

# ANÁLISE DO RETORNO ELÁSTICO EM DOBRAMENTO DE CHAPAS VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

## **Alexandre Tácito Malavolta**

Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense 400, CEP 13566-590, São Carlos – SP. email : alexandr@sc.usp.br

## **Mariano Eduardo Moreno**

Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense 400, CEP 13566-590, São Carlos – SP. email : mmoreno@sc.usp.br

## **Sérgio Henrique Evangelista**

Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense 400, CEP 13566-590, São Carlos – SP. email : todody@sc.usp.br

## **João Lirani**

Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense 400, CEP 13566-590, São Carlos – SP. email : lirani@sc.usp.br

## **Hazim A. Al-Qureshi**

Universidade Federal de Santa Catarina, LabMAT, C.P. 476, CEP 88040-900, Florianópolis – SC. email : hazim@materiais.ufsc.br

**Resumo.** *Dentre os processos de conformação mecânica dos metais, o processo de dobramento de chapas é um dos mais aplicado na indústria metal-mecânica. Dado o seu interesse, a predição do comportamento do material no processo é de crucial importância, uma vez que problemas de fabricação podem comprometer o desempenho final de componentes dobrados. No dobramento de perfis de chapas é comum que a peça sofra uma distorção geométrica após sua retirada da matriz. Este efeito, conhecido como retorno elástico, pode ser prejudicial na montagem final junto a outros componentes. Busca-se aqui analisar o problema do retorno elástico em chapas dobradas via Método dos Elementos Finitos. Comparam-se os resultados obtidos numericamente com soluções analíticas existentes na literatura. Pondera-se o problema de contato e condições de contorno do modelo numérico com as hipóteses simplificadoras dos modelos analíticos. Assim, avaliam-se os aspectos necessários à modelagem do retorno elástico em peças mais complexas, com discussão dos problemas relacionados e resultados obtidos.*

**Palavras-chave:** *dobramento, método dos elementos finitos, retorno elástico*

## **1. INTRODUÇÃO**

O dobramento de chapas é um dos processos de conformação mais aplicados na indústria metal-mecânica. Uma grande parte dos produtos obtidos a partir de chapas metálicas sofre algum tipo de dobramento em sua fabricação. A Figura 1 ilustra os principais parâmetros associados a um processo simples: o raio de dobra  $R$  expresso geralmente em múltiplos da espessura, o ângulo de dobra  $\alpha$ , a largura de dobra  $b$  e a espessura da chapa  $t$ .

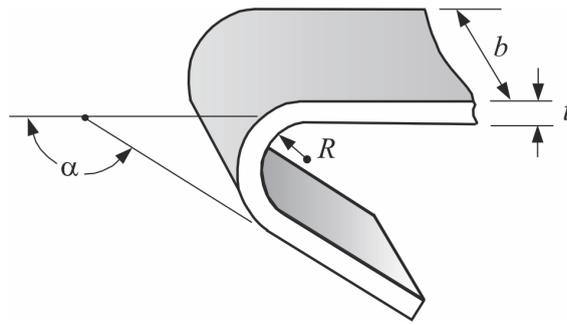


Figura 1. Principais parâmetros associados ao processo de dobramento.

Um fenômeno muito comum no dobramento é o retorno elástico que consiste no relaxamento da peça após sua retirada da matriz. Este fato ocorre devido à presença da energia elástica acumulada na peça durante o processo de conformação. Quando o carregamento é cessado e as vinculações são retiradas, esta energia é redistribuída na peça através do equilíbrio interno, o que geralmente causa uma distorção em relação à geometria determinada em projeto. Portanto o formato final da peça depende não apenas da geometria do conjunto matriz/punção mas também da quantidade de energia elástica acumulada. Quantificar esta parcela de energia é uma tarefa difícil pois é influenciada por inúmeros fatores, entre eles pelo modelo de material adotado. Por outro lado, uma previsão acurada do retorno elástico e com isso uma compensação adequada nas dimensões do ferramental ainda na fase de projeto torna-se importante para evitar-se as etapas de tentativa e erro na fabricação e montagem final de componentes dobrados.

