

Paulo Roberto Mai<sup>(2)</sup>

### RESUMO

Foram realizadas experiências para se determinar a cinética de crescimento do grão austenítico em amostras de aço 0,2 a 0,8% C, 1% Mn, com e sem adição de 0,031% Nb, na faixa de temperatura de 500 a 1300°C.

Os resultados obtidos foram comparados com os de outros pesquisadores para se avaliar o efeito da temperatura final do tratamento termomecânico na T<sub>cg</sub> (temperatura crítica de crescimento dos grãos austeníticos) de aços níobio - dos, com níobio.

### 1. INTRODUÇÃO

Os efeitos do níobio em impedir o crescimento do grão austenítico são bem conhecidos<sup>(1,2)</sup>, embora ainda ocorram dúvidas em relação a maneira em que este elemento altera a T<sub>cg</sub> (temperatura crítica de crescimento do grão austenítico)<sup>(3)</sup>.

Como o tamanho do grão austenítico é um importante fator na determinação das propriedades mecânicas dos aços microligados<sup>(4)</sup>, é essencial conhecê-lo com precisão.

A partir dos dados obtidos da literatura<sup>(3)</sup> verificou-se que não existiam informações sobre os efeitos do níobio na cinética de crescimento do grão austenítico de aços carbono, e por isso este trabalho foi iniciado.

### 2. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Foram fabricados lingotes de 5 kg em forno de indução à vácuo (10<sup>-3</sup> torr) sendo que o níobio foi adicionado na forma de ferro-liga (Fe - 63%Nb) de alta pureza. A análise destes aços é apresentada na tabela I.

Tabela I - Composição química dos aços.

Aço	% em peso			ppm	
	C	Mn	Nb	C <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
C20	0,20	1,04	-	20	29
C20Nb3	0,20	1,05	0,027	15	40
C40	0,40	1,05	-	15	31
C40Nb3	0,40	1,05	0,027	19	37
C80	0,80	1,04	-	13	32
C80Nb3	0,80	1,05	0,050	13	31

(1) Contribuição Técnica apresentada no 40º Congresso Anual da AIM, julho de 1985, Rio de Janeiro, R.J.

(2) Membro da AIM. Engº Mecânico e Dr. em Engenharia, Professor Assistente Doutor da FIC - UNICAMP.

Os lingotes produzidos foram homogeneizados a 1200°C por 8 horas e forjados posteriormente na faixa de 1100 a 900°C (temperatura final de forjamento de 900°C). Posteriormente foram trellados a frio, obtendo-se barras cilíndricas com 5 mm de diâmetro.

A determinação do tamanho de grão austenítico foi realizada em amostras cilíndricas com 5 mm de diâmetro e 15 mm de comprimento. As amostras foram aquecidas em forno a vácuo ( $10^{-4}$  torr) por diferentes períodos de tempo e com a temperatura variando de 900 a 1300°C. A seguir foram resfriados em água, embutidas em haquelite e serradas longitudinalmente.

Por razões já discutidas em outro trabalho (3) empregou-se o reativo de Vilela com 0,5% de lauril sulfonato de sódio para revelar o contorno do antigo grão austenítico.

O tamanho de grão foi determinado pelo método de Intercepção Linear (norma ASTM/P-29-421, 1967).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A cinética de crescimento do grão austenítico em aços com 0,20/0,40/0,80% C, com e sem a adição de 0,031% Nb é apresentada nas figuras 1 a 3. Observa-se que o grão cresce rapidamente com apenas 10 minutos de aquecimento, passando de 10  $\mu$ m a 40  $\mu$ m a uma temperatura de 1000°C. Depois disso o grão cresce lentamente - não havendo muita diferença no diâmetro do grão austenítico de um aço aquecido por 30 minutos ou 2 horas numa certa temperatura. Este rápido crescimento do grão nos primeiros 10 minutos de aquecimento deve ser levado em conta quando se determina o seu tamanho. Nos quatro métodos existentes para se delinear o contorno de grão austenítico, (oxidação, Mc Quaid - Ehn, técnica diferencial e reativo químico), três utilizam aquecimento em temperaturas acima de 900°C por 30 minutos, o que altera completamente o tamanho original do grão austenítico.

