

ANÁLISE DA DEFLEXÃO ELÁSTICA DO CILINDRO DE TRABALHO E SUA INFLUÊNCIA NA GERAÇÃO DE DEFEITOS DE PLANICIDADE NA LAMINAÇÃO DE TIRAS A FRIO¹

Willian Costa do Nascimento²
Luciano Pessanha Moreira³
Anderson Pires de Oliveira⁴
Eduardo Amorim Motta⁵
Sidnei Gomes Itaboray⁶

Resumo

A simulação numérica tem sido amplamente utilizada nos meios científico e industrial para otimização e controle off-line de processos e prever fenômenos visando a obtenção de produtos com características dimensionais cada vez mais restritas. O presente trabalho mostra o desenvolvimento de um modelo em elementos finitos para previsão da deformação e deflexão elástica nos cilindros de trabalho durante o processo de laminação de tiras finas a frio, que podem ocasionar distúrbios no “gap” de laminação e, por conseguinte, variações na distribuição das tensões normais ao longo da largura da tira, as quais, por sua vez, podem ter um influência na planicidade da tira. Para tal, foi proposto um modelo tridimensional (3D) com base nos dados industriais da última cadeia do laminador de tiras a frio da CSN de modo reproduzir as condições de processamento de uma folha metálica. As previsões numéricas do modelo 3D foram comparadas com as medidas industriais das tensões normais ao longo da largura da tira obtidas pelo sistema de controle *shapemeter*.

Palavras-chave: Laminação a frio; Modelamento; Método de elementos finitos.

ANALYSIS OF THE ELASTIC DEFLECTION OF THE WORK ROLL AND ITS INFLUENCE ON THE FLATNESS DEFECTS IN THE STRIP COLD ROLLING

Abstract

The numeric simulation has been widely used in the academic and industrial sectors to optimization and *off-line* process control and predicts phenomena aiming to obtain products with smaller dimensional tolerances. The present work shows the development of finite element model to forecast the deformation and elastic deflection of the work-rolls during the cold thin strip rolling, which may cause perturbations in the rolling gap and, as a consequence, variations in the normal stress profile along the strip width which, in turn, may have an effect on the strip flatness. For this purpose, a three dimensional (3D) finite element model was proposed based on the industrial data of the last stand from the CSN's 4-high cold rolling mill so as to reproduce the processing conditions of a thin metallic strip. The numerical predictions of the 3D model were compared with the industrial values of the normal stresses along the strip width obtained by the measurement and control system *shapemeter*.

Key words: Cold rolling; Modeling; Finite element method.

¹ Contribuição técnica ao 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 18 a 21 de novembro de 2013, Ouro Preto, MG, Brasil.

² Eng. Metalúrgico, MSc., Engº da CSN. Volta Redonda, RJ, Brasil. willian.costa@csn.com.br

³ Eng. Mecânico, D.Sc., Profº Associado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense. Volta Redonda, RJ, Brasil. luciano.moreira@metal.eeimvr.uff.br

⁴ Eng. Produção, Engº da CSN. Volta Redonda, RJ, Brasil. willian.costa@csn.com.br
a.pires@csn.com.br

⁵ Eng. Metalúrgico, MSc., Engº da CSN. Volta Redonda, RJ, Brasil. willian.costa@csn.com.br
eduardoamorim@csn.com.br

⁶ Eng. Metalúrgico, MSc., Especialista em Siderurgia da CSN. Volta Redonda, RJ, Brasil. willian.costa@csn.com.br
sidnei@csn.com.br

1 INTRODUÇÃO

Ocorrências de ondulações em processos de laminação a frio de planos são comuns, e tendem a ocasionar descontinuidades de planicidade denominados industrialmente de repuxado lateral (RT), repuxado central (RC) e ondulado lateral (OL). Quando visualizados após o processo de laminação a frio estão isentos das tensões de processo adquirindo uma forma de planicidade comumente denominada “manifestada”, conforme mostrado na Figura 1. Este defeito pode vir a propagar-se em posições ao longo da largura e comprimento da tira e, em função da amplitude e comprimento das ondulações formadas, pode provocar perdas metálicas, sobretudo nas linhas destinadas ao recozimento contínuo. Neste caso, isto ocorre devido ao possível desalinhamento da tira nas torres de acumulação, e por consequência, ocasionando a formação de “rugos” e até mesmo o rompimento da tira e, por fim, paradas de processo e comprometimento da segurança operacional.

