

## Análise

# O uso de *software* na medição do coeficiente de atrito em estampagem

Na fabricação por estampagem, o projeto das ferramentas leva ao sucesso ou fracasso do produto frente ao mercado consumidor. Por esse motivo, é necessário dispor de um profundo conhecimento acerca da influência das variáveis sobre o resultado do processo de estampagem. O atrito na interface entre a peça e a ferramenta é uma variável importante nesse tipo de operação, de forma que são necessários conhecimentos precisos para a análise e o projeto de novas peças e ferramentas, assim como para validação de uma simulação numérica. Este estudo sugere uma metodologia para determinar o coeficiente médio de atrito e avalia sua resposta por meio do *software* de elementos finitos LS-Dynaform, específico para esse processo de fabricação. O material utilizado foi o alumínio comercialmente puro AA1100. As conclusões indicam que a metodologia aplicada resulta em uma boa aproximação com o valor do coeficiente de atrito, estando de acordo com estudos já realizados na área. É observada também uma tendência do *software* de se distanciar dos resultados práticos por considerar o atrito como uma constante ao longo do processo.

L. F. Folle e L. Schaeffer

**O**tualmente, devido à grande competição e à constante demanda por produtos novos e de baixo custo, é comum nas indústrias de transformação mecânica – principalmente no caso da indústria brasileira – encontrar metodologias de desenvolvimento baseadas na adaptação de linhas de

produtos já fabricados, com modificações inspiradas muitas vezes no método da tentativa e erro.

Esta postura, principalmente quando não se tem muita experiência no processo, gera considerável desperdício de material, seja nas peças que apresentaram falha, seja no ferramental que não

se adequou ao projeto. Além de gerar desperdícios e elevar os custos, estes processos são demorados e não trazem resultados satisfatórios, uma vez que não há um domínio sobre as reais causas da falha.

Nos processos de estampagem, sabe-se que o sucesso para a obtenção de uma peça depende de três fatores principais: a geometria das ferramentas, as

## Análise

propriedades do material da peça e a interação entre a superfície de contato desses dois materiais. Os custos associados ao terceiro fator representam em torno de 5% do valor final de produção da peça, de modo que qualquer melhora relacionada à área de atrito em estampagem pode gerar retorno imediato para os fabricantes.

Com o surgimento de leis ambientais mais rigorosas e com a tendência de se fabricarem peças com índice de refugo zero, será necessário criar métodos mais eficazes de fabricação, que operem sem desperdícios. Os *softwares* de simulação podem contribuir consideravelmente com este aspecto, oferecendo resultados rápidos e muito próximos da realidade, ou seja, que possam prever falhas na fabricação de peças antes que elas sejam criadas fisicamente. Dentro desse contexto, uma área crítica é a medição do atrito em estampagem, na qual os métodos criados até

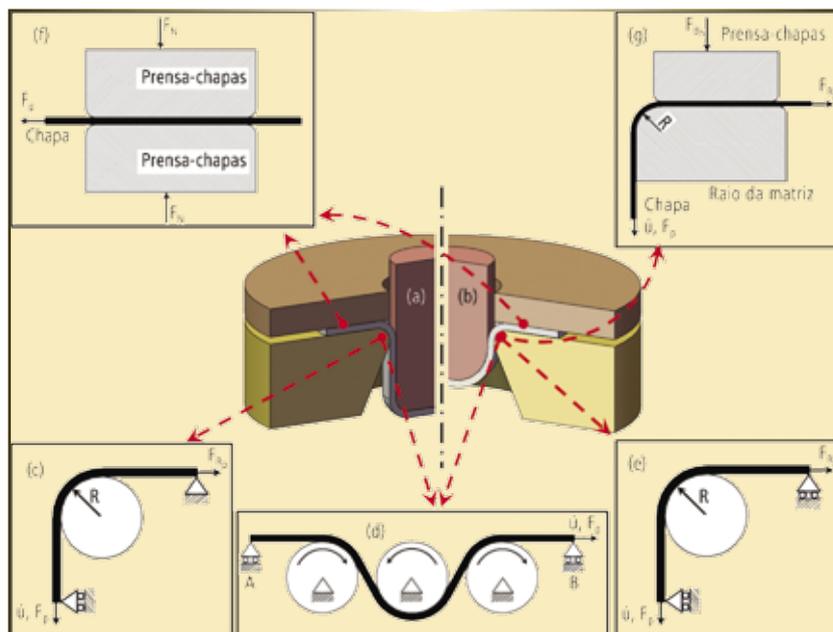


Fig. 1 – Ensaios para simulação de atrito (adaptado de: Paunoiu<sup>(1)</sup> e Kim<sup>(2)</sup>)

então não conseguem se adequar ao que acontece na prática.

### Ensaios para determinação do atrito em chapas

Existem vários ensaios tecnológicos para determinar parâmetros de

estampagem, dependendo do tipo de condição de deformação. Os principais tipos de deformação em estampagem são o estiramento puro e o embutimento profundo, e para cada um existe um ensaio correspondente para avaliação do atrito.

Em um ensaio de estiramento puro, a chapa é totalmente presa

## SOLUÇÕES COMPLETAS PARA PROJETOS E SERVIÇOS

- ▶ Corte Plasma CNC
- ▶ Solda CNC
- ▶ Dobra CNC
- ▶ Tornearia
- ▶ Estamparia
- ▶ Usinagem CNC



**FT FERTEC**

[www.fertectecnologia.com.br](http://www.fertectecnologia.com.br)

Fone: 14 3815-8999

no prensa-chapas e deformada por um punção, como mostra a figura 1b (pág. 132). O mais comum é o ensaio Erichsen, no qual um punção esférico deforma a chapa até a sua ruptura e, em seguida, a altura da chapa deformada é medida.

Para a condição de estiramento, o coeficiente de atrito é obtido por meio de um ensaio em que uma tira de chapa passa por um cilindro de raio  $R$  a  $90^\circ$ , sendo que uma das pontas da tira está presa e a outra se movimenta com uma velocidade  $u$  (figura 1c). O coeficiente de atrito é obtido por meio da medição da força que a chapa oferece para se deslocar. A vantagem desse ensaio é que ocorrem grandes deformações na zona de contato. Porém, também há desvantagens, tais como: a pressão normal não pode ser ajustada para os níveis desejados, a velocidade de deslizamento na área de contato varia bastante, de modo que sua medição é difícil e o ensaio

gera uma deformação localizada muito grande, que geralmente é ausente nos processos de fabricação. Isso acaba por mudar a condição de lubrificação na área de contato, ocasionando consequências desconhecidas.

