

ESTUDO DA VARIAÇÃO DA CARGA DE CONTATO ENTRE OS CILINDROS EM LAMINADORES QUÁDRUOS EM FUNÇÃO DE SUA COROA, CHANFRO E DESGASTE

Yukio Shigaki

Resumo

O autor desenvolve um modelo matemático-numérico para a simulação de laminadores quádrus. Este modelo computacional possibilita a determinação do perfil da tira laminada, a distribuição das cargas de laminação e de contato entre os cilindros de laminação e obtém-se uma estimativa da planicidade da tira emergente. Demonstra-se que, dependendo do perfil da superfície usinada, podem surgir picos de carga nos extremos dos cilindros, podendo gerar desgaste prematuro dos mesmos e a produção de chapas fora das especificações do consumidor. Também podem ocorrer lascamentos dos cilindros, causando enormes prejuízos ao fabricante. É feita também uma análise do efeito sobre esses picos de carga ao se aplicarem chanfros nos cilindros. A consideração do desgaste dos cilindros de trabalho mostra que a carga de laminação aumenta, diminui a coroa da tira, porém não se constata variação significativa na pressão de contato entre os cilindros, com exceção na região dos extremos.

Palavras-chave: Laminação; Laminadores; Simulação; Produto plano.

A STUDY ON THE CONTACT LOAD VARIATION BETWEEN ROLLS FOR A 4-HIGH ROLLING MILL ACCORDING TO ROLL CROWN, CHAMFER AND WEAR

Abstract

The author has developed a mathematical-numerical model for simulation of 4-high rolling mills. With this computer model it is possible to calculate the strip profile, the rolling loads and contact loads between the rolls and the flatness quality of the strip rolled. It is shown that depending on the form of grinding the roll, load peaks may appear on the edges of the rolls that can produce unexpected wear and strips out of customer's specification. These rolls can break, causing financial prejudice for the industry. It is studied, also, the effects on these load peaks when the rolls were chamfered. When the wear of the work-rolls is taken into account, it is shown that the rolling load becomes larger, the strip's relative crown becomes smaller, and the contact pressure did not suffer much change except in the edge region of the rolls.

Key words: Strip rolling; 4-hi rolling mill; Simulation; Flat product.

I INTRODUÇÃO

A fabricação de chapas com tolerâncias dimensionais cada vez mais restritivas tem exigido das indústrias o desenvolvimento de novos equipamentos no sentido de assegurarem uma produção dentro das especificações dimensionais e de propriedades dos materiais.

Diante disso desenvolveram-se desde laminadores com contrafletores externos, cilindros com deslocamento axial dos cilindros, perfis de cilindros usinados em forma de garrafa, cilindros com chanfros nos extremos, cilindros de apoio segmentados, cilindros com uma "camisa" externa flexível, até os do tipo infláveis.

Apesar dessa grande diversidade de laminadores, o laminador quádruo ainda é amplamente utilizado nas plantas de produção de chapas. Assim vários laminadores desse tipo foram reformados, recebendo atuadores que realizam a contraflexão dos cilindros. Neste trabalho, concretamente, são trabalhados o perfil usinado dos cilindros e as dimensões do chanfro a ser aplicado, de modo a se evitar o surgimento de picos de carga prejudiciais que possam causar desde um desgaste localizado e prematuro dos cilindros até possíveis lascamentos. Considerando-se o elevado custo de um cilindro de apoio de um laminador quádruo e que o dimensionamento de chanfros é feito

D. Sc., Professor do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Cefet-MG, Mestrado de Modelagem Matemática e Computacional. Membro da ABM. Endereço: Av. Amazonas, 7675. Cep 30315-000, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: yukio@des.cefetmg.br

empiricamente, acredita-se que este estudo seja mais do que justificado. Outro fator considerado neste trabalho é o perfil de desgaste, considerado na determinação do perfil da tira, da pressão de contato e da carga de laminação.

