

ANÁLISE DE AJUSTES NA EQUAÇÃO DE MISAKA E SEUS EFEITOS NAS PROPRIEDADES E MICROESTRUTURA DE AÇOS C-Mn E MICROLIGADOS NA LAMINAÇÃO A QUENTE¹

Marcelo Lucas Pereira Machado²

Kamila Furtado Cupertino³

Gustavo Coqui Barbosa⁴

José Fagundes Junior⁵

Resumo

Foi desenvolvido um modelo matemático em linguagem de programação C++ que faz correções na equação da tensão de escoamento média (TEM) de Misaka para aços C-Mn e microligados, de modo ajustar o valor da TEM do modelo ao valor real calculado pela equação de Sims. O algoritmo desenvolvido é baseado em regressão linear simples e múltipla que a partir de dados industriais, determina um fator de correção para a equação de Misaka. Estas novas equações foram testadas no modelo microestrutural, para simulação do comportamento do aço em todas as cadeiras e comparadas com os resultados obtidos utilizando as equações de Misaka, literatura e do modelo de Machado, M. L. P.. Os resultados do modelo foram melhores que Misaka, próximos aos de literatura e inferiores ao modelo de Machado, M. L. P.

Palavras-Chave: Laminação de tiras a quente; Equação de Misaka; Tensão de escoamento média; Modelo matemático.

ANALYSIS OF ADJUSTMENTS IN THE MISAKA'S EQUATION ITS EFFECT IN THE PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF C-MN AND ALLOYED C-MN STEELS AND IN HOT STRIP MILL

Abstract

A mathematical model in programming language C++ was developed for makes corrections in the mean flow stress (MFS) Misaka's equation for C-Mn and alloyed steels and way to adjust the value of MFS with the real value calculated by Sim's equations. An algorithm based on single and multiple linear regressions was developed from industrial data to determine a factor of correction for the Misaka's equation. These new equations had been tested in the microstructural model for simulation of the steel behavior during all the stands and compared with the results gotten with the others simulations using the equations of Misaka, literature and of the Machado's model. The model results were better that Misaka, near to the literature and the Machado's model was better.

Key words: Hot strip mill; Misaka's equation; Mean flow stress; Mathematical model.

¹ Contribuição técnica ao 44º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 16 a 19 de outubro de 2007, Campos do Jordão – SP, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, D.Sc. Coordenador do Curso de Engenharia Metalúrgica do CEFET-ES, Vitória-ES, E-Mail: marcelolucas@cefetes.br.

³ Aluna do curso de Tecnologia em Metalurgia e Materiais do CEFET-ES, bolsista de iniciação científica, Vitória-ES, E-Mail: nistamilak@yahoo.com.br.

⁴ Aluno do curso de Tecnologia em Metalurgia e Materiais do CEFET-ES, bolsista de iniciação científica, Vitória-ES, E-Mail: coquibarbosa@yahoo.com.br.

⁵ Engenheiro Metalurgista, M.Sc. Especialista de Laminação de Tiras a Quente da ArcelorMittal Tubarão, Vitória-ES, E-Mail: jose.fagundes@arcelor.com.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^[1-9] 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^[2,8] 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^[1,2,4-6] para considerar a influência da composição química, de modo a obter um fator f determinado por regressão linear a partir da implementação de um programa de computador em C++.^[9,10] O programa faz regressão linear simples e múltipla com até cinco variáveis, de modo que, de cada grupo de n variáveis, $n-1$ representa(m) a(s) variável(is) independente(s) teor(es) do(s) elemento(s) de liga.

O ajuste ou fator da equação de Misaka foi definido pelo grupo de modelamento a quente da ABM sendo calculado da seguinte forma:

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

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:

$$\text{Aços CMn:} \quad f = a + b [\text{Mn}] \quad (2)$$

$$\text{Aços microligados:} \quad f = a + b [\text{Mn}] + c [\text{Nb}] + d [\text{Ti}] + e [\text{Si}] \quad (3)$$

As incógnitas (a), (b), (c), (d) e (e) são valores numéricos resultantes de regressão linear múltipla.^[11,12] 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 passe da cadeia de laminação onde o amaciamento é próximo da totalidade e não há a influência do acúmulo de deformação e recristalização entre passes.

Estas novas equações foram testadas no modelo microestrutural de Machado,^[2,6] para simulação do comportamento do aço em todas as cadeiras e comparadas com os resultados obtidos utilizando as equações de Misaka, literatura e do modelo de Machado.^[2,4-6]

2 MATERIAL E MÉTODOS

O material estudado foi o aço C-Mn e microligados, com a seguinte faixa de composição química: CMn: C - 0,03 a 0,13% e Mn - 0,15 a 0,52% e microligados: C: 0.063-0.066% ,Mn: 0.56-0.61%; Ti: 0.02%; Nb: 0.0013% Máx; Si: 0.046-0.29%.

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).

O cálculo da tensão de escoamento média real (TEM_{real}) foi realizado considerando o modelo de Sims, equação (4), empregando-se os dados obtidos na indústria.

$$TEM_{real} = \frac{P}{W\sqrt{R'(h_1-h_2)}.Q} \quad (4)$$

Para determinar os valores das constantes a e b , no caso do aço CMn, empregou-se o ajuste por regressão linear simples. Partindo de um conjunto de n pares de valores, ($f_i, [Mn]_i$), tal que, o melhor ajuste é obtido quando a soma do quadrado das diferenças (d_i) entre os valores medidos (f_i) e calculados ($f_{i,calc}$) for mínima,^[12,13] dessa forma, define-se variância (σ^2) como:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2 \quad (5)$$

Disso tem-se que:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - f_{i,calc})^2 \quad \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - a - b[Mn]_i)^2 \quad (6)$$

Para minimizar (14) deve-se derivar σ^2 em relação a (a) e, em seguida em relação a (b). Efetuando-se os cálculos obtém-se às seguintes equações:

$$a + b \sum_{i=1}^n [Mn]_i = \sum_{i=1}^n f_i \quad (7)$$

$$a \sum_{i=1}^n [Mn]_i + b \sum_{i=1}^n [Mn]_i^2 = \sum_{i=1}^n f_i [Mn]_i \quad (8)$$

Resolvendo essas equações para a e para b :

$$a = \frac{\left(\sum_{i=1}^n f_i \times \sum_{i=1}^n [Mn]_i^2 - \sum_{i=1}^n [Mn]_i \times \sum_{i=1}^n f_i [Mn]_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^n [Mn]_i \right)^2 - n \sum_{i=1}^n [Mn]_i^2} \quad (9)$$

$$b = \frac{\left(\sum_{i=1}^n f_i \times \sum_{i=1}^n [Mn]_i - n \sum_{i=1}^n f_i [Mn]_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^n [Mn]_i \right)^2 - n \sum_{i=1}^n [Mn]_i^2} \quad (10)$$

Procedimento análogo ao descrito acima foi empregado para o caso de três, quatro e cinco variáveis, método conhecido como regressão linear múltipla.

Devido à complexidade e, quantidade de cálculos envolvidos na determinação de a , b e r , implementou-se um programa de computador para executar os cálculos. O programa foi desenvolvido em C++.

Em seguida utilizou-se o modelo microestrutural,^[2,4-6] com as novas equações da TEM encontradas, e comparou-se com o mesmo modelo utilizando as equações de literatura^[3,8,9] e de Machado.^[2,4-6] Este modelo calcula as TEM, carga de laminação, tamanho de grão etc, ao longo de todas as cadeiras lê laminação, simulando o comportamento do material numa laminação.

Aços Carbono Manganês:

a) Modelo de Siciliano:^[3,8,9]

$$TEM = TEM_{Misaka} (0,768 + 0,137[Mn]) \quad (11)$$

b) Modelo de Machado:^[2,4-6]

Neste modelo a equação da literatura é utilizada sempre nas duas primeiras cadeiras, para as demais, existem duas condições: a) quando o nível de deformação na primeira somado com a da segunda cadeira for superior a um e a deformação no passe for superior a 0,5 e b) sempre que a deformação no passe for superior a 0,3. Caso estas duas condições não forem atendidas, o modelo utiliza a equação de Misaka. Estas condições foram utilizadas devido a equação de Misaka ser válida para deformações menores que 0,5 e apresentarem bom desempenho neste nível de deformação.

Aços Microligado:

Tanto Siciliano,^[3,8,9] quanto o modelo de Machado,^[2,4-6] utilizaram as mesmas equações:

$$TEM = TEM_{Misaka} (0,768 + 0,51[Nb] + 0,137[Mn] + 4,217[Ti]) \quad (12)$$

A Figura 1 apresenta o fluxograma do programa implementado.

