

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO MATEMÁTICO- NUMÉRICO PARA SIMULAÇÃO DE LAMINADORES DE PRODUTOS PLANOS COM CILINDROS COM PERFIS CVC¹

 Yukio Shigaki²

 Anna Luíza Vilaça Carvalho Viégas Martins³

Resumo

Diante das exigências cada dia mais restritivas com relação à qualidade dos produtos planos laminados, a indústria de fabricação de tiras e chapas tem desenvolvido equipamentos inovadores, com grande capacidade de controle de espessuras e planicidade. Um desses sistemas desenvolvidos é o dos cilindros com perfis continuamente variáveis (*Continuously Variable Camber – CVC*), que permite um controle bastante preciso sobre a espessura e forma da chapa produzida. Este trabalho propõe-se a desenvolver um modelo de um equipamento desse tipo, aplicando o método dos elementos finitos (MEF) acoplado a um modelo analítico de cálculo de carga de laminação. A vantagem de se utilizar o MEF 3D para modelar laminadores com cilindros CVC reside no fato da dificuldade em se aplicar modelos simplificados de achatamentos localizados juntamente com modelos de vigas, o que requer processos iterativos não triviais de serem programados, envolvendo equações de compatibilidade e de equilíbrio. O acoplamento de um modelo analítico para o cálculo da carga de laminação dispensa o modelamento da deformação elasto-plástica da chapa em elementos finitos, reduzindo substancialmente o tempo de processamento requerido para obter os resultados de perfis de espessuras resultantes. Os resultados desse simulador serão validados com dados da literatura técnica, e será realizada uma análise da real capacidade de controle dos laminadores com cilindros CVC.

Palavras-chave: Laminação; Elementos finitos; Produtos planos; CVC.

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL-NUMERICAL MODEL FOR SIMULATION OF FLAT ROLLING MILLS WITH CVC ROLLS

Abstract

With the increasing quality demands on flat rolled products, new and innovative equipments have been developed with great control ability of thickness and flatness of strips. Amongst them, the roll shifting mill with Continuously Variable Camber (CVC) rolls delivers a very precise control of strip's crown and shape. This paper presents a new method of modeling this type of rolling mill by the finite element method (FEM) coupled with an analytical method of rolling load calculation. The advantage on modeling the rolling mill with FEM is that simplified models for the roll flattening calculation with beam models require iterative processes very difficult to be programmed, involving compatibility and equilibrium equations. Coupling an analytical model for rolling load calculation replaces the elastic-plastic deformation of the strip by FEM, decreasing a lot the computer processing time in order to calculate the strip shape. The results of this new model will be compared with literature, and an analysis of CVC mills will be done.

Keywords: Flat rolling; Finite element method; CVC.

¹ Contribuição técnica ao 49º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 22 a 25 de outubro de 2012, Vila Velha, ES, Brasil.

² D. Sc., Professor do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Cefet-MG, Departamento de Engenharia Mecânica. Membro da ABM.

³ Estudante de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, bolsista de Iniciação Científica.

1 INTRODUÇÃO

Diante de um mercado bastante competitivo como é o de tiras e chapas metálicas torna-se imperativo garantir a qualidade de suas características com um mínimo de custo e máxima produtividade. A tendência mundial de fabricação de chapas em bobinas em lotes com características bastante diferentes entre si e em maior número, exige bastante flexibilidade dos laminadores atuais.

Diante disso desenvolveram-se diversos tipos de laminadores, sendo alguns com contraflatores externos, laminadores com deslocamento axial dos cilindros, perfis de cilindros retificados em forma de garrafa (CVC, *Smart Crown*), cilindros com chanfros nos extremos, cilindros de encosto segmentados, cilindros com uma “camisa” externa flexível, cilindros que se cruzam e até os do tipo infláveis.

Apesar dessa grande diversidade de laminadores, o laminador quádruplo ainda é amplamente utilizado nas plantas de produção de chapas. Assim, vários laminadores desse tipo foram reformados, recebendo atuadores que aplicam um momento fletor externo sobre o pescoço do cilindro, com a finalidade de modificar a sua flexão, corrigindo o perfil da chapa. Também seus cilindros podem ser retificados em formas especiais, tais como os perfis de coroas continuamente variáveis (*Continuously Variable Camber - CVC*, e *Smart Crown*), tanto os cilindros de trabalho quanto os de encosto, podendo-se deslocá-los axialmente.

