



TENACIDADE À FRATURA E RESISTÊNCIA AO CRESCIMENTO DE TRINCA POR FADIGA DE UM AÇO BIFÁSICO DA CLASSE DE 780MPa DE RESISTÊNCIA¹

Andréia Elias Gutz²
Fabiano Alcântara Machado³
João Alfredo Gritti⁴
Túlio Magno Füzessy de Melo⁵
Luiz Cláudio Cândido⁶
Leonardo Barbosa Godefroid⁶

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 tenacidade à fratura e a resistência à propagação de trincas por fadiga. Este trabalho mostra resultados obtidos em ensaios de integral J e de propagação de trinca por fadiga com um aço de microestrutura ferrita-bainita, e compara o seu desempenho com dois aços de microestrutura ferrita-martensita, com diferentes teores de silício e de cromo. O aço bainítico apresentou características superiores aos demais aços estudados.

Palavras-Chave: Rodas; Tenacidade à fratura; Fadiga; Aço bainítico.

FRACTURE TOUGHNESS AND FATIGUE CRACK GROWTH RESISTANCE OF A DP-780 DUAL-PHASE STEEL

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 fracture toughness and fatigue crack growth resistance. This work shows results about J Integral and da/dN-dK curves of a ferrite-bainite microstructure steel, and compare its performance with two ferrite-martensite microstructure steels, with different silicon and chromium contents. The bainitic steel presented the best behavior.

Keywords: Wheels; Fracture toughness; Fatigue; Bainitic steel.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Engenheira Metalurgista, Mestranda, REDEMAT/ UFOP, Ouro Preto – MG.

³ Físico, M.Sc., FUMAGALLI, Limeira – SP.

⁴ Engenheiro Metalurgista, FUMAGALLI, Limeira - SP.

⁵ Engenheiro Mecânico, M.Sc., Dr.-Ing., USIMINAS, Ipatinga - MG

⁶ 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” reuniu no final do século XX importantes empresas siderúrgicas, com o objetivo de se propor novos aços para aplicações automotivas. Este consórcio continua com o Programa “ULSAB-AVC”. Um documento publicado a partir deste Programa⁽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 por tração com a sua ductilidade. Por outro lado, não somente a ductilidade 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.

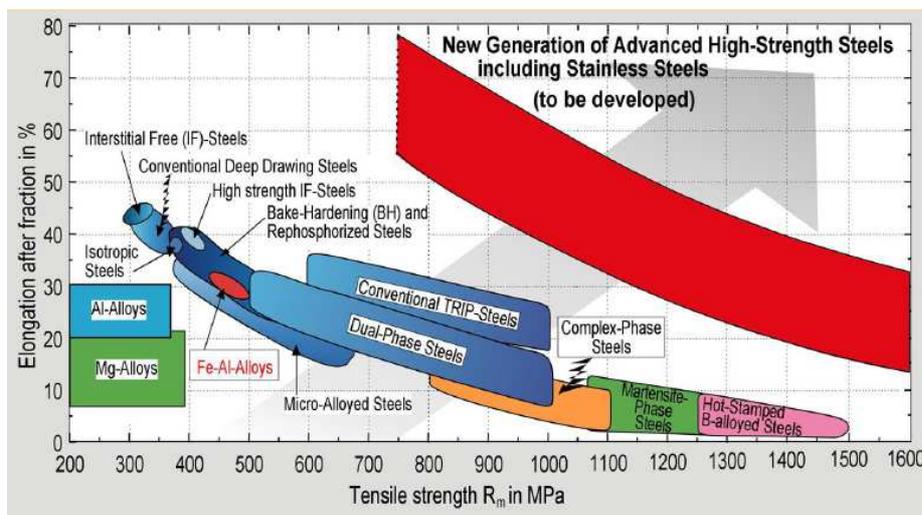


Figura 1: Correlação resistência mecânica – ductilidade para diversas classes de materiais.⁽⁴⁾

Recentemente, aços bifásicos com microestrutura ferrita-martensita e ferrita-bainita, com elevada resistência mecânica por tração (classes DP-590, DP-780, DP-980) têm sido propostos para a indústria automobilística.⁽⁵⁻⁸⁾ A vantagem prática dos aços bainíticos 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. Por outro lado, existem poucos trabalhos sobre a tenacidade à fratura e a resistência à fadiga de aços bainíticos, devido ao fato destes aços terem

ainda poucas aplicações industriais, quando comparados, por exemplo, com os aços martensíticos.⁽⁹⁾

Este trabalho mostra resultados obtidos em ensaios de tenacidade à fratura (integral J) e crescimento de trinca por fadiga (curvas da/dN- ΔK) com um aço de microestrutura ferrita-bainita, e compara o seu desempenho com dois aços de microestrutura ferrita-martensita, com diferentes teores de silício e de cromo.^(10,11)

Todos estes aços foram laminados a quente, com aplicação para rodas automotivas.

