

ESTUDO DA EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL DE VERGALHÃO DE AÇO NO RESFRIAMENTO APÓS LAMINAÇÃO A QUENTE ¹

*Marcelo Oliveira Alves*²
*Luiz Carlos Pereira*³
*Juan Garcia de Blas*³

RESUMO

Neste trabalho são apresentados alguns resultados de experimentos realizados no leito de resfriamento Stelmor do laminador de vergalhões da Siderúrgica Barra Mansa, com o objetivo de relacionar a microestrutura e as propriedades mecânicas dos produtos com as condições de processamento.

A metodologia aplicada incluiu a observação da microestrutura da austenita prévia à transformação e a medida da temperatura do material ao longo do leito.

As variáveis de processamento tais como o diâmetro do produto, a velocidade da esteira e as aberturas dos ventiladores foram expressas na forma de uma taxa de resfriamento média.

Desta maneira, a análise das microestruturas e propriedades apresentadas pelos produtos foi baseada de forma direta em variáveis com significado metalúrgico, tais como a superfície específica de contornos de grão da austenita prévia e a taxa de resfriamento no leito.

O estudo mostrou que estas variáveis são determinantes nas características microestruturais e no valor do limite de escoamento dos vergalhões.

Palavras-chave: vergalhão, Stelmor, evolução microestrutural.

¹ Contribuição Técnica ao 41º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 26-28 de outubro 2004, Joinville, SC.

² Eng. Met., Siderúrgica Barra Mansa - Votorantim Metais, Barra Mansa, RJ

³ Prof. Adjunto, Programa de Eng. Metalúrgica e de Materiais, COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ

INTRODUÇÃO

Recentemente, grande ênfase tem sido dada ao controle do resfriamento de produtos de aços após a laminação a quente, visando alcançar a microestrutura e as propriedades mecânicas desejadas através da intervenção nas condições nas quais se produzem as transformações de fases.

Em condições industriais a verificação é geralmente feita sobre os produtos finais pois o acompanhamento da evolução microestrutural durante o processo através da amostragem do material durante o processo não é possível. A análise da microestrutura e propriedades obtidas é feita com o objetivo de identificar e de avaliar os efeitos das condições de processamento que foram adotadas sobre os fenômenos metalúrgicos. Nesta análise, boa parte das informações utilizadas provém de resultados obtidos em experiências em escala de laboratório, onde a verificação direta da microestrutura é possível. É também freqüente o uso de simulações computacionais da evolução microestrutural para orientar a definição das condições de processamento mais adequadas.

No caso da laminação de vergalhão e de fio máquina dotada de sistema de resfriamento Stelmor (Figura 1), a transformação da austenita ocorre no leito de resfriamento.

Este sistema, devido às suas características oferece algumas possibilidades de observação da evolução microestrutural. A velocidade da esteira e o acesso ao material no leito permitem a sua manipulação, fato que possibilita a rotineira operação de descarte de pontas. ANELLI (1992) relata a obtenção de amostras, destinadas à observação da microestrutura austenítica prévia, através do corte de pedaços de barras e sua têmpera em água. Este tipo de amostragem, quando associado à coleta de material do produto final da mesma bobina, permite obter informações sobre diferentes instantes da evolução microestrutural do mesmo espécime. Outra possibilidade oferecida é a de acompanhar a evolução de temperatura de um determinado ponto do material durante seu percurso na esteira, obtendo-se informações sobre a transformação de fase através da recalescência e sobre parâmetros de transferência de calor (CAMPBELL *et al.*, 1991a e 1991b). Neste trabalho são apresentados alguns resultados preliminares de experimentos realizados no laminador de vergalhões da Siderúrgica Barra Mansa, com o objetivo de relacionar a evolução microestrutural com as condições de processamento no Stelmor, aplicando-se amostragem e medida de temperatura no leito de resfriamento.

