

TIPOS DE CUSTO	FORNOS	
	Sal 70 x 100	Leito 60 x 100
1. Depreciação - 5 anos - 5000 ha./ano preço de reposição + instalação	48	80
2. Insumos:		
. energia	80	70
. nitrogênio Cx\$ 3,00/m <sup>3</sup>		75
. propano Cx\$ 3,82/m <sup>3</sup>		19
. Sal CC-80 Cx\$ 122,80/kg.	98	
. cadinho/cesto	20	31
3. Mão de obra:		
. 1 temperador Cx\$ 35,00/h.	97	97
4. Manutenção:		
. critério VDE	43	70
Custo máquina + MOD + encargos (abril/87)	Cx\$ 386	Cx\$ 442

TABELA 1: CUSTOS COMPARATIVOS SAL X LEITO FLUIDIZADO

EFEITO DO NÍOBIO NO ESPAÇAMENTO INTERLAMELAR DA PERLITA<sup>(1)</sup>Paulo Roberto Mei<sup>(2)</sup>RESUMO

Foi estudada o efeito da microadição de nióbio (0,03% em peso) no espaçamento interlamelar da perlita de amostras de aço 2,34% C - 18Mn, obtidas por transformações isotérmicas parciais. Observou-se o efeito do nióbio em elevar a temperatura eutetóide tanto por curvas ITT como por extrapolação do gráfico recíproco de espaçamento interlamelar em função da temperatura de transformação sustentada - perlita. Foram também efetuadas medidas de dureza da perlita em aço com e sem nióbio, em amostras obtidas isotermicamente em diferentes temperaturas.

(1) Contribuição Técnica apresentada no 42º Congresso Anual da ABM; Salvador, Bahia, novembro de 1987.

(2) Membro da ABM, Engenheiro Mecânico e Doutor em Engenharia Mecânica. Professor Assistente Doutor do Departamento de Engenharia de Materiais. FEC-UNICAMP, Campinas, SP.

## INTRODUÇÃO

A adição de nióbio em aços eutetóides pode provocar vários efeitos e dentro os quais poderíamos citar:

- ) Em solução sólida na austenita o nióbio atrasa significativamente a formação da perlita, conforme já observado em trabalho anterior<sup>(1)</sup>.
- ) Sua precipitação na forma de carbonetos de nióbio restringe o crescimento do grão austenítico, sendo então conhecido como "refinador" do grão austenítico<sup>(2,3)</sup>.
- ) O nióbio em solução sólida atrasa a recristalização dinâmica da austenita<sup>(4)</sup>.

Em relação à estrutura final do aço o interesse volta-se aos efeitos do nióbio na morfologia da perlita (tamanho da colônia, espaçamento interlamelar e espessura da lamela de cementita). Segundo Gladmann<sup>(5)</sup> a diminuição do espaçamento interlamelar leva a um aumento nos limites de escoamento e resistência mecânica. A redução do diâmetro da colônia perifítica faria baixar a TT (temperatura de transição da fratura frágil/dútil)<sup>(5)</sup>. Segundo Flügge<sup>(6)</sup> a redução na espessura da lamela de cementita suscitaria uma melhoria da tenacidade.

De maneira a contribuir para este entendimento o presente trabalho foi elaborado visando estudar os efeitos do nióbio no espaçamento interlamelar da perlita.

Os efeitos dos elementos de liga no espaçamento interlamelar da perlita têm sido estudados a bastante tempo. Pellissier<sup>(7)</sup> observou que o manganês e o níquel aumentavam o espaçamento interlamelar da perlita, enquanto que o cobalto e o níquel

de Pellissier<sup>(7)</sup> constatou também que o espaçamento interlamelar variava linearmente com o recíproco da temperatura, conforme previsto por Zener<sup>(8)</sup>. Posteriormente Al-Salman<sup>(9)</sup> observou que a adição de silício reduzia o espaçamento interlamelar da perlita em aços eutetóides e que a linearidade prevista por Zener<sup>(8)</sup> era seguida.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os aços empregados neste trabalho foram preparados em forno de indução, sob pressão parcial de argônio, usando elementos e ligas de alta pureza. As composições químicas destes aços estão na Tabela I. Os lingotes produzidos foram homogeneizados e posteriormente laminados e forjados à quente para obtenção de barras redondas de 5 mm. As amostras usadas em dilatometria eram redondas ( $\phi = 4$ mm), com um furo central de 2mm e com 13mm de comprimento. Elas foram encapsuladas em tubos de quartzo e solubilizadas a 1300°C por 12 horas, seguindo-se têmpera em água. A seguir foram níqueladas para evitar decarbonatação. A austenitização para a realização das curvas TTT foi feita a 900°C por 1 hora.

Tabela I - Composição química dos aços utilizados.

AÇO	% em peso		
	C	Mn	Nb
CS0	0,84	1,09	-
CS0Nb3	0,84	1,07	0,032

As amostras empregadas para transformações isotérmicas em banho de estanho eram redondas, com 5mm de diâmetro e 10mm de espessura. Foram solubilizadas a 1350°C em forno à vácuo, por horas, seguindo-se tempera em óleo. Antes da transformação isotérmica as amostras foram austenitizadas a 1350°C por 3 minutos.

A microdureza da perlita foi determinada sob a carga de 00g. Os valores encontrados no texto constituem a média de 10 medidas.

As curvas TTT foram realizadas num dilatômetro, usando óleo como gás refrigerante.

O espaçamento interlamelar da perlita foi determinado em amostras parcialmente transformadas em banho de estanho, medindo-se em 10 regiões da amostra o espaçamento interlamelar mínimo, que corresponde ao valor real, e tirando-se a média (figura 1). A medida foi realizada diretamente sobre a tela do microscópio eletrônico de varredura com aumento de 10.000 x.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na figura 2 observa-se o recíproco do espaçamento interlamelar da perlita em função da temperatura de obtenção da mesma. A curva do aço sem nióbio foi comparada com as obtidas por Pellissier<sup>(7)</sup> e Sellars<sup>(10)</sup> para se verificar a validade dos resultados obtidos. Observou-se uma boa concordância entre os mesmos indicando que a técnica de medida utilizada é confiável. Os tempos empregados para se obter transformações parciais da austenita em perlita foram bem maiores nos aços com nióbio do que sem nióbio. Isto decorre do efeito do nióbio em solução

sólida na austenita de atrasar a sua decomposição, conforme já discutido anteriormente<sup>(11)</sup>. Para temperaturas entre 600° e 670°C o espaçamento interlamelar da perlita no aço ao nióbio foi maior que o do aço sem nióbio. Para temperaturas acima de 670°C a medida fica difícil de ser realizada pois os tempos de obtenção da perlita, principalmente no aço ao nióbio, tornam-se excessivamente longos. Por outro lado para temperaturas abaixo de 600°C a estrutura lamelar da perlita começa a degenerar (degenerate pearlite)<sup>(11)</sup> nos aços com e sem nióbio (figura 3) e a medida do espaçamento interlamelar torna-se difícil.

Fazendo-se uma projeção das curvas de espaçamento interlamelar para a temperatura na qual o mesmo seria infinito, consegue-se estimar a temperatura eutetóide ( $T_E$ ). Para o aço carbono a mesma foi estimada a partir da figura 2 em 720°C e para ao nióbio em 745°C. Numa liga Fe-C a temperatura eutetóide é estimada em 727°C<sup>(12)</sup>, porém a adição de manganês abaixa esta temperatura<sup>(12)</sup>. A temperatura de 720°C foi a mesma encontrada por Ridley<sup>(14)</sup> e Pellissier<sup>(7)</sup> em aços com composição semelhante. O nióbio sendo um estabilizador da ferrita<sup>(13)</sup> atuaria no sentido de restringir o campo austenítico elevando a temperatura eutetóide. A tendência do nióbio de elevar a temperatura eutetóide foi detectada na curva TTT (figura 4). Neste caso, no entanto, a temperatura de austenitização foi de 900°C, e nessa temperatura apenas 0,001% em peso de nióbio estaria em solução na austenita, ou seja, apenas 3% do nióbio total do aço. Esses cálculos foram feitos empregando-se um método anteriormente desenvolvido para se calcular o teor de nióbio dissolvido na austenita em equilíbrio com o carboneto de nióbio<sup>(8,16)</sup>. Em função dessa pequena solubilidade de nióbio na austenita o efeito na curva TTT não foi tão

significativo. As amostras da figura 2 foram solubilizadas a 1350°C e o teor de nióbio dissolvido seria de 0,0261, ou seja, 81% do nióbio total estaria em solução na austenita, o que causaria um aumento mais significativo na temperatura eutetóide.

Para os dois aços testados o recíproco do espaçamento interlamelar variou linearmente com a temperatura de transformação, o que está de acordo com a lei de Zener<sup>(8)</sup>:

$$\frac{1}{S} = \frac{\Delta H_V \cdot \Delta T}{4\sigma T_E}$$

onde

S = espaçamento interlamelar da perlita (espessura de 1 lamela de cementita + 1 lamela de ferrita)

T<sub>E</sub> = temperatura eutetóide

σ = energia interfacial ferrita/cementita

ΔT = (T<sub>E</sub> - T) = super-resfriamento, onde T = temperatura de formação da perlita

ΔH<sub>V</sub> = variação de entalpia na reação austenita → perlita, por unidade de volume.

A equação de Zener<sup>(8)</sup> poderia ser reescrita como:

$$S = \frac{4\sigma}{\Delta H_V} \cdot \frac{T_E}{T - T_E}$$

Observando-se novamente a figura 2, nota-se que para temperaturas entre 600 e 670°C o aço ao nióbio apresentou um maior espaçamento interlamelar da perlita, porém a extrapolação das

retas indica que acima 685°C a situação se inverteria e o aço ao nióbio apresentaria um espaçamento interlamelar menor que no aço sem nióbio. Este comportamento pode ser explicado pela equação de Zener<sup>(8)</sup>. Como o nióbio aumenta a temperatura eutetóide (T<sub>E</sub>) ele diminui a relação  $\left(\frac{T_E}{T_E - T}\right)$ , diminuindo o espaçamento interlamelar (figura 5). A diferença entre os termos  $\left(\frac{T_E}{T_E - T}\right)$  nos aços com nióbio (T<sub>E</sub> = 745°C) e sem nióbio (T<sub>E</sub> = 720°C) é grande para temperaturas próximas à temperatura eutetóide (por exemplo 700°C). Porém a medida que a temperatura de transformação vai baixando a diferença entre estes termos decresce. Se a temperatura eutetóide fosse a única diferença entre os dois aços, o espaçamento interlamelar da perlita seria sempre menor nos aços com nióbio. Pela figura 2 nota-se que isto não é verdade pois abaixo de 685°C o espaçamento interlamelar no aço ao nióbio é maior que no aço sem nióbio. Isto é possível com um aumento da energia interfacial ferrita/cementita, com a diminuição na entalpia da reação austenita → perlita ou com a variação conjunta destes dois fatores. Al-Salman<sup>(9)</sup> trabalhando com resultados parecidos para o sistema Fe-C-Si concluiu que o efeito maior do silício seria sobre a energia interfacial ferrita/cementita. Na figura 6 observa-se esquematicamente os efeitos isolados dos termos σ e  $\left(\frac{T_E}{T_E - T}\right)$  no espaçamento interlamelar da perlita para aços com e sem adição de nióbio. Foi suposto que ΔH<sub>V</sub> é constante e independente da temperatura<sup>(17)</sup>.

Procurou-se correlacionar o efeito dos elementos de liga no espaçamento interlamelar da perlita em função de suas atuações como estabilizadores da ferrita ou da austenita (tabela II), sem se obter êxito. Isto indica que nem sempre um elemento estabilizador da ferrita aumenta o espaçamento interlamelar da perlita,



o que reforça a tese de que outros fatores devam estar atuando, como energia da interface entre a ferrita e a cementita.

Elemento	Estabilizador	Efeito em S	Referência
Si	a	+	Al-Saleman <sup>(9)</sup>
Mn	γ	+	Ridley <sup>(14)</sup> -Pellissier <sup>(7)</sup>
Ni	γ	+	Ridley <sup>(14)</sup> -Pellissier <sup>(7)</sup> -Brown <sup>(18)</sup>
Co	γ	+	Pellissier <sup>(7)</sup>
Cr	a	não afeta	Ridley <sup>(14)</sup>
Nb	a	+	Mei <sup>(15)</sup>

Tabela II - Efeito de diversos elementos de liga no espaçamento interlamelar da perlita.

Mediu-se também a dureza da perlita nos aços com e sem nióbio nas diversas amostras obtidas e comparou-se o resultado com o respectivo espaçamento interlamelar da perlita (figura 7). Observa-se que a perlita do aço com nióbio apresentou um ligeiro aumento de dureza em relação a do aço sem nióbio, o que pode ser devido ao nióbio em solução sólida e/ou precipitação de partículas de carboneto de nióbio, conforme já discutido em trabalho anterior<sup>(1)</sup>. A segunda hipótese é reforçada pela observações de Dunlop<sup>(19)</sup> sobre precipitação de carboneto de vanádio na ferrita da perlita.

Na figura 8 observa-se que aços com ou sem nióbio transformados isotermicamente à mesma temperatura apresentam a mesma dureza na perlita. Isto deve-se provavelmente à superposição de

dois efeitos antagônicos do nióbio: ele aumenta o espaçamento interlamelar (reduzindo a dureza) e provoca um aumento da dureza por solução sólida e/ou precipitação de carboneto de nióbio. Como estes dois efeitos são opostos e de pequena intensidade neste caso, o resultante dos mesmos deve ter sido nulo, explicando a não influência do nióbio na dureza da perlita obtida isotermicamente.

Um aspecto que deve ficar claro neste trabalho é que as transformações foram realizadas isotermicamente. Em aços resfriados continuamente o efeito do nióbio no espaçamento interlamelar da perlita pode ser oposto. Isto porque se o nióbio estiver em solução sólida ele retardará a formação da perlita e a mesma poderá ser formada em temperaturas inferiores a de aços sem nióbio, apresentando então um espaçamento interlamelar menor. Neste caso o efeito do nióbio no espaçamento seria indireto, ou seja, via depressão da temperatura de transformação austenita - perlita.

#### 4. CONCLUSÕES

A adição de 0,03% de nióbio em um aço 0,84% C - 1% Mn provocou um aumento no espaçamento interlamelar da perlita transformada isotermicamente na faixa de 600 a 670°C, após uma austenitização das amostras a 1550°C.

A dureza da perlita obtida foi ligeiramente maior em amostras de aço com adição de nióbio do que sem adição do mesmo, supondo igual espaçamento interlamelar.

A dureza da perlita obtida isotermicamente foi a mesma para aços eutetóides com e sem nióbio, supondo a mesma temperatura de formação.

O níbio elevou a temperatura eutetóide da liga 0.84% C - 1%Ni de 720 para 745°C, aproximadamente.

AGRADECIMENTOS

Aos Drs. José Dinis de Souza e Alain Jean-Isore da Eletro - etal - Metais Especiais S/A pela colaboração na fabricação e conformação das barras de aço.

A metalógrafa Rita Helena Suso Jacom pelo trabalho na microscopia eletrônica de varredura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MEI, P. R. & BRESCIANI F<sup>a</sup>, E. Metalurgia - ASM, vol.40, n° 323, out. 1984, p. 565.

- MEI, P. R. Anais do 40º Congresso Anual da ASM, julho de 1985, Rio de Janeiro, RJ, vol. COMFIT, p. 199.

- MEI, P. R. Anais do 40º Congresso Anual da ASM, julho de 1985, Rio de Janeiro, RJ, vol. COMFIT, p. 216.

- KESTENBACH, H. J. ; BALANCIN, O.VENDRASCIO, S. L. Anais do 40º Congresso Anual da ASM, julho de 1985, Rio de Janeiro, RJ, vol. COMFIT, p. 233.

- GLADMAN, T. et alii. JISI, Dec. 1972, p. 916.

- FLUGGE, J. et alii. Stahl und Eisen, vol. 99, n° 16, 13 aug. 1979, p. 841.

- PELLISSIER, G. E. et alii. Trans. of ASM, Dec. 1942, p.1049.

- ZENER, C. Trans. Met. Soc. AIME, vol. 167, 1946, p. 150.

9 - AL-SALMAN, S.A. et alii. Acta Met., vol.27, 1979, p. 1391.

10 - CHATTOPADHYAY, S. & SELLAR, C. M. Acta Met., vol. 30, 1982, p. 157.

11 - ROLLING, G. F. & RICHMAN, R. H. Met. Trans., vol.1, Aug. 1970, p. 2095.

12 - METALS Handbook, vol. 8, ASM, Metals Park, Ohio, USA, 1975, p. 275,276.

13 - BAIN, E. C. & PAXTON, H. W. Alloying elements in steel. ASM, 1966, p. 112 e 6.

14 - RIDLEY, N. et alii. In: Chemical metallurgy of iron and steel, ISI, London, 1973, p. 268.

15 - MEI, P. R. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia de Campinas, UNICAMP, 1983.

16 - MEI, P. R. & BRESCIANI F<sup>a</sup>, E. Anais do 38º Congresso Anual da ASM, julho de 1983, vol. 2, p. 389.

17 - ANDREWS, K. W. JISI, Dec. 1956, p. 414.

18 - BRONN, D & RIDLEY, N. JISI, Sep. 1959, p. 1232.

19 - DUNLOP, G. L. et alii. Met. Trans., vol. 9A, Feb. 1978, p. 261.

ABSTRACT

The effect of niobium microaddition (0.03 weight %) on the interlamellar spacing(s) of pearlite, was studied, using 0.84% C - 1%Ni steel, isothermally transformed. It was observed that niobium rises the eutectoid temperature ( $T_E$ ) through TTT curves and extrapolation of  $SxT_E$  curves. The pearlite hardness was also determined in samples of steels with and without niobium.



S<sub>1</sub> - ESPACAMENTO INTERLAMELAR REAL  
 S<sub>2</sub> - ESPACAMENTO INTERLAMELAR MAIOR  
 QUE O REAL, DEVIDO A INCLINAÇÃO  
 DAS LAMELAS

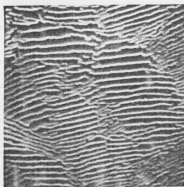
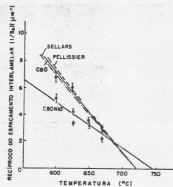


Figura 1 - Núcleos de perlita com diferentes inclinações em relação à superfície. Aço C80 transformado a 670°C por 10 min. Ataque Nital 2%. 5000X. MEV.



	Composição química % em peso			Tempo empregado nas transforma- ções parciais		
	C	Mn	Nb	T(°C)	C80	C80Nb3
Pellissier	0,78	0,63	-	600	10s	80s
Sellars	0,81	0,02	-	625	20s	150s, 200s
C80	0,84	1,09	-	650	60s	420s
C80Nb3	0,84	1,07	0,032	670	10 min.	1 e 2 h

Figura 2 - Espaçamento interlamelar em função da temperatura de transformação de aços 0,81% C com e sem adição de nióbio. Curvas obtidas por regressão linear ( $y = b + mx$ ):  
 Aço C80:  $r = 0,97$   $m = 0,25843$   $b = 40,8557$   
 Aço C80Nb3:  $r = 0,93$   $m = 0,01430$   $b = 21,5044$   
 $r$  = coeficiente de correlação

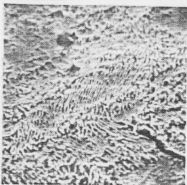


Figura 3 - Perlita degenerada obtida com transformação a 600°C por 10 min. do aço C80Nb3. 8500 X/MEV/Nital 2%.

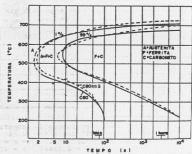


Figura 4 - Curvas de transformação isotérmica dos aços C80 e C80Nb3.

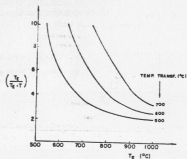


Figura 5 - Variação da relação  $(\frac{T_e}{T_e - T_0})$  em função da temperatura eutetóide ( $T_e$ ).

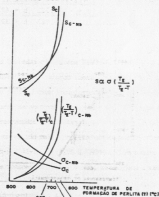


Figura 6 - Ilustração esquemática dos efeitos isolados dos termos  $(\frac{T_e}{T_e - T_0})$  e  $(T_e - T_0)$  no espaçamento interlamelar da perlita em aços com e sem nióbio.

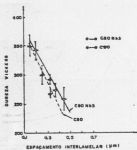


Figura 7 - Variação da dureza da perlita com o espaçamento interlamelar.

Curvas obtidas por regressão linear ( $y = b + mx$ )  
 C80N53:  $r = 0,99$   $m = -347,321$   $b = 407,107$   
 C80:  $r = 0,96$   $m = -373,913$   $b = 399,467$

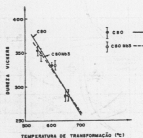


Figura 8 - Dureza da perlita em aços transformados isotermicamente.

Curvas obtidas por regressão linear ( $y = b + mx$ )  
 Aço C80:  $r = 0,96$   $m = 0,08000$   $b = 733,3333$   
 Aço C80N53:  $r = 0,97$   $m = 0,62000$   $b = 695,3333$ .

#### CARACTERÍSTICAS MICROESTRUTURAIS DE UMA LIGA FERRAL APÓS FLUÊNCIA NA FAIXA DE TEMPERATURA DE 500 A 800°C

Vitor Luiz Sorli (1)

Levi de Oliveira Bueno (2)

#### RESUMO

Realizaram-se observações do estado microestrutural de uma liga Fe-34,3% Mn-9,2% Al-1,8% Si-0,95% C, após ensaios de fluência a carga constante na faixa de 500 a 800°C, e tensões no intervalo de 30 a 490 MPa, utilizando microscopia ótica e difração de raios-X. O material apresentou acentuada instabilidade da estrutura austenítica original, com o aparecimento basicamente de ferrita nos contornos de grão. Diferentes características na formação de vazios de fluência e aspecto de fratura foram observados em função do nível de temperatura de ensaio. São discutidas as implicações dessas mudanças estruturais no comportamento de fluência apresentado pelo material.

#### 1. INTRODUÇÃO

As ligas baseadas no sistema Fe-Mn-Al representam uma possibilidade de promissora no desenvolvimento de aços inoxidáveis alternativos(1). Um dos aspectos que permanece praticamente inexplorado, se refere ao desempenho dessa classe de materiais para uso em temperaturas elevadas. Alguns dados de ruptura por fluência foram apresentados por Samyri(1) e Benz e Leavenworth(2). Recentemente foi realizado um estudo mais completo das características de fluência de uma liga Fe-34,3 Mn-9,2 Al-1,8 Si-0,95 C (FERNAL), em quatro temperaturas na faixa de 500 a 800°C e tensões de 30 a 490 MPa, abrangendo a determinação de

\* Contribuição a ser apresentada no 42º Congresso Anual da ABM.

(1) Membro da ABM, Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia de Materiais, Professor Assistente do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos.

(2) Membro da ABM, Engenheiro Mecânico Ph.D., em Engenharia de Materiais, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos.