

MODELO MATEMÁTICO PARA CÁLCULO DA CARGA DE LAMINAÇÃO DE CHAPAS GROSSAS PROCESSADAS POR RESFRIAMENTO ACELERADO¹

Nízia Mendes Fonseca²
Antônio Adel dos Santos³
Bruno Alves Resende⁴
Cristóvão Nery Giacomini⁵

Resumo

Na literatura existem diversos propostos para cálculo da carga de laminação e resistência à deformação do aço, sendo o modelo de Sims o mais utilizado para cálculo da carga, juntamente com as equações de Shida ou de Misaka para a resistência à deformação. Para o caso da laminação de chapas grossas de aços microligados na Usina de Ipatinga da Usiminas, estes modelos não apresentaram resultados satisfatórios em simulações *offline*. Visando aprimorar o cálculo *offline* de carga, foram coletados dados industriais da laminação de algumas qualidades de chapas grossas processadas via resfriamento acelerado e foram testadas as seguintes alternativas: (1) ajuste do fator geométrico do modelo de Sims; (2) modelo de Sims combinado com equação de Misaka modificada; (3) modelo de Sims combinado com a equação de Shida modificada; (4) modelo de Schultz para a carga de laminação; e (5) redes neurais artificiais. Os melhores resultados de previsão de carga de laminação foram obtidos pelos modelos de Schultz e de redes neurais.

Palavras-chave: Modelo matemático; Chapas grossas; Carga de laminação; Resistência à deformação.

MATHEMATICAL MODEL FOR ROLLING FORCE CALCULATION IN HOT ROLLING OF STEEL PLATES PRODUCED BY ACCELERATED COOLING

Abstract

In literature, there are many models to calculate the rolling force and hot deformation resistance. Sims model for rolling force, together with Misaka's or Shida's equations for hot deformation resistance are the most widely used. For the hot rolling of microalloyed steel plates in Ipatinga works of Usiminas, these models did not give satisfactory results. Aiming to improve the offline calculation of rolling force, industrial data of the hot rolling process, related to some types of steel plates processed via accelerated cooling, were collected and the following alternatives were tested: (1) adjustment of the geometric factor of Sims model; (2) Sims model combined with a modification of Misaka equation; (3) Sims model combined with a modification of Shida equation; (4) Schultz model for rolling force; and (5) artificial neural networks. The best results for the rolling force prediction were given by the Schultz model and neural networks.

Key words: Mathematical model; Plate rolling; Rolling force; Deformation resistance.

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; Engenheira Química e Metalurgista, Centro de Tecnologia Usiminas – Usina de Ipatinga, MG.

³ Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, D.Sc., CQE/ASQ, Centro de Tecnologia Usiminas – Usina de Ipatinga, MG.

⁴ Engenheiro Mecânico, M.Sc., Centro de Tecnologia Usiminas – Usina de Ipatinga, MG.

⁵ Membro da ABM; Analista de Sistemas, Centro de Tecnologia Usiminas – Usina de Ipatinga, MG.

1 INTRODUÇÃO

O uso de modelos matemáticos no processo de laminação a quente permite estabelecer uma escala de passes otimizada, visando uma maior produtividade e melhorias no acerto de espessura e forma do material, além de evitar danos ao equipamento.

Para o cálculo da carga de laminação, foram propostos vários métodos que podem fornecer resultados adequados.^(1,2) Dentre eles, o modelo desenvolvido por Sims,⁽²⁾ equações (1) e (2), tem sido o mais utilizado, devido ao bom compromisso entre precisão e simplicidade de cálculos.

$$F = 117,7Q_P w \sigma L_d \quad (1)$$

$$Q_P = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1-r}{r}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{r}{1-r}} - \frac{\pi}{4} - \sqrt{\frac{1-r}{r}} \sqrt{\frac{R'}{h_s}} \ln\left(\frac{h_n}{h_s}\right) + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1-r}{r}} \sqrt{\frac{R'}{h_s}} \ln\left(\frac{1}{1-r}\right) \quad (2)$$

F: carga de laminação (tf);
w: largura do laminado (m);
L_d: comprimento do arco de contato (m);
σ: resistência à deformação (MPa);
Q_p: fator geométrico (-);
r: redução de espessura (-);
R': raio do cilindro deformado (m);
h_s: espessura de saída do passe (m);
h_n: espessura no plano neutro (m).