Conjuntamente com a engenharia de equipamentos, desenvolveu-se o ramo dos simuladores computacionais desses mesmos equipamentos. Esses simuladores possuem diversas utilidades:⁽¹⁾ a) permitem fazer um estudo da influência de um parâmetro de operação, fixando todos os demais parâmetros; b) auxiliam na resposta a questões específicas e na solução de problemas; c) pode-se ter uma maior compreensão de todo o processo, auxiliando na utilização mais eficiente dos equipamentos; d) auxiliam no processo de automação e na seleção de equipamentos no caso de uma modernização da planta, entre outros.

Tais simuladores são derivados de modelos matemático-numéricos do sistema de laminação. Podem-se citar os mais relevantes: a) Método da Fundação Elástica;⁽²⁾ b) Método dos Coeficientes de Influência (MCI);^(3,4) c) Método dos Elementos Finitos (*Finite Element Method, FEM*);⁽⁵⁾ d) Método dos Elementos de Contorno (*Boundary Element Method, BEM*);⁽⁶⁾ e) Métodos Mistos MCI/FEM ou MCI/BEM.⁽⁷⁾

Apesar da crescente velocidade de processamento dos computadores, a aplicação maciça do método dos elementos finitos na modelagem da laminação ainda é considerada proibitiva. A necessidade de se obter resultados precisos e em reduzido tempo fez com que o Método dos Coeficientes de Influência ganhasse popularidade entre os simuladores de laminação. Este método é explicitado a seguir.

2 O MÉTODO DOS COEFICIENTES DE INFLUÊNCIA MCI/BERGER

O MCI surgiu no final da década de 1960. Para se determinar o perfil da tira emergente, é necessário calcular o perfil deformado do cilindro de trabalho, que por sua vez depende do carregamento imposto aos cilindros. Shohet e Townsend⁽⁵⁾ desenvolveram um método que calcula a deflexão elástica dos cilindros devido à flexão e ao cisalhamento por meio dos coeficientes de influência, discretizando a chapa e os cilindros em fatias longitudinais, conforme apresentado na Figura 1.

Uma vez determinados tais coeficientes, reúnem-se as equações de cálculo da deflexão para cada cilindro, superpondo os deslocamentos por flexão, cisalhamento e achatamento localizado (Shohet e Townsend⁽⁵⁾ assumem linearidade no achatamento em função da carga, para a faixa de operação normal). Pelas equações de equilíbrio de cada cilindro e de compatibilidade nas interfaces cilindro/cilindro e cilindro/tira, determinam-se as cargas distribuídas e o perfil deformado da tira, de uma maneira iterativa.

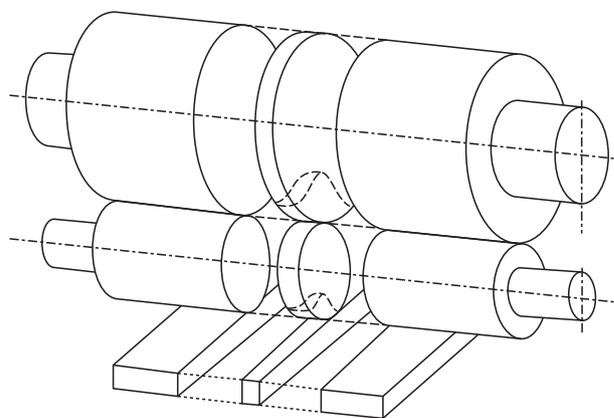


Figura 1. Discretização de um laminador quádruplo para o MCI.⁽⁶⁾

O modelo aperfeiçoado por Pawelski⁽⁴⁾ e seus colegas foi implementado com algumas modificações, e programado em linguagem do MATLAB. O programa denominado MCI/Berger, em reconhecimento a Bernd Berger,⁽⁹⁾ autor do modelo de achatamento de cilindros em contato utilizado no programa, foi testado e validado. Maiores detalhes podem ser encontrados na Tese de Doutorado do autor.⁽¹⁾

2.1 Modelo de Cálculo de Carga de Laminação

O simulador desenvolvido assume como hipótese o Estado Plano de Deformações (EPD) para a deformação plástica da chapa. Tal hipótese de EPD justifica-se quando é satisfeita a relação largura da tira/arco de contato > 10 , segundo Watts e Ford,⁽¹⁰⁾ conservativamente.