O conceito dos cilindros CVC foi desenvolvido originariamente pela SMS. O princípio de seu funcionamento pode ser observado na Figura 1. Um par de cilindros idênticos é retificado em forma de S e instalados um invertido de 180 graus em relação ao outro, de modo a gerar uma abertura simétrica. Define-se como deslocamento C uma forma de mensurar a posição relativa dos cilindros CVC, sendo C nulo quando o deslocamento axial for nulo, C positivo quando se tende a reduzir a espessura no centro da tira e C negativo caso contrário.

Os perfis CVC nos cilindros são retificados segundo a forma de um polinômio de 3ª ordem, podendo-se, inclusive utilizar polinômios de 5ª ordem. Os cilindros *Smart Crown* seguem o mesmo princípio, utilizando funções senoidais e lineares para formar seus perfis.⁽¹⁾

Estes perfis podem ser aplicados tanto nos cilindros de trabalho quanto nos de encosto, e devem ser tais que produzam o efeito de controle desejado, maximizando a utilização dos mesmos e evitando-se quebras por desgaste e fadiga prematuros.⁽²⁾

A escolha dos coeficientes dos polinômios da geratriz desses perfis CVC não é tarefa simples de ser feita,⁽³⁾ e depende do tamanho dos laminadores, seu mix e quantidade de produção, etc.

Propõe-se neste artigo o desenvolvimento de um simulador de um laminador quádruplo com cilindros de trabalho e de encosto com perfis CVC. Diversas são as utilidades de um simulador desse tipo, a começar pela determinação do melhor perfil CVC a ser escolhido.

O simulador apresentado aqui utiliza dois métodos de cálculo: o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método dos Blocos. O MEF é utilizado para modelar os cilindros do laminador quádruplo com perfis CVC. O Método dos Blocos, por sua vez, é aplicado para calcular a carga de laminação e sua distribuição ao longo da largura da tira.

Este método híbrido se justifica principalmente por duas razões. A primeira razão é devido à dificuldade em se aplicar modelos mais simplificados baseados no Método dos Coeficientes de Influência (MCI), onde se assumem equações de

deflexão e achatamento dos cilindros, para considerar cilindros com perfis CVC e assimétricos, com situações de não-contato em parte deles. Os simuladores baseados no MCI dependem de soluções iterativas de contato, compatibilidade e equilíbrios globais, muitas vezes dificultado nas situações de assimetria e regiões de não-contato. O MEF, por considerar os cilindros tridimensionalmente e em contato, determina suas deflexões e achatamentos com poucas simplificações.

A segunda razão deve-se ao fato de que a modelagem completa do sistema laminador-chapa em elementos finitos ainda é bastante onerosa em termos computacionais. Considerar os cilindros tridimensionalmente e aplicar uma deformação elasto-plástica com atrito na chapa demanda elevado custo computacional.

O método proposto exige um processo iterativo, mas com duas ou três iterações, apenas. Assim é possível determinar o perfil da chapa laminada considerando-se uma deformação variável ao longo da sua largura, e acompanhando a deformação elástica dos cilindros de trabalho.

2. METODOLOGIA

Inicialmente serão descritos brevemente o método de cálculo de carga aplicado, as equações dos cilindros CVC, o modelamento dos cilindros via MEF 3D e, finalmente, o modelo híbrido desenvolvido.

2.1 Cálculo de Carga de Laminação

O modelo matemático utilizado para estimar a carga de laminação é o de Bland-Ford para laminação a frio.

O método assume as seguintes hipóteses:

- deformação plana;
 - deformação homogênea em cada plano;
 - coeficiente de atrito constante;
 - arco de contato circular (de raio deformado R');
 - ponto neutro dentro do arco de contato;
 - deformação elástica da tira desprezível.

A equação a que chegou Von Kármán é dada por:

$$hS \frac{d}{d\phi} \left(1 - \frac{p}{S}\right) + \left(1 - \frac{p}{S}\right) \frac{d(hS)}{d\phi} = -2R'p(\sin \phi \pm \mu \cos \phi) \quad (1)$$

onde,

h: espessura da tira;

S: tensão de escoamento;

ϕ : ângulo dentro do arco de contato;

R' : raio deformado;

μ : coeficiente de atrito;

p: pressão sobre o bloco infinitesimal.

Bland e Ford sugeriram que o produto $h.S$ é razoavelmente constante, permitindo, assim, a obtenção de uma solução analítica para a equação (1). Com essa hipótese, a equação (1) fica:

$$hS \frac{d}{d\phi} \left(\frac{p}{S}\right) = 2R'p(\sin \phi + \mu \cos \phi) \quad (2)$$

assim, a solução analítica final será:

$$\text{para a saída:} \quad \frac{p^+}{S} = C_1 \frac{h}{R'} \exp(+\mu H) \quad (3)$$

$$\text{para a entrada:} \quad \frac{p^-}{S} = C_2 \frac{h}{R'} \exp(-\mu H) \quad (4)$$

$$\text{onde,} \quad H = 2 \sqrt{\frac{R'}{h_f}} \arctg \left(\sqrt{\frac{R'}{h_f}} \phi \right) \quad (5)$$

h_f : espessura final;

C_1 e C_2 : constantes que dependem das condições de contorno, mais concretamente da aplicação de tensão à ré e à frente da tira.

A carga é calculada em segmentos do cilindro de trabalho, assumindo estado plano de deformação da chapa. O raio deformado é calculado pela equação de Hitchcock. Desta forma foi possível variar a carga de laminação ao longo da largura da chapa.

2.2 Cilindros CVC

Os cilindros CVC assumem um perfil gerado por um polinômio de 3º ou 5º grau. Assim, quando os cilindros com esses perfis são deslocados axialmente, ocorre uma mudança suave na coroa da tira. Alguns fabricantes retificam coroas nos cilindros de encosto também, para aliviar as elevadas tensões de contato que ocorrem ao suportar a carga transmitida pelo cilindro de trabalho.

A diferença nos diâmetros dos cilindros com perfis do tipo CVC é pouco maior que nos cilindros convencionais (cerca de 0.3 a 0.8 mm), contudo a diferença na velocidade periférica é desprezível.⁽⁴⁾

No modelo exemplificado aqui, a geratriz dos cilindros é dada por um polinômio da forma $y(x) = ax + bx^2 + cx^3$, onde x é o eixo. Para um cilindro de trabalho de 1950mm de comprimento de mesa, por exemplo, os coeficientes a , b e c assumem, por exemplo, os valores⁽⁴⁾ $a = 0.00112573$, $b = -1.20973 \times 10^{-6}$, e $c = 3.50647 \times 10^{-10}$. Esse perfil está representado na Figura 1.

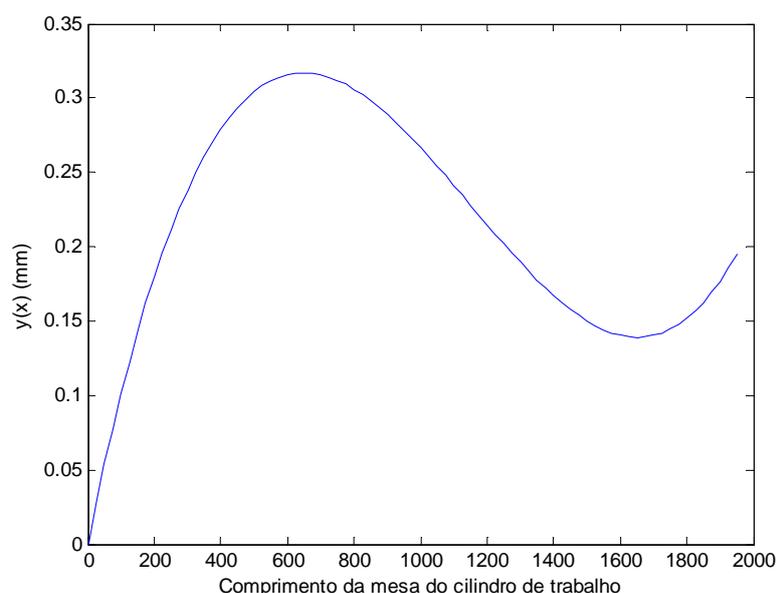


Figura 1 - Polinômio do 3º grau gerador do perfil CVC.

