

COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS PARA CÁLCULO DA CARGA DA LAMINAÇÃO DE TIRAS A QUENTE¹

Antonio Augusto Gorni²
Marcos Roberto Soares da Silva³

RESUMO

Foi feita uma comparação entre a precisão nos valores da carga na cadeira F1 do trem acabador do laminador de tiras a quente determinados pelos modelos de Orowan, Sims, Alexander-Ford, Orowan-Pascoe, Ekelund e Tselikov para aços ao carbono-manganês. Na abordagem determinística, sem ajuste aos dados reais, verificou-se que os melhores níveis de precisão foram obtidos por Orowan, Sims e Alexander-Ford, conforme já era previsto a partir das informações da literatura. Contudo, após se efetuar ajuste linear dos modelos aos dados reais, os modelos de Tselikov e Ekelund mostraram melhor ajuste à realidade industrial, fato que pode decorrer de erros mais significativos nos submodelos de temperatura, tribologia e resistência a quente. Já o modelamento da carga de laminação por redes neurais apresentou níveis máximos de precisão, tornando muito atraente a adoção desse recurso neste caso.

Palavras-Chave: Laminação de Tiras a Quente, Carga, Redes Neurais

COMPARISON BETWEEN MODELS FOR CALCULATION OF HOT STRIP ROLLING MILL LOADS

ABSTRACT

A comparison was made between the precision of hot strip rolling mill loads at the F1 stand calculated according to the theoretical models of Orowan, Sims, Alexander-Ford, Orowan-Pascoe, Ekelund and Tselikov for carbon-manganese steels. In the deterministic approach, without any fit to real data, the Orowan, Sims and Alexander-Models showed best levels of precision, as expected from literature. However, in the semi-empirical approach, after a linear fit between calculated and real data, the Tselikov and Ekelund models showed 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. For its turn, neural network models showed the best levels of precision which make very attractive the adoption of this approach.

Keywords: Hot Strip mill, Load, Neural Networks

¹ Trabalho a ser apresentado no 48º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, Santos SP, 24 a 27 de Outubro de 2011.

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, Brazil. E-Mail: Marcos.Silva@usiminas.com

1. 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 condição 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 permita 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 Orowan¹, o qual considera detalhadamente o equilíbrio de forças ao longo de todo o arco de contato. Outros autores simplificaram seu formidável desenvolvimento matemático para obter fórmulas específicas para o fator geométrico Q usado na equação simplificada da carga de laminação P , a qual já havia sido pioneiramente proposta por Ekelund² em 1927:

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

onde L é a largura do material, $\bar{\sigma}$ é a resistência média à deformação e l_d é o comprimento do arco de contato. As equações de Q que se revelaram mais bem sucedidas para o caso da laminação a quente industrial foram as propostas por Sims³ e Alexander-Ford⁴; já as deduzidas por Ekelund², Orowan-Pascoe² e Tselikov² não foram tão bem avaliadas.

Os modelos de Sims, Alexander-Ford e Orowan-Pascoe assumem atrito por agarramento – ou seja, eles 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. Estes modelos, ao contrário dos demais, possuem a desvantagem de precisar do valor médio do coeficiente de atrito no arco de contato, o qual depende muito das condições específicas de cada processo². 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 muitas 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 quente⁵. Os modelos mais comuns para o cálculo da resistência à deformação a quente no caso do aço são os de Misaka e Shida, os quais 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, a qual reduz significativamente a resistência à deformação a quente.

O objetivo deste trabalho foi 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 para uma determinação mais precisa e rápida desse parâmetro.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este trabalho se limitou ao estudo da cadeira F1 do trem acabador do laminador de tiras a quente da usina de Cubatão da Usiminas. Essa restrição foi 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 processado na F1 pode ser considerado como estando plenamente recristalizado, em função da alta temperatura 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 entre encruamento e fenômenos de restauração que ocorrem nos curtos intervalos de tempo entre os passes, os quais não são considerados pelas equações mais comuns usadas no cálculo desse parâmetro, o que certamente induziria erros no cálculo de carga. Um estudo sobre as demais cadeiras deverá ser feito no futuro.

Foram coletados dados de 2.000 esboços processados na cadeira F1, com teor de C entre 0,03 e 0,21% e Mn entre 0,13 e 0,58%. Os teores dos demais elementos foram mantidos em valores metalurgicamente irrelevantes. Essa restrição teve como objetivo garantir a validade das equações de resistência à deformação a quente adotadas neste trabalho. Os dados de processo coletados 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 foi deduzido da carga medida, já que ele não se origina do processo de laminação propriamente dito, obtendo-se assim os valores de carga reais que foram usados na comparação com os calculados pelos diversos modelos.

Os modelos aqui adotados para o cálculo da carga de laminação na cadeira F1 foram os de Orowan, Sims, Alexander-Ford, Orowan-Pascoe, Ekelund e Tselikov. A resistência a quente foi calculada usando-se os modelos de Shida e Misaka originais, bem como uma versão de Misaka modificada por Siciliano e outros⁶, onde se considera 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, foi deduzida metade da tensão aplicada entre as cadeiras F1 e F2 dos valores de resistência à deformação a quente calculados pelos modelos aqui adotados⁵.

Foi inicialmente proposto o cálculo do modelo de Orowan assumindo-se atrito tanto por agarramento como por deslizamento. Contudo, neste último caso, foi

constatado 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 assumir condição local de atrito de agarramento caso a tensão de cisalhamento decorrente do atrito num ponto do arco de contato ultrapasse a metade do valor da resistência à deformação a quente. Assim sendo, os cálculos relativos à cadeira F1 demonstraram 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 foi 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 Ekelund e Tselikov só consideram atrito por deslizamento. Os valores do coeficiente de atrito por deslizamento foram calculados conforme a equação de Geleji² e também uma fórmula específica para o equipamento aqui analisado⁷.

Como já se tornou praxe na determinação da carga de laminação de produtos planos, calculou-se iterativamente o valor do raio achatado pelo raio de cilindro até se atingir convergência, usando-se a equação de Hitchcock².

Dessa forma foi analisado um total de trinta abordagens de cálculo. No caso do atrito por agarramento, 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, três modelos de carga combinados com três modelos de resistência a quente combinados com dois modelos de coeficiente de atrito, totalizando dezoito abordagens.

Poliak⁸ afirmou que é razoável admitir que um modelo industrial para cálculo da carga de laminação a quente apresente erros de até $\pm 10\%$, os quais são causados principalmente pelas heterogeneidades térmicas do esboço (particularmente pelas marcas de *skid* decorrentes do reaquecimento da placa), as quais falseiam o valor medido de temperatura do esboço. Mas também não se deve descartar erros de medição de carga, dimensões e composição química do aço, além da eventual inadequação da equação de resistência à deformação a quente usada. Logo, a avaliação da precisão dos modelos para cálculo de carga foi feita com base no valor do erro padrão da estimativa e da percentagem de casos onde foram obtidos erros na carga calculada iguais ou inferiores a $\pm 10\%$.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Abordagem Determinística

Inicialmente foi feita uma comparação direta entre os valores calculados e reais de carga, ou seja, adotou-se uma abordagem determinística, sem se efetuar nenhuma adaptação nos valores calculados em função dos reais. Os resultados obtidos estão mostrados na tabela 1, onde só foi 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^{2,5}, os modelos de Orowan, Sims e Alexander-Ford apresentaram melhor desempenho, diferindo muito pouco entre si. Os demais modelos –

Ekelund, Orowan-Pascoe e Tselikov – apresentaram níveis de precisão bem piores, particularmente este último. O modelo de Orowan considerando atrito misto apresentou resultado ligeiramente melhor do que sua versão que considera atrito de agarramento, confirmando a constatação feita em outro trabalho⁹.

Tabela 1: Comparação entre os resultados obtidos para os melhores modelos determinísticos de carga de laminação a quente obtidos neste trabalho. , expressos em termos do erro padrão da estimativa (EPE) e da fração de casos com erro absoluto inferior ou igual a 10%.

Modelo de Carga	Resistência a Quente	Modelo de Atrito	EPE [t]	f_{Erro ≤ 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

O melhor modelo para cálculo de resistência a quente nesta abordagem foi, sem dúvida, o de Misaka modificado por Siciliano. Por sua vez, como já era se esperar, a fórmula para cálculo do coeficiente de atrito por deslizamento que havia sido determinada especificamente para este Laminador de Tiras a Quente⁷ produziu resultados de carga mais precisos do que a equação de Geleji.