Em um ensaio de embutimento profundo, a chapa é conformada por um punção com o uso de uma matriz, e a lubrificação empregada facilita o processo (figura 1a). No início da estampagem, as zonas de contato com a matriz e o punção formam um filme fino de lubrificante. A condição de contato vai mudando gradualmente e a condição de lubrificação torna-se diferente em vários pontos da chapa.

O método mais comumente usado para simular a estampabilidade é o ensaio Swift. Nele, a geratriz é estampada com diferentes diâmetros até que se atinja a máxima força do punção antes que o copo seja todo estampado. Esse ensaio mede o maior tamanho da geratriz que o material

é capaz de agüentar antes de haver o rompimento do copo. O diâmetro do punção é de 50 mm e a matriz tem 52,5 mm.

Já o ensaio de dobramento sob tensão é usado para simular a deformação do material no raio da matriz. Uma tira de chapa é submetida a um deslizamento sobre um cilindro de raio  $R$  enquanto uma tensão é aplicada nas duas pontas da tira (figura 1e). Por meio desse ensaio, com o uso de um cilindro fixo e um girante, é possível obter a força de atrito, o efeito da lubrificação e do acabamento das matrizes e a avaliação do material da chapa com relação às matrizes. O coeficiente de atrito pode ser obtido por meio da equação 1:

$$\mu = \frac{1}{\theta} \ln \frac{F_p}{F_{Bp}} \quad (1)$$

onde  $F_p$  é a força de dobra,  $F_{Bp}$  é a força de restrição contrária no sentido oposto e  $\theta$  é o ângulo de contato entre a tira e o cilindro.

A simulação da zona do prensa-chapas é simples. Com o



**SANTA RITA**  
EQUIPAMENTOS

Tecnologia em corte, dobra e máquinas especiais.

SRW 100 PH



SRW 15 PH



SRCIPH 3025



- Calandras para chapas
- Calandras para perfis
- Máquinas especiais

Rod. Anhanguera, km 147 | Limeira - SP | Tel. (19) 3451.6621 | contato@santaritaequipamentos.com.br | www.santaritaequipamentos.com.br

## Análise

emprego de um ensaio em que uma chapa é deslizada entre duas matrizes paralelas, é possível averiguar a força de atrito nessa região (figura 1f). O coeficiente de atrito pode ser obtido por meio da equação 2:

$$\mu = \frac{F_p}{2 \cdot F_N} \quad (2)$$

Entretanto, a correlação desse processo com o embutimento profundo é relativamente pobre. Algumas razões podem ser citadas: a compressão axial não é modelada e o efeito do raio não é levado em conta. Esses inconvenientes podem ser reduzidos com o uso de ferramentas mais sofisticadas (figura 1g) e isso, obviamente, pode levar a uma simulação mais

complexa. Uma vantagem adicional desse ensaio é que os efeitos do dobramento ao redor do raio da matriz são os mesmos dos casos reais de deformação. Porém, os efeitos de retorno elástico são negligenciados, modificando um pouco as condições de lubrificação nesse ensaio, em comparação com o processo real.

Existe, ainda, uma condição em que se tem ao mesmo tempo embutimento profundo e estiramento. Esse tipo de condição está presente na região do quebra-rugas e o ensaio geralmente é aplicado para simular essa região. O sucesso na combinação entre estiramento e embutimento profundo depende do controle do escoamento da chapa dentro da matriz: restrições excessivas levam a fratura,

insuficientes restrições levam a enrugamentos. Para que se tenha um controle adequado, a força requerida para o dobramento e o desdobramento da chapa sobre um ou mais quebra-rugas deve ser determinada.

A geometria do ensaio de quebra-ruga pode ser bastante próxima da geometria real das matrizes, de forma que o resultado tem uma boa relação com o usado nas indústrias. Nesse ensaio, uma tira de chapa é conformada por meio de três cilindros que se assemelham ao quebra-rugas comumente usado em matrizes (figura 1d). Esse ensaio é usado também como uma boa aproximação para a região do raio da matriz, tanto para o embutimento profundo como para o estiramento<sup>(1)</sup>.

### QUALIDADE GARANTIDA PELOS NOSSOS SERVIÇOS E PARCEIROS

CHAPAS E PLACAS DE 1/4" A 18" DE ESPESSURA  
Distribuidor das Maiores Usinas Siderúrgicas do País



- Oxicorte CNC
- Plasma de Alta Definição CNC
- Prensa Hidráulica para Conformação

Produtos 100% Rastreáveis  
Garantia de Procedência  
Empresa Certificada ISO 9001:2000



CONSULTE NOSSA LINHA DE PRODUTOS  
tel 11 2641.5211  
fax 11 2641.3191  
vendas@acosradial.com.br  
www.acosradial.com.br



**ACOS RADIAL**

**Qualinox**

2009 COM O QUE HÁ DE MAIS MODERNO NO MUNDO DA TECNOLOGIA



Corte laser (CNC)  
Guilhotina (CNC)  
Dobradeira (CNC)  
Estamparia  
Prensas de 4 a 130 ton



**DAVINOX  
INDÚSTRIA  
METALÚRGICA LTDA**

R. Dom Pedro Henrique de Orleans e Bragança, 702 / Vl. Jaguará - São Paulo - SP  
3621 - 3396 / 3625 - 0281  
vendas@qualinox.com.br laser@qualinox.com.br  
www.qualinox.com.br www.afabricadofuturo.com.br

## Análise por elementos finitos

O método dos elementos finitos (MEF) considera a região a ser analisada como formada por pequenos elementos interconectados entre si. Essa região em estudo é analiticamente modelada ou aproximada por um conjunto de discretos elementos pré-definidos. Estes elementos podem ser colocados juntos em um grande número de configurações diferentes, modelando formas geométricas bastantes complexas. Além disso, possibilita que o projetista tenha boas possibilidades de cálculo da aplicação de cargas e condições de contorno, o que torna este método o mais amplamente utilizado em análises estruturais atualmente.

