

# APLICAÇÕES DE UM MODELO DE EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL<sup>1</sup>

**Antonio Augusto Gorni**

Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA

[gorni@cosipa.com.br](mailto:gorni@cosipa.com.br)

Modelos de evolução microestrutural esclarecem os efeitos do processo de laminação de tiras a quente sobre o material

## **ABSTRACT**

*Microstructural evolution models can predict the quantitative effects of the hot rolling process over grain size, allowing the optimization of hot rolled products properties. This paper shows some application examples of such model regarding the hot strip rolling of C-Mn Steels.*

Um dos objetivos do processo de laminação a quente de aços com baixo C consiste em se obter microestrutura constituída de grãos pequenos e uniformes de ferrita, a qual garante produtos com alta resistência mecânica, boa ductilidade e conformabilidade [1]. Essas propriedades apresentam correlação quantitativa com os parâmetros da microestrutura; um exemplo clássico é a relação de Hall-Petch entre o tamanho de grão e o limite de escoamento [2]. Materiais com teor de carbono muito baixo e tamanho de grão excessivo podem apresentar valores de limite de escoamento muito baixos, tornando-se susceptíveis à ocorrência do defeito quebra de superfície [3]. Um aspecto decisivo na obtenção desse bom resultado é o tratamento termomecânico aplicado ao material, ou seja, a seqüência de deformações associada à evolução térmica do esboço, a qual é definida pelo esquema de passes de laminação. Por essa razão, é altamente recomendável que se conheçam os fenômenos metalúrgicos que podem ocorrer ao se definir o esquema de passes a ser aplicado na laminação a quente.

O princípio do cálculo da evolução do tamanho de grão austenítico ao longo da laminação a quente consiste em se expressar numericamente a influência que os fenômenos metalúrgicos de encruamento e restauração exercerão sobre o tamanho de grão da tira que está sendo laminada a quente. Deve-se lembrar também que o tamanho de grão e grau de recristalização da austenita ao final da laminação, bem como a velocidade de resfriamento posteriormente aplicada ao laminado, influenciam diretamente o tamanho de grão ferrítico que será obtido após sua transformação.

Serão mostradas a seguir simulações sobre os efeitos de variações no processo de conformação no trem acabador de um laminador de tiras a quente sobre a evolução microestrutural de um aço ao C-Mn usando-se um modelo desenvolvido por Siciliano [4]. Sua metodologia de cálculo está fartamente documentada na literatura, podendo ser facilmente implementada usando-se uma simples planilha eletrônica.

## **Efeito do Tamanho de Grão Inicial**

Este é um parâmetro cuja determinação experimental sob condições industriais é virtualmente impossível. Mas ele pode ser assumido como sendo igual a 100  $\mu\text{m}$  em

---

<sup>1</sup> Publicado na Revista Metalurgia e Materiais, Outubro de 2004, pág. 631-633.

função de informações disponíveis na literatura [2]. Contudo, qual seria o possível efeito de uma alteração nesse parâmetro? Este é um tipo de resposta que o modelo em questão pode fornecer. A figura 1 permite comparar as evoluções microestruturais que ocorreriam para um laminado a quente com espessura final de 4,88 mm, considerando-se tamanhos de grão iniciais iguais a 100 e 200  $\mu\text{m}$ .