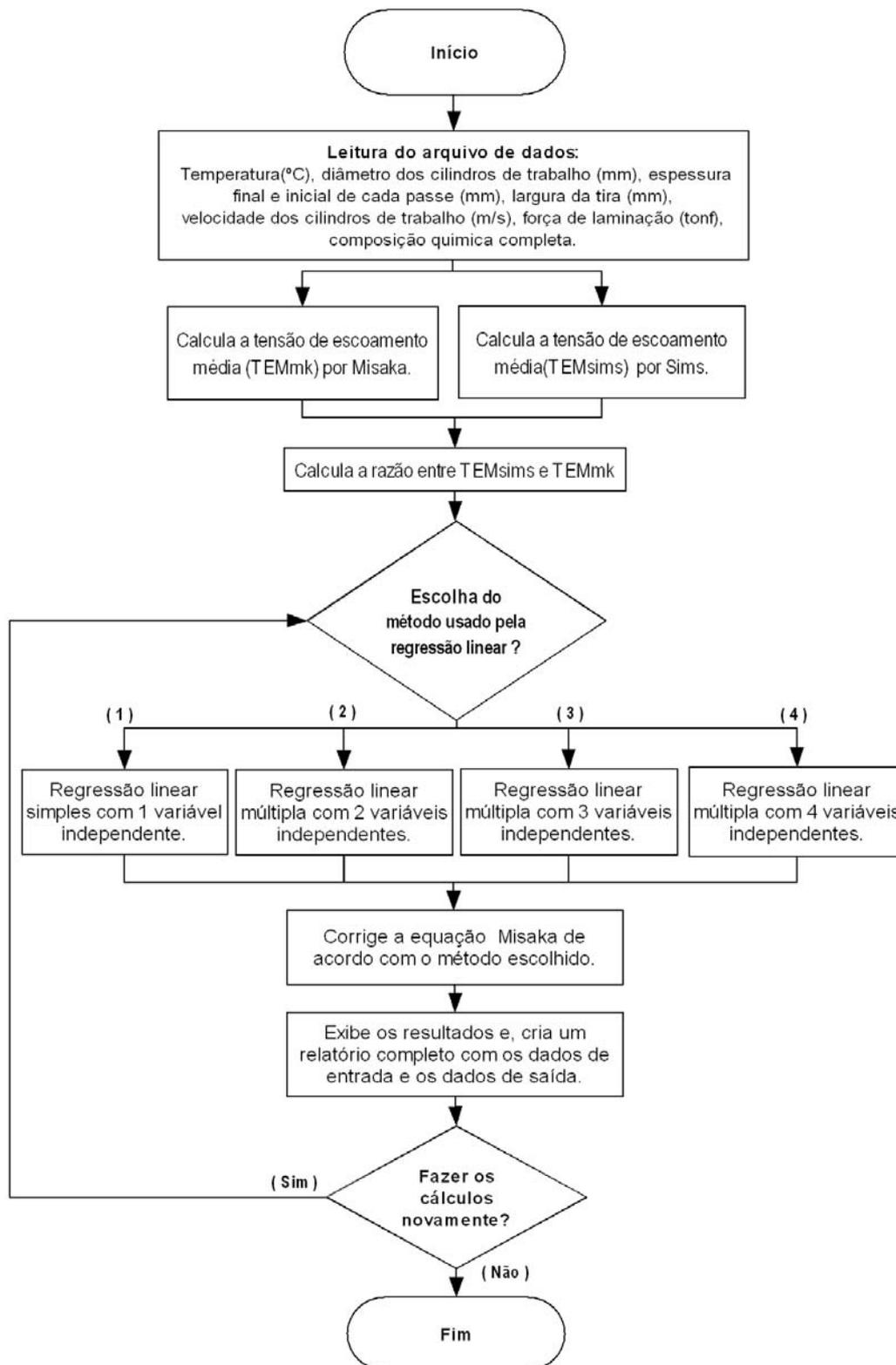


Figura 1 – Fluxograma do programa implementado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resultados das Regressões Lineares

O programa criado a partir do modelo é capaz fazer a leitura de uma tabela dados e, através de regressão linear determinar o fator de correção que melhor ajusta a equação de Misaka.

