

CÁLCULO DA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO NA LAMINAÇÃO DE TIRAS A QUENTE CONSIDERANDO O EFEITO DO ATRITO NO ARCO DE CONTATO¹

Antonio Augusto Gorn²
Marcos Roberto Soares da Silva³

RESUMO

Não é raro observar redução na resistência à deformação ou mesmo na carga de laminação sob níveis crescentes de deformação em algumas cadeiras do trem acabador do laminador de tiras a quente, sem que haja razões metalúrgicas para tal. Aparentemente esse fato está associado à modificação das condições de atrito ao longo do arco de contato decorrentes de interações inesperadas com a carepa ou de altas velocidades dos cilindros de trabalho. Este trabalho teve como objetivo propor uma correção empírica para o modelo de resistência à deformação a quente de Misaka que permita considerar o efeito do atrito de deslizamento. Os resultados obtidos demonstraram a melhoria conseguida no grau de precisão do modelo, particularmente para as cadeiras do Trem Acabador onde as evidências de atrito de deslizamento são maiores, ou seja, F1, F5 e F6.

Palavras-Chave: Laminação de Tiras a Quente, Resistência à Deformação, Atrito de Deslizamento

CALCULATION OF STEEL STRENGTH DURING HOT STRIP ROLLING CONSIDERING FRICTION IN THE ROLL GAP

ABSTRACT

It is not rare to verify reduction in hot strength or even in rolling load values as strain degree increases in some finishing rolling stands of the hot strip mill. Apparently this fact is associated to modifications in the friction condition along the roll gap that arise from unexpected interactions with rolling stock scale or high work roll speeds. This paper proposes an empirical correction for the Misaka hot strength model that includes the slipping friction effect. The results got in this work showed a significant improvement in the precision of the calculated hot strength values, especially in the rolling stands most affected by the slipping friction – that is, F1, F5 and F6.

Keywords: Hot Strip Rolling, Hot Strength, Slipping Friction

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

Num trabalho anterior¹ foi desenvolvido um modelo matemático para determinação da resistência à deformação para as cadeiras do trem acabador do laminador de tiras a quente (LTQ) da então Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, levando-se em conta os fenômenos microestruturais que ocorrem durante a passagem da tira entre uma cadeira e outra, conforme a abordagem proposta por Siciliano². Os resultados então obtidos foram muito bons, conforme mostra a tabela 1.

Tabela 1: Valores do erro padrão da estimativa associados aos modelos de resistência à deformação a quente desenvolvidos para o trem acabador do laminador de tiras a quente. O modelo de Shida Modificado é o padrão que foi fornecido com o sistema de automação do equipamento¹.

Modelo	F1 [MPa]	F2 [MPa]	F3 [MPa]	F4 [MPa]	F5 [MPa]	F6 [MPa]
Shida Modificado	64	63	79	51	28	53
Siciliano	15	12	9	15	26	27
Melhoria	77%	81%	89%	71%	7%	49%

Ainda assim, os resultados obtidos mostram que ainda há oportunidades para se melhorar a precisão do modelo para cálculo da resistência à deformação na laminação de tiras a quente. Por exemplo, essa tabela permite observar que os erros mais significativos do modelo de Siciliano concentraram-se nas cadeiras F1, F4, F5 e F6, ou seja, nos extremos do trem acabador. Outro problema que o modelo de Siciliano não consegue explicar é a redução da resistência à deformação a quente sob graus crescentes de redução em cadeiras onde o algoritmo metalúrgico não prevê a ocorrência de recristalização dinâmica, como é o caso das cadeiras F5 e F6³. Este é o único fenômeno metalúrgico que poderia explicar esse comportamento inesperado.

Foi então feita uma revisão completa, tanto no algoritmo desenvolvido conforme o modelo de Siciliano, como na metodologia de cálculo dos valores de resistência à deformação a quente a partir da carga de laminação industrial usando o modelo inverso de Sims. Não foram constatados problemas significativos. Suspeitou-se então que os maiores erros observados no cálculo da resistência à deformação a quente observadas nas cadeiras F1, F5 e F6 talvez pudessem ser explicados por algum parâmetro de processo que não estivesse sendo considerado. Esse é o caso das condições de atrito que, no caso do modelo de Sims, é considerado como sendo do tipo por agarramento, portanto assumindo valor máximo e fixo. Se, por algum motivo, o tipo de atrito se alterar de agarramento para deslizamento, o valor de seu coeficiente irá cair, reduzindo o valor da carga de laminação. O modelo inverso de Sims para cálculo da resistência à deformação a partir da carga de laminação a quente não levará em consideração essa redução no atrito. Dessa forma, a diminuição no valor de carga se refletirá integralmente no valor obtido de resistência à deformação, o que pode ser indevidamente interpretado como sendo algum tipo de fenômeno metalúrgico de amaciamento. Isso pode explicar a degradação da precisão no cálculo da resistência à deformação a quente para as cadeiras F1, F5 e F6

constatada ao se usar o modelo de Siciliano, que sempre assume, ainda que indiretamente, condições de atrito por agarramento no arco de contato.

