

## **MODELO PARA PREDIÇÃO DA RECUPERAÇÃO ELÁSTICA DE CHAPAS DOBRADAS EM MATRIZ ELASTOMÉRICA**

**Marco Túlio Braga, mtbraga@ita.br<sup>1</sup>**  
**Lindolfo Araújo Moreira Filho, lindolfo@ita.br<sup>1</sup>**  
**Miguel Ângelo Menezes, miguel@dem.feis.unesp.br<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Aeronáutica, CTA-ITA-IME, Praça Mal Eduardo Gomes, nº 50 - São José dos Campos - S.P. - Brazil, CEP 12228-900. *Phone: +55-12-39475865 – Fax: +55-12-39475865*

<sup>2</sup>Universidade Estadual Paulista - Campus Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Mecânica, Av Brasil 56 - Centro - Ilha Solteira - S.P. - Brazil, CEP 15385-000.

**Resumo:** Um problema crítico dos produtos fabricados por conformação de chapas metálicas é a sua precisão dimensional. Este problema é mais facilmente observado no dobramento, entretanto, também ocorre em outros processos de conformação de chapas, afetando montagens estruturais, com especial importância na indústria aeronáutica. Embora, a literatura forneça alguns modelos para a estimativa da recuperação elástica no processo de dobramento convencional, isto não ocorre no dobramento não-convencional em matriz elastomérica, o que conduz ao ajuste do processo por meio de tentativas e ao aumento das peças refugadas. Assim, este trabalho tem como objetivo apresentar um modelo teórico para estimar a recuperação elástica no processo de dobramento não-convencional. Os resultados fornecidos pelo modelo mostraram boa correlação com os dados experimentais, os quais foram utilizados na sua validação.

**Palavras-chave:** Recuperação elástica; dobramento convencional em matriz; dobramento não-convencional.

### **1. INTRODUÇÃO**

Atualmente, o mercado econômico é caracterizado pela forte competição. Neste cenário, dois requisitos básicos para a sobrevivência são: a redução de custos e o fornecimento de produtos e serviços de qualidade.

Na indústria de conformação, alguns defeitos que podem comprometer a qualidade dos produtos de chapas metálicas são: a fratura, o enrugamento e a baixa precisão dimensional. Este último problema é muito relevante devido à considerável recuperação elástica do material, após a remoção da carga de conformação; sendo crítico na indústria aeronáutica por causa da fina espessura das chapas empregadas e tendo como conseqüências as montagens “forçadas”, o pré-tensionamento de juntas e elementos de fixação e a redução da vida esperada para a junta mecânica.

Um método comumente utilizado na indústria aeronáutica para minimizar a recuperação elástica é o processo de conformação utilizando blocos de poliuretano (elastômero especial, de elevada dureza, resistência à abrasão e ao rasgamento). Estes blocos exercem a função de matrizes e permitem que a chapa assumira a forma geométrica do punção durante a aplicação de carga. Outra vantagem deste processo é manter intacta a camada protetora de *ALCLAD* na conformação de chapas de alumínio, como citado por Frey *et al* (1943), devido à menor dureza do poliuretano em relação à dureza da chapa metálica.

A fim de se obter melhor compreensão do fenômeno, dos parâmetros envolvidos e evitar o tratamento do problema por meio de tentativa e erro, como geralmente ocorre no chão de fábrica, a literatura fornece alguns modelos. No entanto, estes geralmente desprezam o encruamento do metal da chapa, como o modelo proposto por Gardiner (1957) ou não se aplicam ao processo de dobramento não convencional por apresentarem condições de contorno diferentes das encontradas no dobramento convencional em matriz metálica, como o modelo de Queener *et al* (1968). Por isso, um modelo teórico é proposto para a predição da recuperação elástica para este processo não convencional e sua validação obtida por meio de resultados experimentais. Convém ressaltar que o desenvolvimento de um modelo é de grande utilidade, pois possibilita a redução do tempo de ajuste do processo e do número de peças refugadas.

### **2. MATERIAL E MÉTODOS**

Este item apresenta o modelo teórico proposto, bem como os materiais e métodos utilizados na parte experimental.

#### **2.1. Recuperação elástica**

A parte esquerda da fig. (1) mostra uma chapa metálica sob um bloco de poliuretano sendo dobrada por um punção, enquanto no lado direito da mesma estão mostrados os ângulos de dobramento da chapa, antes e depois do descarregamento da carga de conformação.

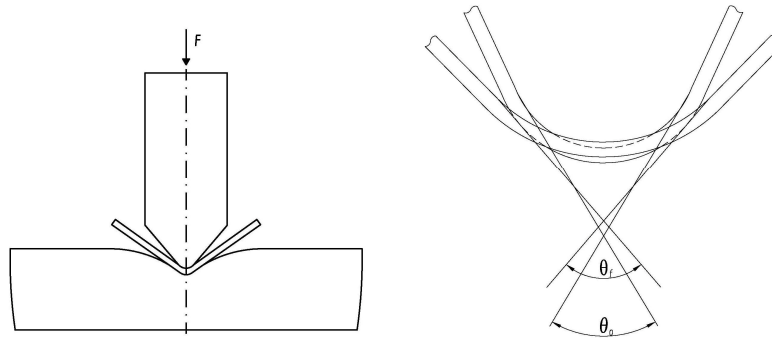


Figura 1. Processo de dobramento não-convenção e recuperação elástica.

Após o descarregamento, a chapa tende à recuperar sua forma plana inicial devido à liberação da energia elástica armazenada na estrutura do metal. Este fenômeno está mostrado nos diagramas tensão-deformação e momento-curvatura na figura 2, cujas áreas hachurada e tracejada representam a energia elástica armazenada e a variação de forma geométrica, respectivamente.

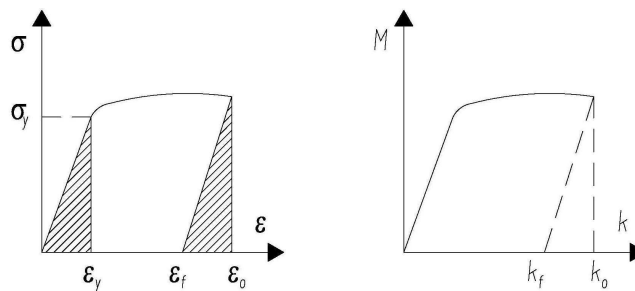


Figura 2. Diagramas tensão-deformação e momento-curvatura.

Assim, a recuperação elástica está associada à variação de curvatura e de momento fletor. A partir deste último diagrama e da resistência dos materiais, a relação entre estas grandezas pode ser obtida, como:

$$\frac{1}{R_f} - \frac{1}{R_o} = \frac{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot [0 - M_o]}{E \cdot l_z \cdot t^3} \quad (1)$$

Ou rearranjando, vem:

$$\frac{R_o}{R_f} = 1 - \frac{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot M_o \cdot R_o}{E \cdot t^3} \quad (2)$$

onde  $R$  = raio de dobramento,  $t$  = espessura da chapa,  $l_z$  = comprimento da chapa ao longo do eixo de dobramento,  $E$  = módulo de elasticidade,  $\nu$  = coeficiente de Poisson e  $M$  = momento fletor. Subscritos  $o$  e  $f$  referem-se aos estados carregado e descarregado da chapa, respectivamente. Além disso, a condição de estado plano de deformações foi assumida na Eq. (2).

## 2.2. Momento Fletor

Durante a aplicação da carga de conformação surgem tensões circunferenciais ( $\sigma_\theta$ ) ao longo da espessura da chapa, resultantes do momento fletor associado à carga aplicada. Assim, este momento promove a mudança de curvatura da chapa. Matematicamente, a relação entre estas grandezas é dada por:

$$M = \int_a^b \sigma_\theta r dr \quad (3)$$

Para o cálculo do momento fletor torna-se necessário a determinação das distribuições de tensões circunferenciais. Estas são baseadas nas hipóteses a seguir:

- Material elasto-plástico, obedecendo ao modelo de *Hollomon*;
- Tensão efetiva responsável pelo fluxo plástico associada ao critério de *Tresca*.

Entretanto, antes, da determinação das tensões circunferenciais é necessário conhecer as tensões radiais. Partindo das equações de equilíbrio radial, do critério de *Tresca* e do modelo de *Hollomon*, as distribuições de tensões radiais para as regiões tracionada e comprimida são obtidas, como:

$$\sigma_r = K\varepsilon^n \cdot \ln\left(\frac{r}{b}\right) - p_o \quad (4)$$

$$\sigma_r = -K\varepsilon^n \cdot \ln\left(\frac{r}{a}\right) - p_i \quad (5)$$

Utilizando as eq. (4) e (5) e o critério de *Tresca* obtém-se as distribuições de tensões circunferenciais:

$$\sigma_\theta = K\varepsilon^n \cdot \left[1 + \ln\left(\frac{r}{b}\right)\right] - p_o - \mu \cdot p_o \quad (6)$$

$$\sigma_\theta = -K\varepsilon^n \cdot \left[1 + \ln\left(\frac{r}{a}\right)\right] - p_i \quad (7)$$

onde  $r$  = coordenada radial arbitrária ao longo da espessura da chapa,  $a$  = raio da superfície côncava da chapa,  $b$  = raio da superfície convexa da chapa,  $K$  = coeficiente de resistência,  $n$  = expoente de encruamento,  $\varepsilon$  = deformação verdadeira ou  $\varepsilon = \ln(1+e)$ ,  $e$  = deformação de engenharia ou  $e = \{(R_p+t)-r_n\}/r_n$ ,  $R_p$  = raio do punção e  $r_n$  = raio neutro (definido abaixo),  $p_o$  = pressão na superfície convexa,  $p_i$  = pressão na superfície côncava da chapa e  $\mu$  = coeficiente de atrito.

Para a obtenção do momento fletor, as distribuições de tensões circunferenciais devem ser integradas ao longo da espessura, conforme eq. (3). No entanto, o raio neutro deve ser conhecido previamente; este é determinado pela condição de continuidade das tensões radiais, dada por:

$$-K\varepsilon^n \cdot \ln\left(\frac{b}{r_n}\right) - p_o = -K\varepsilon^n \cdot \ln\left(\frac{r_n}{a}\right) - p_i \quad (8)$$

Resultando em,

$$r_n = \left[ ab \exp^{(p_o - p_i)/K\varepsilon^n} \right]^{0.5} \quad (9)$$

onde  $\exp$  = número de *Euler* e os demais símbolos têm os significados citados anteriormente.

Substituindo-se as distribuições de tensões, eq. (6) e (7), e o limite de integração, eq. (9), em (3), vem:

$$M_o = \left\{ K\varepsilon^n \cdot \left[ -\frac{a^2}{4} - \frac{b^2}{4} + \frac{ab \exp^{(p_o - p_i)/K\varepsilon^n}}{2} \right] - \frac{p_i a^2}{2} + \frac{p_o b^2}{2} - \frac{\mu \cdot p_o \cdot (ab \exp^{(p_o - p_i)/K\varepsilon^n} - b^2)}{2} \right\} \quad (10)$$

### 2.3. Pressões externa e interna

A equação (10) mostra que para o cálculo do momento fletor faz-se necessário conhecer as pressões externa  $p_o$  e interna  $p_i$ . Estas são definidas como:

$$p_o = F/A_o \quad (11)$$

$$p_i = F/A_i \quad (12)$$

onde  $A_o$  = área da superfície convexa da chapa,  $A_i$  = área da superfície côncava da chapa,  $F$  = carga de conformação, definida como  $F = F' + 2 \cdot F''$ , sendo  $F'$  = força para comprimir o bloco de poliuretano e  $F''$  = força de dobramento.

