubo, é reajustada; e novos ciclos de carregamento são aplicados até se obter a conformação desejada.

Na Fig. (4) pode-se ver o dispositivo utilizado para predizer o coeficiente de atrito (m) onde através de um relógio comparador mede-se o deslocamento x do domo e do elastômero que funciona como uma mola. Através de relações matemáticas mede-se a força que será utilizada no calculo do coeficiente de atrito.

Na Fig. (5) tem-se a descrição da geometria do tubo e um exemplo de junção formada por este processo de conformação.



**Figura 5. Descrição da geometria do tubo antes e depois da conformação.**

### 3. MODELAGEM TEÓRICA

A fórmula apresentada para o calculo da força total de conformação já foi previamente deduzida na referência, Foli et al. (2003), como segue:

$$F_T = \frac{\frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{(R+1)}{(4R+2)}} \cdot \bar{\sigma} \{d_0^2 - d_i^2 + 2.m.L.d_0\} + A_0 E_c \left( \frac{d_i^2 - d_r^2}{d_r^2} + \frac{A_i E^* . X}{L'} \right)}{2 - K.E^*} \quad (01),$$

Na força total experimental deve ser retirada a força necessária para a conformação do elastômero ( $F_e$ ). Em, Marreco (1979), encontra-se a equação experimental abaixo:

$$F_e = 430 + 74x \quad (02),$$

então a força total será dado por:

$$P = F_t - F_e \quad (03),$$

onde  $F_t$  é a força medida diretamente no ensaio de conformação do tubo.

Portanto o coeficiente de atrito será dado por:

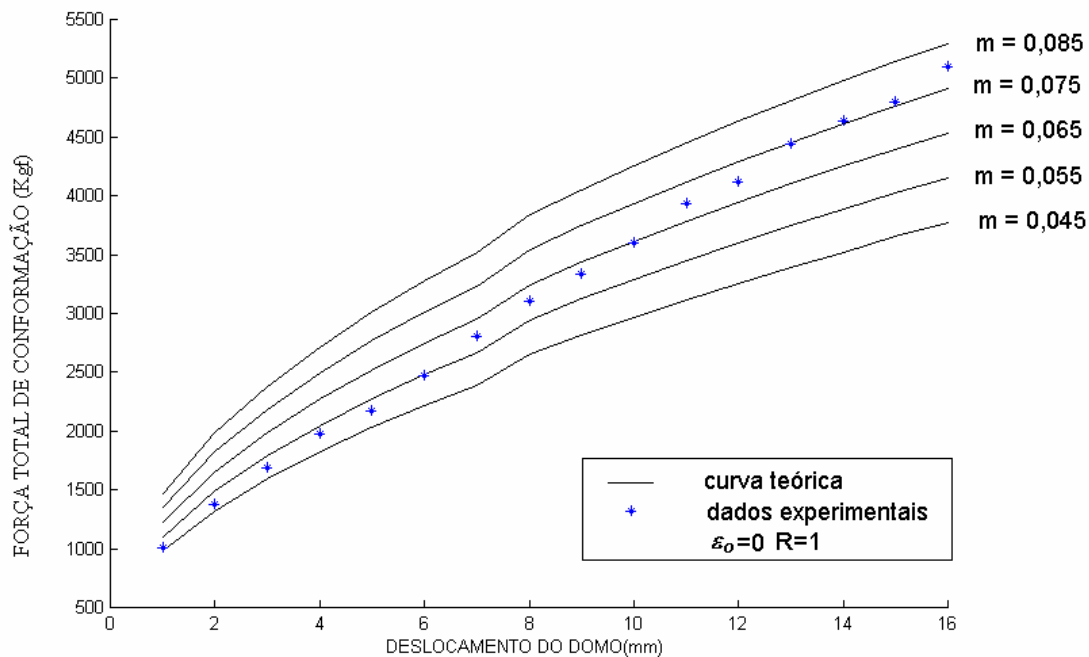
$$m = \frac{F}{P} \quad (04),$$

onde  $F$  é a força medido pelo elastômero-mola na conformação do domo e  $m$  o coeficiente de atrito.

#### 4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.

Analisando a Eq.(01), pode-se verificar que a mesma depende de fatores geométricos, propriedades mecânicas, de condições de operação (avanço do domo), do fator de atrito ( $m$ ), e da anisotropia do material ( $R$ ). Devido à dificuldade do levantamento prévio do fator de atrito ( $m$ ), durante o processo, uma série de curvas teóricas, obtidas da Eq.(01) fixando  $m$  e variando ( $X$ ) até  $X=16$  mm (conformação máxima), foram plotadas visando encontrar o valor médio de atrito, através da comparação dos valores teóricos e experimentais.

Examinando a Fig. (6), pode-se observar que o fator  $m$  (atrito) para o cobre apresenta uma baixa variação, variando de 0,04 a 0,075. Esta variação pode ser explicada pelo fato, que à medida que o processo se desenvolve, o lubrificante entre a parede externa do tubo e a matriz perde sua eficiência devido a sua eliminação, acentuando mais o contato metal/metal.

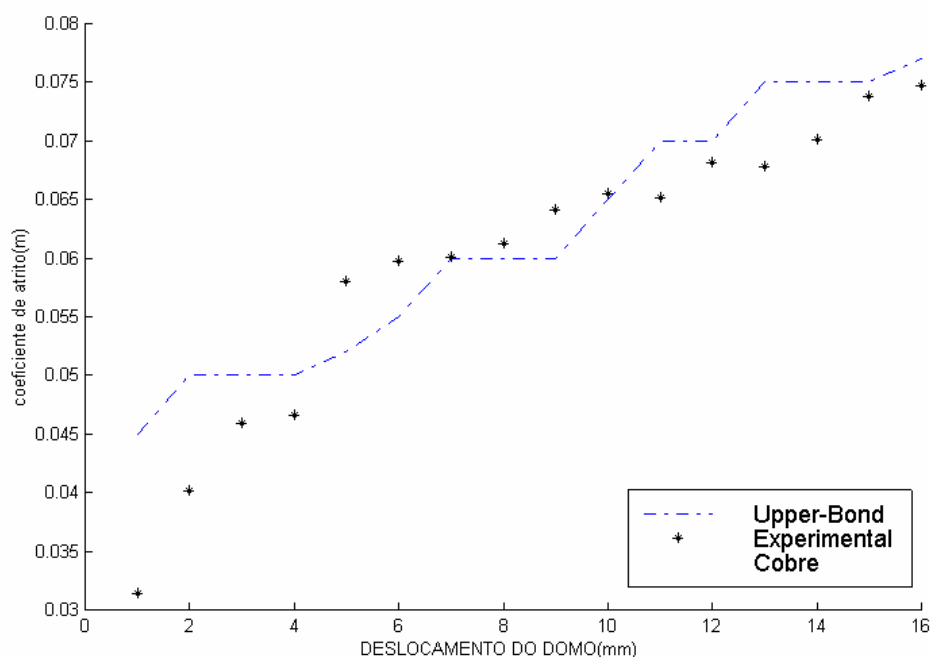


**Figura 6. Valores Teóricos e Experimentais da Carga de Conformação – Cobre**

Com os dados de força obtidos experimentalmente, através do dispositivo para medida de atrito, Fig. (5), e utilizando a Eq.(04) pode-se levantar os valores de atrito, que foram plotados na Fig. (7).

Através da Fig. (7) observa-se que no início do processo de conformação (até aproximadamente  $X=2$  mm) um baixo valor do fator de atrito, da ordem de 0,03, em relação aos valores teóricos. Isso pode ser explicado porque no início apenas o elastômero está agindo para formação do domo, há portanto, atrito somente na região de conformação, à medida que o processo de conformação se desenvolve o segundo estágio do punção começa agir sobre o tubo havendo assim atrito tanto na região

de conformação quanto na região de alimentação. Com o desenvolvimento do processo de conformação os valores do fator de atrito calculados experimentalmente convergem para os valores teóricos apresentando apenas uma pequena diferença, demonstrando assim a validade dada pela Eq.(01) que calcula da força total de conformação.



**Figura 7. Coeficiente de atrito.**

## 5. CONCLUSÕES

O teste realizado para medir o atrito, embora seja uma simplificação do equipamento para conformação de junções uma vez que utiliza apenas um punção fazendo com que haja um aumento no ciclo de carregamento e descarregamento mostrou-se eficiente na obtenção da junção e na medida do valor do atrito.

As diferenças encontradas entre os valores teóricos e experimentais devem-se a simplificação do equipamento na aquisição de dados uma vez que utiliza um elastômero como mola a fim de medir o valor da força na saída do equipamento. Para um melhor resultado deve-se utilizar melhores equipamentos como, por exemplo, células de carga. Os testes devem ser feitos para outros materiais a fim de confirmar sua eficiência.

O processo de conformação de junções utilizando elastômero, no estágio em que se encontra representa uma importante área de aplicação de elastômero, que devido a sua simplicidade e ao baixo custo do ferramental, pode ser uma opção de interesse em aplicações industriais que envolvam produção em pequena escala, substituindo com vantagens as junções obtidas por métodos convencionais, uma vez que se tem um processo de conformação a frio o que aumenta as propriedades de resistência do material.

## 6. REFERENCIAS



- AL-QURESHI, H. A., 1972. Feasibility of a rubber-forming techniques. Machinery and Prod. Eng., 119, p. 189, Febr.
- AL-QURESHI, H.A., MELLOR P.B., 1967. Forming and Piercing of Metal Tubes with Polyretane” Eng. Materials and Design, Nov.
- AL-QUERESHI, H.A., 1971, “Metals and Materials 7”, pp. 317.
- DERWEESH, F.L. AND MELLOR, P.B., 1969. Maslennikov’s Technique for Forming a Cylindrical Cup. Proc. 10 th Int. MTDR Conf., p. 499.
- FOLI, C. R.M, MOREIRA FILHO, L. A., MENEZES, M.A., 2003a. Alternative process for unconventional forming of junction in thin-walled metal tubes In: Proceedings Of the 17th International Congress of Mechanical Engineering.v.1. p.1 , 2003, São Paulo.
- MARRECO, D.B., 1979. Estudo de Viabilidade do Uso de Elastômero em dois Processos de Conformação de Metais. - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, C.T.A., São José dos Campos, Tese de Doutorado.
- MASLENNIKOV, N.A., 1956. Deep Drawing of Sheet Metal by Friction Forces . The Engineers Digest, 17, p. 336, Sept.
- MOREIRA, FILHO L.A., 1984. Conformação de Junções em tubos de Parede fina Utilizando Elastômero - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, C.T.A., São José dos Campos, Tese de Mestrado.
- MOREIRA FILHO, L.A., AL-QUERESHI, H.A., 1986. Elastomer Forming os Cross Junction.Int Journal Mach.Too Desing.
- MOREIRA, FILHO, L.A., 1998. Modelagem Teórica e Automatização de Processo de Conformação de Junções em Tubos de Parede Fina. - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, C.T.A., São José dos Campos, Tese de Doutorado.
- NIELSEN, M., 2000. In: Proceedings of Syposium on New Coatings for Hydroforming Tooling, Next Generation Solutions, Vol 10, Nashville, USA.
- VOLERTSEN, F., PLANCAK, M., 2002. On possibilities for the determination of the coefficient of friction in hydroforming of tubes, Jounal of Mat.Proc.Tech., pp 412-420.

## **INVESTIGATION OF THE INFLUENCE FORMING FORCE AND FRICTION IN UNCONVENCIONAL FABRICATION OF THE METALLIC JUNCTION.**

### **Cristiano Roberto Martins Foli**

ITA – Aeronautic Technological Institute, Praça Mal. Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias  
S.J. Campos (SP) – CEP 1228-900, e-mail : [foli@mec.ita.br](mailto:foli@mec.ita.br)

### **Miguel Ângelo Menezes**

Unesp – State University of São Paulo, Av. Brasil nº56 – Centro -Ilha Solteira (SP) - CEP 15385-000.  
e-mail : [miguel@dem.feis.unesp.br](mailto:miguel@dem.feis.unesp.br)

### **Lindolfo Araújo Moreira Filho**

ITA – Aeronautic Technological Institute, Praça Mal. Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias  
S.J. Campos (SP) – CEP 1228-900, e-mail: [lindolfo@mec.ita.br](mailto:lindolfo@mec.ita.br)

**Abstract:** *The great versatility in using the elastomer as a flexible tool in the metals forming allow it to be used in bending process of sheet and tubes, deep-drawing, cut and fabrication of metallic junctions. This work present the calculation of the forming total force using elastomer for the " T " junctions fabrication and the friction measurement involved in the forming process. One of the important factors that influence the forming total force is friction, turning the measurement into a complex task since in the test, the elevation of the hidrostatic pressure induced inside the tube due to the elastomer press*



*isn't constant and the modification of the superficial conditions of lubrication during the process, as it is, was developed a measurement device that simulates the real conditions of test. For forming total force forecasting, the upper-bound theory will be used. The employed material for such investigation was copper. Further, a computational package was developped using the software Matlab in order to make the graphical analyses of the results.*

**Keywords:** *elastomer, tube forming, friction, junction forming*