Os modelos analíticos de cálculo de deformação da tira são preferíveis aos modelos numéricos, pois estes requerem um tempo de processamento maior por parte do computador. Escolheu-se o modelo de Bland-Ford-Ellis⁽¹¹⁾ por apresentar uma solução analítica simples e relativamente precisa. Este modelo deverá ser aplicado a cada faixa da chapa, dentro de um sistema iterativo. Utiliza-se o método de Hitchcock para a deformação do raio de cada rodela do cilindro de laminação.⁽¹²⁾

2.2 Método dos Coeficientes de Influência

Na Figura 2 é apresentada a forma como cilindro e tira são discretizados para a aplicação do modelo de Bland-Ford-Ellis para cálculo da carga de laminação e o Método dos Coeficientes de Influência.

O Método dos Coeficientes de Influência calcula a deflexão do cilindro segundo a equação (as variáveis em negrito representam grandezas vetoriais):

$$\mathbf{u} = \mathbf{a} \mathbf{p} + \mathbf{b} \mathbf{F} + \mathbf{c} \mathbf{M} \quad (1)$$

sendo:

\mathbf{u} : vetor de deflexões do cilindro;

\mathbf{a} : matriz dos coeficientes de influência;

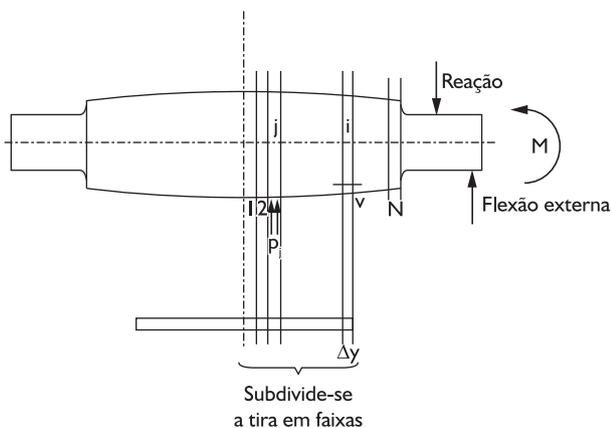


Figura 2. Subdivisão do cilindro e da tira.⁽¹⁾

b: vetor de coeficientes para as cargas concentradas;
 c: vetor de coeficientes para os momentos externos;
 p: vetor força por unidade de largura;
 F: carga concentrada (do mancal e dos contrafletos);
 M: momento fletor externo dos contrafletos.

A seguir são explicitadas as equações que determinam o achatamento dos cilindros, baseado no método desenvolvido por Berger.⁽⁹⁾ Trata-se de um método bastante preciso, gerando resultados como o ombro da chapa de forma bastante satisfatória. A expressão que calcula o achatamento do cilindro é dada por:

$$v = [f(2.(j-i),s) + f(2.(j+i)-2,s)]p \quad (2)$$

$$s = (R'\Delta h)^{1/2} \quad (3)$$

onde:

v: vetor de achatamento ao longo da largura;
 s: vetor comprimento do arco de contato;
 f: função de achatamento de Berger;
 R': raio deformado segundo Hitchcock;⁽¹²⁾
 Δh: espessura de entrada menos a espessura de saída (redução);
 i, j: posições da carga p_i na tira e no ponto j do achatamento do cilindro.

