

# MODELAMENTO POR ELEMENTOS FINITOS DO PRIMEIRO PASSE DE LAMINAÇÃO A FRIO DE UM AÇO C-MN<sup>1</sup>

*Willian Costa do Nascimento<sup>2</sup>  
Marcelo Costa Cardoso<sup>3</sup>  
Luciano Pessanha Moreira<sup>4</sup>*

## Resumo

O processo de laminação a frio de produtos planos tem sido extremamente investigado por métodos experimentais, analíticos e numéricos. O trabalho é baseado no modelamento por elementos finitos do primeiro passe do laminador quádruo da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). Um modelo bidimensional foi proposto considerando apenas o cilindro de trabalho assumindo um estado plano de deformação, material isotrópico com encruamento isotrópico não-linear. Uma chapa de aço C-Mn foi caracterizada por meio de ensaios de tração uniaxial na direção de laminação para obter as propriedades mecânicas usadas no modelo de elemento finito. As tensões industriais a ré e avante foram levadas em consideração. As simulações por elementos finitos foram realizadas com auxílio do programa comercial ABAQUS empregando o método implícito de integração, cilindro de trabalho como corpo rígido e modelo de atrito de Coulomb. As previsões numéricas de carga de laminação apresentaram boa concordância com valores industriais e calculados pelo método dos blocos de acordo com o modelo de Bland-Ford.

**Palavras-chave:** Laminação a frio; Aço C-Mn; Método de elementos finitos.

## FINITE ELEMENT MODELING OF THE FIRST COLD ROLLING PASS OF A C-MN STEEL

### Abstract

The cold rolling process of flat products has been widely investigated by experimental, analytical and numerical methods. This work is based upon the finite element modeling of the first pass of the four high mill of the CSN steel plant. A two dimensional model has been proposed by considering only the work-roll under the assumptions of plane-strain deformation, material isotropy with isotropic nonlinear work-hardening. A C-Mn steel strip has been first characterized by means of the uniaxial tensile test at the rolling direction to obtain the mechanical properties used in the finite element model. The industrial back and forward tensions were also taken into account. The finite element simulations were carried out with the commercial code ABAQUS using the integration implicit method, work-roll as a rigid body and Coulomb friction model. The numerical predictions of the roll-force presented a good agreement with the industrial and the calculated values by the slab method according to the Bland-Ford model.

**Keywords:** Cold rolling; C-Mn steel; Finite element method.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 48º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 24 a 27 de outubro de 2011, Santos, SP.*

<sup>2</sup> *Engº Metalúrgico, Mestrando em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal Fluminense, Engenheiro Especialista da Gerência de Processos da Laminação da Companhia Siderúrgica Nacional.*

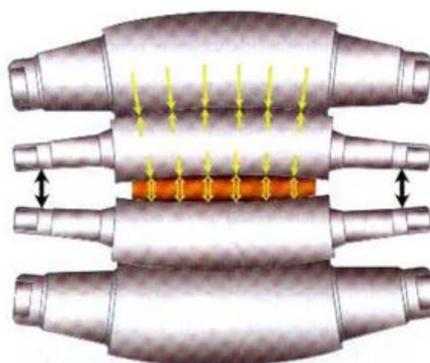
<sup>3</sup> *Engº Civil, Mestrando em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal Fluminense.*

<sup>4</sup> *Engº Mecânico, DSc., MSc., Professor Adjunto, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense.*

## 1 INTRODUÇÃO

O *set up* de redução por passe em um laminador a frio de planos é uma das etapas mais importantes do processo. Este visa a correta distribuição das forças e o torque do laminador sem exceder seus limites operacionais, obtendo assim produtos com precisão dimensional cada vez mais restrita em função das necessidades do mercado consumidor, minimizando o custo operacional de produção, redução dos desvios de qualidade, entre outros. Neste sentido várias pesquisas têm sido realizadas com fins a se ter modelos de previsão de carga em um processo de laminação a frio ou a quente cada vez mais precisos.