O modelo original de Sims foi desenvolvido considerando-se deformação homogênea ao longo da espessura do laminado. No entanto, esta condição é satisfeita apenas para materiais relativamente finos, com relação L_d/h_m ≥ 1 (sendo h_m a espessura média do laminado).⁽³⁾ Adicionalmente, durante a laminação de chapas grossas, existe o efeito *peening*, onde a deformação ocorre preferencialmente nas camadas externas do laminado, tornando a carga de laminação maior que a esperada.

Para a utilização do modelo de Sims, o principal parâmetro que deve ser ajustado é a resistência à deformação que depende da composição química do material, temperatura, deformação e taxa de deformação em cada passe. Na literatura existem algumas equações para cálculo da resistência à deformação, sendo as de Misaka e Yoshimoto⁽⁴⁾ e Shida⁽⁵⁾ as mais utilizadas. Estas equações levam em conta apenas o teor de C do material e consideram que ocorre recristalização estática completa entre os passes. Isto pode levar a desvios significativos para aços microligados processados por laminação controlada, onde estão presentes fenômenos como arraste de soluto e ancoramento de precipitados e, por este motivo, a recristalização não é completa, ocorrendo acúmulo de deformação principalmente nos passes de acabamento.

Aplicando-se um simulador matemático para a laminação de chapas grossas, desenvolvido no Centro de Tecnologia Usiminas,⁽⁶⁾ a aços microligados, as equações de Shida e Misaka originais, acopladas ao modelo de Sims, realmente não forneceram previsão satisfatória da carga de laminação, especialmente nos passes de acabamento. Deste modo, neste trabalho foram avaliadas as seguintes alternativas para melhoria do cálculo da carga de laminação: (1) ajuste do fator geométrico do modelo de Sims; (2) modelo de Sims combinado com equação de Misaka modificada; (3) modelo de Sims combinado com a equação de Shida modificada; (4) modelo de Schultz para a carga de laminação; e (5) redes neurais artificiais (RNA).

2 MODELOS MATEMÁTICOS DE CARGA E RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO

O modelo para cálculo da carga apresentado por Schultz e Smith Junior⁽⁷⁾ é dado na equação (3). Este modelo ganha destaque devido à sua simplicidade, pois foi desenvolvido inicialmente para elaborar escalas de passe e para controle *online* do processo de laminação. As constantes do modelo são determinadas por regressão múltipla dos dados industriais. Como o modelo de Schultz é totalmente empírico, os efeitos do atrito, deformação elástica dos cilindros e resistência à deformação do material estão implícitos nas constantes.

$$\ln F = b_0 + b_1 \ln \left(\frac{R}{h_e} \right) + b_2 \ln \left(\frac{\Delta h}{h_e} \right) + b_3 \ln \left(\frac{R}{h_e} \right) \ln \left(\frac{\Delta h}{h_e} \right) + b_4 \frac{T}{1000} + b_5 \frac{T}{1000} \ln \left(\frac{\Delta h}{h_e} \right) + b_6 \ln \left(\frac{\Delta h}{h_1} \right) \ln \left(\frac{R}{h_e} \right)^2 + b_7 \left(\frac{T}{1000} \right)^2 + \ln(w) + \frac{1}{2} [\ln(R) + \ln(\Delta h)] \quad (3)$$

R: raio médio dos cilindros de trabalho (m);

h_e : espessura de entrada no passe (m);

Δh : redução de espessura no passe (m);

T: temperatura (°C);

b_0 a b_7 : constantes.

Moon e Park⁽⁸⁾ propuseram uma modificação da equação de Misaka que considera a composição química do material e a deformação retida do passe anterior devido à não recristalização. A modificação proposta é apresentada pelas equações (4) e (5). Na última equação os teores dos elementos químicos são dados em porcentagem em massa.

$$\sigma = (f_k \sigma_M)^k \varepsilon^p \dot{\varepsilon}^n \left(\frac{\varepsilon + \varepsilon_r}{\varepsilon} \right)^l \exp \left(C_{eq} + \frac{Q}{T + 273} \right) \quad (4)$$

$$f_k = 0,963 + 0,161Mn + 4,388Nb + 0,86V + 4,03Ti + 0,29Mo + 0,022Ni + 0,028Cr \quad (5)$$

σ_M : resistência à deformação calculada pela equação original de Misaka⁽³⁾ (MPa);

ε : deformação logarítmica (-);

$\dot{\varepsilon}$: taxa de deformação (s^{-1});

ε_r : deformação residual do passe anterior (-), calculada por um modelo de evolução microestrutural;

k , l , n , p , C_{eq} e Q : constantes.

