

MODELAGEM E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA DEFORMAÇÃO PARA CÁLCULO DE PARÂMETROS DE REFERÊNCIA EM PROCESSOS DE LAMINAÇÃO A FRIO¹

Péricles G. Alves²
Elder M. Hemerly²

Resumo

Modelos matemáticos de laminação a frio têm sido amplamente desenvolvidos nas últimas seis décadas. Com o advento da automação industrial, a utilização de tais modelos nos sistemas de geração de referências ilustra a sua aplicabilidade no controle de processo de laminadores tandem. Um modelo baseado no trabalho de Ford é apresentado e comparado com um método simplificado utilizado em laminadores reais. Este modelo pode ser utilizado, por exemplo, no desenvolvimento de um simulador para o projeto de controladores de espessura em laminadores tandem.

Palavras-chave: Modelagem matemática; Simulação numérica; Laminação a frio; Laminador tandem.

MODELING AND NUMERICAL SIMULATION OF THE DEFORMATION FOR CALCUL OF SET-UP PARAMETERS IN PROCESSES OF COLD ROLLING

Abstract

Mathematical models of cold rolling have been largely developed in the last six decades. With the advent of the industrial automation, the utilization of those models in setup generation systems show their applicability in the tandem mill process control. A model based in the Ford's work is described and compared with a simpler model used in real mills. This model can be used, for example, on the development of a simulator for the project of thickness controllers in tandem mill.

Key words: Mathematical modeling; Numerical simulation; Cold rolling; Tandem mill.

¹ Contribuição técnica ao Seminário 44^o Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos.

² Departamento de Sistemas e Controle, Divisão de Engenharia Eletrônica – ITA, Pça. Marechal Eduardo Gomes, 50 – 12.228-900 – São José dos Campos – SP, E-mails: pericles@ita.br, hemerly@ita.br

1 INTRODUÇÃO

Na indústria siderúrgica, tem-se observado a introdução contínua de novas tecnologias, buscando adequar o produto oferecido às especificações de qualidade solicitadas com tolerâncias cada vez mais difíceis de serem atingidas. Uma etapa de grande relevância no processo siderúrgico é a Laminação a Frio, onde o controle das características dimensionais, como a espessura da tira e sua planicidade, tem sido o foco principal. A uniformidade dimensional da tira é uma exigência muito importante na aplicação deste produto em indústrias automobilísticas, aeronáuticas e de eletrodomésticos, pois o mesmo será submetido a processos de conformação mecânica.

O atendimento às exigências de qualidade no processo de Laminação a Frio fornece um cenário onde a melhoria na automação dos Laminadores Tandem é essencial. A automação de laminadores obedece à arquitetura piramidal,⁽¹⁾ organizadas em níveis hierárquicos. O nível 0 é constituído por sensores e atuadores, que colhem informações do processo e atuam no mesmo propiciando as correções solicitadas pelos controladores. No nível 1 encontram-se as malhas de controle de espessura, planicidade, coroamento térmico e cedagem, constituindo-se a parte dinâmica do sistema. No nível 2 encontramos os Sistemas Geradores de Referência para as malhas de controle do nível 1.

O bom desempenho destes sistemas de controle é de importância vital para a eficiência do processo. O aperfeiçoamento de estratégias de controle já empregadas e o estudo de novas aplicações constituem atividades inerentes ao desenvolvimento dos equipamentos.

Tipicamente o estudo das aplicações dos sistemas de controle é inicialmente efetuado através de simulação digital, principalmente se o processo a ser controlado apresenta grandes dimensões ou apresenta inviabilidade economicamente para a realização de testes ou ensaios. Os laminadores se enquadram nos dois casos.

