

COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS PARA O CÁLCULO DE CARGA NA LAMINAÇÃO A QUENTE INDUSTRIAL

Antonio Augusto Gorni ¹
Marcos Roberto Soares da Silva ²

Resumo

É feita uma avaliação da precisão dos valores da carga na cadeira FI do trem acabador do laminador de tiras a quente, determinados pelos modelos de Orowan, Sims, Alexander-Ford, Orowan-Pascoe, Ekelund e Tselikov, em relação aos valores reais obtidos para aços ao carbono-manganês. Na abordagem determinística, sem ajuste dos valores calculados aos dados reais, verifica-se que os melhores níveis de precisão são obtidos pelos modelos de Orowan, Sims e Alexander-Ford, conforme já era previsto a partir das informações da literatura. Contudo, após se efetuar ajuste linear dos resultados dos modelos aos dados reais, os modelos de Tselikov e Ekelund mostram melhor ajuste à realidade industrial, fato que pode decorrer de erros mais significativos obtidos nos submodelos de temperatura, tribologia e resistência a quente do que nos modelos de carga. Já o cálculo da carga de laminação por redes neurais apresenta níveis máximos de precisão, tornando muito atraente a adoção desse recurso neste caso.

Palavras-chave: Laminação de tiras a quente; Cargas; Rede neural.

COMPARISON BETWEEN MODELS FOR CALCULATION OF INDUSTRIAL HOT ROLLING LOADS

Abstract

An evaluation is made about the precision of hot strip rolling mill loads at the FI stand calculated according to the theoretical models of Orowan, Sims, Alexander-Ford, Orowan-Pascoe, Ekelund and Tselikov in comparison to real values got for carbon-manganese steels. In the deterministic approach, without any fit of the calculated values to real data, Orowan, Sims and Alexander-Models show best levels of precision, as expected from the information got in the literature. However, in the semi-empirical approach, after a linear fit between calculated values and real data, Tselikov and Ekelund models show better adequacy to the industrial data, a fact that can be attributed to more significant errors occurring in the sub-models of temperature, tribology and hot strength than in the rolling load models. For its turn, neural network models show the best levels of precision which make very attractive the adoption of this approach.

Key words: Hot strip mill; Loads; Neural network.

I INTRODUÇÃO

A carga ou força de laminação é um parâmetro fundamental para se garantir a precisão dimensional de um produto plano e permitir o controle do processo de conformação. Seu cálculo prévio, em função das condições específicas do material e de processo, é fundamental para uma correta definição do *set-up* de um laminador. Por isso, todo sistema de automação usado em laminação adota um modelo matemático de carga que permite sua determinação precisa sem um excessivo esforço computacional.

No caso específico da laminação a quente há inúmeros algoritmos disponíveis para o cálculo da carga. Um dos mais complexos é o de Orowan,⁽¹⁾ que considera detalhadamente o equilíbrio de forças ao longo de todo o arco de contato. Outros autores simplificam seu desenvolvimento matemático para obter fórmulas específicas para o fator geométrico **Q** usado na equação simplificada da carga de laminação **P**, que já havia sido pioneiramente proposta por Ekelund⁽²⁾ em 1927 (Equação 1):

$$P = L \bar{\sigma}_d Q \quad (1)$$

¹Membro da ABM, Engenheiro de Materiais, M.Eng., Dr. Eng., Especialista em Laminação a Quente, Usiminas-Cubatão, Rod. Cônego Domênico Rangoni, s/n, Jardim das Indústrias, Cep 11573-900, Cubatão, SP, Brasil. E-mail: antonio.gorni@usiminas.com

²Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, M.B.A., C.Q.E., Gerente do Suporte Técnico da Laminação a Quente, Usiminas-Cubatão, Rod. Cônego Domênico Rangoni, s/n, Jardim das Indústrias, Cep 11573-900, Cubatão, SP, Brasil. E-mail: marcos.silva@usiminas.com

onde L é a largura do material, $\bar{\sigma}$ é sua resistência média à deformação e l_d é o comprimento do arco de contato. As equações de Q , que se revelam mais bem sucedidas para o caso da laminação a quente industrial, são as propostas por Sims⁽³⁾ e Ford e Alexander;⁽⁴⁾ já as deduzidas por Ekelund, Orowan-Pascoe e Tselikov apud Wusatowski⁽²⁾ não são tão bem avaliadas.