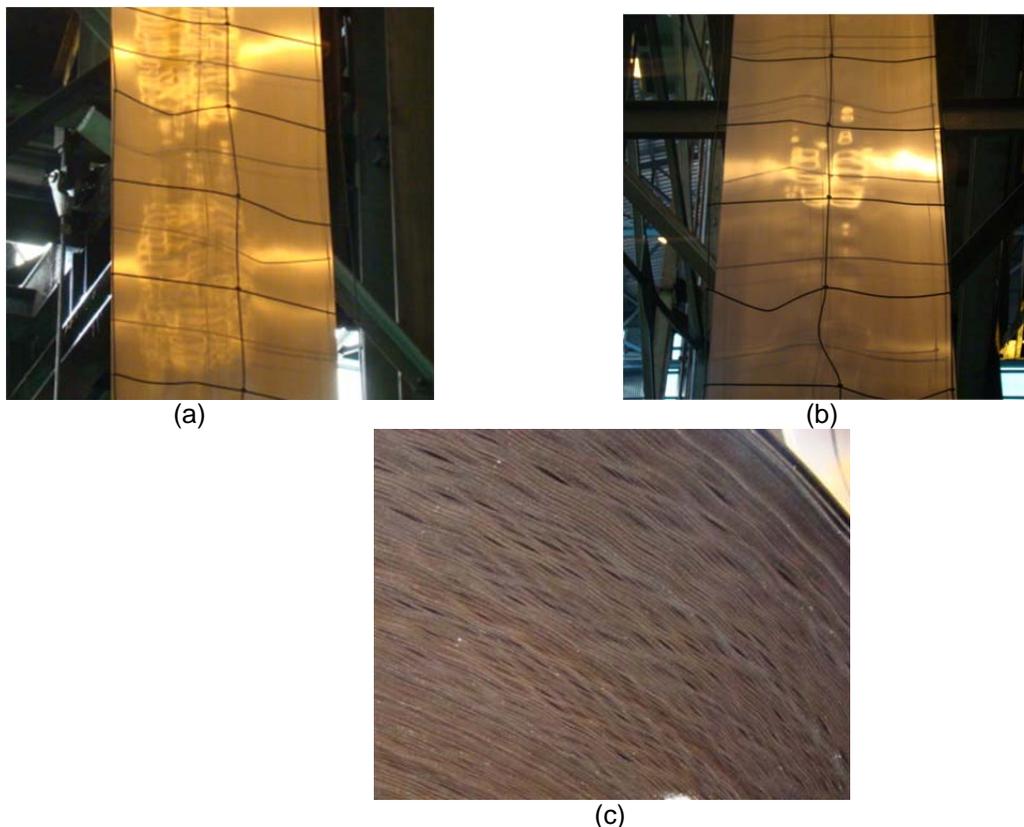


Figura 1 – Tipos de defeitos de planicidade “manifestada” em tiras laminadas a frio: (a) Repuxado lateral, (b) Repuxado central e (c) ondulado lateral [CSN].

Os defeitos de planicidade são oriundos de uma distribuição não uniforme da espessura da tira decorrente de uma redução diferenciada ao longo da sua seção transversal. Isto ocorre devido a diferença existente entre o perfil da tira na entrada da cadeira e do “gap” de laminação. Com isso, são originadas deformações heterogêneas com conseqüente introdução de tensões residuais na tira, as quais, por sua vez, podem vir a ocasionar descontinuidades de planicidade visíveis durante e ou após o processo de laminação a frio. A configuração transversal do “gap” de laminação é definida pelo acoplamento termomecânico do conjunto de cilindros que compõem a cadeira de laminação. Nessa região, os cilindros de laminação estão sujeitos a variações dimensionais devido à dilatação ou expansão térmica que tem

lugar ao longo do comprimento dos cilindros. O controle da expansão térmica tem sido classificado como um dos fatores críticos para obtenção de tiras com boa forma de planicidade.⁽¹⁾ Na verdade, uma distribuição de espessura da tira ao longo de sua largura em concordância com o desejado é fundamental para a qualidade da planicidade do produto.⁽²⁾ O objetivo principal desse estudo é desenvolver um modelo para previsão da magnitude da deformação ou deflexão elástica que ocorre no conjunto de cilindros da cadeia de laminação devido à resistência a conformação do material, conforme demonstrado na Figura 2.