O presente trabalho avalia o retorno elástico de um dobramento em V de uma chapa via Método dos Elementos Finitos. Para tal é utilizado o software *ANSYS 7.0*<sup>®</sup> que aplica um algoritmo de integração implícito na solução do problema estático com não linearidades devido ao material, à geometria e contatos. São estudados dois casos, o primeiro considerando-se o comportamento do material da chapa como elástico perfeitamente plástico e o segundo considerando-se o encruamento dado por uma lei de potência. Para cada caso, tem-se uma estimativa do raio de curvatura final  $R_f$  da chapa após o retorno elástico. Estes dados são comparados com o raio de curvatura inicial em cada caso, como contribuição para compensação da geometria do punção na etapa de projeto. Os resultados obtidos são discutidos e comparados com modelos analíticos disponíveis na literatura.

## 2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

### 2.1 Teoria de vigas simples

O estado de tensões e deformações em uma chapa devido ao dobramento pode ser determinado analiticamente a partir da teoria de vigas simples. Neste caso as tensões devido às forças cortantes são desprezadas e a chapa é assumida estar submetida a um carregamento de flexão devido a um momento fletor  $M$  conforme esquematizado na Figura 2a. Outras hipóteses consideradas são de que a linha neutra não se desloca durante o processo e que as seções inicialmente planas e perpendiculares ao plano da chapa permanecem planas e perpendiculares após a flexão. Também é assumido um estado de tensão-deformação unidimensional e que o material tem o mesmo comportamento à tração e à compressão. Uma análise mais acurada deve considerar outros fatores tais como a variação da espessura da chapa durante o processo, Dadrás<sup>(1)</sup>, Dadrás et al<sup>(2)</sup>, assim como o deslocamento da linha neutra e os efeitos das tensões radiais, ver Hill<sup>(3)</sup>.

Baseando-se na teoria de vigas simples, a deformação ao longo da espessura da chapa pode ser expressa em termos do raio de curvatura  $R_n$  e de sua posição  $y$  em relação à linha neutra como:

$$e_x = -\frac{y}{R_n} \quad (1)$$

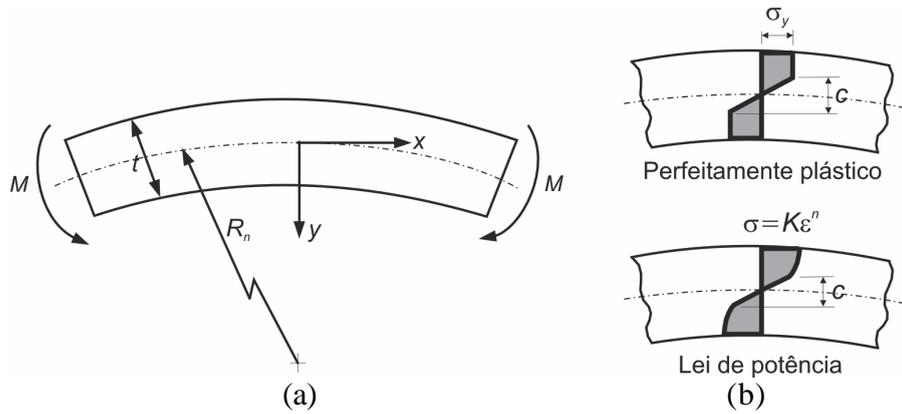


Figura 2. Geometria e distribuição de tensão na teoria de vigas simples.

A Equação 1 implica numa distribuição linear da deformação ao longo da espessura. Esta aproximação é satisfatória quando os níveis de deformações são pequenos e quando o raio de curvatura é bem maior que a espessura da chapa. A distribuição da tensão ao longo da espessura é função do modelo de material adotado. Para o caso elástico perfeitamente plástico (Figura 2b), o perfil de tensão é composto por uma região central  $|y| < c/2$ , cujo comportamento é elástico linear, e uma região nas bordas,  $c/2 < |y| < t/2$ , cuja tensão corresponde à tensão de escoamento  $\mathbf{s}_y$ . Já para o caso da lei de potência tem-se a mesma região elástica  $|y| < c/2$  e a região plástica  $c/2 < |y| < t/2$  com a tensão dada por:  $\mathbf{s} = K\mathbf{e}^n$ .