Após 1 hora em uma determinada temperatura o tamanho do grão praticamente fica estável e só aumentará novamente, de uma maneira sensível, se a tempera

tura for aumentada. Isto vale para os aços com e sem a adição de nióbio.

A partir dos dados das figuras 1 a 3 construiu-se a curva isocronal (para tempo igual a 1 hora) de crescimento do grão austenítico (fig. 4). Observa-se que os aços com nióbio apresentaram sempre um menor tamanho de grão austenítico, para todas as temperaturas de aquecimento utilizadas.

A curva isocronal obtida para o aço C40Nb3 foi comparada com as de aços semelhantes obtidos por outros pesquisadores (2,6,7) (fig. 5). Nota-se que para aços com baixa TFFT, temperatura final de tratamento termomecânico, (900°C por ex.) não foi observada uma  $T_{cg}$  (temperatura crítica de crescimento do grão austenítico ou seja, uma temperatura a partir da qual o diâmetro do grão austenítico aumentaria drasticamente. Para aços com alta (1250°C, por ex.) TFFT foi observada uma  $T_{cg}$  a 1100°C. O motivo destas diferenças nas curvas de crescimento, deve-se, provavelmente, aos diferentes teores de nióbio dissolvidos na austenita, na TFFT. Assim, o aço empregado por Coladas (2) apresentava todo o nióbio em solução na austenita na TFFT, enquanto que para aço empregado neste trabalho a fração do nióbio dissolvido na austenita seria de apenas 4% do teor total do nióbio do aço (este cálculo pode ser feito utilizando-se os dados de um trabalho anterior (8)). Isto é razoável de se admitir, visto que a cinética de precipitação do Nb(C,N) é bastante rápida em amostras deformadas, mesmo a 900°C. Lubon (9) observou que em um aço com 0,21% C e 0,041% Nb, submetido a uma deformação de 32% a 900°C, a precipitação do Nb(C,N) era completada em apenas 5 minutos. Assim os passes subsequentes de forjamento em temperaturas próximas a 900°C só serviriam para aumentar o diâmetro das partículas de Nb(C,N) já precipitadas (10), tornando-as menos eficientes em "segurar" o contorno do grão austenítico.

Já nos aços processados (laminais, forjados, etc) em altas temperaturas (1300°C), a precipitação das partículas de Nb(C,N) ocorreria após processamento final do mesmo, não havendo o coalescimento das mesmas. Assim, as partículas formadas nestes aços seriam menores e mais eficientes em "segurar" o contorno

do grão austenítico. Deve-se ainda observar que aços com alta TPTT (>1250°C) apresentaram uma Tcg da ordem 1100°C, ou seja, 150 a 200°C menor que a TTTT. Como os aços deste trabalho foram forjados a 900°C, a sua Tcg deveria ser menor que 900°C. Como as experiências de crescimento do grão austenítico só foram realizadas em temperaturas superiores a 900°C, é possível que este seja também um motivo para não detecção do Tcg.

A curva isocronal do aço C80N3 foi comparada com a de aços semelhantes obtidas por outros pesquisadores (11,12) e também não foi encontrada uma Tcg para estes aços. A explicação para este caso é a mesma para a figura anterior, exceto para um aço (12), em que TPTT não era conhecida.

A partir do método de Gladman (1) tentou-se estimar a Tcg para os aços deste trabalho. Tem-se que:

$$r_c = \frac{6}{z} R_0 f \left( \frac{3}{z} - \frac{2}{z} \right)^{-1} \quad (1.1)$$

onde:

Rc = raio médio do grão austenítico

z = fator de heterogeneidade

f = fração volumétrica do precipitado, no caso Nb(C,N)

r<sub>c</sub> = raio do precipitado acima do qual há o crescimento do grão austenítico

O valor de f foi calculado anteriormente (13) e vale:

$$f = 1.11 \cdot 10^{-2} \text{ NbC} \quad (1.2)$$

onde:

NbC = % em peso de nióbio como NbC<sub>0,87</sub> no aço, que pode ser obtido para cada aço, numa determinada temperatura, através dos dados de trabalho anterior (8). Sabendo-se o valor de z, pode-se calcular o r<sub>c</sub> pela equação 1.1. O problema está em se conhecer exatamente o valor de z, pois

essa mostra z é variável, caso pode ser comprovado pela figura 7. Escolheu-se então uma faixa de variação para z: entre 2 e √2, o que aliás é sugerido por Gladman (1) e Coladas (2). A partir destes dados construiu-se os gráficos de r<sub>c</sub> x temperatura para os aços C20N3, C10N3 e C80N3 (fig. 8). Nestas mesmas figuras foram colocados os valores do raio da partícula de carboneto de nióbio, medidos por Coladas (2) e Gladman (1). A intersecção das curvas r<sub>c</sub> e r<sub>c</sub> fornece o valor da T<sub>cg</sub>, a qual é apresentada na tabela II. Deve-se observar que muitos valores desta tabela foram obtidos por extrapolação.

AÇO	T <sub>cg</sub> (°C)		
	COLADAS (2)	GLADMAN (1)	MÉDIA
C20N3	900 - 1030	800 - 970	875
C40N3	900 - 1050	825 - 980	905
C80N3	900 - 1075	825 - 1000	950

Tabela II. - Temperatura crítica de crescimento do grão austenítico (T<sub>cg</sub>), calculada pelo método de Gladman (1), para os aços ao nióbio deste trabalho, utilizando-se os valores do raio da partícula de carboneto de nióbio, medidos por Coladas (2) e Gladman (1).

Obviamente este cálculo não pode ser interpretado como dado preciso, visto que os valores utilizados para o raio da partícula de carboneto de nióbio foram os obtidos por Gladman (1) e Coladas (2). Entretanto como os valores obtidos por aqueles pesquisadores (1,2) eram aproximados, utilizou-se dos mesmos para se fazer uma estimativa da T<sub>cg</sub>.

A análise da tabela II indica que a hipótese anteriormente apresentada estava correta, ou seja, que a Tcg seria da ordem de 900°C e, como as medidas são feitas a partir de 900°C, é possível que a Tcg não tivesse sido detectada.

tada. Observa-se ainda que este método de cálculo da  $T_{CG}$  é bastante impreciso, pois fornece uma faixa de temperatura de até  $200^{\circ}\text{C}$ . Por outro lado, os resultados de Coladas (2) indicam que para aços com alto teor de carbono ( $0,4 \leq C \leq 0,8\%$ ) a  $T_{CG}$  seria sempre de  $1075^{\circ}\text{C}$ , independente do teor de carbono ou níbio do aço, não foram confirmados por este trabalho. Conclui-se então que nos sempre os resultados de Gladman (1) ou Coladas (2) podem ser aplicados aos aços microligados com níbio, objetivando o cálculo da  $T_{CG}$ . É necessário o desenvolvimento de um novo modelo, mais elaborado, para prever o crescimento do grão austenítico em aços ao níbio, que leve em conta a temperatura final de tratamento termomecânico, e talvez, também, a deformação e a taxa de deformação aplicada ao aço.

#### 4. CONCLUSÕES

As seguintes conclusões foram obtidas neste trabalho:

O crescimento do grão austenítico em aços com  $0,2$  à  $0,8\%$ , com e sem a adição de  $0,03\%$  Ni, ocorre rapidamente nos primeiros 10 minutos de aquecimento para uma dada temperatura (entre  $900$  e  $1300^{\circ}\text{C}$ ). Depois disso o grão só volta a crescer de uma maneira significativa se for aumentada a temperatura.

Os aços ao níbio apresentavam uma cinética de crescimento do grão austenítico semelhante ao dos aços sem níbio, com a diferença que para todas as temperaturas e tempos testados os aços com níbio apresentavam um menor tamanho de grão austenítico.

Não foi encontrada uma  $T_{CG}$  (temperatura crítica de crescimento do grão austenítico) para aços com ou sem níbio na faixa de  $900$  e  $1300^{\circ}\text{C}$ .

#### AGRADECIMENTOS

À Eletrometal - Aços Fios S.A. pela preparação dos aços empregados

neste trabalho e à técnica Rita Helena B. Jacon pelo auxílio na fresa metalográfica.

