

# CARACTERIZAÇÃO DA OCORRÊNCIA DE RECRISTALIZAÇÃO DINÂMICA NA LAMINAÇÃO DE TIRAS A QUENTE <sup>1</sup>

*Antonio Augusto Gorni<sup>2</sup>  
José Herbert Dolabela da Silveira<sup>3</sup>*

## Resumo

O uso de um modelo matemático para cálculo da resistência à deformação a quente que leva em conta a evolução microestrutural da austenita durante a laminação de tiras a quente de um aço ao C-Mn levou a resultados mais próximos da realidade do que os tradicionais algoritmos que somente consideram o efeito da temperatura, grau e velocidade de deformação. Contudo, foi constatado um fato intrigante: a melhoria proporcionada por esse novo modelo foi bem menor no caso das cadeiras F5 e F6 do Trem Acabador. Uma análise dos resultados experimentais de resistência à deformação a quente calculada a partir da carga de laminação demonstrou que, ao contrário do previsto no modelo de evolução microestrutural, houve a ocorrência de recristalização dinâmica nessas cadeiras. Isso pode explicar a menor eficácia desse novo modelo em melhorar o grau de precisão do cálculo da resistência à deformação a quente nas cadeiras F5 e F6. O fato das equações dos modelos de evolução microestrutural terem sido deduzidas a partir de dados obtidos em laboratório pode explicar essa discrepância, já que é virtualmente impossível reproduzir sob tais condições os parâmetros industriais de laminação de tiras a quente.

**Palavras-chave:** Recristalização dinâmica; Laminação de tiras a quente; Resistência à deformação a quente.

---

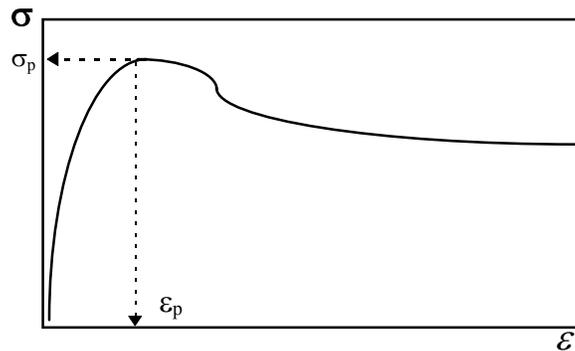
<sup>1</sup> Trabalho a ser apresentado ao 60º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais-ABM, Belo Horizonte (MG), 25 a 28 de Julho de 2005.

<sup>2</sup> Membro da ABM. Engenheiro de Materiais, M. Eng, Dr. Eng., Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: [gorni@cosipa.com.br](mailto:gorni@cosipa.com.br)

<sup>3</sup> Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, M.Eng., Gerente de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: [herbert@cosipa.com.br](mailto:herbert@cosipa.com.br)

## INTRODUÇÃO

A recristalização dinâmica é um fenômeno de restauração microestrutural típico das ligas metálicas sob deformação a quente que tenham sistema cristalino CFC, que é o caso dos aços no estado austenítico. Como se sabe, à medida que se deforma a quente a austenita sua resistência mecânica aumenta progressivamente, até se atingir um grau de deformação crítico a partir do qual atinge-se um valor máximo. Deformações acima desse valor crítico levam a uma redução na resistência do material, seguindo-se então sua estabilização num valor de patamar. Esse comportamento pode ser visto na Figura 1.



**Figura 1.** Evolução genérica da resistência à deformação a quente em função da deformação para a austenita. A recristalização dinâmica ocorre para valores de deformação superiores a  $\varepsilon_p$ .

