



## MECANISMOS DO PROCESSO DE DOBRAMENTO CONTÍNUO POR ROLOS

**Anselmo Monteiro Ilkiu**

Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica

[ilkiu@uol.com.br](mailto:ilkiu@uol.com.br) – Taubaté, SP, Brasil

**Hazim Ali Al-Qureshi**

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Departamento de Engenharia Aeronáutica e Mecânica

[Hazim@mec.ita.cta.br](mailto:Hazim@mec.ita.cta.br) – São José dos Campos, SP, Brasil

**Resumo.** *O presente trabalho apresenta um modelo matemático para o processo de dobramento contínuo por rolos em chapas metálicas. Para a análise do modelo proposto assume-se a região elastoplástica que, durante o processo, apresenta uma geometria não regular que é considerada, aproximadamente, constante no desenvolvimento do presente trabalho. Consideram-se parâmetros importantes no desenvolvimento do modelo proposto, sendo os seguintes: a recuperação elástica da chapa após o processo de conformação; as forças principais do processo e a potência de acionamento. Esses parâmetros são determinados em função das propriedades mecânicas e geométricas da chapa metálica, da geometria da máquina para a execução do processo e dos parâmetros de anisotropia do material que, junto com os parâmetros de atrito entre o rolo e a superfície da chapa, são condições necessárias para o desenvolvimento do presente trabalho.*

**Palavras-chave:** *Anisotropia, Contínuo, Dobramento, Elastoplástica*

### 1. INTRODUÇÃO

O processo de dobramento contínuo por rolos tem importância fundamental na fabricação de peças de geometria cilíndricas ou cônicas conformadas a partir de chapas metálicas. Sua utilização no meio industrial data de longo tempo. Desde que o homem desenvolveu máquinas para a conformação de chapas já se pensava em escala industrial, na conformação de chapas por dobramento contínuo por rolos. As máquinas desenvolvidas para esse fim foram denominadas de calandras mecânicas.

As máquinas de dobramento contínuo são construídas em geral com três ou quatro rolos (Bouhelier, 1982). Na maioria das máquinas, os rolos são dispostos na horizontal, facilitando o processo de dobramento em chapas metálicas. Entretanto, também existem máquinas com rolos dispostos na vertical para operações especiais, como no caso de dobramento contínuo em barras de grandes dimensões, para a fabricação, por exemplo, de anéis e grandes cremalheiras para a operação de fornos rotativos e afins, e para o dobramento contínuo de perfis laminados na formação de arcos utilizados na construção civil e mecânica.

Na conformação de chapas metálicas, as máquinas são fabricadas em função da espessura admissível de dobramento e da largura útil de dobramento. As espessuras admissíveis de

trabalho podem chegar até 250mm e a largura útil de dobramento até 6m (Bouhelier, 1982, Klein, 1979), sendo que o limite é fornecido pelo fabricante da máquina e está relacionado com sua potência e rigidez.

Em geral, o processo de dobramento contínuo é executado a frio, porque no processo a quente parâmetros como: tolerâncias dimensionais e controle do processo de fabricação são difíceis de serem controlados.

Um dos parâmetros importantes no processo é a porcentagem de deformação. O cálculo, desse parâmetro, pode ser efetuado de acordo com o código ASME Section VIII, 1995, que define a porcentagem de deformação dada pela equação,

$$d(\%) = \frac{100 \cdot h}{R_f} \left( 1 - \frac{R_f}{R_i} \right), \quad (1)$$

sendo: (d) a porcentagem de deformação; (Rf) o raio final de dobramento; (Ri) o raio inicial da peça, para chapa plana  $R_i \rightarrow \infty$ , e (h) metade da espessura da chapa.

O resultado obtido pela Eq. (1) deve ser comparado com o alongamento admissível fornecido pelo fabricante da chapa, onde o valor da porcentagem de deformação determinada por essa equação, deve ser menor que o alongamento admissível do material.