## 2.2 Previsão analítica do retorno elástico

Na previsão analítica do retorno elástico assume-se que quando o carregamento na peça é cessado, o raio de curvatura sofre um aumento de  $R_n$  para  $R_f$ . Para uma fibra distante de  $y$  da linha neutra este retorno gera uma diferença de deformação  $\mathbf{De}_x$  e como o descarregamento é assumido puramente elástico a diferença de tensão correspondente torna-se:

$$\Delta \mathbf{s}_x = E\Delta \mathbf{e}_x = Ey \left( \frac{1}{R_n} - \frac{1}{R_f} \right) \quad (2)$$

Quando o descarregamento é completo a mudança no momento fletor torna-se igual ao momento externo aplicado inicialmente de forma que:

$$\int_A Ey \left( \frac{1}{R_n} - \frac{1}{R_f} \right) y dA = - \int_A \mathbf{s}_x y dA \quad (3)$$

De onde:

$$\left( \frac{1}{R_n} - \frac{1}{R_f} \right) = \frac{- \int_A \mathbf{s}_x y dA}{EI_z} \quad (4)$$

onde:  $I_z$  corresponde ao momento de inércia da secção transversal.

No caso do material elástico perfeitamente plástico a Equação 4 é resolvida, conforme Al-Qureshi<sup>(4)</sup>, para os intervalos correspondentes à parcela elástica, quando  $\mathbf{s}_x = E\mathbf{e}_x$  onde  $\mathbf{e}_x$  é dado pela Equação 1, e plástica, quando  $\mathbf{s}_x = \mathbf{s}_y$ . Com isso a seguinte relação entre os raios de curvatura é obtida:

$$\frac{R_n}{R_f} = 1 - 3 \left( \frac{\mathbf{s}_y R_n}{tE} \right) + 4 \left( \frac{\mathbf{s}_y R_n}{tE} \right)^3 \quad (5)$$

Já para o caso com encruamento dado pela lei de potência o mesmo procedimento fornece:

$$\frac{R_n}{R_f} = 1 - 8 \left( \frac{\mathbf{s}_y R_n}{nE} \right)^3 - \frac{3K}{(n+2)E} \left( \frac{t}{2R_n} \right)^{n-1} + \frac{24K}{(n+2)E} \left( \frac{t}{R_n} \right)^{n-1} \left( \frac{\mathbf{s}_y R_n}{tE} \right)^{n+2} \quad (6)$$

As Equações 5 e 6 foram baseadas em simplificações impostas em um estado de deformação geral, implicando que o estado de deformação modelado seja o uniaxial. Quando a largura  $b$  da chapa é muito maior que sua espessura  $t$ , a hipótese de deformação plana pode ser considerada. Neste caso o módulo de elasticidade  $E$  e a tensão de escoamento  $\mathbf{s}_y$  nas Equações 5 e 6 devem ser substituídos, para o caso do critério de escoamento de von Mises, por:

$$E' = \frac{E}{1 - \mathbf{u}^2} \quad \mathbf{s}'_y = \frac{2}{\sqrt{3}} \mathbf{s}_y \quad (7)$$

### 3. MODELAGEM NUMÉRICA

As principais dimensões do processo de dobramento modelado via Método dos Elementos Finitos são ilustradas na Figura 3. O comprimento  $b$ , a largura  $L$  e a espessura  $t$  adotada para a chapa foram respectivamente 600 mm, 300 mm e 1 mm. O ângulo de abertura da matriz  $\theta$  considerado foi de  $60^\circ$ . Para cada material estudado (elástico perfeitamente plástico e lei de potência), o raio  $R$  do punção assumiu os valores de 15, 20 e 25 mm.