A recristalização dinâmica requer condições bastante peculiares do processo de conformação a quente em termos de temperatura, grau e velocidade de deformação. A deformação crítica mínima  $\varepsilon_c$  necessária para a ocorrência de recristalização dinâmica pode ser calculada pela equação abaixo [1]:

$$\varepsilon_c = 5,6 \times 10^{-4} d_0^{0,3} Z^{0,17} \quad (1)$$

onde  $d_0$  é o tamanho de grão inicial e  $Z$  é o parâmetro de Zener-Hollomon. No caso de aços ao C-Mn:

$$Z = \dot{\varepsilon} e^{\left(\frac{Q}{RT}\right)} \quad (2)$$

onde  $\dot{\varepsilon}$  é a velocidade de deformação,  $Q$  é a energia de ativação para deformação a quente,  $R$  é a constante universal dos gases e  $T$  a temperatura.

Acreditava-se no passado que tais condições não ocorriam sob condições industriais, o que rotulava tal fenômeno como uma curiosidade de laboratório. Contudo, estudos mais recentes demonstram que esse fenômeno faz parte da realidade industrial [1]. No caso específico da COSIPA uma análise dos valores de resistência à deformação a quente da cadeira F1 do Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente demonstrou a ocorrência da recristalização dinâmica [2]. Isso faz sentido pois, ao se analisar as equações (1) e (2), pode-se observar que a recristalização dinâmica é

favorecida por grandes graus de deformação, tamanho de grão inicial relativamente fino, baixas velocidades de deformação e altas temperaturas, condições típicas do processo de laminação na cadeira F1.

Um trabalho posterior [3] consistiu na aplicação de um modelo matemático para cálculo da resistência à deformação a quente da austenita na laminação de tiras a quente de aço ao C-Mn que leva em conta o efeito da evolução microestrutural, inclusive a eventual ocorrência de recristalização dinâmica [4]. O grau de precisão conseguido por esse modelo foi significativamente superior aos que consideram somente o encruamento monotônico da austenita. Contudo, os resultados obtidos foram intrigantes. A melhoria no cálculo foi muito boa para as quatro primeiras cadeiras, com aumento de precisão entre 71 e 89%. Já para a cadeira F5 a melhoria foi de apenas 7% e, para a F6, 49%. Note-se que o modelo em questão previu a ocorrência de recristalização dinâmica apenas para as cadeiras F1, F2 e F3, em respectivamente 93, 92 e 53% dos casos estudados. Essa situação motivou uma análise mais detalhada dos resultados obtidos, a qual será descrita a seguir.

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram coletados dados do processo de laminação de tiras a quente de 15.504 laminados de aço ao C-Mn, incluindo-se a composição química do material processado. A partir dessa massa de dados foram determinados os valores da resistência à deformação a quente.

O cálculo da resistência à deformação a quente foi feito baseando-se no procedimento descrito em [5]: 1) correção do valor da abertura entre os cilindros em função da cedagem da cadeira e do achatamento dos cilindros; 2) compensação de penetração incompleta da deformação em passes pesados; 3) cálculo do grau e velocidade de deformação; 4) cálculo da temperatura média do esboço, levando em conta a existência de um perfil térmico ao longo de sua espessura; 5) cálculo do valor de resistência à deformação a quente  $\bar{\sigma}$  a partir da carga, usando o modelo de Sims de maneira reversa, conforme a fórmula abaixo:

$$\bar{\sigma} = \frac{w \sqrt{R (h_i - h_f)} Q_s}{P} \quad (3)$$

onde  $w$  é a largura do material,  $R$  é o raio dos cilindros de trabalho,  $h_i$  é a espessura inicial,  $h_f$  é a espessura final,  $Q_s$  é o fator geométrico definido pelo modelo de Sims e  $P$  é a carga de laminação.

Dessa forma transformou-se a massa de dados operacionais original em registros contendo os valores de resistência à deformação a quente, composição química, temperatura, grau e velocidade de deformação associados à cada passe aplicado em todas as cadeiras do Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente, os quais foram usados na análise a seguir.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra gráficos tridimensionais dos valores de resistência à deformação a quente em função do grau de deformação e temperatura, na forma de superfícies obtidas através de interpolação *spline*, usando-se o pacote estatístico *Statistica*. Essa representação dos dados permite verificar as eventuais ocorrências de recristalização dinâmica.