Na simulação de laminadores tandem é essencial a definição de duas etapas do processo, o sistema de AGC, *automatic gauge control*, que responde pela parte dinâmica do sistema, seus sensores, atuadores e como são interligados ao processo e o modelo de deformação, parte estática do sistema, que tem a função de calcular parâmetros de processo, como por exemplo, a força de laminação. O modelo aqui tratado apresenta um sólido embasamento teórico, porém foram incorporadas simplificações respaldadas por experiências em elaboração de modelos em laminação.⁽²⁾

O uso de modelos de deformação está relacionado, na prática, à etapa de geração de referências para as malhas de controle, normalmente existente em sistemas de automação para laminadores reais.⁽³⁾ Estes programas geradores de referência fazem o *set-up* do sistema.

Este trabalho consiste na primeira parte de um projeto de maior amplitude que é a construção de um simulador para estudos e desenvolvimentos de novos controladores aplicados aos laminadores tandem, equipamentos presentes em um processo de laminação a frio. Será apresentado, em detalhes, um modelo matemático baseado no modelo clássico de Ford et al.⁽⁴⁾ Em seguida será apresentado o algoritmo de resolução utilizado para a obtenção da força de laminação, e finalmente serão mostrados os resultados obtidos por simulações com parâmetros realistas extraídos da literatura e comparações entre os modelos envolvidos.⁽⁵⁾ A simulação numérica computacional do modelo é implementada utilizando-se o software MatLab.

As principais contribuições deste trabalho são: 1) desenvolvimento de um programa computacional para o cálculo da força de laminação, 2) proposição de um modelo matemático simplificado baseado no modelo de Ford et al.,⁽⁴⁾ e 3) comparação com modelos já consagrados e utilizados em sistemas reais. A principal dificuldade encontrada na utilização do modelo aqui proposto é a obtenção da força de laminação, que depende do raio do cilindro de trabalho. Sendo que a hipótese do achatamento de tais cilindros é considerada. Esta deformação acarreta num aumento no raio do cilindro de trabalho que por sua vez afeta o cálculo da força de laminação. O processo de cálculo transcorre, portanto, de forma iterativa até que ocorra a convergência entre os valores da força calculada pela integração da pressão ao longo do arco de contato e a força calculada pela fórmula de Hitchcock.

Este trabalho está organizado conforme a seguir: na seção 2 será apresentado um breve histórico da modelagem da deformação em processos de laminação a frio. Na seção 3 o modelo tratado será detalhado, com a geometria do problema e conjunto de equações, bem como o algoritmo empregado para os cálculos. Alguns esclarecimentos acerca da metodologia de determinação de alguns parâmetros, também são colocados. Finalizando, os resultados de simulação obtidos são comparados com outros extraídos da literatura, mediante a adoção de dados consistentes com a realidade industrial.

2 MODELO DE DEFORMAÇÃO

2.1 Histórico

O desenvolvimento de modelos teóricos que descrevem o processo de deformação na Laminação a Frio tem trazido contribuições importantes nas últimas seis décadas.

A teoria clássica em modelos de laminação tem o seu início em um trabalho de grande relevância.⁽⁶⁾ Em concordância com esta teoria, notáveis resultados foram apresentados em Ford, Ellis e Bland,⁽⁴⁾ onde foram propostas simplificações que permitiram linearizar e integrar a equação diferencial da força de laminação. Os resultados apresentados por Ford, conseguiram uma boa concordância com a teoria de Orowan e com resultados experimentais. O modelo de Ford não só tem sido bastante referenciado em trabalhos sobre controle em laminação,^(7,8) como também é implementado em laminadores reais.⁽³⁾ Trata-se portanto de um bom referencial para a realização de simulações.