Uma revisão na literatura disponível confirmou essa suspeita. Por exemplo, Wiesinger⁴ mostrou que a resistência à deformação a quente calculada a partir da carga de laminação nas cadeiras do Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente da Eko Stahl caiu assim que o grau de deformação real aplicado ultrapassava 0,7. Reimer⁵ observou o mesmo fato na cadeira F1 da Hoogovens, quando se aplicava grau de deformação real superior a 0,8. Já Kost⁶ relata o mesmo fenômeno quando a deformação real na cadeira F2 da VAI superava 0,60. Em todos esses casos, o efeito isolado da recristalização dinâmica não era suficiente para explicar a significativa queda observada nos valores da resistência à deformação a quente. De fato, Reimer⁵ também observou intensa emissão de poeira vermelha para os valores de deformação real onde se observava a queda na resistência à deformação a quente, bem como o surgimento de bandejamento acentuado nos cilindros de trabalho, sugerindo alterações nas condições tribológicas do arco de contato. Ele atribuiu a redução no coeficiente de atrito ao esboroamento da carepa que recobre o esboço, cujas partículas atuam no sentido de lubrificar o arco de contato. Morales⁷ determinou os valores de coeficientes de atrito para as cadeiras do Trem Acabador do LTQ da usina da Hylsa a partir dos valores de deslizamento à vante. Ele constatou que eles efetivamente são inversamente proporcionais à redução aplicada na cadeira, podendo explicar a diminuição nos valores de resistência à deformação a quente à medida que se eleva o grau de redução aplicado à tira nas cadeiras de laminação. Constatção idêntica foi obtida em outro trabalho, desta vez desenvolvido para o próprio Trem Acabador que é tema deste estudo⁸. Note-se ainda que essa nova abordagem sobre as condições de atrito no arco de contato durante a laminação a quente já foi incorporada ao novo modelo matemático desenvolvido pela *Converteam* para o cálculo do *set-up* do Trem Acabador do LTQ, onde se adota atrito de deslizamento ao invés de agarramento. Ela foi considerada mais precisa que as condições de atrito por agarramento anteriormente adotadas⁹.

Os resultados do trabalho sobre a caracterização das condições de atrito no arco de contato observadas no trem acabador do LTQ da usina de Cubatão da Usiminas⁸ mostraram que o coeficiente de atrito caiu significativamente sob altos graus de deformação para a cadeira F1, e sob altas velocidades de laminação para as cadeiras F5 e F6. Note-se que são justamente as cadeiras onde foram observados erros significativos no cálculo da resistência à deformação a quente pelo modelo de Siciliano^{1,2}, o que sinaliza um possível efeito do atrito de deslizamento. Essa situação motivou o desenvolvimento do presente trabalho, que teve como objetivo incluir esse efeito num modelo para cálculo da resistência à deformação a quente.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O ideal seria desenvolver um modelo matemático para cálculo de carga para as cadeiras do trem acabador do LTQ que adotasse condições de atrito por deslizamento, similar ao que a *Converteam* elaborou recentemente⁹. A partir desse modelo, executado de forma inversa, seria possível isolar o efeito do atrito, possibilitando a determinação de valores genuínos de resistência à deformação a quente do aço a

partir da carga de laminação industrial. Contudo, o desenvolvimento de um modelo desse tipo é muito longo e complexo, tendo sido momentaneamente postergado.

Propôs-se então a alternativa de se deduzir um fator de correção f_{μ} que incluiria, de forma empírica, o possível efeito do atrito por deslizamento e da recristalização dinâmica. Ele deverá multiplicar os valores de resistência à deformação a quente calculados pelo modelo de Misaka¹⁰, de forma a melhorar seu grau de ajuste em todas as cadeiras, mas particularmente no caso da F1, F5 e F6, onde seu desempenho foi pior. O modelo de Misaka foi escolhido em função de sua simplicidade. O fator de correção f_{μ} deve ser calculado em função do grau e velocidade de deformação, uma vez que o atrito ao longo do arco de contato parece ser definido primordialmente por esses dois fatores⁸.