2 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O aço bainítico utilizado neste trabalho apresentou um teor de carbono menor do que 0,15% em peso, com adição de manganês e de nióbio. Trata-se de um aço bifásico ferrita-bainita da classe DP-780. Para comparação de seu desempenho, foram utilizados dois aços bifásicos ferrita-martensita da classe DP-590, um deles com teor de silício em torno de 1% e o outro com teor de cromo em torno de 1%.

Amostras para metalografia foram preparadas e observadas em um microscópio ótico (MO) LEICA e em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) JEOL, usando o reativo químico de Le Pera para revelação da microestrutura.

Ensaio de tração, de tenacidade à fratura 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 3,6mm, que corresponde à espessura real de aplicação dos aços em rodas. Os corpos de prova de tenacidade à fratura e de fadiga apresentaram uma geometria semelhante, do tipo C(T), orientação TL.

Os parâmetros utilizados⁽¹²⁾ nos ensaios de integral J foram: relação a/W de 0,6, incremento de deslocamento de 0,2mm, taxa de incremento de 2mm/min, porcentagem de descarregamento em cada passo de 10%, duas etapas de descarregamento em cada passo, intervalo para propagação de trinca de 5s em cada passo. A partir dos ensaios, foram traçadas as curvas $J-\Delta a$ para os aços em questão e calculado o valor de J_Q . Neste trabalho $J_Q \neq J_{IC}$, uma vez que a espessura ($B = 3,6\text{mm}$, espessura real da aplicação) utilizada para os corpos de prova não preencheu os requisitos da norma de ensaio. Em outras palavras, os resultados apresentados são função da espessura considerada para os corpos de prova. Foram utilizados cinco corpos de prova para cada aço.

Os ensaios de fadiga foram realizados⁽¹³⁾ na frequência de 30 Hz, numa razão R entre tensões de 0,1. Curvas tamanho de trinca em função do número de ciclos foram obtidas, e transformadas para curvas taxa de propagação de trinca em função do fator cíclico de intensidade de tensões. Foram utilizados três corpos de prova para a obtenção destas curvas. O fechamento de trinca foi calculado durante os ensaios de fadiga, através da técnica de flexibilidade elástica.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A microestrutura do aço ferrita-bainita na direção transversal é mostrada na Figura 2(a,b), enquanto as Figura 3(a,b) e 4(a,b) apresentam as microestruturas dos outros dois aços, na mesma orientação. Pode-se observar para o aço ferrita-bainita uma redução significativa do tamanho de grão ferrítico e das ilhas da segunda fase.

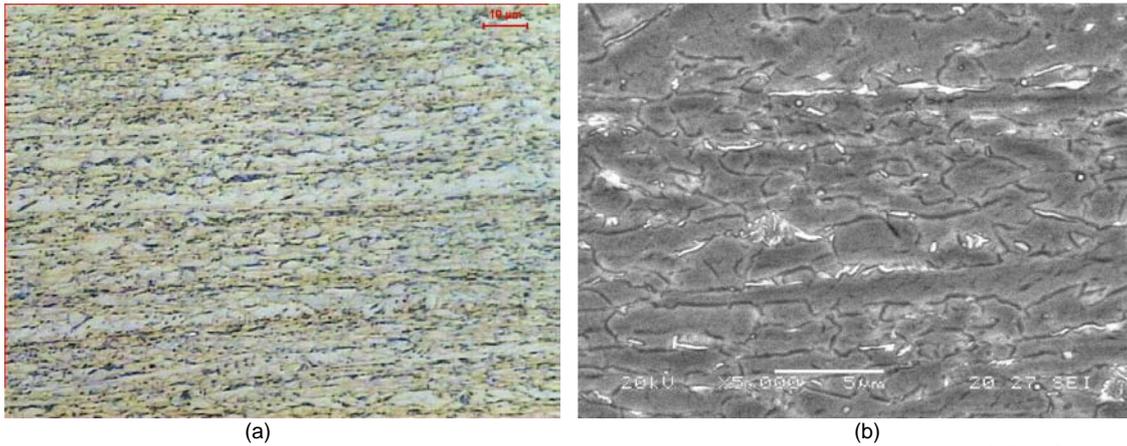


Figura 2: Microestrutura do aço ferrita-bainita. Direção transversal. Reativo Le Pera. (a) MO, 1.000X. (b) MEV, 5.000X.