Em ambos os modelos de material o módulo de elasticidade  $E$  adotado foi de 73 GPa, a tensão de escoamento  $\mathbf{s}_y$  de 100 MPa e o coeficiente de Poisson  $\mathbf{u}$  de 0,33. O coeficiente de resistência  $K$  e o expoente de encruamento  $n$  da lei de potência considerados foram respectivamente 600 MPa e 0,23.

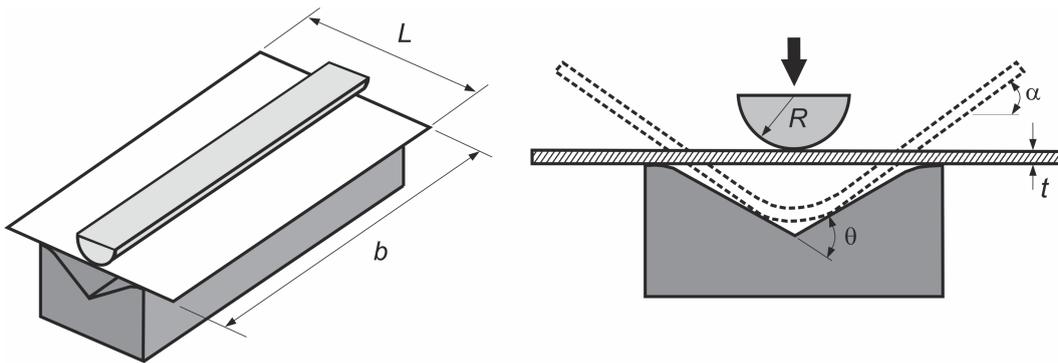


Figura 3. Esquema do processo de dobramento em V.

Todos os componentes foram modelados com elementos do tipo *SHELL* com nove pontos de integração ao longo da espessura. Apenas um quarto do modelo foi considerado aplicando-se condições de contorno apropriadas para satisfazer a simetria. Para o contato entre os componentes aplicou-se o algoritmo de contato *Penalty*, Ansys<sup>(5)</sup>, com escolha de parâmetros adequados e com um maior refinamento de malha nesta região. Na Figura 4 é mostrada a malha *SHELL* do conjunto matriz-chapa-punção expandida em seus planos de simetria. Em todos os casos o atrito foi desprezado; e os materiais da matriz e do punção são considerados rígidos.

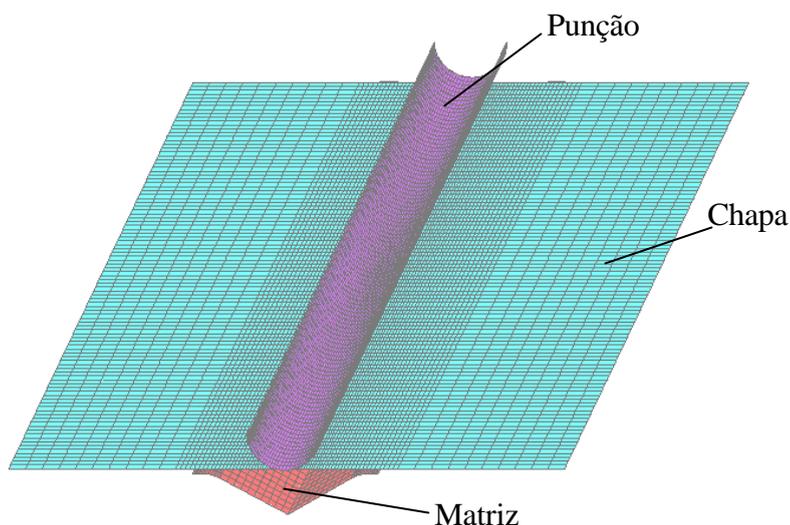


Figura 4. Malha *SHELL* do modelo de elementos finitos.

Na modelagem do dobramento é imposto um deslocamento no punção de forma que ao final do carregamento a chapa assuma a geometria do punção e da matriz sem que ocorra afinamento da espessura. Depois de efetuado o carregamento, um arquivo contendo as componentes de tensão nos pontos de integração ao longo da espessura de cada elemento é obtido. Estas tensões passam a compor o carregamento inicial para uma nova modelagem com a geometria da chapa atualizada na configuração deformada. Nesta etapa novas condições de contorno são aplicadas para permitir o retorno e o material da chapa é considerado puramente elástico.

A previsão numérica do raio de curvatura final  $R_f$  é realizada assumindo a hipótese, conforme Marciniak et al <sup>(6)</sup>, de que o comprimento do arco  $AB$  na Figura 5, quando submetido ao momento fletor  $M$ , permanece inalterado após o retorno elástico.

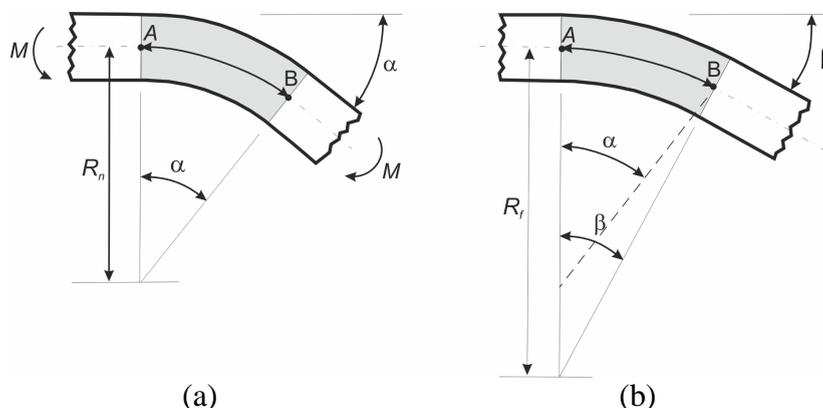


Figura 5. Esquema da alteração do raio de curvatura (a) situação inicial e (b) situação após o retorno elástico

Como o raio de curvatura inicial  $R_n$  é assumido ser o raio do punção e os ângulos: **a** antes do retorno e **b** após o retorno são determinados a partir dos resultados numéricos, tem-se uma estimativa para o raio de curvatura final  $R_f$  a partir da seguinte relação:

$$R_n \mathbf{a} = R_f \mathbf{b} \quad (8)$$

Os resultado numéricos obtidos a partir da Equação 8 foram comparados e discutidos com os resultados obtidos a partir do modelo analítico (Equações 5 e 6) conforme mostrado a seguir.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 6 ilustra a distribuição da tensão equivalente de von Mises na chapa com material dado pela lei de potência, para o punção com raio  $R$  20 mm. Este caso corresponde ao final do carregamento e pode-se notar que apenas a região central em contato com o punção é que apresenta altos níveis de tensões atingindo 270 MPa. A maior dificuldade nesta etapa foi garantir a convergência da simulação devido ao contato entre as partes.

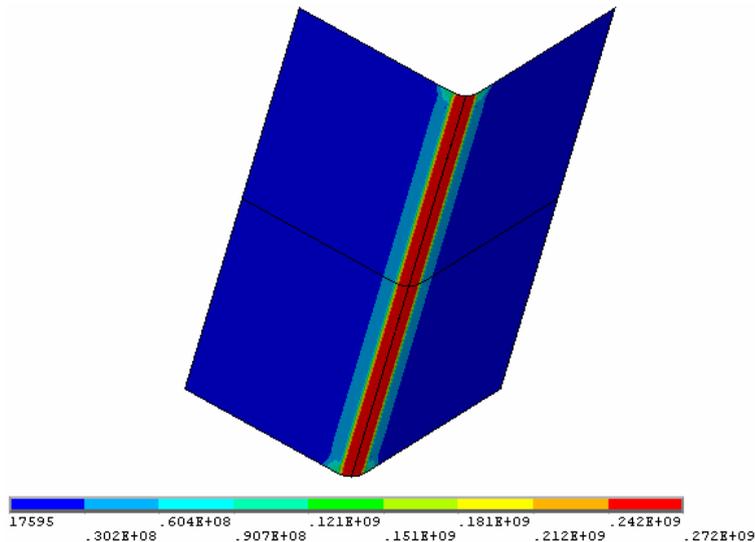


Figura 6. Tensão equivalente (Pa) antes do retorno.

Depois de efetuado o carregamento, a geometria da chapa foi atualizada na configuração deformada e um arquivo contendo as componentes de tensão nos pontos de integração ao longo da espessura de cada elemento é aplicado como carregamento inicial em uma nova modelagem com condições de contorno apropriadas para permitir o relaxamento da peça. A Figura 7 corresponde a esta nova modelagem e apresenta a distribuição da tensão equivalente após o retorno elástico. Neste caso houve uma redistribuição das tensões e seus valores máximos diminuíram para 95 MPa.

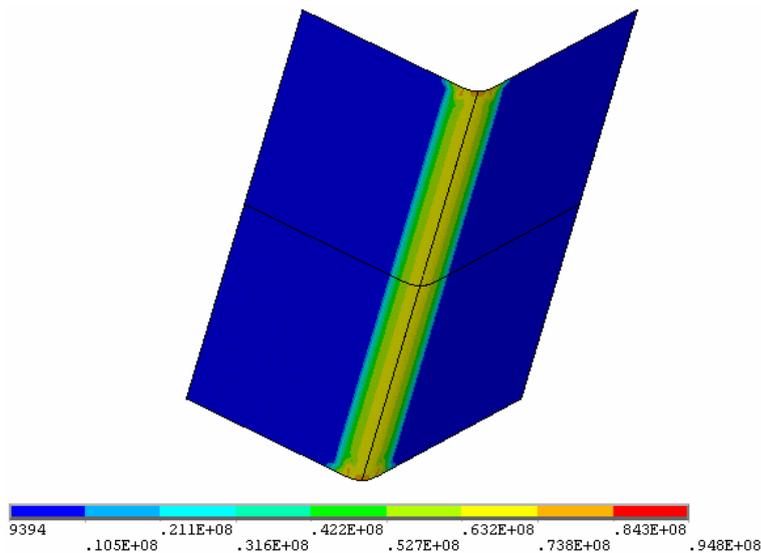


Figura 7. Tensão equivalente (Pa) após o retorno.

Os valores do raio de curvatura final  $R_f$  obtidos a partir do modelo analítico (Equações 5 e 6) e pelos resultados numéricos, via Método dos Elementos Finitos, são apresentados nas tabelas a seguir. No caso da solução dada pelo modelo analítico a hipótese de deformação plana é considerada. A Tabela 1 corresponde ao modelo de material elástico perfeitamente plástico. Neste

caso os resultados fornecidos pelo modelo numérico sobreestimam os do modelo analítico mas as diferenças observadas entre eles são pequenas (da ordem de 1%). Pode-se também observar que o retorno é mais acentuado com o aumento do raio de curvatura inicial.

Tabela 1. Resultados obtidos para o modelo de material elástico perfeitamente plástico.

| Modelo de Material     | Raio inicial (mm) | Raio final (analítico) (mm) | Raio final (numérico) (mm) |
|------------------------|-------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Perfeitamente Plástico | 15                | 16,01                       | 16,18                      |
|                        | 20                | 21,84                       | 22,03                      |
|                        | 25                | 27,95                       | 28,12                      |

Os resultados correspondentes ao modelo de material dado pela lei de potência são apresentados na Tabela 2. Neste caso os resultados numéricos subestimam os do modelo analítico e as diferenças observadas são da ordem de 13%. Pode-se também notar, comparando-se os resultados das Tabelas 1 e 2, a influência do modelo de material na previsão do retorno elástico.