De acordo com Huebner<sup>(3)</sup>, o método pode ser resumido basicamente em três etapas: pré-processamento, solução e pós-processamento:

**Pré-Processamento (preprocessing):** É a etapa de preparação do problema que posteriormente deverá ser solucionado. É nesta fase que se faz a modelagem do fenômeno, assumindo hipóteses, condições iniciais, condições de contorno e carregamentos, assim como a escolha do elemento, das propriedades dos materiais e da geometria que representará a forma do componente a ser analisado.

**Solução (solver):** A solução do problema tem como ponto de partida o modelo configurado na etapa anterior. Portanto, a exatidão das respostas depende basicamente da capacidade do engenheiro em abstrair o fenômeno. A solução é baseada em

um algoritmo numérico que visa resolver da maneira mais rápida e exata possível uma equação diferencial, com condições de contorno e/ou condições iniciais impostas pelo modelo.

**Pós-Processamento (post-processing):** Esta é a última etapa. Nela, analisam-se os casos vindos das necessidades do engenheiro que modela o problema. Ou seja, ela é formada pelo conjunto de soluções da equação diferencial que descreve o fenômeno em estudo, o que, em problemas mecânicos, pode ser composto por:

- Deslocamentos nodais;
- Deformações da geometria;
- Gradientes de tensão;
- Gradientes de temperatura;
- Deslocamentos nodais ao longo do tempo;
- Frequências naturais e modos de vibração da estrutura.

Esses recursos implementados no computador permitem estimar a solução de um problema complexo em um tempo relativamente pequeno, fazendo com que se reduza o tempo de desenvolvimento de projetos de materiais isotrópicos ou anisotrópicos sujeitos a carregamentos estáticos, térmicos, dinâmicos e outros.

## Método de simulação empregado

O objetivo específico da simulação numérica é reproduzir o estudo experimental, permitindo quantificar o coeficiente de atrito e mensurar os valores de força versus deslocamento ao longo da peça de trabalho.

Para as análises da geometria desejada foi empregado o *software* de simulação em estampagem



Máquinas curvadoras  
Conformadoras de tubos  
Linhas de corte  
Centros de medição  
Carregadores automáticos  
Linhas automáticas



www.bemabrasil.com.br

Rua Cel Anibal dos Santos, 315  
Curitiba-PR | Fone/fax: (41)3569-3100

## Análise

eta/Dynaform, versão 5.6, e o LS-Dyna versão 971 como *solver*. O eta/Dynaform combina as análises do LS-Dyna versão 971 com as funções de pré e pós-processamento do próprio Dynaform. As funções iterativas e as análises dos elementos são integradas unicamente para servir à indústria de estampagem no dimensionamento de matrizes e no desenvolvimento de peças finais.

Esse *solver*, de uso geral, incorpora as análises não-lineares, dinâmicas e de elementos finitos utilizando capacidades implícitas e explícitas para resolver tanto problemas de fluidos como problemas estruturais. No caso de uma estampagem, o eta/Dynaform tem a capacidade de dar informações acerca da estampabilidade das chapas, atuação do prensa-chapas e do punção, retorno elástico, orelhamento, espessura da chapa durante o processo, tendência a

rupturas prematuras, tendência a enrugamento e estampagem em múltiplos estágios.

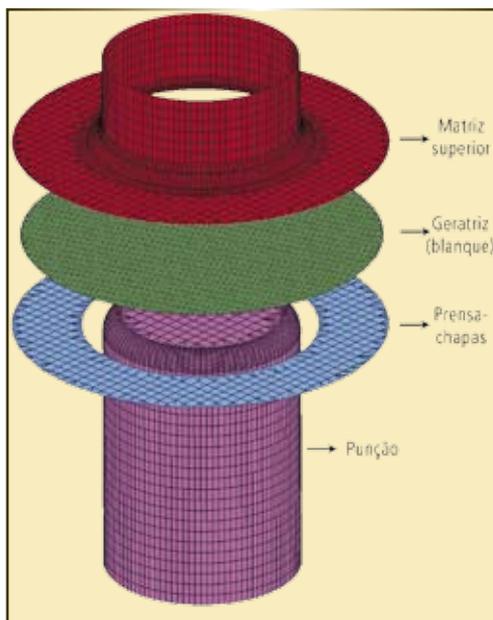


Fig. 2 – Conjunto montado no Dynaform para a simulação do processo de estampagem empregado no estudo

O elemento usado para definir as ferramentas (punção, matriz e prensa-chapas) é do tipo casca,

porém, esse elemento é indeformável. A figura 2 mostra a construção de todo o conjunto montado no simulador para execução da estampagem, inclusive as malhas geradas e os detalhes de refinamento da malha nas regiões críticas.

A simulação foi dividida em três passos: no primeiro, o prensa-chapas se desloca até atingir a chapa; no segundo, o prensa-chapas aplica sobre ela uma força de 10 kN e, no terceiro, o punção é deslocado 40 mm, provocando o embutimento de toda a geratriz. Esse valor foi especificado por ser o deslocamento obtido nos ensaios experimentais.

### Propriedades mecânicas do material da geratriz

As propriedades aplicadas ao material usado – AA1100, ou seja, alumínio comercialmente puro –, usadas como dados de entrada

MATERIAIS: \* AÇO INOX 5/8 \* AÇO CARBONO 3/4 \* ALUMÍNIO 8mm \* OUTROS



TECNOLOGIA EM CORTE A LASER

(11) 4543-6132

(11) 4543-6188

www.lasertech.ind.br

lasertech@lasertech.ind.br

• CORTE LASER

• DOBRA

• SOLDA

• MONTAGEM DE PEÇAS E EQUIPAMENTOS



CAPACIDADE DE CORTE: CHAPAS DE 2.000 X 4.000 - CAPACIDADE DE DOBRA: 3/8 X 200T

no Dynaform são descritas na tabela 1. A curva tensão *versus* deformação verdadeira é desenvolvida pelo Dynaform como  $C$  e  $n$ , dada pela equação 3. Esta equação, criada por Hollomon para descrevê-la, corresponde a uma boa aproximação, desde que sejam obedecidas algumas condições, como, por exemplo, que o ensaio seja realizado à temperatura ambiente. A parte inicial da curva tensão *versus* deformação (parte elástica) é desenvolvida pelo Dynaform a partir de informações da deformação e tensão de escoamento, enquanto a parte final da curva (ruptura) é criada a partir de informações da deformação final. A curva-limite de conformação (CLC) também é representada pelo Dynaform a partir de  $n$ , dada pela equação 3, e pela espessura inicial da geratriz. Essa forma de criação da CLC foi concebida por Keeler<sup>(5)</sup>, por meio de uma relação empírica. A CLC desenvolvida com esse método é bastante próxima da maioria

das CLC's medidas por meio de ensaios; a principal diferença pode estar no ponto em que a CLC intercepta o eixo das ordenadas, que pode ser mais alto ou mais baixo que o real. Entretanto, esse ponto pode ser facilmente mudado já no

que os coeficientes  $n$  (grau de encruamento) e  $C$  (coeficiente de resistência) são obtidos para cada direção de laminação. Os símbolos  $k_f$  e  $\phi$  representam a tensão e a deformação na curva de escoamento, respectivamente.

**Tab. 1 – Propriedades usadas para definir o material da geratriz no Dynaform**

Densidade	2,7	g/cm <sup>3</sup>
Módulo de Young	69.000	N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0,33	
Índice de encruamento ( $n$ )	0,09	
Coefficiente de resistência ( $C$ )	196	
Índice de anisotropia	0,79	
Tensão de escoamento	124	N/mm <sup>2</sup>
Deformação de escoamento	0,2	%

momento de entrada dos dados no Dynaform, o que deixa a curva bem próxima do caso real.

$$k_f = C \cdot \phi^n \quad (3)$$

A curva de escoamento pode ser representada por uma equação exponencial (equação 3), em

### Curva-limite de conformação

Para o ensaio Nakajima foi empregado um punção do tipo hemisférico, com raio de 50 mm. Com o objetivo de reduzir o atrito, utilizou-se uma almofada de poliuretano com 6 mm de espessura. Os ensaios para a determinação da curva-limite de conformação do alumínio (AA1100) foram baseados no trabalho desenvolvido por Silveira em 2004<sup>(4)</sup>. Na figura 3 (pág. 138) é mostrada a curva-limite de conformação (CLC) resultante do ensaio Nakajima.

### Descrição do ensaio prático

Como o objetivo desse estudo é determinar o coeficiente de atrito

## Serviços na precisão que sua empresa necessita.



Prensas  
Corte laser  
Puncionadeiras  
Dobradeiras  
Solda MIG  
Solda TIG

## Análise

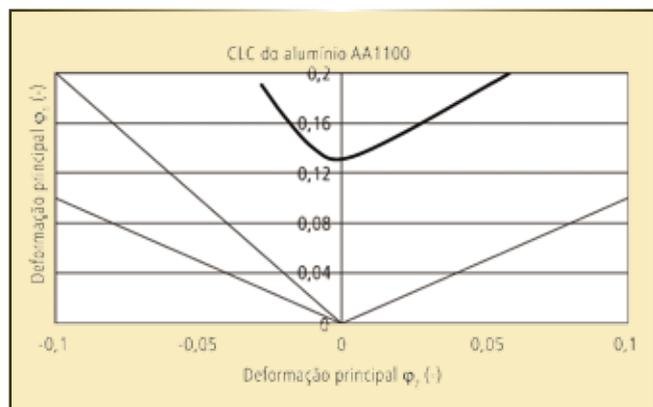


Fig. 3 – Curva-limite de conformação do alumínio AA 1100

para ser usado como parâmetro de entrada do Dynaform – e assim ter uma simulação mais realista – foi estampada uma geometria simples e foram medidos a força e o deslocamento do punção como forma de comparação com os resultados da simulação.

Para tanto, foram usadas as ferramentas do ensaio mecânico Swift, que simula o embutimento profundo em estampagem, pois há tensões trativas no sentido radial e tensões compressivas no sentido circunferencial do corpo-de-prova, ambas iguais em módulo. Basicamente, o conjunto

de ferramentas utilizado para o ensaio Swift é composto por um punção cilíndrico, prendedor de chapas e matriz<sup>(4)</sup>. As suas dimensões são mostradas na figura 4. É possível utilizar corpos-de-prova cilíndricos de vários diâmetros, que são restringidos em uma prensa de duplo efeito pelo prensa-chapas em forma de anel. O punção é então forçado

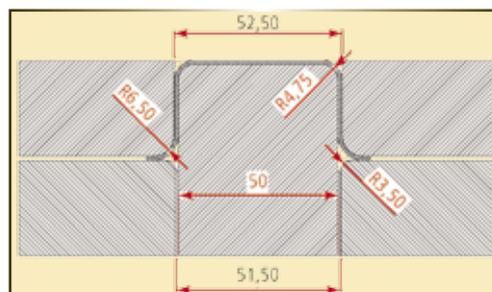


Fig. 4 – Vista em corte do ferramental empregado no ensaio prático

# TEKNO

REFERENCIA EM PRE-PINTADO

O aço pré-pintado oferece uma série de vantagens sobre o sistema convencional de pintura, entre elas resistência a corrosão, durabilidade, retenção de cor, versatilidade e um padrão de qualidade superior, sempre de acordo com a necessidade do cliente.

A Tekno atende ainda uma enorme demanda em diversos tipos de metais base, cores e dimensões.

**Processos usuais de industrialização**

- corte
- dobramento
- puncionamento
- perfilação
- estampagem
- solda a frio





**Bobina de aço pré-pintada**



**Tel: (11) 2903-6000**  
[www.tekno.com.br](http://www.tekno.com.br)

# SOS LASER

Peças e acessórios para

## MÁQUINAS DE CORTE A LASER

- Filtros
- Cerâmicas
- Fluidos para bomba a vácuo
- Bicos para corte
- Lenço original Kodak para CO<sub>2</sub> (Bystronic, Amada, Mazak)
- Exclusiva lente negra para inox e alumínio

Distribuidor:



**São Paulo e Grande São Paulo**  
(11) 4229-3957 / 4229-4029

**Interior**  
(19) 3444-2510 / 9179-2466

**PRECITEC**



**Paraná e Santa Catarina**  
(41) 3332-4373 / 9969-2750

**Rio Grande do Sul**  
(51) 3451-4954 / 9807-8520

**CENTRICUT**



**www.soslaser.com.br**

Tab. 2 – Força máxima medida em kN no ensaio prático

Lixas	Lubrificantes						
	F	L	O	S	Teflon	Graxa	A seco
220	25,7	24,3	23,3	21,4	-	-	-
400	23,4	22,4	22,9	20,4	-	-	-
1.200	19,8	19,2	18,2	17,3	16,9	16,9	22,9

contra os corpos-de-prova, provocando o embutimento, isto é, a chapa é forçada para dentro da matriz até que o material seja todo embutido. A principal função do prensa-chapas, nesse caso, é impedir o enrugamento, mas não o movimento da chapa. Esse ferramental foi usado no presente trabalho porque a folga entre o punção e a matriz superior é a ideal para a estampagem de uma chapa de alumínio de 1 mm de espessura. O diâmetro da geratriz adotado para todos os ensaios foi de 90 mm.