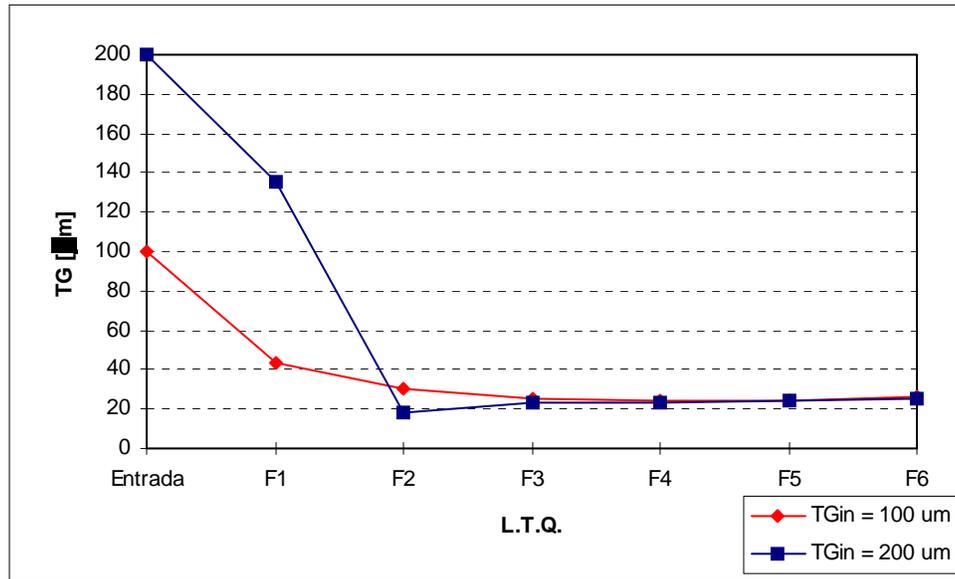


Figura 1: Evolução microestrutural de tiras a quente de aço ao C-Mn com diferentes tamanhos de grão iniciais.

O modelo previu que o material com tamanho de grão inicial de 100  $\mu\text{m}$  não apresentaria recristalização dinâmica em nenhuma das cadeiras, uma vez que as reduções por passe aplicadas não seriam suficientes para deflagrar esse processo de restauração. O esboço com tamanho de grão inicial de 200  $\mu\text{m}$  também sofreria recristalização estática após sua passagem pela F1, o que reduziria seu tamanho de grão para 135  $\mu\text{m}$ . O grau de refino conseguido seria menor que o observado para o outro material, cujo tamanho de grão pós-F1 seria igual a 43,7  $\mu\text{m}$ . Contudo, o tamanho de grão relativamente grande no segundo laminado após sua laminação na cadeira F1 reduziria a velocidade de recristalização estática subsequente, aumentando o grau de deformação residual presente no material no momento da laminação na F2, que atingiria valor de 0,29. Isso seria suficiente para possibilitar a deflagração de recristalização dinâmica na sua passagem pela F2, revertendo a situação observada na F1: agora o material com tamanho de grão inicial maior passaria a apresentar tamanho de grão austenítico de 17,7  $\mu\text{m}$ , contra 30,1  $\mu\text{m}$  da tira a quente com tamanho de grão de partida igual a 100  $\mu\text{m}$ . Isso mostra o grande potencial refinador de grão que a recristalização dinâmica possui. A partir desse ponto ambos os materiais somente passariam por recristalização estática entre um passe e outro, o que acabaria por equalizar os tamanhos de grão austeníticos obtidos ao final da laminação: 25,9 e 25,3  $\mu\text{m}$ , respectivamente para materiais com tamanhos de grão iniciais de 100 e 200  $\mu\text{m}$ . Contudo, o material com menor tamanho de grão inicial apresentaria menor fração recristalizada ao final da laminação - 30% contra 67% - fato

que deveria acelerar a transformação austenítica posterior, o que contribuiria para um maior refino do tamanho de grão final.

### Efeito do Grau de Deformação Total

A figura 2 mostra a evolução do tamanho de grão austenítico ao longo da laminação de tiras a quente calculada pelo modelo para dois materiais, os quais foram laminados a partir de um mesmo valor inicial de bitola até duas diferentes espessuras finais: 2,3 e 9,8 mm. Isso implica numa considerável redução do grau de redução total esboço-tira, que passou de 2,57 (92,4%) para 1,30 (72,7%).

A redução total mais leve aplicada ao material pesado impôs a desativação da cadeira F5, caso contrário ocorreria a formação de uma ponta alta ou baixa no momento da mordida do esboço, fato que causa severos problemas à operação do laminador. Ainda assim, as reduções por passe no caso do material mais pesado foram consideravelmente menores em relação ao material mais leve; tendência similar também foi constatada para as taxas de deformação. Conseqüentemente, os intervalos de tempo entre cadeiras foram maiores para o material mais pesado. As temperaturas de laminação foram ligeiramente mais altas nos primeiros passes para o material mais leve mas, apesar de sua maior velocidade de laminação, ambas as tiras apresentaram temperaturas de acabamento bastante próximas entre si, pois o material mais leve apresentou maior taxa de resfriamento ao longo da laminação.

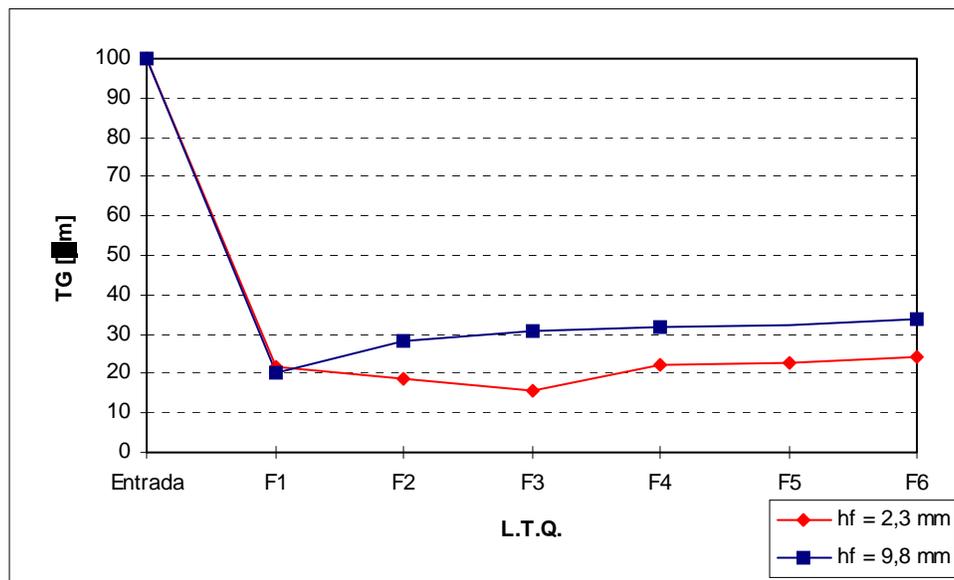


Figura 2: Evolução microestrutural de tiras a quente de aço ao C-Mn com diferentes espessuras finais.

Os resultados da figura 2 permitem constatar que, surpreendentemente, o modelo previu que a tira mais pesada apresentaria tamanho de grão austenítico ligeiramente menor do que o da tira mais fina ao sair da cadeira F1: 20,1 versus 21,8 µm. Este resultado, um tanto inusitado, é explicado por diversos fatos. Em primeiro lugar, ambos os materiais passariam por recristalização dinâmica nessa primeira cadeira. Sob

tais condições, o tamanho de grão obtido é função do parâmetro de Zener-Hollomon, o qual independe da deformação aplicada, tornando-se menor com a diminuição da temperatura de laminação e aumento da velocidade de deformação. Uma vez que o material mais pesado foi laminado sob menor temperatura e velocidade de deformação praticamente igual a do material mais fino para esta cadeira, seu tamanho de grão austenítico previsto seria o menor.

O modelo, contudo, sinaliza que essa situação mudaria para os passes seguintes. O material mais fino passaria por recristalização dinâmica também nas cadeiras F2 e F3, fato que refinaria significativamente seu tamanho de grão. Já o material mais espesso só passaria por recristalização estática, reconhecidamente um mecanismo menos efetivo para o refino de grão. Além disso, os intervalos entre passes seriam maiores para a tira mais pesada, fato que favoreceria o crescimento de seu tamanho de grão.

A partir da cadeira F4 também o material mais fino passaria a sofrer recristalização estática, fazendo com que seu tamanho de grão passe por um aumento acentuado. Já o material mais pesado apresentaria estabilização em seu tamanho de grão. Finalmente, na saída do trem acabador, o material mais fino apresentaria tamanho de grão austenítico igual a 24,3  $\mu\text{m}$  contra 33,7 $\mu\text{m}$  do material mais pesado, uma diferença de 39% decorrente da maior atuação da recristalização estática e de menores tempos entre passes do material mais fino.

Um outro aspecto a ser considerado seria a menor fração recristalizada que foi constatada para o material mais fino ao término da laminação - 29% contra 67% do outro material usado na comparação. Tal fato que tenderia a refinar o tamanho de grão ferrítico resultante no laminado de menor espessura.