#### BIBLIOGRAFIA

- GLADMAN, T. & PICKERING, F. B. - J.I.S.I., Jun. 1957, p. 653.
- COLADAS, R. et alii - Metal Science, Nov. 1977, p. 509.
- MEI, P. R. - "Efeitos da adição de níbio no crescimento do grão austenítico - Parte II", a ser apresentado neste Congresso.
- COHEN, M. & HANSEN, S. S. - "Microstructural control in microalloyed steels" In: MICON 78, Proc. Conf., ABRAMS, H. et alii, Eds., ASTM, 1979, p. 34.
- CASTELLETTI, L. C. & CUNHOVIC, O. P. - "Avaliação de métodos para determinação de tamanhos de grãos austeníticos originais em aços". In: Anais do 38º Congresso Anual da ABM, julho de 1983, São Paulo, S.P., vol. 3, p. 215.
- STEDEN, A. Von der - Stahl und Eisen, vol. 95, nº 6, Mar. 1975, p. 209.
- MELI, F. Y. et alii - Metalurgia - ABM, vol. 33, nº 241, dez. 1977, p. 743.
- MEI, P. R. & BRESCIANI FV, E. - "Solubilidade do níbio na austenita na presença de Nb(C,N)". Anais do 38º Congresso Anual da ABM, julho de 1983, São Paulo, S.P., vol. 2, p. 367.
- LEBON, A. et alii - Metal Science, vol. 9, 1975, p. 36.
- WEISS, I. & JOUES, J. J. - Met. Trans., vol. 10A, Jul. 1979, p. 831.
- KESTENBACH, H. J. et alii - "Estudo metalográfico de carbonetos eutéticos em aços microligados com níbio". Anais do 4º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. UISC, dezembro de 1980, Santa Catarina, p. 615.
- CARNEIRO, R. D. & BASTIAN, F. I. - "Efeito de tratamentos térmicos de normalização nas propriedades mecânicas do aço Niobrás - 2005 - I Encontro



Nacional de Trilho, AM, Fixação e Acessório - agosto de 1984, Rio de Janeiro, R. J.

13. MEI, P. R. - "Efeitos da adição de nióbio na estrutura e propriedades dos aços com médio e alto teor de carbono". Tese de Doutorado, UNICAMP, dez. 1983, p. 311.

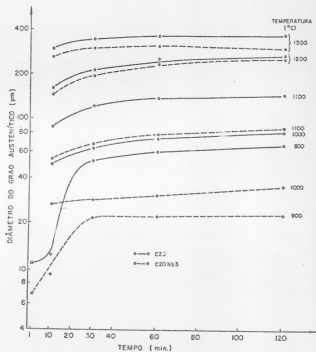


Figura 1 - Cinética de crescimento do grão austenítico para os aços C18 e C20Ni3

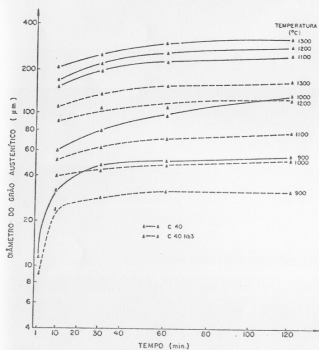


Figura 2 - Cinética de crescimento do grão austenítico para os aços C40 e C40Ni3.

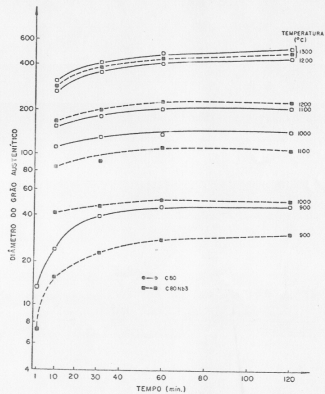


Figura 3 - Cinética de crescimento do grão austenítico para os aços C80 e C20Ni3.

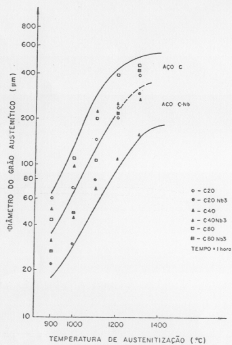


Figura 4 - Curva isocronal de crescimento do grão austenítico de aços com e sem nióbio.

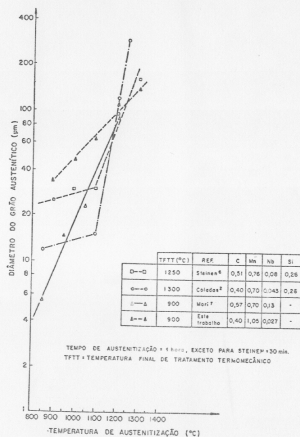
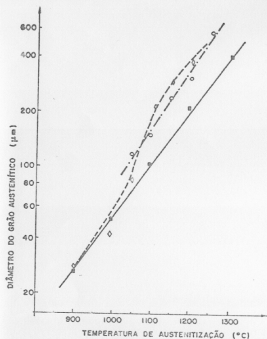


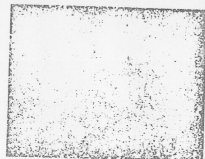
Figura 5 - Curva isocronal de crescimento do grão austenítico de aços com nióbio.



	TFTT (°C)	TEMPO AUST. min.	C	Mn	Nb	Si	REF.
○—○	900	30	0,80	1,03	0,03	—	ESTE TRABALHO
○—○	900	30	0,75	0,90	0,04	0,17	KESTENSACH <sup>(1)</sup>
○—○	?	2,5	0,75	1,27	0,02	0,82	BASTIAN <sup>(2)</sup>

TFTT = TEMPERATURA FINAL DE TRATAMENTO TERMO-MECÂNICO

Figura 6 - Curva isocronal de crescimento do grão austenítico de aço com nióbio.



nital

Figura 7 - Aço C20Nb3 aquecido a 900°C por 1 hora e transformado parcialmente. Nota-se a rede de ferrita proeutetóide (branca) no contorno do antigo grão austenítico (agora martensítico).

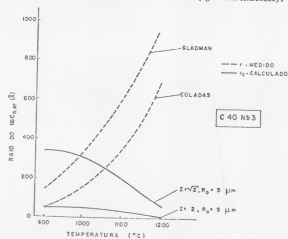


Figura 8 - Razão da partícula de carboneto de nióbio para o aço C40Nb3, após 1 hora nas temperaturas indicadas.

EFFECTS OF NIOBIUM ADDITIONS ON THE AUSTENITIC GRAIN GROWTH OF CARBON STEELS -  
Part II

ABSTRACT

Experiments were carried out to evaluate the kinetics of austenitic grain growth in steels with 0.2 to 0.8% C, 14 Mn, with or without 0.031% Nb, in the temperature range of 900 to 1300°C.

The results obtained were compared with the results available on the literature in order to understand the effects of niobium additions on the  $T_{cg}$  (critical temperature for the austenitic grain growth) of microalloyed carbon steels.

EFEITO DA LAMINAÇÃO A QUENTE SOBRE AS MICROESTRUTURAS AUSTENITICAS E PERLITICAS EM AÇOS EUTETÓIDES MICROLIGADOS AO NÍOBIO<sup>(1)</sup>

HANS-JÜRGEN KESTENBACH, OSCAR BALANCIN E SÉRGIO  
LUIZ VENDRASCO<sup>(2)</sup>

RESUMO

Aços eutetóides com e sem adição de nióbio foram submetidos a ensaios de laminação em escala de laboratório. Investigaram-se os efeitos do nióbio e da temperatura de laminação sobre o processamento austenítico e a microestrutura perlítica após a transformação. O nióbio solubilizado a 1200°C mostrou-se capaz de afetar tanto o tamanho médio das colônias como o espaçamento lamelar da perlita, atuando principalmente através do seu efeito inibidor sobre a recristalização na austenita.

(1) Trabalho a ser apresentado ao XL Congresso Anual da AEM, Rio de Janeiro, Julho (1985)

(2) Professor Titular, Professor Adjunto e Bolsista de Iniciação Científica, respectivamente, no Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos.