

# MODELAGEM MATEMÁTICA DA CARGA DE LAMINAÇÃO NO ENCRUAMENTO DE AÇOS IF EM LINHA DE RECOZIMENTO CONTÍNUO<sup>1</sup>

Gláucio Bórtoli da Cruz Rabelo<sup>2</sup>

Hiroshi Jorge Takahashi<sup>3</sup>

Giuliano César Aguiar Costa<sup>4</sup>

Paulo Roberto Cetlin<sup>5</sup>

## Resumo

A carga de laminação é função de variáveis como redução de espessura, largura, diâmetro do cilindro de laminação, etc. Além disto, a carga de laminação pode ser usada como indicador indireto da tensão planar, ou seja, do limite de escoamento. Desta maneira podem-se identificar anormalidades pontuais que não seriam detectadas pela amostragem convencional. Neste trabalho foram utilizadas as técnicas de modelagem de regressão linear múltipla e redes neurais artificiais (RNAs) para previsão da carga de laminação no encruamento na linha de recozimento contínuo de aços *interstitial free* (IF). Na regressão linear múltipla, foram utilizadas cinco variáveis, sendo obtido um coeficiente de determinação ajustado de 82,6%. Observou-se divergência dos valores previstos e observados para os extremos das cargas de laminação. A utilização da RNA possibilitou a correção deste desvio, gerando maior coeficiente de determinação ajustado (91,0%) e utilização de menor número de variáveis.

**Palavras-chave:** Aço *interstitial free*; Laminação de encruamento; Redes neurais.

## MATHEMATICAL MODELLING OF ROLLING LOAD OF IF STEELS IN A CONTINUOUS ANNEALING AND PROCESSING LINE

### Abstract

The rolling load is a function of variables such as the elongation, width of sheet, work roll diameter, etc. Furthermore, the rolling load may be used as an indirect indicator of the material plane-strain flow stress, i.e. the yield strength in tension. With such information it is possible to identify spot abnormalities that couldn't be detected by conventional sampling. In the present study multiple linear regression and artificial neural networks were used as modelling techniques to predict the rolling load for an Interstitial Free steel (IF) in the skin pass mill of the continuous annealing and processing line (CAPL). For the case of multiple linear regression five variables were considered and an adjusted coefficient of determination of 82,6% was found. Divergences between the predicted and actual values were found concerning extreme roll forces. The use of artificial neural network allowed the correction of such deviation, generating a higher adjusted coefficient of determination (91,0%) and also allowed the use of just three variables.

**Key words:** Interstitial free steel; Skin pass; Neural networks.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil

<sup>2</sup> Membro da ABM, Engenheiro Mecânico, M.Sc., ASQ CQE e CQA, Superintendência de Metalurgia e Garantia da Qualidade da Usiminas; Ipatinga, MG. [grabelo@usiminas.com.br](mailto:grabelo@usiminas.com.br).

<sup>3</sup> Membro da ABM, Engenheiro Eletricista, M.Sc., Superintendência de Projetos, Instrumentação e Automação da Usiminas; Ipatinga, MG. [htakahashi@usiminas.com.br](mailto:htakahashi@usiminas.com.br).

<sup>4</sup> Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, M.Sc., ASQ CQE, Superintendência de Laminação a Frio da Usiminas; Ipatinga, MG. [gcosta@usiminas.com.br](mailto:gcosta@usiminas.com.br).

<sup>5</sup> Membro da ABM, Engenheiro Mecânico, Ph.D., Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG; Belo Horizonte, MG. [p cetlin@demet.ufmg.br](mailto:p cetlin@demet.ufmg.br).