3.2. Abordagem Semi-Empírica: Calibração Linear

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 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 – como, por exemplo, uma regressão linear entre eles⁸. Dessa forma, o valor calibrado da carga P_c' calculada pelo modelo semi-empírico é definida como

$$P_c' = a_c + b_c P_c \quad (2)$$

onde P_c é o valor de carga calculado pelo modelo teórico e a_c e b_c são os coeficientes obtidos pela regressão linear entre os valores calculados e reais de carga de laminação. Note-se que os valores de carga calculados pelos modelos teóricos se aproximam mais dos reais quando o valor de a_c tende a zero e o de b_c tende à unidade. Esse procedimento 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 modificou 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 entre os modelos determinísticos, passaram agora a ser os modelos mais precisos, com mais de 95% dos casos apresentando erro inferior a 10% e erros padrão da estimativa iguais a 70 e 75 t, respectivamente. A seguir vieram os modelos de Orowan, Alexander-Ford e 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.

Tabela 2: Comparação entre os resultados obtidos para os melhores modelos semi-empíricos de carga de laminação a quente obtidos 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

O melhor modelo de resistência à deformação a quente passou a variar com o modelo de carga em questão. O modelo de Misaka modificado por Siciliano, que havia sido sempre o melhor entre os modelos determinísticos, foi mantido apenas no modelo de Tselikov; o modelo de Misaka foi o melhor quando associado ao modelo de carga de Ekelund e o de Shida foi o melhor quando aplicado aos demais modelos de carga. Também aqui o modelo próprio para cálculo do coeficiente de atrito apresentou melhores resultados do que a fórmula de Geleji.

A inversão de modelos decorrente da adoção da calibração linear com os dados reais é a princípio surpreendente, uma vez que modelos de carga antiquados (Ekelund) e pouco citados (Tselikov) apresentaram níveis de precisão bem melhores do que modelos complexos (Orowan) ou consagrados (Sims e Alexander-Ford). Contudo, Sellars¹⁰ já havia comentado que não é raro que as acentuadas incertezas associadas à determinação quantitativa real do perfil de temperatura, das condições tribológicas no arco de contato e da resistência à deformação a quente gerem erros muito maiores do que os associados às imperfeições do modelamento matemático. Dessa forma, sob condições práticas, a melhor abordagem matemática pode não necessariamente ser a mais precisa, mas sim aquela cujos erros sistemáticos anulam os erros associados às hipóteses e modelos assumidos para a determinação da temperatura, tribologia 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 ca-

deira F1 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 não é raro do ponto de vista da estatística aplicada. De acordo com o critério proposto por Flavelle¹¹, pode-se afirmar que neste caso o modelo de Orowan apresentou 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 apresentou 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 logrou reduzir sensivelmente os erros associados ao modelo de Tselikov, sua maior precisão lhe garantiu melhor desempenho em relação aos demais. Isto pode ser observado graficamente na figura 1.

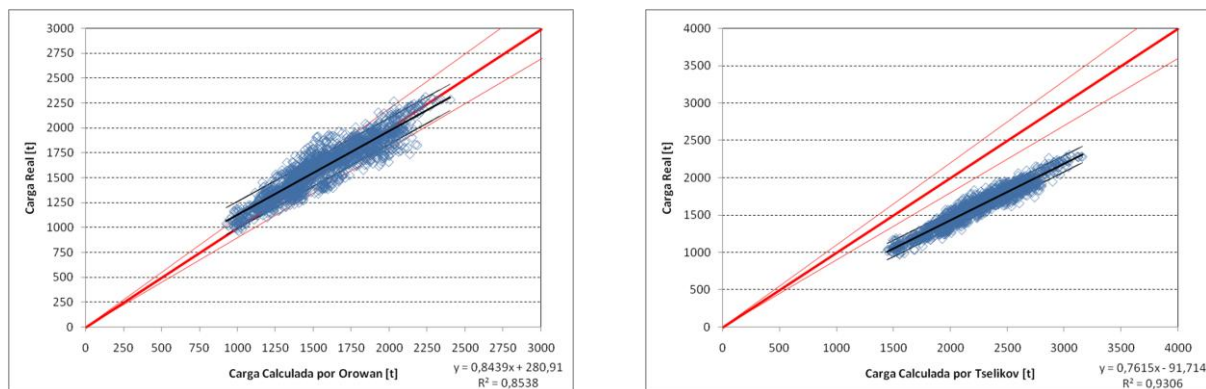


Figura 1: Comparação gráfica entre a exatidão e a precisão dos modelos para cálculo de carga de Orowan (com atrito misto) e Tselikov. As linhas vermelhas mais finas delimitam a faixa de erro admissível para a carga calculada, ou seja, $\pm 10\%$ da carga medida. As linhas negras mais finas mostram o intervalo de 95% de confiança associado à regressão linear entre os valores reais e calculados.

