

239553

INFLUÊNCIA DE ADIÇÕES DE NIÓBIO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇOS PARA TRILHOS *

PhD Fernando Luiz Bastian (a)
MSc Cesar Lúcio Molitz Allenstein (b)
MSc Angelo Storino de Abreu (c)

Este estudo apresenta o efeito das adições de Níobio sobre as propriedades mecânicas de Fadiga e Tenacidade à Fratura de três aços experimentais para uso na fabricação de trilhos. Um quarto aço, com o mesmo teor nominal de carbono e 0,02% de níobio e teores mais altos de Manganês e Silício, foi igualmente estudado. Ficou estabelecido que o níobio, acima de certos teores, aumenta a resistência à fadiga dos aços e que o quarto material apresentou valores extremamente mais altos para esta propriedade. Em todos os casos, estas adições de elementos de liga causaram perda de tenacidade.

-
- (*) Artigo original em Inglês, apresentado no "International Conference on Fracture Prevention in Energy and Transport Systems - November 28 December 1, 1983 - Rio de Janeiro - Brasil.
- (a) COPPE/UFRJ - Coordenação dos Programas de Pós-graduação em Engenharia - Universidade Federal do Rio de Janeiro - Cidade Universitária - RJ.
- (b) CEFET-PR - Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná/ENGISA - Inspeção e Pesquisa Aplicada à Indústria Ltda.
- (c) IEN - Instituto de Energia Nuclear - Cidade Universitária - RJ.

INTRODUÇÃO

Objetivando alcançar longa vida em serviço, os trilhos deverão apresentar alta resistência ao desgaste e a deformação bem como garantir adequada segurança contra fraturas em cargas monotônicas e cíclicas nos esforços de fadiga^(1,2). Estas propriedades podem ser obtidas pela utilização de tratamentos termomecânicos.

A resistência à tração e à dureza representam propriedades particularmente importantes na vida dos trilhos. Assim altos valores para estes parâmetros irão aumentar a resistência ao desgaste, à deformação e à fadiga⁽²⁾. A tenacidade à Fratura (Fracture Toughness) caracteriza o trilho quanto a Fraturas catastróficas a partir de defeitos pré-existentes ou trincas de Fadiga.

Aços Perlíticos têm sido usados, há muito tempo, como aços para trilhos, devido à sua grande resistência ao desgaste⁽²⁾ e também devido à sua resistência à tração e à fadiga, muito embora tenham apresentado relativamente baixa tenacidade à fratura.

As propriedades mecânicas dos aços perlíticos são controladas pelas características microestruturais da perlita, que nos aços carbono são alteradas por tratamentos termomecânicos. A adequada adição de elementos de liga contribuem para o controle das características e propriedades das estruturas perlíticas.

Trabalhos publicados mostram que a resistência mecânica, resistência à fadiga e ao desgaste nos aços perlíticos para trilhos aumenta pelo refinamento da perlita^(2,6). É também conhecido que o Manganês adicionado nestes aços, desloca as curvas TTT para a direita e para baixo, refinando a perlita resultante da transformação eutetóide⁽⁷⁾. As adições de silício produzem substancial endurecimento por solução sólida na ferrita, sendo este efeito menos pronunciado que o proporcionado pelo manganês⁽⁸⁾. Os aços que contêm adições de nióbio, podem apresentar microestrutura refinada pela ação dos carbonitretos de nióbio ancorando o crescimento de grão austenítico e proporcionando a formação de colônias perlíticas pequenas, muito embora estas adições não promovam acentuada redução no espaço interlamelar⁽²⁾.

A influência das características da perlita sobre a tenacidade à fratura é ainda assunto que causa alguma controvérsia. Alguns autores têm relatado que a tenacidade à fratura é principalmente dependente do tamanho de grão da austenita prévia, devido ao efeito deste parâmetro sobre o número de colônias perlíticas que possuam ferrita com mesma orientação cristalográfica. Desta forma para estes autores, a tenacidade não é governada pelo tamanho de colônia perlítica^(10,11). Outros autores⁽¹²⁾ encontraram que as propriedades de impacto podem ser melhoradas significativamente pelo refinamento do tamanho de colônias, enquanto o espaçamento interlamelar tem pouco efeito na temperatura de transição dúctil frágil. Poucos trabalhos sistemáticos têm sido feitos sobre a influência das adições de elementos de liga sobre a tenacidade à fratura dos aços perlíticos⁽²⁾.