## 1 INTRODUÇÃO

Os processos siderúrgicos podem ser considerados amadurecidos, dado o grau de evolução que experimentaram desde sua criação. Entretanto, a exemplo de outros setores produtivos, observa-se freqüentemente a introdução de novas tecnologias que visam suportar a geração de produtos que venham de encontro às especificações cada vez mais exigentes por parte do mercado consumidor.<sup>(1)</sup> No âmbito dos produtos planos laminados a frio destacam-se as exigências crescentes dos clientes automotivos que demandam produtos com tolerâncias cada vez mais estreitas, seja no aspecto dimensional, bem como em termos de propriedades mecânicas e aspecto superficial, em particular os requisitos de rugosidade da chapa. Neste contexto a laminação de encruamento reveste-se de especial importância, pois é um dos últimos processos na seqüência de produção de laminados planos, tendo três finalidades fundamentais: (1) ajuste ou adequação das propriedades mecânicas seja pela eliminação do patamar de escoamento, nos aços que tenham esta característica, seja pelo aumento da densidade de deslocamentos (encruamento); (2) transferência de textura do cilindro para superfície da chapa, determinando assim a rugosidade do produto laminado e (3) a correção de forma e defeitos, caso haja necessidade.

O presente trabalho discute o emprego de técnicas para modelagem da carga de laminação de encruamento e o uso desta informação como indicador para o controle de qualidade de produtos planos laminados a frio, para aços conhecidos internacionalmente por *interstitial free*, ou seja, aços ultra-baixo carbono, livres de intersticiais em solução (C e N), obtidos através de pequenas adições de Ti ou Nb, ou ainda da combinação destes, doravante denominados aços IF.

## 2 OBJETIVO

Apresentar os resultados alcançados através de modelagem matemática obtida pelo uso de regressão linear múltipla e de redes neurais artificiais (RNAs), para predição da carga de laminação no encruamento de aços IF na linha de recozimento contínuo (CAPL), além de seu uso como ferramenta de detecção de anormalidades visando a retenção de produtos não conforme.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 A Modelagem da Laminação de Encruamento

A modelagem do processo de laminação sempre foi uma preocupação dos engenheiros envolvidos com este processo produtivo, como descrito por Roberts:<sup>(2)</sup>

“Expressões matemáticas que teoricamente relacionam vários parâmetros da laminação... servem a numerosos propósitos, sendo os principais assistir aos projetistas e construtores de laminadores e aos operadores destes no sentido de como utilizar bem e extrair o melhor do equipamento”.

Entretanto a modelagem do processo de laminação de encruamento sempre foi um desafio maior, em particular por sua característica peculiar de pequenas deformações aplicadas ao material, o que impõem dificuldades adicionais ao propósito de modelar este processo. Variáveis como a deformação do cilindro de

trabalho e a determinação do coeficiente de atrito tornam a convergência de resultados ainda mais difícil.

Em uma perspectiva histórica tem-se a proposição de um modelo para a laminação a frio, feita por Roberts em 1967,<sup>(3)</sup> porém não aplicável à laminação de encruamento. Entretanto este modelo proposto, bem como outros modelos teóricos para laminação a frio são criticados por não serem capazes de fazer boas previsões e serem muito complexos. Já em 1972, Roberts<sup>(3)</sup> propõe um novo modelo para a laminação de encruamento, fazendo uso de hipóteses simplificadoras. Este modelo foi testado por Pinto<sup>3</sup> em 1985, validando-o. Neste mesmo ano, Lake<sup>(4)</sup> publica amplo trabalho avaliando os efeitos de diversas variáveis na laminação de encruamento. A difusão do uso da informática acelera o processo de modelagem de processos e, em 1993, Onno e Gratacos<sup>(5)</sup> questionam os modelos clássicos existentes para lidar com a laminação de encruamento, incorporando o uso da técnica de elementos finitos. No Brasil, depois de Pinto<sup>(3)</sup> em 1985, Alves e Lenski,<sup>(6)</sup> em 1997, desenvolvem um modelo matemático para a laminação de encruamento, trabalho continuado por Miguel,<sup>(7)</sup> que questiona as hipóteses simplificadoras propostas por Roberts<sup>(3)</sup> em 1972. Em 2002, a Corus anuncia a criação de modelo simplificado da deformação heterogênea e sua aplicação para melhorar a predição da carga de laminação no encruamento. A primeira década deste milênio reforça o uso de elementos finitos para a tratativa do processo de laminação de encruamento, quando em 2003, Kainz<sup>(8)</sup> publica trabalho sobre simulação da laminação de encruamento utilizando-se de software de elementos finitos. A simplificação de que o arco de contato seja circular é excluída do modelo, em consonância com trabalhos anteriores. Em continuação ao trabalho de 2003, Kainz<sup>(9)</sup> aprofunda seu modelo de elementos finitos nos aspectos de transferência de rugosidade. Em 2007, no 44º Seminário de Laminação da ABM, dois trabalhos, de Alves<sup>(1)</sup> e Bielskis,<sup>(10)</sup> abordam o uso de modelagem e simulação numérica, inclusive com redes neurais artificiais (RNAs) para determinação da carga de laminação a frio.

Para os propósitos deste trabalho, dadas as condições de contorno estabelecidas – um único equipamento, com condições pré-estabelecidas de lubrificação, somente um tipo de aço, deformações entre 0,5 e 2,0%, variação reduzida no diâmetro dos cilindros de trabalho, espessuras entre 0,50 mm e 2,00 mm – e as técnicas de modelagem empregadas, o entendimento dos modelos clássicos de cálculo das cargas de laminação são suficientes para a escolha de variáveis a serem consideradas nos modelos. Seja dada a equação [1], apresentada por Dieter:<sup>(11)</sup>

$$P = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}'_0 [(1/q)(e^q - 1) \times b \sqrt{R \Delta h}] \quad [1]$$

$$\text{onde : } q = \frac{\mu L_p}{h} \quad \Delta h = h_0 - h_f \quad \bar{h} = \frac{(h_0 + h_f)}{2}$$

A interpretação da equação [1] mostra que a carga de laminação (P) é crescente com a largura do laminado (b), com o raio do cilindro (R) e com a diminuição da espessura de entrada (h<sub>0</sub>), através do termo “e<sup>q</sup>”. Além disto, quanto maior a tensão média de escoamento para o estado plano de deformação ( $\bar{\sigma}'_0$ ), maior será a carga necessária para aplicar uma mesma deformação. Outras variáveis usadas nesta equação são a espessura de saída (h<sub>f</sub>), o coeficiente de atrito (μ) e o arco de contato entre cilindro e tira laminada, expresso por L<sub>p</sub>.

## 3.2 Técnicas de Modelagem

### 3.2.1 Regressão linear múltipla

Uma equação de regressão linear múltipla expressa uma relação linear de uma variável dependente com duas ou mais variáveis independentes, na forma geral de:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_kx_k \quad [2]$$

Uma medida de quão bem a equação se ajusta aos dados amostrais é dada pelo coeficiente de determinação múltipla, conhecido por  $R^2$ . Entretanto, em função de suas características de construção, quanto mais variáveis independentes forem agregadas ao modelo, o coeficiente  $R^2$  irá crescer o que nem sempre representa uma melhora significativa no poder descritivo da equação. Em função desta característica, para a regressão linear múltipla utiliza-se o coeficiente de determinação ajustado, que leva em conta a quantidade de variáveis independentes usadas na construção do modelo, e é expresso pela equação:

$$R^2_{Ajustado} = 1 - \frac{(n-1)}{[n-(k+1)]}(1-R^2) \quad [3]$$

Onde:  $n$  = tamanho da amostra e  $k$  = número de variáveis independentes

Segundo Triola,<sup>(12)</sup> uma boa equação de regressão deve ser aquela que apresenta um coeficiente de determinação suficientemente alto e envolva o menor número possível de variáveis, sendo assim mais simples.

### 3.2.2 Redes neurais artificiais (RNAs)

Em 1943, dois pesquisadores de diferentes áreas do conhecimento humano - McCullough e Pitts,<sup>(10)</sup> respectivamente neurofisiologista e matemático - formularam as bases da “neurocomputação”. A partir do entendimento do funcionamento de neurônios biológicos foi desenvolvido o modelo de um neurônio artificial que analogamente ao primeiro recebe sinais, processa estes e emite, ou não, um sinal de saída. O quadro a seguir mostra a arquitetura dos dois tipos de neurônios citados.

**Quadro 1** - Comparativo entre neurônios biológicos e artificiais.

Função	Neurônio biológico	Neurônio artificial
Recepção de sinais advindos de outros neurônios	Dendritos	Expresso através das variáveis independentes $X_i$ .
Processamento dos estímulos de entrada e geração do estímulo de saída (sinal)	Corpo do Neurônio, também chamado de <i>somma</i> .	Representado pela função de ativação, que emite um sinal quando a soma dos impulsos recebidos ultrapassa um limiar.
Ramificação por onde é conduzido o estímulo de saída (sinal)	Axônio	Expresso através da variável dependente $Y$ .
Transmissão dos sinais entre diferentes neurônios	Sinapse	Representadas pelos pesos $W_i$ , responsáveis pela soma ponderada das entradas $X_i$ .

As RNAs são programas de computador, obtidos a partir dos neurônios artificiais, que podem reconhecer padrões em uma dada coleta de dados e produzir um modelo para esses dados. É uma ferramenta utilizável nas mais diversas áreas de conhecimento e as suas aplicações já podem ser encontradas em modelagem de processos, controle de qualidade, controle de processo, diagnósticos de máquinas, etc, conforme já demonstrado por Bielskis<sup>(10)</sup> e Takahashi.<sup>(13)</sup>

Para que a RNA possa cumprir sua função de prever o valor da variável resposta, esta deve ser treinada, o que requer uma quantidade significativa de dados, que incluem os valores das variáveis independentes, tantas quantas forem, bem como os valores da variável dependente, para que o algoritmo de treinamento da rede possa estabelecer os pesos ( $W_i$ ) adequados a cada variável de entrada ( $X_i$ ), de modo a alimentar a função de ativação. Usualmente reserva-se uma quantidade de dados que não são usados no treinamento da RNA, mas que após o treinamento são utilizados para validar os resultados obtidos.

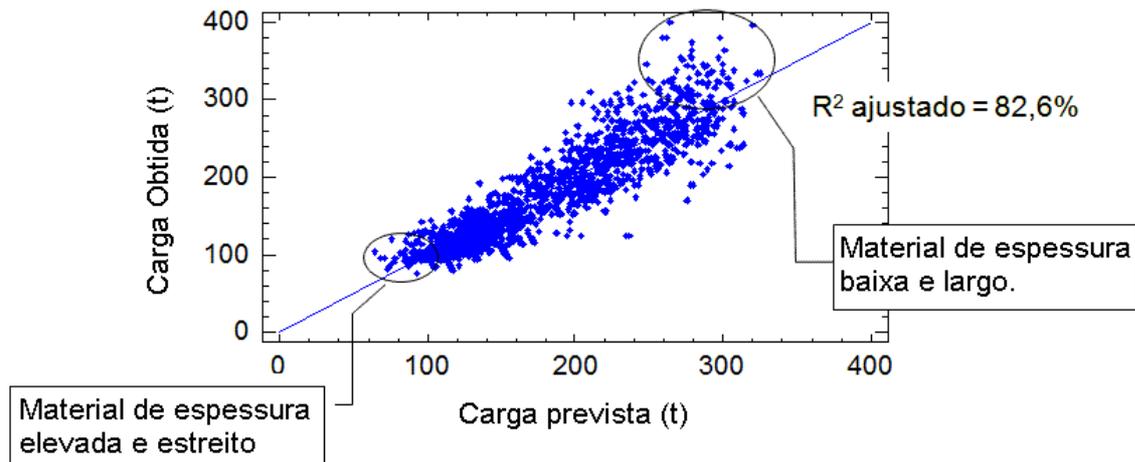
Com o procedimento acima descrito para o treinamento da RNA torna-se dispensável o conhecimento prévio de relações entre as variáveis envolvidas no processo. Porém o entendimento de como uma variável interfere no resultado fica difícil, por não haver uma interpretação fenomenológica para a construção do modelo. Em contrapartida, comportamentos complexos podem ser bem identificados e reproduzidos pelo modelo resultante do treinamento da RNA.

## 4 DESENVOLVIMENTO

### 4.1 Modelagem do Processo

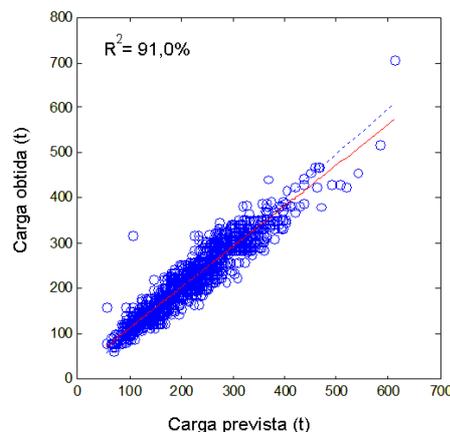
A primeira etapa do trabalho consistiu na seleção de dados a partir dos bancos disponíveis com os resultados de bobinas processadas na linha de recozimento contínuo da Usiminas. Os critérios de seleção envolveram a escolha do tipo de produto, período e, sobretudo, do tipo de aço avaliado, neste caso o aço IF. Foram selecionados 4027 dados de diferentes bobinas laminadas a frio, do ano de 2005. Na seqüência foram realizadas análises para a identificação de *outliers*, que fazem aumentar a imprecisão do modelo e que podem estar associados a condições anormais, tais como paradas de linha, troca de materiais e problemas de captação de dados por parte da automação da linha.

Feitas as seleções necessárias iniciou-se o processo de construção de equações a partir da regressão linear múltipla. Para isto foi usado o pacote estatístico *Statgraphics® Plus* versão 5.1. Após nove rodadas de testes, chegou-se a uma equação com cinco variáveis (espessura, largura, deformação, velocidade e teor de carbono), sendo obtido um coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) de 82,6%. Entretanto observou-se uma divergência dos valores previstos e observados para os extremos das cargas de laminação (Figura 1). Tanto no caso de bobinas com espessuras maiores e com larguras estreitas, quanto para bobinas com espessuras menores e larguras maiores, a carga era subestimada pelo modelo de regressão múltipla.



**Figura 1** - Comparativo entre carga prevista pela equação de regressão e a carga real obtida.

Considerado que esta seria a melhor resposta possível para a ferramenta utilizada, buscou-se um refinamento através do uso de RNA. Para tanto, o mesmo conjunto de dados foi utilizado no programa MATLAB Versão 6.0 Release 12, sendo que aproximadamente 75% dos dados foram usados no treinamento da rede e o restante foi utilizado para a validação da mesma. A utilização da RNA possibilitou a correção do desvio, verificado na Figura 2, com um maior coeficiente de determinação ajustado (91,0%) e utilização de um número menor de variáveis (espessura, largura e deformação).