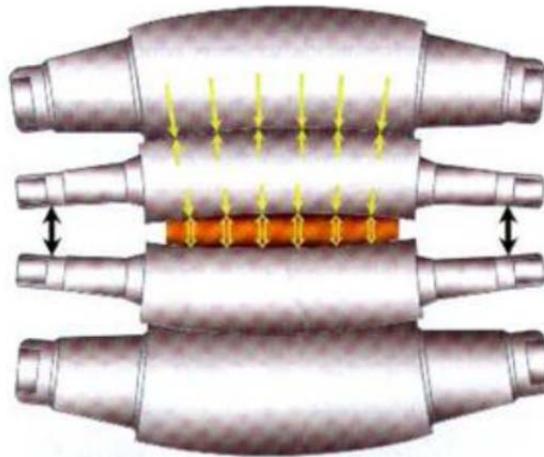


Figura 2 – Deflexão dos cilindros devido à aplicação de carga.⁽³⁾

Visando o controle da amplitude das ondulações formadas, os modernos laminadores a frio atualmente fabricados são providos de um sistema de controle e correção da planicidade denominado *shapemeter*, geralmente instalado na última cadeia de laminação, sendo o responsável pelo controle do “gap” entre os cilindros através de um sistema de contra flexão denominado *bending* e de refrigeração dos cilindros conforme mostrado na Figura 3.

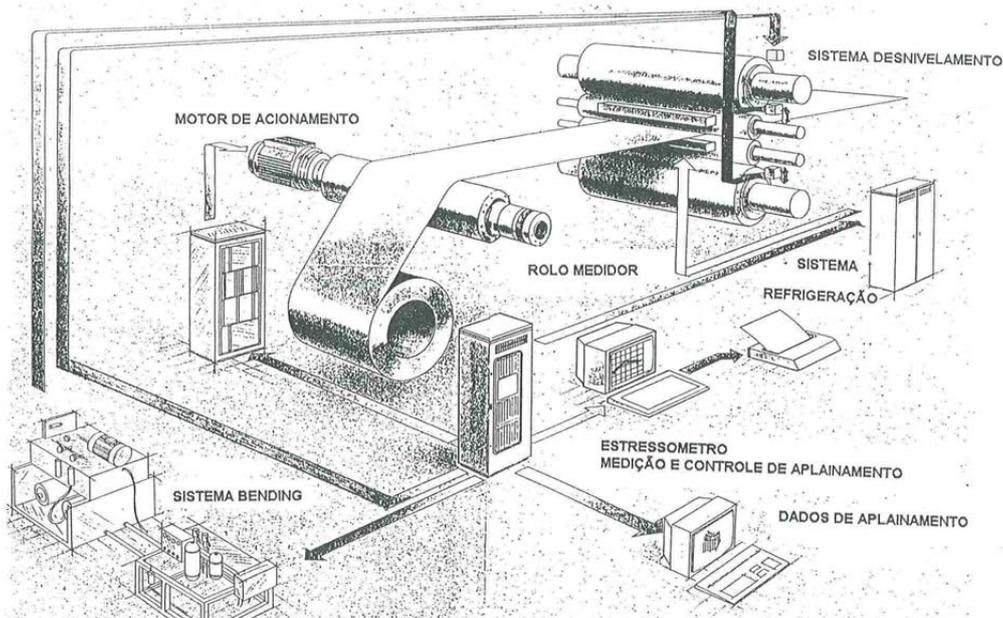


Figura 3 - Sistema de medição e controle da planicidade.⁽⁴⁾

O sistema *shapemeter* é composto por um rolo de medição localizado após a 5ª cadeira, para o caso do laminador em estudo, subdividido em 21 zonas de medição, possuindo cada zona quatro transdutores de pressão responsáveis por medir a tensão que cada região do material exerce sobre o rolo medidor. Para quantificar a planicidade é internacionalmente utilizada a “Unidade I” ou “UI” que é definida como o erro de planicidade causado por um comprimento diferencial de 0,001%.

$$Aplainamento = \left(\frac{L_l - L_s}{L_l} \right) \times 10^5 \text{ UI} \quad (1)$$

na qual, L_l é o comprimento final e L_s o comprimento inicial da tira.

A planicidade registrada sob ação das tensões de laminação é calculada pela medida de força radial em cada zona do rolo cujo valor obtido é convertido para o estiramento da tira. Em seguida, são calculados os desvios individuais de cada zona em relação ao valor de estiramento médio conforme:

$$\Delta\sigma_i = \left(\frac{F_i - \bar{F}}{\bar{F}} \right) \times \left(\frac{T}{Wh} \right) \quad (2)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{T}{wh} \quad (3)$$

F_i é a força radial na zona i (N), \bar{F} é o valor médio das forças radiais nas zonas (N), $\bar{\sigma}$ a tensão normal (N/mm²), T é a força total na tira (N), $\Delta\sigma_i$ é a tensão específica na zona i (N/mm²), W é a largura da tira (mm) e h a espessura da tira (mm).

2 METODOLOGIA

No modelamento tridimensional (3D) foram utilizados os dados geométricos e de processo da quinta cadeira do laminador N^o1 da CSN e o dimensional de uma tira de aço C-Mn de grande volume de produção no fluxo de folhas metálicas. O objetivo principal do modelamento é a obtenção da magnitude da deflexão elástica do cilindro de trabalho, e da distribuição de tensão ao longo da tira. A definição de escolha da quinta cadeira de laminação para o desenvolvimento foi definida em função da possibilidade de validação do modelo que será realizada pelo sistema de medição e controle da planicidade *shapemeter* por meio dos valores de tensões medidas por este sistema.

2.1 Comportamento Plástico do Material

Para descrição do encruamento do material da tira, foram realizados dois ensaios de tração uniaxial em corpos de prova de uma tira de aço C-Mn laminado a quente na condição após decapagem. A espessura inicial da tira é igual a 2,25 mm, a qual é reduzida no trem de laminação a frio com cinco cadeiras conforme plano de redução apresentado na Figura 4a. Para prever o comportamento plástico da tira em função da deformação plástica verdadeira acumulada entre a primeira e penúltima cadeira, este foi ajustado pela seguinte equação de encruamento:⁽⁵⁾

$$\bar{\sigma} = \left[600 + 150 \left(\bar{\varepsilon}_0 + \bar{\varepsilon}^p \right) \right] \left[1 - 0,35 e^{-5,9 \left(\bar{\varepsilon}_0 + \bar{\varepsilon}^p \right)} \right] - 172 \text{ MPa} \quad (4)$$

na qual o termo de pré-deformação é definido a partir das espessuras de entrada h_e e saída h_s de cada cadeira por $\bar{\varepsilon}_0 = 2/\sqrt{3} \ln(h_e/h_s)$ enquanto que a deformação

mecânica em cada cadeia varia de zero na entrada até o valor $\bar{\epsilon}^p = 2/\sqrt{3} \ln(h_e/h_s)$. A Figura 4b compara as previsões do ajuste obtido com a Eq. (4) com os valores médios de tensão-deformação plástica em tração uniaxial e apresenta igualmente o comportamento plástico previsto em cada cadeia. O comportamento elástico da tira foi descrito pela lei de elasticidade linear isotrópica de Hooke por meio do módulo de elasticidade longitudinal $E = 207.000 \text{ MPa}$ e pelo coeficiente de Poisson $\nu = 0,29$. Assumindo-se a hipótese de encruamento isotrópico, o comportamento plástico foi descrito pelo critério de escoamento de von Mises.

2.2 Modelo de Elementos Finitos

O programa comercial de elementos finitos Abaqus/Standard foi utilizado para o modelamento da quinta cadeia de laminação. Para tal, foram consideradas somente as geometrias da tira e dos cilindros de encosto e trabalho assumindo-se simetria em relação aos planos XY e XZ, indicados no esquema apresentado na Figura 5.

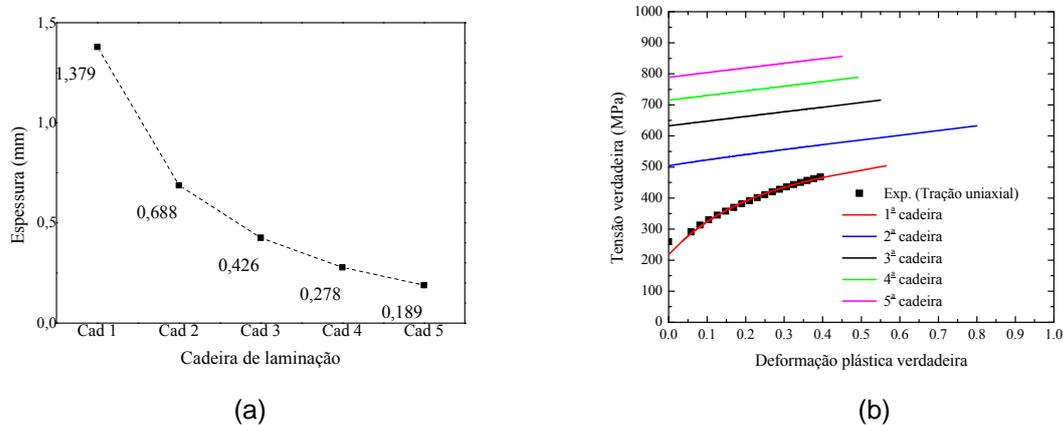


Figura 4 – Dados do processo de laminação de tiras a frio: (a) plano de redução e (b) comportamento plástico do material da tira ajustado de acordo com a Eq. (4).

O comportamento dos cilindros de encosto e trabalho é assumido como elástico linear e isotrópico definido por $E = 207.00 \text{ MPa}$ e $\nu = 0,29$. O modelo 3D conta com um total de 241.200 elementos hexaédricos, repartidos em 28.628 e 84.772 elementos sólidos com 8 nós e integração reduzida para os cilindros de encosto e trabalho, respectivamente e, 127.800 elementos sólidos com 8 nós e integração completa para descrever a tira.

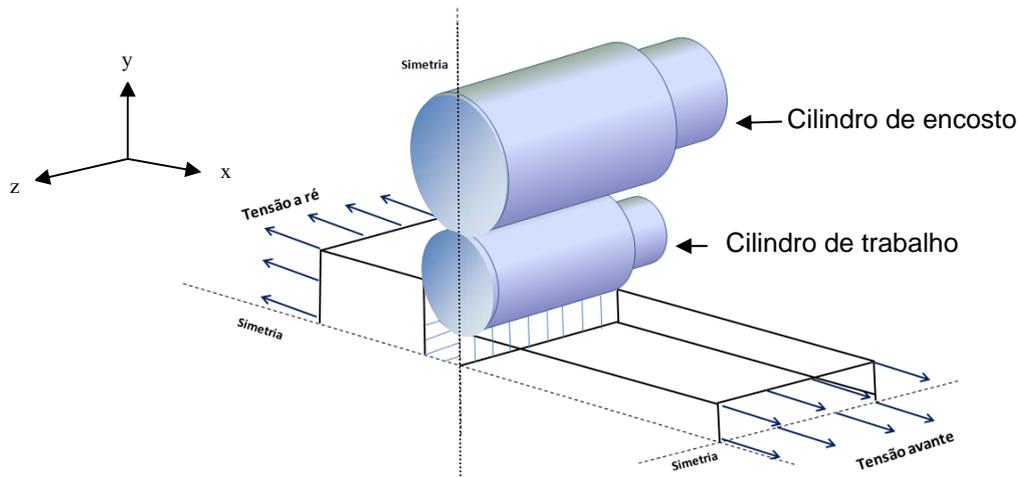
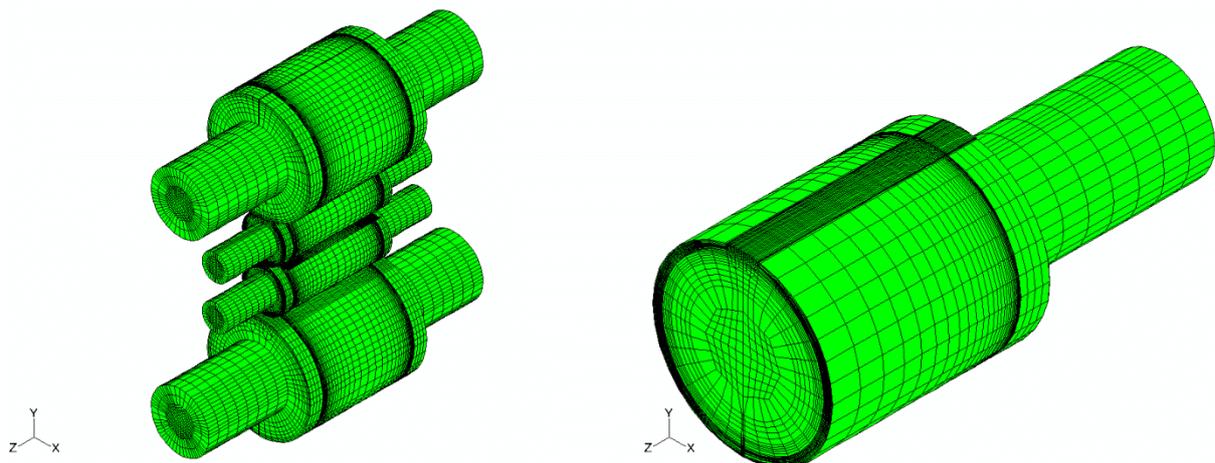


Figura 5 – Esquema do modelo 3D de laminação a frio de tiras.

Neste trabalho, foi assumido um carregamento estático imposto a uma superfície do cilindro de encosto com valor de pressão correspondente com a medida industrial da carga de laminação na quinta cadeira (8,39 kN/mm). Nesse sentido, as regiões de interesse representadas pelas superfícies de contato entre o cilindro de encosto e trabalho assim como entre o cilindro de trabalho e o arco de contato com a tira, foram refinadas com maior densidade de elementos, porém, mantendo-se uma malha estruturada de elementos conforme mostrado na Figura 6. No presente trabalho, foi analisado somente a influência deste carregamento em conjunto com os valores industriais de tensões a ré e avante aplicados a tira na quinta cadeira e, portanto, sem consideração dos efeitos de rotação do cilindro de trabalho uma vez que os elementos sólidos não possuem graus de liberdade de rotação, conforme a abordagem proposta em Kim, Lee e Hwang.⁽²⁾

Figura 6 – Esquema do modelo 3D de laminação a frio de tiras.