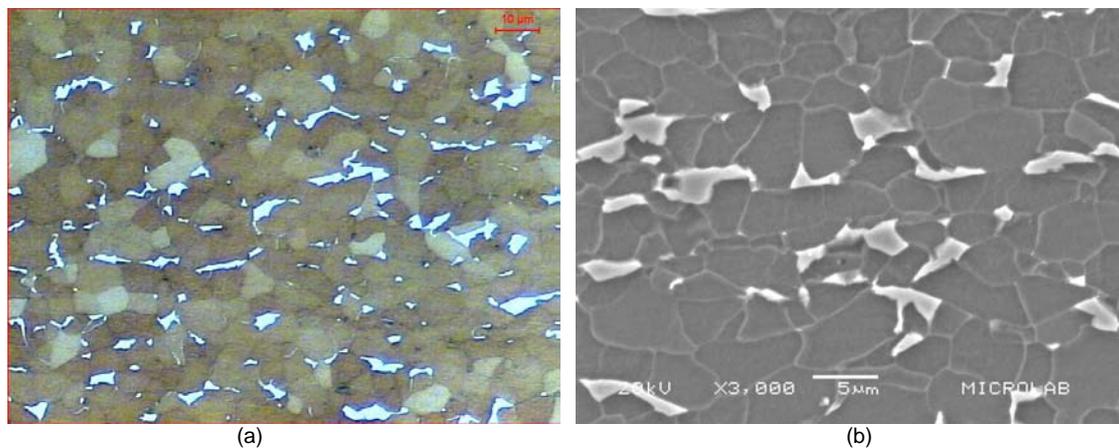


Figura 3: Microestrutura do aço ferrita-martensita ao silício. Direção transversal. Reativo Le Pera. (a) MO, 1.000X. (b) MEV, 3.000X.

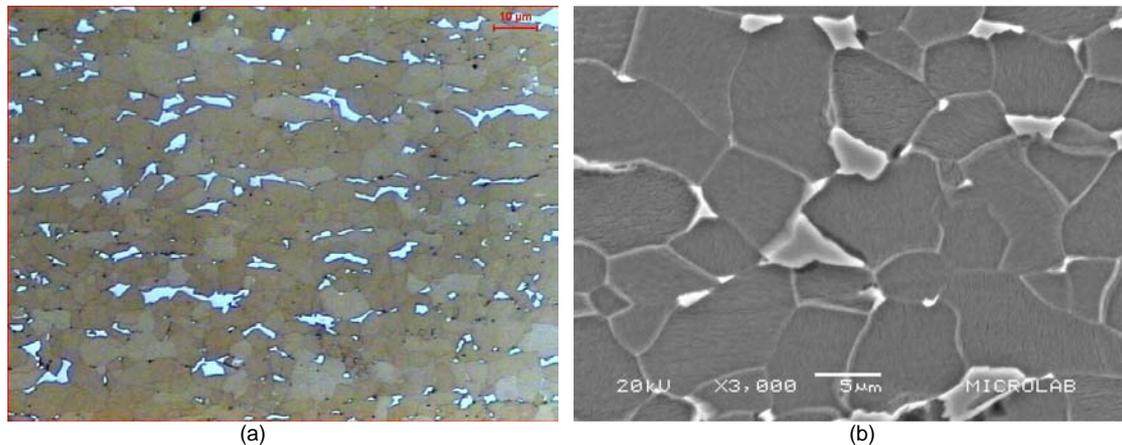


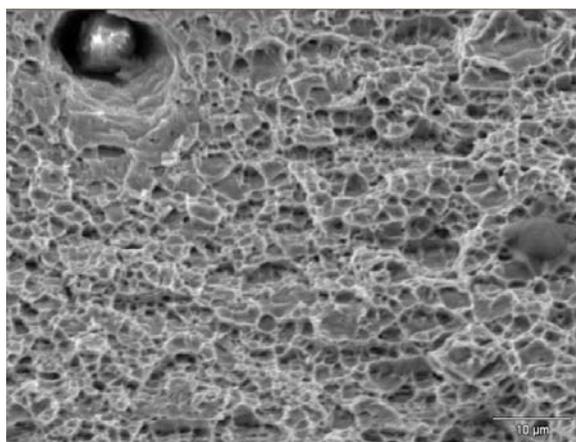
Figura 4: Microestrutura do aço ferrita-martensita ao cromo. Direção transversal. Reativo Le Pera. (a) MO, 1.000X. (b) MEV, 3.000X.

Propriedades mecânicas típicas dos três aços (direção transversal, temperatura ambiente) são apresentadas na Tabela 1. Observa-se que o aço bainítico apresentou a maior resistência mecânica entre os aços estudados, sem perda significativa de ductilidade. Este comportamento está relacionado com sua microestrutura. A análise fraturográfica mostrou uma fratura transgranular e dúctil para os três aços, com um mecanismo de nucleação, crescimento e coalescimento de

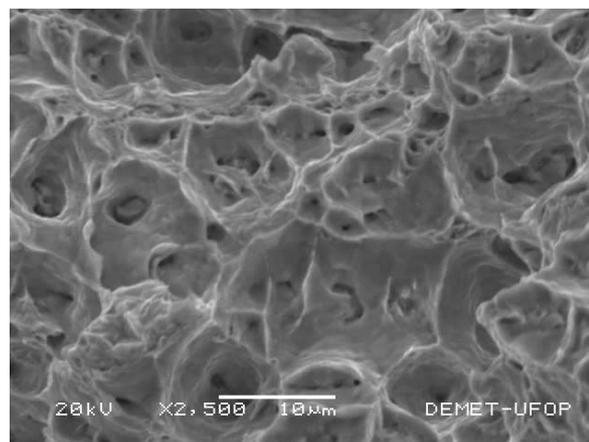
microcavidades. A Figura 5(a,b,c) ilustra este comportamento. A única diferença é o tamanho dos alvéolos, diretamente relacionado com o tamanho de grão dos aços.

Tabela 1: Resultados de propriedades mecânicas de tração

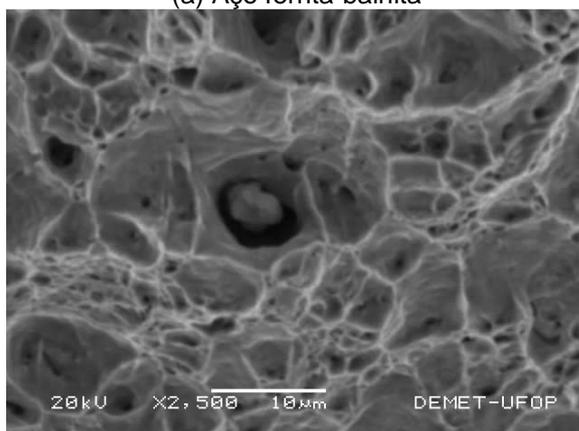
AÇO	σ_{LE} (MPa)	σ_{LR} (MPa)	ϵ_t (%)
DP 780	744	805	30
DP 590 Si	477	589	35
DP 590 Cr	388	569	34



(a) Aço ferrita-bainita



(b) Aço ferrita-martensita ao silício



(c) Aço ferrita-martensita ao cromo

Figura 5: Fratografias de corpos de prova de tração dos aços estudados. 2.500X. MEV.

A curva de resistência $J-\Delta a$ que caracteriza o comportamento do aço ferrita-bainita em termos de tenacidade à fratura está apresentada na Figura 6. Trata-se de uma curva média entre os cinco ensaios realizados. Os outros aços tiveram comportamento semelhante. O valor de J_Q , correspondente ao início do crescimento estável de trinca, está apresentado na Tabela 2, juntamente com valores dos outros aços bifásicos estudados neste trabalho. Pode-se observar que o aço ferrita-bainita apresenta uma tenacidade à fratura relativamente elevada, mesmo com um nível de resistência mecânica maior. Este fato confirma o bom desempenho do aço com estrutura bainítica. A análise fratográfica da região correspondente ao valor de J_Q mostrou novamente um comportamento dúctil para os três aços. A Figura 7(a,b,c) ilustra este comportamento. A única diferença é o tamanho dos alvéolos, diretamente relacionado com o tamanho de grão dos aços.

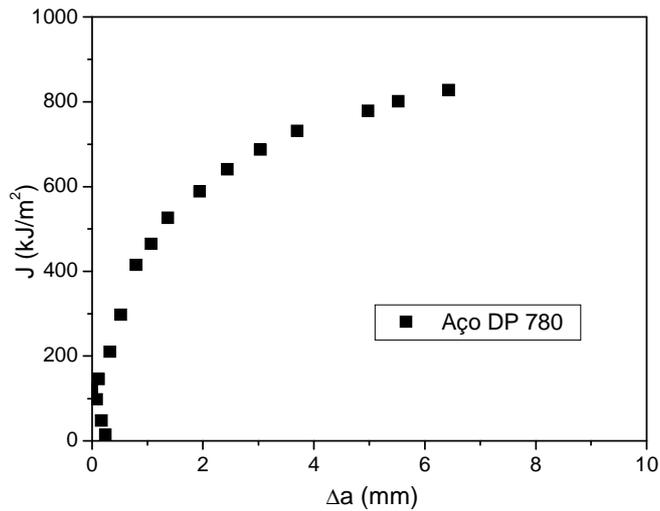
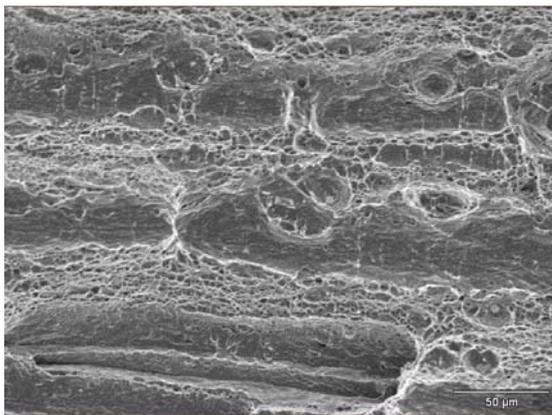


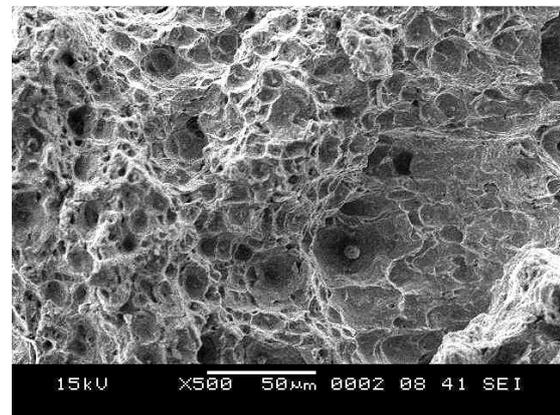
Figura 6: Curva de resistência $J-\Delta a$ obtida a partir do ensaio de integral J para o aço ferrita-bainita.

Tabela 2: Tenacidade à fratura J_Q para os aços estudados

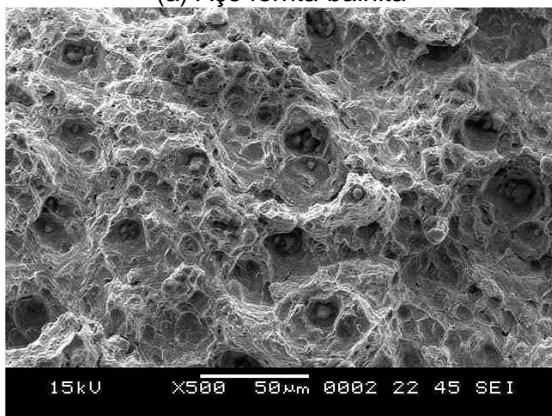
AÇO	σ_{LE} (MPa)	J_Q (kJ/m ²)
DP 780	744	305
DP 590 Si	477	300
DP 590 Cr	388	190



(a) Aço ferrita-bainita



(b) Aço ferrita-martensita ao silício



(c) Aço ferrita-martensita ao cromo

Figura 7: Fratografias de corpos de prova de tenacidade à fratura dos aços estudados. 500X. MEV.

A tradicional curva sigmoide de velocidade de propagação de trinca, da/dN , em função da força motriz ΔK , para o aço ferrita-bainita, está apresentada na Figura 8. A

Tabela 3 mostra o valor do limiar ΔK_{th} para este aço, assim como os valores correspondentes para os dois aços ferrita-martensita. O limiar ΔK_{th} obtido para os aços está de acordo com resultados encontrados na literatura para diversas ligas ferrosas.⁽¹⁴⁻¹⁷⁾

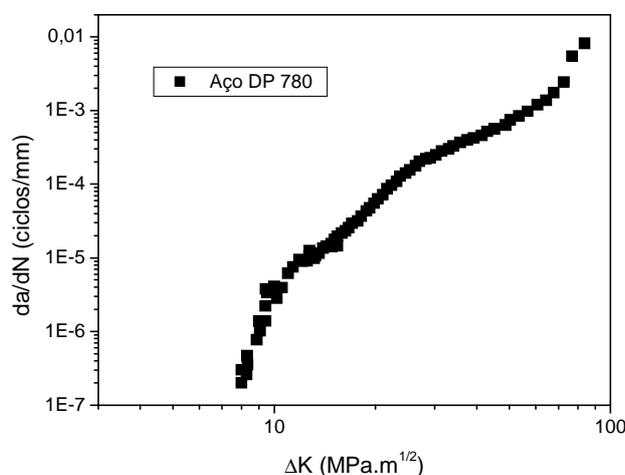


Figura 8: Variação de da/dN em função de ΔK para o aço ferrita-bainita, orientação T-L, $R = 0,1$.