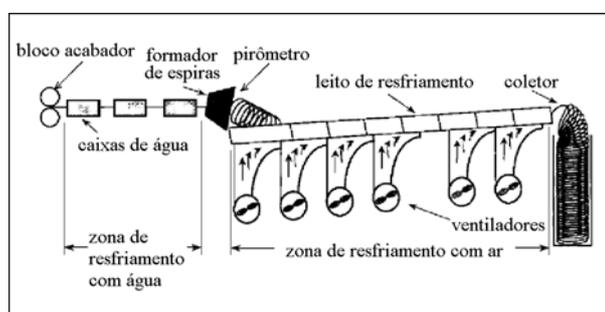


Figura 1 - Esquema do sistema de resfriamento Stelmor. (LABIB, 2001)

METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados no laminador de vergalhões da Siderúrgica Barra Mansa e consistiram no processamento de vergalhões nervurados atendendo à especificação CA-50 com diâmetros nominais (bitolas) de 6,30mm, 8,0mm, 10,0mm e 12,5mm. O material utilizado no estudo foi um aço ABNT1030, produzido em aciaria elétrica e lingotamento contínuo, na forma de tarugos com seção de 120mm,

cujo reaquecimento até 1180°C teve duração em torno de 150 minutos. A composição química do conjunto de tarugos empregados apresentou-se nos limites descritos na Tabela 1.

C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	Cr	Sn	N(ppm)
0,33 a 0,35	1,01 a 1,09	0,20 a 0,30	0,05 máx.	0,05 máx.	0,50 máx.	0,30 máx.	0,30 máx.	0,15 máx.	160 a 200

Tabela 1 - Limites de composição apresentados nos materiais estudados (% peso).

As etapas de laminação e resfriamento em água foram realizadas nas condições padronizadas de produção. A intervenção no processo de fabricação se deu no leito de resfriamento do Stelmor. Para cada bitola foram aplicadas duas condições de resfriamento no leito, sendo uma delas a usualmente empregada na produção e a outra obtida unicamente pela modificação da abertura dos ventiladores, como indicado na Tabela 2.

Modo de Resfriamento	Bitola (mm)	Velocidade barra (m/s)	Velocidade esteira(m/s)	T.entrada leito (°C)	Aberturas dos ventiladores A_V (%)				
Padrão	6,3	59,2	0,80	1141	80	80	30	30	30
	8,0	37,6	0,70	1100	80	80	30	30	30
	10,0	24,0	0,70	1116	80	80	80	30	30
	12,5	15,2	0,45	1050	80	80	80	30	30
Modificado	6,3	59,2	0,80	1116	90	90	60	40	40
	8,0	37,6	0,70	1082	10	10	10	10	10
	10,0	24,0	0,70	1077	30	30	30	20	20
	12,5	15,2	0,45	1080	20	20	20	10	10

Tabela 2 - Condições de processamento dos experimentos.

Dois tipos de experimentos foram realizados para cada condição: aqueles em que amostras eram extraídas para caracterização de microestrutura e de propriedades mecânicas e aqueles destinados à medida da temperatura de um ponto da bobina durante seu deslocamento no leito. Foram processadas três bobinas por condição com a finalidade de amostragem e acompanhada a temperatura de cinco bobinas para cada uma das condições envolvendo as bitolas de 8 e de 10mm. Adicionalmente, foram processadas três bobinas por condição padrão com a finalidade de obter amostras suplementares no leito.

A temperatura na entrada do leito era medida pelo pirômetro localizado no formador de espiras; os valores apresentados na Tabela 2 são as médias dos três experimentos de amostragem da condição. A velocidade da esteira é ajustada à velocidade da barra, a qual depende da bitola.

A amostragem de material no leito foi realizado pelo pessoal encarregado da operação de descarte de ponta. Um pedaço da região do meio da bobina era cortado e temperado em água. Desta maneira eram obtidas amostras para caracterização da microestrutura austenítica prévia. Posteriormente, após a saída do

coletor, das mesmas bobinas eram extraídas as amostras destinadas à caracterização das microestruturas e propriedades dos produtos.

A medida de temperatura do material no leito de resfriamento foi realizada com um pirômetro bicolor Raytek conectado a um microcomputador portátil através de uma interface serial, com o objetivo de armazenar o registro de temperatura em tempo real. O pirômetro era focalizado numa espira do meio da bobina, acompanhando-a durante o seu deslocamento na esteira. A região focalizada situava-se no eixo da esteira de modo a evitar os efeitos de superposições de espiras.