A determinação da deformação retida de um passe para o seguinte, a partir da carga de laminação medida, pode ser feita pela proposição de Ouchi.⁽⁹⁾ Neste método, a fração de deformação não amaciada pode ser relacionada com a temperatura, intervalo de tempo entre passes e deformação total do passe anterior de acordo com a equação (6).⁽¹⁰⁾

$$\lambda_i = 1 - A \cdot \frac{\Delta t_i}{\varepsilon_{t,i-1}} \cdot \exp \left[\frac{-Q}{R(T_i + 273)} \right] \quad (6)$$

λ_i : fração não amaciada entre os passes $i-1$ e i (-);

Δt_i : tempo entre passes (s);

$\varepsilon_{t,i-1}$: deformação total no passe anterior (-);

R : constante dos gases ideais ($J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$).

As constantes A e Q podem ser determinadas por regressão linear múltipla dos dados de processo.

3 METODOLOGIA

Foram utilizados dados reais do processo de laminação de um total de 287 chapas grossas processadas via resfriamento acelerado. A Tabela 1 apresenta a faixa de composição química dos aços estudados. Para aplicação do modelo de Sims combinado com as equações de Misaka e Shida modificadas, e do modelo de Schultz, os aços estudados foram divididos em sete grupos, de acordo com a qualidade e/ou composição química.

Tabela 1. Faixa de composição química dos aços estudados (% em massa)

Elemento	C	Mn	Si	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V
Mínimo	0,04	1,05	0,17	0,02	0,01	0	0	0	0	0
Máximo	0,16	1,77	0,35	0,25	0,30	0,22	0,05	0,24	0,06	0,05

O simulador matemático do processo de laminação de chapas grossas desenvolvido pelo Centro de Tecnologia Usiminas⁽⁶⁾ foi utilizado para determinar, para cada passe, a partir dos dados industriais, a temperatura, deformação, taxa de deformação, dimensões a quente do laminado e deformação residual, calculada pelo modelo de evolução microestrutural do simulador.

O desempenho dos modelos testados para cálculo da carga de laminação foi avaliado a partir dos gráficos de dispersão da carga calculada *versus* carga medida, coeficiente de determinação (r^2), erro médio absoluto (\bar{e}) e erro padrão da estimativa (e_p). O erro médio absoluto e o erro padrão da estimativa foram calculados de acordo com as equações (7) e (8).

$$\bar{e} = \frac{\sum(|F_{real,i} - F_{calc,i}|)}{n} \quad (7)$$

$$e_p = \sqrt{\frac{\sum(F_{real,i} - F_{calc,i})^2}{n - 2}} \quad (8)$$

3.1 Ajuste do Fator Geométrico do Modelo de Sims

O resultado do cálculo da carga pelo modelo de Sims, equação (1), depende da escolha da equação para o fator geométrico. Para considerar o efeito *peening*, foi utilizada a equação (9),⁽⁶⁾ desenvolvida a partir de regressão dos dados de processo. O último termo da equação traduz o efeito *peening*, onde h_m é a espessura média do esboço.

$$Q_p = 0,8 + \left(0,45 \frac{\Delta h}{h_e} + 0,04\right) \left(\sqrt{\frac{R'}{h_e}} - 0,5\right) + 0,25 \frac{h_m}{L_d} \quad (9)$$

3.2 Modelo de Sims Combinado com a Equação de Misaka Modificada

Para cada um dos grupos de aço, as constantes da equação (4) foram determinadas a partir de regressão linear múltipla dos valores reais de resistência à deformação. A resistência à deformação real foi calculada através da aplicação inversa do modelo de Sims, a partir da carga medida. Para a deformação residual do passe anterior, foram utilizados os dados fornecidos pelo simulador,⁽⁶⁾ calculados por meio de um modelo de evolução microestrutural.

3.3 Modelo de Sims Combinado com a Equação de Shida Modificada para Inclusão da Deformação Residual

Para se determinar as constantes da equação (6), a deformação total real aplicada no passe deve ser determinada a partir da aplicação inversa das equações de Sims e Shida, utilizando a carga medida.

A deformação total real aplicada no passe corresponde à soma da deformação logarítmica para redução de espessura e da deformação residual acumulada nos passes anteriores. Assim, a deformação residual e a fração não amaciada podem ser determinadas pelas equações (10) e (11). As constantes da equação (6) são determinadas por regressão múltipla.

$$\varepsilon_{r,i} = \varepsilon_{t,i} - \varepsilon_i \quad (10)$$

$$\lambda_i = \frac{\varepsilon_{r,i}}{\varepsilon_{t,i-1}} \quad (11)$$

3.4 Modelo de Schultz

As constantes do modelo de Schultz, equação (3), foram determinadas por regressão linear múltipla dos dados de processo. Foram determinados conjuntos de constantes para cada um dos grupos de aço estudados.

3.5 Redes Neurais Artificiais

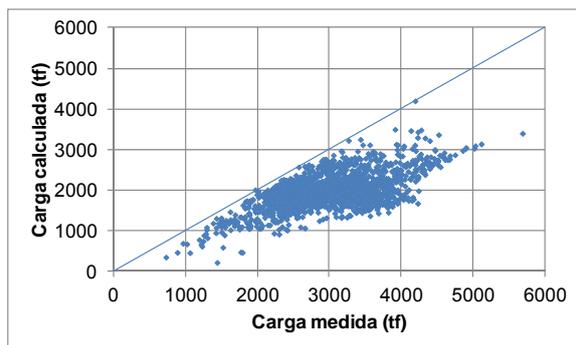
Para a modelagem da força de laminação via redes neurais artificiais, foram utilizadas redes do tipo MLP (*Multi-layer Perceptron*). A definição da estrutura da rede foi realizada variando o número de neurônios da camada oculta de $(n/2)$ até

$(2n+1)$ sendo n o número de variáveis de entrada. Foram treinadas apenas redes com uma camada oculta.

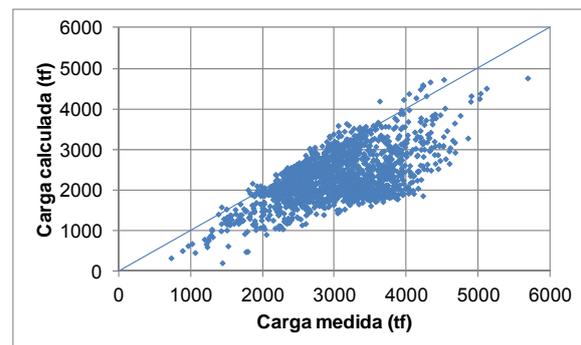
Nesse estudo, utilizou-se o algoritmo Back-Propagation para o ajuste dos pesos da rede. O algoritmo de otimização utilizado foi o Levenberg-Marquardt.⁽¹¹⁾ Como critério de parada do treinamento da rede, foi utilizada a técnica *early stopping* (critério de parada do treinamento por aumento do erro de validação). Para isso, todos os dados disponíveis para o treinamento foram divididos em três grupos: treinamento (60%), validação (20%) e teste (20%). Essa metodologia teve como finalidade permitir a obtenção de uma RNA com melhor capacidade de generalização.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta a comparação entre a carga medida e a carga calculada pelo modelo de Sims com fator geométrico original, usando para cálculo da resistência à deformação as equações de Misaka e Shida originais. Pode-se observar que o modelo original de Sims em geral subestima a carga de laminação. Durante a laminação de chapas grossas, a deformação acontece preferencialmente nas camadas externas do laminado, existindo uma considerável deformação por cisalhamento (efeito *peening*).⁽³⁾ Essa deformação por cisalhamento não é considerada no modelo de Sims e, por este motivo, a carga de laminação é subestimada pelo modelo.



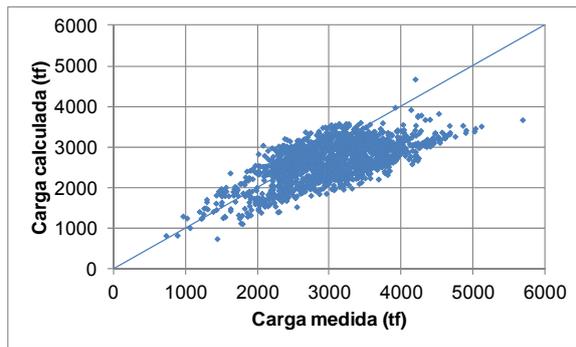
a) Equação original de Misaka.



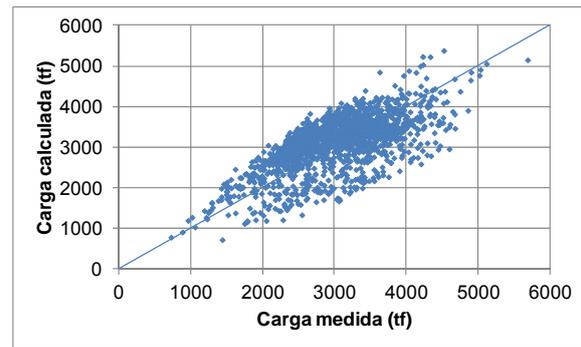
b) Equação original de Shida.

Figura 1. Comparação entre a carga medida e a carga calculada pelo modelo de Sims com fator geométrico original combinado às equações originais de Misaka e Shida para cálculo da resistência à deformação.

Para considerar o efeito *peening*, o fator geométrico original da equação de Sims, equação (2) foi modificado conforme equação (9). Na Figura 2 observa-se que houve um aumento geral nos valores de carga prevista utilizando tanto a equação de Misaka quanto a de Shida para resistência a deformação.



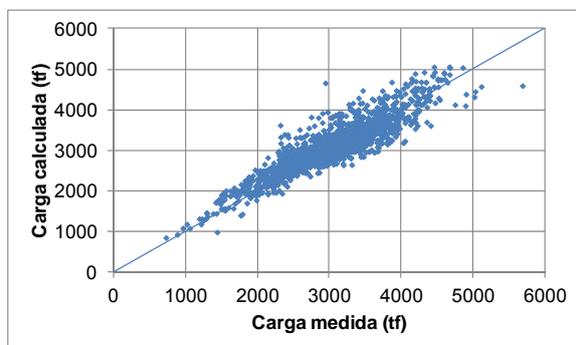
a) Equação original de Misaka.



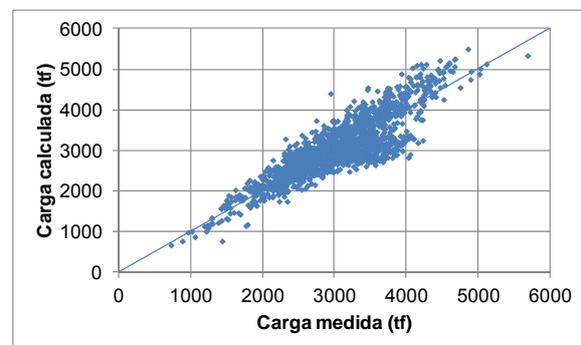
b) Equação original de Shida.

Figura 2. Comparação entre a carga medida e a carga calculada pelo modelo de Sims com ajuste do fator geométrico combinado às equações originais de Misaka e Shida para cálculo da resistência à deformação.

As modificações das equações de Misaka e Shida e a aplicação do modelo de Schultz foram realizadas separadamente para cada grupo de aço, obtendo-se um conjunto de constantes para cada grupo. No entanto, para facilitar a comparação dos modelos, as cargas de laminação foram determinadas para a massa total dos aços estudados, aplicando-se para cada placa o conjunto apropriado de constantes. A Figura 3 apresenta a comparação entre a carga medida e a calculada pelas equações modificadas de Misaka e Shida, utilizando o fator geométrico ajustado. Comparando-se as Figuras 2 e 3, observa-se uma grande melhora na previsão da carga usando as duas equações modificadas para a resistência à deformação. A equação de Misaka modificada apresentou resultados ligeiramente melhores que a equação de Shida modificada.



a) Equação modificada de Misaka.



b) Equação modificada de Shida.