As equações (13) e (14) apresentam os fatores de correção (f) obtido a partir de um grupo de aços C-Mn e microligados respectivamente.

$$f_{\text{CMn}} = 0,8702 - 0,3366[\text{Mn}] \quad (13)$$

$$f_{\text{micro}} = 0,6917 - 0,2346 [\text{Mn}] + 117,1719[\text{Nb}] + 115,6286[\text{Ti}] - 0,1917[\text{Si}] \quad (14)$$

O cálculo de TEM a partir do modelo, TEM (fator f), com a introdução de um fator de correção na equação de Misaka, é feito da seguinte forma:

CMn:

$$\text{TEM}(\text{fator } f) = \text{TEMmk} (0,8702 - 0,3366[\text{Mn}]) \quad (15)$$

Microligado:

$$\text{TEM}(\text{fator } f) = \text{TEMmk} (0,6917 - 0,2346 [\text{Mn}] + 117,1719[\text{Nb}] + 115,6286[\text{Ti}] - 0,1917[\text{Si}]) \quad (16)$$

As Figuras 2 e 3 mostram um gráfico de dispersão em que foram plotados os valores das seguintes TEM: Sims, Misaka, Modelo. Observa-se que os valores obtidos pelo modelo de regressão (modelo) desenvolvido se ajustaram melhor aos valores reais determinados por Sims do que os resultados obtidos por Misaka.

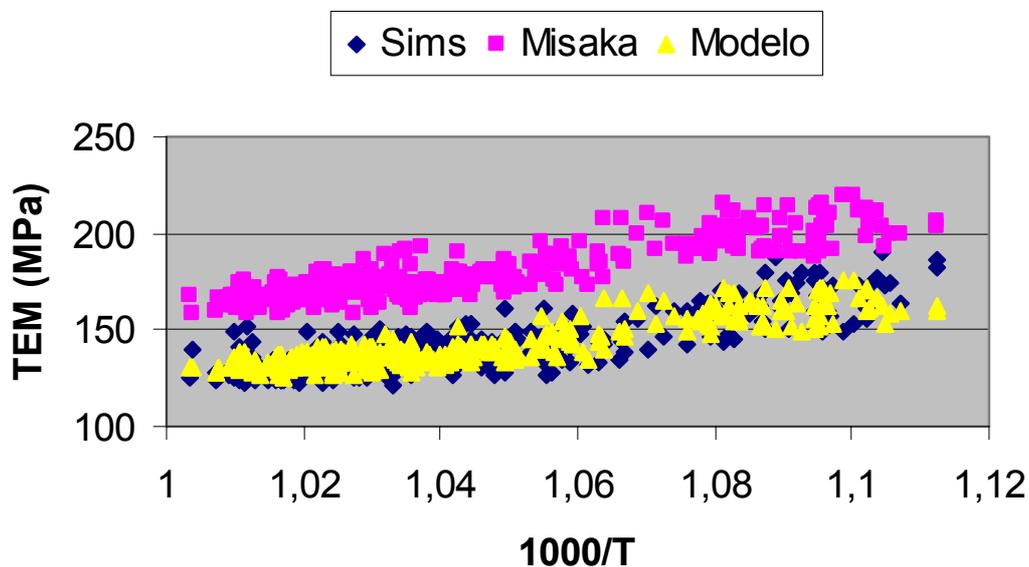


Figura 2 - TEM versus $1000/T$ em $^{\circ}\text{C}^{-1}$, determinado para um grupo de aços C-Mn.