O avanço dos cilindros segue a seguinte convenção (Figura 2). A variável C mede o deslocamento aplicado aos cilindros de trabalho. $C = 0$ para coroa nula na tira. $C > 0$ quando se tende a produzir uma coroa negativa sobre a tira (Figura 2, (b)), e $C < 0$ caso contrário (Figura 2, (c)).

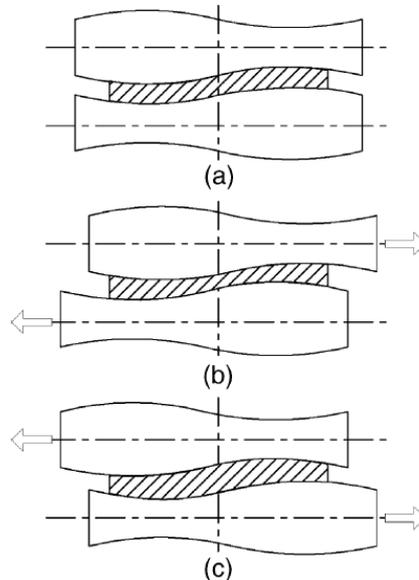


Figura 2 - Cilindros CVC com deslocamento axial: (a) coroa nula; (b) coroa negativa; (c) coroa positiva.⁽⁵⁾

2.3 Modelo em Elementos Finitos

O laminador quádruplo com cilindros de trabalho e encosto com perfis CVC foi modelado no software Solidworks.

A Tabela 1 apresenta as dimensões do laminador modelado.

Tabela 1 - Dimensões do laminador

Comprimento do cilindro de trabalho (mesa)	1.950 mm
Comprimento do cilindro de encosto	1.500 mm
Diâmetro do cilindro de trabalho	300 mm
Diâmetro do cilindro de encosto	800 mm

Na posição neutra, o cilindro de encosto com perfil CVC está perfeitamente assentado sobre o cilindro de trabalho, sendo este um pouco maior em comprimento que o cilindro de encosto. Quando se aplica um deslocamento axial C positivo, perde-se esse assentamento, como pode ser observado na Figura 3.

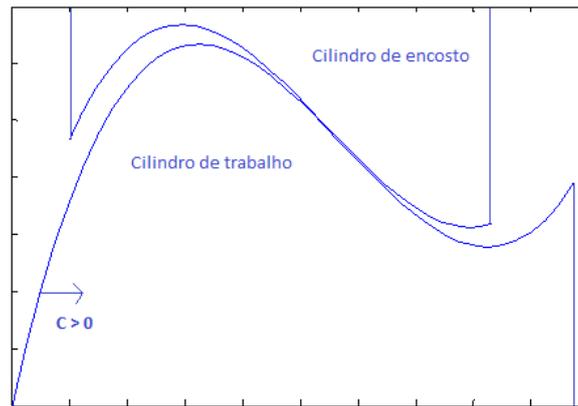


Figura 3 - Perfis CVC dos cilindros em contato (dimensões exageradas proposadamente).

Adotou-se como material dos cilindros um aço comum, com módulo de elasticidade de 210 GPa. Na falta de maiores informações sobre a fabricação de cilindros, não se modelaram os mesmos com diferenças nas propriedades mecânicas entre a sua casca e o seu corpo interno. Deve-se lembrar, porém, que no MEF isso é facilmente aplicável.

Como restrições no modelo do laminador foram aplicadas as seguintes condições de contorno, observando-se que somente a metade superior do laminador foi modelado devido à simetria existente:

- cilindro de encosto: restrição lateral e vertical sobre os pescoços, na parte superior apenas (a parte superior do mancal suporta a carga), e restrição axial;
- cilindro de trabalho: restrição lateral e axial.