O objetivo do presente trabalho é a investigação da resistência mecânica em tração, da resistência à fadiga e da tenacidade à fratura de três aços experimentais para trilhos com composição aproximadamente eutetóide e com teores crescentes de nióbio. O quarto aço, comercialmente denominado Niobrás 200, com menor adição de nióbio e mais alto manganês e silício foi também estudado.

MATERIAIS

TABELA 1. Composição Química dos Aços, % Peso.

STEEL	C	Mn	P	Si	S	Nb
1	0.76	0.87	0.015	0.14	0.021	0.000
2	0.76	0.87	0.016	0.15	0.021	0.045
3	0.76	0.86	0.016	0.15	0.021	0.098
Niobrás 200	0.74	1.28	0.024	0.76	0.022	0.020

Os primeiros três aços foram produzidos para trabalhos experimentais e foram laminados a quente na forma de trilho na bitola de 57 kg/m. O quarto aço tem sido produzido comercialmente na forma de trilho de 68 kg/m. A temperatura de reaquecimento dos lingotes foi de 1300° C e os passes de acabamento na laminação foram executados em temperaturas superiores a 1000° C. A tabela 1 mostra que os aços experimentais possuem a mesma composição básica, porém com teores crescentes de nióbio. O aço Niobrás 200 possui 0,020% de Nb e teores maiores de Mn e Si.

MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Avaliação das Propriedades de Tração:

Os corpos de prova para os ensaios mecânicos de tração foram usinados da alma dos trilhos. O eixo de solicitação dos corpos de prova ficou paralelo ao eixo longitudinal dos trilhos. Os ensaios foram realizados numa máquina Instron universal para ensaios mecânicos.

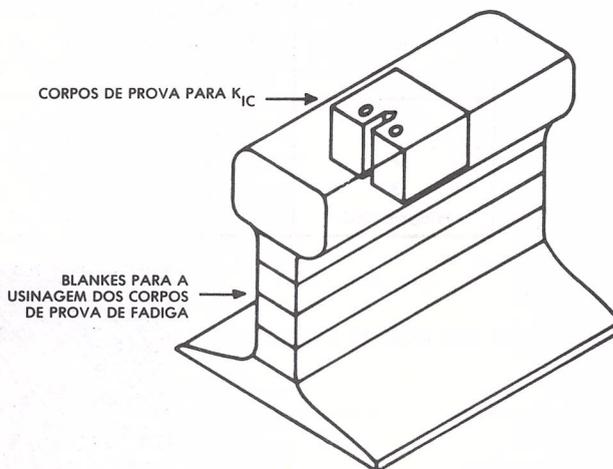


FIGURA 1. Método utilizado para a remoção de corpos de prova para fadiga e tenacidade à fratura dos aços para trilho.

Avaliação das Propriedades de Fadiga:

Foram obtidas curvas da Tensão máxima aplicada versus Número de ciclos para os quatro aços em estudo. Os corpos de prova foram retirados da alma dos trilhos como mostrado na figura 1. Os corpos de prova foram construídos com seção retangular de 12mm x 8mm (Base x Altura) com um comprimento de 90mm. Após a usinagem foram cuidadosamente polidos em pasta de diamante de 6 μm . Os corpos de prova foram ensaiados em flexão com carregamento em três pontos com vão de 70mm e $R = 0,2$. O equipamento utilizado nos ensaios foi um Vibroforo Amsler com dinamômetro de 2tf.

Avaliação da Tenacidade à Fratura:

A tenacidade à fratura em deformação plana (K_{IC}) dos aços foi avaliada usando corpo de prova compacto de tração (Compact Tension Test Pieces). Os corpos de prova foram removidos no boleto dos trilhos e usinados para as dimensões finais, sendo $B = 25\text{mm}$ e $W = 50\text{mm}$ conforme a norma British Standard BS - 5447⁽¹³⁾. A orientação dos corpos de prova é mostrada na figura 1. Esta orientação foi escolhida a fim de permitir que o corpo de prova compacto de tração pudesse ser usado nos testes dos trilhos de 57 kg/m. Os corpos de prova foram pré-trincados para um comprimento de 50mm. Os testes de K_{IC} foram executados na máquina Instron com Clip Gages também Instron. Os procedimentos de ensaios foram aqueles recomendados na Norma Inglesa.