Após o trabalho de Ford et al.,⁽⁴⁾ inúmeros modelos foram desenvolvidos, buscando melhorias e sofisticções.^(2,9-16) Como é esperado, os modelos desenvolvidos após o de Ford et al.,⁽⁴⁾ mencionados acima, apresentam grande esforço computacional e algoritmos numericamente robustos. Visando implementações reais, a preferência recai em modelos aproximados, de preferência que se utilizam de equações algébricas para o cálculo da força de laminação.⁽⁵⁾

2.2 Modelagem da Deformação do Material

Neste trabalho utilizou-se como base o modelo de Ford et al.⁽⁴⁾ Algumas simplificações foram adotadas, conforme pode ser visto ao longo do texto. A seguir serão citadas suas equações e alguns detalhes que são úteis para sua aplicação. A Figura 1 mostra um diagrama esquemático do modelo.

Observando a Figura 1, conclui-se que o ângulo de saída é dado por $\varphi_{ex} = 0$, pois foi desprezado o retorno elástico da tira na saída da mordida. O cálculo do

ângulo de entrada φ_{en} é feito pela equação (1), conforme pode ser compreendido pela Figura 2.

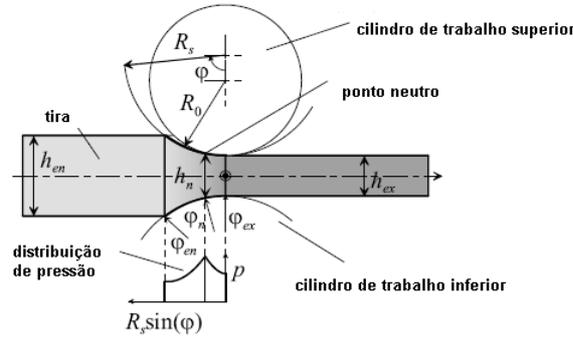


Figura 1. Diagrama esquemático para o modelo de deformação do material.⁽⁷⁾

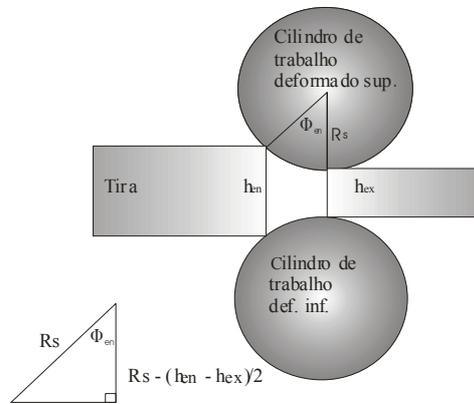


Figura 2. Cálculo do ângulo de entrada φ_{en} .

O modelo utilizado neste trabalho não leva em consideração a zona de deformação elástica do material na entrada e nem o seu retorno elástico na saída da mordida. A força de laminação F_R é calculada como a integral da distribuição de pressão ao longo do arco de contato.

Os cálculos são feitos usando-se (2)-(6), conforme apresentado em Kugi et al.,⁽⁷⁾

$$\varphi_{en} = \arccos \left[1 - \left(\frac{h_{en} - h_{ex}}{2R_s} \right) \right] \quad (1)$$

$$\chi(\varphi) = 2 \sqrt{\frac{R_s}{h_{ex}}} \arctan \left(\sqrt{\frac{R_s}{h_{ex}}} \varphi \right) \quad (2)$$

$$\chi_n = \frac{\chi(\varphi_{en})}{2} - \frac{1}{2\mu} \ln \left(\frac{h_{en} \left(1 - \frac{\sigma_{ex}}{k_f(\varphi_{ex})} \right)}{h_{ex} \left(1 - \frac{\sigma_{en}}{k_f(\varphi_{en})} \right)} \right) \quad (3)$$

$$\varphi_n = \sqrt{\frac{h_{ex}}{R_S}} \tan \sqrt{\frac{h_{ex}}{R_S}} \frac{\chi_n}{2} \quad (4)$$

$$h(\varphi) = h_{ex} + R_S \varphi^2 \quad (5)$$

$$F_R = R_S b \left(\left(1 - \frac{\sigma_{ex}}{k_f(\varphi_{ex})} \right) \int_0^{\varphi_n} k_f(\varphi) \frac{h(\varphi)}{h_{ex}} e^{\mu \chi(\varphi)} d\varphi + \left(1 - \frac{\sigma_{en}}{k_f(\varphi_{en})} \right) \int_{\varphi_n}^{\varphi_{en}} k_f(\varphi) \frac{h(\varphi)}{h_{en}} e^{\mu(\chi(\varphi_{en}) - \chi(\varphi))} d\varphi \right) \quad (6)$$