### Condições superficiais aplicadas

Para que fosse possível variar o coeficiente de atrito entre a peça e as ferramentas de estampagem, foi usada uma metodologia que consiste na aplicação de lixas específicas nas matrizes superior e inferior (prensa-chapas), juntamente com a aplicação de lubrificantes de uso comercial para embutimento profundo e estiramento. Os acabamentos superficiais e os lubrificantes foram os únicos parâmetros variados nas medições; os demais permaneceram constantes.

As lixas empregadas nesse estudo tinham granulometrias de 220, 400 e 1.200. A metodologia de aplicação consistiu em passar as lixas em seqüência, da maior para a menor, até chegar à lixa desejada para eliminar os acabamentos anteriores, ou seja,

caso fosse necessária a aplicação da lixa 1.200, antes eram aplicadas as lixas 220 e 400, em seqüência.

Os lubrificantes utilizados para os ensaios práticos são de uso comercial e de base mineral, mas seus nomes não puderam ser divulgados, pois os fabricantes não autorizaram sua publicação. Sendo assim, para diferenciá-los adotou-se seguinte nomenclatura: lubrificantes F, L, O e S. Cada um deles foi aplicado em todas as condições superficiais (todas as lixas). Além desses lubrificantes comerciais, foram testados ainda dois outros lubrificantes: graxa de máquinas de uso comercial e uma folha de TEFLON de 0,09 mm de espessura. Outra condição avaliada foi a seco, ou seja, sem lubrificação e com a aplicação da lixa 1.200.

A metodologia de aplicação dos lubrificantes consistiu em passá-los em abundância nos dois lados da geratriz, ou seja, na chapa a ser estampada, sem aplicá-los nas matrizes ou no punção. Assim, o excesso de lubrificante da chapa se espalha para o punção e as ferramentas, eliminando a necessidade de lubrificá-los. Para a remoção do lubrificante e posterior aplicação de outro, foi usada acetona, aplicada em excesso também nas matrizes e no punção para assegurar a limpeza e remoção completas do lubrificante, evitando que ocorresse uma mistura entre eles.

*Corte e dobra de tubos e perfis ?*

**CTPN**  
curvador pneumático

**ZB 80/3H**  
calandra para tubos e perfis

**SC-2P 315**  
serra circular

**A 38/50 TNCB**  
curvadoras CNC

máquinas serras circulares •  
lâminas de serras circulares •  
calandras para tubos e perfis •  
curvadoras de tubos •

*Temos oportunidades para representantes em diversas regiões do Brasil*

(41) 3667-2525  
(11) 2919-9596  
cortesa@cortesa.com.br  
www.cortesa.com.br

## Análise

### Resultados e discussões

#### Curvas de força versus deslocamento

Como foi mencionado anteriormente, em cada caso foram aplicadas três lixas nas matrizes e quatro tipos de lubrificantes. Para cada condição de atrito foram feitos três ensaios válidos, e a curva média entre os três foi tomada como a curva representativa para cada lixa e lubrificante. Os ensaios foram realizados com uma velocidade constante de 7,5 mm/s. Os gráficos resultantes das medições da força no punção pelo seu deslocamento são mostrados na figura 5, onde eles foram agrupados segundo a lixa aplicada e variando o lubrificante. O gráfico inferior à direita na figura 5 mostra os resultados obtidos para outros lubrificantes, com os

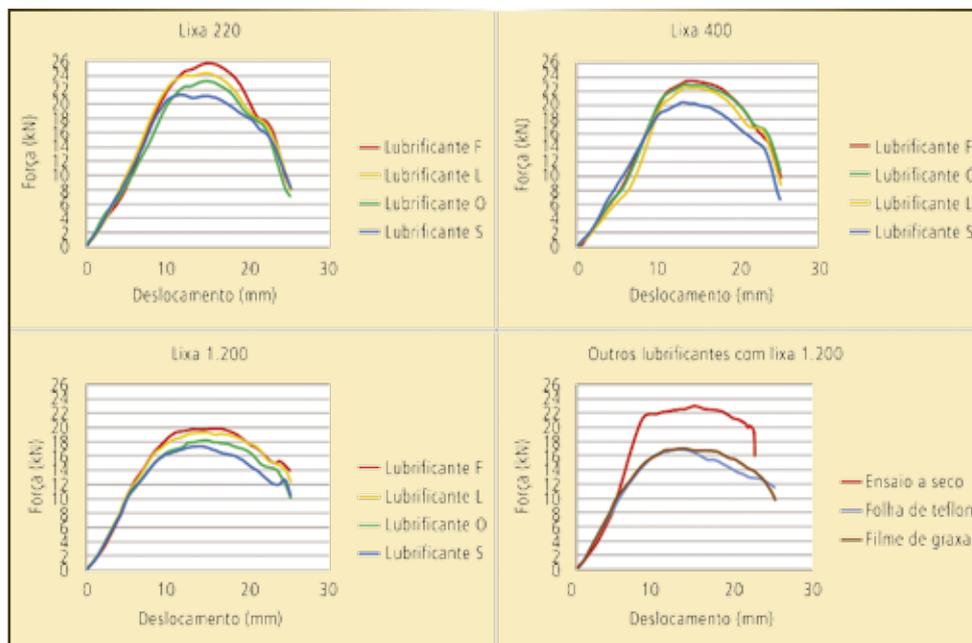


Fig. 5 – Gráficos de força versus deslocamento medidos para cada lubrificante e cada lixa utilizada, juntamente com as condições a seco, com folha de TEFLON e com filme de graxa

quais a lixa usada nas matrizes foi a 1.200.