METALOGRAFIA E FRATOLOGIA

A análise metalográfica foi executada por microscopia óptica e eletrônica de varredura. A microscopia óptica foi usada para a avaliação de inclusões não metálicas nos aços. Neste caso, os corpos de prova foram polidos em pasta de diamante de 0,25 μm . A fração volumétrica de inclusões foi avaliada por contagem, usando uma tela com 36 divisões superpostas três vezes em cada aço. A microestrutura dos aços foi estudada usando microscópio eletrônico de varredura em superfícies polidas em pasta de diamante de 0,25 μm e atacadas com Nital 2. O microscópio eletrônico de varredura foi também usado para análise fratógráfica.

RESULTADOS

As observações metalográficas mostraram que todos os aços estudados eram perlíticos, com espaçamento interlamelar fino. A figura 2 ilustra esta microestrutura para o aço com 0,098% Nb. A observação metalográfica do aço Niobrás 200 apresentou alguma dificuldade devido o seu reduzidíssimo espaçamento interlamelar resultando problemas de resolução. A ferrita pró-eutetóide foi encontrada em muito pouca quantidade. Foram tam-

bém observadas nestes aços inclusões alongadas de silicatos e sulfetos de manganês, cuja fração de volume (V_v) foi aproximadamente similar em todos os aços: Aço 1 $V_v = 0,83\%$, Aço 2 $V_v = 0,65\%$, Aço 3 $V_v = 0,65\%$, Aço Niobrás $V_v = 0,74\%$. Os resultados dos ensaios de tração são mostrados na Tabela 2.

TABELA 2. Propriedades de Tração dos Aços				
AÇO	TENSÃO LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	ALONGAMENTO (%)	ESTRICÇÃO (%)
1	501.57	951.50	12.07	10.77
2	523.30	952.40	14.50	12.70
3	524.00	915.03	14.13	12.38
Niobrás 200	696.50	1.134.80	12.31	10.95

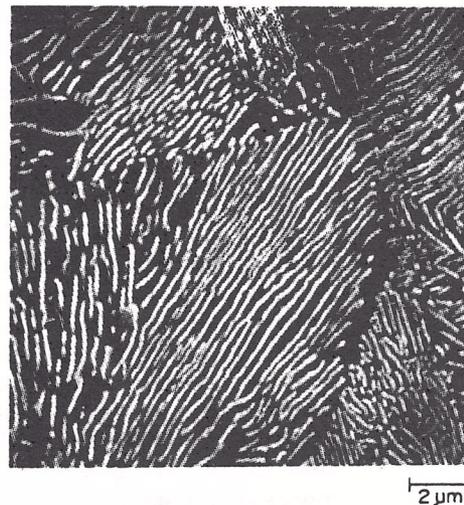


FIGURA 2. Microestrutura perlítica - aço com 0,098% de Nióbio. Microscopia eletrônica de varredura. Ataque — Nital 2.

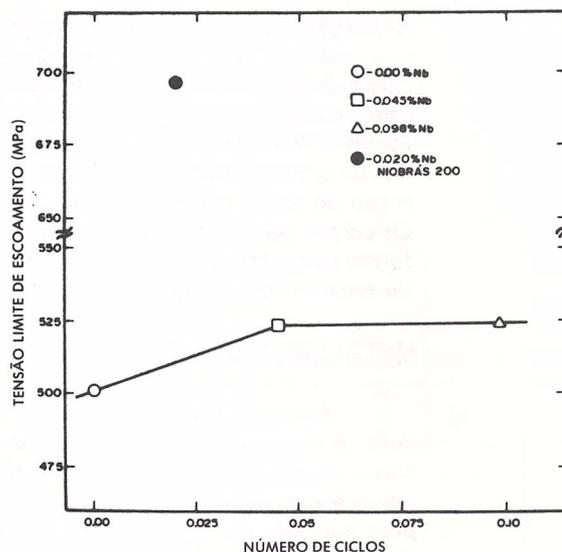


FIGURA 3. Efeito do teor de Nióbio no limite de escoamento.

A figura 3 mostra a relação entre a tensão de escoamento e o teor de nióbio. O limite de escoamento do aço Niobrás 200 é também mostrado nesta figura muito embora tenha composição química básica diferente. Este tipo de correlação será igualmente feita para as demais propriedades estudadas assim que estivermos também interessados em comparar as propriedades deste aço (Niobrás 200) com os demais estudados.

As curvas de tensão máxima aplicada versus número de ciclos para ruptura dos quatro aços estudados são mostrados na figura 4. As tensões limite de resistência à fadiga são mostradas na tabela 3. Estes limites foram cotados como função do teor de Nióbio na figura 5.