Os modelos de Sims, Alexander-Ford e Orowan-Pascoe consideram atrito por agarramento – ou seja, consideram condição de atrito máximo, onde as velocidades das superfícies do laminado e do cilindro de trabalho são idênticas ao longo de todo o arco de contato. Já os modelos de Ekelund e Tselikov assumem atrito por deslizamento, caso em que a superfície do laminado entra no arco de contato sob velocidade inferior à velocidade periférica do cilindro, acelerando a partir daí até assumir velocidade ligeiramente superior à do cilindro na saída do laminador. Esses modelos, ao contrário dos demais, possuem a vantagem de precisar do valor médio do coeficiente de atrito no arco de contato, que depende muito das condições específicas de cada processo.⁽²⁾ Já o modelo de Orowan permite a adoção de qualquer regime de atrito em cada ponto considerado ao longo do arco de contato, conforme for desejado.

Outro parâmetro fundamental para o cálculo da carga é a resistência à deformação a quente do material que está sendo laminado. Já foram publicadas inúmeras equações para o cálculo dessa grandeza no caso do aço, mas sua aplicabilidade é objeto de muita discussão, já que ela depende não só dos parâmetros de processo, como também da composição química do aço e dos processos de encruamento e restauração que ocorrem durante a conformação a quente⁽⁵⁾. Os modelos mais comuns para o cálculo da resistência à deformação a quente, no caso do aço, são os de Misaka e Shida, que determinam esse parâmetro em função do teor de carbono do material, bem como da temperatura, grau e velocidade de deformação, aplicados na conformação a quente. Este último modelo apresenta ainda a vantagem de considerar o efeito da transformação austenita → ferrita que ocorre sob temperaturas relativamente baixas, e reduz significativamente a resistência à deformação a quente.

O objetivo deste trabalho é avaliar as diversas abordagens para cálculo da carga no caso específico da laminação de tiras a quente de aços ao carbono-manganês para se identificar as alternativas mais adequadas a uma determinação mais precisa e rápida desse parâmetro.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho limita-se ao estudo da cadeira F1 do trem acabador do laminador de tiras a quente da usina de Cubatão da Usiminas. Essa restrição é adotada para que os valores de resistência à deformação a quente calculados pelas equações disponíveis na literatura fossem o

mais próximos possíveis da realidade. O esboço que entra na cadeira F1 pode ser considerado como estando plenamente recristalizado, em função da alta temperatura e grau de deformação do último passe nele aplicado pelo laminador esboçador e do tempo de espera relativamente longo até a aplicação do passe pela F1. Nas demais cadeiras do trem acabador, a resistência à deformação a quente real sofrerá algum tipo de influência decorrente dos efeitos conflitantes dos fenômenos de encruamento e restauração que ocorrem nos curtos intervalos de tempo entre os passes. Eles não são considerados pelas equações mais comuns usadas no cálculo desse parâmetro, o que certamente induziria erros no cálculo de carga. Um estudo similar sobre as demais cadeiras deverá ser feito no futuro.

Foram coletados dados de 2.000 esboços processados na cadeira F1, com teor de carbono variando entre 0,03% e 0,21% e o de manganês entre 0,13% e 0,58%. Os teores dos demais elementos foram mantidos em valores metalurgicamente irrelevantes. Essa restrição tem como objetivo garantir a validade das equações de resistência à deformação a quente adotadas neste trabalho. Os dados coletados de processo foram: teores de carbono e manganês do laminado; espessura inicial e final do passe; largura do laminado; temperatura do passe; velocidade e raio do cilindro de trabalho; carga aplicada no sistema de contra-flexão de cilindros de trabalho (*roll bending*), tensão no laminado entre as cadeiras F1 e F2 e a carga de laminação medida. O valor da carga aplicado pelo sistema de contra-flexão é deduzido da carga medida, já que ele não se origina do processo de laminação propriamente dito, obtendo-se assim os valores de carga reais usados na comparação com os calculados pelos diversos modelos.