Nas equações acima, μ é o coeficiente de atrito, σ_{en} e σ_{ex} são respectivamente, as tensões na entrada (tensão a ré) e na saída (tensão avante), k_f é a tensão de escoamento da tira que é função da deformação do material na mordida, b é a largura da tira e o índice n está relacionado ao ponto neutro.

No modelo apresentado o ponto neutro é o ponto do arco de contato entre o material e o cilindro de trabalho, em que não ocorre o deslizamento, ou seja, a velocidade da tira e a velocidade linear do cilindro são iguais.

Lembrando hipóteses importantes que são consideradas, a de que o arco de contato é circular e que o cilindro de trabalho se deforma durante o processo. No caso usa-se a fórmula de Hitchcock, para o cálculo do raio deformado R_S ,

$$R_S = R_0 \left(1 + \frac{16(1 - \nu_{cil}^2)}{E_{cil}(h_{en} - h_{ex})\pi b} F_R \right) \quad (7)$$

A tensão de escoamento variável em função da deformação $k_f(\varphi)$, variável ao longo do arco de contato, foi aproximada por um valor médio, conforme método sugerido na literatura.⁽⁴⁾ Na seção 3 serão descritos os aspectos necessários para a aplicação do método, de modo a se obter o valor médio de k_f .

3 ALGORITMO E RESULTADOS

3.1 Descrição do Algoritmo para a Utilização do Modelo

O modelo descrito na seção anterior foi implementado em MatLab 6.5, através de um algoritmo desenvolvido para a simulação do processo em estudo. A seguir será apresentada uma descrição sucinta deste algoritmo e o fluxograma utilizado está mostrado na Figura 3.

Destaca-se no algoritmo o caráter iterativo utilizado no cálculo da força de laminação, onde esta variável e o raio do cilindro de trabalho são inter-relacionados, sendo que ambos devem convergir para valores finais coerentes.

Para a determinação do limite de escoamento médio do material, conforme mencionado na seção anterior, os seguintes passos devem ser executados.

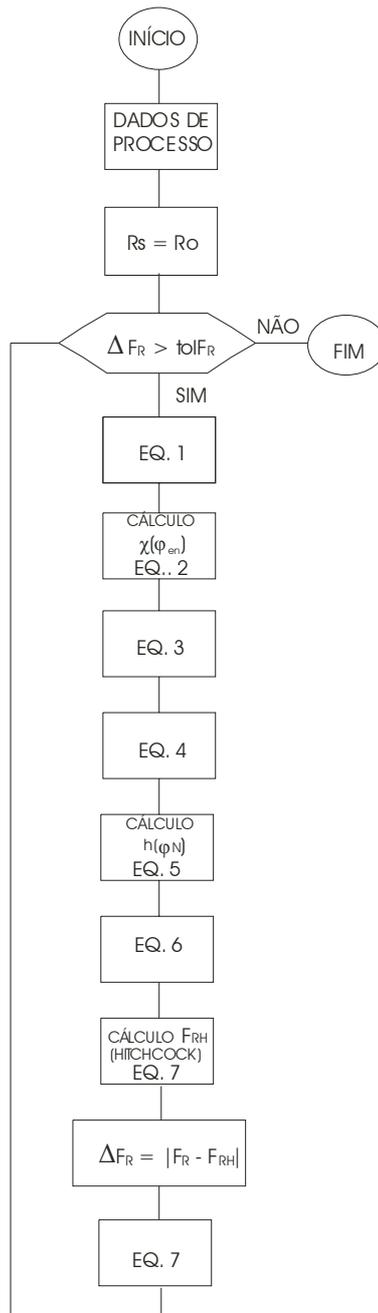


Figura 3. Fluxograma representativo do algoritmo.