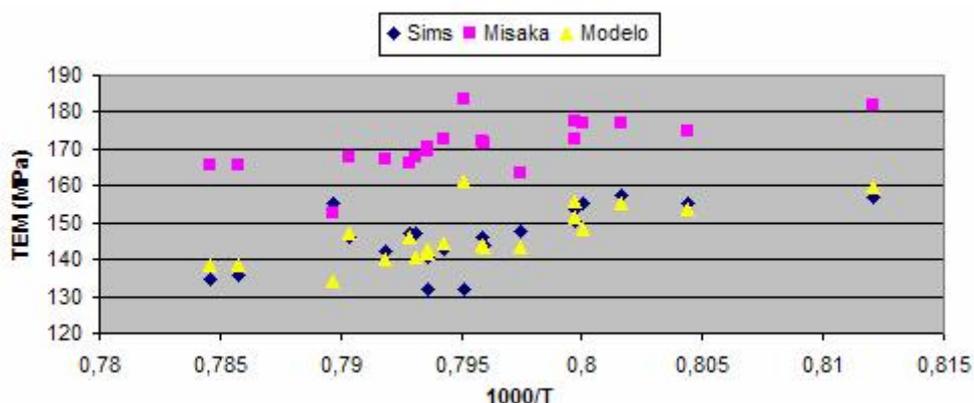


Figura 3 - TEM versus $1000/T$ em $^{\circ}\text{C}^{-1}$, determinado para um grupo de aços microligados.

As Tabelas 1 e 2 ilustram a precisão do modelo. Nessa tabela encontram-se alguns dos resultados obtidos a partir de dados industriais de laminação de tiras a quente.

Tabela 1 – Precisão do modelo no cálculo de TEM para aços C-Mn.

TEM (MPa) Sims	TEM (MPa) Misaka	TEM (MPa) Modelo	Diferença(%) Sims/Misaka	Diferença(%) Sims/Modelo
154,64	203,72	162,61	31,73	5,15
168,49	192,21	154,52	14,07	-8,28
162,18	190,37	152,08	17,38	-6,22
164,39	202,05	162,09	22,90	-1,39
162,63	203,83	163,52	25,33	0,54
159,05	206,94	165,66	30,10	4,15
168,64	192,17	154,49	13,95	-8,39
163,02	197,21	157,41	20,96	-3,44

Tabela 2 – Precisão do modelo no cálculo de TEM para aços microligados.

TEM (MPa) Sims	TEM (MPa) Misaka	TEM (MPa) Modelo	Diferença(%) Sims/Misaka	Diferença(%) Sims/Modelo
157,255	176,8759	155,3712	12,4771	-1,198
147,3881	167,8919	140,507	13,9114	-4,6687
150,6432	172,5739	151,5922	14,558	0,6299
144,1263	171,3481	143,3995	18,8874	-0,5043
131,7092	170,7224	142,8758	29,6207	8,4783
155,169	174,661	153,4255	12,5618	-1,1236
155,398	176,9576	148,094	13,8738	-4,7002
153,7398	177,5406	155,9551	15,4812	1,4409

3.2 Resultados da Simulação no Modelo Microestrutural

O modelo microestrutural desenvolvido por Machado,^[2,4-6] pode utilizar aços carbono – manganês, microligados e ao nióbio, neste último caso o modelo testa se ocorre precipitação de carbonetos. O modelo microestrutural, foi desenvolvido em

linguagem de programação C++, e o mesmo considera no cálculo das TEM e carga de laminação, as recristalizações estáticas e dinâmicas, as deformações acumuladas e redundantes entre passes. O modelo também calcula os tamanhos de grãos da austenita durante a laminação e da ferrita pouco antes do bobinamento.

3.2.1 Resultados das simulações para os aços C-Mn

Observe na figura 4 que a carga de laminação obtida pelo modelo se aproxima bem dos obtidos pela indústria e se comporta igual aos do Siciliano^[3,8,9] e Machado^[2,4-6] nas primeiras cadeiras (temperaturas mais altas). Nas últimas cadeiras o modelo se comporta igual ao do Siciliano,^[3,8,9] e o do Machado^[2,4-6] se aproxima mais aos dos dados industriais.