Os modelos aqui adotados para o cálculo da carga de laminação na cadeira F1 são os de Orowan, Sims, Alexander-Ford, Orowan-Pascoe, Ekelund e Tselikov. A resistência a quente é calculada usando-se os modelos de Shida e Misaka originais, bem como uma versão de Misaka modificada por Siciliano Junior et al.⁽⁵⁾ onde se consideram os efeitos de uma eventual recristalização dinâmica durante o passe. Uma vez que há tensão no lado de saída da F1, mas não no lado de entrada, é deduzida metade da tensão aplicada entre as cadeiras F1 e F2 dos valores de resistência à deformação a quente calculados pelos modelos aqui adotados.⁽⁶⁾

O cálculo do modelo de Orowan é feito em duplicidade, considerando-se as duas principais condições de atrito: agarramento ou deslizamento. Contudo, neste último caso, constata-se na prática que, no caso específico da cadeira F1, é impossível assumir atrito por deslizamento ao longo de todo o arco de contato quando se usa o modelo de Orowan. Afinal, esse modelo impõe que se deve considerar condição local de atrito por agarramento caso a tensão de cisalhamento decorrente do atrito num ponto do arco de contato ultrapasse metade do valor da resistência à deformação a quente. Assim sendo, os cálculos relativos à cadeira F1 demonstram que o atrito

por deslizamento ocorre apenas nas regiões de entrada e saída do esboço, com o atrito por agarramento dominando a região central do arco de contato. Logo, é mais correto afirmar que o modelo de Orowan é calculado neste trabalho assumindo-se atrito por agarramento e atrito misto. Já os modelos de Sims, Alexander-Ford e Orowan-Pascoe assumem somente atrito por agarramento, enquanto que os de Ekelund e Tselikov só consideram atrito por deslizamento. Os valores do coeficiente de atrito por deslizamento são calculados empregando-se a equação de Geleji⁽²⁾ e também por uma fórmula específica para o equipamento aqui analisado.⁽⁷⁾

Como já é praxe na determinação da carga de laminação de produtos planos, calcula-se iterativamente o valor do raio achatado do cilindro de trabalho até se atingir convergência, usando-se a equação de Hitchcock.⁽²⁾

Dessa forma, foi analisado um total de trinta abordagens de cálculo. No caso do atrito por agarramento, empregam-se quatro modelos de carga de laminação combinados com três modelos de resistência de deformação a quente, totalizando doze abordagens. Nos casos de atrito por deslizamento ou misto, são três modelos de carga combinados com três modelos de resistência a quente mais dois modelos de coeficiente de atrito, totalizando dezoito abordagens.

Poliak et al.⁽⁸⁾ afirmam que é razoável admitir que um modelo industrial para cálculo da carga de laminação a quente apresente erros de até ± 10%, que são causados, principalmente, pelas heterogeneidades térmicas do esboço, particularmente pelas marcas de *skid* decorrentes do reaquecimento da placa. Elas falseiam o valor medido de temperatura do esboço. Entretanto, também não se devem descartar erros de medição de carga, nas dimensões do laminado e na composição química do aço, além da eventual inadequação da equação de resistência à deformação a quente usada e do próprio modelo de carga. Logo, a avaliação da precisão dos modelos para cálculo de carga é feita com base no valor do erro padrão da estimativa e da percentagem de casos onde são obtidos erros na carga calculada iguais ou inferiores a ± 10%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, é feita uma comparação direta entre os valores calculados e reais de carga, ou seja, adota-se uma abordagem determinística, sem se efetuar nenhuma adaptação nos valores calculados em função dos reais. Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela I, onde só é considerada a melhor combinação de modelo de resistência à deformação a quente e de coeficiente de atrito (quando fosse o caso) para cada modelo de carga. Como já seria de se esperar, a partir das informações da literatura,^(2,6) os modelos de Orowan, Sims e Alexander-Ford apresentam melhor desempenho, diferindo muito pouco entre si. Os demais modelos – Ekelund, Orowan-Pascoe

e Tselikov – apresentam níveis de precisão bem piores, particularmente este último. O modelo de Orowan considerando atrito misto apresenta resultado ligeiramente melhor do que sua versão que considera atrito de agarramento, confirmando a constatação feita em outro trabalho.⁽⁹⁾

O melhor modelo para cálculo de resistência a quente nesta abordagem é, sem dúvida, o de Misaka modificado por Siciliano (designado na Tabela I como Misaka com RexDin), onde se consideram os possíveis efeitos da recristalização dinâmica. Por sua vez, como já era de se esperar, o emprego da fórmula para cálculo do coeficiente de atrito por deslizamento, determinada especificamente para este Laminador de Tiras a Quente,⁽⁷⁾ produz resultados de carga mais precisos do que quando se usa a equação de Geleji.

