

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO EM FADIGA DE UM AÇO BAINÍTICO DE APLICAÇÃO EM RODAS AUTOMOTIVAS¹

Andréia Elias Gutz²
Vanessa Gomes Santana³
Luiz Cláudio Cândido⁴
Leonardo Barbosa Godefroid⁴

Resumo

A indústria automobilística tem demandado o desenvolvimento de novos aços com boa formabilidade e elevada resistência mecânica, com o objetivo de se obter redução de espessura (redução de peso) sem perda de desempenho, principalmente levando-se em conta a segurança e o conforto dos passageiros. Os principais desafios para o desenvolvimento de aços para esta aplicação não se relacionam apenas com requisitos de propriedades mecânicas convencionais, mas também com adicionais requisitos, como a resistência à nucleação e à propagação de trincas por fadiga. Este trabalho mostra a análise de resultados obtidos em ensaios de fadiga com controle de tensão (curvas de Wöhler) com um aço de microestrutura ferrita-bainita, e compara o seu desempenho com dois aços de microestrutura ferrita-perlita, com diferentes teores de manganês e de nióbio. O aço bainítico apresentou uma resistência à fadiga superior aos demais aços estudados.

Palavras-chave: Rodas; Fadiga; Aço bainítico.

FATIGUE PERFORMANCE EVALUATION OF A BAINITIC STEEL FOR AUTOMOTIVE WHEELS APPLICATION

Abstract

Automotive industry has demanded the development of new steels with good formability and high strength, aiming to obtain smaller thickness without performance loss, mainly concerning about safety and comfort of the passengers, and to obtain automobile weight reduction. The main challenges to develop these steels are not only to reach the traditional mechanical properties requirements, but also satisfy the additional requirements such as fatigue crack initiation and growth resistance. This work shows the analysis about stress-controlled fatigue results (Wöhler curves) of a ferrite-bainite microstructure steel, and compare its performance with two ferrite-perlite microstructure steels, with different manganese and niobium contents. The bainitic steel presented the best behavior.

Key words: Wheels; Fatigue; Bainitic steel.

¹ Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil

² Aluna de Engenharia Metalúrgica, Escola de Minas da UFOP, Ouro Preto – MG.

³ Engenheira Metalurgista, ARCELORMITALL Tubarão, mestrando da REDEMAT, UFOP, Ouro Preto – MG.

⁴ Professor, M.Sc., D.Sc., REDEMAT, UFOP, Ouro Preto – MG.

1 INTRODUÇÃO

A redução de peso de veículos tem sido um tópico bastante importante para a indústria automotiva, devido às crescentes exigências para eficiência no consumo de combustível, que estão relacionadas com ganho de energia e restrições ambientais. Neste contexto, um grande esforço está sendo feito no sentido de se desenvolver e de se aplicar novos aços de elevada resistência mecânica, que combinam uma boa formabilidade com elevada resistência mecânica, para redução da espessura do material de diferentes partes do veículo, sem perda de desempenho, e garantindo a segurança do passageiro. [1]

A nível internacional, o consórcio chamado de “ULSAB-AVC” reuniu no final do século XX importantes empresas siderúrgicas, com o objetivo de se propor novos aços para aplicações automotivas. Um documento publicado a partir deste consórcio [2] mostra a existência de inúmeros aços capazes de atender às especificações para a indústria automotiva. A Figura 1 apresenta alguns dos aços propostos pelo referido consórcio e também por publicações mais recentes, [3,4] correlacionando a sua resistência mecânica com a sua formabilidade. Por outro lado, não somente a formabilidade e a resistência mecânica destes aços são importantes quando se pensa em sua aplicação. Especialmente em rodas, a tenacidade à fratura e a resistência ao trincamento por fadiga tornam-se importantes características exigida para estes materiais, devido às condições de operação do produto.