Foram efetuados testes com os mais diversos tipos de função matemática para se calcular o fator de correção f_{μ} de forma a se conseguir o melhor grau de ajuste aos valores de resistência à deformação a quente calculados anteriormente a partir dos dados relativos ao processamento de 15.504 bobinas a quente¹. Esses dados foram calculados a partir dos valores de carga medida nas cadeiras do trem acabador do LTQ da usina de Cubatão da USIMINAS, tendo sido usado o modelo inverso de Sims. A melhor função foi do tipo exponencial, sendo os expoentes do grau e da velocidade de deformação sendo calculados em função dessas mesmas variáveis, usando-se as constantes empíricas **a**, **b**, **c** e **d** que foram determinadas usando-se o módulo para ajuste de funções não-lineares do programa *Statistica*:

$$f_{\mu} = \varepsilon^{(a+b\varepsilon)} \dot{\varepsilon}^{(c+d\dot{\varepsilon})}$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 2 compara o desempenho entre os diversos modelos que já foram testados para o cálculo da resistência à deformação a quente nas cadeiras do trem acabador do LTQ da usina de Cubatão da Usiminas¹. Como se pode observar, o novo modelo, designado como Misaka com Ajuste, apresentou melhor precisão para todas as cadeiras do trem acabador, permitindo uma redução média do erro padrão de estimativa de 34%. Já nas cadeiras F1, F5 e F6, onde o erro do modelo de Siciliano² havia sido maior, essa redução média foi da ordem de 46%. Isso indica que os efeitos do atrito de deslizamento e da recristalização dinâmica foram agora considerados de maneira mais precisa.

Tabela 2: Erro padrão da estimativa associados aos valores calculados de resistência à deformação a quente para as cadeiras do trem acabador do LTQ a partir do modelo de Siciliano e o desenvolvido neste trabalho.

Modelo	F1 [MPa]	F2 [MPa]	F3 [MPa]	F4 [MPa]	F5 [MPa]	F6 [MPa]
Siciliano	15	12	9	15	26	27
Misaka com Ajuste	8	9	7	12	11	18
Melhoria	47%	25%	22%	20%	58%	33%

4. CONCLUSÕES

Diversas referências na literatura, bem como análises feitas a partir dos dados operacionais do trem acabador do LTQ da usina de Cubatão da Usiminas, mostram evidências de reduções no valor da resistência à deformação a quente, ou até mesmo de carga, sob maiores valores de grau de deformação, sem que houvesse uma justificativa metalúrgica aparente. Elas podem ser explicadas pela alteração nas condições tribológicas do arco de contato, ou seja, transição do atrito de agarramento para de deslizamento, provocadas pelo esboroamento da carepa superficial no caso da primeira cadeira e pelas altas velocidades e baixas temperaturas reinantes nas últimas cadeiras do Trem Acabador. Este trabalho propôs um coeficiente para ajustar empiricamente esses efeitos, em função do grau e velocidade de deformação, a ser aplicado aos valores calculados pelo modelo de resistência à deformação a quente proposto por Misaka. A comparação entre os resultados calculados por esse novo modelo ajustado com dados reais de resistência à deformação a quente obtidos industrialmente mostram a melhoria na precisão proporcionada pela abordagem sugerida no presente trabalho para todas as cadeiras do Trem Acabador, mas de forma mais intensa nas cadeiras onde o efeito do atrito de deslizamento parece ser mais atuante, ou seja, F1, F5 e F6.

5. REFERÊNCIAS

1. GORNI, A.A. & VALLIM, P.S.S. Efeito da Recristalização Dinâmica na Resistência à Deformação a Quente de Aços Processados em Laminador de Tiras a Quente. In: 40º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. **Anais...** Vitória, 2003, 235-243.
2. 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.
3. GORNI, A.A. & SILVEIRA, J.H.D. Caracterização da Ocorrência de Recristalização Dinâmica na Laminação de Tiras a Quente. In: Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. **Anais...** Belo Horizonte, 2005, 192-198.
4. WIESINGER, H. et al. Das kontinuierliche Stranggießen und –walzen von Dünnbrammen. **Stahl und Eisen**, v. 110, n. 11, p. 81-88, 14 November 1990.
5. REIMER, C. & HUISMAN, R.L. Geometrical Effects of Large Reductions in First Stands of Finishing Mill. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 20, n. 4, p. 275-279, 1993.
6. KOST, R. et al. Berechnung der Werkstoffkennwerte von Warbreitband auf Basis einer Walzspaltanalyse. **Stahl und Eisen**, v. 112, n. 11, p. 69-74, 9 November 1992.

7. MORALES, J. et al. Influence of Process Parameters on Friction Coefficient of High-Chromium Rolls. **AISE Steel Technology**, v. 76, n. 11, p. 46-48, November 1999.
8. 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. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. **Anais...** Rio de Janeiro, 2010, 11 p.
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. GORNI, A.A. Cálculos de Laminação. In: Laminação de Produtos Planos. **Curso**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2005, 86 p.