Do ponto de vista prático, a avaliação determinística dos modelos para cálculo de carga é rigorosa demais por não considerar as inevitáveis condições específicas da instalação industrial onde eles estão sendo aplicados. Logo, é prática usual que seja feito algum tipo de calibração entre os resultados reais e calculados, obtendo-se dessa forma um modelo semi-empírico – por exemplo, uma regressão linear entre eles.⁽⁸⁾ Dessa forma, o valor calibrado da carga P'_c , calculada pelo modelo semi-empírico, é definido como (Equação 2):

$$P'_c = a_c + b_c P_c \tag{2}$$

onde P_c é o valor de carga calculada pelo modelo teórico e a_c e b_c são os coeficientes obtidos pela regressão linear entre os valores reais e calculados de carga de laminação. Note-se que os valores de carga calculados pelos modelos teóricos aproximam-se mais dos reais quando o valor de a_c tende a zero e o de b_c tende à unidade. Esse proce-

Tabela I. Comparação entre os resultados obtidos para os melhores modelos determinísticos de carga de laminação a quente adotados neste trabalho, expressos em termos do erro padrão da estimativa (EPE) e da fração de casos com erro absoluto inferior ou igual a 10% ($f_{\text{erro} \leq 10\%}$)

Modelo de carga	Resistência a quente	Modelo de atrito	EPE [t]	$f_{\text{Erro} \leq 10\%}$ [%]
Orowan/Misto	Misaka com RexDin	Próprio	104	88
Orowan/Agar	Misaka com RexDin	-	118	83
Sims	Misaka com RexDin	-	125	81
Alexander-Ford	Misaka com RexDin	-	126	80
Ekelund	Misaka com RexDin	Próprio	245	21
Orowan-Pascoe	Misaka com RexDin	-	453	18
Tselikov	Misaka com RexDin	Próprio	631	0

dimento sempre melhora a precisão do valor calculado, ainda que geralmente não permita identificar diretamente qual tipo de erro está sendo eliminado dessa forma.

Como se pode observar a partir da Tabela 2, a aplicação da calibração linear modifica de forma dramática o *ranking* em termos de precisão do modelo de cálculo de carga de laminação. Os modelos de Tselikov e Ekelund, que tinham apresentado o pior desempenho na abordagem determinística, passam agora a ser os mais precisos, com mais de 95% dos casos apresentando erro inferior a 10% e erros padrão da estimativa iguais a 70 t e 75 t, respectivamente. A seguir, seguem-se os modelos de Orowan, Alexander-Ford, Sims e, mais distanciado, o de Orowan-Pascoe, todos com menos de 95% dos casos apresentando erro de carga inferior a $\pm 10\%$. Vale notar que, nesta oportunidade, os três melhores modelos de carga adotam atrito por deslizamento ou misto.

O melhor modelo de resistência à deformação a quente passa a variar em função do modelo de carga em questão. O modelo de Misaka modificado por Siciliano, que havia sido sempre o melhor na abordagem determinística, é mantido apenas no modelo de Tselikov; o modelo original de Misaka é o melhor quando associado ao modelo de carga de Ekelund e o de Shida é o melhor quando aplicado aos demais modelos de carga. Também aqui o modelo próprio para cálculo do coeficiente de atrito apresenta melhores resultados do que a fórmula de Geleji.

A inversão do *ranking* de modelos decorrente da adoção da calibração linear com os dados reais é, em princípio, surpreendente, uma vez que modelos de carga obsoletos (Ekelund) e pouco citados (Tselikov) apresentam níveis de precisão bem melhores do que modelos complexos (Orowan) ou consagrados (Sims e Alexander-Ford). Contudo, Sellars⁽¹⁰⁾ já havia comentado que não é raro que as acentuadas incertezas associadas à determinação quantitativa real do perfil de temperatura do laminado, das condições tribológicas no arco de contato e da resistência à deformação a quente do material gerem erros muito maiores do que os associados às imperfeições da modelagem matemática da carga. Dessa forma, sob condições práticas, a melhor abordagem matemática para o cálculo da carga pode não necessariamente ser a mais precisa, mas sim aquela cujos erros sistemáticos anulem as imprecisões associadas às hipóteses e modelos assumidos

para a determinação da temperatura, parâmetros tribológicos no arco de contato e resistência à deformação a quente. Outro ponto a ser considerado é o fato de só ter sido considerada, neste trabalho, a cadeira FI do Trem Acabador, cujas condições de processo são relativamente limitadas e que, eventualmente, podem ser mais favoráveis aos modelos de Tselikov e Ekelund.

De toda forma, esse tipo de ocorrência já foi explicado pela estatística aplicada. De acordo com o critério proposto por Flavelle,⁽¹¹⁾ pode-se afirmar que, neste caso, o modelo de Orowan apresenta alta exatidão (melhor nível de acerto em relação aos dados reais sem o uso de calibração), mas baixa precisão (dispersão relativamente alta entre os resultados calculados). Por sua vez, o modelo de Tselikov apresenta baixa exatidão (pior nível de acerto em relação aos dados reais sem o uso de calibração), mas alta precisão (dispersão relativamente pequena entre os resultados calculados). Uma vez que a calibração linear logra reduzir sensivelmente os erros associados ao modelo de Tselikov, sua maior precisão garante-lhe melhor desempenho em relação aos demais. Isto pode ser observado graficamente na Figura 1.

Outra possibilidade para se calibrar os modelos para cálculo de carga de laminação a quente está no uso da chamada caixa cinza (*grey box*). Neste caso, a calibração do valor de carga calculado pelo modelo teórico é feita subtraindo-se o erro associado a ele, que é determinado por uma rede neural previamente treinada. A idéia por trás dessa abordagem híbrida consiste em efetuar o cálculo da carga de laminação por um modelo com embasamento teórico (caixa branca) e corrigi-lo com a rede neural (caixa preta), um recurso matemático com alta capacidade de aprendizado sobre relações de causa-e-efeito, mas que não permite entender plenamente os fundamentos por trás dos cálculos dos valores modelados.⁽¹²⁾

O erro no cálculo de carga (ΔP) para cada modelo de carga adotado é modelado por meio de rede neural com três camadas, desenvolvida usando-se o programa computacional *Statistica*. A camada de entrada constitui-se de oito neurônios: teores de carbono e manganês do aço, espessuras de entrada e saída do esboço, velocidade e raio dos cilindros de trabalho, temperatura do esboço e tensão entre as cadeiras FI e F2. O número de neurônios da camada oculta e as funções de ativação dos neurônios são

Tabela 2. Comparação entre os resultados obtidos para os melhores modelos semi-empíricos de carga de laminação a quente adotados neste trabalho

Modelo de carga	Resistência a quente	Modelo de atrito	EPE [t]	$f_{\text{Erro} \leq 10\%}$ [%]	a_c	b_c
Tselikov	Misaka com RexDin	Próprio	70	97	-92	0,76
Ekelund	Misaka	Próprio	75	96	-180	0,97
Orowan/Misto	Shida	Próprio	90	92	112	0,84
Orowan/Agar.	Shida	-	97	89	210	0,78
Alexander-Ford	Shida	-	103	88	271	0,74
Sims	Shida	-	106	86	296	0,74
Orowan-Pascoe	Shida	-	133	77	557	0,48

selecionados automaticamente pelo programa, de forma a se obter o melhor modelo possível. A camada de saída possui um único neurônio, ou seja, o erro associado ao cálculo da carga ΔP . A massa global de dados para cada abordagem de cálculo de carga é subdividida da seguinte forma: 70% para treinamento, 15% para teste e 15% para aferição. Adota-se a rede neural treinada que apresenta erro mínimo quando exposta ao conjunto de dados para aferição.

Verifica-se que as caixas-cinza obtidas apresentam erro padrão da estimativa para a carga de laminação variando entre 44 e 48 t, independentemente da combinação de modelos (caixa branca) de carga-resistência à deformação a quente-coeficiente de atrito adotada. Um exemplo pode ser visto na Figura 2a. A flutuação na precisão obtida das caixas-cinza é aleatória e decorrente do caráter iterativo do aprendizado da rede neural (caixa preta). Note-se que esse nível de precisão é bem melhor

que os 97 t do melhor modelo obtido anteriormente, ou seja, o de Tselikov com calibração linear. Além disso, virtualmente 100% dos resultados calculados de carga de laminação passam a apresentar erros inferiores a $\pm 10\%$. Isso indica que a rede neural é muito superior à regressão estatística para captar as reais condições do processo de laminação a quente que influenciam o cálculo da carga e, a partir delas, corrigir mais eficientemente os valores de carga determinados pelos modelos teóricos.