2.3 Compatibilidade no Contato Cilindro de Trabalho-Cilindro de Apoio

Define-se o contorno da superfície superior do cilindro de trabalho como:

$$c_w = u_w - Cm_w - v_w + v_{w1} \quad (4)$$

e o contorno da superfície inferior do cilindro de apoio:

$$c_b = u_b + Cm_b + v_b - v_{b1} \quad (5)$$

sendo:

u_w, u_b : deflexão elástica dos cilindros de trabalho e de apoio, respectivamente;
 Cm_w, Cm_b : coroas impostas aos cilindros de trabalho e de apoio, respectivamente;

v_w, v_b : achatamento dos cilindros de trabalho e de apoio, respectivamente;

v_{w1}, v_{b1} : achatamento no meio dos cilindros de trabalho e de apoio, respectivamente (os termos em negrito representam variáveis vetoriais).

Deve-se notar que $u_w, u_b, Cm_w, Cm_b, v_w$ e v_b são todos vetoriais ao longo de meia largura do cilindro para u e Cm, e para meia largura da tira para v.

O problema resume-se, então, em descobrir as cargas distribuídas nos cilindros de modo a satisfazer à equação de compatibilidade $c_b = c_w$ e respeitando o equilíbrio de forças. O cálculo da carga distribuída de laminação já é conhecido, obtido pela determinação da carga de laminação no centro de cada subdivisão da chapa por Bland-Ford. Dado que a deflexão e o achatamento da tira em cada ponto ao longo da largura são desiguais de ponto para ponto (no centro de cada subdivisão), cada um desses pontos terá um valor de carga de laminação diferente, a menos que a deformação total da chapa ao longo da largura seja horizontal.

3 INFLUÊNCIA DO PERFIL USINADO DOS CILINDROS

O programa MCI/Berger é aplicado na simulação da laminação de chapas para diferentes perfis usinados dos cilindros de laminação. Adota-se um mesmo caso comum de laminação de chapa a frio para os diferentes perfis usinados.

Uma expressão matemática utilizada para gerar os perfis das coroas usinadas é mostrada na equação 6:

$$\text{coroa usinada } (Cm_b \text{ ou } Cm_w) = 0,025 * (x / 800)^b \quad (6)$$

onde: x é a coordenada na direção do comprimento do cilindro, com origem no centro e b é o grau do polinômio. Cm_w e Cm_b são as coroas usinadas do cilindro de trabalho e do cilindro de apoio, respectivamente.

A Figura 3 apresenta os perfis usinados aplicados na simulação, aplicados tanto para o cilindro de apoio quanto para o de trabalho. Os resultados das simulações estão apresentados na Figura 4.

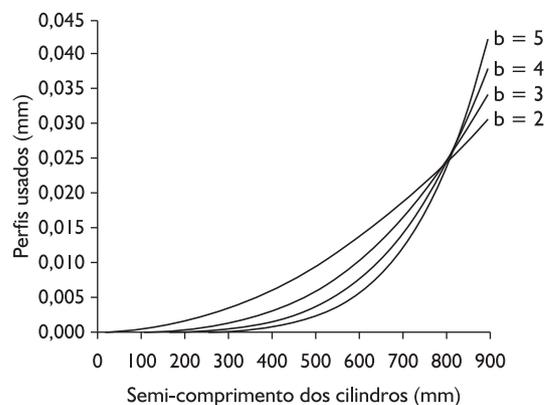


Figura 3. Perfis usinados obtidos conforme o polinômio adotado.

