

MODELAMENTO DA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO DURANTE A LAMINAÇÃO DE TIRAS A QUENTE DE AÇOS MICROLIGADOS AO NIÓBIO¹

Antonio Augusto Gorni²
 Marcos Roberto Soares da Silva³

Resumo

Foi desenvolvido neste trabalho um modelo para o cálculo da resistência à deformação da austenita microligada durante seu processamento no Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente, o qual leva em conta sua evolução microestrutural. O algoritmo desenvolvido apresentou nível de precisão razoável, particularmente após ter sido feita sua calibração linear com os dados reais. Contudo, seu desempenho é praticamente equivalente ou mesmo inferior ao de modelos semi-empíricos e empíricos. Essa situação deixa claro que ainda há avanços a serem feitos nessa área como, por exemplo, maximizar o uso de valores efetivamente medidos dos parâmetros metalúrgicos, garantir a precisão dos dados e revisar as equações microestruturais.

Palavras-chave: Laminação de tiras a quente; Aços microligados; Evolução microestrutural; Resistência à deformação a quente.

MODELLING THE MICROSTRUCTURAL EVOLUTION DURING HOT STRIP ROLLING OF NIOBIUM MICROALLOYED STEELS

Abstract

This paper describes the development of a model for the calculation of the hot strength of microalloyed austenite that considers its microstructural evolution as the strip is being processed along the Finishing Mill. The calculations carried out by this model showed a reasonable precision level, especially after its correction through a linear calibration procedure. However, its precision performance is similar or even lower than that observed in semi-empirical or empirical models. This fact shows the need to maximize the use of effectively measured metallurgical relevant parameters, to ensure data accuracy and consistency, and to refine the microstructural equations.

Keywords: Hot strip rolling; Microalloyed steels; Microstructural evolution; Hot strength.

¹ Contribuição técnica ao 49º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 22 a 25 de outubro de 2012, Vila Velha, ES, Brasil.

² Membro da ABM. Engenheiro de Materiais, M. Eng., Dr. Eng., Especialista em Laminação a Quente, Usiminas-Cubatão, Cubatão SP, Brasil. E-Mail: Antonio.Gorni@usiminas.com.

³ Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, M.B.A., C.Q.E., Gerente do Suporte Técnico da Laminação a Quente, Usiminas-Cubatão, Cubatão SP, Brasil. E-Mail: Marcos.Silva@usiminas.com

1 INTRODUÇÃO

Ocorrências aparentemente inexplicáveis de sucateamento de bobinas de aços microligados durante seu processamento no Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente #1 da usina de Cubatão da Usiminas indicaram a necessidade de se fazer um estudo mais detalhado sobre suas condições metalúrgicas de processamento e o resultante impacto na operação do equipamento, especialmente em termos das cargas de laminação.

Já foi amplamente mostrado na literatura^(1,2) que determinadas condições de evolução microestrutural podem levar à ocorrência de recristalização dinâmica nas cadeiras intermediárias do Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente. Esse processo de restauração é muito mais rápido do que a recristalização estática que normalmente ocorre entre os passes aplicados nesse equipamento. Portanto, geralmente a recristalização dinâmica anula totalmente o encruamento residual que se acumulou no material durante sua passagem pelas cadeiras anteriores. Isso faz com que a cadeira imediatamente posterior àquela onde ocorreu esse fenômeno processe um material amaciado, criando uma condição que não está prevista nos algoritmos de controle do sistema de automação do Trem Acabador, os quais normalmente prevêem que o material endurece progressivamente ao passar pelas várias cadeiras. Por outro lado, note-se que a eventual ocorrência de recristalização dinâmica nas primeiras cadeiras do Trem Acabador passa quase despercebida. O material chega totalmente recristalizado à F1, não havendo encruamento residual a ser eliminado. Além disso, as altas temperaturas do esboço no início do processo e os altos graus de deformação aplicados nas primeiras cadeiras do Trem Acabador favorecem bastante a cinética dos processos de restauração do material, minimizando ou mesmo anulando o acúmulo de encruamento.

