

Processo de dobramento de chapas metálicas

Geraldo Magela Barbosa

Mestre em Engenharia - Escola Politécnica - USP;
Engenheiro Mecânico, licenciado em Matemática;
Professor do Departamento de Ciências Gerenciais - Uninove
São Paulo - SP [Brasil]
magela@uninove.br

Nesta pesquisa, estuda-se a solução analítica do momento de dobramento de uma chapa metálica sobre três cilindros. A simulação numérica computacional na obtenção do raio final de dobra é implementada com as formulações. Tensões residuais e retorno elástico são medidos e comparados com os resultados citados nas referências. Na formulação do problema, é mostrado que o momento de dobramento, as tensões internas e a distribuição elástica podem ser expressas em função de parâmetros geométricos (raio de dobramento e espessura) e propriedades do material (módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, coeficiente de resistência, expoente de encruamento). Os resultados teóricos serão comparados com os resultados experimentais.

Palavras-chave: Dobramento de chapas. Retorno elástico. Tensões residuais.



1 Introdução

O processo de conformação de chapas metálicas por dobramento tem sido usado amplamente nas indústrias em razão do bom acabamento superficial, redução de peso e baixo custo de fabricação.

Na dobra de chapas finas de metal, desde que observados os limites de conformabilidade do material, não deverá ocorrer fratura ou dano de algumas de suas propriedades mecânicas.

A alta taxa de produção de perfis variados por dobramento de chapas metálicas tem máxima importância na economia dos países industrializados, em particular na indústria automobilística.

As relações entre tensões e deformações são complexas no dobramento. Dessa forma, deve-se considerar primeiro a deformação e a tensão na região elástica. A análise e interpretação dos resultados devem levar em consideração a influência de variáveis metalúrgicas de acordo com ASM Handbook – Mechanical testing and evaluation (2000).

Segundo Helman e Cetlin (2005), o conhecimento da geometria, do grau de deformação e das tensões que atuam no material durante a conformação constitui valiosa ajuda na análise de possíveis causas de defeitos e fraturas, permitindo precaver formas de evitar tais inconvenientes.

Para Souza e Rolfe (2008), a variação dos parâmetros do material, de tensões e do expoente de encruamento causa muita influência no retorno elástico da chapa após o dobramento, e esses valores são muito maiores que o atrito de contato no processo de dobra.

Assim, pesquisas têm sido feitas no estudo de dobrar chapas metálicas, e a verificação do retorno elástico da chapa inicia-se com as soluções propostas para a dobra elastoplástica sob a condição de deformação plana, bem como análises mais aprofundadas do dobramento e do modelo, tais como a determinação das tensões, deformações,

retorno elástico e o encruamento, cujas magnitudes serão objeto de estudo deste trabalho.

2 Metodologia

Para atingir os objetivos propostos nesta pesquisa, optou-se pelo método analítico, que verificará o dobramento de uma chapa metálica envolvendo propriedades mecânicas do material e parâmetros geométricos da chapa.

Foram consultadas bibliografias de diversos autores da área de conformação, e, diante de vasto material atualizado, optou-se também por utilizar referências bibliográficas anteriores como no caso de Dieter (1986) e Tan et al. (1994) por serem consideradas essenciais para este trabalho.

Dessa forma, neste estudo, primeiro analisa-se o processo considerando soluções analíticas, que incorporam efeitos diversos, tais como encruamento do material e resistência ao escoamento num modelo de chapa fina de aço ABNT 1008. Nas relações constitutivas da elasticidade, será levada em consideração a lei de Hooke, e nas relações constitutivas da plasticidade, a lei de Hollomon. Serão incluídas deformações que não gerem danos à peça sendo dobrada.

Na solução analítica, utiliza-se, para cada geometria prescrita, o momento total de dobramento, somando-se uma componente relativa às deformações elásticas a outra relativa às componentes plásticas de deformações. Retirado o esforço de conformação, ocorre o retorno elástico da chapa, com mudança de geometria do produto conformado, e o desaparecimento das tensões elásticas.

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo sobre a modelagem do processo de dobramento de chapa fina do aço ABNT 1008 com espessura $t = 0,003\text{m}$, largura unitária e conformada por dobramento entre três cilindros.

O dobramento será feito a frio, e o material utilizado, considerado isotrópico com encruamento e homogêneo.

No cômputo do momento total, serão levadas em conta as relações constitutivas tanto na região elástica quanto na elastoplástica para cálculo da integral variando de $-\frac{t}{2}$ até $\frac{t}{2}$ na espessura da chapa.

