



## DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO PARA OPERAÇÕES DE ESTAMPAGEM PROFUNDA ATRAVÉS DE DISPOSITIVOS EXPERIMENTAIS

Roberto Bortolussi

Faculdade de Engenharia Industrial – Departamento de Mecânica

Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972

CEP 09850-901 – S. B. Campo – S. P. – Brasil

[roberto@cci.fei.br](mailto:roberto@cci.fei.br)

Sérgio Tonini Button

Universidade Estadual de Campinas – Departamento de Materiais

Cx. P. 6122 – 13083-970 – Campinas – S. P. – Brasil

[sergio1@fem.unicamp.br](mailto:sergio1@fem.unicamp.br)

**Resumo:** *Com o aumento da competição na indústria mundial, principalmente no setor automobilístico, tem-se procurado nos últimos anos métodos que reduzam o tempo e os custos necessários para o desenvolvimento dos projetos. A simulação computacional, especialmente utilizando o Método dos Elementos Finitos, está auxiliando o desenvolvimento de ferramentas de conformação, principalmente as de estampagem profunda. Para a simulação dos processos de estampagem profunda uma das variáveis necessárias é o coeficiente de atrito que ocorre nas regiões de contato da ferramenta com a peça que está sendo estampada. O coeficiente de atrito varia conforme as condições de lubrificação, a geometria da ferramenta e as pressões de contato. Levando-se em consideração os fatores de influência citados acima foram realizados ensaios que simulam as condições das operações de estampagem utilizando-se dois dispositivos, um para simular a condição de contato de superfícies planas da ferramenta, como ocorre no prensa-chapa, e um para a condição de contato dos raios do punção. Desta forma foi possível determinar o coeficiente de atrito para diversas pressões de contato e tipos de lubrificantes e também verificar a eficiência da lubrificação durante a operação.*

**Palavras-chave:** *Estampagem, Atrito, Elementos Finitos, Simulação*

### 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a utilização de métodos computacionais de simulação de processos de estampagem profunda, estão auxiliando o desenvolvimento de ferramentas para estas operações. Estas simulações reduzem o tempo necessário para o desenvolvimento dos ferramentais, o custo final do projeto, o tempo necessário para a confecção e os erros durante a sua fase de implantação.

A precisão dos resultados das simulações depende do conhecimento das propriedades mecânicas do material que será conformado, das condições de contorno e das condições de atrito que existem no contato entre a chapa e as ferramentas.

O atrito aumenta as deformações que ocorrem durante a conformação (Darendeliler e Altan, 1996) reduzindo os limites de conformação do material. Esta redução obriga, em muitos casos, a criação de novas ferramentas, aumentando-se o número de etapas de conformação.

A determinação do coeficiente de atrito envolve o conhecimento de variáveis que interagem e estão sempre alterando-se durante a conformação. Estas variáveis não são apenas variáveis de processo como velocidade do punção e pressão do prensa-chapa sobre a chapa, mas também a rugosidade superficial da chapa, a pressão máxima na qual o lubrificante ainda conseguirá exercer sua função e a geometria do ferramental ( raios de arredondamento e folgas entre punção e matriz ).

Nos últimos anos vários dispositivos de simulação dos processos de estampagem tem sido propostos (Schey, 1983), com o objetivo de determinar o coeficiente de atrito especialmente o que ocorre no contato entre o prensa-chapa e a chapa ( superfícies planas ) e entre o raio do punção e a chapa.

O objetivo deste trabalho é com a utilização de dois dispositivos de simulação, uma para simular a região de contato entre superfícies planas e outro para simular o contato entre o raio do punção e a chapa, determinar o coeficiente de atrito existente e as limitações dos ensaios. Na parte experimental utilizou-se aço de baixo carbono ABNT 1006 – EEP, sendo que no primeiro dispositivo foram realizados ensaios utilizando-se 3 tipos de lubrificação (seco, óleo para estampagem e pasta de bissulfeto de Molibdênio ) com três pressões diferentes e no segundo dispositivo utilizou-se duas condições de lubrificação para três forças diferentes.

## 2. DISPOSITIVO PARA SUPERFÍCIES PLANAS

Este dispositivo é baseado no contato que ocorre entre o prensa-chapa e a chapa. Seu princípio básico é fazer com que a chapa a ser estampada escorregue entre duas superfícies planas, que estão submetidas a uma força normal conhecida ( figura 1 ).

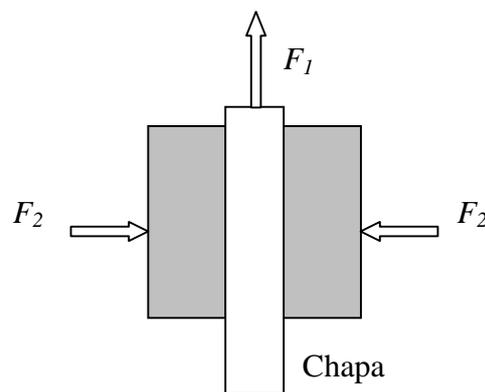


Figura 1. – Princípio do dispositivo para superfícies planas.

Tracionando-se a chapa e medindo-se a força  $F_1$  determina-se o coeficiente de atrito através da Eq. 1:

$$\mu = \frac{1}{2} \cdot \frac{F_1}{F_2} \quad (1)$$

Onde:

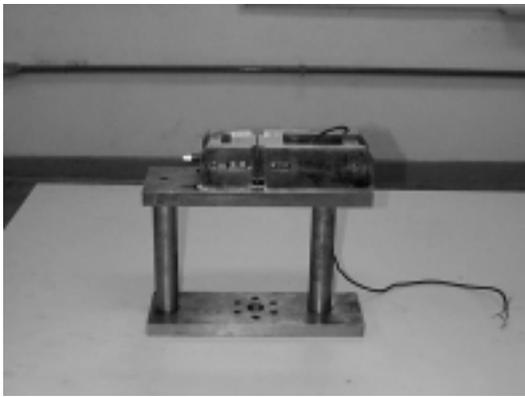
$\mu$  - Coeficiente de atrito

$F_1$  - Força tangencial

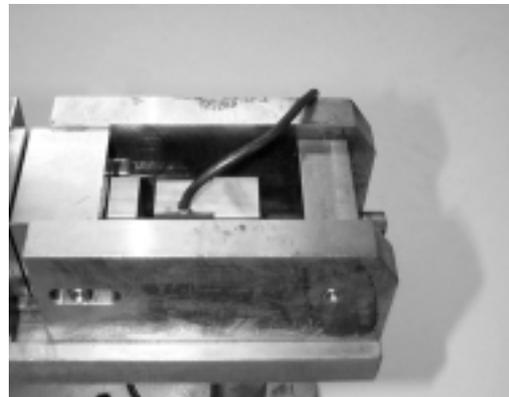
$F_2$  - Força normal

A divisão por dois surge do fato de existirem duas superfícies de contato.

O dispositivo foi construído para ser utilizado em máquinas convencionais de tração; dentro do dispositivo é colocada a célula de carga de onde controla-se o valor da força normal que está sendo aplicada sendo a força tangencial medida através da célula de carga da máquina, a força normal deve permanecer constante durante o ensaio. As superfícies que entrarão em contato com a chapa possuem 55 mm de altura e 25 mm de espessura e foram confeccionadas de aço D6 temperado e revenido à uma dureza de 54 HRC, evitando-se assim, que o valor da força a ser medida seja influenciada pela deformação destas peças. Na figura 2 está mostrado o dispositivo e o detalhe da célula de carga para controle de aplicação da força normal.



(a)



(b)

Figura 2 – (a) Dispositivo de atrito para superfícies planas

(b) Detalhe da célula de carga para controle de aplicação da força normal.

### 3. DISPOSITIVO PARA A REGIÃO ENTRE RAIOS DO PUNÇÃO E CHAPA

Este dispositivo também foi confeccionado para ser utilizado em máquinas de ensaio de tração e seu princípio é medir a força necessária para puxar a chapa sobre dois pinos que simulam o raio do punção enquanto as extremidades da chapa estão presas. Este carregamento irá submeter a chapa ao estiramento na região de contato.

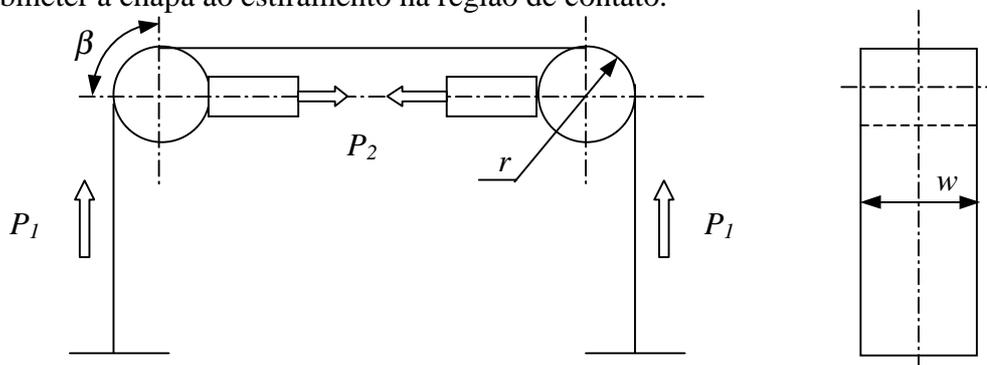


Figura 3 – Princípio do dispositivo para a região entre o raio do punção e a chapa.

Neste dispositivo utiliza-se a equação da corda (Eq. (2)) para determinação do coeficiente de atrito.

$$\mu = \frac{1}{\beta} \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (2)$$

A pressão média de contato pode ser calculada segundo a Eq. (3) (Han, 1997).

$$p = \frac{P_1 + P_2}{4 \cdot w \cdot r} \quad (3)$$

Onde:

$\beta$  – Ângulo formado no pino pela chapa

$P_1$  – Carga medida no sentido vertical

$P_2$  – Carga medida no sentido horizontal

$p$  - Pressão média de contato

$w$  – Largura da tira

$r$  – Raio do Pino

Inicialmente este dispositivo era utilizado a medindo-se as deformações nas duas arestas verticais e na aresta horizontal da chapa através de três extensômetros (Duncan et al, 1978). Conhecendo-se as deformações, através do diagrama de tensão por deformação era determinado o valor das forças atuantes e calculado o valor do coeficiente de atrito aplicando-se a Eq. 2. Uma simplificação deste dispositivo foi feita em (Wagoner e Chenot, 1997) com a colocação de uma célula de carga para a medição da carga no sentido horizontal.

A configuração do dispositivo utilizado nas experiências está mostrado na figura 4 e segue a simplificação citada acima.

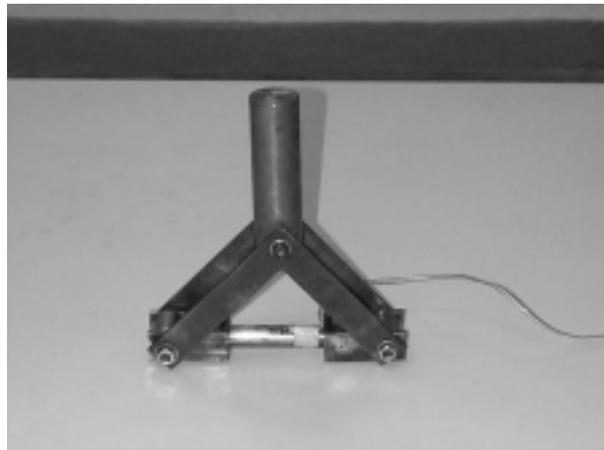


Figura 4 – Dispositivo utilizado para medida do atrito no contato do raio do punção com a chapa.

#### 4. EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para realização dos experimentos foi utilizada chapa de aço ABNT 1006 Classe EEP (Estampagem Extra-Profunda) com espessura de 0,9 mm e propriedades mecânicas conforme tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do aço utilizado nos experimentos

Material	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão Limite de Resistência (MPa)	Alongamento Total (%)
ABNT 1006 – EEP	233	322	32

Foram utilizados dois equipamentos de ensaio de tração na realização dos experimentos. Para o ensaio de atrito em regiões planas foi utilizada a máquina Kratos – K 2001, com capacidade de 20 kN e para os ensaios de atrito na região curva foi utilizada a máquina LOS – UHS – 40 com capacidade de 400 kN.

As tiras utilizadas nos ensaios tinham largura de  $13,5 \pm 0,2$  mm e foram limpas com éter de petróleo para eliminação de qualquer óleo que pudesse existir em suas superfícies. A força normal aplicada foi calculada multiplicando-se a largura da tira, a altura de superfície de contato e a pressão estabelecida. Dois tipos de lubrificantes foram ensaiados nos dois dispositivos, óleo de estampagem e pasta de bissulfeto de Molibdênio, que foram aplicados como em operações industriais. No dispositivo para superfícies planas também foi realizado o ensaio na condição sem lubrificação (seco).

As velocidades de ensaio foram 283,4 mm/min para o ensaio nas superfícies planas e 10 mm/min para a região entre o raio do punção e a chapa. Estas velocidades simulam as condições que existem na ferramenta. As células de carga utilizadas tinham capacidade de 2000 N para o ensaio da região plana e 44000 N para a região do raio do punção. Os pinos do dispositivo que simulam o punção tinham raio de 15 mm e dureza superficial de 48 HRc. O diâmetro destes pinos pode ser alterado para verificar a influência da geometria no coeficiente de atrito. Nos experimentos não foi ensaiada esta condição.

## 5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

*Coefficiente de atrito nas regiões planas.* Na figura 5 é mostrada a saída dos resultados em forma gráfica do coeficiente de atrito em regiões planas para o ensaio de atrito sem lubrificação com pressão de contato de 1,5 MPa. O valor de força zero no gráfico corresponde ao atraso entre a ligação do sistema de aquisição de dados e o movimento da máquina.

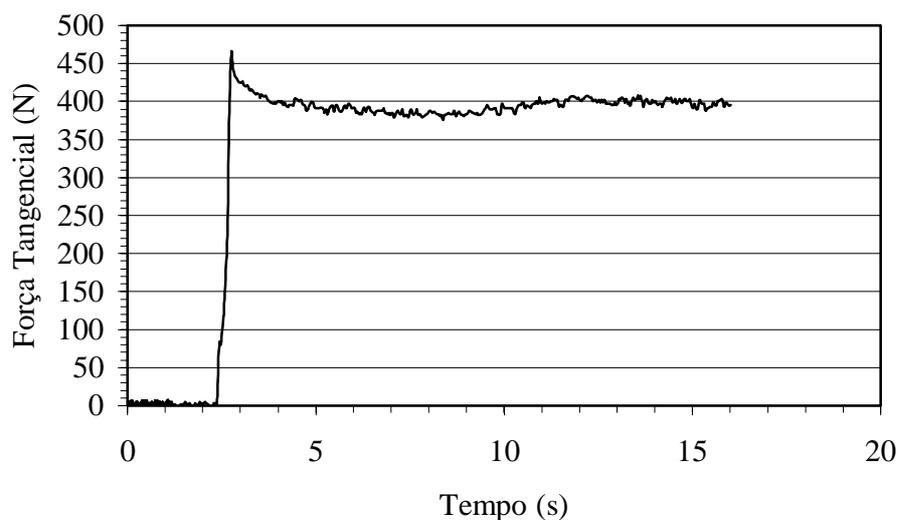


Figura 5 – Representação gráfica dos resultados da força tangencial em relação ao tempo de ensaio. (Caso – Sem lubrificação com pressão de 1,5 MPa)

Na tabela 2 são apresentados os valores dos coeficientes de atrito para as pressões e condições de lubrificação testadas.

Tabela 2 – Resultados experimentais dos coeficientes de atrito para as três condições de lubrificação

Pressão Aplicada (MPa)	Sem Lubrificação		Óleo para Estampagem		Pasta de Bissulfeto de Molibdênio	
	$F_1$ (N)	$\mu$	$F_1$ (N)	$\mu$	$F_1$ (N)	$\mu$
1,0	267,3 ± 3,8	0,18	252,4 ± 5,3	0,17	222,8 ± 1,1	0,15
1,5	401,0 ± 16,6	0,18	401,0 ± 2,6	0,18	356,4 ± 8,7	0,16
2,0	564,4 ± 4,4	0,19	534,6 ± 10,3	0,18	415,8 ± 4,4	0,14

O ponto mais elevado do gráfico corresponde à força necessária para vencer o atrito estático existente, após ultrapassado este ponto a força tangencial diminui estabelecendo-se o atrito dinâmico. O desvio padrão calculado corresponde a variação da medida da força tangencial no patamar para três réplicas.

A aplicação de lubrificantes mais eficientes reduz o valor do coeficiente de atrito para as superfícies planas, como é possível observar através dos resultados da tabela 2. A redução do atrito nesta região reduz as deformações que ocorrem durante o processo, aumentando o limite máximo de embutimento.

**Coefficiente de atrito para as regiões de contato entre o punção e a chapa.** Os resultados experimentais para as duas condições de lubrificação estão na tabela 3 e os valores das pressões atuantes para cada condição de lubrificação estão na tabela 4.

Tabela 3 – Coeficientes de atrito para as duas condições de lubrificação

$P_1$ (N)	Óleo para Estampagem		Pasta de Bissulfeto de Molibdênio	
	$P_2$ (N)	$\mu$	$P_2$ (N)	$\mu$
2000	1112	0,37	1000	0,44
4000	3070	0,17	2590	0,27
6000	5874	0,01	4908	0,12

Tabela 4 – Pressões para as duas condições de lubrificação

$P_1$ (N)	Óleo para Estampagem		Pasta de Bissulfeto de Molibdênio	
	$P_2$ (N)	$p$ (MPa)	$P_2$ (N)	$p$ (MPa)
2000	1112	3,8	1000	3,7
4000	3070	8,7	2590	8,1
6000	5874	14,6	4908	13,5

Os valores encontrados para o coeficiente de atrito estão com variação elevada e diminuindo conforme aumenta-se a aplicação da carga, o que demonstra que estes resultados não são confiáveis. Este ensaio passa a ter resultados confiáveis quando entra-se na região plástica da chapa. Para os valores de 2000 e 4000 N a tensão atuante estava abaixo do limite

de escoamento (a carga  $P_f$  deve ser dividida por 2 para o cálculo da tensão de escoamento, pois a força medida corresponde às duas laterais da chapa) explicando a razão dos valores do atrito não serem estáveis.

Aumentando-se até a carga de 6000 N, a variação dos resultados foi provocada pela falta de rigidez da célula de carga. Conforme aumentava-se a carga para a deformação da chapa, aumentava-se também os esforços de flexão e a célula de carga registrava dois sinais, um correspondente a compressão e um sinal correspondente a flexão, o que fez com que os resultados do coeficiente de atrito apresentassem esta variação,

Neste ensaio à rigidez a flexão do dispositivo e da célula de carga deve ser elevada, pois variações de 5% na leitura da carga horizontal implicam numa variação de 20 % no valor do coeficiente de atrito para coeficientes na faixa de 0,2.

## 6. CONCLUSÕES

Coefficientes de atrito foram determinados para as duas condições existentes na operação de estampagem profunda, deslizamento da chapa entre as ferramentas e estiramento na região do raio. Para a primeira condição, o coeficiente de atrito diminuiu com a utilização de lubrificantes que suportam maior pressão de contato.

Na segunda condição, a utilização de uma célula de carga com pouca rigidez a flexão prejudicou os resultados experimentais. O dispositivo foi construído com a modificação proposta em (Wagoner e Chenot, 1997) o que facilitou a coleta de dados.

Com os resultados obtidos torna-se possível simulações mais precisas utilizando-se o método dos elementos finitos, pois uma das variáveis necessárias para os elementos de contato que são utilizados é o coeficiente de atrito. Outra variável que estes elementos necessitam é a relação entre o coeficiente de atrito estático e o dinâmico.

### *Agradecimentos*

Agradeço aos funcionários da oficina, do laboratório de materiais e da secretária do Centro de Laboratórios Mecânicos da Faculdade de Engenharia Industrial sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Darendeliler, H., Altan, T., 1996, “**Analysis of Axisymmetric Cup Drawing in relation to Friction**”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 58, pp. 293-301.
- Duncan, J. L., Shabel, B. S., Filho, J. G., 1978, **SAE Paper No. 780391**, 1978, pag. 1.
- Han, S. S., 1997, “**The Influence of Tool Geometry on Friction Behavior in Sheet Metal Forming**”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 63, pp. 129 – 133.
- Lanzon, J. M., Cardew-Hall, M. J., Hodgson, P.D., 1998, “**Characterising Frictional Behavior in Sheet Metal Forming**”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 80-81, pp. 251 – 256.
- Schey, J. A., 1983, “**Tribology in Metalworking**”, ASM.
- Wagoner, R. H., Wang, W., Sriram, S., 1994, “**Development of OSU Formability Test and OSU Friction Test**”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 45, pp. 13 – 18.
- Wagoner, R. H., Chenot, J. L., 1997, “**Fundamentals of Metal Working**”, John Wiley and Sons, New York.

## **DETERMINATION OF FRICTION COEFFICIENTS IN DEEP DRAWING PROCESSES USING EXPERIMENTAL DEVICES**

***Abstract:** With the increase of competition between industries in the world, mainly in car industries, have been looking for in the last years new ways to reduce the time and the costs in the development of new products. The computational simulation, using Finite Element Method, that some years ago were used to development of new products, nowadays have helped the development of metal forming dies, specially of the deep drawing processes. To simulate the deep drawing processes, one of the variables necessary is the friction coefficient between the sheet and the die. The friction coefficient is affected by several factors like lubricant, geometry of the die and the contact pressure. Some tests were done with two experimental devices that can simulate the conditions of deep drawing processes, one can simulate de contact between sheet and the blankholder and other can simulate the punch radius. With these devices was possible to determine the friction coefficient for different contact pressures and kinds of lubricants and verify the lubricant performance.*

*Keywords: Deep Drawing, Friction, Finite Element, Simulation*