

# AJUSTES NA EQUAÇÃO DE MISAKA PARA CÁLCULO DA TENSÃO DE ESCOAMENTO MÉDIA DE AÇOS MICROLIGADOS NA LAMINAÇÃO DE TIRAS A QUENTE, POR MODELAGEM MATEMÁTICA <sup>1</sup>

*Kamila Furtado Cupertino* <sup>2</sup>  
*Marcelo Lucas Pereira Machado* <sup>3</sup>

## **Resumo**

Um modelo matemático preditivo foi desenvolvido em linguagem de programação C++ de modo a calcular a tensão de escoamento média (TEM) para aços microligados, na laminação de tiras a quente, e determinar um fator de correção por regressão linear múltipla que corrige a equação de Misaka. O fator de correção encontrado leva em conta os elementos de liga Nb, Mn, Ti e Si presentes nas famílias de aços analisadas. Os valores da TEM corrigida e da TEM de Misaka são comparadas com a TEM dada pela equação de Sims. Os resultados mostram que o modelo apresenta melhores ajustes do que aqueles obtidos pela equação de Misaka.

**Palavras-chave:** Laminação a quente; Modelo matemático; Equação de Misaka; Regressão linear múltipla.

## **CORRECTIONS IN THE MISAKA'S EQUATION FOR CALCULATION OF THE MEAN FLOW STRESS OF MICROALLOYED STEELS IN THE HOT STRIP MILL, BY MATHEMATICAL MODELLING**

## **Abstract**

A predictive mathematical model was developed in programming language C++ in order to calculate the mean flow stress (MFS) for microalloyed steels in the hot strip mill, and to calculate a correction factor for multiple linear regression that corrects the Misaka's equation. The correction factor takes in account the steel microalloyed Nb, Mn, Ti and Si. The values of MFS from model and from Misaka's equation are compared with the MFS calculate from Sims equation. The results show that the model fit better those gotten by Misaka's equation.

**Key words:** Hot strip mill; Mathematical model; Misaka's equation; Multiple linear regressions.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

<sup>2</sup> *Aluna do curso de Tecnologia em Metalurgia e Materiais do CEFET-ES, bolsista de iniciação científica, Vitória-ES, E-Mail: [nistamilak@yahoo.com.br](mailto:nistamilak@yahoo.com.br).*

<sup>3</sup> *Engenheiro Metalurgista, D.Sc. Coordenador do Curso de Engenharia Metalúrgica do CEFET-ES, Vitória-ES, E-Mail: [marcelolucas@cefetes.br](mailto:marcelolucas@cefetes.br).*

## 1 INTRODUÇÃO

O modelamento matemático tem sido utilizado como um importante instrumento de aperfeiçoamento de processos siderúrgicos. Isso se deve aos benefícios por ele gerado como a possibilidade de predição de diversas variáveis que ocorrem de forma complexa durante a produção como redução do custo de experimentos e testes industriais e, também, estimativas de propriedades e comportamentos dos produtos obtidos.

Na laminação a quente, em particular, alguns autores<sup>[1-4]</sup> desenvolveram métodos por meio de modelamento com a finalidade de estimar as cargas aplicadas pelos cilindros já que essa é uma etapa de grande responsabilidade no processo e envolve muitas variáveis de decisão. A equação de Misaka<sup>[5]</sup> é muito utilizada na laminação a quente no cálculo da TEM e depende basicamente da temperatura do processo e do teor de carbono contido no aço carbono. O presente trabalho desenvolve um modelo matemático, onde realiza correções na equação de Misaka em relação a equação de Sims<sup>[1,2]</sup> levando em consideração também a influência da composição química. Este modelamento foi feito em linguagem de programação em C++<sup>[6,7]</sup> que é uma ferramenta muito poderosa nos estudos tecnológicos e científicos de forma geral capaz de efetuar leitura de dados em arquivo e fornecimento de resultados de forma eficiente e veloz.