Será implementado o método numérico computacional de Dicotomia (Bisseção), utilizando-se as formulações obtidas analiticamente, para determinar o raio final de dobramento após o retorno elástico da chapa.

Os valores de tensão interna e tensões residuais serão calculados mediante um raio final de dobramento $r_c = 0,135m$ em todas as posições na espessura da chapa fina.

O perfil das tensões residuais, obtido pelas formulações, será comparado com resultados experimentais de difração de raios-X.

3 Fundamentos do processo de dobramento

A mecânica da conformação metálica considera o material isotrópico e homogêneo. No entanto, na maioria dos casos, a deformação do metal entre as matrizes não é uniforme. O problema analítico principal consiste em prever, de forma precisa, a deformação não uniforme e calcular as tensões locais.

Como demonstrado na Figura 1, chapas finas têm os planos normais considerados planos durante a dobra, que converge até o centro de curvatura.

Nesse modelo, as direções principais de tensão e deformação coincidem com as direções normais, radiais e tangenciais, respectivamente, permitindo, assim, trabalhar apenas três variáveis em cada caso.

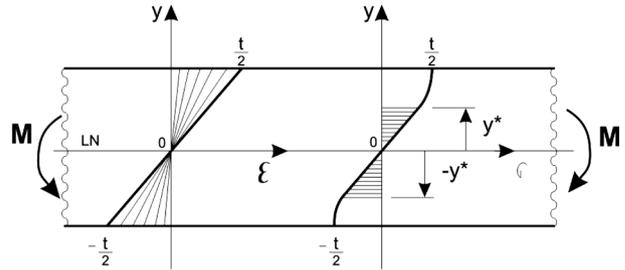


Figura 1: Tensão e deformação distribuídas em um elemento de chapa

Fonte: o autor.

As componentes de tração e cisalhamento são incluídas como esforço interno no dobramento. O momento de flexão nos diferentes estágios de dobra será determinado como solução no processo de conformação.

4 Relações constitutivas

As coordenadas principais de tensões e deformação estão relacionadas em regime elástico (BEER; JOHNSTON, 2008) e podem ser escritas pela lei de Hooke:

$$\epsilon_x^e = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)] \quad (1a)$$

$$\epsilon_y^e = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu (\sigma_z + \sigma_x)] \quad (1b)$$

$$\epsilon_z^e = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y)] \quad (1c)$$

Das relações acima citadas, ϵ^e é a deformação, e o expoente e mostra que as relações estão no regime elástico. Tem-se E como módulo de elasticidade [Pascal], ν como coeficiente de Poisson e σ como tensão [Pascal].



As componentes do tensor das tensões σ estão restritas às componentes tangencial x , radial y e normal z , conforme Figura 2.

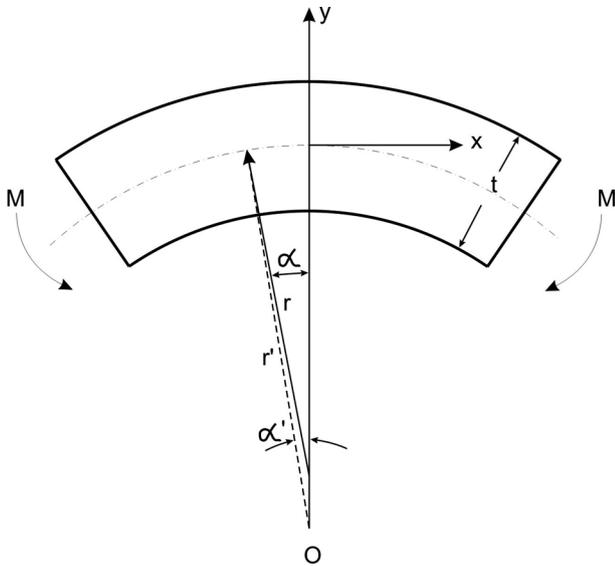


Figura 2: Representação do dobramento de chapas metálicas

Fonte: o autor.

Na deformação plana, a componente z pode ser considerada nula, lembrando que, quando as curvaturas aplicadas à chapa são muito grandes, as tensões σ_y são praticamente nulas e as equações se reduzem a:

$$\varepsilon^e_x = \frac{\sigma_x}{E'} \quad (2a)$$

$$\varepsilon^e_y = \frac{-\nu}{E} (1 + \nu) \sigma_x \quad (2b)$$

$$\varepsilon^e_z = 0 \quad (2c)$$

e que E = módulo de elasticidade [Pascal] e ν = coeficiente de Poisson, e $E' = \frac{E}{1 - \nu^2}$.

Esses equacionamentos são utilizados para determinação das componentes de deformação

plástica para materiais isotrópicos com carregamento contínuo. Usa-se também para a proporcionalidade entre deformações e tensões de cisalhamento principal.

$$\varepsilon^p_x = \frac{2K}{3} \left[\sigma_x - \frac{1}{2} (\sigma_y + \sigma_z) \right] \quad (3a)$$

$$\varepsilon^p_y = \frac{2K}{3} \left[\sigma_y - \frac{1}{2} (\sigma_z + \sigma_x) \right] \quad (3b)$$

$$\varepsilon^p_z = \frac{2K}{3} \left[\sigma_z - \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) \right] \quad (3c)$$

O valor $\frac{2K}{3}$ é conhecido como módulo de plasticidade.

Em que ε^p é a deformação, e o expoente p mostra que as relações estão no regime plástico. E que $\frac{2K}{3}$ é módulo de plasticidade $\left[\frac{1}{\text{Pascal}} \right]$, e σ , a tensão [Pascal].

Assumindo o volume constante no regime plástico, simplifica-se:

$$\varepsilon^p_x = \frac{K}{2} (\sigma_y - \sigma_x) \quad (4a)$$

$$\varepsilon^p_y = \frac{K}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \quad (4b)$$

$$\varepsilon^p_z = 0 \quad (4c)$$

Conforme Vladimirov, Pietryga e Reese (2009), a relação entre o endurecimento isotrópico e cinemático pode ser estabelecida por uma expressão exponencial. Pode-se analisar a

sensibilidade no momento de dobra em relação a parâmetros geométricos como o raio da ferramenta, a espessura da chapa e a relação entre o endurecimento isotrópico e cinemático.

Para Marciniak (2002), os valores equivalentes de tensão e deformação para a maioria dos metais podem ser correlacionados pela lei de Hollomon, que relaciona tensões e deformações por meio de uma expressão de potência equivalente.

$$\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n \tag{5}$$

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{3}{2}(\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \epsilon_z^2)} \tag{6}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2}(\sigma_x'^2 + \sigma_y'^2 + \sigma_z'^2)} \tag{7}$$

Nas equações, $\bar{\sigma}$ é a tensão equivalente [Pascal]; $\bar{\epsilon}$, a deformação equivalente; K , coeficiente de resistência [Pascal], e n , expoente de encruamento, sendo que essas expressões dependem somente do tensor de tensões desviadoras σ' , em que $\sigma'_x = \sigma_x - \sigma_b$; $\sigma'_y = \sigma_y - \sigma_b$; $\sigma'_z = \sigma_z - \sigma_b$; e que $\sigma_b = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}$.

As componentes radiais das tensões residuais são pequenas quando comparadas com as tangenciais, e escrevem-se:

$$\bar{\epsilon} \cong \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_x \tag{8}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{3}}{2}\sigma_x \tag{9}$$

5 Momento de dobramento

Considera-se que, durante o dobramento entre três cilindros no processo de conformação de chapas metálicas, cada seção passa por estados de deformação aos quais correspondem apenas tensões elásticas ou elastoplásticas.

Da posição A até a posição E, na Figura 3, observa-se que as tensões são pequenas na região elástica (MARCINIAK, 2002).

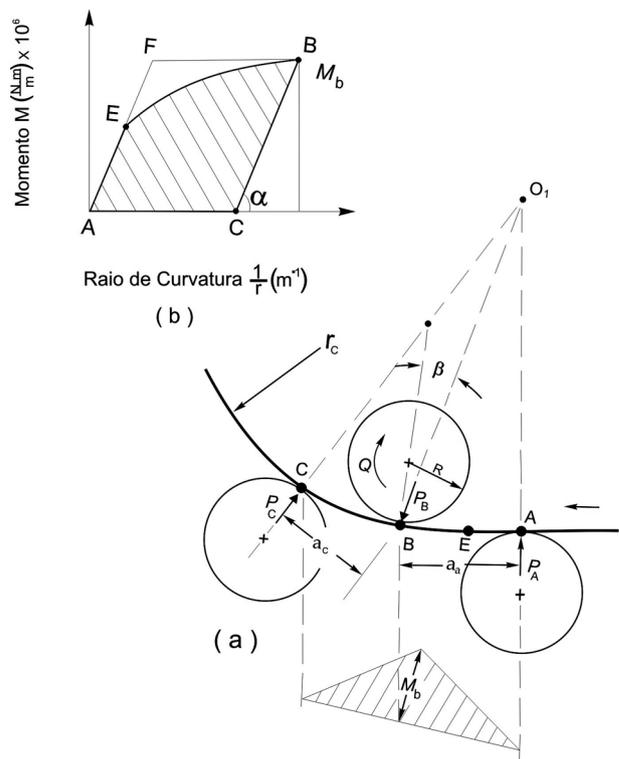


Figura 3: Dobramento de chapa sobre três cilindros

Fonte: o autor.

O dobramento ocorre a partir de zero, na posição A, até o momento máximo M_e de dobra na região elástica, na posição E, e o momento fletor é definido como

$$M = \int_{t/2}^{-t/2} \sigma_x y dy \tag{10}$$



Tem-se que M é o momento total de dobramento por unidade de largura [N.m/m]; t , a espessura da chapa [m]; σ , a tensão [Pascal], e y , a distância da linha neutra da chapa até a posição considerada [m].

Segundo Vin (2000), a curvatura de uma chapa pode ser estimada durante a aplicação do esforço de dobra, o que gera o momento de dobramento. Pode-se, inclusive, estimar a forma da curva da chapa na ponta do punção.

5.1 Momento - Região elástica

O momento na região elástica é definido por:

$$M_e = E' \frac{t^3}{12} \frac{1}{r} \quad (11)$$

E a tensão nesta região é representada por:

$$\sigma_x^e = E' \varepsilon_x^e \quad (12)$$

$$\varepsilon_x^e = 1n \left(1 + \frac{y}{r} \right) \cong \frac{y}{r} \quad (13)$$

Nestas relações, M_e é o momento na região elástica por unidade de largura [N.m/m], $E' = \frac{E}{1 - \nu^2}$ em que E é o módulo de elasticidade [Pascal]; t , a espessura da chapa [m], r , o raio de dobramento [m], σ_x^e , a tensão na região elástica [Pascal]; ε_x^e , a deformação; e , a região elástica, e y , distância da linha neutra da chapa até a posição considerada [m]. Nesse caso, não ocorre estiramento da chapa em razão do grande raio de dobramento.

5.2 Momento - Região elastoplástica

A partir da posição E, tem-se uma região de seção com tensões elásticas seguida de outra no estado elastoplástico.

$$\varepsilon_x^* = \frac{1 - \nu^2}{\sqrt{1 - \nu + \nu^2}} \left[\frac{K}{E} \right]^{\frac{1}{1-n}} \quad (14)$$

Em que ε_x^* é a deformação na região da chapa no regime elástico e elastoplástico; ν , o coeficiente de Poisson; K , o coeficiente de resistência [Pascal]; E , o módulo de elasticidade [Pascal], e n , o expoente de encruamento.

O resultado, em geral, é a supressão das condições elásticas e elastoplásticas que estariam presentes em qualquer seção após o ponto E.

O momento total de dobramento é:

$$M = M_e + M_p \quad (15)$$

$$M = 2 \int_0^{+y^*} \sigma_x^e y dy + 2 \int_{y_*}^{+t/2} \sigma_x^p y dy \quad (16)$$

Sendo

$$\sigma_x^e = \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot \frac{y}{r} \quad (17a)$$

$$\sigma_x^p = K \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n+1} \cdot \left(\frac{y}{r} \right)^n \quad (17b)$$

Nas equações acima, M é o momento total do dobramento por unidade de largura [N.m/m];

M_e , o momento na região elástica [N.m/m]; M_p , o momento na região elastoplástica [N.m/m]; σ_x^e , a tensão na região elástica [Pascal]; E , o módulo de elasticidade [Pascal]; ν , o coeficiente de Poisson; y , a distância da linha neutra da chapa até a posição considerada [m]; r , o raio de dobramento [m]; σ_x^p , a tensão na região elastoplástica [Pascal]; K , o coeficiente de resistência [Pascal], e n , o expoente de encruamento.

Resolvendo a integral, chega-se ao momento na região elastoplástica que depende de parâmetros do material (E , K , ν , n) e parâmetros geométricos (r , t):

$$M = 2Er^2 \left(\frac{K}{E} \right)^{\frac{3}{1-n}} \left\{ \frac{(1-\nu)^2}{3(1-\nu+\nu^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n+1}}{(n+2)} \left[\frac{(1-\nu^2)}{\sqrt{1-\nu+\nu^2}} \right]^{n+2} \right\} + \left(\frac{t}{r} \right)^n \frac{Kt^2}{(n+2)(\sqrt{3})^{n+1}}$$

(18)

Em que,

M = momento total de dobramento por unidade de largura [N.m/m]

E = módulo de elasticidade [Pascal]

K = coeficiente de resistência [Pascal]

ν = coeficiente de Poisson

n = expoente de encruamento

r = raio de dobramento [m]

t = espessura [m]

6 Retorno elástico

Segundo Dieter (1986), após a retirada do esforço aplicado para dobrar a chapa, ela terá um retorno elástico decorrente da ductilidade do material.