Para cada gráfico da figura 5 é obtida uma força que corresponde ao valor máximo que cada curva atinge, e que ocorre com aproximadamente 15 mm de deslocamento. Após esse

máximo, a força medida no punção decresce até chegar a zero, o que corresponde ao final da estampagem, quando é obtida a forma final da peça. Um pequeno aumento da força durante esse decréscimo pode ocorrer devido à uniformização da espessura,

## PUNÇONADEIRA AUTOINDEX MTX FLEX 1250/30-2250

- Área de trabalho: 1.250 x 4.500 mm com 1 reposição
- Nibbling: 1.000 golpes por minuto
- Máxima potência de punçonado: 30 toneladas
- Marcação: 2.000 golpes por minuto
- Velocidade dos eixos: 70 m/min
- Quantidade máxima de ferramentas: 60, 30 autoindexadas
- Pronta para opcional carga e descarga

#### REPRESENTANTES:

Cesmi Ltda: • 11 2221-3610 • [www.cesmi.com.br](http://www.cesmi.com.br)  
Empremaq: • 41 3362-2662 • [www.empremaq.com.br](http://www.empremaq.com.br)  
J.C. Representações: • 51 3222-7534 • [www.jorgecarvalho.net](http://www.jorgecarvalho.net)

LANÇAMENTO  
**FEIMAFE**  
18 a 23 de Maio



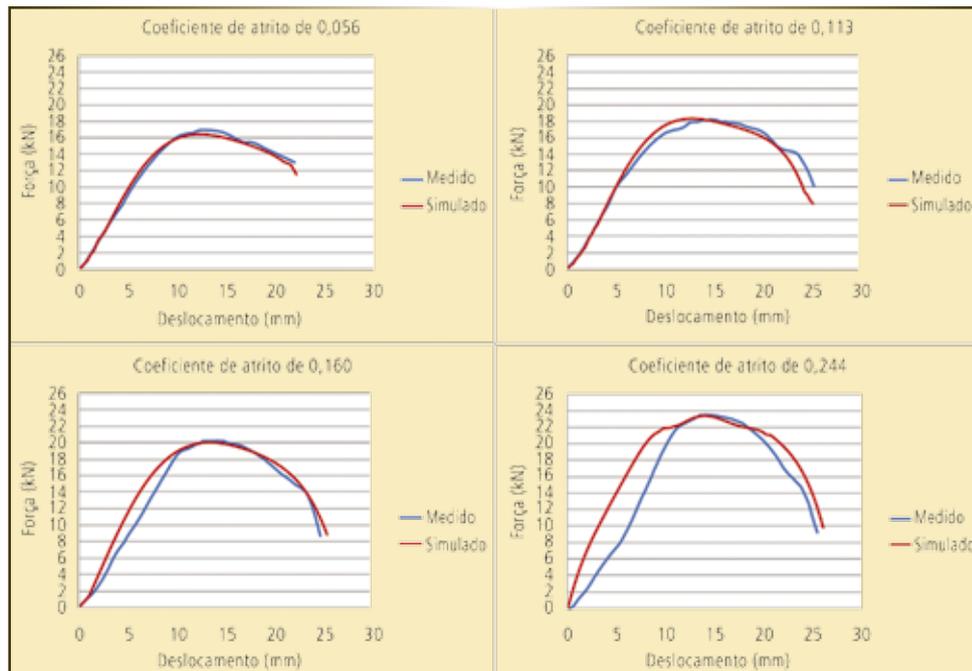


Fig. 6 – Comparação entre os gráficos gerados pela simulação e pelas medições com coeficientes de atrito 0,056; 0,113; 0,160 e 0,244

mas esse aumento nunca atinge valores tão altos quanto o da força máxima. A tabela 2 (pág. 139) mostra os valores, medidos em kN, das forças máximas obtidas pelos dados que geram as curvas para cada condição superficial aplicada.

### Resultados da análise numérica (simulação) com uso do Dynaform

A metodologia para encontrar o coeficiente de atrito consistiu em estampar uma geometria simples, medir a força e o deslocamento do punção, simular

essa mesma geometria no Dynaform usando um coeficiente de atrito arbitrário, obter um gráfico de força por deslocamento gerado pelo simulador e fazer com que as curvas simuladas e medidas coincidisse no ponto máximo da força durante a estampagem.

A figura 6 mostra a comparação entre as curvas que foram geradas pelo simulador para quatro coeficientes de atrito e as curvas medidas. Por meio da análise dos gráficos da figura 6 foi possível observar que, à medida que o coeficiente de atrito aumenta, as curvas simuladas se diferenciam das medidas, ou seja, elas se encontram apenas no ponto de máxima força, o que não acontece para um atrito muito baixo, situação em que as curvas medidas e simuladas praticamente se encaixam. Uma possível causa disso se deve ao

**CALDLASER**  
CALDEIRARIA  
E CORTE À LASER



**Dobra CNC**

**Caldeiraria**

**Corte a Laser**



**Armários  
Elétricos  
Especiais**

## Acabamento em tubos, hastes e barras.



• Solução definitiva em acabamentos como desbaste, lixamento, polimento, microacabamento, em tubos, barras, hastes, cilindros entre outras aplicações, nos mais diversos tipos de materiais.

• Desenvolvimento de sistemas para acabamento e automatização de processos.

• Para mais informações, acesse nosso site ou consulte nossos técnicos.

**NESSIN**

Fone: (19) 3834-3790 Fax (19) 3885-5450  
Indaiatuba - SP  
www.nessin.com.br  
comercial@nessin.com.br

## Levantamento de Chapas



Desde 1957 Tecnologia Metalmag Hi-Flux!®

2 a 3 ANOS de GARANTIA\*

- Modelos Permanentes e Eletropermanentes, que não dependem de energia elétrica para sustentar a carga.
- Alto coeficiente de segurança.
- Ideais no levantamento e movimentação de chapas, barras, tubos etc.
- Circuito magnético construído segundo a exclusiva Tecnologia Metalmag Hi-Flux!®, que utiliza ímãs permanentes de altíssima energia.