O ajuste ou fator da equação de Misaka provém da seguinte relação:

$$TEM_{real} = f * TEM_{msk}, \quad (1)$$

Onde  $TEM_{real}$  é a tensão de escoamento média real calculada pela equação de Sims e  $TEM_{msk}$  é o valor encontrado pela relação de Misaka e do fator (f) vem:

$$f = a + b [Nb] + c [Mn] + d [Ti] + e [Si] \quad (2)$$

As incógnitas (a), (b), (c), (d) e (e) são valores numéricos resultantes de regressão linear múltipla.<sup>[8,9]</sup> As concentrações de nióbio, manganês, titânio e silício fazem relação com uma das famílias do aço microligado (Nb-Mn-Ti-Si) que foi escolhida para testar a modelagem matemática feita no primeiro e segundo passe da cadeia de laminação onde o amaciamento é próximo da totalidade e não há a influência do acúmulo de deformação.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A modelagem matemática para a determinação da tensão de escoamento média da tira durante a laminação a quente foi desenvolvida com a utilização de linguagem de programação C++.

### 2.1 Levantamento de Variáveis Operacionais

Foram utilizados dados industriais de aços microligados para execução do programa com a seguinte faixa de composição química:

C: 0.05-0.12%; Mn: 0.5-1.5%; Ti: 0-0.05%; Nb: 0.04% Máx; Si: 0.04-0.40%;

definida pelo grupo de modelamento a quente da ABM que reúne especialistas de grandes siderúrgicas e professores pesquisadores de universidades brasileiras.

Além dessas, outras variáveis importantes foram utilizadas, como temperatura em cada passe ( $T$ ), diâmetro dos cilindros de trabalho ( $D$ ), espessura inicial ( $h_1$ ) e final ( $h_2$ ) em cada passe, largura da tira ( $w$ ), velocidade dos cilindros de trabalho ( $U$ ) e força de laminação ( $P$ ).

Foram utilizados os parâmetros da primeira e segunda cadeira devido ao amaciamento do material se aproximar de 100% a fim de isolar os efeitos do acúmulo de deformação.

## 2.2 Desenvolvimento do Modelo de Programação

Para cada passe foi calculado a tensão de escoamento média ( $TEM_{real}$ ) segundo a equação de Sims:<sup>[1]</sup>

$$P = TEM_{real} \cdot w \cdot \sqrt{R'(h_1 - h_2)} \cdot Q \quad (2)$$

Onde  $R'$  é igual ao raio corrigido e  $Q$  é um fator geométrico equivalentes respectivamente à:<sup>[10]</sup>

$$R' = Ri \cdot \left[ 1 + \frac{C \cdot P}{W \cdot \Delta h} \right] \quad (3)$$

$$Q = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{1-r}{r}} \cdot \left\{ \pi \cdot \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{r}{1-r}} \right) - \sqrt{\frac{R'}{h_2}} \cdot \ln \left[ \left( \frac{h_n}{h_2} \right)^2 \cdot (1-r) \right] \right\} - \frac{\pi}{4} \quad (4)$$

Sendo  $Ri$  é o raio inicial do cilindro,  $C$  uma constante que depende do material do cilindro,  $r$  igual a redução do material e  $h_n$  a espessura do material no ângulo neutro ( $\phi_n$ ) assim:<sup>[10]</sup>

$$C = \frac{16 \cdot (1 - 0,3^2)}{\pi \cdot 21092,1} \quad (5)$$

$$r = \left( \frac{h_1 - h_2}{h_1} \right) \quad (6)$$

$$h_n = 2R' \cdot [1 - \cos(\phi_n)] + h_2 \quad (7)$$

$$\phi_n = \sqrt{\left( \frac{h_2}{R'} \right)} \cdot \tan \left[ \frac{\pi}{8} \left( \frac{h_2}{R'} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \ln(1-r) + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{r}{1-r} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (8)$$

Então, com o mesmo raciocínio, foi calculada a tensão de escoamento média de Misaka ( $TEM_{msk}$ ):

$$TEM_{msk} = 1,15 \cdot 9,8 \cdot \exp \left( 0,126 - 1,75[C] + 0,594[C]^2 + \frac{2851 + 2968[C] - 1120[C]^2}{T} \right) \cdot \varepsilon^{0,21} \dot{\varepsilon}^{0,13} \quad (9)$$