Seu retorno elástico, após o dobramento, ocasiona efeitos de mudança em alguns parâmetros, entre os quais o raio de dobramento e o ângulo de dobra, conforme Chan (2004).

Depois de a chapa passar pela máxima flexão na posição B (Figura 3), o momento de dobra decresce gradualmente até zero. Nessa fase de dobramento, as tensões tentam aliviar-se por meio da deformação da chapa dobrada, que, com o retorno elástico, apresenta tensões residuais.

De acordo com Asgari et al. (2008), dependendo das propriedades do material e dos parâmetros do processo de dobramento, há efeitos diferentes no retorno elástico de uma peça dobrada que podem ser estudados pelo modelo de elementos finitos com análise estatística.

Demonstra-se esse efeito considerando-se r_b e r_c os raios de dobramento antes e depois do retorno elástico da chapa, respectivamente; α_b , o ângulo de dobramento, e α_c , o ângulo após o retorno elástico.

Ao considerar que um elemento é deslocado a uma distância y de uma fibra neutra entre duas seções separadas por $\Delta l_b = (r_b + y) \cdot \alpha_b$, após o retorno elástico seu comprimento passa a ser $\Delta l_c = (r_c + y) \cdot \alpha_c$, em que $y \equiv y'$ e $r_b \alpha_b = r_c \alpha_c$, de forma que

$$\epsilon_{x(y)}^e = \frac{\Delta l_c - \Delta l_b}{\Delta l_b}$$

(19)

$$\epsilon_{x(y)}^e = \frac{y \cdot r_b}{r_b + y} \left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{r_b} \right)$$

(20)

Tem-se que $\epsilon_{x(y)}^e$ é a deformação após o retorno elástico da chapa; y , a distância da linha neutra da chapa até a posição considerada [m]; r_b , raio de dobramento [m], e r_c , raio de dobramento após o retorno elástico [m].

O momento do dobramento no retorno elástico é



$$M' = 2 \int_0^{t/2} \sigma_x^e y dy \quad (21)$$

$$M' = r_b E \left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{r_b} \right) b^2 \quad (22)$$

Em que

$$b^2 = -r_b t + r_b^2 l n \left(\frac{r_b + \frac{t}{2}}{r_b - \frac{t}{2}} \right) \quad (23)$$

Tem-se M' como o momento de dobramento no retorno elástico por unidade de largura [N.m/m].

Após o retorno elástico, o momento resultante é zero:

$$M + M' = 0 \quad (24)$$

De acordo com as equações (18) e (22), tem-se

$$\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_c} = \frac{M}{r_b E b^2} \quad (25)$$

Tensões residuais são redistribuídas, segundo o retorno elástico da chapa, depois de cessado o esforço aplicado para dobrá-la.

Essas tensões são obtidas superpondo a tensão elástica e a interna, conforme segue:

$$\sigma_{xr}(y) = \sigma_x(y) + \sigma_x^e(y) \quad (26)$$

$$\sigma_{xr}(y) = -\frac{yM}{(r_b + y)b^2} + K \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n+1} \cdot \varepsilon_x^{p^n} \quad (27)$$

Em que $\sigma_{xr}(y)$ é a tensão residual em qualquer posição na espessura da chapa [Pascal]; $\sigma_x(y)$, a tensão interna causada na chapa durante o dobramento [Pascal], e $\sigma_x^e(y)$, a tensão elástica na chapa após o descarregamento do dobramento [Pascal]. M é o momento total de dobramento por unidade de largura [N.m/m]; y , a distância da linha neutra até a posição considerada [m]; K , o coeficiente de resistência [Pascal]; n , o expoente de encruamento, e ε_x^p , a deformação na região elastoplástica.

7 Aplicações

As chapas são materiais caracterizados geralmente pela ductilidade e pela grande facilidade de conformação. Normalmente, não apresentam elevados valores para as propriedades mecânicas, isso porque as cargas que suportarão em serviço são comumente baixas, em geral o próprio peso. Em razão das condições de trabalho, esses produtos deveriam possuir certa resistência à corrosão atmosférica, e mesmo para determinadas aplicações, resistência ao ataque de outros agentes químicos.