O cilindro de trabalho possui configuração descrita pelo método de elementos finitos com diâmetro na região central na ordem de centésimos de milímetros maior que o diâmetro da borda, reproduzindo assim a condição industrial de coroamento. Ademais, admitiu-se também como condição prescrita, uma coroa relativa da tira na entrada da quinta cadeira igual a 2,22%, isto é, relação esta entre a coroa absoluta e

a espessura medida no centro da seção transversal assumindo-se que esta condição seja oriunda da coroa relativa da bobina laminada a quente decapada. Os demais parâmetros de processo relativos ao modelo 3D da quinta cadeira estão definidos na Tabela 1. Foi adotado a lei de Coulomb para descrever o atrito entre as superfícies de contato cilindro de encosto-cilindro de trabalho e cilindro de trabalho-tira com valores do coeficiente de atrito estático μ iguais a 0.1 e 0.05, respectivamente. Foram impostas as partes do modelo 3D as condições de contorno de simetria em termos de deslocamentos.

Tabela 1 – Parâmetros de laminação da quinta cadeira adotados no modelo 3D

Espessura de entrada (mm)	0,278
Espessura de saída (mm)	0,189
Largura da tira (mm)	984
Tensão a ré (MPa)	276,1
Tensão avante (MPa)	62,2
Carga de laminação (kN/mm)	8,39
Coroa absoluta da tira (mm)	0,0062
Coroa do cilindro de trabalho (mm)	0,06
Diâmetro do cilindro de trabalho (mm)	470
Comprimento da mesa do cilindro de trabalho (mm)	1.135
Coroa do cilindro de encosto (mm)	0,00
Diâmetro do cilindro de encosto (mm)	1.108,1
Comprimento da mesa do cilindro de encosto (mm)	1.244,6

As simulações numéricas foram realizadas com a licença acadêmica do programa ABAQUS/Standard versão 6.9-1 em uma estação de trabalho com dois processadores Intel Xeon 3.47 GHz com 24 núcleos cada e 24 Gb da memória RAM. Em modo de processamento paralelo (Message Passage Interface), o modelo 3D foi executado em 124 incrementos com um tempo computacional de 60.608 segundos, ou seja, cerca de 17horas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a validação experimental do modelo de elementos finitos efetuou-se o processo de laminação a frio conforme o dimensional pré-estabelecido na Tabela 1. Os parâmetros de processo utilizados foram obtidos através de valores industriais médios de 70 bobinas de mesma dimensão processadas em períodos anteriores. O resultado da planicidade do material processado pode ser visualizado na Figura 7, na qual pode ser observado a simetria dos valores obtidos em unidades I ao longo da largura e o comprimento da bobina, estimado em 15,5 km.

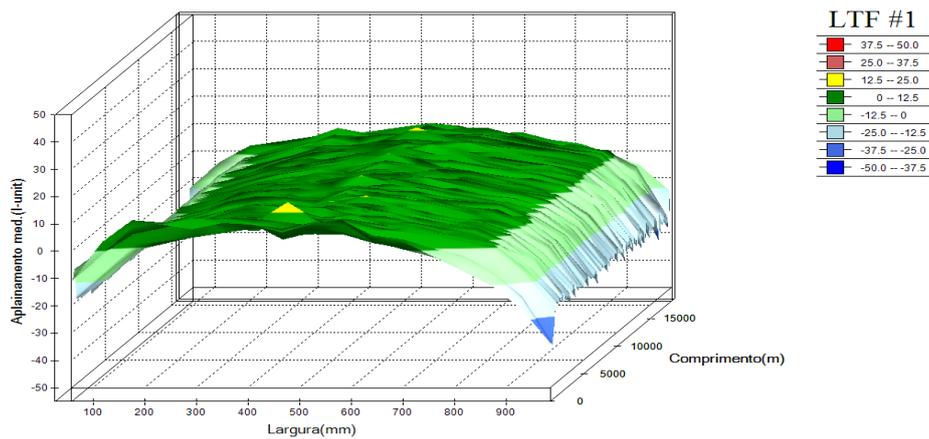


Figura 7 – Aplaiamento em função da largura e comprimento da tira.