A carga de laminação tem uma influência direta no posicionamento da separação dos cilindros (*roll gap*), na deflexão dos cilindros de trabalho, a qual, mesmo em condições mínimas de desvio, prejudica a forma e a tolerância de espessura e planicidade do produto final (Figura 1).



**Figura 1.** Deflexão dos cilindros devido à aplicação de carga.<sup>(1)</sup>

O presente estudo descreve o modelamento por Elementos Finitos do primeiro passe do laminador 3 de cinco cadeiras quádruplo da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) utilizando o *software* ABAQUS *standard*. É realizada uma comparação entre o valor de carga obtido pela análise numérica com e sem os valores de tensão experimental, o valor previsto pelo método dos blocos segundo modelo de Bland-Ford (1948), utilizado pelo equipamento para realização do *set up* do laminador, e o valor experimental da carga de laminação medido por células de carga localizadas no cilindro de encosto inferior da primeira cadeira. O valor experimental foi obtido na condição de regime ou estabilidade do equipamento durante o processamento de um aço C-Mn de composição química (Tabela 1), utilizando-se como base de informação para a confecção do modelo o trabalho de Malinowski e Lenard.<sup>(2)</sup>

**Tabela 1.** Composição química do aço C-Mn<sup>(3)</sup>

(%) C	(%) Mn	(%) Al	(%) Si	(%) N	(%) Ti	(%) S	(%) P	(%) Nb	(%) Cr	(%) Ni	(%) Sn
0,03/ 0,06	0,20/ 0,30	0,02/ 0,06	0,00/ 0,02	0,0001 /0,006	0,00/ 0,005	0,00/ 0,025	0,00/ 0,02	0,00/ 0,005	0,00/ 0,06	0,00/ 0,04	0,00/ 0,02

No modelo por elementos finitos, o cilindro de trabalho foi considerado como corpo rígido sendo negligenciada a deformação elástica ocasionada na região de contato entre a chapa e o cilindro em função da carga aplicada. A deformação e a temperatura ao longo do arco de contato foram consideradas como homogênea e isotérmica, respectivamente. Foram também negligenciadas as deformações

elásticas ao longo do arco de contato em virtude da alta deformação plástica reinante no processo. As variações que ocorrem na largura do material durante o processo são desprezíveis devido ao estado de deformação plana. O comportamento plástico da chapa foi descrito pelo critério isotrópico de von Mises segundo a hipótese de encruamento isotrópico. No modelo proposto foram introduzidas as tensões a ré e avante aplicadas ao material durante seu processamento e obtidas pela diferença de velocidades, a saber, entre a desenroladeira e a primeira cadeira e entre a primeira e a segunda cadeira, vide esquema do laminador de tiras a frio mostrado na Figura 2. Estas tensões possuem um papel fundamental com respeito à estabilidade ou centralização do material ao longo do trem de laminação como também quanto à diminuição da carga de laminação necessária para redução da espessura do material.