Tabela 2. Resultados obtidos para modelo de material dado pela lei de potência.

| Modelo de Material | Raio inicial (mm) | Raio final (analítico) (mm) | Raio final (numérico) (mm) |
|--------------------|-------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Lei de Potência    | 15                | 17,34                       | 16,03                      |
|                    | 20                | 24,05                       | 22,20                      |
|                    | 25                | 31,24                       | 28,43                      |

## 5. CONCLUSÕES

A previsão acurada do retorno elástico em chapas dobradas via Método dos Elementos Finitos pode contribuir para uma compensação do ferramental ainda na fase de projeto. Desta forma torna-se possível garantir uma tolerância de projeto sem as etapas de tentativa e erro evitando problemas na montagem final de componentes dobrados.

O procedimento numérico adotado no presente trabalho foi satisfatório na previsão do raio de curvatura final de um dobramento em V quando comparado com soluções analíticas disponíveis na literatura. Os resultados obtidos mostram a influência do modelo de material na previsão do retorno elástico indicando a necessidade de se considerar um modelo elasto-plástico de encruamento mais refinado com parâmetros adequados que representem bem o comportamento do material.

O mesmo procedimento poderá ser aplicado no caso de geometrias mais complexas onde não é possível uma solução analítica. Para tal torna-se necessário à realização de ensaios experimentais, a serem realizados futuramente, para validar os resultados obtidos.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos - EESC-USP, pela utilização dos recursos do LaMAC – Laboratório de Mecânica Aplicada e Computacional, e ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

## 7. REFERÊNCIAS

1. DADRAS, P. Stress-Strain Relationships in Bending. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metal Handbook** : Mechanical Testing, Metals Park, Ohio, 1985, p. 118-124.

- 2.DADRAS, P.; MAJLESSI, S.A. Plastic bending ok work hardening materials. **Transactions of the ASME**, v. 104, p. 224-230, aug. 1982.
- 3.HILL, R. **The Mathematical Theory of Plasticity**. London: Oxford University Press, 1950.
- 4.AL-QURESHI, A.H. Processos e mecanismos da conformação dos metais. **Instituto Tecnológico da aeronáutica**. 1991.
- 5.ANSYS. Theory reference. **Ansys Incorporated**. 2002.
- 6.MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J. **Mechanics of Sheet Metal Forming**. London: Edward Arnold, 1992.

## **SPRINGBACK ANALYSIS OF SHEET IN BENDING PROCESS BY FINITE ELEMENT METHOD**

### **Alexandre Tácito Malavolta**

Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense 400, CEP 13566-590, São Carlos – SP. email : alexandr@sc.usp.br

### **Mariano Eduardo Moreno**

Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense 400, CEP 13566-590, São Carlos – SP. email : mmoreno@sc.usp.br

### **Sérgio Henrique Evangelista**

Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense 400, CEP 13566-590, São Carlos – SP. email : todody@sc.usp.br

### **João Lirani**

Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense 400, CEP 13566-590, São Carlos – SP. email : lirani@sc.usp.br

### **Hazim A. Al-Qureshi**

Universidade Federal de Santa Catarina, LabMAT, C.P. 476, CEP 88040-900, Florianópolis – SC. email : hazim@materiais.ufsc.br

***Abstract.** The bending process of sheet metals, among the metal forming processes, is one of the most used in the metal-mechanic industry. Therefore, through the prediction of the material behaviour during the process, it is possible to detect the manufacturing problems that arise, leading to low final mechanical performance of the parts. In bending of sheet profiles, usually the part undergoes a geometric distortion after its removal from the die. This effect, known as springback, can be harmful to the final assembly with other parts. In this work the springback problem in bent sheet metals by using Finite Element Method is analyzed. The numerical results are compared to analytical solutions from the literature. The contact problem and boundary condition are considered on the numerical model with the use of simplified hypotheses of analytical models. Thus, the main aspects involved in springback modeling of more complex parts are analyzed, along with discussion on the related problems and obtained results.*

***Keywords:** bending, finite element method, springback.*