O fato de todas as caixas-cinza apresentarem níveis semelhantes de precisão, independentemente da abordagem teórica adotada para o cálculo preliminar da carga, parece ter indicado que o cálculo pelo modelo teórico é supérfluo nesse caso. Isso motivou a realização de um teste empregando-se exclusivamente uma rede neural para se efetuar o cálculo da carga de laminação, sem a aplicação de nenhum modelo teórico – ou seja, uma abordagem totalmente empírica. A rede neural usada neste

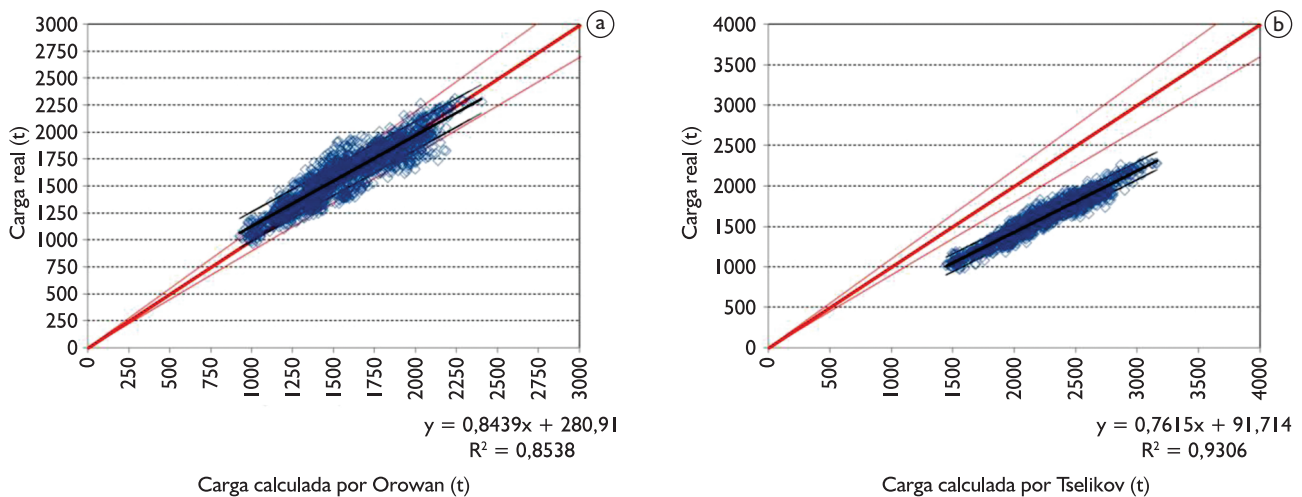


Figura 1. Comparação gráfica entre a exatidão e a precisão dos modelos para cálculo de carga de a) Orowan (com atrito misto); e b) Tselikov. As linhas mais finas que partem da origem do gráfico delimitam a faixa de erro admissível para a carga calculada, ou seja, $\pm 10\%$ da carga medida. As linhas mais finas paralelas à reta de regressão mostram os intervalos de 95% de confiança associados às regressões lineares entre os valores reais e calculados.