A caracterização microestrutural foi realizada por microscopia ótica sobre amostras submetidas a preparação metalográfica convencional na seção longitudinal do vergalhão. A microestrutura da austenita prévia foi revelada por ataque com solução aquosa saturada de ácido pícrico com cloreto férrico e a microestrutura dos produtos finais foi revelada por ataque com Nital 2%.

As análises metalográficas foram realizadas em microscópio ótico Olympus modelo BX60M. A microestrutura da austenita prévia foi caracterizada pelo seu intercepto médio (UNDERWOOD, 1970), tomando-se 250 interseções em linhas teste situadas sobre o eixo do vergalhão. Nas amostras transformadas, a determinação da fração volumétrica de fases através do método de contagem de pontos (UNDERWOOD, 1970) foi realizada utilizando uma grade de 7x7 pontos, sendo aplicadas 10 grades a cada amostra.

As propriedades mecânicas dos vergalhões foram caracterizadas por ensaios de tração, segundo a norma NBR-6152. Foram obtidas os valores do limite de escoamento, limite de resistência, redução de área e alongamento percentual.

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Aspectos térmicos

A transformação da austenita no leito de resfriamento será determinada pela microestrutura da austenita prévia e o caminho térmico resultante da combinação da velocidade da esteira e aberturas dos ventiladores. Para efeito de análise de resultados de microestruturas e propriedades, este caminho térmico pode ser expresso de maneira simplificada por uma taxa de resfriamento. No caso presente, esta taxa pode ser determinada a partir dos registros de temperatura obtidos no leito de resfriamento.

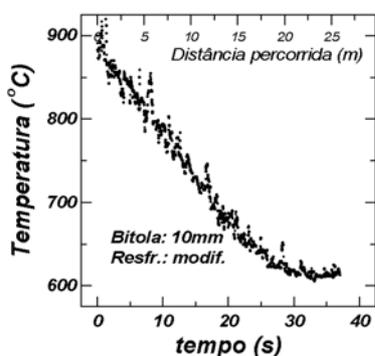


Figura 2 - Temperatura medida no leito de resfriamento.

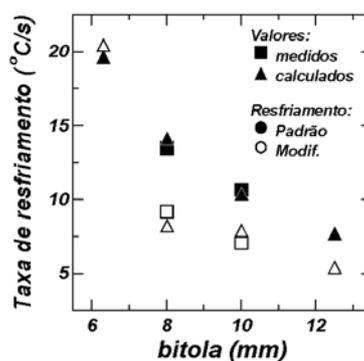


Figura 3 - Taxas de resfriamento entre 700 e 800°C.

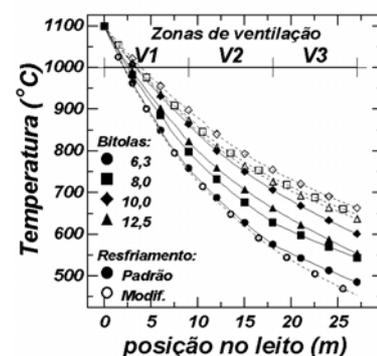


Figura 4 - Curvas de resfriamento calculadas.

O aspecto típico apresentado pelos registros de temperatura é mostrado na Figura 2. Pode-se observar que a dispersão das medidas, embora não impeça a determinação da taxa de resfriamento, não permite distinguir efeitos de

recalescência associados à transformação da austenita. A estabilização da temperatura em valores próximos a 620°C explica-se pelo fato de ser este o limite inferior de medida do pirômetro utilizado.

Os valores da taxa de resfriamento V_R calculados entre as temperaturas de 800°C e 700°C para os vergalhões com diâmetros 8 e 10mm são apresentados na Figura 3. Segue-se uma descrição sucinta dos procedimentos utilizados para a determinação dos valores de V_R para as demais condições.

A taxa de resfriamento de uma barra com diâmetro D pode ser estimada pela relação (HOLMAN, 1983) estabelecida pela balanço de energia:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{4}{\rho C_p D} h(T - T_A) \quad (1)$$

onde o coeficiente de transmissão de calor total h é a soma dos coeficientes h_C , de convecção, e h_R , de radiação. O coeficiente h_C foi determinado para as condições de resfriamento características do Stelmor por CAMPBELL *et al.* (1991a). No campo austenítico vale a relação:

$$h_C = 2,545 \frac{v^{0,466}}{D^{0,534}} \quad (2)$$

onde v é a velocidade do ar. O coeficiente de transferência de calor por radiação é dado por

$$h_R = \sigma \varepsilon R_C(T) \left(\frac{T^4 - T_A^4}{T - T_A} \right) \quad (3)$$

onde R_C é a correção determinada experimentalmente por CAMPBELL *et al.* (1991a) para pontos de espiras no centro do leito.

A partir do valor da taxa de resfriamento e das relações acima, é possível calcular a velocidade do ar. Como se verá mais adiante, o intervalo de temperaturas considerado para o cálculo de V_R está associado a valores iguais de aberturas de ventiladores. Isto permite estabelecer uma correspondência entre a velocidade do ar e a abertura do ventilador A_V para a instalação utilizada neste trabalho:

$$v = 0,2 + 0,195 A_V \quad (4)$$

com coeficiente de correlação $R=0,958$. A validade desta determinação é suportada pela análise dos resultados da aplicação da equação (2) às relações entre h_C e A_V apresentadas por ANELLI (1992) e LABIB *et al.* (2001), que mostra uma variação linear da velocidade do ar com a abertura do ventilador, para valores de A_V acima de 20%.

A partir da equação (4) e dos valores de A_V da Tabela 2, é possível calcular os valores das taxas de resfriamento para as demais condições, que são mostrados na Figura 3. Da mesma forma, por integração da equação (1) a partir de um valor de temperatura de entrada no leito de 1100°C, são calculadas as temperaturas do material no leito para as diversas condições de resfriamento, supondo-o na fase austenítica. Tais resultados, apresentados em função da posição ao longo da esteira, confirmam que o intervalo 700-800°C ocorre sob a ação de séries de ventiladores com igual valor de abertura (vide Tabela 2).

Os efeitos da bitola e do modo de resfriamento sobre os valores da velocidade de resfriamento entre 700°C e 800°C, V_R , podem ser observados na Figura 3. Independentemente do modo de resfriamento, maiores valores de V_R são apresentados pelos vergalhões de menor bitola. A modificação do modo de resfriamento nas bitolas de 8 a 12,5mm, através da redução das aberturas dos ventiladores resultou na diminuição de V_R . No caso da bitola de 6,3mm, o aumento

de A_V de 80% para 90% nos dois primeiros ventiladores não tem influência significativa sobre V_R . Ainda em relação a esta bitola, pode-se observar na Figura 4 que o aumento da abertura do terceiro ventilador elevará sensivelmente a taxa de resfriamento em temperaturas abaixo de 550°C.

Aspectos Microestruturais

A microestrutura austenítica na entrada do leito de resfriamento é o resultado de todo o processamento a montante, ou seja as etapas de laminação e de resfriamento a água do Stelmor. Costuma-se caracterizá-la através da superfície específica de contorno de grão austenítico S_V , relacionada com o intercepto médio \bar{L} através de $S_V = 2/\bar{L}$, para expressar a quantidade de sítios disponíveis para a nucleação. A observação das amostras temperadas no leito mostrou que a austenita prévia apresentava uma granulação equiaxial e homogênea. A Figura 5 apresenta os valores de S_V obtidos nos experimentos de amostragem e suplementares. Em termos de intercepto médio, os valores situam-se entre 16 e 27 μm . A disposição apresentada pelos valores, apesar da dispersão, sugere a existência de um mínimo do parâmetro S_V para a bitola de 8 mm, fato cujo esclarecimento demanda a análise das condições de laminação e de resfriamento em água, fora do escopo deste trabalho.

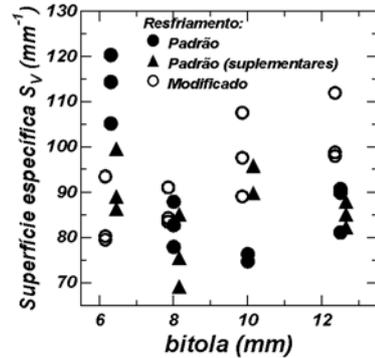


Figura 5 - Superfície específica de contorno de grão austenítico S_V

Os aspectos microestruturais típicos dos produtos finais são mostrados na Figura 6. Os principais constituintes presentes são perlita, ferrita poligonal e ferrita acicular. Foram observados, em menor quantidade, e nem sempre claramente distinguíveis, bainita, martensita e o constituinte martensita-austenita (MA). Por ocasião da determinação de fração volumétrica, estes constituintes foram agrupados sob uma mesma classificação, que denominamos BMA.

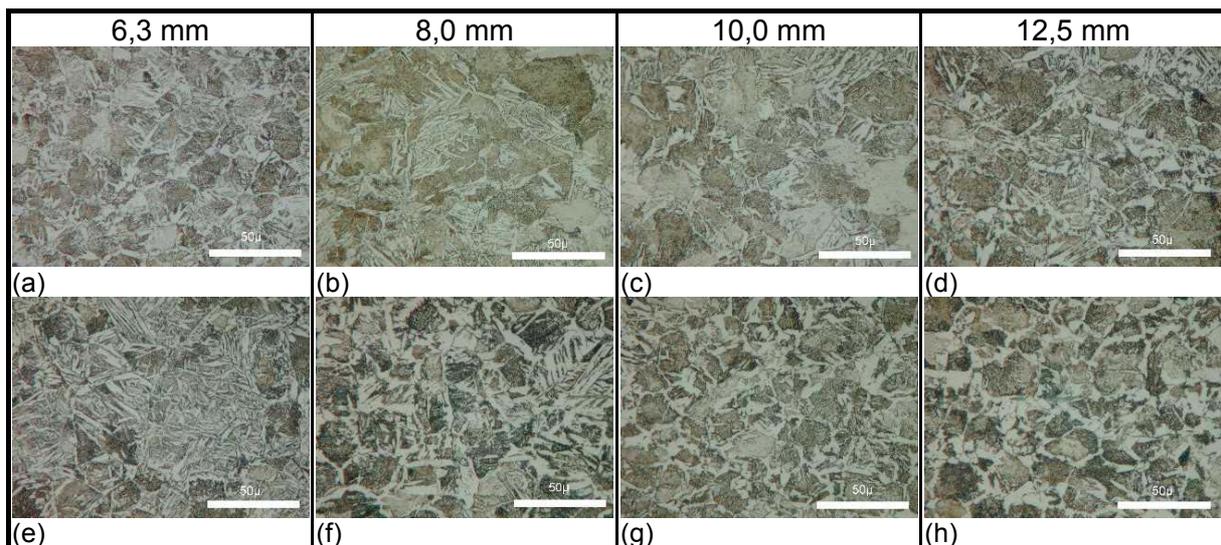


Figura 6. Micrografias óticas da seção longitudinal dos vergalhões. Ataque Nital 2%. (a) - (d): resfriamento padrão, (e) - (h): resfriamento modificado. Segmento: 50 μm .

De uma maneira geral, às condições com menores taxas de resfriamento (bitola 12,5mm em ambos os modos e bitolas 8 e 10mm no modo modificado) estão

associadas microestruturas com predominância de ferrita poligonal e perlita. Nas demais condições é mais significativa a presença de ferrita acicular. Uma visão mais detalhada da influência da taxa de resfriamento sobre a fração volumétrica dos diversos constituintes é apresentada na Figura 7. A fração volumétrica da ferrita poligonal, primeiro produto da transformação, tem o seu valor reduzido à medida que aumenta a taxa de resfriamento, estabilizando-se para taxas maiores que 10°C/s. A formação de perlita é favorecida pelo aumento de V_R quando no resfriamento lento das maiores bitolas. Nesse caso, o aumento da fração de perlita está associado à diminuição da fração de ferrita poligonal. Para maiores taxas de resfriamento, ocorre a diminuição da fração de perlita, acompanhada do aumento da fração de ferrita acicular. Finalmente, a austenita remanescente dará origem aos constituintes que foram agrupados na classificação BMA.

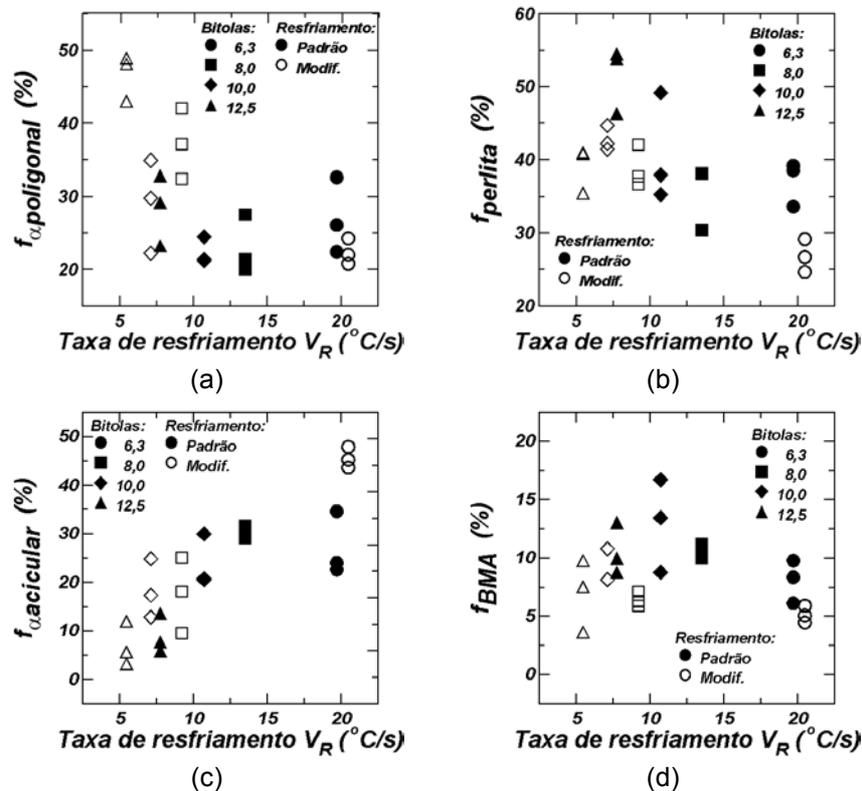


Figura 7 - Fração volumétrica de constituintes em função da taxa de resfriamento entre 700°C e 800°C. (a) ferrita poligonal, (b) perlita, (c) ferrita acicular e (d) demais constituintes: bainita, martensita e martensita-austenita.

O efeito da superfície específica de contorno de grão austenítico S_V na formação da microestrutura foi analisado através de regressões lineares envolvendo este parâmetro e a taxa de resfriamento. Um dos melhores resultados obtidos, Figura 8 mostra que a soma das frações de ferrita poligonal e de perlita é bem representada por uma relação linear de V_R e de S_V . Os coeficientes e demais parâmetros da determinação são apresentados na Tabela 3. A comparação da influência destas variáveis pode ser feita através do efeito máximo que elas podem produzir, calculado pelo produto do coeficiente na regressão pela diferença entre os valores extremos da variável (amplitude). Os efeitos máximos constam na Tabela 3, e no caso presente, seus valores mostram que o efeito de S_V sobre a soma das frações é comparável, embora menor, ao efeito de V_R . Este resultado indica que S_V exerce uma influência apreciável na formação da microestrutura, o que poderia ser

explicado pelo fato de que os contornos de grão da austenita fornecem os sítios para nucleação da ferrita poligonal e para a perlita.