## 2. PRESENTE TEORIA

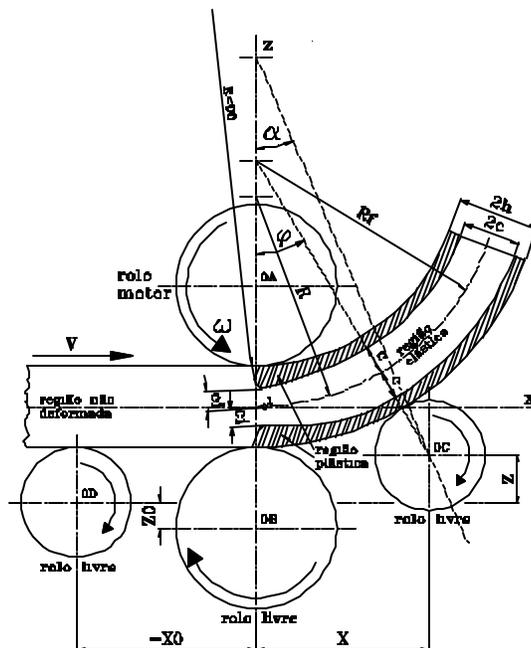


Figura 1 – Geometria do processo para o modelo proposto

Na presente teoria, considera-se a anisotropia normal do material definida por  $(\bar{R})$  que é obtida por meio de ensaios de tração simples, conforme apresentada nos trabalhos desenvolvidos por Al-Qureshi (1985) e Pearce (1968). Considera-se o atrito ( $\mu$ ) na região de contato entre o rolo superior (rolo de acionamento) e a superfície da chapa, obtido através da análise da tensão de cisalhamento ao escoamento do material em função da pressão de contato nessa região (Al-Qureshi, 1985, Borelli, 1993). Considera-se a equação empírica que define a relação entre a tensão efetiva e a deformação efetiva, obtida por Swift e apresentada nos

trabalhos de Johnson e Mellor (1978) e modificada, no presente trabalho, para atender as condições de contorno e as hipóteses assumidas pela presente teoria (Ilkiu, 2000).

## 2.1 Desenvolvimento teórico

Analisando a Fig. 1, verifica-se que o raio de dobramento no início do processo tende a um valor infinito,  $R \rightarrow \infty$ . Sendo assim, antes do início do processo a chapa é considerada plana. Logo após o início do processo, em função da recuperação elástica do material, o raio de dobramento efetivo ( $R$ ) tende para o valor final ( $R_f$ ) e a distância ( $ci$ ), do eixo neutro ao contorno elastoplástico, tende para a distância ( $c$ ) que passa a ser constante até o final do processo.

Considerando os parâmetros do processo e da máquina, assume-se que o ângulo ( $\alpha$ ) e as dimensões ( $X_0$ ) e ( $Z_0$ ) são dados da máquina. Entretanto, o ângulo ( $\varphi$ ) e as dimensões ( $X$ ) e ( $Z$ ) são dados do processo, variando para cada raio de dobramento a ser analisado. Antes do início do processo, tem-se a região não deformada na chapa, podendo apresentar encruamento inicial devido ao processos anteriores (Al-Qureshi, 1985). Durante o processo são criadas as regiões elástica e plástica definidas pelo contorno elastoplástico.

Para a análise da região elástica, considera-se a seção transversal de uma chapa em flexão pura, obtendo-se que a tensão na direção do eixo  $x$  será dada pela equação,

$$\mathbf{s}_x = \frac{E \cdot z}{R \cdot (1 - \mathbf{n}^2)}, \text{ para } 0 \leq z \leq ci, \quad (2)$$

sendo ( $E$ ) o módulo de elasticidade do material e ( $\nu$ ) o coeficiente de Poisson.