Segundo Chiaverini (2008), os requisitos essenciais a que os materiais da chapa devem obedecer, para a maioria das aplicações, são os seguintes:

- Elevada trabalhabilidade, ainda que à custa da resistência mecânica, para maior facilidade de conformação. Quando se deseja certa resistência e principalmente rigidez, adota-se o corrugamento da chapa;
- Boa soldabilidade, para maior facilidade de sua montagem em estruturas;
- Superfície sem defeitos, essencial no caso de sua aplicação em estampagem profunda;

- Aspecto superficial conveniente, igualmente exigido para a maioria das aplicações e obtido por acabamentos ou revestimentos superficiais especiais;
- Baixo custo.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define chapa fina entre os “produtos laminados planos de aço-carbono”, como chapa com espessura compreendida entre 0,0003m e 0,006m, incluindo os extremos, e largura igual ou superior a 0,3m.

A maior parte do aço utilizado em chapas é do tipo de baixo carbono, cuja composição obedece aos seguintes limites:

Carbono: 0,03 a 0,12%

Manganês: 0,20 a 0,60%

Fósforo: 0,04% (máx)

Silício: 0,15% (máx)

Com as seguintes propriedades mecânicas:

Limite de escoamento: 180 a 225 MPa

Limite de resistência à tração: 285 a 340 MPa

Alongamento: 22% a 28% (até 40)

Dureza Brinell: 82 a 110

Os aços baixo carbono apresentam a melhor trabalhabilidade tanto no que se refere à sua obtenção por laminação como no que diz respeito à sua facilidade de conformação posterior.

O esforço aplicado em uma chapa plana de metal durante o dobramento muda sua forma (Figura 2), gerando tensões de tração na parte superior e tensões de compressão na parte inferior.

Depois de retirado o esforço de conformação, ocorre o retorno elástico à sua geometria alterada, resultando, a partir daí, a presença de tensões residuais na geometria final da chapa dobrada (BEER; JOHNSTON, 2008).

Técnicas de dobramento utilizadas em chapas planas de metal podem desenvolver variados perfis. Utilizam-se industrialmente os dobramentos em V, em U e em L por prensa de cortina ou prensa viradeira, além do dobramento entre três cilindros ou o dobramento em perfiladora. O uso de cada uma dessas técnicas depende do ferramental disponível e de especificidades do produto em questão.

Segundo Pereira et al. (2009), no processo de dobramento, deve-se analisar as condições de contato entre a chapa e o raio da matriz, a resistência do material que a compõe e a qualidade da chapa para predizer a vida da ferramenta usada no dobramento.

As expressões obtidas podem ser aplicadas para resolver o problema de dobra de chapas sobre três cilindros (Figura 3). Na aplicação, considera-se conhecido o raio dobramento final r_c de uma chapa no ponto C, e deseja-se calcular o máximo dobramento no ponto B, ou seja, o raio de dobramento inicial r_b que deverá ser a forma inicial da chapa dobrada.

Da equação (25), conclui-se que

$$\frac{M}{r_b E' b^2} + \frac{1}{r_c} - \frac{1}{r_b} = 0$$

(28)

Dessa forma, deseja-se ter o raio final $r_c = 0,135\text{m}$ após retirado o momento de dobramento (esforço aplicado).

Por meio da equação (25), obtém-se uma função que depende unicamente do raio de dobramento r_b e pode-se resolvê-la pelo uso de um método numérico computacional:

$$f(r_b) = \frac{M(r_b)}{r_b E' b^2(r_b)} + \frac{1}{r_c} - \frac{1}{r_b}$$

(29)



Adota-se o Método da Dicotomia por ser mais simples na obtenção das raízes de uma equação.

O algoritmo do Método da Dicotomia descreve que, para calcular um valor aproximado de uma raiz isolada $\bar{x} \in (a, b)$ da equação $f(x) = 0$, com certo grau de precisão $E > 0$, é necessário que a função satisfaça as hipóteses do Teorema da Existência e Unicidade:

- (i) a função $f(x)$ é contínua em (a, b)
- (ii) $f(a) \cdot f(b) < 0$ uma única raiz no intervalo

Verificado o Teorema, segue-se o algoritmo:

1° Para calcular $f(a)$ e $f(b)$ sem perda de generalidade foi admitido $f(a) < 0$ e $f(b) > 0$

2° Calcular $x_0 = \frac{a+b}{2}$ e $E_0 = \frac{b-a}{2}$

3° Se $E_0 \leq E$, x_0 é o valor procurado

4° Se $E_0 > E$, calcular $f(x_0)$

5° Se $f(x_0) = 0$, então x_0 é a raiz procurada

6° Se $f(x) < 0$, substitui-se o valor de a por x_0 e retorna-se ao 2° passo

7° Se $f(x) > 0$, substitui-se o valor de b por x_0 e retorna-se ao 2° passo

Mediante a função (29) para um aço ABNT 1008 com os seguintes valores:

$$E = 210 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0,33$$

$$K = 541 \text{ MPa}$$

$$n = 0,252$$

$$t = 0,003\text{m}$$

simula-se o raio de dobramento r_b pelo Método da Dicotomia (Bisseção), e, como solução numérica computacional mais simples para solução do problema, obtém-se os resultados da Tabela 1.