Tabela 3: Limiar ΔK_{th} e fechamento de trinca para para os aços estudados

AÇO	σ_{LE} (MPa)	ΔK_{TH} (MPa.m ^{1/2})	K_{cl}/K_{max}
DP 780	744	8,3	0,96
DP 590 Si	477	6,6	0,82
DP 590 Cr	388	8,1	0,98

Valores do fator de intensidade de tensões no ponto de fechamento de trinca, K_{cl} , foram obtidos em função de ΔK para o aço ferrita-bainita na região do limiar de propagação de trinca. Os resultados são mostrados na Figura 9, na forma da relação K_{cl}/K_{max} em função de ΔK . Pode-se notar que o efeito de fechamento de trinca rapidamente aumenta à medida que ΔK se aproxima do limiar ΔK_{th} . Estes resultados estão consistentes com diversos resultados obtidos para aços.⁽¹⁵⁻²⁴⁾ Os mecanismos que têm sido empregados para explicar este comportamento incluem o fechamento de trinca induzido por oxidação, tortuosidade e deflexão da trinca. A Tabela 3 apresentada anteriormente compara o fechamento de trinca desenvolvido pelo aço ferrita-bainita e pelos aços ferrita-martensita, próximo ao valor de ΔK_{th} . Pode-se observar o bom desempenho da microestrutura ferrita-bainita.

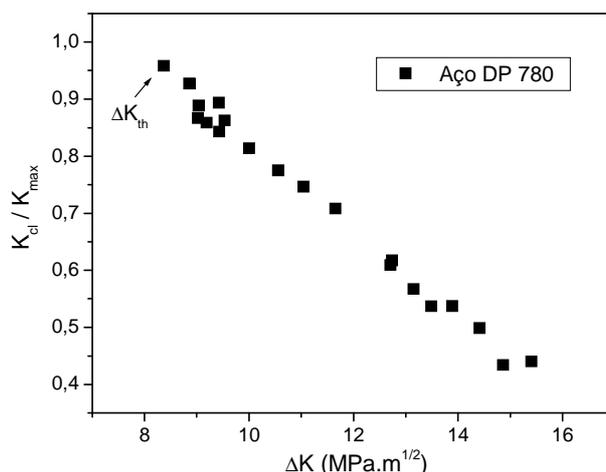
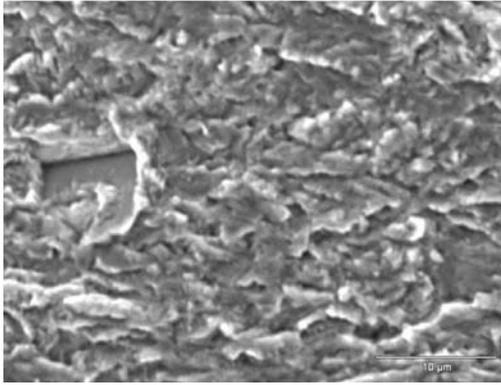


Figura 9: Medidas experimentais do fechamento de trinca próximo da região do limiar de propagação de trinca para o aço ferrita-bainita.

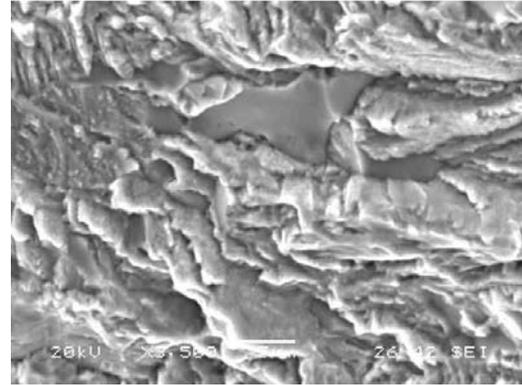
A análise fractográfica dos corpos de prova na região do limiar de propagação de trinca mostrou um modo de fratura predominantemente transgranular, com facetas de cisalhamento associadas a uma propagação de trinca do tipo “zig-e-zag” através da ferrita. A Figura 10(a,b,c) mostra exemplos deste comportamento, para os aços estudados. Este tipo de fratura relaciona-se com elevada rugosidade e deflexão de trinca, característicos do fechamento de trinca induzido por asperezas ^(15, 16). Para níveis mais elevados de taxa de propagação de trinca a superfície de fratura permanece transgranular, mas com evidência de estrias. Este comportamento pode ser observado na Figura 11(a,b,c) para os aços estudados.