Figura 3. Comparação entre a carga medida e a carga calculada pelo modelo de Sims com ajuste do fator geométrico combinado às equações modificadas de Misaka e Shida para cálculo da resistência à deformação.

O modelo de Schultz apresenta boa capacidade de previsão da carga, como mostrado na Figura 4a. Assim, este modelo se mostra bastante promissor, devido aos bons resultados apresentados e à facilidade de ajuste do modelo e utilização. As redes neurais foram construídas a partir de 17 variáveis de entrada, as quais são relacionadas à composição química, dimensões do laminado, deformação, taxa de deformação, temperatura e raio médio dos cilindros de trabalho. Assim, foram construídas redes contendo entre nove e 35 neurônios na camada oculta, sendo a rede com 32 neurônios a que apresentou melhor resultado.

O desempenho da rede neural é mostrado na figura 4b, onde percebe-se a excelente precisão do modelo. Para a laminação de tiras a quente, já foram obtidos resultados semelhantes para a previsão da carga a partir de redes neurais.⁽¹²⁾

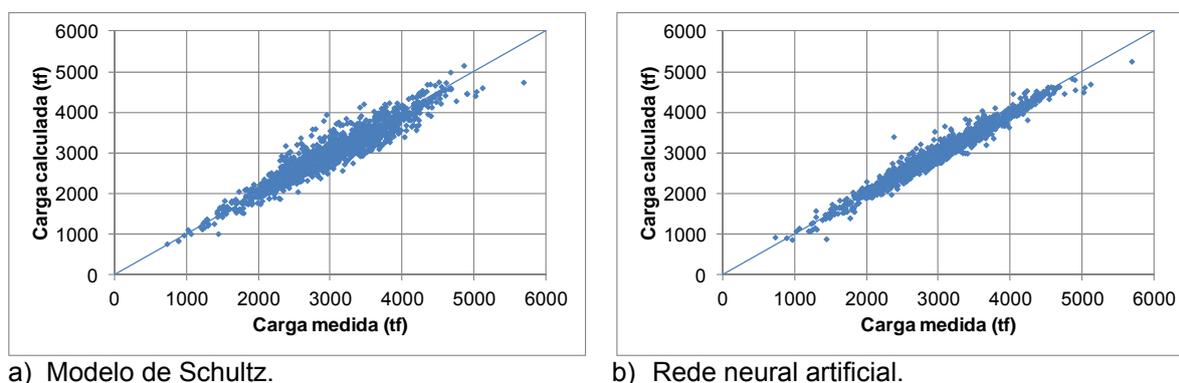


Figura 4. Comparação entre a carga medida e a carga calculada pelo modelo de Schultz e por rede neural artificial.

A Tabela 2 apresenta uma síntese do desempenho dos modelos estudados, avaliado a partir do coeficiente de determinação, erro médio absoluto e erro padrão da estimativa.

Tabela 2. Coeficiente de determinação, erro médio absoluto e erro padrão da estimativa para os modelos de carga avaliados

Modelo de carga	Fator geométrico	Equação de resistência à deformação	r^2	Erro médio absoluto (tf)	Erro padrão da estimativa (tf)
Sims	Original	Misaka original	0,37	1031	1158
		Shida original	0,35	729	909
	Ajustado	Misaka original	0,40	507	621
		Shida original	0,45	447	540
		Misaka modificada	0,82	229	297
		Shida modificada	0,76	281	356
Schultz	-	-	0,90	159	209
Rede neural	-	-	0,97	91	123

Os modelos totalmente empíricos, como o modelo de Schultz e a rede neural, apresentaram resultados bem superiores aos resultados dos modelos teóricos (modelo de Sims combinado às equações originais de Misaka e Shida) e parcialmente teóricos (modelo de Sims com fator geométrico ajustado combinado às equações modificadas de Misaka e Shida). No entanto, o uso dos modelos empíricos é seguro apenas para condições dentro das faixas avaliadas, não permitindo extrapolação. O modelo de Schultz, apesar de apresentar um desempenho inferior à rede neural, apresenta como principal vantagem sua facilidade de ajuste e utilização.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram avaliados os seguintes modelos e ajustes para previsão da carga de laminação de chapas grossas processadas por resfriamento acelerado: (1) ajuste do modelo de Sims a partir de modificações no fator geométrico; (2) modelo de Sims combinado com equação de Misaka modificada; (3) modelo de Sims combinado com a equação de Shida modificada; (4) modelo de Schultz para a carga de laminação; e (5) redes neurais artificiais.

As previsões de carga pelo modelo original de Sims foram subestimadas, pois o modelo não considera a deformação por cisalhamento que ocorre na superfície de laminados com espessura elevada. Quando o fator geométrico é modificado de forma a considerar o efeito *peening*, observa-se um aumento geral da carga calculada e uma consequente melhora nos resultados. As modificações das equações de resistência à deformação de Misaka e Shida melhoraram bastante a previsão da carga de laminação, mas os resultados ainda foram insatisfatórios. A equação modificada de Misaka apresentou resultados ligeiramente melhores.

Os melhores resultados foram obtidos pelos modelos totalmente empíricos, ou seja, pela rede neural ($r^2 = 0,97$ e $e_p = 123$ tf) e pelo modelo de Schultz ($r^2 = 0,90$ e $e_p = 209$ tf). A rede neural apresentou resultados superiores, mas o modelo de Schultz tem como principal vantagem a facilidade de ajuste das constantes e aplicação.

REFERÊNCIAS

- 1 GINZBURG, V. G. Steel Rolling Technology – Theory and Practice. New York: Marcel Dekker Inc., 1989.
- 2 SIMS, R. B. The Calculation of Roll Force and Torque in Hot Rolling Mills. **Proc. Inst. Mech. Eng.**, v. 168, p. 191-200, 1954.
- 3 SIMON, S.; MARKUS, B.; GERHARD, H.; ROLAND, H.; MARKUS, P. Geometric Fast Calculation of Roll Force in Plate Rolling. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STEEL ROLLING, 10, 2010, Beijing, China. The Chinese Society for Metals, 2010. p. 134-141.
- 4 MISAKA, Y.; YOSHIMOTO, T. Formularization of Mean Resistance to Deformation of Plain Carbon Steels at Elevated Temperature. **J. Jpn. Soc. Technol. Plast.**, v. 8, p. 414-422, 1967-8.
- 5 SHIDA, S. Effect of Carbon Content, Temperature and Strain Rate on Compressive Flow-Stress of Carbon Steels (Resistance to Deformation of Carbon Steels at Elevated Temperature, 1st Report). **J. Jpn. Soc. Technol. Plast.**, 9, p. 127-132, 1968.
- 6 SANTOS, A. A.; GIACOMIN, C. N. Mathematical Simulation of Plate Rolling at Usiminas: a Tool for Process Enhancement. In: CONFERENCIA DE LAMINACIÓN, 18, 2010, Rosario. IAS, 2010. p. 113-123.
- 7 SCHULTZ, R. G.; SMITH JR., A. W. Determination of a Mathematical Model for Rolling Mill Control. **Iron and Steel Engineer**, p. 127-133, 1965.
- 8 MOON, C. H.; PARK, H. D. Integrated On-Line Model for the Prediction of Roll Force and Temperature in Thick Plate Rolling. In: STEEL ROLLING 2006 – 9TH INTERNATIONAL & 4TH EUROPEAN CONFERENCES, 2006, Paris. ATS – Association Technique de la Siderurgie Française.
- 9 OUCHI, C.; OKITA, T.; ICHIHARA, T.; UENO, Y. Hot Deformation of Austenite during Controlled Rolling in a Plate Mill. **Transactions ISIJ**, v. 20, p. 833-841, 1980.
- 10 HAUCK, G. A. C.; NAKASHIMA, J. T.; PEREIRA, A. M. Previsão de Carga na Laminação de Aços Microligados. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO, 32, 1995, Curitiba. São Paulo: ABM, 1995. p. 305-314.



- 11 NORGAARD, M.; RAVN, O.; POULSEN, N. K.; HANSEN, L. K. Neural Networks for Modelling and Control of Dynamic Systems – Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. London: Springer-Verlag, 2000.
- 12 GORNI, A. A.; SILVA, M. R. S. Comparação entre os Modelos para Cálculo da Carga de Laminação de Tiras a Quente. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO – PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 48, 2011, Santos. São Paulo: ABM, 2011. p. 702-712.