Inicialmente é definida a variável redução r pela equação (8):

$$r = \frac{h_{en} - h_{ex}}{h_{en}} \quad (8)$$

A relação entre a deformação efetiva ε_u e a redução é dada pela equação (9).⁽²⁾

$$\varepsilon_u = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln\left(\frac{1}{1-r}\right) \quad (9)$$

Normalmente é conhecida a função de encruamento do material f que é estabelecida pela equação (10), onde σ_u é a tensão efetiva,

$$\sigma_u = f(\varepsilon_u) \quad (10)$$

Substituindo-se a equação (9) na (10), obtém-se a equação (11), que nos permite aplicar o método sugerido na literatura.⁽⁴⁾

$$\sigma_u = g(r) \quad (11)$$

A obtenção do valor da força de laminação é feita de forma iterativa, onde o raio deformado é atualizado a cada iteração, até que a diferença ΔF_R entre a força obtida pela integração (6) e a obtida pela fórmula de Hitchcock (7) seja inferior à uma tolerância predefinida tol/F_R .

3.2 Resultados de Simulações Numéricas

O modelo apresentado neste trabalho foi validado com dados operacionais coerentes com valores encontrados na realidade industrial.⁽⁵⁾

Alguns modelos mais simples podem ser utilizados em sistemas de controle para laminadores ⁽⁵⁾. O uso de um modelo computacionalmente mais simples fundamenta-se na economia de tempo de processamento em sistemas reais. As Tabelas 1, 2 e 3 mostram os resultados da simulação onde o modelo apresentado pode ser comparado com resultados de alguns métodos clássicos.⁽⁵⁾

Tabela 1. Parâmetros fixos para cada redução.

r (%)	14,6 %	35,9 %
h_{en} (mm)	1,981 2	1,9812
h_{ex} (mm)	1,701 8	1,27
μ	0,04	0,055
K_f (N/mm ²) *	455	575

Tabela 2. Resultados das simulações, redução de 14,6 %. (a) Ford et al; (b) Bryant e Osborn; (c) e (c) * Modelo deste trabalho

σ_{en} N/mm ²	σ_{ex} N/mm ²	R_0 mm	F_R (a) N/mm	F_R (b) N/mm	F_R (c) N/mm	$Erro\%$ (a)-(c)	F_R (c) * N/mm	$Erro\%*$ (a)-(c)
0	75,9502	254	4466,83	4455,76	3989,4	10,6684	4447,9	0,42384
15,1901	75,9502	254	4363,01	4335,84	3904	10,5204	4356,4	0,1514
30,3801	75,9502	254	4250,46	4215,39	3811,1	10,3368	4258	-0,1774
0	121,52	254	4105	4203,74	3621,4	11,7808	4091,2	0,33627
15,1901	121,52	254	4033,28	4089,88	3567,8	11,54	4028,9	0,10857
30,3801	121,52	254	3951,99	3975,29	3506,7	11,2674	3959,6	-0,1927
0	75,9502	279,4	4750,22	4736,18	4242,9	10,67	4734,9	0,32255
15,1901	75,9502	279,4	4639,07	4607,74	4151,1	10,5186	4636,5	0,05529
30,3801	75,9502	279,4	4518	4478,83	4051,6	10,3429	4531,1	-0,2678

Tabela 3. Resultados das simulações, redução de 35,9 %.