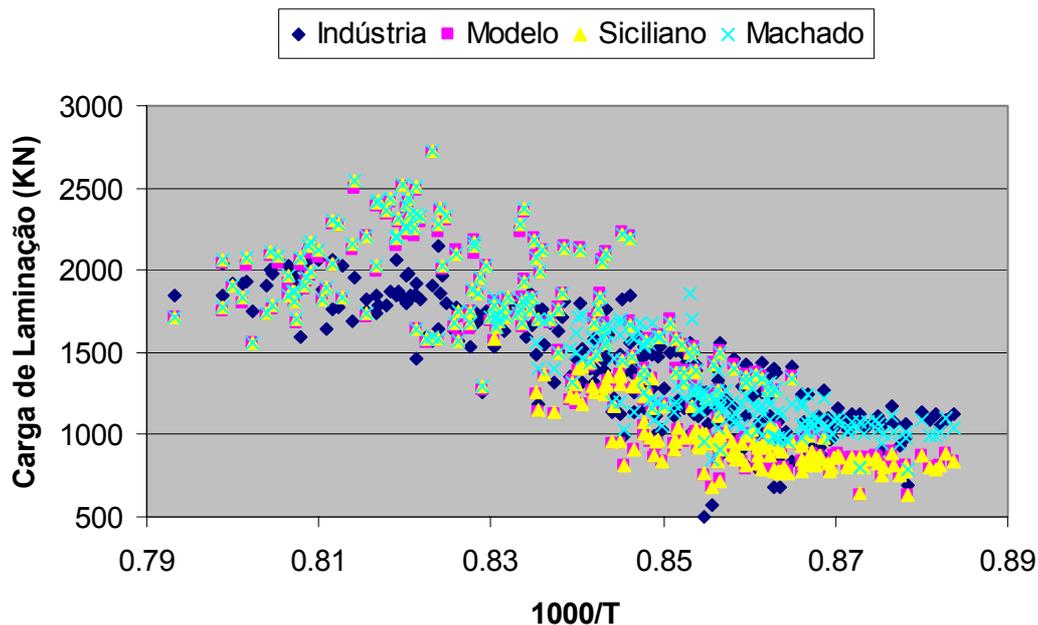


Figura 4 - Carga de laminação versus $1000/T$ em $^{\circ}\text{C}^{-1}$, determinado para um grupo de aços C-Mn, para a Indústria, Modelo, Siciliano^[3,8,9] e Machado.^[2,4-6]

Na Figura 5, observa-se o comportamento da TEM da indústria obtida pela equação de Sims, de Misaka, de Misaka corrigida pelo fator F, da Siciliano^[3,8,9] e do Machado.^[2,4-6] Observe que da mesma forma que na figura 4, nas primeiras cadeiras (temperaturas mais altas) o modelo (fator F) se comportou de forma similar ao da Siciliano^[3,8,9] e ao de Machado,^[2,4-6] e estão mais próximos ao de Sims do que o resultado obtido por Misaka. Já para as últimas cadeiras, o Misaka se comportou melhor e o modelo de Machado.^[2,4-6] Também acompanhou a melhor performance do Misaka. Isto é devido as condições do modelo de Machado.^[2,4-6] ditas anteriormente.

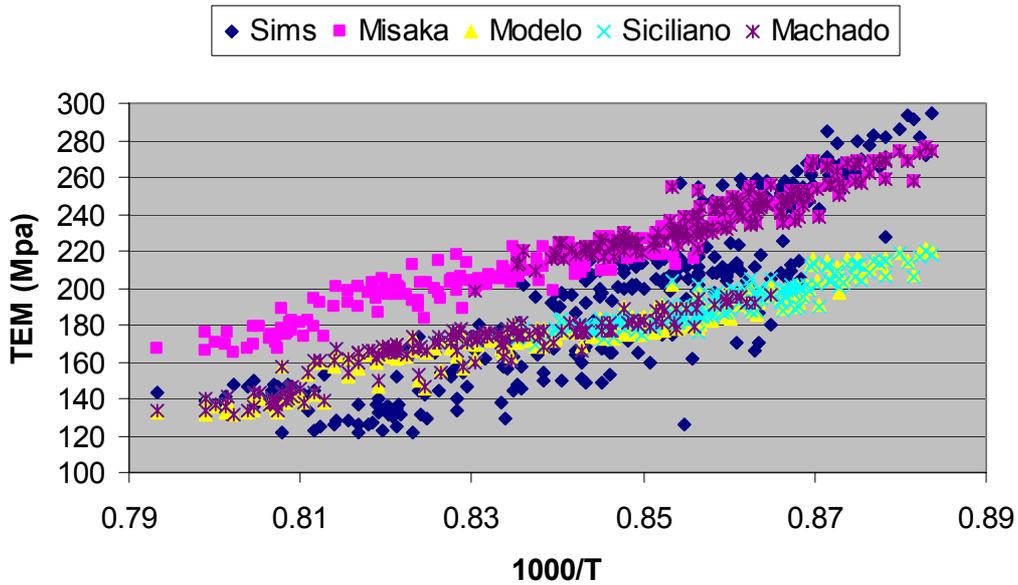


Figura 5 - TEM versus $1000/T$ em $^{\circ}\text{C}^{-1}$, determinado para um grupo de aços C-Mn, para a Indústria, Modelo, Siciliano^[3,8,9] e Machado.^[2,4-6]

3.2.1 Resultados das simulações para os aços microligados

Observe na Figura 6 que o modelo acompanha a carga de laminação ao longo da laminação de maneira similar ao de Siciliano^[3,8,9] e de Machado.^[2,4-6] Observa-se que principalmente nas primeiras cadeiras que os resultados do modelo estão mais próximos com os resultados industriais.