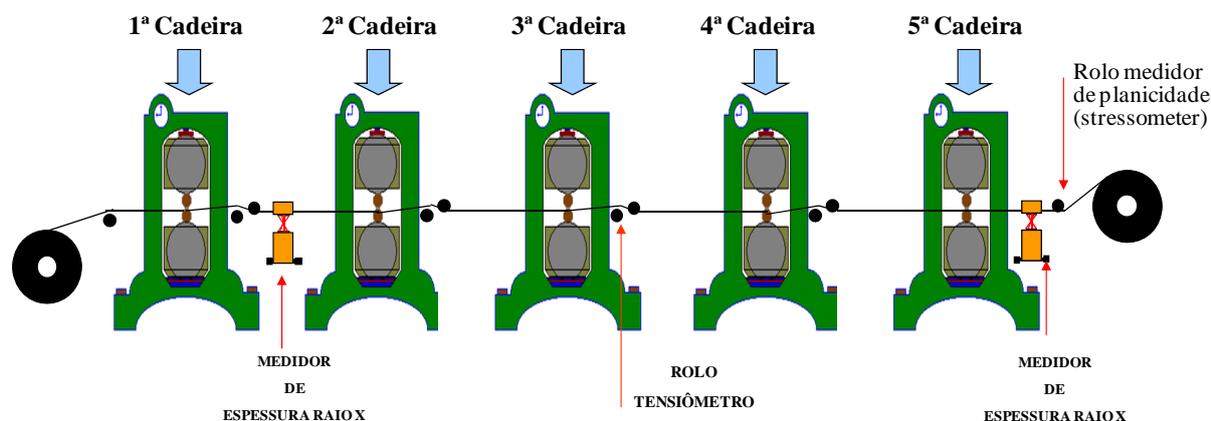


Figura 2. Representação esquemática do laminador de tiras a frio da CSN.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizada a escolha e amostragem do material para realização de ensaio de tração uniaxial na direção de laminação no laboratório de análise da Companhia Siderúrgica Nacional. As etapas de modelamento por elementos finitos foram realizadas no Laboratório de Simulação Computacional do Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense. O comportamento plástico da chapa foi avaliado a partir de dois ensaios de tração uniaxial, cujos valores médios foram ajustados segundo a equação de encruamento de *Swift* por:

$$\sigma = 618,24(0,01561 + \epsilon^p)^{0,4226} \text{ MPa} \quad (1)$$

Tabela 2. Dados utilizados na simulação por elementos finitos<sup>(4)</sup>

DADOS DE PROCESSO	
Espessura de entrada $h_i$ (mm)	3,500
Espessura de saída $h_o$ (mm)	2,414
Redução da 1ª cadeira (%)	31,02
Raio do cilindro de trabalho não deformado (mm)	281,39
Velocidade periférica linear do cilindro de trabalho da 1ª cadeira (mpm)	478,85
Tensão total a ré (tonf)	3,46
Tensão total avante (tonf)	32,29
Largura da bobina $w$ (mm)	1.061
Coeficiente de atrito de Coulomb $\mu^*$	0,06

**Tabela 3.** Dados do material utilizado na simulação por elementos finitos<sup>(5)</sup>

<b>DADOS DO MATERIAL</b>	
Módulo de Elasticidade (MPa)	210.000
Coefficiente de Poisson	0,29
Limite de escoamento em tração uniaxial (MPa)*	232

\*Valor obtido no ensaio de tração uniaxial

Foi utilizado no modelo o valor do coeficiente de atrito de Coulomb igual a 0,06 conforme utilizado pelo modelo de Bland-Ford para cálculo do *set up* do laminador. Em cilindros texturizados de equipamentos de alta velocidade conforme o laminador da CSN, os valores de coeficiente de atrito  $\mu$  variam entre 0,06 a 0,12.<sup>(4)</sup> Para a introdução dos dados de processo no programa de elementos finitos ABAQUS/Standard foi necessário a transformação dos dados experimentais da tensão a ré e avante em unidade tonelada-força para MPa, a saber:

$$\sigma_{\text{aRé}} = \frac{\sigma_{\text{tetal-aRé}}}{w \times h_0} = 9,14 \text{ MPa} \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{avante}} = \frac{\sigma_{\text{tetal-avante}}}{w \times h_0} = 123,68 \text{ MPa} \quad (3)$$

## 2.1 Cálculo do Comprimento do Arco de Contato<sup>(6)</sup>

$$L = \sqrt{R\Delta h} \quad (5)$$

$$\Rightarrow L = 17,481 \text{ mm}$$

## 2.2 Cálculo do Raio do Cilindro Deformado<sup>(6)</sup>

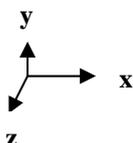
$$R' = R \left( 1 + \frac{C}{\Delta h} \times \frac{P}{W} \right) \quad (6)$$

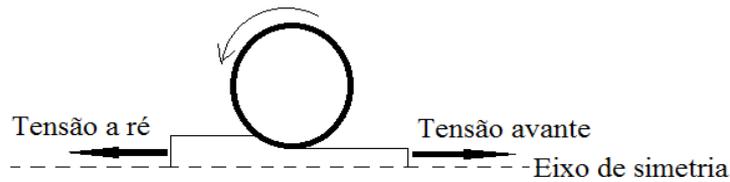
$$\Rightarrow R' = 348,30 \text{ mm}$$

Onde:

- R – raio do cilindro não deformado;
- C – constante do cilindro de trabalho  $\cong 2,2 \times 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{Kg}$ ;
- P – carga de laminação = 1.244 t (valor experimental); e
- W – largura do material.

O modelamento por elementos finitos consistiu em discretizar o domínio integrado em finitas e pequenas partes as quais possuem as mesmas propriedades do domínio integrado. Para confecção do modelo a chapa foi discretizada com 0,85 mm na direção do comprimento e 13 divisões ao longo da espessura totalizando 795 elementos planos CPE4R (deformação plana bilinear, com integração reduzida). As tensões a ré e avante experimentais são aplicadas na superfície da direção normal a espessura conforme Figura 3.





**Figura 3.** Representação esquemática das tensões aplicadas no modelo.

As condições de contorno introduzidas no modelo de elementos finitos são definidas por:

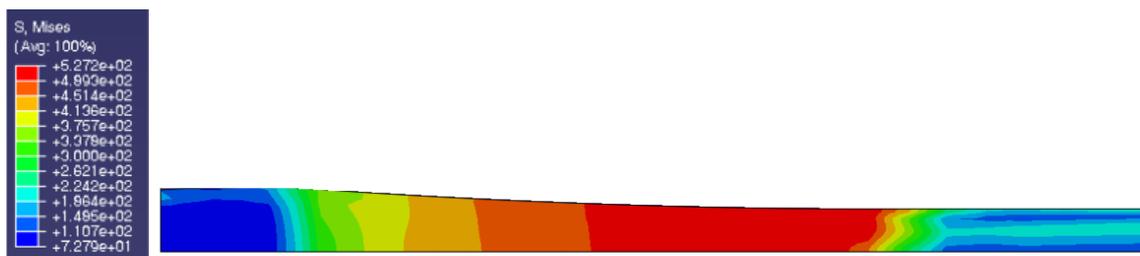
- cilindro: rotação livre em torno do eixo z com velocidade constante de 4.513 rad/s, deslocamento bloqueado nas três direções (x, y, z) estando também bloqueada sua rotação em torno dos eixos x e y. Foi realizada a simetria do cilindro nos eixos x e y tendo como objetivo a redução do tempo computacional;
- chapa: deslocamento livre na direção x tendo seu movimento bloqueado nas direções y e z. Os passos do modelamento são descritos na Tabela 4.

**Tabela 4.** Descrição dos passos do modelo realizado pelo MEF

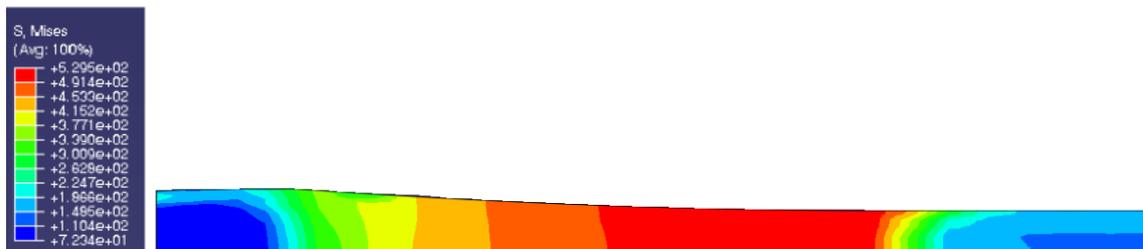
Passos	Descrição
1º Mordida	Deslocamento inicial da chapa na direção x correspondendo a 80% do comprimento do arco de contato;
2º Laminação 1	Introdução da tensão a ré;
3º Laminação 2	Introdução da tensão avante.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 4 e 5 podemos visualizar a distribuição da tensão de von Mises ao longo do comprimento da chapa com e sem a aplicação das tensões a ré e avante, respectivamente.

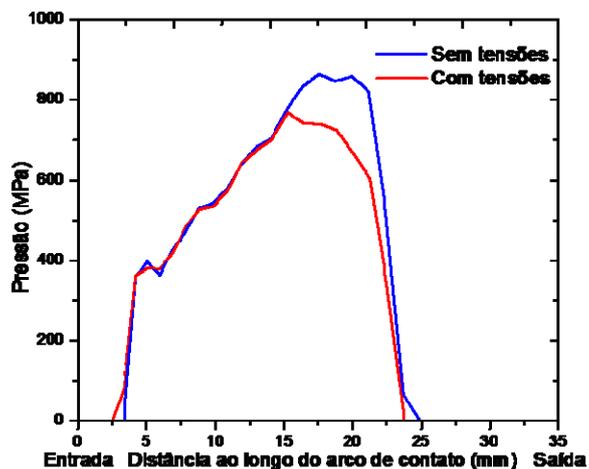


**Figura 4.** Distribuição da tensão de von Mises com aplicação das tensões a ré e avante.



**Figura 5.** Distribuição da tensão de von Mises sem aplicação das tensões a ré e avante.

Considerando-se as tensões introduzidas no modelo nota-se uma redução significativa dos valores de carga aplicada ao material e um deslocamento longitudinal do ponto neutro em relação a curva de pressão obtida sem a aplicação das tensões a ré e avante, vide previsões numéricas apresentadas na Figura 6. Este fato é claramente observado em termos industriais onde elevados valores de tensão entre vãos são inseridos no processo com fins a se obter a redução de carga visando principalmente a redução do consumo de emulsão de laminação.

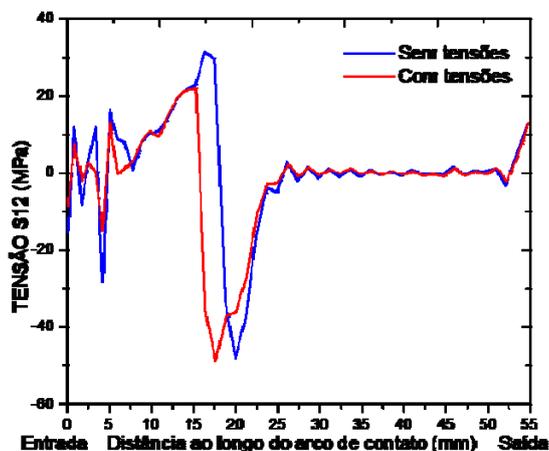


**Figura 6.** Distribuição da pressão ao longo do arco de contato com e sem a aplicação de tensão.

A carga aplicada é obtida através da integração da curva de pressão determinada pelo modelo efetuando-se seu produto pela largura efetiva do material. Abaixo é mostrado os valores de carga obtidos por diferentes modelos de previsão. Os valores obtidos pelo MEF sem e com a aplicação das tensões industriais apresentaram boa concordância com o valor experimental (Tabela 5).

**Tabela 5.** Comparação dos valores de carga

Descrição	Carga (kN)	Diferença (%)
<b>Medida industrial</b>	<b>12.204,92</b>	-
Modelo de Bland-Ford	12.168,52	- 0,30
MEF sem tensões a ré e avante	13.194,06	+ 8,10
MEF com aplicação de tensão a ré e avante	11.997,63	- 1,64



**Figura 7.** Distribuição da tensão cisalhante S12 ao longo do arco de contato.

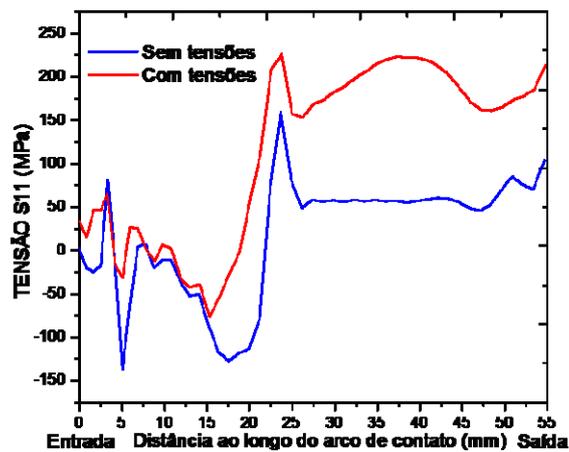


Figura 8. Distribuição da tensão S11 ao longo do arco de contato.

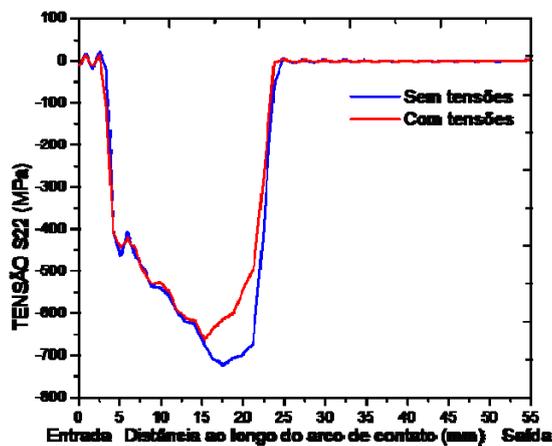


Figura 9. Distribuição da tensão S22 ao longo do arco de contato.

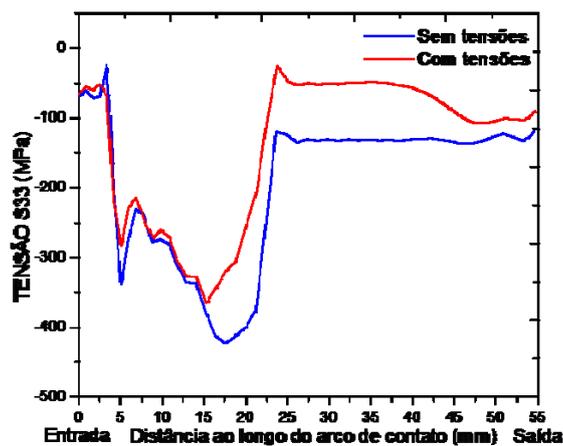


Figura 10. Distribuição da tensão S33 ao longo do arco de contato.

## 4 CONCLUSÃO

O modelamento realizado obteve uma boa aproximação do valor de carga industrial no primeiro passe de laminação. A diferença de - 1,64% verificada no modelo com aplicação das tensões experimentais pode ser relacionada com a consideração de um ferramental rígido, negligenciando as deformações elásticas que ocorrem ao longo do arco de contato. Pela análise da tensão cisalhante no arco de contato observa-se uma mudança do caráter positivo para o negativo após a passagem da chapa pelo ponto neutro. Este fato corrobora com o conhecimento teórico da mudança de sinal das forças de atrito entre a chapa e o cilindro antes e após o ponto neutro. Pode-se notar pelos resultados obtidos que o Método de Elementos Finitos é uma ferramenta promissora para previsão de comportamento local do processo de laminação a frio. Neste sentido, sugere-se o desenvolvimento em trabalhos futuros de um modelo elasto-plástico que considere as deformações elásticas do cilindro de trabalho para fins de avaliação de variações na carga de laminação assim como de espessura de saída.

## Agradecimentos

Luciano P. Moreira agradece a FAPERJ pelo apoio financeiro (Jovens Cientistas do Nosso Estado) e ao CNPq pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa.

Marcelo Costa Cardoso agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Willian Costa do Nascimento agradece a Universidade Federal Fluminense por todo apoio.

## REFERÊNCIAS

- 1 RIZZO, E.M.S. Processos de laminação dos aços, ABM, 2007.
- 2 Malinowski, Z. e Lenard, J.G. A study of the state of stress during cold strip-rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, v.33, p. 273-288, 1992.
- 3 FEA – Folha de especificação do aço da Companhia Siderúrgica Nacional.
- 4 36<sup>th</sup> Internacional Rolling Technology Course p. 10, 2011.
- 5 Callister, "Materials science and engineering", 5<sup>a</sup> Ed., John Wiley & Sons, 1999.
- 6 Gorni, A. Augusto - Cálculo de laminação "Associação brasileira de metalurgia e materiais – ABM", 2004
- 7 Jiang, Z.Y. e Tieu, A.K., Elastic-plastic finite element method simulation of thin strip with tension in cold rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 130-131, p. 511-515, 2002.