Seria muito oportuno dispor de um modelo para o cálculo da resistência à deformação a quente que possa prever corretamente a evolução da resistência à deformação a quente dos aços microligados durante sua passagem pelo Trem Acabador, levando em conta tanto o progressivo encruamento residual do esboço, como o amaciamento proporcionado pela ocorrência eventual de recristalização dinâmica. Infelizmente a grande maioria das equações propostas para a determinação da resistência à deformação a quente dos aços parte do princípio de que o material encontra-se plenamente recristalizado imediatamente antes da deformação,⁽³⁾ não podendo ser aplicadas de forma direta no caso das cadeiras posteriores do Trem Acabador.

Assim sendo, o desenvolvimento do modelo proposto requereu inicialmente a implantação de uma metodologia para se calcular a evolução microestrutural dos aços microligados durante sua passagem pelo Trem Acabador, determinando-se dessa forma o encruamento residual imposto ao esboço a cada passe de laminação e a eventual ocorrência de recristalização dinâmica. Esse trabalho foi descrito em outra contribuição apresentada neste Seminário.⁽⁴⁾ A seguir, a exemplo do que já havia sido feito anteriormente para aços ao C-Mn,⁽⁵⁾ foi desenvolvido um modelo matemático para o cálculo da resistência à deformação a quente da austenita microligada nas cadeiras do Trem Acabador, o qual incorpora esses fenômenos metalúrgicos. Este artigo tem como objetivo descrever como esse algoritmo foi elaborado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo matemático para cálculo da resistência à deformação a quente de aços microligados durante sua passagem pelo Trem Acabador desenvolvido neste trabalho se baseou no descrito por Siciliano.^(1,2) Em primeiro lugar, foi necessário definir uma equação básica para cálculo de resistência à deformação a quente específica para a cadeira F1 do Trem Acabador. Neste caso o esboço encontra-se plenamente recristalizado antes da aplicação da deformação nessa cadeira, em função das altas temperaturas e graus de deformação aplicados nos passes da laminação esboçadora, e também do relativamente longo período de espera que ocorre entre sua saída da última cadeira de esboçamento e o início da laminação no Trem Acabador.

Foram então coletados, no sistema supervisório do Laminador de Tiras a Quente #1 da usina de Cubatão da Usiminas, os dados operacionais de 11.440 bobinas a quente, cobrindo a seguinte faixa de composições químicas: 0,00-0,19% C; 0,11-1,57% Mn; 0,00-0,40% Si; 0,00-0,26% Cu; 0,00-0,56% Cr; 0,000-0,060% Nb; 0,000-0,054% Ti e 0,000-0,077% V. A seguir, a partir desses dados, foram calculados os correspondentes valores de resistência média à deformação a quente $\bar{\sigma}$ relativos a todas as seis cadeiras do Trem Acabador a partir de sua carga de laminação, usando-se o modelo inverso de Sims, conforme indicado pela equação:(1)

$$\bar{\sigma} = \frac{P}{w \sqrt{R (h_i - h_f)} Q_{Sims}} \quad (1)$$

Uma vez obtidos esses dados, foi feita uma análise estatística para verificar o efeito dos elementos de liga sobre a resistência à deformação a quente considerando-se exclusivamente a cadeira F1, usando-se análise gráfica, matriz de Pearson, regressão linear múltipla *stepwise* e não-linear. O motivo de se usar apenas os dados da cadeira F1 nesta análise se deve à necessidade de se evitar os eventuais efeitos de encruamento residual que ocorrem nas demais cadeiras e que perturbariam os efeitos puramente associados aos elementos de liga.