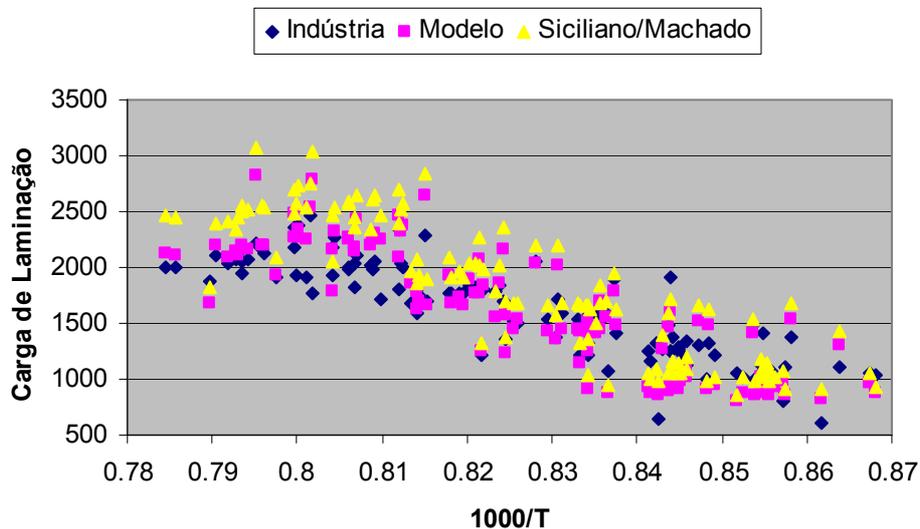


Figura 6 - Carga de laminação versus $1000/T$ em $^{\circ}\text{C}^{-1}$, determinado para um grupo de aços microligados, para a Indústria, Modelo, Siciliano^[3,8,9] e Machado.^[2,4-6]

Observe na Figura 7 que a TEM, para aços microligados, dada pelo modelo se aproxima mais da TEM obtida por Sims nas primeiras cadeiras do que o de Misaka, Siciliano^[3,8,9] e Machado.^[2,4-6]

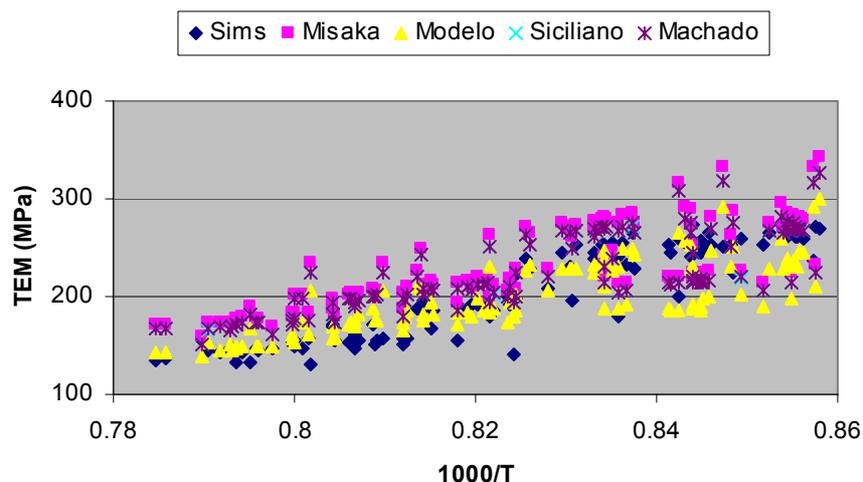


Figura 7 - TEM versus $1000/T$ em $^{\circ}\text{C}^{-1}$, determinado para um grupo de aços microligados, para a Indústria, Modelo, Siciliano^[3,8,9] e Machado.^[2,4-6]

4 CONCLUSÕES

O modelo matemático para predição da tensão de escoamento média (TEM) e cálculo do fator de correção na equação de Misaka, em uma laminação de tiras a quente de aços C-Mn e microligados, com o emprego da linguagem de programação C++ mostrou-se muito eficiente e com resposta rápida quando testado com dados industriais.