3.3. Abordagem Semi-Empírica: Calibração via Redes Neurais

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, o qual é determinado por uma rede neural previamente treinada. A idéia por trás desta abordagem híbrida consiste em efetuar o cálculo da carga de laminação por um modelo com embasamento teórico (caixa branca) e corrigí-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 modelados¹².

O erro no cálculo de carga (ΔP) para cada modelo de carga adotado foi modelado através de rede neural com três camadas, a qual foi desenvolvida usando-se o programa computacional *Statistica*. A camada de entrada era constituída de 8 neu-

rônios, a saber: teores de C e Mn do aço, espessuras de entrada e saída do esboço, velocidade e raio dos cilindros de trabalho, temperatura do esboço e tensão entre as cadeiras F1 e F2. O número de neurônios da camada oculta e as funções de ativação dos neurônios foram selecionados automaticamente pelo programa, de forma a se obter o melhor modelo possível para o cálculo dos erros. A camada de saída tinha um único neurônio, ou seja, o erro associado ao cálculo da carga. A massa global de dados para cada abordagem de cálculo de carga foi subdividida da seguinte forma: 70% para treinamento, 15% para teste e 15% para aferição. Foi adotada a rede neural treinada que apresentou erro mínimo quando exposta ao conjunto de dados para aferição.

Foi verificado que as caixas-cinza obtidas apresentaram erro padrão da estimativa para a carga de laminação variando entre 44 e 48 t, independentemente da combinação de modelos de carga-resistência à deformação a quente-coeficiente de atrito (caixa branca) adotada. Um exemplo pode ser visto na figura 2(a). A flutuação na precisão obtida das caixas-cinza foi aleatória e decorrente do caráter iterativo do aprendizado da rede neural (caixa preta). Note-se que esse nível de precisão foi 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 passaram a apresentar erros inferiores a $\pm 10\%$. Isso indicou que a rede neural foi 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.

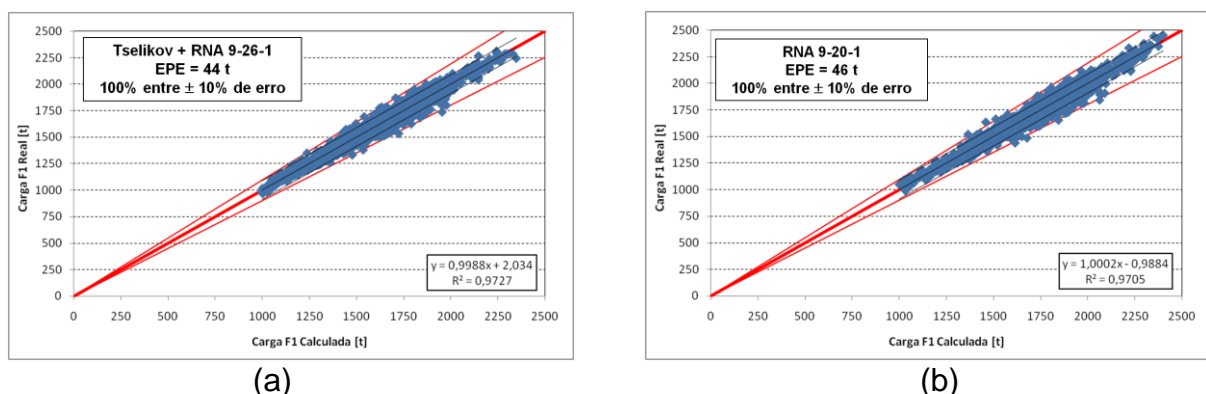


Figura 2: Comparação gráfica entre a precisão de cálculo da carga de laminação para a cadeira F1 por a) caixa-cinza (modelo de Tselikov corrigido por rede neural) e b) exclusivamente por rede neural.

3.4. Abordagem Empírica

O fato de todas as caixas-cinza terem apresentado 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 modelamento matemático da carga de laminação, sem a aplicação de nenhum modelo teórico – ou seja, uma abordagem totalmente empírica. A rede neural usada neste 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 foi idêntico ao descrito no item anterior.

Os níveis de precisão conseguidos para o cálculo de carga de laminação usando exclusivamente rede neural foram absolutamente idênticos aos obtidos para as caixas-cinza. Ficou comprovado 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 o modelamento direto da carga de laminação¹³.