Uma vez definidos os elementos de liga mais significativos para o cálculo da resistência à deformação a quente, foram então testadas várias equações empíricas para permitir o cálculo desse parâmetro em função da composição química do aço e da temperatura, grau e velocidade de deformação do passe aplicado na cadeira F1. A equação (2) mostra a fórmula geral que apresentou melhor desempenho:

$$\bar{\sigma} = k_1 \exp\left(\frac{k_2 + k_3 C + k_4 Mn + k_5 Si + \dots}{T}\right) \varepsilon^{0,21} \dot{\varepsilon}^{0,13} \quad (2)$$

Como se pode observar, optou-se aqui pela abordagem clássica do cálculo da resistência à deformação a quente proposta por Hajduk, assumindo-se função exponencial para expressar o efeito da temperatura e de potência para os efeitos do grau e velocidade de deformação.⁽⁶⁾ Os efeitos dos elementos de liga são incorporados ao argumento da função exponencial, juntamente com a temperatura. Os valores dos expoentes usados no grau e velocidade de deformação são os mesmos propostos por Misaka.⁽⁷⁾ Os valores das constantes de ajuste k_i foram

obtidos ao se efetuar o ajuste da equação considerando somente os dados relativos à cadeira F1, onde havia garantia de supressão total do encruamento residual.

Decidiu-se aproveitar esta oportunidade para também verificar os efeitos específicos dos elementos microligantes sobre a resistência à deformação a quente. Para este objetivo utilizou-se a equação (3), que é ligeiramente diferente em relação à equação (2). Agora os elementos microligantes foram incluídos num polinômio linear que determina um fator de multiplicação; somente o C é incluído na função exponencial, juntamente com a temperatura:

$$\bar{\sigma} = (k_1 + k_2 Nb + k_3 Ti + k_4 V) \exp\left(\frac{k_5 + k_6 C}{T}\right) \varepsilon^{0,21} \bar{\varepsilon}^{0,13} \quad (3)$$

A equação (2) permite o cálculo direto dos valores de resistência à deformação a quente para as condições específicas da cadeira F1 do Trem Acabador. Ela também pode ser aplicada para as demais cadeiras, mas neste caso é necessário somar ao valor do grau de deformação ε a deformação (ou encruamento) residual calculada pelo modelo de evolução microestrutural correspondente à cadeira considerada. Sob tais condições, foi ainda constatado que a precisão do valor calculado de resistência à deformação a quente melhorava quando o valor da velocidade média de deformação $\bar{\varepsilon}$ era elevado na mesma proporção que havia sido aplicada ao grau de deformação. Isso pode ser explicado pelo fato de haver uma forte correlação estatística entre os valores de grau e velocidade de deformação dentro das condições operacionais do Trem Acabador. Além disso, nos casos onde o modelo microestrutural prevê a ocorrência de recristalização dinâmica, deve ser feita uma redução no valor calculado de resistência à deformação a quente, conforme a metodologia proposta por Siciliano.^(1,2) Para se aumentar o grau de precisão do cálculo, os resultados de resistência à deformação a quente calculados por esse modelo foram ajustados aos reais usando-se um procedimento de calibração baseado em correlação linear.

Para fins de comparação, também foi verificado o grau de ajuste conseguido pela equação para cálculo da resistência à deformação a quente normalmente usada pelos algoritmos do sistema de automação do Trem Acabador. Trata-se do modelo de Shida⁽⁸⁾ modificado, cujo valor original calculado é multiplicado por um fator de correção em função dos teores de Si e Nb do aço. Da mesma forma que o modelo original de Shida, esta versão parte do princípio de que o material a ser deformado sempre se encontra totalmente recristalizado. Também neste caso os resultados calculados foram ajustados aos reais usando-se calibração linear.

Optou-se ainda por aplicar a técnica de redes neurais ao cálculo da resistência à deformação a quente de aços microligados no Trem Acabador. Trata-se de um método totalmente empírico e interpolativo, mas muito poderoso. A rede neural proposta incluiu em sua camada de entrada a composição química do aço; seis conjuntos de valores de temperatura, grau e velocidade de deformação correspondentes a cada cadeira; e cinco intervalos de tempo entre os passes. A camada de saída era constituída de seis neurônios correspondentes aos seis valores de resistência à deformação a quente calculados, um para cada cadeira do Trem Acabador. O treinamento da rede neural foi feito usando o programa Statistica, o que implicou no uso de apenas uma camada oculta na rede. De todos os dados disponíveis, 70% deles foram reservados para a etapa de treinamento, 15% para o teste periodicamente feito durante o treinamento e 15% para a aferição final da rede

neural considerada plenamente treinada. Como foi feito nos demais casos, os resultados calculados pela rede neural foram ajustados aos reais usando-se calibração linear, com o objetivo de se melhorar a precisão do modelo.

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1 Equação de Resistência à Deformação a Quente para a Cadeira F1

A análise da matriz de Pearson para a análise do efeito dos elementos de liga sobre os valores de resistência à deformação a quente calculados para a cadeira F1 apresentou a seguinte ordem decrescente de relevância em termos do coeficiente de correlação r : Si (0,57) \rightarrow Mn (0,47) \rightarrow C e Ti (0,35) \rightarrow Nb (0,34) \rightarrow V (0,21) \rightarrow Cr e Cu (0,10). Deve-se notar que os valores de r refletem o efeito isolado de cada elemento de liga. Contudo, uma vez que as composições químicas não foram selecionadas de forma aleatória, mas sim refletem o *mix* específico de produção do Laminador de Tiras a Quente #1 da usina de Cubatão, surgem inevitavelmente correlações entre os teores de elementos de liga. Eis as principais correlações encontradas e seus correspondentes valores de r : C x Mn (0,68); Mn x Si (0,65); Mn x Ti (0,56); Si x Ti (0,60); e Cr x Cu (0,95). Infelizmente essa situação dificulta sobremaneira a caracterização da influência legítima de cada elemento de liga sobre a resistência à deformação a quente, uma vez que o efeito de um dado elemento está “contaminado” pelos efeitos dos demais elementos com os quais ele apresenta alto índice de correlação.

Por esse motivo foi feita correlação linear múltipla *stepwise* para se tentar identificar os elementos de liga mais influentes sobre a resistência à deformação a quente, o que permitiu analisar os efeitos de todos eles de forma global. De acordo com essa análise, os elementos mais influentes foram C, Mn, Si, Nb, Cr e B. O ajuste da equação (2), incluindo todos esses elementos de liga, aos dados de resistência à deformação a quente disponíveis para a cadeira F1, mostrou que o modelo apresentou coeficiente de correlação r igual a 0,600, erro padrão da estimativa de 12,6 MPa e 78% dos casos apresentaram valor do resíduo dentro da faixa de $\pm 10\%$ em relação ao valor real. Uma nova versão da equação (2), mas levando em conta apenas o C, Si e Nb, apresentou praticamente o mesmo nível de precisão e possui a vantagem de ser mais simples. Aparentemente, para as condições específicas do Laminador de Tiras a Quente #1 de Cubatão, as correlações estatísticas existentes entre os elementos de liga relevantes permitem que o efeito de todos eles seja plenamente expresso usando-se apenas esses três elementos. É curioso notar que a equação modificada de Shida citada anteriormente, que é normalmente usada pelo sistema de automação do Trem Acabador para o cálculo de resistência à deformação a quente, e que foi deduzida há mais de dez anos atrás, também só considera esses três elementos de liga.

3.2 Efeito dos Elementos Microligantes

O ajuste da equação (3) aos dados relativos à cadeira F1 apresentou coeficiente de correlação r igual a 0,547 e erro padrão da estimativa de 13,2 MPa – ou seja, uma ligeira degradação na precisão em relação à equação (2). Contudo, a análise da equação (3) mostrou que, a cada 0,010% de elemento microligante incorporado à liga, a resistência à deformação a quente do aço aumentou de 2,9% para o Nb, 1,3% para o Ti e 0,2% para o V. Esse resultado está qualitativamente de acordo com o observado na literatura⁽⁹⁾; uma comparação quantitativa é virtualmente impossível em função de terem sido usados dados industriais neste trabalho, obtidos a partir de condições complexas de processo.

À primeira vista, a elevação nos valores de resistência à deformação a quente provocada pelos elementos microligantes parece ser pequena, mas deve-se levar em conta que essa conclusão vale somente para a cadeira F1, onde a temperatura de laminação ainda é relativamente alta, da ordem de 990 a 1050°C, e o esboço encontra-se totalmente recristalizado antes da aplicação do passe. O endurecimento proporcionado pelo Nb decorre principalmente do retardamento da recristalização estática da austenita entre passes, o qual será calculado pelo modelo de evolução microestrutural para as demais cadeiras.

3.3 Modelo Proposto Incluindo Evolução Microestrutural

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos em termos da precisão para o cálculo da resistência à deformação a quente através da equação (1), onde os valores de grau e velocidade de deformação foram ajustados em função do encruamento residual e onde foi considerado o efeito da ocorrência eventual de recristalização dinâmica para cada cadeira considerada. A precisão foi definida em termos do erro padrão da estimativa, **EPE**, e da porcentagem de casos em que o erro manteve-se dentro da faixa de $\pm 10\%$ em relação ao valor real, **P_{±10%}**. Como se pode observar nessa tabela, foi constatada uma tendência de queda na precisão dos valores calculados rumo às cadeiras posteriores do Trem Acabador. Além disso, a calibração linear deste modelo em relação aos dados reais melhorou ligeiramente a precisão obtida.

Tabela 1: Precisão obtida pelo cálculo da resistência à deformação a quente pela equação (1)

CADEIRA	EPE - MM DIRETO		EPE – CALIBRAÇÃO		P _{±10%} [%]	
	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	DIRETO	CALIB
F1	11,0	7,9	10,1	7,2	82	85
F2	13,8	8,7	10,9	7,6	76	81
F3	19,2	10,5	13,8	7,6	63	83
F4	19,7	9,8	17,9	8,9	72	75
F5	34,8	14,1	23,8	9,7	49	72
F6	32,4	12,6	30,1	11,7	63	68

3.4 Modelo de Shida Modificado

O desempenho em termos de precisão do modelo de Shida modificado, onde se usou um fator multiplicativo em função dos teores de Si e Nb do aço, pode ser visto na Tabela 2. Os erros produzidos por esse modelo, em sua versão direta,

são bem mais altos do que os verificados no modelo proposto por este trabalho, exceto para a cadeira F5. Isto já era de se esperar, já que o modelo de Shida não considera o encruamento residual do esboço. Contudo, após a calibração linear, os erros do modelo de Shida modificado caíram bastante. Isso ocorreu basicamente pelo fato desse procedimento numérico incorporar indiretamente a esse modelo o encruamento residual a partir dos dados reais. Essa melhoria permitiu que este modelo apresentasse desempenho superior ao proposto por este trabalho para as cadeiras F1, F3, F4 e F5, quando se considera apenas o erro padrão da estimativa. Contudo, a diferença de precisão entre os dois modelos foi muito pequena e pouco significativa em termos práticos.

Tabela 2: Precisão obtida pelo cálculo da resistência à deformação a quente através do modelo de Shida modificado. Os resultados em negrito indicam os casos em que este modelo foi melhor em relação ao utilizado neste trabalho

CADEIRA	EPE - MM DIRETO		EPE - CALIBRAÇÃO		P _{±10%} [%]	
	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	DIRETO	CALIB
F1	53,9	38,8	9,3	6,7	0	87
F2	76,7	53,7	11,0	7,7	0	80
F3	60,5	33,2	12,2	6,7	1	87
F4	55,8	27,9	17,6	8,8	11	77
F5	30,9	12,5	23,4	9,5	60	71
F6	36,4	14,2	32,1	12,5	51	63

Os erros apresentados pelo modelo modificado de Shida, em sua versão sem calibração, não apresentaram relação nítida com a posição da cadeira dentro do Trem Acabador. Mas foi constatado valor mínimo de erro para o caso específico da cadeira F5. Isto parece indicar que esse modelo foi ajustado usando dados de processo obtidos exclusivamente para essa cadeira. Por outro lado, após a aplicação da calibração linear, foi verificado que os erros do modelo de Shida modificado apresentaram tendência crescente no sentido das cadeiras posteriores do Trem Acabador, da mesma forma como verificado no modelo anterior.