Os resultados da TEM obtido pelo modelo com o fator f mostraram uma boa correspondência com os dados reais, obtidos por meio da equação de Sims.

O modelo utilizando o fator f , se comportou de forma similar ao de Siciliano e de Machado e nas primeiras cadeiras mostrou maior aproximação com os dados da indústria comparados aos obtidos por Misaka.

As equações corrigidas da TEM do modelo com o fator f foram levantadas para a primeira cadeira, o que justifica um melhor ajuste nestas cadeiras iniciais.

A equação de Misaka foi obtida com deformações menores do que 0,5 e nas primeiras cadeiras normalmente estas deformações são maiores que 0,5.

De uma maneira geral modelo de Machado se comportou melhor, porque ele utiliza a equação de Misaka e de Siciliano nas condições em que elas apresentam melhor desempenho com os dados industriais, devido as condições criadas no modelo.

O programa criado a partir do modelo poderá ser utilizado em simulações na indústria, universidades e centros de pesquisas.

Agradecimentos

À ArcelorMittal Tubarão (CST) pela colaboração com contribuições técnicas e ao Fundo de Apoio a Ciência e Tecnologia do Município de Vitória (FACITEC) pelo auxílio financeiro na forma de bolsa de iniciação científica para KFC e GCB.

REFERÊNCIAS

- 1 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.
- 2 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.
- 3 Siciliano F. **Mathematical modeling of hot strip rolling of Nb steels**. 1999. Phd Theses. McGill University, Montreal-Canadá. Disponível em: <http://www.collectionscanada.ca/obj/s4/f2/dsk1/tape8/PQDD_0023/NQ50261.pdf>. Acessado em : 28 jan. 2007.
- 4 Machado M. L. P.; Denti Filho J.; Fagundes Junior J. **Simulation of disturbance in a hot strip mill using a thermomicrostructural model**. The 16 IASTED International Conference on Modelling and Simulation, Cancun, Mexico, 2005.
- 5 MACHADO M.L.P., DENTI Filho J., FAGUNDES Jr. J. **Development of qualitative rules for simulation disturbances and actions in a hot strip mill by using a thermomicrostructural model**, IASTED International Conference on Modelling and Simulation (MS 2006), Montreal, Canada, 2006.
- 6 MACHADO, M. L. P., DENTI FILHO, J., FAGUNDES JR., J. **A thermomicrostructural model for simulation disturbances in a hot strip mill and its effect in steel properties, roll force and exit strip thickness**. In: XXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering CILAMCE 2005, Guarapari, ES, 2005
- 7 MACHADO, M. L. P., DENTI FILHO, J., FAGUNDES JR., J. **Análise de variações na tensão na tira entre as últimas cadeiras e no gap e efeitos nas propriedades e espessura do aço por modelamento matemático**, 43º Seminário de Laminação Processos e Produtos Laminados e Revestidos, ABM, Curitiba, PR, 2006.
- 8 5M Siciliano F.; Marini O. Bruna R. G. **The effect of chemical composition on the hot-deformation resistance during hot strip rolling of microalloyed steels processed at the sidor hot strip mill**. Disponível em: <www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2005/LINK/30.pdf> Acesso em : 21 fev 2007.
- 9 Minami K.; Siciliano F.; Maccagno T.M.; Jonas J.J. **Mathematical modeling of mean flow stress during the hot strip rolling of Nb Steels**. ISJ International, 1996, vol 36, p.1507. Disponível em: <db1.wdc-jp.com/cgi-bin/isij/abst.cgi?Abst=is361507.html>Acessado em: 21 fev 2007.
- 10 Kima S.I, Leeb Y., Byonc S.M. **Study on constitutive relation of AISI 4140 steel subject to large strain at elevated temperatures**. Journal of Materials Processing Technology 140 (2003) 84–89.
- 11 Spiegel M. R., **Estatística**. 3ª ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1994.
- 12 Triola M. F., **Introdução à Estatística**. 9ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.
- 13 Deitel H. M., Deitel P. J., **C++ Como Programar**. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.