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 fortemente 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 outros¹⁴, já demonstraram o enorme potencial que a rede neural no modelamento matemático da laminação a quente. Uma solução para esse impasse pode estar na obtenção de dados de processo massivos a longo prazo, além de seu tratamento através do uso 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 a que ela estará exposta no ambiente industrial. A análise criteriosa, a longo prazo, de dados de processo coletados extensivamente, associado ao dimensionamento e treinamento adequados, certamente minimizarão significativamente os riscos da rede neural final produzir resultados absurdos.

4. CONCLUSÕES

Foi feita neste trabalho uma comparação entre várias abordagens para o modelamento matemático da carga de laminação de aços carbono-manganês na cadeira F1 do Trem Acabador de um Laminador de Tiras a Quente.

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

A busca da melhoria da precisão dos modelos através da abordagem semi-empírica levou a resultados inesperados quando se corrigiram os resultados calculados através de correlação linear com os dados reais. Houve inversão na classificação dos modelos, que passou a ser liderado pelos algoritmos de Tselikov e Ekelund, com erros padrão da estimativa de 70 t e 75 t, respectivamente, seguindo-se então Orowan, Alexander-Ford e Sims. Essa alteração pode ser decorrência do efeito de parâmetros de processo modelados com precisão ainda inadequada para as condições industriais, tais como a temperatura, condições de tribologia no arco de contato

e a resistência à deformação a quente, que induzem a erros com valor superior em comparação aos decorrentes dos modelos teóricos de carga.

Já a calibração dos modelos usando-se redes neurais para cálculo dos erros previstos, através da chamada técnica de caixa-cinza, apresentou níveis de precisão independentes do modelo teórico escolhido para cálculo de carga; o erro padrão da estimativa oscilou sempre entre 44 e 48 t, variando aleatoriamente à medida que se repetia a fase de treinamento para uma mesma rede neural e entre uma rede neural e outra. O mesmo resultado foi obtido quando se partiu para uma abordagem totalmente empírica, ou seja, modelamento da carga de laminação usando-se exclusivamente uma rede neural. 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 calculados. Afinal, em última análise, elas são polinômios empíricos altamente complexos. Esse problema pode ser minimizado ou mesmo eliminado desde que elas sejam treinadas a partir de massas de dados massivas e depuradas usando-se ferramentas estatísticas sofisticadas, de forma a garantir a qualidade e representatividade de seu treinamento.

5. REFERÊNCIAS

1. OROWAN, E. The Calculation of Roll Pressure in Hot and Cold Rolling. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 150, 140-167, 1943.
2. WUSATOWSKI, Z. **Fundamentals of Rolling**, Pergamon Press, Oxford, 1969, 679 p.
3. SIMS, R.B. The Calculation of Roll Force and Torque in Hot Rolling Mills. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 168, 1954, 191-214.
4. FORD, H. & ALEXANDER, J.M. Simplified Hot-Rolling Calculations. **Journal of the Institute of Metals**, 92, August 1964, 397-404.
5. GORNI A.A. Cálculos de Laminação. In: Laminação de Produtos Planos. **Curso**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2005, 86 p.
6. SICILIANO JR., 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. 1500-1006, December 1996.
7. GORNI, A.A. & SILVA, M.R.S. Characterization of the Friction Conditions in the Finishing Stands of a Hot Strip Mill. In: 1st International Brazilian Conference on Tribology – Tribo-BR 2010. **Proceedings...** Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, Rio de Janeiro, p. 680-689, 2010.

8. POLIAK, E.I. e outros. Application of Linear Regression Analysis in Accuracy Assessment of Rolling Force Calculations. **Metals and Materials**, v. 4, n. 5, p. 1047-1056, 1998.
9. LI, Y. et al. Roll Force Model for Online Application in Hot Strip Rolling with Varying Friction Conditions. International Conference on Steel Rolling, **Proceedings**. Association Technique de la Siderurgie Française, Paris, 2006, 8 p.
10. SELLARS, C.M. Modelling – An Interdisciplinary Activity. In: Mathematical Modelling of Hot Rolling of Steel. **Proceedings...** Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Hamilton, p. 1-18, Aug. 1990.
11. FLAVELLE, P. A Quantitative Measure of Model Validation and Its Potential Use for Regulatory Purposes. **Advances in Water Resources**, v. 15, p. 5-13, 1992.
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**, 221, p. 1-9, 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**. Monografia M.B.A., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008, 194 p.
14. GORNI, A.A. *Keynote Paper: Modelamento Matemático da Laminação: De Ficção Científica a Ferramenta para a Capacitação Industrial*. In: Congresso Anual da ABM. **Proceedings...** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Belo Horizonte, p. 3894-3903, 2005.