A carga foi aplicada em uma área de 60mm de largura ao longo de todo o comprimento do cilindro de trabalho em contato com a chapa. Esta área foi segmentada em pequenas áreas com 25 mm de comprimento cada. A variação da carga de contato ao longo da largura da chapa foi discretizada sobre essas pequenas áreas.

Pode-se ver na Figura 4 o modelo em CAD do laminador.

Assumiu-se uma chapa de aço médio carbono, com largura de 1500mm sem coroa, e aplicou-se uma redução de 4,5 mm para 3,0 mm.

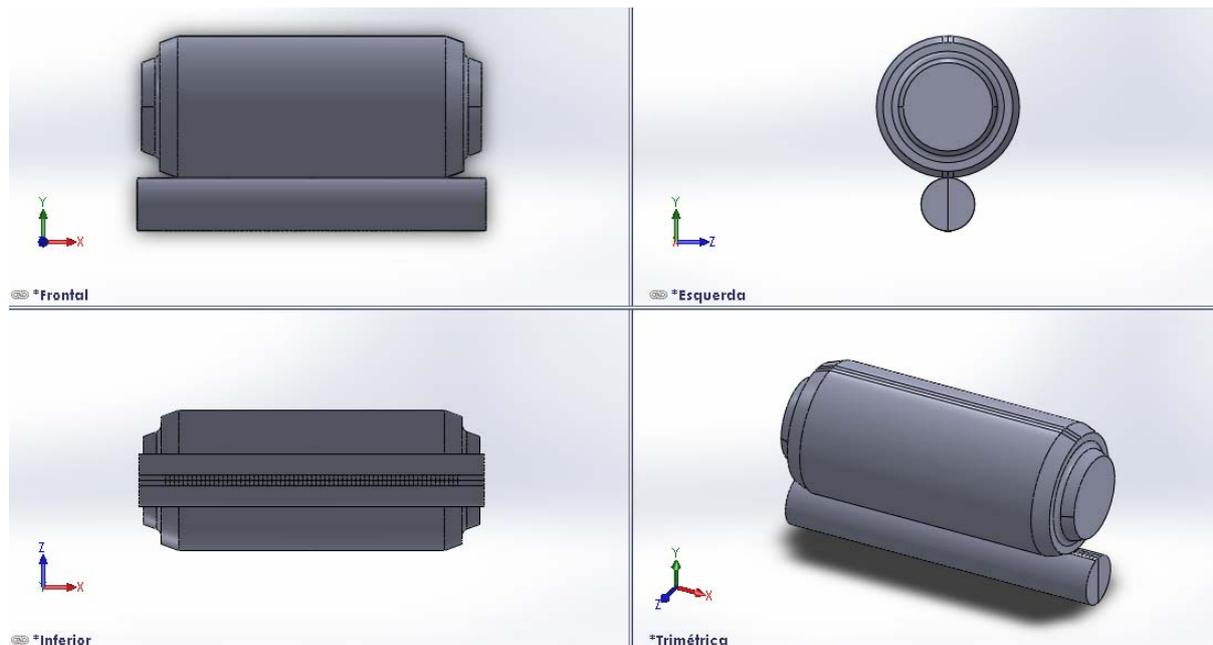


Figura 4 - Modelo do laminador feito no Solidworks.

A Figura 5 apresenta a malha de elementos finitos do laminador modelado. Foram utilizados cerca de 70.000 elementos tetraédricos quadráticos (presença de nós intermediários nas arestas), resultando em cerca de 100.000 nós. Foram aplicados refinamentos nas regiões de contato e de aplicação da carga.