Por meio do Método da Dicotomia (Bisseção), e utilizando o equacionamento anterior, deve-se dobrar a chapa de aço ABNT 1008 com um raio de dobramento $r_b = 0,121\text{m}$ para obter, após o retorno elástico da chapa, raio final de dobramento de $r_c = 0,135\text{m}$.

As medições das tensões residuais por difração de raios-X foram obtidas do trabalho de Tan, Li e Persson (1994). A técnica da difração de raios-X, citada na Figura 4, tem como princípio a medição do espaçamento entre planos da rede cristalina dos materiais. Por meio do uso de feixes estreitos de raios-X, a medida é feita pela posição angular da linha de difração, a partir da lei de Bragg. Para mais detalhes do método veja, por exemplo, Dieter (1986) e Tan et al. (1994).

Obtêm-se, neste método, as principais tensões residuais:

- macrotensões (deslocamento do pico de difração de raios-X)
- microtensões (alargamento do pico de difração de raios-X)

Medidas feitas por difração de raios-X para o aço ABNT 1008, com espessura $t = 0,003\text{m}$ e raio final de dobramento $r_c = 0,135\text{m}$, resultaram para as tensões residuais (Figura 4) na forma característica em S. Essas tensões têm posições de picos tanto no lado positivo de tração quanto no negativo de compressão e ocorrem aproximadamente nas posições indicadas pela formulação analítica da equação (27).

As curvas de tensões residuais obtidas, de forma analítica e experimental, por difração

Tabela: 1 Solução pelo Método da Dicotomia para obter o raio de dobramento r_b :

n	a	b	$r_{b_n} = \frac{a+b}{2}$	$f(a)$	$f(r_{b_n})$	$f(b)$	$E_n = \frac{b-a}{2}$
0	0,12	0,16	0,14	-	+	+	0,02
1	0,12	0,14	0,13	-	+	+	0,01
2	0,12	0,13	0,125	-	+	+	0,005
3	0,12	0,125	0,1225	-	+	+	0,0025
4	0,12	0,1225	0,12125	-	+	+	0,00125
5	0,12	0,12125	0,120625	-	-	+	$6,25 \cdot 10^{-4}$
6	0,120625	0,12125	0,1209375	-	-	+	$3,125 \cdot 10^{-4}$
7	0,1209375	0,12125	0,12109375	-	-	+	$1,5625 \cdot 10^{-4}$
8	0,12109375	0,12125	0,12117187	-	+	+	$7,8125 \cdot 10^{-5}$
9	0,12109375	0,12117187	0,121132812	-	-	+	$3,90625 \cdot 10^{-5}$
10	0,121132812	0,12117187	0,1211523438	-	+	+	$1,953125 \cdot 10^{-5}$

Fonte: O autor.