3.5 Modelo Baseado em Rede Neural

Em função dos resultados obtidos anteriormente durante a análise estatística sobre os efeitos dos elementos de liga na resistência à deformação a quente e de testes feitos com várias configurações de redes neurais, chegou-se à conclusão de que apenas os teores de C, Mn, Si e Nb do aço eram relevantes para esta abordagem de modelamento. Logo, considerando-se os dados da composição química do aço e dos parâmetros de processo, a camada de entrada da rede neural ficou constituída por 27 neurônios. As interações feitas pelo programa Statistica revelaram que a rede neural com camada oculta contendo 18 neurônios e usando função logística como função de transferência apresentou os melhores resultados em termos de precisão do cálculo da resistência à deformação a quente.

Os valores de resistência à deformação a quente calculados pela rede neural proposta por esse trabalho mostraram níveis de precisão superiores aos dois modelos anteriores, conforme mostra a tabela 3. Neste caso específico a calibração linear dos resultados calculados em relação aos reais não proporcionou nenhuma melhoria na precisão do cálculo, o que mostra o grande poder de previsão típico das

redes neurais. De toda forma, mais uma vez, os erros tenderam a aumentar no sentido das últimas cadeiras do Trem Acabador.

Tabela 3: Precisão obtida pelo cálculo da resistência à deformação a quente ao longo do Trem Acabador através de rede neural

CADEIRA	EPE		P _{±10%} [%]
	[MPa]	[%]	
F1	5,8	4,1	98
F2	7,6	5,3	94
F3	9,4	5,0	95
F4	12,3	6,0	90
F5	14,4	5,8	92
F6	17,5	6,6	88

4 DISCUSSÃO

Em sua versão original, o modelo para cálculo da resistência à deformação a quente baseado na evolução microestrutural do esboço ao longo do Trem Acabador apresentou desempenho claramente superior ao modelo modificado de Shida, exceto no caso específico da cadeira F5. Esta exceção parece decorrer do procedimento específico adotado para o ajuste desse último modelo.

Após a aplicação da calibração linear em função dos dados reais a ambos os modelos, a situação praticamente se inverteu, passando o modelo modificado de Shida a apresentar desempenho nominalmente melhor do que o baseado na evolução microestrutural. E, ao se considerar a relação custo/benefício associada ao esforço computacional associado a ambas as alternativas, o modelo modificado de Shida passa a ser claramente superior, uma vez que seu cálculo é bem mais simples.

O modelo para cálculo da resistência à deformação a quente através de redes neurais é ainda mais preciso do que as duas alternativas anteriores. Contudo, há muita desconfiança sobre a confiabilidade das redes neurais, uma vez que ela “deduz” o modelo a partir dos dados apresentados a ela, não se baseando em nenhum princípio metalúrgico ou equação formal. Esse receio somente poderia ser eliminado (ou confirmado) após uma avaliação de longo prazo da rede neural treinada sob condições operacionais.

Os erros relativamente altos associados aos resultados calculados pelo modelo de resistência à deformação a quente baseado na evolução microestrutural parecem estar ligados à ausência de dados medidos ou à insuficiente precisão de diversos parâmetros metalúrgicos necessários ao cálculo. Por exemplo: temperatura média do esboço, tamanho de grão médio do esboço na entrada do Trem Acabador e teor de Nb solubilizado, entre outros. Além disso, há dúvidas sobre a aplicabilidade das diversas equações para determinação da evolução microestrutural da austenita, as quais foram desenvolvidas sob condições laboratoriais e para aços cuja composição química nem sempre é compatível com a realidade industrial. Esses aspectos deverão ser melhor encaminhados para se reduzir os erros associados ao cálculo da evolução microestrutural do material e o correspondente grau de encruamento residual em cada cadeira do Trem Acabador.