Os valores do limite de escoamento dos vergalhões, apresentados na figura 9, mostram-se crescentes com o aumento de V_R , como esperado em decorrência da influência observada deste parâmetro sobre a microestrutura. O resultado da introdução de S_V na representação desta propriedade é mostrado na Figura 10. Os valores dos efeitos máximos de S_V e de V_R são bastante próximos. Por outro lado, o limite de escoamento pode também ser expresso em termos de parâmetros microestruturais. Neste caso, a relação mais significativa encontrada envolve S_V e a fração de ferrita poligonal, Figura 11, onde o efeito máximo de S_V supera o de V_R . O coeficiente negativo da fração de ferrita poligonal, que é o constituinte mais *macio*, indica que a relação está baseada na soma dos demais constituintes. A presença de S_V na relação deve-se à sua influência no refino da microestrutura. A relação deve portanto ser interpretada como sendo a dependência do limite de escoamento na quantidade e no refino dos constituintes mais duros.

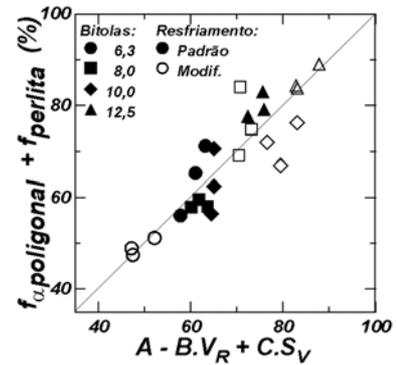


Figura 8 - Regressão linear obtida para a soma das frações de ferrita poligonal e perlita. Coeficientes na Tabela 3.

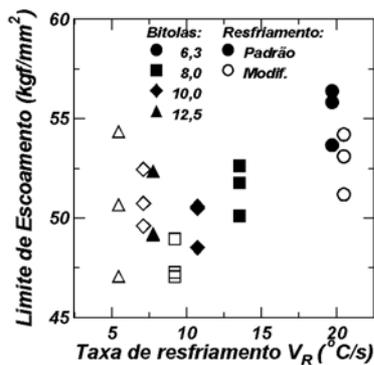


Figura 9 - Limite de escoamento em função da taxa de resfriamento entre 700°C e 800°C.

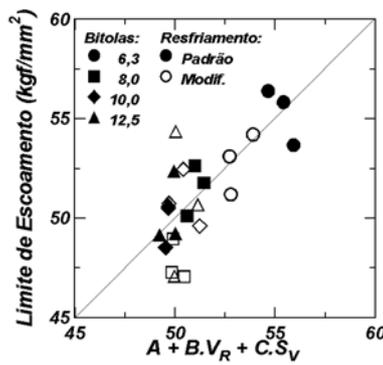


Figura 10 - Regressão linear obtida para o limite de escoamento em função de V_R e S_V . Coeficientes na Tabela 3

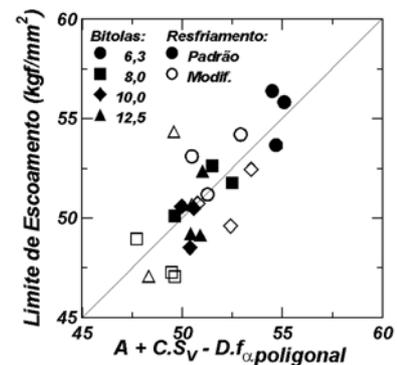


Figura 11 - Regressão linear obtida para o limite de escoamento em função de S_V e fração de ferrita poligonal.

	Cte.	Coeficientes			Parâmetros		Efeitos máximos		
		S_V	V_R	$f_{\alpha polig.}$	R	EPE	S_V	V_R	$f_{\alpha polig.}$
$f_{perlit.} + f_{\alpha polig.}$	58,6 ±9,0	0,354 ±0,094	-1,937 ±0,234	—	0,891	5,8	16	29	—
Le	40,2 ±2,9	0,084 ±0,031	0,286 ±0,077	—	0,712	1,9	3,9	4,3	—
Le	43,8 ±2,8	0,143 ±0,033	—	-0,194 ±0,048	0,734	1,9	6,6	—	5,6

Tabela 3 - Coeficientes, parâmetros e efeitos resultantes das regressões lineares. R : coef. de correlação; EPE : erro padrão da estimativa. Os efeitos máximos são os produtos do coeficiente pela amplitude da variável ($\Delta S_V=46$, $\Delta V_R=15$, $\Delta f_{\alpha polig.}=29$).