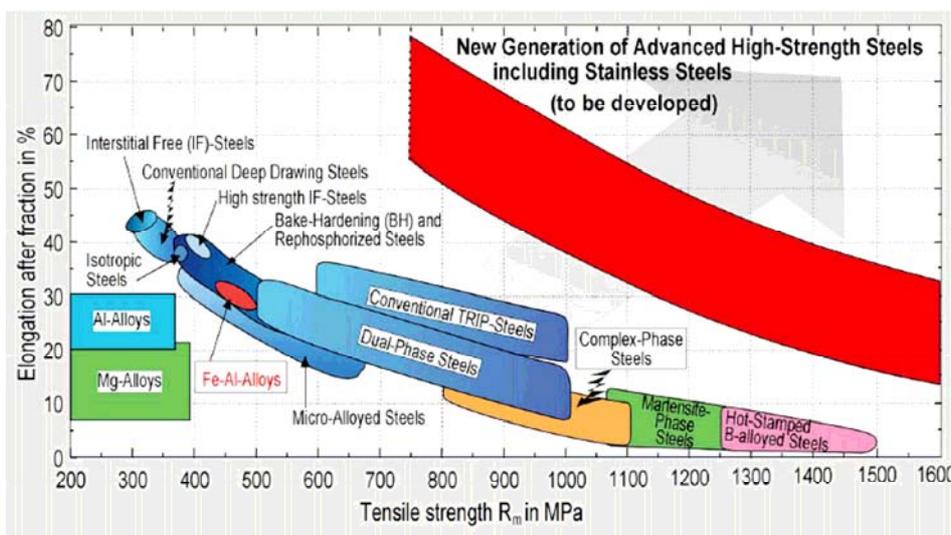


Figura 1: Correlação resistência mecânica – formabilidade para diversas classes de materiais. [4]

Recentemente, aços com microestrutura bainítica têm sido propostos para a indústria automobilística. A vantagem prática destes aços consiste na sua elevada resistência mecânica aliada a uma boa ductilidade, obtidos com a reação bainítica, sem necessidade de tratamento térmico posterior. Estes aços são facilmente soldáveis, pois a bainita, diferentemente da martensita, será formada na zona termicamente afetada adjacente ao metal de solda, reduzindo a incidência de trincamento. Além disto, estes aços possuem um baixo teor de carbono, que melhora a soldabilidade e reduz as tensões provenientes da transformação.

Existem poucos trabalhos sobre a resistência à fadiga de aços bainíticos, devido ao fato destes aços terem ainda poucas aplicações estruturais, quando comparados, por exemplo, com os aços martensíticos. [5]

Este trabalho mostra a análise de resultados obtidos em ensaios de fadiga com controle de tensão (curvas de Wöhler) com um aço de microestrutura ferrita-bainita, e compara o seu desempenho com dois aços de microestrutura ferrita-perlita, com diferentes teores de manganês e de nióbio.

2 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O aço bainítico utilizado neste trabalho possuía um teor de carbono menor do que 0,15% em peso, com adição de manganês e de nióbio. Para comparação de seu desempenho, utilizou-se um aço C-Mn convencional e um aço microligado ao nióbio. Amostras para metalografia foram preparadas e observadas em um microscópio ótico LEICA com analisador de imagens, usando o reativo químico de Nital para revelação da microestrutura.

Os ensaios de tração e de fadiga foram realizados numa máquina servo-hidráulica MTS de 10 ton, com aquisição de dados por computador, na temperatura ambiente. As superfícies de fratura foram analisadas num microscópio eletrônico de varredura JEOL.

Todos os corpos-de-prova foram preparados com a espessura de aproximadamente 4 mm, que corresponde à espessura real de aplicação dos aços em rodas. Os corpos-de-prova de tração e de fadiga apresentaram uma geometria idêntica, com dimensões mostradas na Figura 2.

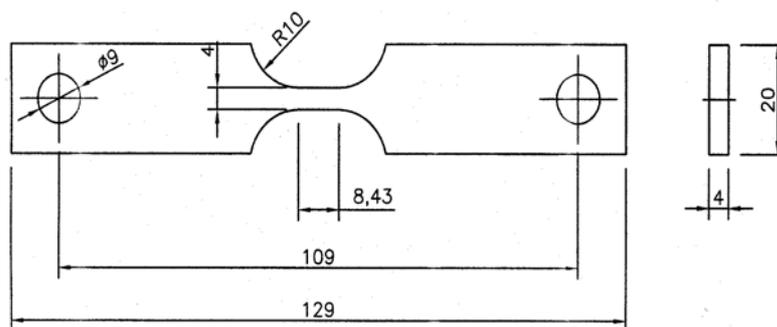


Figura 2: Corpos-de-prova para ensaios de tração e de fadiga.