No contorno elastoplástico se inicia o escoamento do material. Sendo assim, a tensão ( $\sigma_x$ ) será igual a tensão de escoamento do material ( $\sigma_e$ ). Considerando as condições de contorno no critério de escoamento proposto por Hill (1967), baseado no critério de escoamento de von Mises com anisotropia normal ( $\bar{R}$ ), conforme apresentado por Al-Qureshi (1985), obtém-se que a distância ( $ci$ ) será dada pela equação,

$$ci = \frac{R \cdot \mathbf{s}_e \cdot (1 - \mathbf{n}^2)}{E \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{2 \mathbf{n} \bar{R}}{1 + R} \right) + \mathbf{n}^2}}. \quad (3)$$

Analisando-se a região elástica, verifica-se que o momento será obtido pela equação:

$$Me = 2 \cdot b \cdot \int_0^{ci} \frac{E}{R \cdot (1 - \mathbf{n}^2)} \cdot z^2 \cdot dz = \frac{2 \cdot b \cdot R^2 \cdot \mathbf{s}_e^3 \cdot (1 - \mathbf{n}^2)^2}{3 \cdot E^2 \cdot \left( 1 - \left( \frac{2 \mathbf{n} \bar{R}}{1 + R} \right) + \mathbf{n}^2 \right)^{\frac{3}{2}}}. \quad (4)$$

Para a análise da região plástica considera-se o equação empírica, obtida para o modelo proposto, dada pela equação,

$$\mathbf{s}_r = \mathbf{s}_e \cdot \left( \boldsymbol{\omega} + \frac{E}{\mathbf{s}_e} \cdot \mathbf{e}_r \right)^n. \quad (5)$$

Na presente teoria, considera-se que na região de deformação plástica ( $\epsilon_p$ ) haverá um acréscimo de deformação elástica ( $\Delta\epsilon$ ) induzida durante o processo sendo que, esse acréscimo de deformação será recuperado com parte da deformação elástica contida entre as regiões plásticas. Analisando-se o modelo proposto, obtém-se que a deformação efetiva total para o modelo será dada pela equação,

$$\mathbf{e}_r = \Delta\mathbf{e} + \mathbf{e}_p, \quad (6)$$

As Eq. de ( $\Delta\epsilon$ ) e ( $\epsilon_p$ ) são obtidas analisando-se a Eq. (3), para as seguintes condições de contorno: a) para  $ci = h$ , região totalmente elástica,  $\Delta\epsilon = z.ke$ , onde a curvatura elástica será dada por  $ke = 1/Re$ ; b) no contorno elastoplástico, início do escoamento plástico,  $\epsilon_p = z.k$ , onde a curvatura será dada por  $k = 1/R$ . Substituindo-se as Eq. de ( $\Delta\epsilon$ ) e ( $\epsilon_p$ ) na Eq. (6) e simplificando, tem-se:

$$\mathbf{e}_r = z. \left[ \frac{\mathbf{s}_e.(1-\mathbf{n}^2)}{E.\sqrt{1-\frac{2.R\mathbf{n}}{1+R}}+\mathbf{n}^2} \left( \frac{2}{\sqrt{3}.ci} \sqrt{\frac{2+\bar{R}}{1+2.R}} + \frac{1}{h} \right) \right], \text{ para } ci \leq z \leq h. \quad (7)$$

Substituindo a Eq. (7) na Eq. (5) e analisando-se a região plástica, obtém-se que o momento na região plástica será dado pela equação,

$$Mp = 2.b \int_{ci}^h \mathbf{s}_e \cdot \left[ \mathbf{e} + \frac{z.(1-\mathbf{n}^2)}{\sqrt{1-\frac{2.R\mathbf{n}}{1+R}}+\mathbf{n}^2} \left( \frac{2}{\sqrt{3}.ci} \sqrt{\frac{2+\bar{R}}{1+2.R}} + \frac{1}{h} \right) \right] \cdot z.dz. \quad (8)$$

A solução da Eq. (8) será dada pela equação,

$$Mp = \frac{1}{(E.A)^2.(1+n).(2+n)} \left\langle 2.b.\mathbf{s}_e \cdot \left[ \begin{array}{l} - \left[ \mathbf{e} + \frac{ci.E.A}{\mathbf{s}_e} \right]^n \cdot [ci.E.A.(1+n) - \mathbf{e} \cdot \mathbf{s}_e] \cdot [ci.E.A + \mathbf{e} \cdot \mathbf{s}_e] + \\ \left[ \mathbf{e} + \frac{E.h.A}{\mathbf{s}_e} \right]^n \cdot [E.h.A.(1+n) - \mathbf{e} \cdot \mathbf{s}_e] \cdot [E.h.A + \mathbf{e} \cdot \mathbf{s}_e] \end{array} \right] \right\rangle \quad (9),$$

sendo:

$$A = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{4.(2+\bar{R})}{3.(1+2.\bar{R})}} + \frac{\mathbf{s}_e.(1-\mathbf{n}^2)}{E.h.\sqrt{1-\frac{2.R\mathbf{n}}{1+R}}+\mathbf{n}^2} \quad \text{e} \quad \mathbf{s}_e = \mathbf{s}_{et} \cdot \sqrt{\frac{4.(1+\bar{R})}{5+\bar{R}}}$$

O momento total ( $M_i$ ), é obtido somando-se as Eq. (4) e (9).

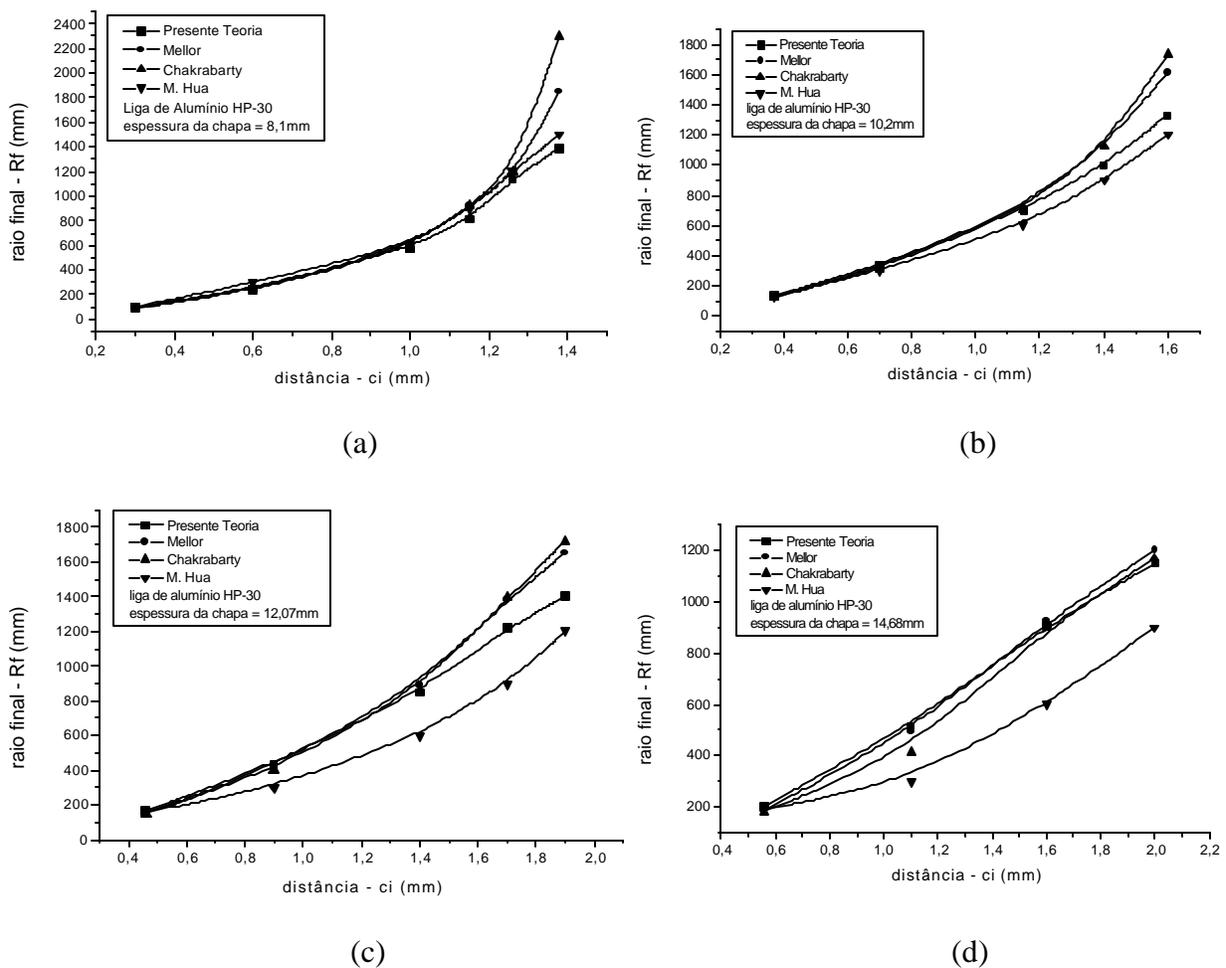
A recuperação elástica é um parâmetro importante na análise do processo de dobramento contínuo por rolos. A análise, dessa recuperação, é feita baseando-se nas teorias elásticas resultando na equação que define o raio final de dobramento ( $R_f$ ), em função do momento ( $M_i$ ), do módulo de elasticidade ( $E$ ), do raio de dobramento ( $R$ ) e do momento de inércia da seção transversal ( $I_y$ ). Logo, o raio final ( $R_f$ ) será dado pela equação,

$$R_f = \frac{R.E.I_y}{E.I_y - M_i.R}. \quad (10)$$

### 3. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS TEÓRICOS

Hua e outros (1997)(1999) consideraram, para a análise teórica, a liga de alumínio HP-30 com quatro espessuras diferentes: 8,1mm; 10,2mm; 12,07mm e 14,68mm e largura de dobramento  $b=80,5\text{mm}$ , com as seguintes características: tensão de escoamento  $\sigma_{et}=215\text{ N/mm}^2$ ; módulo de elasticidade  $E=67190\text{ N/mm}^2$ ; coeficiente de Poisson  $\nu=0,34$ ; coeficiente de encruamento  $n=0,364$ ; coeficiente de anisotropia  $\bar{R}=1$ .

Considerando os mesmos dados obtidos por Hua e outros (1999) nas equações de Johnson e Mellor (1978) e Chakrabarty (1987), para o estado plano de deformações, e nas equações da presente teoria, podem ser traçados os gráficos apresentados nas Figuras a seguir, comparando-se os resultados para a distância (ci) com relação ao raio final de dobramento (Rf).



Figuras 2a, b, c e d – Comparação dos resultados na determinação da distância (ci), em função do raio final de dobramento (Rf)

### 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

No presente trabalho foram analisados, em tração simples e pelo dobramento contínuo por rolos três materiais, com o objetivo de verificar o comportamento dos resultados teóricos e experimentais para diferentes propriedades mecânicas e geométricas. Os resultados dos ensaios de tração simples estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados experimentais do ensaio de tração simples, larguras e espessuras das chapas para o dobramento contínuo

n°	Material	Espessura	Largura	Coef. de encr.(n)	$\sigma_{et}$	K	E	Coef. de Poisson(v)	Anisotr.
		(mm)	(mm)		(N/mm <sup>2</sup> )				
1	aço inoxidável	1,58	100	0,29	276	1500	209860	0,31	1,08
2	cobre	0,8	100	0,332	78	600	93450	0,34	0,81
3	liga de alumínio	0,8	100	0,224	34	170	73260	0,36	0,76

Os ensaios de dobramento contínuo foram realizados em uma máquina de potência igual a 1,5 kW com diâmetros dos rolos iguais a 90mm, foram ensaiados seis corpos-de-prova para cada material, os raios de dobramento e os resultados experimentais e teóricos, para cada material, estão apresentados nas Tabelas a seguir:

Tabela 2 – Resultados experimentais e teóricos para o aço inoxidável, material n.º 1

CDP n°	Raio efetivo R (mm)	Raio experimental Rf <sub>1</sub> (mm)	Raio teórico (anisotrópico) Rf <sub>2</sub> (mm)	Raio teórico (isotrópico) Rf <sub>3</sub> (mm)	Desvio (Rf <sub>1</sub> e Rf <sub>2</sub> ) (%)	Desvio (Rf <sub>1</sub> e Rf <sub>3</sub> ) (%)
1	80,0	133,5	128,3	127,8	4,1	4,5
2	80,0	132,2	128,3	127,8	3,1	3,5
3	80,0	136,4	128,3	127,8	6,3	6,7
4	100,0	189,3	179,9	178,9	5,2	5,8
5	100,0	186,4	179,9	178,9	3,6	4,2
6	100,0	192,2	179,9	178,9	6,8	7,4

Tabela 3 – Resultados experimentais e teóricos para o cobre, material n.º 2

CDP n°	Raio efetivo R (mm)	Raio experimental Rf <sub>1</sub> (mm)	Raio teórico (anisotrópico) Rf <sub>2</sub> (mm)	Raio teórico (isotrópico) Rf <sub>3</sub> (mm)	Desvio (Rf <sub>1</sub> e Rf <sub>2</sub> ) (%)	Desvio (Rf <sub>1</sub> e Rf <sub>3</sub> ) (%)
1	80,0	141,0	149,2	151,2	5,5	6,7
2	80,0	138,2	149,2	151,2	7,4	8,6
3	80,0	134,5	149,2	151,2	9,9	11,0
4	100,0	198,3	218,7	222,8	9,3	11,0
5	100,0	201,8	218,7	222,8	7,7	9,4
6	100,0	193,5	218,7	222,8	11,5	13,2

Tabela 4 – Resultados experimentais e teóricos para a liga de alumínio, material n.º 3

CDP n.º	Raio efetivo R (mm)	Raio experimental Rf <sub>1</sub> (mm)	Raio teórico (anisotrópico) Rf <sub>2</sub> (mm)	Raio teórico (isotrópico) Rf <sub>3</sub> (mm)	Desvio (Rf <sub>1</sub> e Rf <sub>2</sub> ) (%)	Desvio (Rf <sub>1</sub> e Rf <sub>3</sub> ) (%)
1	100,0	135,8	141,2	142,7	3,8	4,8
2	100,0	132,6	141,2	142,7	6,1	7,1
3	100,0	134,4	141,2	142,7	4,8	5,8
4	150,0	239,2	250,9	255,6	4,7	6,4
5	150,0	236,5	250,9	255,6	5,7	7,5
6	150,0	249,4	250,9	255,6	0,6	2,4

## 5. CONCLUSÕES

A presente teoria, desenvolvida para a análise dos mecanismos do processo de dobramento contínuo por rolos, apresenta resultados importantes no que se refere aos ensaios experimentais e teóricos considerados no presente trabalho, como também, em relação à comparação dos resultados teóricos obtidos por pesquisadores da área de conformação e da teoria clássica de plasticidade. Os aspectos mais importantes apresentados no presente trabalho são os seguintes: a) Anisotropia normal: a importância do parâmetro de anisotropia normal é observada nos resultados apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4, onde verifica-se que os resultados teóricos obtidos considerando esse parâmetro estão mais próximos dos resultados experimentais. Entretanto, as teorias existentes, para a análise dos mecanismos do processo de dobramento contínuo por rolos, não consideram esse parâmetro em seus modelos; b) Materiais: os materiais adotados, para os ensaios experimentais, foram escolhidos de modo a verificar os diferentes resultados em função das características mecânicas e das dimensões dos corpos-de-prova. Nesse aspecto conclui-se que a escolha do material deve levar em consideração os resultados uniformes obtidos após os ensaios. Esse aspecto define o comportamento do material na fabricação de várias peças, do mesmo material, conformadas pelo processo de dobramento contínuo por rolos.