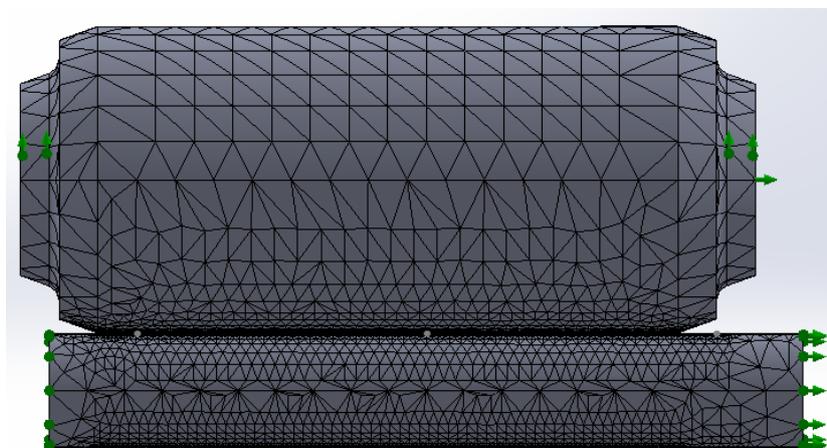


Figura 5 - Malha de elementos finitos do laminador.

2.4 Modelo Híbrido

Apresenta-se neste item o fluxograma do modelo híbrido para cálculo do perfil final da tira.

- i - Aplica-se uma carga uniformemente distribuída sobre o laminador;
- ii - Extraem-se os deslocamentos verticais resultantes na linha central de contato entre o cilindro de trabalho e a tira;
- iii - Processam-se esses resultados e obtém-se o perfil gerado da tira;
- iv - Caso esse perfil seja semelhante ao perfil anterior (dentro de uma tolerância), o problema está resolvido; Caso contrário siga no item v;

- v - Com esse perfil é possível obter as reduções de espessura que foram aplicadas à tira;
- vi - Calcular as cargas de laminação com esse novo perfil de reduções;
- vii - Aplicar essas cargas sobre o modelo em elementos finitos; voltar ao item ii.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo foi executado em três situações distintas: a) $C = 0$; b) $C = 50$ mm; c) $C = 75$ mm.

A Figura 6 mostra um dos resultados em deslocamentos verticais do modelo em elementos finitos.

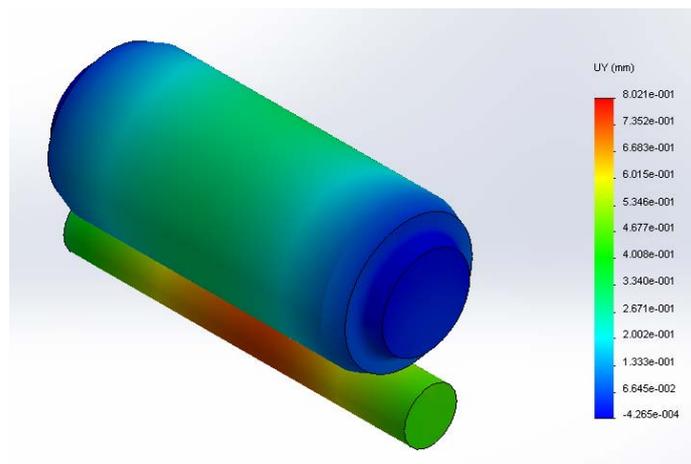


Figura 6 - Resultados em deslocamentos verticais de um dos casos.

As Figuras 7, 8 e 9 apresentam os perfis da tira e sua convergência (três iterações) respectivamente para os casos a), b) e c).

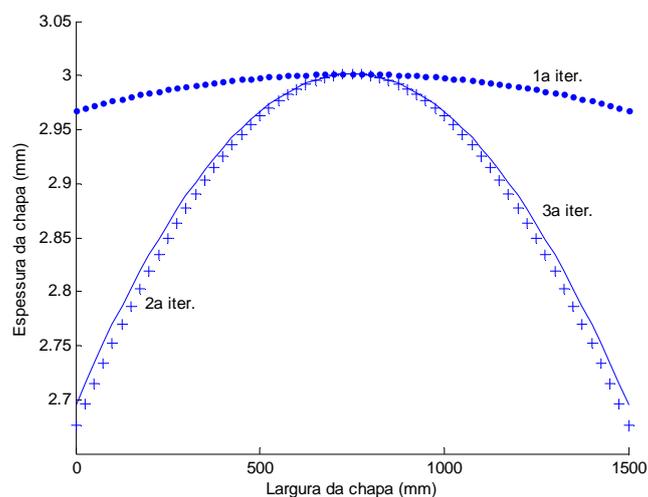


Figura 7 - Perfis finais da tira em três iterações, para $C = 0$ (caso a).