5 CONCLUSÕES

Os resultados decorrentes da aplicação de um modelo matemático para o cálculo da resistência à deformação de aços microligados no Trem Acabador de um Laminador de Tiras a Quente que leva em conta o encruamento residual do esboço mostraram que o nível de precisão obtido por esse modelo foi razoável. Contudo, na prática, seu desempenho foi similar ao do algoritmo já usado no sistema de automação da linha, após ambos terem sido calibrados de forma linear em relação aos dados reais. Um terceiro modelo, baseado exclusivamente em rede neural, mostrou desempenho ainda melhor em termos de precisão. Esses resultados mostram que, para aumentar a precisão do modelo baseado na evolução microestrutural, é necessário viabilizar a medição de dados ainda não disponíveis no sistema supervisor do Trem Acabador, maximizar a precisão e consistência de todos eles e revisar as equações usadas no algoritmo, de forma a compatibilizá-las plenamente com as condições específicas de processo e o *mix* de produtos do Laminador de Tiras a Quente #1 da usina de Cubatão da Usiminas.

6 TABELA DE SÍMBOLOS E ABREVIÇÕES

EPE:	Erro Padrão da Estimativa
h_i :	Espessura Inicial do Esboço
h_f :	Espessura Final do Esboço
k_i :	Constante
MM:	Modelo Matemático
P:	Carga de Laminação
$P_{\pm 10\%}$:	Porcentagem de Casos Onde o Resíduo Variou entre $\pm 10\%$ do Valor Real
Q_{Sims} :	Fator Geométrico Definido pelo Modelo de Carga de Sims
r:	Coefficiente de correlação
T:	Temperatura
w:	Largura do Laminado
$\bar{\epsilon}$:	Velocidade Média de Deformação
$\bar{\sigma}$:	Resistência Média à Deformação a Quente

REFERÊNCIAS

- 1 MINAMI, K. et al. Mathematical Modeling of Mean Flow Stress During the Hot Strip Rolling of Nb Steels. **ISIJ International**, v. 36, n. 12, p. 1507-1015, December 1996.
- 2 SICILIANO JR., F. & JONAS, J.J. Mathematical Modelling of the Hot Strip Rolling of Microalloyed Nb, Multiply-Alloyed Cr-Mo, and Plain C-Mn Steels. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 31A, n. 2, p. 511-530, February 2000.
- 3 GORNI A.A. Cálculos de Laminação. In: Laminação de Produtos Planos. **Curso**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2005, 86 p.
- 4 GORNI, A.A. & SILVA, M.R.S. Modelamento da Evolução Microestrutural Durante a Laminação de Tiras a Quente de Aços Microligados ao Nióbio. A ser apresentado no 49º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Vitória, 2012.
- 5 GORNI, A.A. & VALLIM, P.S.S. Efeito da Recristalização Dinâmica na Resistência à Deformação de Aços Processados no Laminador de Tiras a Quente. In: 40º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos. **Anais...** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Vitória, p. 480-488, 2003.
- 6 HENSEL, A. & SPITTEL, T. **Kraft- und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren**. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1978, 528 p.



- 7 MISAKA, Y. & YOSHIMOTO, T. Formularization of Mean Resistance to Deformation of Plain Carbon Steels at Elevated Temperature. **Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity**, v. 8, n. 79, p. 414-422, 1967-8 (em japonês).
- 8 SHIDA, S. Empirical Formula of Flow Stress of C Steels - Resistance to Deformation of C Steels at Elevated Temperature. **Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity**, v. 10, n. 103, p. 610-617, 1969 (em japonês).
- 9 NAGASAKI, C. & KIHARA, J. Dependence of Flow Stress of Steels at Elevated Temperature on the Content of Micro Alloying Elements. **Tetsu-to-Hagané**, v. 81, n. 8, 773-779, August 1995 (em japonês).