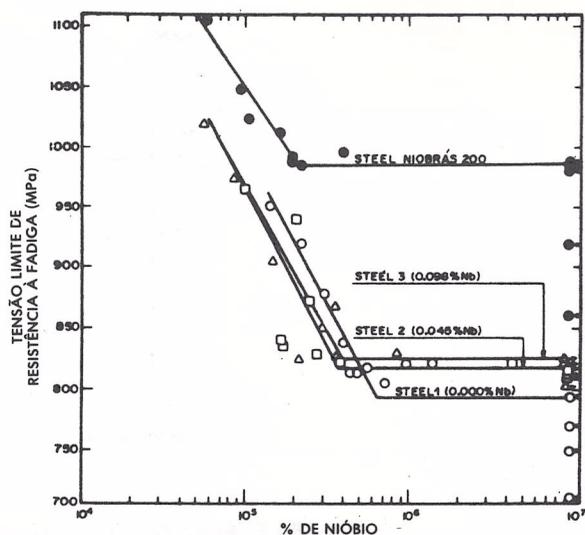


FIGURA 4. Tensão máxima cíclica versus número de ciclos para fratura para os quatro aços estudados.

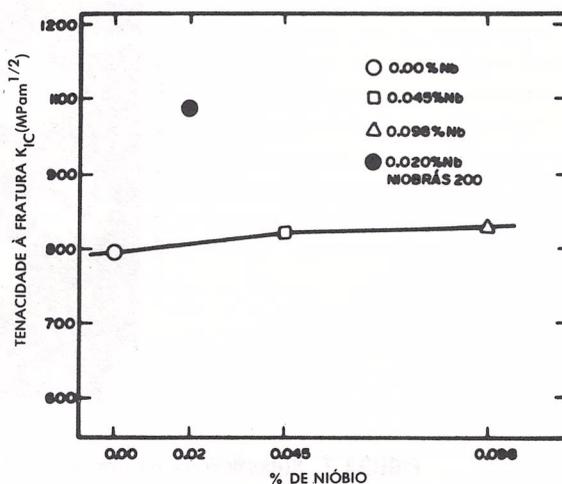


FIGURA 5. Efeito do teor de Nióbio no limite de resistência à fadiga.

TABELA 3. Limites de resistência à fadiga e tenacidade à fratura em deformação plana para os aços estudados.				
AÇO	1	2	3	Niobrás 200
Limite de Resistência à fadiga (MPa)	793.0	816.3	823.5	986.0
K_{IC} (MPa \sqrt{m})	44.2	42.4	38.9	31.6

A análise fractográfica dos corpos de prova de fadiga mostraram grande similaridade na aparência da superfície de fratura. Como em outros trabalhos, não foram constatadas estriações de fadiga nas superfícies de fratura^(1,14) o que algumas vezes se parecia com estriações, realmente consistia no delineamento da microestrutura perlítica¹⁴; isto sendo confirmado pelo ataque das superfícies de fratura com Nital 4.

Os valores obtidos para a tenacidade à fratura em deformação plana são mostrados na tabela 3. Estes valores são plotados como função do teor de nióbio destes aços na figura 6.

A análise fractográfica dos corpos de prova de K_{IC} mostrou que o modo de fratura foi sempre por clivagem, sendo este fato ilustrado na figura 7, que corresponde a um corpo de prova do aço Niobrás 200. Algumas vezes foram observadas algumas ilhas de fratura dúctil, as quais sempre estavam associadas com alta concentração de inclusões alongadas. Entretanto, suas proporções foram muito pequenas e o modo de fratura foi predominantemente por clivagem.

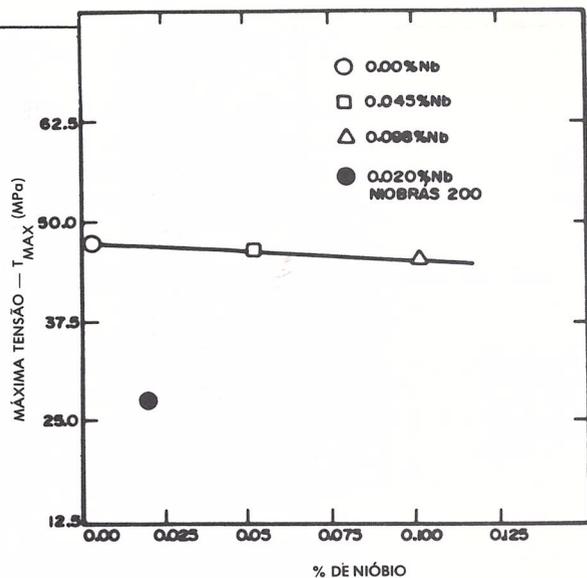


FIGURA 6. Efeito do teor de Nióbio na tenacidade à fratura em deformação plana K_{Ic} .

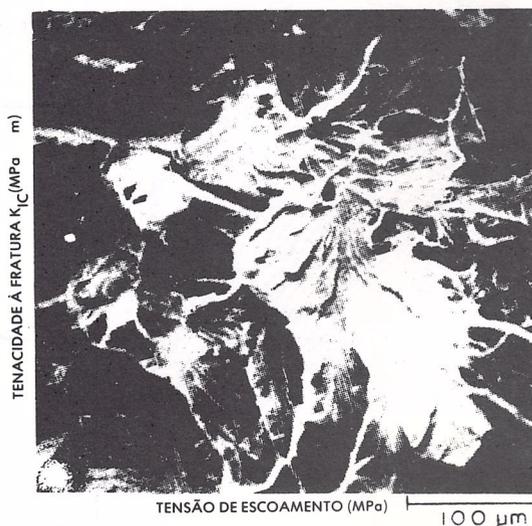


FIGURA 7. Superfície de fratura por clivagem. Aço Niobrás 200. Microscopia eletrônica de varredura.

DISCUSSÃO

As figuras 3 e 5 mostram que os valores da resistência à tração e do limite de resistência à fadiga no aço com 0,45% de Nb foram mais altos que os obtidos nos aços sem Nióbio, mostrando que esta adição pode causar alguma melhoria nestas propriedades. É também observado que maiores acréscimos no teor de Nióbio não promove qualquer aumento nestas propriedades. O aço Niobrás 200, por outro lado, apresenta valores muito superiores para a resistência à tração e limite de resistência à fadiga que os observados nos demais aços estudados. O ganho nestas propriedades pode, entretanto, resultar também do aumento nos teores de manganês e silício.

O efeito observado do Nióbio sobre a resistência à tração e às propriedades de fadiga, provavelmente resultam de sua influência sobre as características metalográficas da perlita via o refinamento do tamanho de colônia^(2, 9); do fortalecimento da ferrita pelo mecanismo de endurecimento por precipitação dos carbonitretos de Nióbio⁽²⁾. Uma combinação ótima entre o teor de Nióbio e as condições de processamento pode, entretanto, existir nestes aços a fim de produzir uma matriz perlítica com os mais altos valores de resistência mecânica e à fadiga.

Até este momento, a análise da influência dos elementos de liga foi enfocada sobre as propriedades, as quais aumentam com adições de elementos de liga. Entretanto, a observação da figura 6 mostra que isto não ocorre com a tenacidade à fratura, a qual tende a deteriorar com as adições de Nióbio nos aços experimentais, ou no aço com adições de manganês e silício, o aço Niobrás 200. O problema do comprometimento entre resistência à tração e tenacidade à fratura também ocorre nestes aços para trilhos. É fato bem conhecido que a tenacidade à fratura tende a diminuir com o aumento da resistência para um dado grupo de aços⁽¹⁶⁾. A figura 8, que é um gráfico da tenacidade à fratura como função do limite de escoamento, mostra que existe uma redução da tenacidade associada com o aumento da resistência resultante da adição de 0,045% de Nb. Entretanto, maiores

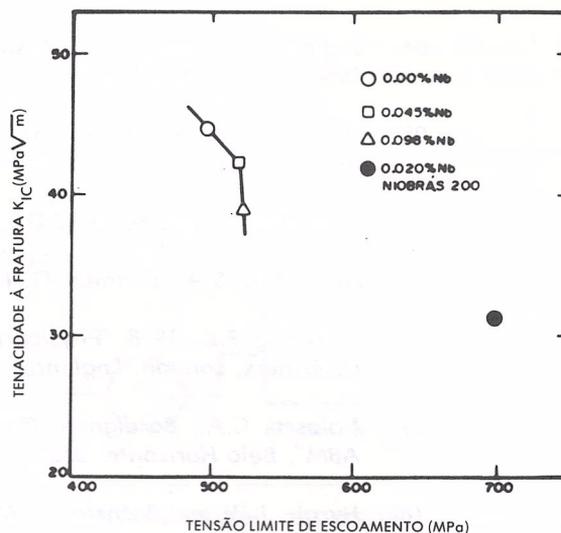


FIGURA 8. Tenacidade à fratura em deformação plana versus tensão limite de escoamento.

adições de Nióbio (aço com 0,098% Nb) não contribuíram para qualquer ganho na resistência mecânica, mas causou uma queda na tenacidade à fratura. Isto coloca em evidência o efeito fragilizante do Nióbio quando adicionado acima de certos limites; neste caso, a redução da tenacidade à fratura não é compensada por qualquer ganho importante na resistência mecânica ou limite de resistência à fadiga. O aço Niobrás 200, por outro lado, apresenta os mais baixos valores de tenacidade à fratura, mas também os mais altos valores para tensão limite de escoamento e limite de resistência à fadiga.

A consequência direta da evidência que as adições de elementos de liga estudados melhoram algumas propriedades enquanto prejudicam outras; é que o fabricante destes aços deve ter em mente quais as propriedades necessárias nos trilhos, a fim de fazer a melhor escolha nos teores de elementos de liga como também dos parâmetros de processamento.

CONCLUSÕES

Adições de Nióbio nos aços para trilhos com 0,76% de carbono, 0,87% de manganês e 0,15% de silício podem induzir, até uma certa quantidade, algum aumento na resistência à tração e no limite de resistência à fadiga, muito embora causem deterioração na tenacidade à fratura. Maiores adições de Nióbio não têm influência em ambas as propriedades, resistência à tração e limite de resistência à fadiga, mas causam uma adicional perda de tenacidade à fratura.

Substantial ganho nas propriedades de fadiga e resistência mecânica podem resultar do aumento nos teores de manganês e silício num aço para trilho com uma dada adição de Nióbio.

AGRADECIMENTOS

À Companhia Siderúrgica Nacional, CSN, pelo fornecimento dos aços na forma de trilhos. Ao FINEP, CNPq e CEPG/UFRJ pelo suporte financeiro. Ao Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná - CEFET-PR e ao CNPq/Pronuclear pela garantia de manutenção nas atividades de pesquisa para C.L.M. ALLENSTEIN e A.S. de ABREU, respectivamente.

REFERÊNCIAS

01. Marich, S., 1979, Proc. Seminar "Vanadium in Rail Steels". Vanitec Publication, Chicago, USA, 23.
02. Williams, J.G., Simpson, I.D. and MacDonald, J.K., 1981, Proc. "Heavy Haul Railways Conference", Session 307, Paper I.3, Perth, Australia.
03. Ichinose, H., Takehara, J., Iwasaki, N. and Ueda, M., 1978, Proc. "Heavy Haul Railways Conference", Session 307, Paper I.3, Perth, Australia.

04. Sugino, K., Masumoto, H., Nishida, S., Urashima, C., Kageyama, H. and Hattori, M., 1980, "Nippon Steel Technical Report", **16**, 103.
 05. Masumoto, H., Sugino, K. and Hayashida, H., 1978, Proc. "Heavy Haul Raylways Conference", Session 212, Paper H.1, Perth, Austrália.
 06. Querales, A. and Byrne, J.G., 1980, **Metall. Trans.** **11A**, 255.
 07. Al-Salman, S.A., Lorimer, G.H. and Ridley, N., 1976, **Metall. Trans.** **7A**, 365.
 08. Pickering, F.B., 1978, "Physical Metallurgy and the Design of Steels", Applied Science Publishers, London, England.
 09. Nolasco, C.A., Bordignon, P.J.P. and Oliveira, E.Q., 1976, Proc. "Annual Conf. of ABM", Belo Horizonte, Brasil, 31.
 10. Hyzak, J.M. and Bernstein, I.M., 1976, **Metall. Trans.** **7A**, 1217.
 11. Park, Y.J. and Bernstein, I.M., 1979, **Metall. Trans.** **10A**, 1953.
 12. Gladman, T., McIvor, I.D. and Pickering, F.B., 1972, **JISI**, 916.
 13. BS5447 - "Methods of Test for Plane Strain Toughness (K_{IC}) of Metallic Materials", 1977, British Standards Institution, UK.
 14. Cooke, R.J. and Beevers, C.J., 1974, **Mats. Sci. and Engeno.** **13**, 201.
 15. Allenstein, C.L.M., 1981, M.Sc. Thesis, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
 16. Knott, J.F., 1973, "Fundamentals of Fracture Mechanics", Butterworth, London, UK.
-
-