Onde C é o teor de carbono no aço,  $\varepsilon$  é a deformação do aço e  $\dot{\varepsilon}$  é a taxa de deformação em que:

$$\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (10)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\pi\sqrt{3} \cdot U}{45 \cdot \alpha} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (11)$$

Para que a  $TEM_{msk}$  fosse corrigida levando em consideração os elementos de liga, foi necessário calcular um ajuste (fator f), que relacionasse a equação de Misaka com a nova equação. Este fator f definido pelo grupo de modelamento a quente da ABM é calculado da seguinte forma:

$$TEM_{cor} = f * TEM_{msk}, \quad (12)$$

Em que foi considerado a  $TEM_{real}$  obtida por Sims igual a tensão de escoamento média corrigida ( $TEM_{cor}$ ) de modo que:

$$TEM_{real} = f * TEM_{msk} \quad (13)$$

Desta forma, será encontrado o valor numérico do fator de ajuste f, relacionado aqui para aços microligados, que depende do teor de nióbio (Nb), manganês (Mn), titânio (Ti) e silício (Si) sendo definido pela expressão:

$$f = a + b [Nb] + c [Mn] + d [Ti] + e [Si] \quad (14)$$

Equivalente a:

$$TEM_{real} / TEM_{msk} = a + b [Nb] + c [Mn] + d [Ti] + e [Si]. \quad (15)$$

A última equação deve ser resolvida por meio de regressão linear múltipla onde serão encontrados os valores de (a), (b), (c), (d) e (e). A regressão linear múltipla é um dos tipos de regressão mais comumente utilizados, pois é de obtenção simples e providencia uma relação funcional linear entre as variáveis. Os coeficientes são ajustados segundo o método dos mínimos quadrados.

### 2.3 Fluxograma do Modelo Matemático de Programação em C++

A Figura 1 indica o fluxograma do modelo matemático em linguagem de programação obedecida pelo programa em C++:

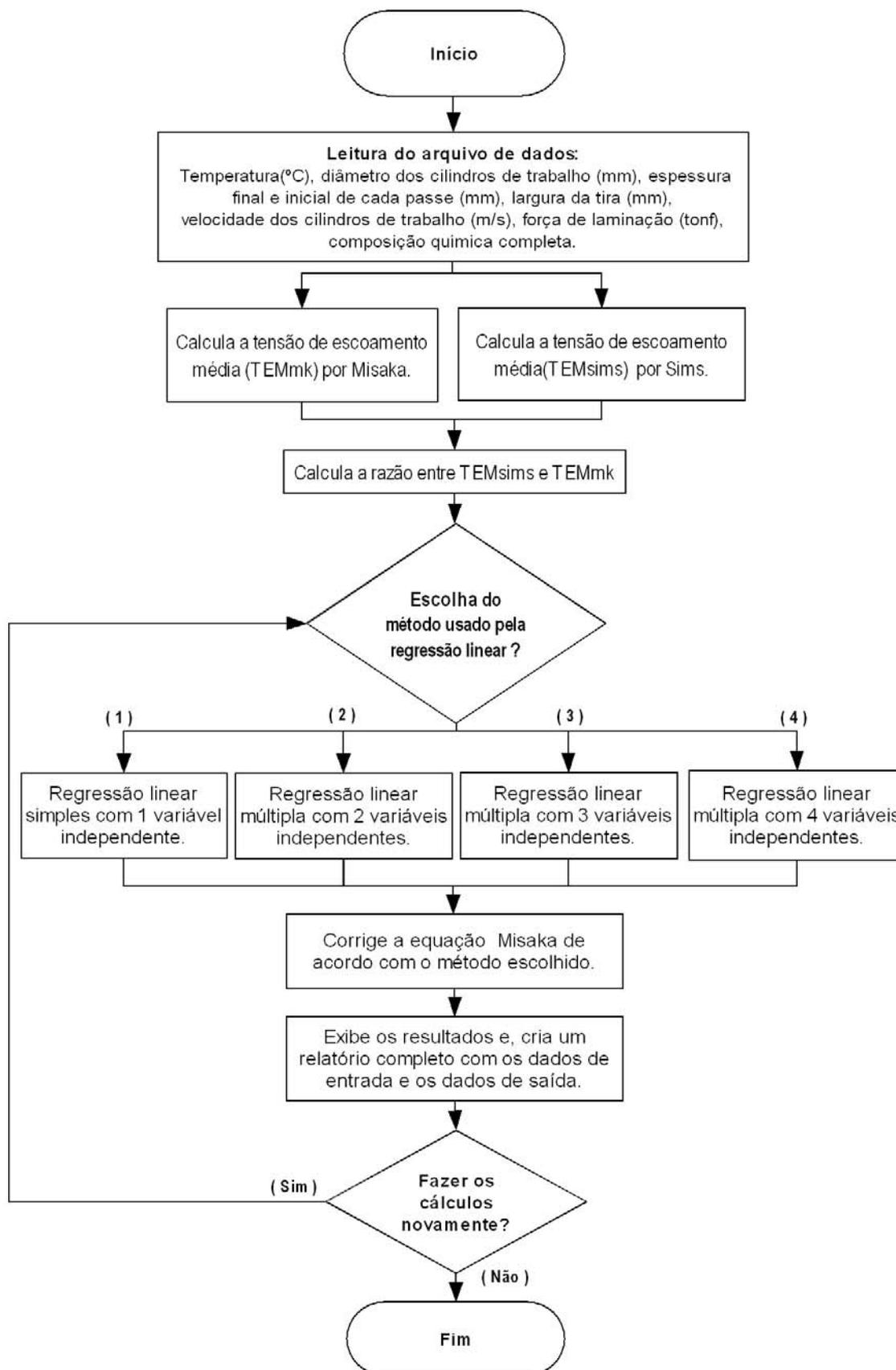


Figura 1 – Fluxograma do Modelo Matemático.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo matemático faz a leitura dos dados do processo de laminação proveniente de um arquivo. Através de regressão linear múltipla, calcula as incógnitas do fator de correção que ajusta a equação de Misaka para uma TEM mais próxima do real quando comparado com o valor obtido pela equação de Sims. O valor desta TEM poderá ser utilizado para determinar a força de laminação que deve ser aplicada na laminação de tiras a quente.

A programação para se encontrar o fator de correção do modelo é dependente dos teores de nióbio, manganês, titânio e silício e pode ser utilizado para outras famílias de aço.

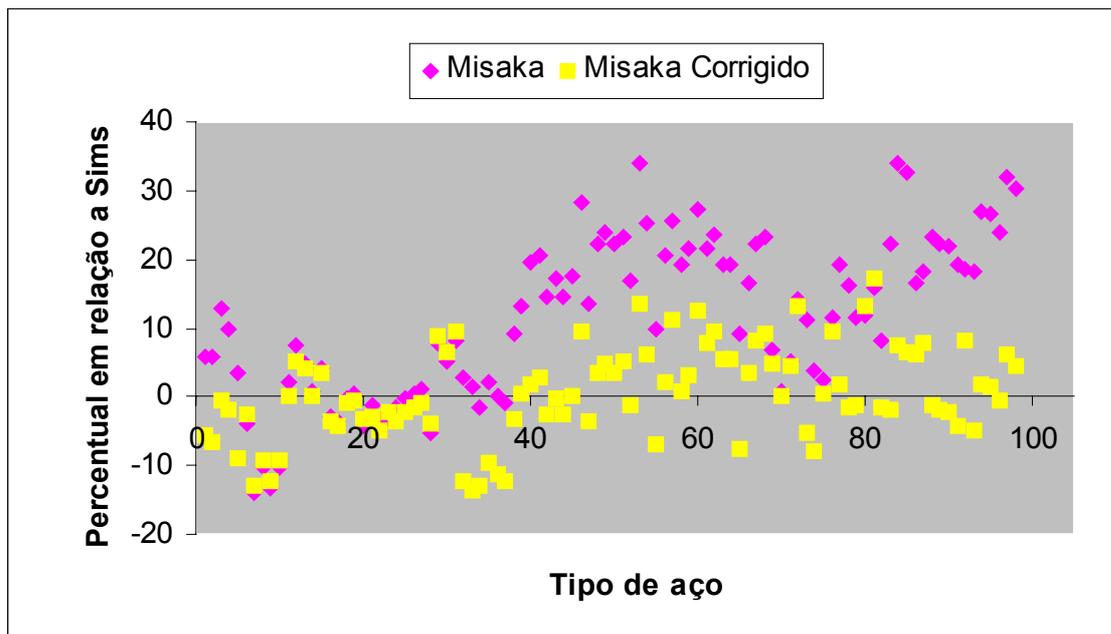
A Tabela 1 apresenta a composição química de alguns aços microligados utilizados e também os valores das tensões médias de escoamento obtida por Sims, Misaka e pelo modelo. Através das diferenças percentuais ( $TEM_{real} - TEM_{msk}$ ) e ( $TEM_{real} - TEM_{cor}$ ) percebe-se que a TEM corrigida se mantém mais próxima da equação de Sims.