O termo  $F'$  pode ser interpretado como a força requerida para manter um determinado volume (parte do punção e da chapa) submerso num líquido (bloco de poliuretano), conforme o princípio de Arquimedes. Do ponto de vista matemático, esta força depende da área frontal do punção, que varia com o ângulo de contato  $\beta$  entre a chapa e o bloco. Por sua vez, o ângulo de contato apresenta dependência em relação ao deslocamento do punção  $d$ . Assim, as equações correlacionadas com a carga de conformação são fornecidas para dois estágios de deslocamento do punção.

Primeiro estágio de deslocamento -  $d \leq R_p (1 - \text{sen } \theta_p / 2)$

$$\beta = \arccos(R_p - d) / R_p \quad (13)$$

$$A_1 = \frac{\pi(R_p + t)^2 \cdot 2\beta}{360} - \frac{(R_p + t)^2 \cdot \text{sen} 2\beta}{2} \quad (14)$$

$$F' = \frac{E_d^*}{H} \cdot A_1 \cdot w_{pz} \quad (15)$$

onde  $E_d^*$  = modulo de elasticidade efetivo,  $H$  = altura do bloco,  $A_1$  = área frontal do punção submersa no bloco de poliuretano no primeiro estágio de deslocamento do punção,  $w_{pz}$  = largura do punção ao longo do eixo de dobramento, eixo  $z$ .

Segundo estágio de deslocamento -  $d > R_p (1 - \text{sen } \theta_p / 2)$

$$\beta_{max} = 90^\circ - \frac{\theta_p}{2} \quad (16)$$

onde  $\beta_{max}$  = máximo ângulo de contato entre a chapa e o bloco de poliuretano e  $\theta_p$  = ângulo do punção.

$$A_1 = \frac{\pi(R_p + t)^2 \cdot 2\beta_{max}}{360} - \frac{(R_p + t)^2 \cdot \text{sen} 2\beta_{max}}{2} \quad (17)$$

$$d_2 = d - R_p \cdot (1 - \text{sen } \theta_p / 2) \quad (18)$$

onde  $d_2$  = deslocamento do punção no segundo estágio.

$$A_2 = 2d_2(R_p + t)\text{sen}\beta_{max} + \left( \frac{(0.5w_{px} + t) - (R_p + t)\text{sen}\beta_{max}}{(h_p + t) - (R_p + t)(1 - \text{sen } \theta_p / 2)} \right) \cdot d_2^2 \quad (19)$$

onde  $A_2$  = área frontal do punção submersa no bloco de poliuretano no segundo estágio de deslocamento do punção.

$$F' = \frac{E_d^*}{H} \cdot (A_1 + A_2) \cdot w_{pz} \quad (20)$$

O termo  $F''$ , necessário para o dobramento da chapa, é dado por:

$$F'' = \frac{[K\varepsilon^n - (1 + \mu)p_o] \cdot l_z t^3}{12 \cdot (b - r_n) \cdot (R_p + t) \text{sen}\beta} \quad (21)$$

Conhecendo-se a carga de conformação,  $F = F' + 2 \cdot F''$ , é possível calcular as pressões  $p_o$  e  $p_i$ . Substituindo as eq. (20) e (21) e  $A_o = [2\pi(R_p + t) \cdot 2\beta / 360^\circ] \cdot l_z$  na Eq. (11) vem:

$$p_o = \left\{ \left( \frac{w_{pz}}{l_z} \cdot \frac{E_d^*}{H} \right) \cdot [A_1 + A_2] + \frac{2 \cdot K\varepsilon^n \cdot t^3}{12 \cdot (b - r_n) \cdot (R_p + t) \text{sen}\beta} \right\} \cdot \left\{ \frac{2160 \cdot (b - r_n) \cdot (R_p + t) \text{sen}\beta}{[(6(b - r_n) \cdot (R_p + t) \text{sen}\beta) \cdot 2\pi(R_p + t) 2\beta] + 360 \cdot (1 + \mu) \cdot t^3} \right\} \quad (22)$$

Procedendo de maneira análoga para  $p_i$  e considerando  $A_i = [2\pi \cdot R_p \cdot 2\beta / 360^\circ] \cdot l_z$ , obtém-se:

$$p_i = \left\{ \left[ \frac{w_{pz}}{l_z} \cdot \frac{E_d^*}{H} \right] \cdot [A_1 + A_2] + \frac{2 \cdot K \varepsilon^n \cdot t^3}{12 \cdot (b - r_n) \cdot (R_p + t) \cdot \text{sen} \beta} \right\} \cdot \left\{ \frac{2160 \cdot (b - r_n) \cdot (R_p + t) \cdot \text{sen} \beta}{\left[ (6 \cdot (b - r_n) \cdot (R_p + t) \cdot \text{sen} \beta) \cdot 2\pi \cdot R_p \cdot 2\beta + 360 \cdot (I + \mu) \cdot t^3 \right]} \right\} \quad (23)$$

## 2.4. Fator de forma

Diferentemente dos metais, o módulo de elasticidade dos elastômeros depende da razão entre a área carregada e a área livre para expansão, razão definida como fator de forma,  $S$ . A fim de considerar a influência deste parâmetro no módulo de elasticidade, define-se um módulo efetivo  $E_d^*$ , o qual está relacionado com o fator de forma pela eq. (24).

$$E_d^* = E_d \cdot (I + 2S^2) \quad (24)$$

onde,  $E_d$  é o módulo de elasticidade obtido do ensaio de compressão.

Analogamente ao que ocorre para os outros parâmetros (ângulo de contato, área submersa e força para deformar o bloco de poliuretano), o fator de forma também varia com o deslocamento do punção. Assim,

$$S_1 = \frac{2 \cdot l_z \cdot (R_p + t) \cdot (\text{sen} \beta)}{2 \cdot H \cdot (L + W)} \quad (25)$$

$$S_2 = \frac{2 \cdot l_z \cdot \left\{ (R_p + t) \cdot \text{sen} \beta_{\max} + \left( \frac{(0.5w_{px} + t) - (R_p + t) \cdot \text{sen} \beta_{\max}}{(h_p + t) - (R_p + t) \cdot (1 - \text{sen} \theta_p / 2)} \right) \cdot d_2 \right\}}{2 \cdot H \cdot (L + W)} \quad (26)$$

representam os fatores de forma para o primeiro e segundo estágios de deslocamentos do punção, respectivamente.

## 2.5. Modelo Proposto

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo analítico para prever a recuperação elástica de chapas dobradas por processo não convencional de conformação. O modelo proposto é original, pois foi desenvolvido exclusivamente para o processo de dobramento utilizando matrizes “flexíveis” (constituídas de poliuretano). A vantagem do modelo analítico sobre modelos de elementos finitos é o menor tempo de resposta, visto que neste último método, grandezas como o momento fletor e o deslocamento são calculadas para vários pontos do meio *continuum*; além da exigência de compatibilidade de deformações, características que implicam em maior tempo requerido para a solução.

No descarregamento da carga de conformação, as fibras tracionadas tendem a ser comprimidas, enquanto, as fibras comprimidas tendem a ser tracionadas, devido à ação das tensões residuais. Isso resulta num momento fletor de mesmo módulo e sentido contrário ao aplicado na etapa de dobramento. Portanto, a eq. (10) deve ser multiplicada por (-1), a fim de considerar essa inversão de sentido. Após substituição de (10) em (2), a equação final proposta para o modelo é dada por:

$$\frac{R_o}{R_f} = I - \left[ \frac{12(I - \nu^2)R_o}{Et^3} \right] \left\{ K \varepsilon^n \cdot \left[ \frac{a^2}{4} + \frac{b^2}{4} - \frac{ab \exp^{(p_0 - p_i)/K \varepsilon^n}}{2} \right] + \frac{p_i a^2}{2} - \frac{p_o b^2}{2} + \frac{\mu \cdot p_o \cdot (ab \exp^{(p_0 - p_i)/K \varepsilon^n} - b^2)}{2} \right\} \quad (27)$$

onde,  $p_i$  e  $p_o$  são as pressões nas superfícies côncava e convexa dadas pelas equações (23) e (22);  $a$  e  $b$  são os raios de curvatura nas respectivas superfícies.

## 2.6. Materiais e Propriedades Mecânicas

Foram utilizados materiais com diferentes capacidades de encruamento como o alumínio comercial 1100 (baixa capacidade), além do aço 1001 e do latão 65/35 (ambos com alta capacidade de encruamento), obtidos de chapas laminadas à frio, recozidas. As propriedades mecânicas destes materiais foram obtidas através do ensaio de tração, executado conforme norma ASTM E8, numa máquina de tração universal Instron modelo 5500R, e estão mostradas na tab. (1).

**Tabela 1.** Propriedades Mecânicas.

Material	Aço 1001	Alumínio 1100	Latão 65/35
$E (N/m^2)$	$210,0 \cdot 10^9$	$70,0 \cdot 10^9$	$101,0 \cdot 10^9$
$\sigma_y (N/m^2)$	$157,8 \cdot 10^6$	$57,2 \cdot 10^6$	$102,8 \cdot 10^6$
$\sigma_{m\acute{a}x} (N/m^2)$	$349,1 \cdot 10^6$	$131,8 \cdot 10^6$	$385,0 \cdot 10^6$
$K (N/m^2)$	$485,0 \cdot 10^6$	$182,0 \cdot 10^6$	$555,7 \cdot 10^6$
$n$	0,20	0,13	0,35

Em relação à matriz utilizada no dobramento, esta era constituída de um poliuretano, cuja dureza e módulo de elasticidade eram: 90 Shore A e 40,6 MPa. Ambos os valores foram determinados experimentalmente.

## 2.7. Implementação computacional

Devido à complexidade das equações apresentadas nos itens 2.1 a 2.5, estas foram implementadas num programa em Fortran, para se obter uma resposta mais rápida.

## 2.8. Ensaio de dobramento

Embora, neste ensaio sejam utilizados corpos de prova cujas formas geométricas sejam mais simples que as peças obtidas por dobramento no meio industrial, o foco do estudo está limitado à região da dobra. Para o caso de simples curvatura, as regiões de dobra do corpo de prova e da peça a ser fabricada podem ser consideradas idênticas.

Neste trabalho, o objetivo da parte experimental é a obtenção de dados, os quais serão utilizados na validação do modelo teórico proposto, eq. (27).

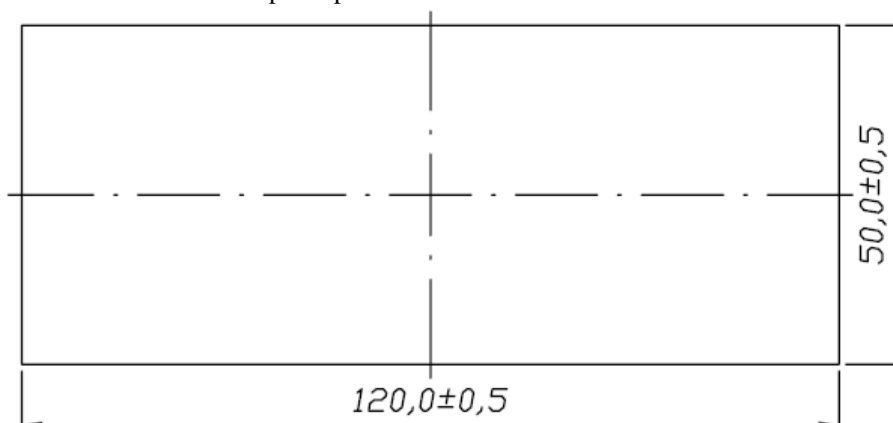
### 2.8.1. Procedimento do Ensaio

Os ensaios foram executados numa máquina de compressão universal, modelo Instron 5500R. Corpos de prova em forma de tiras foram cortados, numa guilhotina, conforme as dimensões mostradas na tab. (2) e posteriormente dobrados a fim de simular o comportamento da chapa, após a conformação.

**Tabela 2.** Dimensões do corpo de prova.

Dimensões do corpo de prova	
Comprimento $l_x$ (mm)	120,0
Comprimento $l_z$ (mm)	50,0
Espessura $t$ (mm)	1,2

A figura 3 ilustra as dimensões do corpo de prova de dobramento.



**Figura 3.** Corpo de prova para ensaio de dobramento.

Cada corpo de prova foi posicionado sobre o bloco de poliuretano e dobrado por um punção. Ao fim do curso especificado para este último, foram traçadas linhas retas, com auxílio de um anteparo, para a medição do ângulo de dobramento no estado carregado. Após a remoção da carga de conformação, o ângulo de dobramento foi medido no próprio corpo de prova. Em seguida, a recuperação elástica de cada tira foi calculada através da eq. (28):

$$\frac{R_o}{R_f} = \frac{1 - (\theta_f/180)}{1 - (\theta_o/180)} \quad (28)$$

onde os subscritos *o* e *f* referem-se aos estados carregado e descarregado da chapa (tira), respectivamente.

Durante os ensaios iniciais, foi verificado que a variação do ângulo de dobramento das tiras dobradas por este processo não-convencional é pequena, por isso, apenas três corpos de prova de cada material foram utilizados para cada deslocamento (curso) do punção. Finalmente, foi calculada a média dos valores de recuperação elástica fornecidos pela eq. (28). O procedimento descrito acima foi executado para dois valores de deslocamento do punção: 5,0 e 10,0 mm, caso 1 e 2, respectivamente.

Quanto ao valor do coeficiente de atrito entre o bloco de poliuretano e a tira de chapa, foi adotado o valor médio sugerido por Al-Qureshi (1977).

### 2.8.2. Aparato

As tabelas (3) e (4) mostram as dimensões do punção e do bloco de poliuretano utilizados nos ensaios de dobramento.

**Tabela 3.** Dimensões do punção.

Dimensões do punção	
Compr. dir. eixo x, $w_{px}$ (mm)	50,0
Compr. dir. eixo z, $w_{pz}$ (mm)	70,0
Altura, $h_p$ (mm)	26,4
Ângulo, $\theta_p$ (°)	80°
Raio, $R_p$ (mm)	6,0

**Tabela 4** Dimensões do bloco de poliuretano.

Dimensões do bloco de poliuretano	
Altura, $H$ (mm)	50,0
Comprimento, $L$ (mm)	130,0
Largura, $W$ (mm)	252,0

## 2.9. Resultados

Este item apresenta os resultados teóricos e experimentais fornecidos pelo modelo proposto e pelos ensaios de dobramento, conforme mostram as tab. (5) e (6) para os casos 1 e 2, respectivamente.

**Tabela 5.** Comparação para o caso 1.

Material	$R_o/R_f$ teórica	$R_o/R_f$ exper.	Dif. (%)
<b>Aço 1001</b>	0,9836	0,9323	5,5
<b>Alumínio 1100</b>	0,9831	0,9512	3,3
<b>Latão 65/35</b>	0,9742	0,8442	15,4

**Tabela 6.** Comparação para o caso 2.

Material	$R_o/R_f$ teórica	$R_o/R_f$ exper.	Dif. (%)
<b>Aço 1001</b>	0,9883	0,9627	2,6
<b>Alumínio 1100</b>	0,9968	0,9654	3,2
<b>Latão 65/35</b>	0,9837	0,8918	10,3

### 2.10. Análise dos Resultados

Observando-se os resultados das tab. (5) e (6) verifica-se que o efeito do deslocamento do punção é reduzir a recuperação elástica, conforme verificado pelo aumento da razão  $R_o/R_f$ . Essa observação é válida para todos os materiais e pode ser atribuída ao aumento das pressões  $p_i$  e  $p_o$  sobre a região da dobra da tira metálica. O efeito dessas pressões resulta em estados de tensões favoráveis à conformação, aumentando a deformação plástica, segundo Shanley (1942). À nível microscópico, o efeito dessas pressões é aumentar as tensões de cisalhamento nos planos de maior densidade atômica, resultando em maior deformação plástica.