### **Influência do Esquema de Passes**

Também o esquema de passes aplicado ao material pode influenciar sua microestrutura final, mesmo sob condições aproximadamente constantes em termos de grau de deformação total aplicada e evolução de temperatura ao longo da laminação. Este fato pode ser visto na figura 3, que mostra a evolução microestrutural de duas tiras com espessuras finais e evoluções térmicas bastante semelhantes, sendo que a primeira foi laminada usando-se todas as seis cadeiras do trem acabador, enquanto que no segundo caso dispensou-se a última (F6).

Pode-se constatar a partir dos resultados do modelo que nenhum dos dois materiais passaria por recristalização dinâmica em nenhuma cadeira do trem acabador. O material laminado com seis passes apresentaria inicialmente refino do tamanho de grão ligeiramente maior do que o outro laminado, aparentemente em função do grau de deformação um pouco mais elevado que foi aplicado na F1 no primeiro caso. Contudo, a situação se inverteria a partir da cadeira F3, quando as deformações por passe passaram a ser maiores no material laminado com cinco passes. Isso faria com que, ao final do processo, o tamanho de grão austenítico do material processado com seis passes fosse de 25,9  $\mu\text{m}$  e o laminado com cinco passes fosse igual a 21,6  $\mu\text{m}$ , uma diferença de aproximadamente 20%.

Note-se, contudo, que o material laminado com menor número de passes apresentaria maior grau de recristalização austenítica na saída do trem acabador, aproximadamente 93%, enquanto que o outro apresentaria valor bem mais baixo, 30%. Logo, é altamente recomendável e dispor de um modelo microestrutural para a transformação da austenita para se levar em conta também este efeito na microestrutura final, o qual pode inverter a situação observada no campo austenítico.

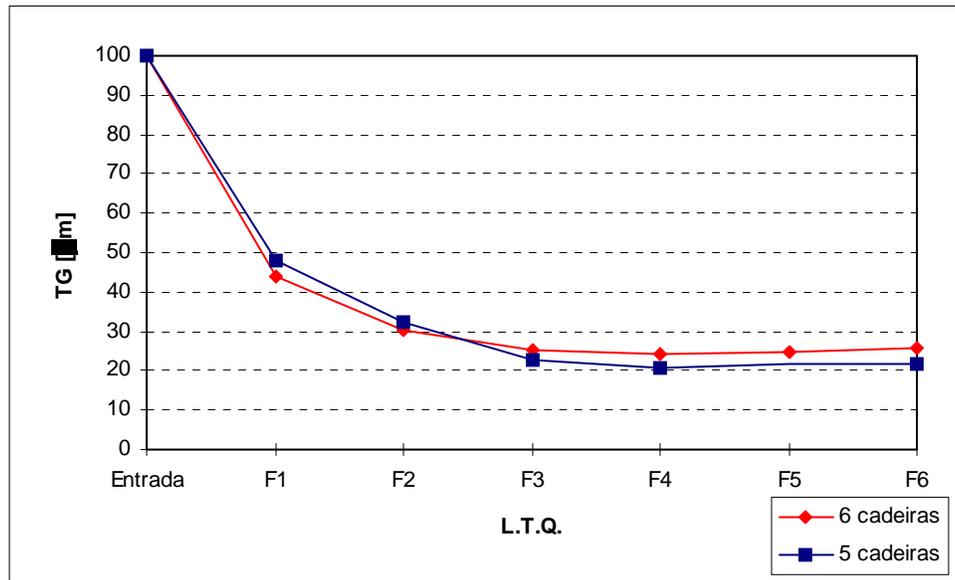


Figura 3: Evolução microestrutural de idênticas tiras a quente de aço ao C-Mn usando ou não a cadeira F6.

#### - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. LENARD, J.G. e outros. Mathematical and Physical Simulation of the Properties of Hot Rolled Products. Elsevier, Oxford, 1999. 364 p.
2. TAMURA, I. e outros. Thermomechanical Processing of High Strength Low-Alloy Steels. Butterworths, London, 1988. 248 p.
3. FERREIRA, L.C. e outros. Metalurgia ABM, Janeiro 1985, 9-14.
4. SICILIANO JR., F. e outros. ISIJ International, December 1996, 1500-1506.