**Tabela 1**-Composição química e valor TEM de Sims, Misaka e do modelo para aços microligados.

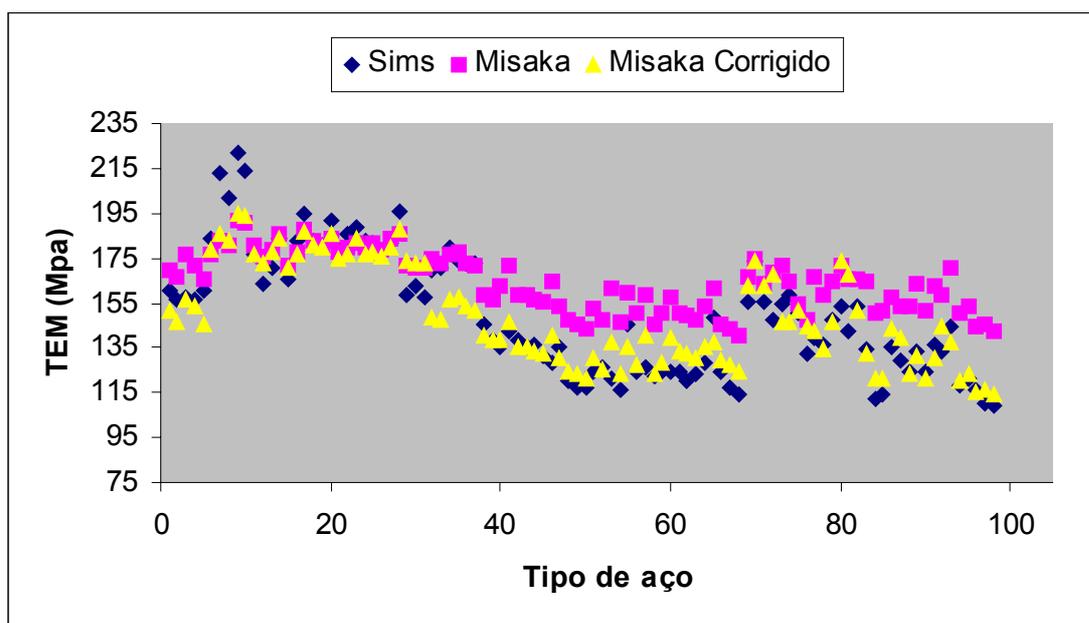
| %C     | %Nb    | %Mn  | %Ti   | %Si   | Sims    | Misaka  | Modelo  |
|--------|--------|------|-------|-------|---------|---------|---------|
| 0.0711 | 0.0244 | 0.55 | 0.001 | 0.008 | 165.150 | 171.983 | 170.778 |
| 0.0886 | 0.0294 | 1.02 | 0.002 | 0.054 | 157.072 | 177.045 | 156.026 |
| 0.0960 | 0.0293 | 0.99 | 0.001 | 0.054 | 135.688 | 162.160 | 138.140 |
| 0.1000 | 0.0334 | 1.10 | 0.002 | 0.064 | 120.515 | 147.250 | 124.745 |
| 0.0895 | 0.0263 | 0.98 | 0.002 | 0.050 | 147.902 | 164.848 | 146.048 |
| 0.0707 | 0.0259 | 0.54 | 0.001 | 0.009 | 150.879 | 154.680 | 151.612 |
| 0.0988 | 0.0337 | 1.02 | 0.002 | 0.052 | 153.522 | 165.934 | 151.180 |
| 0.0921 | 0.0345 | 1.03 | 0.002 | 0.064 | 116.127 | 143.963 | 115.588 |

