

FIG. 7 - Variação da dureza de amostras ferreadas de  $6000^{\circ}\text{C}$  e duplo revenidas ( $2h + 2h$ ) à  $525^{\circ}\text{C}$ , em função do tempo de revenimento à  $525^{\circ}\text{C}$ .

7-1-11  
39º Congresso Anual da ABM, 5 a 10 de Julho 1984, B. Horizonte

EFEITO DE ADIÇÕES DO NÍOBIO NA ESTRUTURA E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS COM MÉDIO E ALTO TEOR DE CARBONO

Paulo Roberto Mei<sup>(1)</sup>

Ettore Bresciani Filho<sup>(2)</sup>

#### RESUMO

Foi estudado o efeito da adição de 0,03%Ni na microestrutura, dureza, resistência mecânica e tamanho de grão austenítico de aços com o teor de carbono variando de 0,2 a 0,8% em peso, e submetidos a diferentes tipos de tratamentos térmicos.

Observou-se que o nióbio em solução na austenita pode elevar em até 150 MPa a resistência mecânica desses aços, sem contudo ocasionar uma perda considerável de ductilidade.

(1) Membro da ABM, Engenheiro Mecânico e Doutor em Engenharia, Professor Assistente Doutor da FEC-UNICAMP, Campinas - SP.

(2) Membro da ABM, Engenheiro Aeronáutico, Doutor em Engenharia e Professor Livre-Docente da FEC-UNICAMP e EPUSP.

## INTRODUÇÃO

Os efeitos de microadições ( $< 0,1\%$  em peso) de elementos com tendência à formação de carbonitretos, como o vanádio, titânio e nióbio, nas propriedades mecânicas dos aços com baixo teor de carbono ( $C < 0,20\%$ ) são, atualmente, bem conhecidas<sup>(1-4)</sup>. Esses elementos refinam o grão ferrítico e endurecem a ferrita pela precipitação de carbonitretos, causando um aumento na resistência mecânica dos aços. Entretanto, se os efeitos do vanádio, titânio e nióbio nos aços com baixo teor de carbono são bem conhecidos, o mesmo não se pode dizer em relação aos efeitos destes elementos em aços com médio e alto teor de carbono ( $0,20 < C < 0,80\%$ ).

As primeiras microadições de elementos com forte tendência à formação de carbonitretos, nos aços com médio e alto teor de carbono foram feitas com vanádio<sup>(5-6)</sup>, pois, segundo Gladman<sup>(7)</sup>, o nióbio e o titânio não alterariam as propriedades mecânicas desses aços devido à baixa solubilidade destes elementos na austenita. Em tanto outros pesquisadores<sup>(8-10)</sup> verificaram, recentemente, que o nióbio poderia elevar em até 100 MPa o limite de escoamento desses aços, desde que se realizasse o tratamento termomecânico em temperaturas compatíveis com a solubilização do nióbio na austenita (1200 a 1300°C).

Atualmente começa-se a utilizar aços com médio e alto teor de carbono microligados com nióbio em componentes forjados para a indústria automotiva<sup>(11)</sup>, trilhos ferroviários<sup>(12-13)</sup> e barras empregadas para concreto de alta resistência<sup>(14)</sup>. Porém a otimização das propriedades mecânicas pelos fabricantes é quase sempre feita de uma maneira empírica, pois pouco se conhece sobre os mecanismos de atuação do nióbio na estrutura e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas desses aços. Isto leva, certas vezes, à uma

deterioração na qualidade de aço microligado com nióbio devido a um uso inadequado do mesmo<sup>(14)</sup>.

O objetivo deste trabalho, em decorrência do acima exposto, é o de avaliar o potencial de aplicação do nióbio nos aços com médio e alto teor de carbono, com estrutura ferrítica-perlítica, através da compreensão dos mecanismos de atuação do nióbio na estrutura e nas propriedades mecânicas desses materiais.

## 2. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Foram fabricados lingotes de 5 kg em forno de indução à vácuo ( $10^{-3}$  torr) sendo que o nióbio foi adicionado na forma de ferro-liga (Fe-65Nb) 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	O <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	1,03	0,050	13	31

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).

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina Universal de Ensaios, com acionamento hidráulico, na Mohr-Federhaff. As dimensões dos corpos de prova empregados foram:  $L_0 = 50$  mm e  $D_0 = 6$  mm. Foram realizados 2 ensaios para cada amostra e os resultados

indicados nas figuras referem-se a média dos valores obtidos.

O tamanho de grão austenítico foi medido em amostras retiradas dos corpos de prova e temperadas, empregando-se o reativo de Níchet<sup>(15)</sup> para a revelação do antigo contorno de grão austenítico.

A dureza Vickers foi determinada em um equipamento Wolpertector com carga de 10 kg. Os resultados apresentados nas figuras representam o valor médio de 10 medidas.

O aquecimento dos lingotes foi realizado em forno ao ar, por 30 minutos, seguindo-se o resfriamento ao ar livre ou com ar comprimido. O resfriamento foi realizado de maneira padronizada para que não causasse interferências nos resultados dos ensaios de tração.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para se estudar o efeito do nióbio nas propriedades mecânicas dos aços com 0,2; 0,4 e 0,5%C utilizou-se três condições distintas de tratamentos térmicos:

1. Na primeira série de ensaios os aços foram forjados a 800°C e resfriados ao ar. Estes aços eram constituídos de ferrita poligonal e perlita (Fig. 1). Com a adição de nióbio houve uma redução no tamanho do grão austenítico e um ligeiro aumento da dureza, do limite de escoamento (10 MPa) e do limite de resistência, em no entanto ocorrer redução da ductilidade (medida através do alongamento e da estricção) (Fig. 2).

2. A segunda série de ensaios foi realizada nos mesmos aços, e que após o forjamento, submetidos a um aquecimento a 1250°C por 30 minutos, com posterior resfriamento ao ar. Esta temperatura é suficiente para solubilizar, praticamente, todo o nióbio nestes aços<sup>(16,17)</sup>. Escolheu-se 30 minutos com o tempo de aquecimento das

amostras, pois segundo Frodl<sup>(10)</sup>, seria suficiente para que todo o nióbio entrasse em solução na austenita. O intuito deste ensaio era o de observar os efeitos do nióbio, em solução na austenita, na estrutura e propriedades dos aços. Pela figura 3, nota-se que a ferrita poligonal (a única existente no ensaio anterior, fig.1) do aço C20 foi parcialmente substituída pela ferrita de crescimento lateral (side growth ferrite) e pela ferrita de Widmanstätten intragranular (empregou-se a nomenclatura de Aaronson<sup>(18)</sup>, Honeycombe<sup>(19)</sup> e Colpaert<sup>(20)</sup> para a classificação das diferentes morfologias de ferrita). No aço C20NB3 a estrutura de ferrita poligonal e perlita foi substituída pela ferrita acicular, com a perlita em forma de cordões entre as ripas de ferrita. O tamanho do grão austenítico no aço com nióbio mostrou-se menor que o do aço carbono, embora ambos tenham crescido muito com o aquecimento a 1250°C, indicando que nesta temperatura o nióbio perde o seu poder de "segurar" o contorno de grão austenítico, fato já evidenciado em outro trabalho<sup>(21)</sup>. Nos aços com 0,4%C verificou-se que houve uma redução na fração volumétrica da ferrita comparativamente aos aços da primeira série. Também a ferrita poligonal dos aços da primeira série foi parcialmente substituída pela ferrita de crescimento lateral e pela de Widmanstätten intragranular. Para os aços eutetóides (Fig. 3) é difícil de se verificar diferenças de estruturas utilizando-se apenas a microscopia ótica.

Analisando-se agora a figura 4 observa-se que o nióbio aumentou em média 80 MPa o limite de escoamento e em 50 MPa o limite de resistência destes aços, o que está de acordo com os resultados de Brownrigg<sup>(8)</sup>, Steinen<sup>(9)</sup> e Frodl<sup>(10)</sup>, para aços com 0,3 a 0,5%C. O aumento da resistência mecânica e na dureza provocado pelo nióbio deve ter sido devido à:

redução do tamanho de grão austenítico (efeito apenas marginal neste caso)

endurecimento da ferrita proeutetóide e ferrita da perlita pela precipitação do Nb(C,N) (17,22)

atraso na decomposição difusional da austenita com a formação de produtos mais "duros" (substituição da ferrita da perlita e da perlita pela bainita) (17,22).

Ve-se observar que embora o nióbio tenha aumentado a resistência crítica dos aços, houve também uma pequena perda de ductilidade dos mesmos. Quanto às diferenças no tamanho de grão austenítico entre diversos aços (C40 e C20, por ex.), nada se pode afirmar, pois não se controlou as variáveis do processo de laminação, as inhomogeneidades e taxas de deformação aplicadas nas diferentes barras nem distintas, e isso deve ter afetado o posterior crescimento de grão austenítico.

3. A terceira série de ensaios foi realizada nos mesmos aços da primeira série, só que após o forjamento os aços foram submetidos a um aquecimento a 1250°C por 30 minutos e resfriados com ar comprimido. A estrutura observada nestes aços foi semelhante aos da segunda série, com a diferença que nos aços com 0,41C se observou uma menor fração volumétrica na ferrita devido ao aumento da taxa de resfriamento, conforme já explicado em outro trabalho (17). Estes resultados estão de acordo com os de Steinen (9), que observou redução na fração volumétrica da ferrita em aços 0,51C quando o resfriamento ao ar era substituído por aquele com ar comprimido. Steinen (9) também verificou que o nióbio substituiu a ferrita por perlita pela bainita-martensita, o que provocava um aumento no limite de escoamento do aço. Observando-se agora a figura 5 verifica-se que o nióbio provocou um aumento de até 100 MPa no limite de esco-

amento e de até 60 MPa no limite de resistência, com uma pequena redução de ductilidade. Nota-se também nesta figura um aumento significativo na dureza dos aços pela adição de nióbio, e que, ambos os aços (com e sem nióbio) apresentavam um grande tamanho de grão austenítico. Os efeitos do nióbio de aumentar a resistência mecânica são os mesmos discutidos para a segunda série, só que mais pronunciados devido à maior taxa de resfriamento empregada.

Resumindo, pode-se dizer que o aumento na resistência mecânica dos aços provocado pelo nióbio estaria associado à redução do tamanho de grão austenítico, precipitação de Nb(C,N) na ferrita e atraso na decomposição difusional da austenita. Todos esses efeitos são provocados pela dissolução do nióbio na austenita, e os dois primeiros pela posterior precipitação do nióbio como Nb(C,N) durante o resfriamento dos aços. Entretanto como nos aços com médio e alto teor de carbono a temperatura de solubilização do nióbio é alta (1220°C para o aço com 0,41C e 1330°C para o aço com 0,81C, ambos com 0,031Nb) (16), durante a solubilização dos mesmos ocorre um drástico crescimento do grão austenítico (alcançando diâmetros da ordem de 100 a 500  $\mu\text{m}$ ) (21), o que compromete a sua tenacidade (7,23). Seria então recomendado que após a solubilização do nióbio, fosse imediatamente realizado o tratamento termomecânico, que objetivaria a redução do tamanho do grão austenítico e das partículas de Nb(C,N) precipitadas, tomando-se o cuidado de se utilizar taxas de deformação suficientemente altas para não provocar o coalescimento precoce das partículas de Nb(C,N) (24). Com isso o aço aliaria à sua alta resistência mecânica, uma boa tenacidade (deve-se ainda lembrar que o nióbio aumenta a resistência à fadiga dos aços eutetóides, porém com uma redução de sua tenacidade, medida através do teste COD) (25).

## CONCLUSÕES

A adição de 0,031Nb em aços com teor de carbono variando de 0,81, forjados a 900°C, levou a uma redução pela metade do tamanho do grão sustentivo, um pequeno aumento no limite de escoamento (20 MPa) sem no entanto causar uma redução da ductilidade. Com o resaquecimento desses aços a 1250°C, por 30 minutos, e posterior resfriamento ao ar ou com ar comprimido, os aços não apresentaram, comparativamente aos aços sem a adição deste elemento, um aumento de até 130 MPa na resistência mecânica, porém com pequena perda de ductilidade.

## AGRADECIMENTOS

Ao Eng<sup>o</sup> Carlos Alfredo B. Campos do Centro de Tecnologia da UFPA, pelo auxílio prestado nos ensaios de tração e de dureza. À Eletrometal - Aços Finos S.A. (Sumaré - SP) pela preparação de lingotes de aço, e à CBMM - Companhia Brasileira de Mineração Metalúrgica pelo apoio financeiro recebido durante parte da duração deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- GLADMAN, T. et alii - "Structure - property relationships in high-strength microalloyed steels". In: Microalloying 75, Proc. Cong., Union Carbide Corp., New York, 1977, p. 25.
- MEYER, L. et alii - "Nb, Ti and V in normalized, thermomechanically treated and cold-rolled steels". Idem ref. 1, p. 153.
- BAKER, T. et alii - Sci. Progress, Oxford, vol. 65, 1978, p. 493.

- 4) COHEN, M. & HANSEN, S.S. - "Micro-structural control in micro alloyed steels". In: MiCon 78, Proc. Conf., ABRAMS, H. et alii, Eds., ASTM, 1979, p. 31.
- 5) FLÜGGE, J. et alii - Stahl und Eisen, vol. 99, n<sup>o</sup> 16, 13 Aug. 1979, p. 841.
- 6) ENGINEER, S. Von - Technische Bericht, vol. 2, n<sup>o</sup> 2, 1976, p. 105.
- 7) GLADMAN, T. et alii - J.I.S.I., Dec. 1972, p. 916.
- 8) BROWNFIGG, A. & BOELEN, R. - Phase Transformations, vol. 11, 1979, p. V-15.
- 9) STEINEN, A. von der et alii - Stahl und Eisen, vol. 95, n<sup>o</sup> 6, 13 Mar. 1975, p. 209.
- 10) FRODL, D. et alii - Härterei Technische Mitteilungen, vol. 29, 1974, p. 169.
- 11) ALBIERO, W. - Metalurgia - ABM, vol. 37, n<sup>o</sup> 281, Abr. 1981, p. 192.
- 12) NOLASCO, C.A. et alii - Metalurgia - ABM, vol. 33, n<sup>o</sup> 294, Mai 1977, p. 257.
- 13) NOLASCO, C.A. et alii - Metalurgia - ABM, vol. 34, n<sup>o</sup> 245, Abr. 1978, p. 241.
- 14) GRAY, M. - "Hot-rolling of HSLA concrete reinforcing bar and other niobium containing steel". ILAFSA Conf., Lima, Peru, 21-25 Sep. 1975.
- 15) BÉCHET, S. & BEAUJARD, L. - Revue de Metallurgie, France, n<sup>o</sup> 10, 1955, p. 850.
- 16) MEI, P.R. & BRESCIANI F., E. - "Solubilidade do nióbio na austenita na presença do Nb(C,N)" - Anais do 38<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM, vol. 2, julho de 1983, ABM, S.P., p. 167.
- 17) MEI, P.R. - "Efeitos da adição de nióbio na estrutura e pro-

riedades dos aços com médio e alto teor de carbono". Insp. de Doutorado, Faculdade de Engenharia da UNICAMP, Dezembro de 1983, Campinas, SP .

AARONSON, H.I. - "The proeutectoid ferrite and the proeutectoid cementite reactions". In: Decomposition of austenite by diffusional processes. ZACKAY, V.F. & AARONSON, H.I., Eds., Interscience Publisher, USA, 1962, p. 387.

HONEYCOMBE, R.W.K. - Metal Science, Jan. 1980, p. 20.

COLPAERT, H. - Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 3ª ed., Edgard Blücher, São Paulo, 1974, p.

MEI, P.R. & BRESCIANI Fª, E. - "Efeito do nióbio na cinética de crescimento do grão austenítico dos aços com médio e alto teor de carbono". A ser apresentado.

MEI, P.R. & BRESCIANI Fª, E. - "Efeito de adições de nióbio na dureza e na formação da perlita". Anais do 38º Congresso Anual da ABM, vol. 2, Julho de 1983, ABM, SP, p. 389.

PICKERING, F.B. - Physical metallurgy and the design for steels Applied Science Publishers, London, 1978, p. 95.

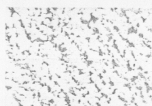
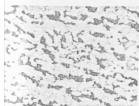
AKBEN, M.G. et alii - Acta Met., vol. 29, 1981, p. 111.

BASTIAN, F.L. et alii - "Influence of niobium additions on the mechanical properties of rail steels". International Conference on Fracture Prevention in Energy and Transport Systems, Proc., COPPE/UFRJ Rio de Janeiro, 1983, p. 149.

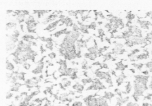
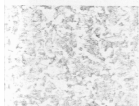
## ABSTRACT

The effect of 0.031Nb addition on the microstructure, hardness, tensile strength and austenite grain diameter, in steel with 0.1-0.8wtC, thermal treated at different conditions was investigated.

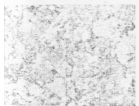
It is shown that niobium dissolved in the austenite can increase the tensile strength up to 130 MPa, without affecting seriously the ductility.



C20Nb3



C40Nb3



C80Nb3

1 - Microestrutura dos aços após forjamento a 900°C. Todas as fotos com 500X, atacadas com nital 2%.

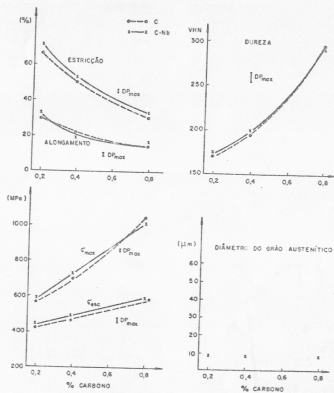
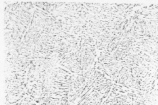
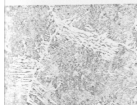
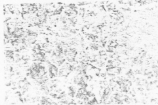
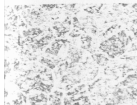


Fig. 2 - Efeito do nióbio nas propriedades mecânicas dos aços após o forjamento a 900°C, seguido de resfriamento ao ar.

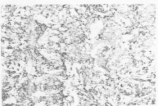
D<sub>r</sub>max = maior desvio padrão observado



C20Nb3



C40Nb3



C80Nb3

3 - Microestrutura dos aços após forjamento a 900°C, reaquecimento a 1250°C por 30 minutos, seguido de resfriamento ao ar. Todas as fotos com 80X, atacadas com nital 2%.

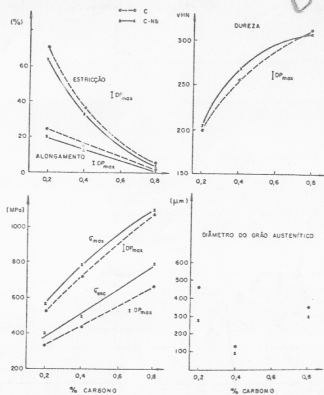
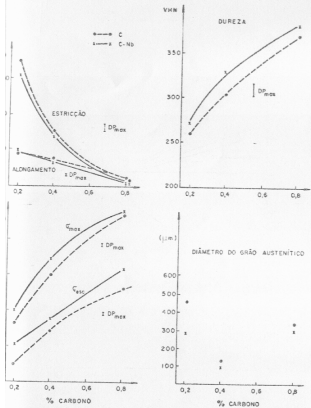


Fig. 4 - Efeito do nióbio nas propriedades mecânicas dos aços após um aquecimento a 1250°C por 30 minutos, seguido de resfriamento ao ar.

D.P.  $_{max}$  = maior desvio padrão observado





5 - Efeito do níbio nas propriedades mecânicas dos aços após um aquecimento a  $1250^{\circ}\text{C}$  por 30 minutos, seguido de resfriamento com ar comprimido.

D.P. <sub>max</sub> = maior desvio padrão observado

Efeito de Adições de Níbio em Liga Fe-18Cr-10Ni com Baixo teor de Interticiais.

Jan Vatacuk (1)  
 Fernando José Gomes Lanagraf (2)  
 Leopold Sacovsky (3)  
 José Alberto Pacheco Vieira (4)

#### RESUMO

Estudou-se a solubilidade do Níbio em liga austenítica 18Cr-10Ni, bem como a resposta aos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento.

Para tanto foram utilizados três materiais com os seguintes teores de Nióbio: 0,46; 0,94; 1,90.

Os resultados indicam que todas as ligas solubilizadas endurecem durante envelhecimentos, e que a  $1200^{\circ}\text{C}$  cerca de 1,9% de Níbio entram em solução.

(1) Engenheiro Metalurgista; Pesquisador do Instituto Mauá de Tecnologia Centro de Pesquisas; Professor da Escola de Engenharia Mauá, São Caetano do Sul - SP

(2) Membro da ASM, Engenheiro Metalurgista; Pesquisador Lotado no Laboratório de Elaboração de Metais e Ligas Divisão de Metalurgia-IPT; Professor da Escola de Engenharia Mauá, São Caetano do Sul - SP

(3) Assistente Aluno da Disciplina Ciência dos Materiais Metalúrgicos na Escola de Engenharia Mauá, São Caetano do Sul - SP

(4) Engenheiro Metalurgista; Professor da Escola de Engenharia Mauá, São Caetano do Sul - SP