Os ensaios de fadiga foram realizados na frequência de 30 Hz, numa razão R entre tensões de 0,1. Curvas tensão máxima versus número de ciclos para fratura foram obtidas, desde uma tensão aplicada próxima ao limite de resistência dos aços até uma tensão próxima do seu limite de fadiga. Foram utilizados três corpos-de-prova para cada nível de tensão aplicado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A microestrutura do aço bifásico na direção longitudinal é mostrada na Figura 3(a,b), enquanto a Figura 4(a,b) apresenta a microestrutura dos outros dois aços, na mesma orientação. Pode-se observar para o aço bainítico uma microestrutura típica do tipo granular, característica de aços obtidos por laminação controlada.⁽⁵⁾ Percebe-se também o pequeno tamanho de grão dos aços bainítico e microligado ao nióbio, devido à presença deste elemento microligante.

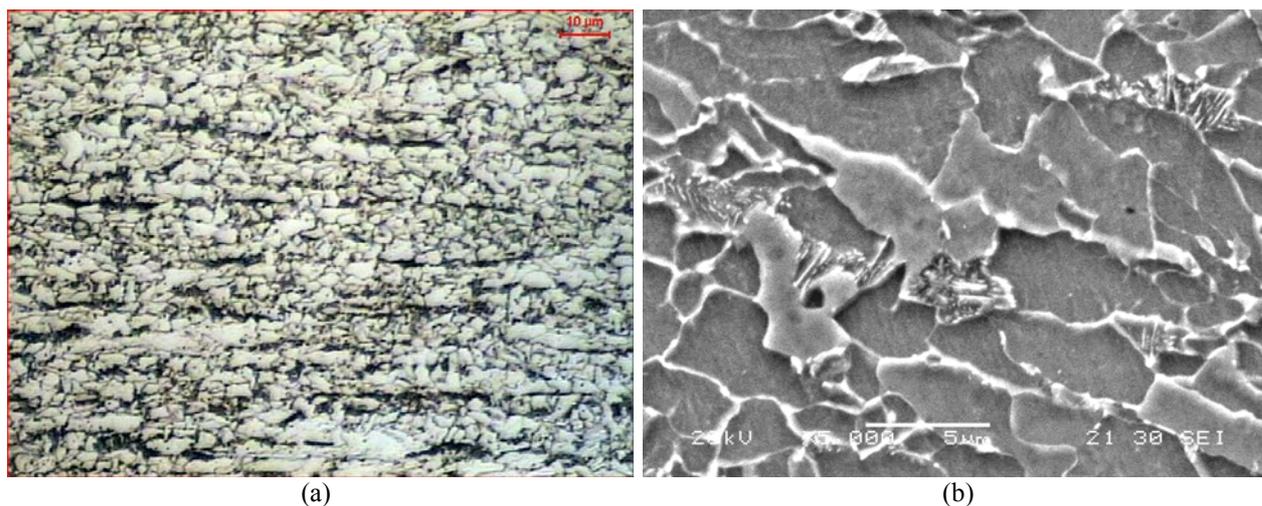


Figura 3: Microestrutura do aço bainítico. Direção longitudinal. Reativo Nital. (a) Microscópio ótico, 1000X. (b) Microscópio eletrônico de varredura, 5000X.

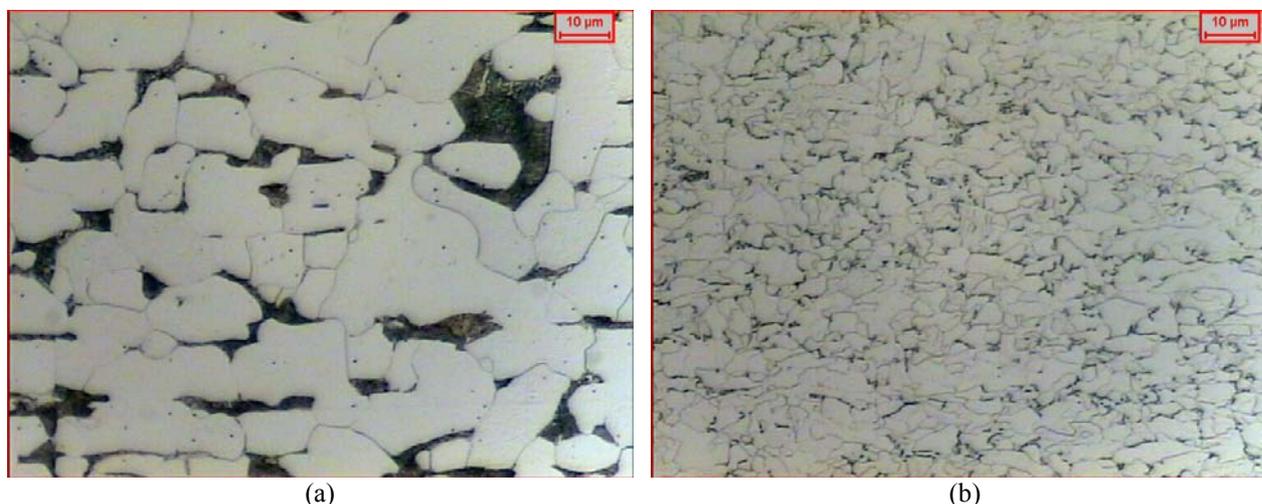


Figura 4: Microestrutura dos outros aços. Direção longitudinal. Reativo Nital. Microscópio ótico, 1000X. (a) aço C-Mn. (b) aço C-Mn-Nb.

Propriedades mecânicas típicas dos três aços (direção longitudinal, temperatura ambiente) são apresentadas na Tabela 1. Observa-se que o aço bifásico apresentou a maior resistência mecânica entre os aços estudados. De qualquer forma, a análise fratógráfica mostrou uma fratura transgranular e dúctil para os três aços, com um mecanismo de nucleação, crescimento e coalescimento de microcavidades. A Figura 5(a,b,c) ilustra este comportamento. A única diferença é o tamanho dos alvéolos.

Tabela 1: Resultados de propriedades mecânicas de tração, direção longitudinal.

Aço	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento percentual (%)
Bifásico	470	598	40
C-Mn-Nb	411	542	42
C-Mn	358	427	50

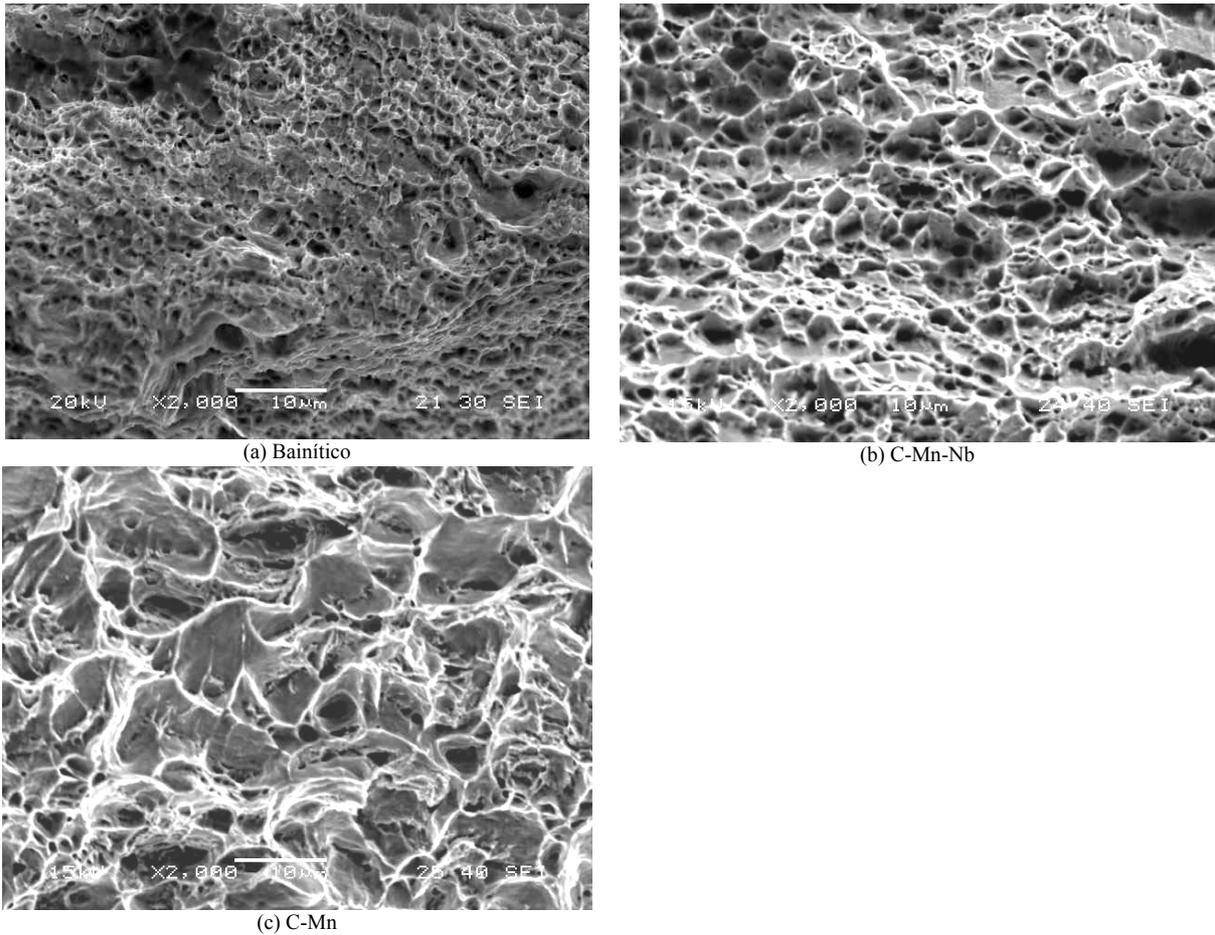


Figura 5: Fratografias de corpos-de-prova de tração dos aços estudados. 2000X. MEV.

O comportamento em fadiga para os três aços está apresentado na Figura 6. As curvas tracejadas são tendências de comportamento, na forma de decréscimo logarítmico, do tipo:

$$\log(N_f) = A - B \log(\sigma_{\max} - C)$$

onde N_f é o número de ciclos para fratura do corpo-de-prova, σ_{\max} é a tensão máxima do ciclo de fadiga, A-B-C são constantes de ajuste. Este tipo de ajuste considera o comportamento por fadiga na região de fadiga de alto ciclo e na região do limite de fadiga.^[6]

Observa-se que o aço bainítico apresentou uma resistência por fadiga superior aos outros aços, tanto no regime de fadiga de alto ciclo quanto na região do limite de fadiga. Os mecanismos de endurecimento monotônico contribuíram igualmente para melhorar a resistência por fadiga, conforme a tendência de comportamento observada com a maioria dos materiais metálicos.^[7]

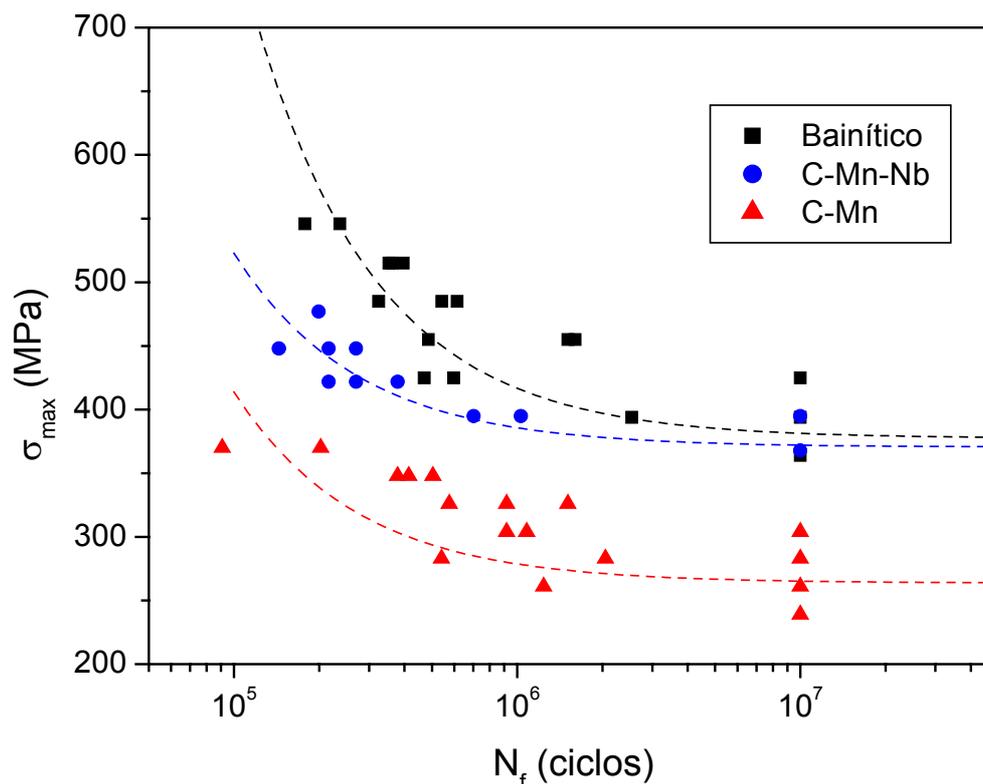
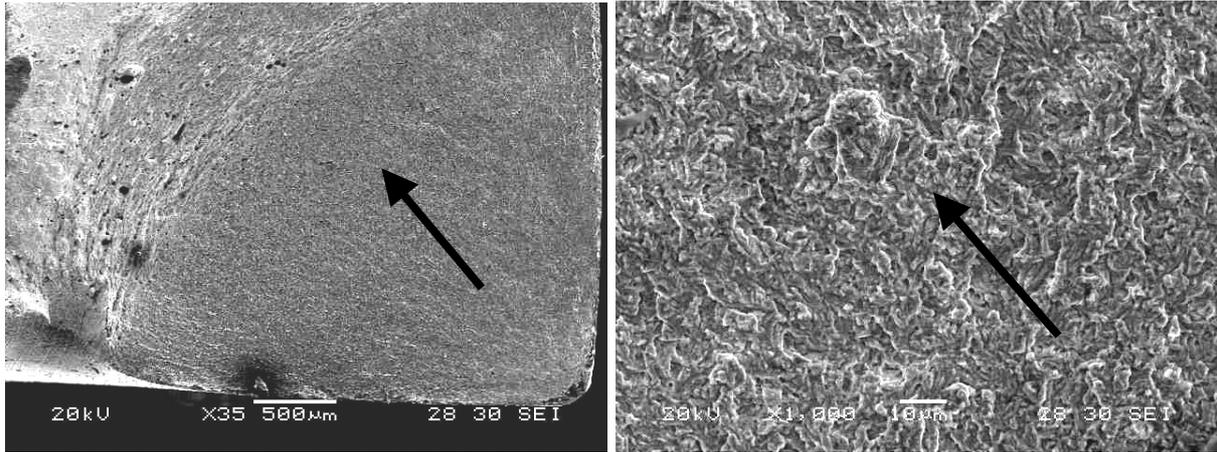