4 CONCLUSÕES

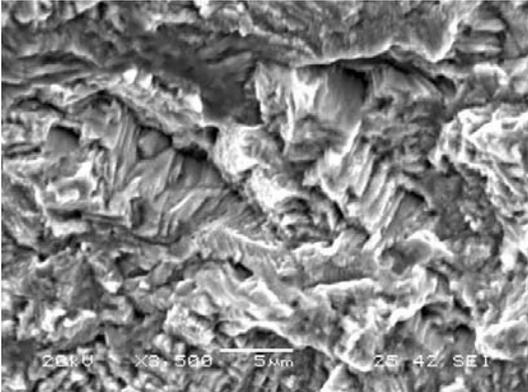
O aço bifásico ferrita-bainita da classe DP-780 apresentou resistência mecânica por tração superior aos aços bifásicos ferrita-martensita da classe DP-590, sem perda significativa de ductilidade. Sua tenacidade à fratura e a sua resistência ao crescimento de trinca por fadiga também são superiores, mostrando que se trata de um aço com promissoras aplicações para o setor automotivo.



(a) Aço ferrita-bainita

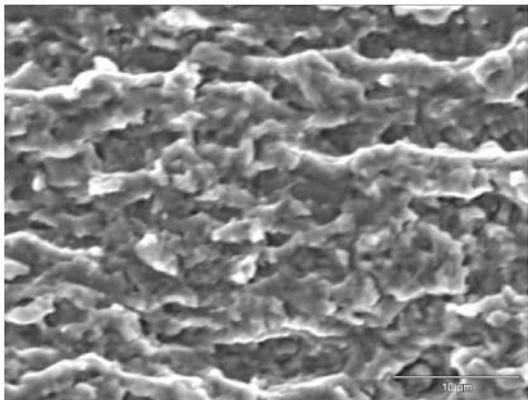


(b) Aço ferrita-martensita ao silício

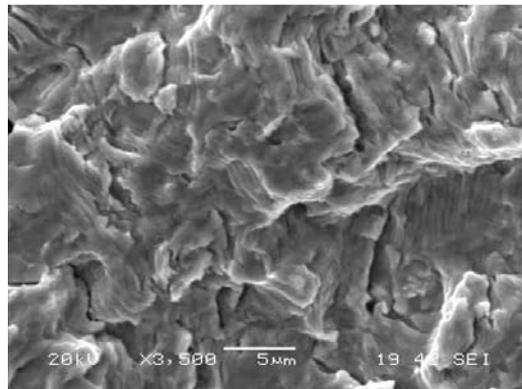


(c) Aço ferrita-martensita ao cromo

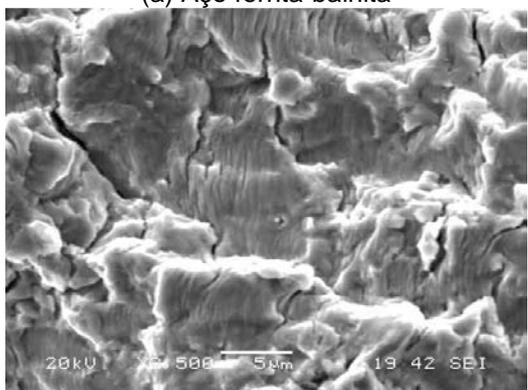
Figura 10: Fratografia da superfície de fadiga do aços estudados, próximo da região do limiar de propagação de trinca, 3.500X, MEV.



(a) Aço ferrita-bainita



(b) Aço ferrita-martensita ao silício



(c) Aço ferrita-martensita ao cromo

Figura 11: Fratografia da superfície de fadiga do aços estudados, região intermediária de propagação de trinca, 3500X, MEV.



Agradecimento

À FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, pelo apoio para participação de Leonardo Barbosa Godefroid e Luiz Cláudio Cândido no 65^o Congresso Anual da ABM.