σ_{en} N/mm ²	σ_{ex} N/mm ²	R_0 mm	F_R (a) N/mm	F_R (b) N/mm	F_R (c) N/mm	$Erro\%$ (a)-(c)	F_R (c) * N/mm	$Erro\%*$ (a)-(c)
0	121,52	279,4	10519,7	10037,8	9512,7	9,57234	10356	1,55594
15,1901	121,52	279,4	10235,1	9799,15	9305,6	9,08149	10141	0,91939
30,3801	121,52	279,4	9943,8	9561,21	9095,1	8,53495	9922,5	0,21418
0	75,9502	304,8	11745,6	11183,9	10630	9,49779	11551	1,65654
15,1901	75,9502	304,8	11414,5	10918,1	10387	9,00195	11300	1,00337
30,3801	75,0592	304,8	11107,3	10653	10140	8,70902	11045	0,56125
0	121,52	304,8	11288,1	10748,5	10188	9,7459	11104	1,63118
15,1901	121,52	304,8	10981,7	10486,5	9965,2	9,25639	10872	0,99903
30,3801	121,52	304,8	10668,4	10228,4	9738,7	8,71469	10637	0,29451

3.3 Discussão dos Resultados

Foram simulados dois casos de redução, uma classificada como média, $r(\%) = 14,1\%$, e a outra como alta, $r(\%) = 35,9\%$. A redução $r(\%)$, redução percentual, é definida por

$$r(\%) = r \times 100 \quad (12)$$

onde r é dado pela equação (8).

A Tabela 1 apresenta os parâmetros fixos utilizados para cada redução. Na coluna (c) das Tabelas 2 e 3, foram utilizados os valores de $K_f = 418,1 \text{ N/mm}^2$ e $538,7 \text{ N/mm}^2$, obtidos através de um processo gráfico sugerido na literatura,⁽⁴⁾ o $Erro\%$ obtido (a) – (c), pode ser justificado pela incerteza existente neste tipo de método. Para a obtenção da coluna (c)*, foram utilizados valores de K_f^* ajustados, tomando como referencial os resultados obtidos na coluna (a), ou seja os de Ford et al.⁽⁵⁾

Os resultados obtidos e apresentados nas Tabelas 2 e 3 apresentaram boa concordância com os os modelos validados de Ford et al.⁽⁴⁾ e Bryant e Osborn.⁽⁵⁾

O processo de cálculo do limite médio de escoamento do material, K_f , foi realizado segundo o procedimento indicado na literatura.⁽⁴⁾ Por se tratar de um método gráfico, pode-se atribuir a ele alguma inexatidão. Além disso, ao utilizar o K_f , médio, introduz-se o erro de torná-lo constante ao longo da mordida.

Outra simplificação que pode ser levantada como causa de inexatidão é de não se levar em conta as regiões de deformação elástica, tanto na entrada quanto na saída.

Na automação de laminadores tandem, os modelos matemáticos do processo de deformação são utilizados nos programas geradores de referência, que fazem o set-up do sistema. Ao entrar em funcionamento normal o sistema possui funções de adaptação que podem reajustar estas referências para valores coerentes com o sistema real.⁽⁵⁾ Sendo assim, a precisão dos resultados dos modelos mais sofisticados pode ser relevada, tendo como ganho simplificações que podem tornar tal modelo mais adequado para estes tipos de aplicação.

O cálculo do limite de escoamento médio do material é feito com o uso de uma metodologia gráfica. Uma melhoria neste trabalho poderia ser a mudança para uma metodologia numérica.

4 CONCLUSÃO

Para o objetivo de se construir um simulador de laminador tandem, pode-se dizer que o modelo apresentado apresenta bons resultados, sendo computacionalmente rápido.

A utilização de um valor adequado para o limite médio de escoamento do material mostrou que o modelo apresenta menos desvio, em relação ao modelo completo de Ford et al.,⁽⁴⁾ do que o modelo simplificado de Bryant e Osborn.⁽⁵⁾

Para um determinado valor de redução r , vide equação (8), tendo-se um resultado real ou simulado e validado, pode ser implementada uma rotina de ajuste automático do K_f para aquela redução, para minimizar o erro no cálculo da força de laminação.