No caso da cadeira F1 pode-se observar que a recristalização dinâmica ocorreu ao longo de todas as temperaturas de laminação aplicadas, com grau de deformação crítica  $\varepsilon_c$  por volta de 0,7.

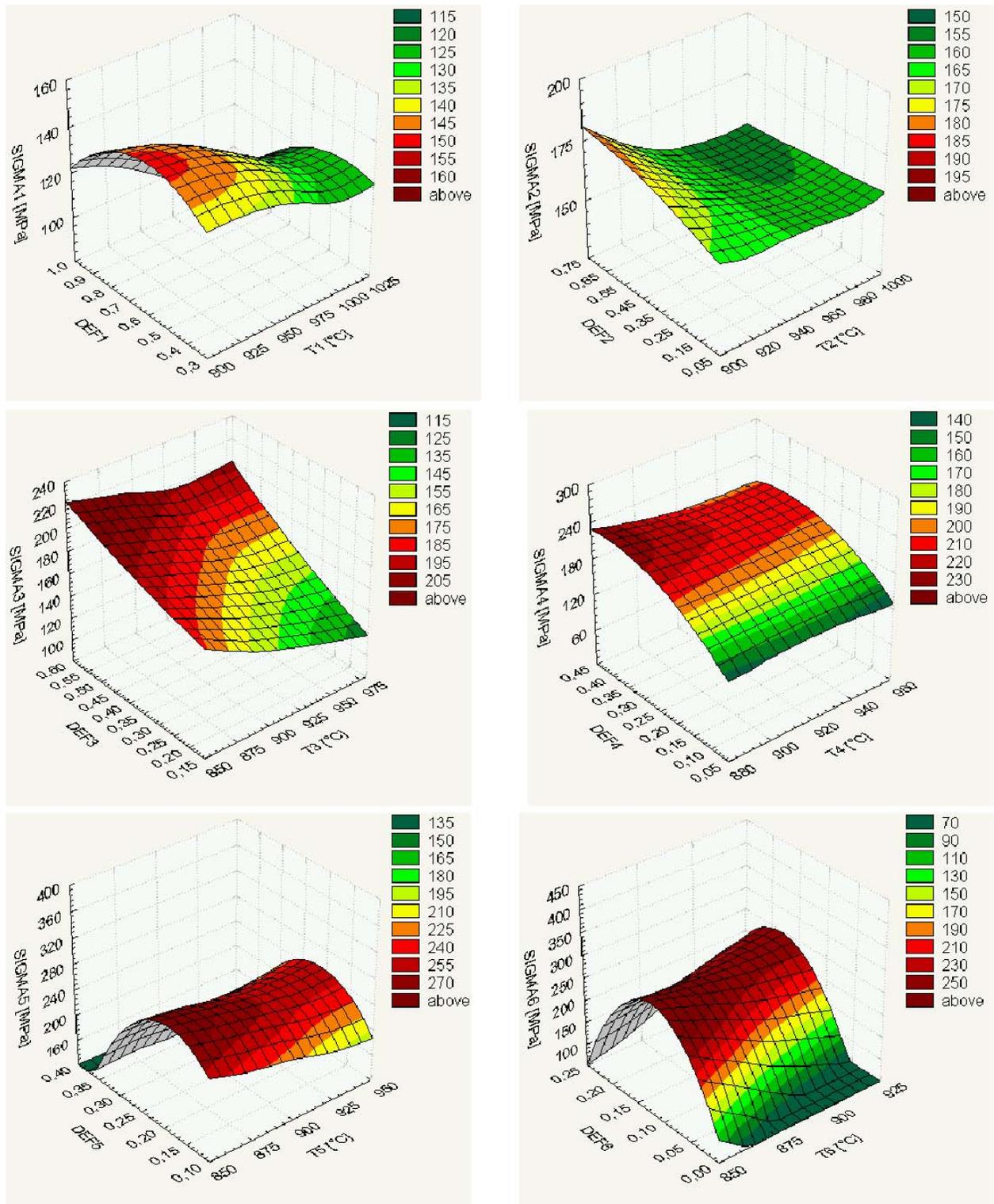
Já para a cadeira F2 observou-se a ocorrência de recristalização dinâmica apenas para aplicação simultânea de maiores temperaturas e graus de deformação, acima de aproximadamente 950°C, conforme mostra a região mais escura do gráfico, no quadrante superior/esquerdo da superfície plotada. Isto confirma uma situação prevista nas equações (1) e (2), ou seja, o favorecimento da recristalização dinâmica pelo aumento da temperatura e grau de deformação aplicado.

Nas cadeiras F3 e F4 não foi observada nenhuma ocorrência de recristalização dinâmica para as condições de processo aqui aplicadas.

O gráfico da cadeira F5 mostra claramente a ocorrência de recristalização dinâmica ao longo de todas as temperaturas aplicadas; o valor da deformação crítica  $\varepsilon_c$  foi de aproximadamente 0,23. O mesmo ocorreu para a cadeira F6, mas aqui o valor de  $\varepsilon_c$  foi menor, em torno de 0,15.

Esses resultados explicam o menor grau de melhoria na precisão da resistência à deformação a quente ocorrido nas cadeiras F5 e F6 quando se aplicou o modelo de evolução microestrutural descrito em [4]. É bastante provável que esse baixo desempenho do algoritmo seja explicado por ele não ter considerado o efeito da recristalização dinâmica que foi demonstrado na prática.

As condições de deformação nas cadeiras F5 e F6 não são exatamente favoráveis à ocorrência de recristalização dinâmica: o grão do material deve estar bem refinado, mas a temperatura e grau de deformação aplicado são relativamente baixos, especialmente no caso da F6. Contudo, é provável que o acúmulo de encruamento ocorrido em função de intervalos de tempo insuficientes para uma recristalização estática plena entre cadeiras tenha contribuído para a ocorrência da recristalização dinâmica nas cadeiras F5 e F6. De fato, o intervalo de tempo entre a aplicação dos passes de laminação oscilou entre 3,2 e 0,5 s à medida que a tira passava pelo trem acabador. De acordo com os modelos de recristalização estática, os intervalos de tempo entre passes não seriam suficientes para a uma recristalização estática plena após a deformação aplicada pela cadeira F4. É possível que o encruamento residual decorrente dessa recristalização incompleta contribuiu para ativar a recristalização dinâmica nas cadeiras F5 e F6.



**Figura 2.** Resistência à deformação a quente do aço ao C-Mn nas cadeiras do Trem Acabador plotada em função da temperatura e grau de deformação aplicados na forma de superfícies calculadas por interpolação *spline*.

Assim sendo, torna-se necessário revisar os resultados do modelo, tanto em termos do grau de encruamento residual entre passes ocorrido na tira, como em termos do cálculo para a deformação crítica  $\varepsilon_c$  necessária para deflagrar a recristalização dinâmica. É provável que as constantes das equações usadas no cálculo da evolução microestrutural não sejam as mais adequadas para aplicação à laminação de tiras a quente industrial, já que foram determinadas a partir de ensaios laboratoriais de torção a quente. Conforme foi mostrado neste trabalho, a resistência à deformação a quente, obtida a partir das cargas de laminação industriais, pode ser um parâmetro bastante eficaz para a precisão dos modelos matemáticos para cálculo de evolução microestrutural. Ele pode ser obtido com rapidez para um grande número de bobinas desde que o equipamento em análise disponha de um sistema rápido e confiável de aquisição e armazenamento de dados operacionais.

## CONCLUSÕES

Os resultados de resistência à deformação a quente de aço ao C-Mn processado no Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente da COSIPA, calculados a partir dos valores de carga de laminação industrial, indicaram a ocorrência de recristalização dinâmica nas cadeiras F1, F5 e F6. Esse mecanismo de restauração também pode ocorrer na F2 se a temperatura for suficientemente alta. Esses resultados apresentam discrepância com um modelo para cálculo da evolução microestrutural nesse processo, o qual indicou possível recristalização dinâmica nas cadeiras F1, F2 e F3. Esse resultado indica a necessidade de um refinamento posterior nesse modelo, cujas equações derivam predominantemente de dados obtidos em escala laboratorial. O melhor parâmetro para se avaliar esse ajuste é a resistência à deformação a quente, parâmetro que pode ser facilmente calculado a partir dos dados industriais de processo coletados por sistemas supervisórios, e que também reflete os fenômenos microestruturais que estão ocorrendo no produto laminado.

## BIBLIOGRAFIA

- 1 JONAS, J.J. The Hot Strip Mill as an Experimental Tool. **ISIJ International**, v. 40, n. 8, p. 731-738, Aug. 2000.
- 2 GORNI, A.A. & VALIM, P.S.S. Efeito da Composição Química na Classificação por Resistência a Quente dos Aços Processados num Laminador de Tiras a Quente. In: 59° Congresso Anual da ABM. **Anais...** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2004.
- 3 GORNI, A.A. & VALLIM, P.S.S. Efeito da Recristalização Dinâmica na Resistência à Deformação a Quente de Aços Processados no Laminador de Tiras a Quente. In: 40° Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos. **Anais...** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Vitória, 2003.
- 4 MINAMI, K. e outros. Mathematical Modeling of Mean Flow Stress during the Hot Strip Rolling of Nb Steels. **ISIJ International**, v. 36, n. 12, p. 1507-1515, Dec. 1996.

- 5 MACCAGNO, T.M. e outros. Determination of Recrystallization Stop Temperature from Rolling Mill Logs and Comparison with Laboratory Simulation Results. **ISIJ International**, v. 34, n. 11, p. 917-922, Nov. 1994.

# CHARACTERIZATION OF DYNAMIC RECRYSTALLIZATION DURING HOT STRIP ROLLING <sup>1</sup>

*Antonio Augusto Gorni<sup>2</sup>  
José Herbert Dolabela da Silveira<sup>3</sup>*

## **Abstract**

The use of a mathematical model for the calculation of the hot strength which accounts for the austenite microstructural evolution during hot strip rolling of a C-Mn steel led to results closer to reality than the traditional formulas that only consider the effect of temperature, degree and strain rate. However, it was noted a strange fact: the improvement got by this model was smaller for the F5 and F6 stands of the finishing mill. An analysis of the experimental results of hot strength calculated from industrial rolling loads showed that dynamic recrystallization occurred during rolling at these stands, a restoration mechanism not predicted there by the austenite microstructural evolution model. This fact can explain the smaller improvement in the hot strength forecast by this model in the F5 and F6 stands. It is supposed that this failure to point dynamic recrystallization in such stands can be due to the fact that the equations of the microstructural model were deduced from laboratory hot torsion tests, which hot forming parameters are not exactly to the industrial practice at the hot strip mill.

**Key-words:** Dynamic recrystallization, Hot strip rolling; Hot strength.

---

<sup>1</sup> Paper to be presented at the 60<sup>th</sup> ABM Congress, Belo Horizonte (Brazil), July 25 to 28, 2005.

<sup>2</sup> ABM Member. Materials Engineer, M. Eng, Dr. Eng., Process Analyst of the Hot Rolling Technical Support Department, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: [gorni@cosipa.com.br](mailto:gorni@cosipa.com.br)

<sup>3</sup> ABM Member, Metallurgical Engineer, M.Eng., Chief of the Hot Rolling Technical Support Department, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: [herbert@cosipa.com.br](mailto:herbert@cosipa.com.br)