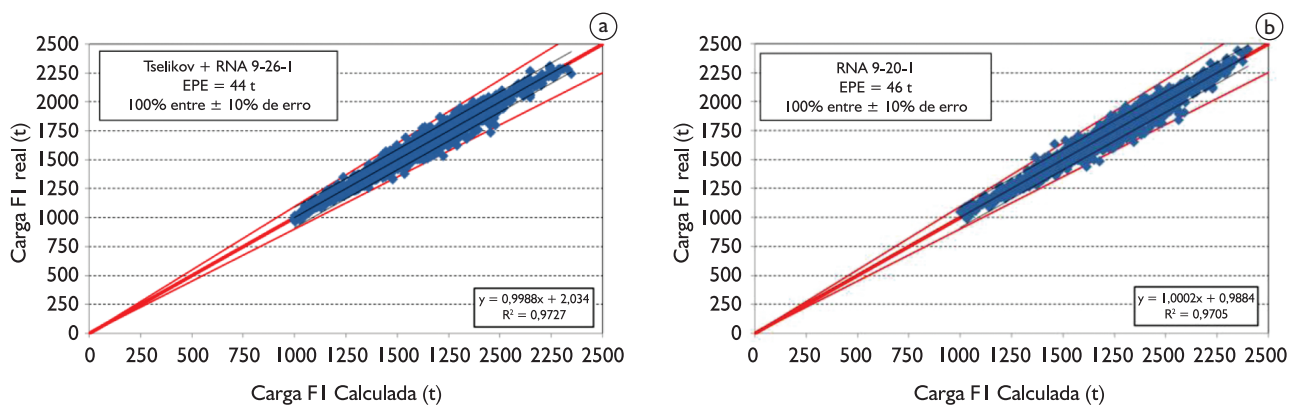


Figura 2. Comparação gráfica entre a precisão de cálculo da carga de laminação para a cadeira FI por: a) caixa-cinza (modelo de Tselikov corrigido por rede neural); e b) exclusivamente por rede neural.

caso tinha camada de entrada similar à do caso anterior. A camada de saída tinha um único neurônio, ou seja, a carga de laminação. O procedimento adotado para configuração da arquitetura e treinamento da rede neural é idêntico ao descrito no item anterior.

Os níveis de precisão conseguidos para o cálculo de carga de laminação, usando exclusivamente rede neural, são absolutamente idênticos aos obtidos para as caixas-cinza. Comprova-se, assim, a inutilidade do cálculo de carga por modelo teórico que era feito na abordagem anterior. Esse resultado não chega a surpreender, considerando-se que um trabalho anterior para o mesmo equipamento já tinha demonstrado a eficácia do uso da rede neural para a modelagem direta da carga de laminação.⁽¹³⁾

Por outro lado, a falta de uma explicação clara sobre como uma rede neural treinada gera os valores modelados deixa intranquilos os especialistas em laminação, fato que ainda restringe seu uso sob condições práticas. Afinal, erros no cálculo da carga geram enormes transtornos operacionais. Por outro lado, os resultados deste trabalho, e de inúmeros outros,⁽¹⁴⁾ demonstram o enorme potencial da rede neural na modelagem matemática da laminação a quente. Uma solução para esse impasse pode estar na massiva obtenção de dados de processo em longo prazo, além de seu tratamento pelo emprego de ferramentas estatísticas avançadas, tais como *data mining* e planejamento de experimentos. Dessa forma, os dados usados no treinamento da rede neural contemplarão, com nível similar de ponderação, todos os casos possíveis e imagináveis aos quais ela estará exposta no ambiente industrial. A análise criteriosa, em longo prazo, de dados de processo coletados extensivamente, associada ao dimensionamento e treinamento adequados, com certeza minimizarão significativamente os riscos de a rede neural final chegar a resultados absurdos.

4 CONCLUSÕES

É feita neste trabalho uma comparação entre várias abordagens para a modelagem matemática da carga de laminação de aços carbono-manganês na cadeia FI do trem acabador de um laminador de tiras a quente.

REFERÊNCIAS

- 1 OROWAN, E. The calculation of roll pressure in hot and cold rolling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, v. 150, n. 4, p. 140-67, 1943.
- 2 WUSATOWSKI, Z. *Fundamentals of rolling*. Oxford: Pergamon, 1969.
- 3 SIMS, R. B. The calculation of roll force and torque in hot rolling mills. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, v. 168, n. 1, p. 191-214, June 1954.

Ao se adotar a abordagem determinística – ou seja, sem qualquer ajuste com os dados reais – constata-se que os modelos mais precisos são os mesmos citados na literatura – Orowan, Sims e Alexander-Ford. O modelo de Orowan considerando atrito misto apresenta o melhor resultado, com erro padrão da estimativa igual a 104 t, o que sugere que o efeito do atrito de deslizamento é significativo já para a primeira cadeira do Trem Acabador.

A busca da melhoria da precisão dos modelos pela abordagem semi-empírica leva a resultados inesperados quando se corrigem os resultados calculados por meio de correlação linear com os dados reais. Há inversão na classificação dos modelos, que passa a ser liderada pelos propostos por Tselikov e Ekelund, com erros padrão da estimativa de 70 t e 75 t, respectivamente, seguindo-se então os de Orowan, Alexander-Ford e Sims. Essa alteração pode ser decorrência do efeito da modelagem de parâmetros de processo com precisão ainda inadequada para as condições industriais, tais como temperatura, condições tribológicas no arco de contato e resistência à deformação a quente, que induzem a erros de magnitude superior em relação aos resultantes dos modelos teóricos de carga.

Já a calibração dos modelos usando-se redes neurais para cálculo dos erros residuais, por meio da chamada técnica de caixa-cinza, apresenta níveis de precisão independentes do modelo teórico escolhido para cálculo de carga; o erro padrão da estimativa oscila sempre entre 44 t e 48 t, variando aleatoriamente à medida que se repete a fase de treinamento para uma mesma rede neural ou entre uma rede neural e outra. O mesmo resultado é obtido quando se parte para uma abordagem totalmente empírica, ou seja, modelagem da carga de laminação usando-se exclusivamente a rede neural. Uma análise da literatura mostra que esses resultados favoráveis não chegam a ser novidade.

Por outro lado, redes neurais ainda não são amplamente usadas no ambiente da laminação industrial em função da falta de confiança que decorre do entendimento insuficiente sobre a forma como seus resultados são obtidos. Afinal, em última análise, elas são polinômios empíricos altamente complexos. Esse problema pode ser minimizado, ou mesmo eliminado, desde que as redes neurais sejam treinadas a partir de massas de dados de grande porte que tenham sido previamente depuradas usando-se ferramentas estatísticas sofisticadas, de forma a garantir sua qualidade e representatividade.

- 4 FORD, H.; ALEXANDER, J. M. Simplified hot-rolling calculations. *Journal of the Institute of Metals*, v. 92, p. 397-404, Aug. 1964.
- 5 SICILIANO JUNIOR, F. et al. Mathematical modeling of the mean flow stress, fractional softening and grain size during the hot strip rolling of C-Mn steels. *ISIJ International*, v. 26, n. 12, p. 1500-606, Dec. 1996.
- 6 GORNI A. A. Cálculos de laminação. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. Laminação de produtos planos. São Paulo, 2005.p. 97-182. (apostila)
- 7 GORNI, A. A.; SILVA, M. R. S. Characterization of the Friction conditions in the finishing stands of a hot strip mill. In: INTERNATIONAL BRAZILIAN CONFERENCE ON TRIBOLOGY – TRIBO-BR 2010, Rio de Janeiro. *Proceedings...* São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2010. p. 680-9.
- 8 POLIAK, E. I. et al. Application of linear regression analysis in accuracy assessment of rolling force calculations. *Metals and Materials*, v. 4, n. 5, p. 1047-56, 1998. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03025975>
- 9 LI, Y. et al. Roll force model for online application in hot strip rolling with varying friction conditions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STEEL ROLLING, 9., 2006, Paris. *Proceedings...* Paris: Association Technique de la Siderurgie Française, 2006.
- 10 SELLARS, C. M. Modelling: an interdisciplinary activity. In: MATHEMATICAL MODELLING OF HOT ROLLING OF STEEL, 1990, Hamilton, Canadá. *Proceedings...* Hamilton: Canadian Institute of Mining and Metallurgy, 1990. p. 1-18.
- 11 FLAVELLE, P. A Quantitative measure of model validation and its potential use for regulatory purposes. *Advances in Water Resources*, v. 15, n. 1, p. 5-13, 1992. [http://dx.doi.org/10.1016/0309-1708\(92\)90028-Z](http://dx.doi.org/10.1016/0309-1708(92)90028-Z)
- 12 JONES, D. M. et al. Comparison of black-, white-, and grey-box models to predict ultimate ts of high strength hot rolled coils at Port Talbot hot strip mill. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, v. 221, n. 1, p. 1-9, Jan. 2007.
- 13 VALLIM, P. S. S. *Aplicação de rede neural para o cálculo da tensão de escoamento e da força específica na laminação de tiras a quente de aços C-Mn*. 2008. 194 p. Monografia (Aperfeiçoamento/Especialização em MBA em Siderurgia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- 14 GORNI, A. A. Modelamento matemático da laminação: de ficção científica a ferramenta para a capacitação industrial. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 60., 2005, Belo Horizonte. *Anais...* São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. p. 3894-903.

Recebido em: 16/03/2012

Aprovado em: 02/05/2012