CONCLUSÕES

A metodologia adotada neste estudo, caracterizada pela amostragem para determinação da microestrutura austenítica prévia e pelo registro da temperatura do material durante seu percurso na esteira, mostrou-se de fácil aplicação e permitiu que a análise das relações entre as microestruturas e propriedades e as condições de processamento fosse realizada com base em variáveis com significado metalúrgico.

O conhecimento da microestrutura austenítica prévia no leito de resfriamento permite, ainda, estabelecer a ligação com eventuais estudos dos efeitos das condições de laminação e de resfriamento em água.

A realização de medidas de temperatura no leito, além de fornecer as taxas de resfriamento necessárias à análise, servem à determinação de características do sistema de resfriamento.

O estudo mostrou que tanto a taxa de resfriamento no leito quanto a superfície específica de contornos de grão da austenita prévia são determinantes nas características microestruturais e no valor do limite de escoamento dos vergalhões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- LABIB, H. F. YOUSSEF, Y. M. DASHWOOD, R. J. LEE, P. D. Instrumentation and simulation of industrial steel wire rod cooling line. **Materials Science and Technology**, v. 17, n.11, p. 856-863, jul. 2001.
- 2- ANELLI, E. Application of Mathematical Modelling to Hot Rolling and Controlled Cooling of Wire Rods and Bars. **ISIJ International**, Tóquio, v. 32. n. 3, p. 440-449, mar. 1992.
- 3- CAMPBELL, P.C. HAWBOLT, E. B. BRIMACOMBE, J. K. Microstructural Engineering Applied to the Controlled Cooling of Steel Wire Rod: Part I. Experimental-Design and Heat-Transfer. **Metallurgical Transactions A - Physical Metallurgy and Materials Science**, Warrendale, v. 22. n.11, p. 2769-2778, nov. 1991.
- 4- CAMPBELL, P.C. HAWBOLT, E. B. BRIMACOMBE, J. K. Microstructural Engineering Applied to the Controlled Cooling of Steel Wire Rod: Part III. Mathematical-Model Formulation and Predictions. **Metallurgical Transactions A - Physical Metallurgy and Materials Science**, Warrendale, v. 22. n.11, p. 2791-2805, nov. 1991.
- 5- UNDERWOOD, E. E. **Quantitative Stereology**. Reading: Addison-Wesley, 1970. 274p.
- 6- HOLMAN, J.P. **Transferência de Calor**. São Paulo: Mcgraw-Hill Brasil, 1983. 639 p.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Siderúrgica Barra Mansa - Votorantim Metais o apoio para a realização dos experimentos e a permissão para divulgação dos resultados.

É também motivo de agradecimento a colaboração prestada pelos técnicos Laércio Rosignoli Guzela e João Carlos Veiga da Silva do PEMM / COPPE e pelo estagiário Gustavo Coelho Alves Costa, Escola Politécnica / UFRJ.

STUDY OF THE MICROSTRUCTURAL EVOLUTION IN STEEL REINFORCING RODS DURING COOLING AFTER HOT ROLLING ¹

Marcelo Oliveira Alves ²
Luiz Carlos Pereira ³
Juan Garcia de Blas ³

ABSTRACT

This work presents some results of industrial tests conducted on the Stelmor conveyor at Barra Mansa Steelworks aiming to relate the microstructures and mechanical properties of reinforcing rods to the process parameters.

The experimental method applied includes the observation of austenite-microstructure prior to transformation and also the material temperature measurement along the conveyor.

Process variables such as rod diameter, conveyor speed and operation ratio of the fans were expressed by an average cooling rate. So that, the analysis of the microstructures and resulted properties was based directly on metallurgical variables such as specific surface of previous austenite grain boundaries and the cooling rate in the conveyor.

The study showed that the microstructural features and the yield stress values are explained by these variables.

Keywords: reinforcing rods, Stelmor conveyor, microstructural evolution.

¹ Technical Contribution to 41th Rolling Seminar - Processes, Rolled and Coated Products - October 26 to 28, 2004 - Joinville - SC - Brazil.

² *Met. Eng., Barra Mansa Steelworks, RJ.*

³ *Associate Professor, Metallurgy and Materials Engineering Program, COPPE, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.*