Metalmag Produtos Magnéticos Ltda.  
Rua Lauzane, 244 - CEP 04782-010  
São Paulo - SP - FAX (11) 5686-4996  
**(11) 5523-8400/5681-5181**  
www.metalmag.com.br  
e-mail: vendas@metalmag.com.br

\*Dependendo do modelo e versão.

## Análise

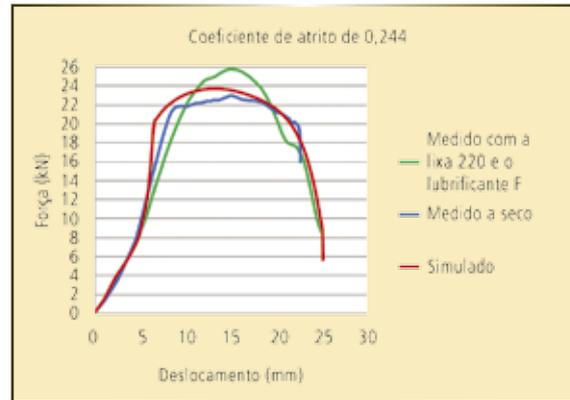


Fig. 7 – Comparação entre os gráficos gerados pela simulação e pelas medições com coeficiente de atrito 0,270, além da condição a seco

fato de o coeficiente de atrito não ser um parâmetro constante durante o processo; ele depende de outros fatores, como as deformações geradas na peça, as pressões superficiais que estão atuando ao longo da estampagem, a velocidade de deslocamento entre ferramentas e a temperatura do processo. O fato de o atrito ser tomado como uma constante na simulação numérica pode ser a principal fonte de erro em programas de simulação em estampagem.

Houve também um coeficiente de atrito máximo admitido pela simulação sem haver o rompimento da peça, com valor de 0,27. Acima desse valor, todas as peças simuladas apresentavam rompimento. O valor máximo de força atingido pelo punção foi observado no caso do lubrificante F com a aplicação da lixa 220,

de forma que a simulação não conseguiu atingir esse patamar de força. Os gráficos da figura 7 mostram esses dados. Outra observação importante é de que a curva simulada com coeficiente de atrito de 0,27 ficou muito próxima da medição a seco, mostrando que o *software* tem boa correlação com a realidade.

A tabela 3 mostra os valores de força máxima que foram igualados para que fosse possível descobrir o coeficiente de atrito do processo. O valor de atrito de 0,27 corresponde ao caso de medição a seco, e foi aproximado com a curva em azul da figura 7. Já a curva em verde não teve aproximação com a simulação, que gerou a curva em vermelho. A figura 8 (pág. 143) mostra o distanciamento dos valores simulados para os medidos, quando seus valores se aproximam do

Tab. 3 – Valores referentes aos gráficos das figuras 6 e 7

Coefficiente de atrito	Força máxima medida	Força máxima simulada
0,056	16,9	16,4
0,113	18,2	18,3
0,160	20,2	20,0
0,244	23,4	23,4
0,270	22,9	23,7

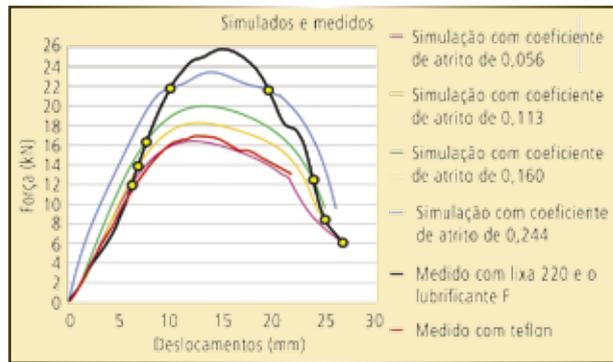


Fig. 8 – Comparação entre os gráficos gerados pela simulação e pelas medições com maior coeficiente de atrito

limite máximo do valor do coeficiente de atrito.

Com o aumento do coeficiente de atrito, é observado um distanciamento progressivo entre os resultados medidos e simulados, o que indica que o atrito é uma variável do sistema, pois sua contribuição nas forças de estampagem passa a ser significativa. Na figura 8 é possível observar também que no início da estampagem o coeficiente de atrito aumenta, visto que a curva em preto intercepta as curvas de atrito simuladas, de maior valor, até um limite superior. De forma similar, no fim da estampagem o atrito diminui, pois a curva em preto intercepta as curvas simu-

ladas de menor atrito, até atingir um mínimo.

Como foi mostrado até aqui, a simulação apresentou uma diferença nos resultados em comparação com o caso real, e essa diferença tende a aumentar quanto maior for a influência do atrito no processo. Entretanto, a simulação no caso estudado se mostrou razoável para prever as solicitações que a peça sofreu durante a estampagem. A figura 9 mostra, para as duas condições de atrito extremas (atrito mínimo e máximo), as solicitações que a peça sofrerá de acordo com a simulação. É possível observar que, quanto maior for o atrito, mais as deformações da peça se

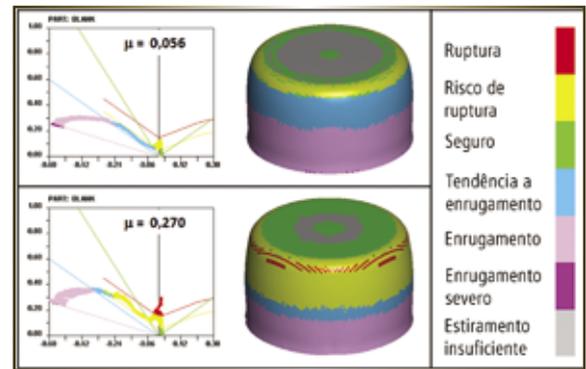


Fig. 9 – Resultados obtidos para os extremos de coeficientes de atrito por meio da simulação

aproximam da curva-limite de conformação e maiores são as chances de a peça romper prematuramente.

Nota-se também que existe uma larga região da borda inferior da peça em que a simulação prevê uma tendência a enrugamento, que se mantém a mesma para todos os valores de atrito. Porém, isso não ocorreu para todas as aplicações de lixas e lubrificantes, o que pode indicar que o Dynaform não está apresentando bons resultados. A figura 10 (pág. 144) mostra uma peça estampada sem enrugamentos. Entretanto, sabe-se que os materiais têm certos comportamentos peculiares, dependendo da aplicação,

## Você acaba de encontrar a sua Prensa!



Prensa H 200T



Prensa PH/C 160T



Prensa PH/C 220 TC Hidráulica



Prensa PH/C4 110 TC



PRENSAS EXCÊNTRICAS E HIDRÁULICAS TIPO "C" E "H".

## Análise



Fig. 10 – Peça estampada sem enrugamento

o que indica que, mesmo não havendo enrugamentos no caso em questão, o material pode estar sofrendo tensões internas que propiciam que isso aconteça.

O fato de o enrugamento não ter ocorrido nessa peça se deve, principalmente, às restrições que as matrizes impõem à peça. Se essas restrições houvessem



Fig. 11 – Peça estampada com uma folha de Teflon e acabamento das matrizes com lixa 1.200

sido diminuídas, a chapa teria enrugado, como mostrado na figura 11, onde, de fato, houve enrugamento. A estampagem da peça mostrada na figura 11 foi feita com uma folha de Teflon, de forma que há uma separação física entre as matrizes e a chapa; essa separação serve como corpo de sacrifício, dando liberdade

para que as tensões internas da chapa atuem.

## Conclusões

De posse dos resultados da simulação e comparando-os aos resultados experimentais, verificou-se que o uso da ferramenta numérica, mais especificamente a modelagem por elementos finitos, é capaz de auxiliar na determinação do coeficiente de atrito. Esta determinação possibilita comparar a eficiência de diversos lubrificantes, adequando-os às características do processo e do tipo de material empregado.

Vale lembrar que para o desenvolvimento dos estudos numéricos foi utilizada a Lei de Coulomb, inserindo um valor para o

**Uma nova opção para cortar, dobrar e prensar.**

► **Prensas Excêntricas** ► **Guilhotinas** ► **Viradeiras**

Fazemos Retrofitting "VISITE NOSSO SITE"

**Soma Máquinas**  
SOMÁQUINAS COMÉRCIO DE MÁQUINAS LTDA.  
Rua Piratininga, 323 - Brás - São Paulo - SP  
Rua Alan Kardec, 193 - Vl. Piza - Limeira - SP

**Fone: (11) 3209-3516**  
**Fone/Fax: (11) 3277-6603**  
[www.somáquinas.ind.br](http://www.somáquinas.ind.br) - [somáquinas@terra.com.br](mailto:somáquinas@terra.com.br)

**MAGNU**  
ENGENHARIA INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA.

**SOLUÇÕES EM OXICORTE, CORTE E DOBRA**  
quadrados • discos • retângulos  
anéis • peças conforme desenhos

CNC em CORTE e DOBRA até 1/2" CNC em OXICORTE e PLASMA chapas SAE 1020/45, ASTM A36, A-283 GR° C, USI-SAC 300/350 e COSAR-COR 400/500 e 420

Sistema de corte automatizado em AutoCAD com qualidade e precisão

Cortamos a fogo com oxicorte CNC (máx. 1.50m x 3m), foto-célula (máx 2.50m x 6m), maçarico manual e maçarico máquina (tartaruga) peças sob-medida conforme necessidade dos nosso clientes até 10" de espessura

**CONJUNTOS USINADOS E SOLDADOS**

[ventas@magnu.com.br](mailto:ventas@magnu.com.br)  
[www.magnu.com.br](http://www.magnu.com.br)  
**Tel.: (11) 2488 0300**  
Av. Nova Cumbica nº 1001 - Nova Cumbica  
Guarulhos/SP - CEP 07231-000

coeficiente de atrito constante. Nestas situações verificou-se que para condições diferentes de atrito é possível obter diferentes condições de estampagem, ou seja, observa-se significativa influência do atrito no processo de conformação.

A lubrificação é uma das variáveis mais importantes na conformação mecânica. Ela pode atuar como uma reguladora das forças de atrito, uma vez que as propriedades do lubrificante ditam as novas condições de interação peça/ferramenta. É necessário ressaltar que o coeficiente de atrito é influenciado pelas condições das superfícies e de outros parâmetros, tais como pressão de contato, velocidade de deslocamento entre ferramentas e temperatura do processo. A temperatura pode modificar, além das propriedades mecânicas dos materiais, também as propriedades do lubrificante.

A simulação com uso do *software* Dynaform apresenta uma boa concordância com os ensaios

práticos mas, na medida em que as forças de atrito aumentam – e, portanto, aumenta o coeficiente de atrito – o *software* tende a se distanciar da realidade. Isso provavelmente acontece porque o *software* considera o atrito como uma constante durante todo o processo. Entretanto, estudos em medições do coeficiente de atrito por meio de ensaios práticos indicam que isso não é real. Porém, caso seja possível identificar quais são os parâmetros que influenciam o atrito e transmiti-los para o *software*, é provável que ele consiga prever o que acontecerá nas peças simuladas com um mínimo de erro.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo financiamento das bolsas e aos

Engenheiros Dhiones Marca e Cristian Rech pela ajuda durante os ensaios práticos para obtenção das curvas.

### Referências

- 1) PAUNOIU, V. E. NICOARA, V. Simulation of friction phenomenon in deep drawing process. In: *The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. National Tribology Conference, Romania, 24-26 September 2003.* p. 407-412.
- 2) KIM H, ALTAN T, YAN Q. Evaluation of stamping lubricants in forming advanced high strength steels (AHSS) using deep drawing and ironing tests. In: *Journal of Materials Processing Technology.* Disponível em [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com) desde 5 nov. 2008.
- 3) HUEBNER, K.H, DEWHIRST D L., SMITH D E., BYROM T G. *The Finite Element Method for Engineers.* v. 2. Ed. John Wiley & Sons, 1982.
- 4) SILVEIRA, S.E. *Desenvolvimento do Processo de Construção de Curvas Limite de Conformação,* 2004. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (RS).
- 5) KEELER, S. P. Predicting Forming Limits. *Sheet Metal Industries, Understanding Sheetmetal Formability,* 1971. Part IV, p. 589 – 593.

**Corte a Laser**

Qualidade • Preços Competitivos • Prazo de Entrega

— aço carbono - 12 mm  
— aço inox - 3 mm  
— alumínio - 6 mm

Tel.: 11 4229.9344  
comercial@racz.com.br

**RACZ**  
Desde 1956

www.racz.com.br