Pode ainda ser implementada uma rotina de ajuste automático do valor de K_f para uma dada redução r , vide equação (8), desde que se tenham resultados reais ou oriundos de modelos validados da literatura. Desta forma o K_f seria ajustado para reproduzir tais resultados.

Com base em um modelo realista, novas estratégias de controle poderão ser testadas e comparadas com as usuais, permitindo a implementação de melhorias no sistema de controle, viabilizando maior qualidade no produto.

Agradecimentos

O segundo autor agradece ao CNPq e MCT/Pronex pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 D'AMICO, F., ANGELA, P., PACKIAM, J.. Higly integrated automation system for the New Ipsco mini mill. *Iron and Steel Engineer*, agosto 1999, pp. 27-31.

- 2 ALVES, P. G.. Um modelo para o estudo da transição de heterogeneidades e controle de espessura na laminação a frio. *Dissertação de mestrado Universidade Federal Fluminense*, EEIMVR, 1998.
- 3 FERREIRA, H. C.. Geração de referências para as malhas de controle de um laminador de tiras a frio. *Dissertação de mestrado Universidade de São Paulo, Escola Politécnica*, 2004.
- 4 FORD, H., ELLIS, F., BLAND, R.. Cold Rolling with strip tension, Part I – A new approximate method of calculation and a comparison with other methods. *Journal of the Iron and Steel Institute*, v.168, pp.57-72, 1951.
- 5 BRYANT, G. F., OSBORN, R.. Derivation and assesment of roll-force models. In: Bryant, G. F. (Ed.) *Automation of tandem mills*, The Iron and Steel Institute, London, 1973. ISBN: 0-900497-94-7.
- 6 OROWAN, E.. The calculation of roll pressure of hot and cold flat rolling. *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers*, v. 150, n. 4, pp. 140-167, 1943.
- 7 KUGI, A., NOVAK, R., SCHLACHER, K., AISTLEITNER, K.. A flatness based approach for the thickness control in rolling mills. *Proc. of Fourteen International Symposium of Mathematical Theory of Networks and Systems*, Perpignan, France, June 19-23, 2000.
- 8 KUGI, A., NOVAK, R., SCHLACHER, K.. Non-linear control in rolling mills: A new perspective, 2000. Disponível em http://manuales.elo.utfsm.cl/conferences/seminarios/Eenergy/DATA/54_03.PDF. Acesso em 19/03/2006.
- 9 ALEXANDER, J. M.. On the theory of rolling. *Proc. R. Soc. London*, Londres, A. 326, p. 535-563, 1972.
- 10 TAMANO, T.. Finite element analysis of steady-flow in metal processing. *J. Jap. Soc. Tech. Plas.*, 14, pp766-769, 1973.
- 11 ZIENKIEWKZ, O. C., JAIN, P. C., ONATE, E.. Flow of solids during forming and extrusion: some aspects of numerical solutions. *Int. J. Solids Structures*. 14, pp 15-38,1978.
- 12 LI, G. L., KOBAYASHI, S.. Rigid-plastic finite-element analysis of plane strain rolling. *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*. 104, pp 55-64, 1982.
- 13 FLECK, N. A., JOHNSON, K.L.. Towards a new theory of cold rollling thin foil. *Int. J. Mech. Sci.*, v. 29, n. 7, pp507-524, 1987.
- 14 FRESHWATER, I. J.. Simplified theories of flat rolling-I. The calculation of roll pressure, roll force and roll torque. *Int. J. Mech. Sci.*, v. 38, n. 6, pp 633-648, 1996.
- 15 FRESHWATER, I. J.. Simplified theories of flat rolling-II. Comparison of calculated and experimental results. *Int. J. Mech. Sci.*, v. 38, n. 6, pp 649-660, 1996.
- 16 ABDALLA FILHO, N., LENSKI, E. V.. Modelo de deformação para laminação a frio. *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM*. Bauru – SP , 1997.