As comparações teóricas apresentadas nas Fig. 2 mostram o comportamento dos resultados, para diferentes teorias, para a análise da liga de alumínio HP-30. Esses resultados apresentam uma coerência de comportamento, podendo-se considerar, que as equações da presente teoria são válidas para a aplicação e pré-análise do processo de dobramento contínuo por rolos, essa constatação é confirmada nos resultados experimentais apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4.

Os coeficientes de atrito, analisados para cada material quanto aos resultados experimentais, são obtidos através de métodos experimentais ou obtidos na literatura para cada condição de contato (material do rolo e da chapa). No presente trabalho, o coeficiente de atrito máximo é determinado pela análise da tensão de cisalhamento de escoamento para a condição de contato (rolo e superfície da chapa). No presente trabalho determinou-se que o coeficiente de atrito máximo é igual a  $\mu = 1/\sqrt{3}$ .

Acredita-se que o presente trabalho possa ser utilizado como mais uma fonte de consulta na análise do processo, bem como, apresenta mais uma alternativa de análise e pesquisa além dos trabalhos já existentes nessa área.

## **Agradecimentos**

Ao Professor Dr. Hazim Ali Al-Qureshi, pela orientação dada no desenvolvimento desse trabalho.

À Universidade de Taubaté – UNITAU, pelo apoio e pela ajuda financeira providencial no desenvolvimento desse trabalho.

## **REFERÊNCIAS**

- Al-Qureshi, H. A., 1985, Apostilas de plasticidade e mecanismos de conformação mecânica dos metais, publicação interna do Instituto Tecnológico de Aeronáutica.
- ASME, 1995, Boiler and Pressure Vessel Code – Section VIII Div. 1.
- Boresi, A. P., Schmidt, R. J. and Sidebottom, O. M., 1993, Advanced Mechanics of Materials, Johns Wiley & Sons, Inc.
- Bouhelier, C., 1982, Le formage des tôles fortes, CETIM.
- Chakrabarty, J., 1987, Theory of Plasticity, McGraw-Hill.
- Hill, R., 1967, The Mathematical Theory of Plasticity, OXFORD University Press.
- Hua, M., Baines, K., Cole, I. M. and Rao, K. P., 1997, A formulation for determining the single-pass mechanics of the continuous four-roll thin plate bending process, Journal of Materials Processing Technology 67, p. 189-194.
- Hua, M., Baines, K. and Cole, I. M., 1999, Continuous four-roll plate bending, International journal of Machine Tools & Manufacture 39, p. 905-935
- Ilkiu, A. M., 2000, Mecanismos do processo de dobramento contínuo por rolos, dissertação de tese de Doutorado no Instituto Tecnológico de Aeronáutica.
- Johnson, W. and Mellor P. B., 1978, Engineering Plasticity, Van Nostrand, London.
- Klein, W., 1979, Technologie du cintrage de tôle, Blech-Rohre-Profile, Vol. 25, n.º 10 et 12, n.º 6 et 9.
- Pearce, R., 1968, Some aspects of anisotropic plasticity in sheet metals, International Journal Mech. Sci, Vol. 10, p. 995-1005.

*Abstract. The present work presents basically mathematical modelling of bending of sheet metal using roll forming process. In this analysis it is assumed that the elastic-plastic region during the rolling process varies in sinuous form which was approximated by a constant variation.*

*The theory predicts a number of factors which are normally important to the bending operation, such as roll separating force, spring-back and horse power. These parameters are functions of mechanical properties and geometry of the materials, friction and geometry of the rolls and also the types of the roll machine. It was found that the friction condition and the anisotropy of the metal played an important part in predicting the theoretical values. This will be discussed in detail in the text.*

*Experiments were also performed on various materials having different work hardening conditions, such as stainless steel, copper and aluminium alloys. Comparisons between the predicted value from the present theory and the experimental results of roll bending using three rolls were found to be in good agreement.*

*Other relevant parameters to this process were also examined.*