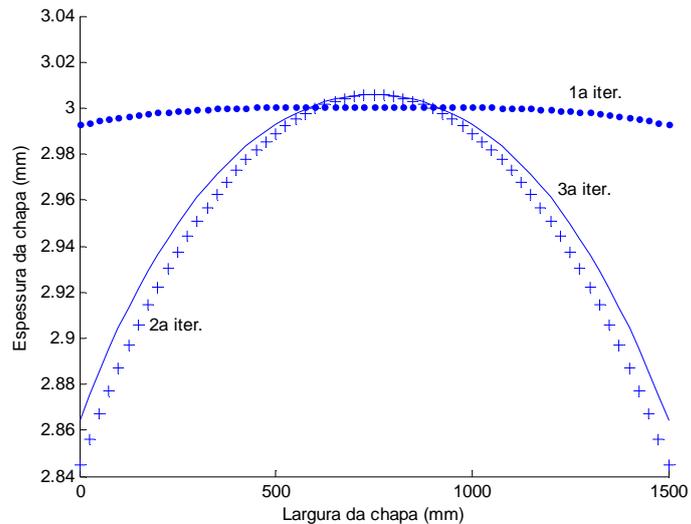


Figura 8 - Perfis finais da tira em três iterações, para $C = 50$ mm (caso b).

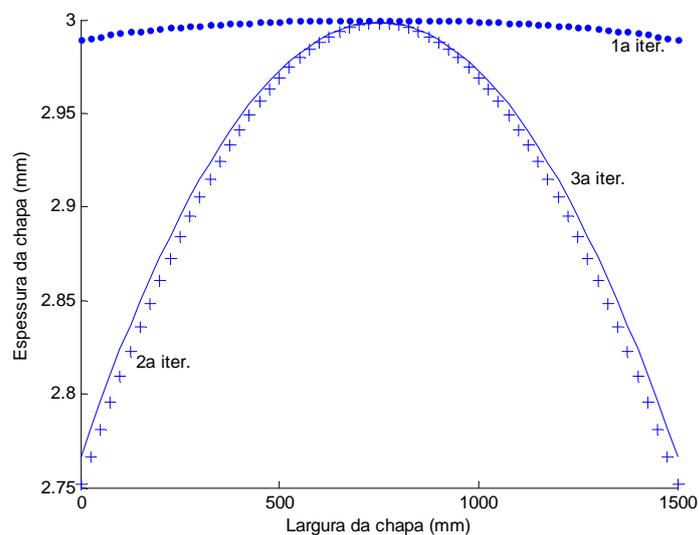


Figura 9 - Perfis finais da tira em três iterações, para $C = 75$ mm (caso c).

Da análise das Figuras 7, 8 e 9 pode-se observar que a convergência ao perfil final ocorre rapidamente. Três iterações são suficientes para se chegar ao perfil final da chapa.

Pode-se observar na Figura 10 os três perfis obtidos das simulações anteriores.

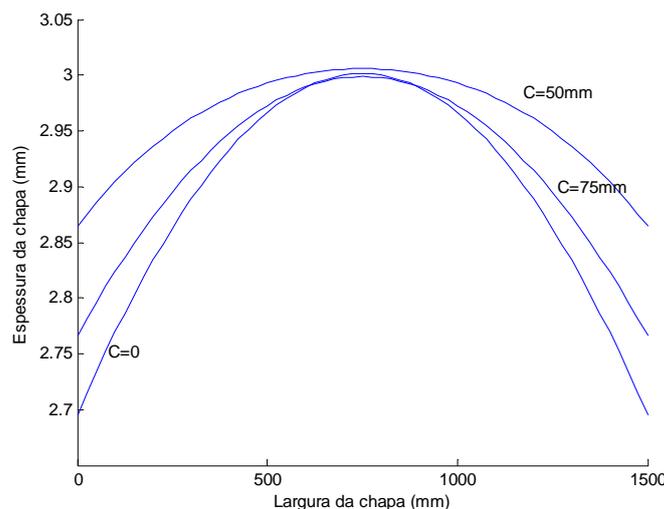


Figura 10 - Perfis finais da tira.