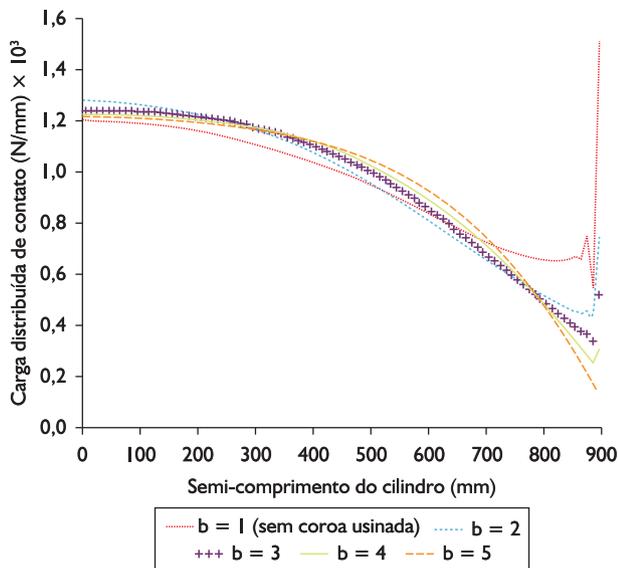


Figura 4. Resultados da simulação para diferentes perfis usinados em termos de carga distribuída de contato entre o cilindro de apoio e o de trabalho.

4 EFEITO DO CHANFRO NOS EXTREMOS DOS CILINDROS

Como segunda aplicação do simulador é feita a análise da distribuição da carga de contato de acordo com o chanfro aplicado ao cilindro de apoio.

Trata-se de um laminador com 700 mm de diâmetro do cilindro de trabalho e 1.500 mm de diâmetro do cilindro de apoio, ambos sem coroa usinada. O comprimento da face dos cilindros é de 1.700 mm, e o comprimento do braço de contraflexão de 400 mm. A largura da chapa é de 1.300 mm. Adota-se um coeficiente de atrito (seco) de 0,1. O módulo de Young da tira é de 210 GPa e o coeficiente de Poisson é 0,3. Utiliza-se a curva de fluxo aproximada por Ludwik (em EPD, $1 + 788\epsilon^{0.249}$ MPa - aço baixo carbono, von Mises). A tira possui uma espessura inicial de 5 mm e espessura final de 4 mm. Não se impõe coroa inicial na chapa. A coroa da chapa utiliza a medida de espessura a 25 mm da borda da tira.

Aplicam-se 3 diferentes tipos de chanfros,^(13,14) conforme pode ser visto na Figura 5. A curva indicada como “1” representa a situação em que não se aplica nenhum chanfro. A curva indicada pelo número 2 representa um chanfro linear (*straight chanfer*) com 64 mm de comprimento e 0,1 mm de altura nos extremos do cilindro de apoio, e a indicada com o número 3 representa um chanfro linear com 100 mm de comprimento e 0,2 mm de altura.

Os resultados da simulação, em termos de distribuição da carga de contato, podem ser vistos na Figura 6.

Pode-se observar, da Figura 6, que a aplicação do chanfro linear 2 possibilita a redução do pico da carga de contato entre os cilindros de 14.400 N/mm para 10.500 N/mm. Já a aplicação do chanfro linear 3 resultou

em um pico de 12.000 N/mm, porém com a redução até zero ao longo do restante do cilindro. Outro resultado interessante é que a redução na espessura ao longo da transversal da chapa (medida pela variável conhecida como “coroa”) vai diminuindo progressivamente, conforme pode ser visto na Figura 7.

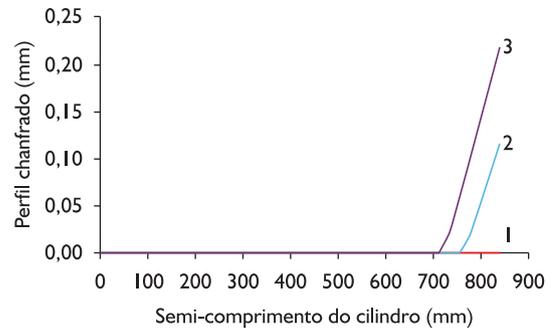


Figura 5. Perfis dos três chanfros aplicados na simulação.

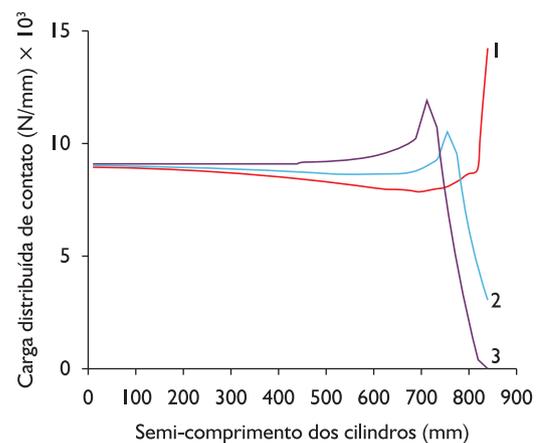


Figura 6. Distribuição de carga de contato entre os cilindros para os três tipos diferentes de chanfros aplicados.

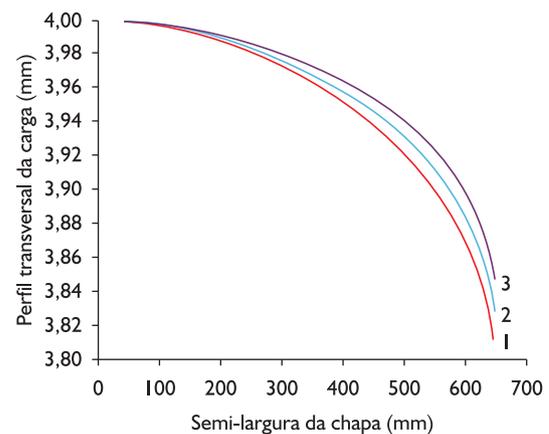


Figura 7. Perfis transversais das chapas laminadas para os três chanfros diferentes.

5 EFEITO DO DESGASTE DO CILINDRO DE TRABALHO

O terceiro caso do simulador considera a aplicação de um perfil retificado do cilindro de trabalho com um desgaste uniforme ao longo de 1.500 mm de comprimento, que é a largura da chapa laminada. O equipamento possui as mesmas características do laminador analisado no caso da análise do efeito do chanfro, exceto que a chapa (de mesmo material que o caso anterior) possui uma coroa de entrada de 50 μm e utilizam-se cilindros com coroas usinadas e desgastadas (média de 0,1 mm de desgaste).

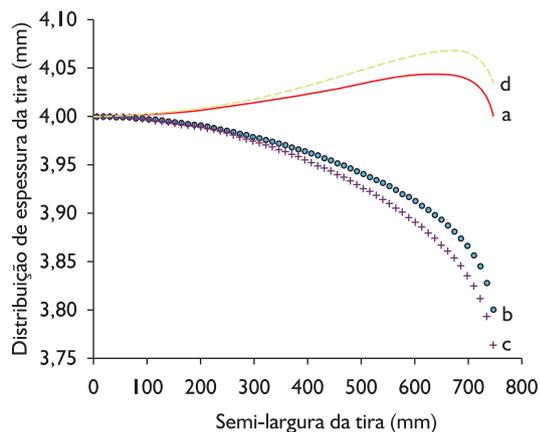


Figura 8. Distribuição de espessuras ao longo de meia largura da chapa.

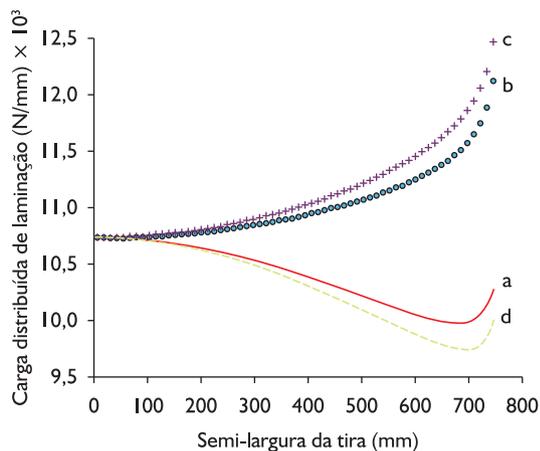


Figura 9. Carga distribuída de laminação ao longo de meia largura da chapa.

Tabela I. Carga total de laminação e coroa para cada caso

Caso	a (com coroa, com desgaste)	b (sem coroa, sem desgaste)	c (sem coroa, com desgaste)	d (com coroa, sem desgaste)
Carga total de laminação (N)	15.644.660,00	16.600.480,00	16.761.060,00	15.504.230,40
Coroa relativa (%)	-0,72	3,93	4,78	-1,47

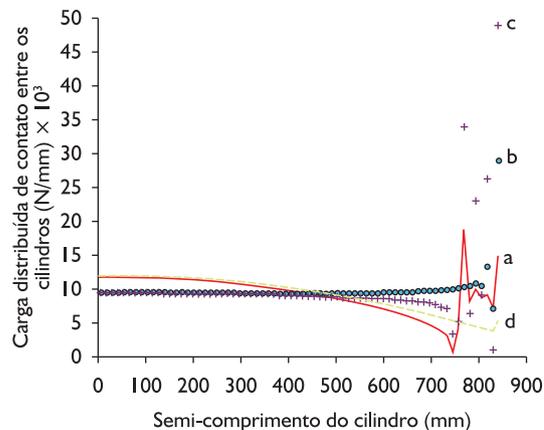


Figura 10. Carga distribuída de contato entre os cilindros.

São consideradas quatro configurações: a) com desgaste e com coroa usinada; b) sem desgaste e sem coroa usinada; c) com desgaste e sem coroa usinada, e d) sem desgaste e com coroa usinada. Os resultados estão apresentados nas Figuras 8, 9 e 10.

Pode-se observar, neste caso, que o desgaste tende a aumentar o valor da carga de laminação (Tabela I).

A coroa da chapa tende a diminuir com o aumento do desgaste (Tabela I), mas a pressão de contato pouco se modifica devido ao desgaste, com exceção da região dos extremos dos cilindros.

6 CONCLUSÕES

O modelo implementado que simula laminadores quádruplos foi aplicado a três diferentes casos, e seus resultados são comentados a seguir.

A análise do caso dos perfis usinados demonstra que pequenas variações nos perfis dos cilindros pode levar a grandes variações em termos de carga distribuída de contato, podendo surgir picos indesejáveis nos extremos. Observa-se que à medida em que se eleva o grau do polinômio ocorre o desaparecimento gradual do pico de carga nos extremos dos cilindros (Figuras 3 e 4). Isso sugere que pequenas variações nos perfis dos cilindros, sejam por expansão térmica e/ou por desgaste ou por algum outro motivo, podem fazer surgir picos de carga indesejáveis.

O segundo caso analisado demonstra a possibilidade de se aplicar o simulador na determinação da nova carga distribuída de contato ao se aplicar um chanfro nos extremos. Essa prática de chanframento é aplicada nos

laminadores quádrus baseando-se na prática adquirida. Um estudo aprofundado, com a simulação de diversos casos de chanframentos levará a uma maior compreensão do fenômeno e, assim, a uma sistematização dessa prática, hoje empírica.

Por fim, a simulação do laminador considerando o desgaste do cilindro de trabalho mostra que ocorrem aumentos razoáveis na carga de laminação (cerca de 140 kN a 160 kN), causando, também, o aumento da coroa da chapa. Já a distribuição da pressão de contato varia pouco, com exceção das regiões extremas dos cilindros.

Ainda há muito a ser melhorado no simulador, especialmente no que se refere ao seu ajuste com dados reais industriais, apesar do mesmo ter sido validado com vários resultados experimentais encontrados em artigos técnicos. Outro ponto a ser considerado refere-se ao aperfeiçoamento do módulo de contato do simulador, de modo a possibilitar situações em que os cilindros não estão completamente unidos.

Agradecimentos

O autor agradece ao Cefet-MG pelo financiamento do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 SHIGAKI, Y. *Um estudo da laminação de tiras e chapas planas através de um modelo matemático-numérico de um laminador quádruo*. 2001. 238 f. Tese (Doutorado em Metalurgia da Transformação) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.
- 2 STONE, M. D.; GRAY, R. Theory and practical aspects in crown control apud MALIK, A. S.; GRANDHI, V. Recent developments in strip-profile calculation. In: GINZBURG, V. B. (Ed.). *Flat rolled steel processes: advanced technologies*. New York: CRC, 2009. p. 331.
- 3 SHOHET, K. N.; TOWNSEND, N. A. Roll bending methods of crown control in four-high plate mills apud MALIK, A. S.; GRANDHI, V. Recent developments in strip-profile calculation. In: GINZBURG, V. B. (Ed.). *Flat rolled steel processes: advanced technologies*. New York: CRC, 2009. p. 330.
- 4 PAWELSKI, O.; TEUTSCH, H. A mathematical model for computing the distribution of loads and thickness in the width direction of a strip rolled in four-high cold-rolling mills. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 21, n. 4, p. 853-9, 1985. [http://dx.doi.org/10.1016/0013-7944\(85\)90092-X](http://dx.doi.org/10.1016/0013-7944(85)90092-X)
- 5 EDBERG, J.; LINDGREN, L.-E. Efficient three-dimensional model of rolling using an explicit-element formulation. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, v. 9, n. 7, p. 613-27, July 1993. <http://dx.doi.org/10.1002/cnm.1640090709>
- 6 SHANGWU, X.; RODRIGUES, J. M. C.; MARTINS, P. A. F. Simulation of plane strain rolling through a combined finite element-boundary element approach. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 96, n. 1, p.173-81, Nov. 1999. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00342-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00342-8)
- 7 YAMADA, K.; OGAWA, S.; ATAKA, M. Three-dimensional analysis of flat rolling using rigid-plastic finite element method coupled with roll deformation analysis. In: NUMIFORM, 4., 1992, Valbonne, France. *Proceedings...* [S.l.]: Taylor & Francis Group, 1992.
- 8 HOLLANDER, F.; REINEN, A. G. Automatic shape control. In: HOOGOVEN'S 88-IN HOT STRIP MILL. *Iron and Steel Engineer*, p. 45-53, Apr. 1976.
- 9 BERGER, B.; PAWELSKI, O.; FUNKE, P. Die beeinflussung des dickenprofils von bändern und Blechen durch walzenbiegeeinrichtungen. *Stahl und Eisen*, v. 96, n. 8, p. 377-81, 1976.
- 10 WATTS, A. B.; FORD, H. On the basic yield stress curve for a metal apud HELMAN, H.; CETLIN, P. R. Fundamentos da conformação mecânica dos metais. São Paulo: Artliber, 2005. p. 218.
- 11 BLAND, D. R.; FORD, H.; ELLIS, F. Cold rolling with strip tensions. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 1951 apud HELMAN, H.; CETLIN, P. R. Fundamentos da conformação mecânica dos metais. São Paulo: Artliber, 2005. p. 218.
- 12 HITCHCOCK, J. H. Elastic deformation of rolls during cold rolling apud HELMAN, H.; CETLIN, P. R. Fundamentos da conformação mecânica dos metais. São Paulo: Artliber, 2005. p. 213.
- 13 DECULTIEUX, F.; HOFFMAN, M.; ADAMS, T. Backup roll chamfer design, profile and maintenance. In: MATERIALS SCIENCE & TECHNOLOGY 2004, New Orleans, Louisiana. [S.n.t.]. p. 311-21.
- 14 HADJUK, D.; CORNELIO, G. T.; BERNARDES, F. G. Computer modeling for better bur performance. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO - PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 46., 2009, Santos, SP. *Anais...* São Paulo: ABM, 2009.

Recebido em: 8/1/2011

Aprovado em: 21/3/2011