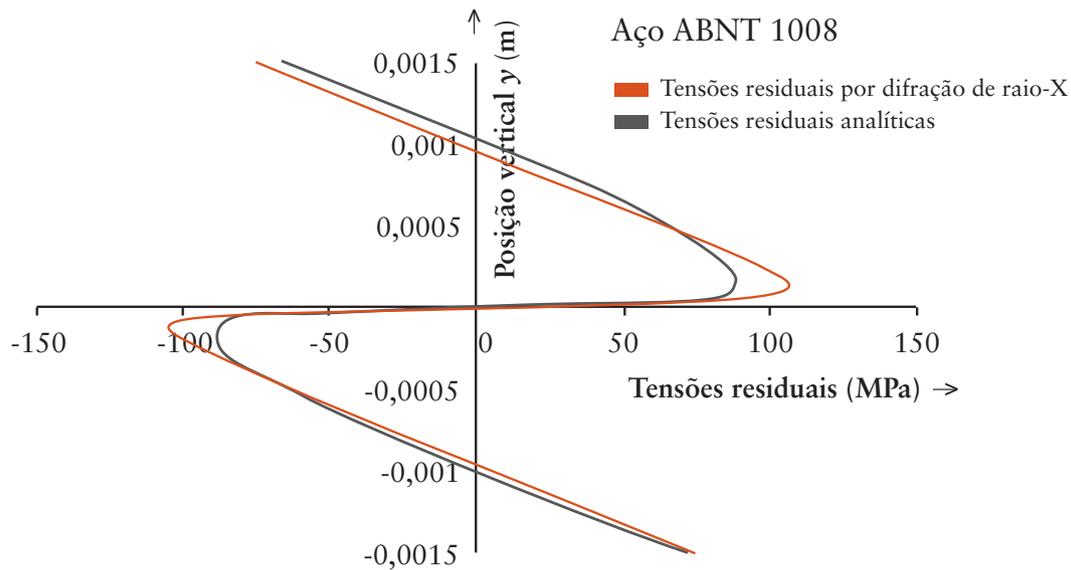


Figura 4: Comparação entre os valores de tensões obtidos analiticamente neste trabalho e os valores medidos experimentalmente por Tan, Li e Persson (1994)

Fonte: O autor.

de raios-X são idênticas, com resultados muito próximos.

8 Considerações finais

O trabalho apresentado produziu bons resultados e pode ser aplicado, de modo proveitoso, em

indústrias que utilizam a conformação de chapas metálicas por dobramento para fabricação de vários perfis de peças.

As medidas simuladas de forma computacional geraram, pelo equacionamento desenvolvido, resultados compatíveis com o esperado, podendo ser utilizadas por indústrias de conformação de chapas por dobramento sobre três cilindros.



Os resultados das tensões residuais obtidos pela formulação correspondem perfeitamente aos alcançados pela difração de raios-X, validando todo o processo.

Um desenvolvimento futuro para melhoria deste trabalho seria incluir efeitos de dano no material durante seu processamento e os fatores de anisotropia do material, considerar os efeitos de Bauschinger e incluir fatores de inércia na análise para verificar seu efeito no momento final das grandezas em questão.

Process of bending sheet metal

In this research, it is studied the analytical solution for the moment of bending of sheet metal on three cylinders. The computational numerical simulation to obtain the final radius of bending is implemented with the formulations. Residual stresses and springback are measured and compared with results cited in the references. In the problem formulation, it is shown that bending moment, distribution of residual stresses and springback can be expressed as a function of geometric parameters (radius of bend and thickness) and material properties (Young modulus, Poisson's ratio, resistance coefficient, work-hardening index). The theoretical results will be compared with the experimental results.

Key words: Sheet bending. Springback. Residual stresses.

Referências

ASM HANDBOOK, *Mechanical testing and evaluation*. 10 ed., v. 8. New York: Dana Medlin, 2000.

ASGARI, S. A. et al. Statistical analysis of finite element modeling in sheet metal forming and springback analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 203, n.1-3, p. 129-136, 2008.

BEER, F. P.; JOHNSTON JR, E. R. *Resistência dos materiais*. 3. ed. São Paulo: Makron Books, 2008.

CHAN, W. et al. Finite element analysis of springback of V-bending sheet metal forming processes. *Journal of Materials Processing Technology*. v. 148, n. 1, p.15-24, 2004.

CHIAVERINI, V. *Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamento térmicos, principais tipos*. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 2008.

DIETER, G. E. *Mechanical metallurgy*. 3. ed. New York: McGraw - Hill, 1986.

HELMAN, H.; CETLIN, P. R. *Fundamentos da conformação mecânica de metais*. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2005.

MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J. L.; HU, S.J. *Mechanics of sheet metal forming*. 2. ed. London: Butterworth-Heinemann, 2002.

PEREIRA, M. P. et al. Contact pressure evolution at the die radius in sheet metal stamping. *Journal of Materials Processing Technology*. v.209, n.7, p.3532-3541, 2009.

TAN, Z.; LI, W. B.; PERSSON, B. On analysis and measurement of residual stresses in the bending of sheet metal. *International Journal Mechanical Science*. v. 36, n. 5, p. 483-491, 1994.

VIN, L. J. Curvature prediction in air bending of metal sheet. *Journal of Materials Processing Technology*. v. 100, n. 1-3, p. 257-261, 2000.

VLADIMIROV, I. N.; PIETRYGA, M. P.; REESE, S. Prediction of springback in sheet forming by a new finite strain model with nonlinear kinematic and isotropic hardening. *Journal of Materials Processing Technology*. v. 209, n. 8, p. 4062-4075, 2009.

Recebido em 12 dez. 2008 / aprovado em 18 fev. 2009

Para referenciar este texto

BARBOSA, G. M. Processo de dobramento de chapas metálicas. *Exacta*, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 109-120, 2009.