Quanto ao efeito do material, este está representado pelo módulo de elasticidade, coeficiente de resistência e expoente de encruamento, como pode ser verificado na eq. (28). Esta permite observar que quanto maior a relação  $K/E$  maior a recuperação elástica. Do ponto de vista microscópico,  $K$  e  $n$  representam a resistência à nucleação e à movimentação de discordâncias (escorregamento de planos atômicos de maior densidade atômica). Isto pode explicar a maior recuperação elástica obtida para o latão nos experimentos.

Finalmente, as tab. (5) e (6) mostram que os valores fornecidos pelo modelo são aceitáveis (diferença máxima de 15,4% entre o valor previsto pelo modelo e o fornecido pelo ensaio). Uma possível explicação para este maior desvio dos valores de recuperação elástica do latão pode ser atribuída ao fato deste material não seguir fielmente ao modelo de Hollomon para o nível de deformação apresentado. Entretanto, com o aumento do deslocamento do punção ocorre um aumento de deformação plástica (redução da resistência à conformação) com conseqüente diminuição da recuperação elástica.

### 3. AGRADECIMENTOS

O Autor agradece à todos do departamento de tecnologia do ITA, pelo uso das instalações e auxílio na execução dos ensaios.

### 4. REFERÊNCIAS

Al-Qureshi, H. A., "On the Mechanics of Sheet Metal Bending with Confined Compressible Dies", Journal of Mechanical Technology vol.1, nº 1, 1977, pp. 261-275.

ASTM E 8 Standard "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials ASTM International.

Frey C. J., Kogut S.S. "Metal Forming by Flexible Tools", Pitman Publishing Corporation, New York 1943.

Gardiner F.J., "The Spring back of Metals" Trans. ASME vol. 79, 1957, pp. 1-9.

Queener C.A., De Angelis R.J., "Elastic Springback and Residual Stresses in Sheet Metal Formed by Bending" Trans. ASM vol. 61, 1968, pp. 757-768.

Shanley F.R., "Elastic Theory in Sheet Metal Forming Problems" Lockheed Aircraft Corporation vol. 9 (7) (1942) pp. 313-333.

## MODEL FOR SPRINGBACK PREDICTION OF BENT SHEETS ON ELASTOMERIC DIE

Marco Túlio Braga<sup>1</sup>, [mtbraga@ita.br](mailto:mtbraga@ita.br)

Lindolfo Araújo Moreira Filho<sup>1</sup>, [lindolfo@ita.br](mailto:lindolfo@ita.br)

Miguel Ângelo Menezes<sup>2</sup>, [miguel@dem.feis.unesp.br](mailto:miguel@dem.feis.unesp.br)

<sup>1</sup> Technological Institute of Aeronautics, CTA-ITA-IME, Praça Mal Eduardo Gomes, nº 50 - São José dos Campos - S.P. - Brazil, ZIP 12228-900. Phone: +55-12-39475865 – Fax: +55-12-39475865.

<sup>2</sup> University of São Paulo State at Ilha Solteira - Mechanical Department - Av Brasil 56 - Centro - Ilha Solteira S.P. – Brazil, ZIP 15385-000.

**Abstract:** One critical problem of sheet formed products is its dimensional accuracy. This problem is easier noticed in bending process, however, it also happens in other sheet metal forming processes, affecting structural assemblies, especially at aeronautic industry. Although literature provides some models for springback estimate in conventional bending process, this is not the case for non-conventional bending using elastomeric die, what leads to a trial and error process setting and an increase of the refutable parts. So this work intends to present a theoretical model for predicting springback at the non-conventional bending process. Model results have shown good correlation with experimental data, which were used on its validation.

**Key words:** Springback, conventional V-bending, non-conventional bending using elastomeric die

### 5. DIREITOS AUTORAIS

The authors are the only responsible by the printed information included in this paper.