A partir desta mesma bobina processada foi possível a obtenção dos valores de força radial exercida sobre o rolo *shapemeter* conforme descrito na Figura 8b. Através dos valores medidos em cada zona do rolo e o uso das equações 2 e 3 para um valor médio entre as forças radiais nas zonas igual a 5.834 N tem-se a tensão radial exercida pela tira no rolo medidor Figura 8a.

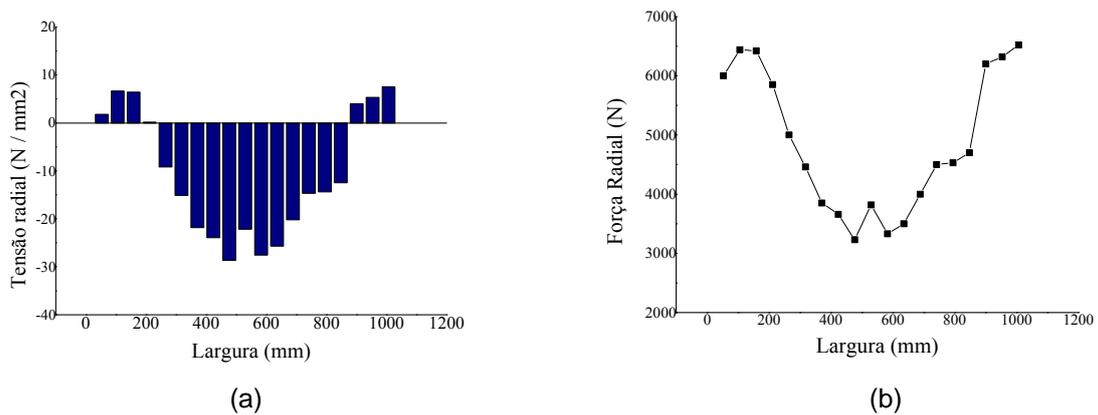


Figura 8: Medidas industriais: (a) tensão específica e (b) força radial.

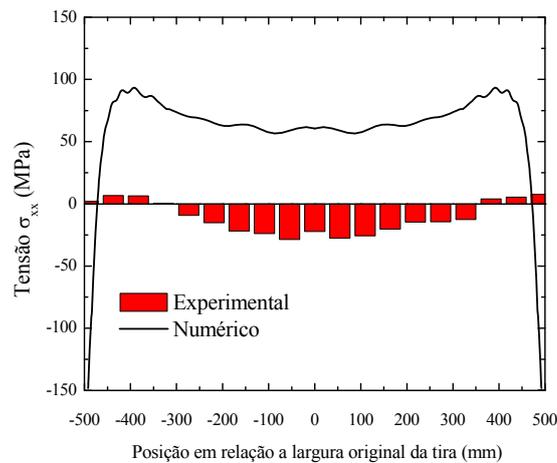


Figura 9 – Comparação entre as medidas industriais de tensões normais ao longo da largura fornecidas pelo *shapemeter* e as previsões numéricas do modelo 3D.

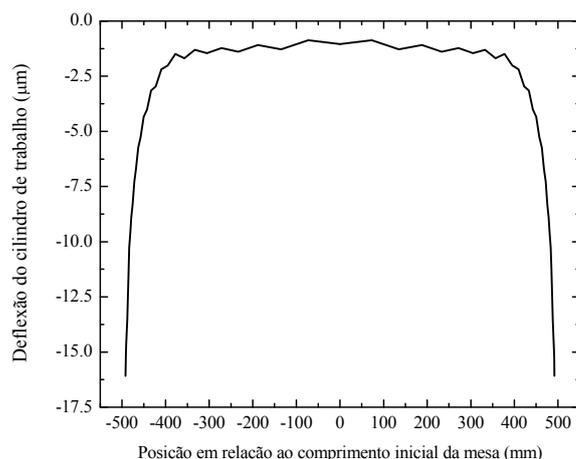


Figura 10 – Previsão da deflexão elástica do cilindro de trabalho.

A Tabela 2 apresenta a comparação dos parâmetros de processo utilizados no modelo desenvolvido. A diferença nos valores de planicidade, obtidos a partir das medidas de tensão, entre as previsões numéricas do modelo de elementos finitos 3D e o sistema industrial de medição e controle *shapemeter* pode ser atribuída a alguns fatores. Em primeiro lugar, o emprego de uma curva de meta de planicidade a partir de medidas e controle na laminação a frio, como condição prescrita para este processo, visa um nível adequado de repuxado na região central da tira com as suas bordas sob condições de estiramento e sua posterior centralização na linha de recozimento contínuo após a laminação. Tal condição não foi prescrita no modelo de elementos finitos 3D. Em segundo lugar, os valores medidos e os de distribuição de tensão são influenciados pela deformação do rolo medidor de planicidade.⁽⁶⁾ Por fim, os dados de geometria e processo adotados no modelamento 3D foram estabelecidos a partir de dados estatísticos de 70 bobinas. Para fins de comparação, foi necessária a reprodução das condições industriais com os mesmos parâmetros empregados no modelo 3D.

Tabela 2. Comparação entre as condições de contorno: experimental e o modelo desenvolvido

Descrição	Industrial	Modelo	Diferença absoluta	Diferença relativa
Redução (%)	32	31,9	0,1	0,31%
Carga específica (kN/mm)	9,06	8,39	0,67	7,39%
Espessura de entrada (mm)	0,277	0,278	-0,001	-0,36%
Espessura de saída (mm)	0,189	0,189	0	0,00%
Diâmetro do cilindro de trabalho (mm)	475,7	470	5,7	1,20%
Diâmetro do cilindro de encosto (mm)	1.109,64	1.108,1	1,54	0,14%
Coroa do cilindro de trabalho (mm)	0,06	0,06	0	0,00%
Coroa do cilindro de encosto (mm)	0,00	0,00	0	0,00%
Tensão a ré (MPa)	328,49	276,13	52,36	15,94%
Tensão avante (MPa)	61,19	62,24	-1,05	-1,72%

Não foram consideradas no modelamento as características térmicas do processo de laminação de tiras a frio, cujo adequado controle é considerado crítico para obtenção de tiras com boa forma de planicidade.⁽¹⁾ A expansão térmica na

borda do cilindro pode ser negligenciada atingindo seu valor máximo na região central.⁽¹⁾ Esta condição tende a ocasionar ao longo da seção transversal da tira um perfil de tensão diferenciado, obtendo na região central valores negativos das tensões conforme apresentado na Figura 8a. A magnitude do valor de deflexão elástica obtida pelo modelo 3D é de aproximadamente 16 μm . Este valor previsto está próximo do valor industrial médio da coroa do produto folhas metálicas, que é da ordem de 4 a 6 μm . A deflexão elástica do cilindro de trabalho da primeira a quarta cadeira do laminador é corrigida por meio de modificações na configuração de refrigeração e coroa física dos cilindros de trabalho, assim como, a redistribuição de cargas e velocidades através da prática operacional. As informações obtidas no modelamento podem contribuir com a correta definição dos parâmetros de processo e coroa retificada dos cilindros de trabalho.

4 CONCLUSÕES

Apesar da diferença entre os valores absolutos das tensões normais medidas na tira e os resultados do modelo 3D, a distribuição prevista para estas tensões apresenta uma concordância em termos de forma com relação ao perfil de tensões fornecidas pelo sistema de medição e controle de planicidade (shapemeter) disponível no laminador N^o 1 de tiras a frio da CSN. Com relação a deflexão elástica do cilindro de trabalho, os valores industriais absolutos na coroa do produto folhas metálicas variam de 4 a 6 μm ao passo que as previsões do modelo 3D forneceram um valor absoluto de 16 μm . Estas diferenças apontam para a necessidade do refinamento do modelamento proposto pela consideração da cinemática do processo de laminação a frio, isto é, pela imposição da velocidade de rotação do cilindro de trabalho em atendimento com a condição de mordida.

Agradecimentos

Willian Costa do Nascimento agradece a CSN por todo apoio na realização do presente trabalho. Luciano P. Moreira agradece a FAPERJ pelo apoio financeiro (JCNE 2012) e ao CNPq pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 A.A.TSENG, S.X.TONG, T.C.CHEN - Thermal expansion and crown evaluations in rolling processes, *Materials & Design*, Vol. 18, 1997, pp. 29-41.
- 2 T.H.KIM, W.H. LEE, S.M. HWANG, An integrated FE Process Model for the prediction of strip profile in flat rolling, *ISIJ International*, Vol. 43, 2003, pp. 1947-56.
- 3 RIZZO, E.M.S. Processos de laminação dos aços, ABM, 2007
- 4 ABB STRESSOMETER – Sistema de medição e controle de planicidade, 2002, pp. 33
- 5 S.ABDELKHALEK, P. MONTMITONNET, M.POTIER-FERRY, H.ZAHROUNI, N.LEGRAND and P.BUSSLER - Strip flatness modelling including buckling phenomena during thin strip cold Rolling, *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 37, 2010, pp. 290-297.
- 6 LIU Jia-Wei, ZHANG Dian-hua, WANG Jun-sheng, WANG Peng-fei - *Deflection compensation model for flatness measuring roll*, *Science Direct*, 2010, 17(12);35-37,45.