Os resultados finais em termos da coroa absoluta (C_{40} , medida a 40 mm das bordas da chapa) das chapas estão resumidos na Tabela 2.

Observa-se que a coroa absoluta diminui inicialmente com o deslocamento axial positivo (de 0 a 50 mm). Ao continuar a deslocar o cilindro de trabalho para além de 50 mm, porém, observa-se um aumento da coroa.

Tabela 2 - Resultados de coroas das tiras e carga por deslocamento axial

Deslocamento axial (mm)	C_{40} (μm)	Carga total de laminação (MN)
0	275	1,08
50	125	1,05
75	210	1,07

4 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi desenvolvido um modelo híbrido para simular a laminação de uma chapa por um laminador quádruplo com cilindros de trabalho e de encosto com perfis CVC.

O método demonstrou possuir uma rápida convergência até o perfil final, o que significa menos tempo para se chegar ao perfil final da chapa para cada configuração de operação.

Ao avançar axialmente o cilindro de trabalho, observou-se uma queda na coroa absoluta da tira, o que era esperado. Porém, ao se continuar a deslocar para além de 50mm observou-se um aumento na coroa.

Deve-se chamar a atenção para o fato de que este modelo considera a deformação elástica dos cilindros para calcular o perfil da chapa, fato não considerado por alguns estudiosos ao desenvolver trabalhos sobre perfis CVC, o que poderia colocar em dúvida seus resultados.

O método demonstrou ser capaz de obter o comportamento do laminador diante dos deslocamentos axiais. O mais interessante, porém, é que neste mesmo modelo podem-se impôr as coroas térmicas e de desgaste, coroas diferentes do CVC, carga de contraflexão, chapa com coroa não nula, etc... Até o cruzamento dos cilindros é possível modelar sem perder a fidelidade do modelo tridimensional. Particularmente no caso da coroa térmica é possível realizar uma análise de transferência de calor e calcular a expansão térmica dos cilindros. A flexibilidade do

modelo é um grande incentivo para se continuarem as pesquisas em torno deste modelo híbrido.

Como trabalhos futuros serão realizados estudos mais aprofundados sobre a largura da faixa de aplicação da carga, que, em princípio deve ser o comprimento do arco-de-contato, e a comparação com dados experimentais, além de se testarem diferentes perfis de cilindros como o SmartCrown⁽⁶⁾ e, eventualmente uma análise da expansão térmica dos cilindros.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio e financiamento do Cefet-MG e da Fapemig.

REFERÊNCIAS

- 1 NIJHUIS, T.; SEILINGER, A.; KIERNER, T.; DJUMLIJA, G. Innovation trends in hot strip rolling, **Millennium Steel**, pp. 195-200, 2005.
- 2 CORNELIO, G. T.; MURAD, B. B. S.; LANG, R. M.; MATSUMOTO, M. M.; TAVARES, M. C., GUARDA, A. A. S.; REBELLATO, M. A. Estudo de extensão de campanha do laminador de tiras a quente da Arcelormittal Tubarão, **48º Seminário de Laminação ABM**, pp. 1-8, outubro, 2011.
- 3 HARTUNG, H. G.; KLAMMA, K.; ROHDE, W.; SEIDEL, J. Roll stand comprising a CVC roll pair, **United States Patent** No.: US 7,059,163 B2, pp. 1-8, junho, 2006.
- 4 DILIGENSKII, E. V. Design calculations for roll assemblies that undergo axial displacement in sheet cold-rolling mills, **Metallurgist**, Vol. 53, Nov. 1-2, 2009.
- 5 ZHANG, X. M.; JIANG, Z. Y.; TIEU, A. K.; LIU, X. H.; WANG, G. D. Numerical modeling of thermal deformation of CVC roll in hot strip rolling, **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 130-131, pp. 219-223, 2002.
- 6 LIU, Z.; GAO, R.; YANG, G. A design of a SmartCrown work roll profile, **International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology IEEE**, pp. 1227-1229, agosto, 2011.