**Figura 2** - Comparativo entre carga prevista pela RNA e carga real obtida.

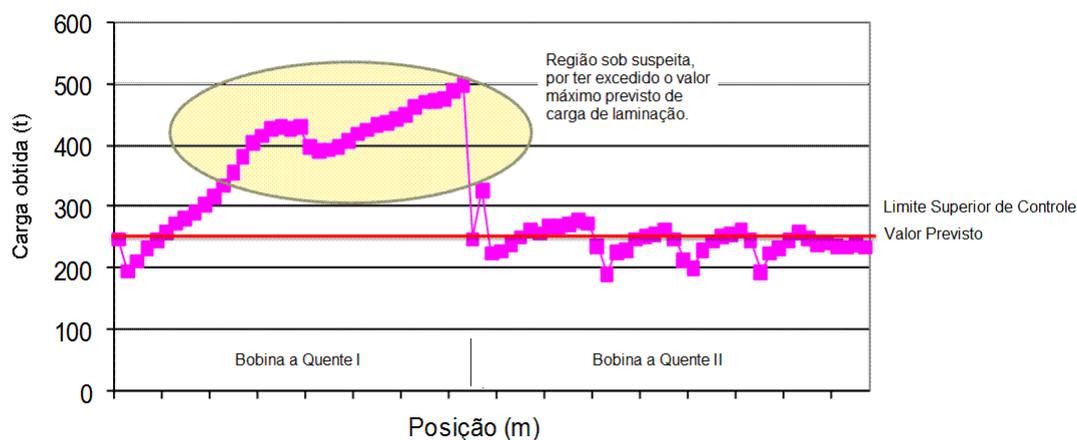
O desenvolvimento de um modelo com melhor poder descritivo do processo, obtido através da RNA, foi determinante para uma mudança significativa no modo de operação do equipamento, que passou a considerar o valor previsto pelo modelo para fazer o *set-up* da linha, ao invés de diversas tabelas existentes até então e que não correspondiam tão bem aos valores reais obtidos.

Uma consideração importante diz respeito à simplificação ocorrida quando se deixa de trabalhar com a equação de regressão múltipla, envolvendo cinco variáveis, dentre as quais a velocidade de processamento, e opta-se pela RNA, com três variáveis de entrada, todas elas conhecidas previamente ao processamento do material no CAPL, quais sejam: espessura, largura e deformação. O uso de qualquer modelo como valor previsto para operação (*set-up*) só pode ser considerado a partir da sua independência em relação a variáveis que só serão conhecidas após o

processamento do material, caso da variável velocidade na equação de regressão obtida.

#### 4.2 Uso do Modelo como Ferramenta de Controle de Qualidade

Considerando a melhor previsão do valor de carga de laminação de encruamento para um dado material, a partir dos dados de deformação visado, espessura e largura da tira, foi possível estabelecer um procedimento para o controle de materiais processados no CAPL. O procedimento consiste na imediata segregação do produto que apresentar um valor de carga de laminação de encruamento acima de um limite de controle estabelecido a partir do valor previsto mais um delta, que varia de acordo com o material, dimensões e deformação visada. A segregação é feita pelo computador de processo e somente após análise cuidadosa realizada pela Gerência de Controle Integrado de Produtos Laminados a Frio e Revestidos é dada disposição final ao produto. A referida análise pode envolver a retirada de novas amostras, em determinadas regiões da bobina, ou a rejeição de parte do produto, ou um retrabalho ou ainda a recusa integral do produto envolvido no trecho não conforme. A Figura 3 mostra um caso em que a partir da análise da carga de laminação foi possível a segregação de um produto não conforme.



**Figura 3** - Exemplo de uso da previsão de carga de laminação para o controle de qualidade de bobinas laminadas a frio e recozidas continuamente.

O procedimento acima descrito, apesar de extremamente simples, tem uma importância muito grande, pois faz com que a avaliação da qualidade do produto final, em termos de suas propriedades mecânicas, não seja dependente exclusivamente da amostragem realizada nas pontas das bobinas, visando coleta de corpos de prova para realização de ensaios mecânicos. Desta forma, além de uma melhor marcha operacional, graças à melhor previsão das cargas requeridas, assegura-se um produto com maior confiabilidade no que se refere a suas propriedades mecânicas, pois este acréscimo de carga está sistematicamente associado a uma maior resistência mecânica do material, expressa nos modelos matemáticos pela tensão média de escoamento para o estado plano de deformação, expresso por  $\bar{\sigma}'_0$  na equação [1].

## 5 CONCLUSÃO

A utilização de técnicas de modelagem, em especial a rede neural artificial (RNA), permitiu a estimação da carga de laminação de aços IF para o laminador de encruamento do recozimento contínuo (CAPL), o que possibilita um melhor desempenho operacional e identificação de ocorrências pontuais anormais. A previsão da carga de laminação permite o estabelecimento de um critério de classificação e conseqüente segregação de bobinas para avaliação detalhada de propriedades mecânicas ao longo da extensão destas, o que possibilita uma maior confiabilidade do produto e redução das falhas na aplicação por propriedades mecânicas.

## Agradecimentos

Os autores deste trabalho gostariam de registrar seus mais sinceros agradecimentos à Engenheira Roberta de Oliveira Rocha, da Superintendência de Metalurgia e Garantia da Qualidade da Usiminas, que muito contribuiu para que o presente trabalho alcançasse os resultados aqui apresentados.

## REFERÊNCIAS

- 1 ALVES G.P.; HEMERLY, E.M. *Modelagem e Simulação Numérica da Deformação para Cálculo de Parâmetros de Referência em Processos de Laminação a Frio*, In: 44º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos - ABM, Campos do Jordão-SP, 16 a 19 de outubro de 2007.
- 2 ROBERTS, W.L. *Cold Rolling of Steel*, 1ª edição, Estados Unidos, Marcel Dekker Inc., 1978.
- 3 PINTO, M.C. *Verificação Experimental de um Modelo para a Laminação de Encruamento*. In: Seminário de Laminação – ABM, Porto Alegre-RS, 1985. p.65-68. 1985.
- 4 LAKE, J.S.H. *Control of Discontinuous Yielding by Temper Rolling*, Journal of Mechanical Working Technology, p.35-66, Amsterdam-Holanda, 1985.
- 5 ONNO F.; GRATACOS P. *Modèles élasto-plastiques de laminage à froid application au skin-pass*, La Revue de Métallurgie – CIT, p.931-936, Junho 1994.
- 6 ALVES, P.G.; LENSKI, E.V. *Modelamento Matemático de Não Homogeneidades no Material nos Processos de Laminação a Frio*, In: 34º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos – ABM, Belo Horizonte-MG, p. 513-527, Agosto 1997.
- 7 MIGUEL, A.G.S.; DELGADO JR, H.G.; LENSKI, E.V. *Efeito da Taxa de Deformação na Laminação de Encruamento*, In: 37º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos – ABM, Curitiba-PR, p. 270-278, Setembro 2000.
- 8 KAINZ A., KRIMPELSTÄTTER K., ZEMAN K. *FE – Simulation of Thin Strip and Temper Rolling Processes*, In: ABAQUS Austria User's Conference, 8 p. Viena-Austria, Novembro 2003.
- 9 KAINZ A., PAESOLD D., KRIMPELSTÄTTER K., ZEMAN K. *Finite Element Modelling of Temper Rolling with particular emphasis on roughness transfer*, In: ABAQUS Austria User's Conference, 10 p. Graz-Austria, Setembro 2005.

- 10 BIELSKIS, C.T.; PLAUT, R.L., PALO, V.M., BIELSKIS, M.F. *Aplicação Industrial das Redes Neurais Artificiais: Laminação a Frio de Chapas*, In: 44º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos - ABM, Campos do Jordão-SP, 16 a 19 de outubro de 2007.
- 11 DIETER, G.E. *Rolling of Metals*, Mechanical Metallurgy, 2ª Edição, McGraw-Hill Book Company, cap 17, p.586-601, 1988.
- 12 TRIOLA, M.F. *Introdução à Estatística*, ISBN 85-2161431-4, 9ª edição, p.418-419, Editora LTC, Rio de Janeiro-RJ, 2005.
- 13 TAKAHASHI, H.J. *Predição de Propriedades Mecânicas de Aços de Alta Resistência Microligados Utilizando Técnicas de Inteligência Computacional*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, Coronel Fabriciano-MG, Dezembro de 2006.