Figura 6: Curvas tensão máxima de fadiga versus número de ciclos para fratura dos aços estudados.

A análise fratógráfrica realizada nos três aços revelou a iniciação de trinca sempre em uma das bordas dos corpos-de-prova, com mecanismo aparentemente cristalográfico. A propagação de trinca por fadiga mostrou, ainda que levemente, a presença de estrias. Estas características são apresentadas nas Figuras 7 a 9, para um nível de carregamento em torno de 70% do limite de resistência de cada aço. Para o aço bainítico observa-se uma fratura típica de fadiga, com rasgamento final por tração. A área ocupada pela fatura por fadiga diminui nos aços C-Mn-Nb e C-Mn, com conseqüente crescimento da área de fratura por tração, confirmando a diferença de comportamento entre os três aços.

4 CONCLUSÕES

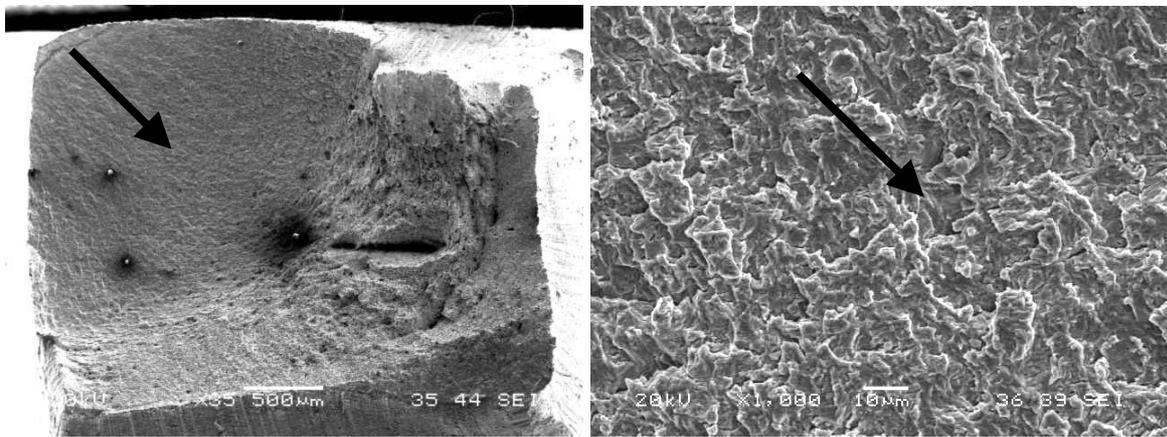
O aço bainítico apresentou uma microestrutura com menor tamanho de grão entre os aços estudados, confirmando o efeito do tratamento termo-mecânico e presença de nióbio no refino da microestrutura. Observou-se uma maior resistência mecânica e menor ductilidade em tração deste aço em comparação com os outros aços, decorrentes dos mecanismos de endurecimento por solução sólida, precipitação, refino de grão e transformação de fase. Verificou-se que o aço bainítico apresentou uma resistência por fadiga superior à dos outros aços, tanto no regime de fadiga de alto ciclo quanto na região do limite de fadiga, fato também decorrente dos mesmos mecanismos de endurecimento citados.