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 WAGONER, R.O. (organizer): **Advanced high strength steel workshop**, Report. USA, 22-23 outubro 2006.
- 4 WUPPERMANN, C.D.: **The Steel Industry in Europe – Globalisation: Challenges and Opportunities**. Conferência proferida no 62^o Congresso Anual da ABM, Vitória, ES, 2007.
- 5 FEKETE, J.: Current Challenges in Implementing Advanced High-Strength Steels, **International Conference on Microalloyed Steels**. AIST, 2007, pp. 1-9.
- 6 CHO, K., GARCIA, C., SHU, H., CHEN, T. e DEARDO, A.: Development of the 590-780-980 Nb-Bearing Dual-Phase Steels for Production on Continuous Galvanizing Lines. **International Conference on Microalloyed Steels**. AIST, 2007, pp. 313-323.
- 7 ALZARI, S., MORICONI, J. e DALMASO, D.: Fatigue Resistance Comparison between Microalloyed High-Strength and Dual-Phase Steels. **International Conference on Microalloyed Steels**. AIST, 2007, pp. 325-333.
- 8 FEKETE, J., HALL, J., MEULEMAN, D. e RUPP, M.: Progress in Implementing of Advanced High-Strength Steels into Vehicle Structures. **International Conference on New Developments in Advanced High-Strength Sheet Steels**. AIST, 2008, pp. 1-11.
- 9 BHADESHIA, H.K.D.H., **Bainite in Steels**, 2nd Edition, IOM Communications Ltd., 2001.
- 10 RODRIGUES, E.M., PEDRINI, R.H., CRUZ, J.R.B., GRITTI, J.A., CÂNDIDO, L.C. e GODEFROID, L.B.: Tenacidade à fratura de dois aços bifásicos de emprego automotivo. **58^o Congresso Anual da ABM**, Rio de Janeiro/RJ, julho de 2003.
- 11 GRITTI, J.A., MELO, T.M.F., MACHADO, F.A., SILVA, A.P.F.S., CÂNDIDO, L.C. e GODEFROID, L.B.: Efeito de pré-deformação e de tratamento térmico de “bake hardening” na propagação de trinca de fadiga de dois aços bifásicos de emprego automotivo. **42^o Congresso de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos**, Santos - SP, outubro de 2005.
- 12 ASTM E-1820-09, **2009 Annual Book of ASTM Standards**.
- 13 ASTM E-647-08, **2009 Annual Book of ASTM Standards**.
- 14 LIAW, P.K, LEAX, T.R. e LOGSDON, W.A., 1983, “Near-threshold fatigue crack growth behavior in metals”, **Acta Metallurgica**, Vol. 31, pp.1581-1587.
- 15 SHANG, J.K., TZOU, J.L. e RITCHIE, R.O., 1987, “Role of crack tip shielding in the initiation and growth of long and small fatigue cracks in composite microstructures”, **Metallurgical Transactions**, Vol. 18A, pp. 1613-1627.
- 16 DUTTA, V.B., SURESH, S. e RITCHIE, R.O., 1984, “Fatigue crack propagation in dual-phase steels”, **Metallurgical Transactions**, Vol. 15A, pp. 1193-1207.
- 17 TZOU, J.L. e RITCHIE, R.O., 1985, “Fatigue crack propagation in a dual-phase plain-carbon steel”, **Scripta Metallurgica**, Vol. 19, pp. 751-755.
- 18 SUZUKI, H. e MCEVILY, A.J., 1979, “Microstructural effects on fatigue crack growth in a low carbon steel”, **Metallurgical Transactions**, Vol. 10A, pp. 475-481.
- 19 MINAKAWA, K., MATSUO, Y. e MCEVILY, A.J., 1982, “The influence of a duplex microstructure in steels on fatigue crack growth in the near-threshold region”, **Metallurgical Transactions**, Vol. 13A, pp. 439-445.



- 20 CAI, X.L., FENG, J. e OWEN, W.S., 1985, "The dependence of some tensile and fatigue properties of a dual-phase steel on its microstructure", **Metallurgical Transactions**, Vol. 16 A, pp. 1405-1415.
- 21 RAMAGE, R.M., JATA, K.V., SHIFLET, G.J. e STARKE, E.A., 1987, "The effect of phase continuity on the fatigue and crack closure behavior of a dual-phase steel", **Metallurgical Transactions**, Vol. 18A, pp. 1291-1298.
- 22 SUN, L, Li, S., ZANG, Q. e WANG, Z., 1995, "Dependence of fatigue crack closure behaviour on volume fraction of martensite in dual-phase steels", **Scripta Metallurgica**, Vol. 32, pp. 517-521.
- 23 SARWAR, M. e PRIESTNER, R., 1999, "Fatigue crack propagation behaviour in dual-phase steel", **Journal of Materials Engineering and Performance**, Vol. 8, pp. 245-251.
- 24 SUDHAKAR, K.V. e DWARAKADASA, E.S., 2000, "A study on fatigue crack growth in dual-phase martensitic steel in air environment", **Bulletin of Materials Science**, Vol. 23, pp. 193-199.