O melhor ajuste do modelo, também pode ser observado pela análise da Figura 2 que mostra a diferenças entre a TEM de Sims e do modelo mais próximas de zero do que aquelas obtidas entre Sims e Misaka.

A Figura 3 relaciona os valores de tensão calculados pelo modelo para cada aço microligado utilizado e, mais uma vez, mostra a proximidade dos valores corrigidos com os de Sims.



**Figura 2** – Diferença percentual entre os valores de TEM (Sims – Misaka) e (Sims - Misaka corrigido) para diferentes composições de aços microligados.



**Figura 3** – TEM versus aços microligados com diferentes composições químicas.

#### 4 CONCLUSÕES

O modelo se mostrou eficiente no levantamento do fator de correção da equação de Misaka, pois apresentou ótima correlação da nova equação com a equação de Sims e uma resposta rápida devido a programação em C++.

Os resultados da TEM obtidos pelo modelo mostraram melhores aproximações do que os obtidos pela equação de Misaka quando comparados com os resultados obtidos pela equação de Sims,

As equações obtidas pelo modelo podem ser utilizadas na indústria para otimização e controle do processo de laminação a quente, bem como, fazer simulações *off line* de novos produtos antes do mesmo de serem laminados.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem a CST/Arcelor Brasil pela colaboração com contribuições técnicas. K.F.C agradece ao Fundo de Apoio à Ciência e Tecnologia do Município de Vitória - FACITEC pela bolsa de iniciação científica para o desenvolvimento deste trabalho.

## **REFERÊNCIAS**

- 1 SIMS, R.B. The calculation of roll force and torque in hot rolling, Proc. Of institution of Mechanical Engineers, No.168, 1954, 191-200.
- 2 SIMS, R.B. The calculation of roll force and torque in hot rolling mills, Proc. Of institution of Mechanical Engineers, Vol.166, 1954, 75-91.
- 3 MACHADO, M.L.P., Modelo Termomicroestrutural para determinação de Variáveis Operacionais e Metalúrgicas para Utilização em Simulação e/ou Controle na Laminação a quente de Aços Carbono e Microligados. 2004. Tese de Doutorado - Programa de pós-graduação em engenharia elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2005.
- 4 MACHADO, M.L.P.; DENTI FILHO, J.; FAGUNDES JUNIOR, J. Simulation of operational disturbance in a hot strip mill using a thermomicrostructural model. The 16 IASTED International Conference on Modelling and Simulation, Cancun, Mexico May 18 - 20, 2005.
- 5 MISAKA, Y., YOSHIMOTO, Y. (1967-8). Formularization of mean resistance to deformation of plain carbon steels at elevated temperature, Journal of The Japan Soc. Tec. Plasticity, 8(79), 414-422.
- 6 DROZDEK, A. Estruturas de dados e algoritmos em C ++. 1ª ed. São Paulo:Thomson, 2002.
- 7 DEITEL, H.M., DEITEL P.J., C++ Como Programar. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- 8 SPIEGEL, M.R., Estatística. 3ª ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1994.
- 9 TRIOLA, M.F. Introdução à Estatística. 9ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.
- 10 Roberts, L.W. Hot Rolling of Steel, Manufacturing Engineering and Materials Processing; 10, New York, 1983, 1033p.