(a) 35X.

(b) 1000X.

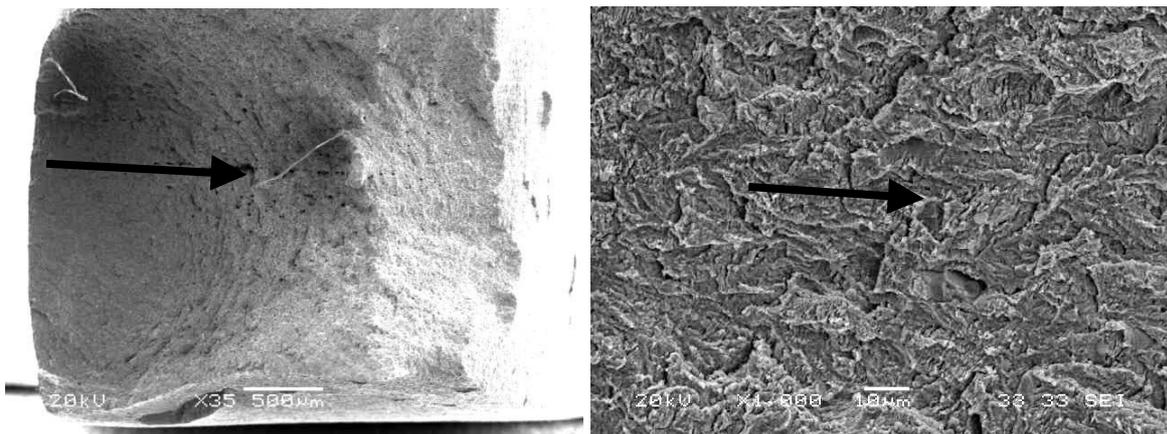
Figura 7: Fratografia de um corpo-de-prova de aço bainítico, ensaiado em fadiga com uma carga máxima de 70% do limite de resistência em tração. MEV.



(a) 35X.

(b) 1000X.

Figura 8: Fratografia de um corpo-de-prova de aço C-Mn-Nb, ensaiado em fadiga com uma carga máxima de 70% do limite de resistência em tração. MEV.



(a) 35X.

(b) 1000X.

Figura 9: Fratografia de um corpo-de-prova de aço C-Mn, ensaiado em fadiga com uma carga máxima de 70% do limite de resistência em tração. MEV.

REFERÊNCIAS

- 1 The Auto/Steel Partnership. *Material Uniformity of High-Strength Sheet Steels – Vol.2*, (November 1, 1998). www.a-sp.org/database. Acesso: 01/07/05.
- 2 ULSAB-AVC Program, 2001. *Technical Transfer Dispatch #6*, 05-01-2001, ULSAB-AVC Body Structures Materials. www.ulsab-avc.org/ulsab_ttd. Acesso: 01/07/05.
- 3 R.O.Wagoner (organizer): *Advanced high strength steel workshop*, Report. USA, 22-23 outubro 2006.
- 4 C.D.Wuppermann: *The Steel Industry in Europe – Globalisation: Challenges and Opportunities*. Conferência proferida no 62º Congresso Annual da ABM, Vitória, ES, 2007.
- 5 H.K.D.H.Bhadeshia, *Bainite in Steels*, 2nd Edition, IOM Communications Ltd., 2001.
- 6 MIL-HDBK-5H: *Military Handbook, Metallic Materials and Elements for aerospace vehicle structures*, USA, Department of Defence, 1998.
- 7 ASM Handbook, Vol. 19 – *Fatigue and Fracture*, American Society for Materials, 1996.