

INFLUÊNCIA DA PRÉ-DEFORMAÇÃO E DO TRATAMENTO DE “BAKE HARDENING” NA TENACIDADE À FRATURA E NA RESISTÊNCIA À FADIGA DE DOIS AÇOS BIFÁSICOS¹

João Alfredo Gritti²
Túlio Magno Füzessy Melo³
Fabiano Alcântara Machado⁴
Warley da Silva Horta⁵
Luiz Cláudio Cândido⁶
Leonardo Barbosa Godefroid⁶

Resumo

Neste trabalho, a tenacidade à fratura (curva J-R e parâmetro J_Q) e a resistência à fadiga (curva S-N) foram estudadas em dois aços bifásicos de emprego em rodas de automóveis, com cerca de 10% de fração volumétrica de martensita. A principal diferença entre estes aços é a composição química: um deles tinha adição de cromo, enquanto o outro tinha adição de silício. Além deste efeito, verificou-se a influência de 10% de pré-deformação seguida do tratamento térmico de “bake hardening” na resistência à fadiga. Este tratamento termo-mecânico foi utilizado para simular as operações de estampagem e pintura das rodas. O comportamento é diferente para os dois aços, nas duas caracterizações mecânicas avaliadas, sendo melhor o desempenho do aço ao silício. Verificou-se que a pré-deformação e o tratamento térmico diminuem a tenacidade à fratura e a resistência à fadiga dos dois aços (fadiga de alto ciclo).

Palavras-chave: Aços bifásicos; Tenacidade à fratura; Resistência à fadiga; Aplicações automobilísticas.

EFFECT OF PRESTRAIN AND BAKE HARDENING HEAT TREATMENT ON FRACTURE TOUGHNESS AND FATIGUE RESISTANCE OF TWO DUAL-PHASE STEELS

Abstract

In this research, fracture toughness and fatigue crack initiation have been studied in two dual-phase steels broadly used in the automotive industry, with 10% of martensite volume fraction. The main difference between the steels is the chemical composition: one of the steels has chromium additions while the other has silicon as an alloy element. Besides the chemical composition, the effect of 10% of prestrain followed by a bake hardening heat treatment on the fatigue resistance was verified. This thermo-mechanical treatment was used to simulate the stamping and the paint baking of the wheels. Silicon dual-phase steel showed superior behavior than chromium dual-phase steel. The thermo-mechanical treatment diminished the resistance of both steels (high cycle fatigue).

Key words: Fracture toughness; Fatigue crack initiation; Dual Phase Steels.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Engenheiro Metalurgista, ARVIN-MERITOR, Limeira – SP.

³ Engenheiro Mecânico, M.Sc., Dr. Ing., USIMINAS, Ipatinga – MG.

⁴ Engenheiro Metalurgista, mestrando da REDEMAT, UFOP, Ouro Preto – MG.

⁵ Aluno de Engenharia Metalúrgica, Escola de Minas da UFOP, Ouro Preto – MG.

⁶ Professor, M.Sc., D.Sc., REDEMAT, UFOP, Ouro Preto – MG.

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.

Na USIMINAS a evolução da produção de aços por laminação a quente para emprego automotivo tem seguido esta tendência,⁽¹⁻³⁾ com o desenvolvimento de aços bainíticos e ferríticos-martensíticos, também chamados de bifásicos. A ARVIN-MERITOR produz discos de rodas com estes materiais, e domina a indústria de rodas em nosso país.⁽⁴⁾

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 à fadiga tornam-se importantes características exigida para estes materiais, devido às condições de operação do produto.

Neste trabalho, a tenacidade à fratura e a resistência à fadiga foram estudadas em dois aços bifásicos de emprego em rodas de automóveis, com cerca de 10% de fração volumétrica de martensita. A principal diferença entre estes aços é a composição química: um deles tinha adição de cromo, enquanto o outro tinha adição de silício. Além deste efeito, verificou-se a influência de 10% de pré-deformação seguida do tratamento térmico de “bake hardening” na resistência à fadiga. Este tratamento termo-mecânico foi utilizado para simular as operações de estampagem e pintura das rodas. Corpos-de-prova foram confeccionados com a espessura de 3,8 mm, que corresponde à espessura real de aplicação dos aços em rodas de automóveis. A tenacidade à fratura foi estudada através da metodologia da curva J-R, com a determinação do parâmetro J_Q . Este parâmetro corresponde ao valor da integral J para o início da propagação estável de trinca, em função da espessura. A resistência à fadiga foi estudada através da metodologia de fadiga sob controle de tensões, com o traçado de curvas tensão versus número de ciclos para fratura.

Este trabalho está inserido em um projeto de pesquisa que vem sendo executado em nosso grupo de estudos já há alguns anos, e que tem por objetivo a caracterização do comportamento mecânico de aços bifásicos de aplicação automobilística. Diversas publicações já foram realizadas, atestando o bom desempenho desta classe de aços em termos de tenacidade à fratura e de resistência à fadiga, e o efeito de pré-deformação e de tratamento de “bake hardening” na diminuição da resistência à propagação de trinca de fadiga.⁽⁵⁻¹³⁾

MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A composição química dos aços produzidos industrialmente e utilizados neste trabalho está apresentada na Tabela 1. Trata-se de dois aços bifásicos ferrita-martensita com diferentes adições de cromo e silício.

Tabela 1. Composição Química dos Aços bifásicos (% em peso).

Código	C	Si	Mn	Cr
DP-Cr	0,052	0,07	1,16	0,58
DP-Si	0,055	1,03	1,19	0,09

Antes dos ensaios mecânicos, tiras foram retiradas das bobinas originais e submetidas a uma pré-deformação de tração (10%), seguida de um tratamento térmico a 170^o C por 20 min, para simular as operações industriais de fabricação das rodas.

Amostras para metalografia foram preparadas em seções longitudinal e transversal à laminação, e observadas em um microscópio ótico LEICA, usando o reativo químico de Nital.⁽¹⁴⁾

Os ensaios 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 3,8mm, 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 apresentadas na Figura 1. Os corpos-de-prova de tenacidade à fratura são mostrados na Figura 2. Estes corpos-de-prova foram confeccionados com um entalhe lateral, de profundidade igual a 20% da espessura.

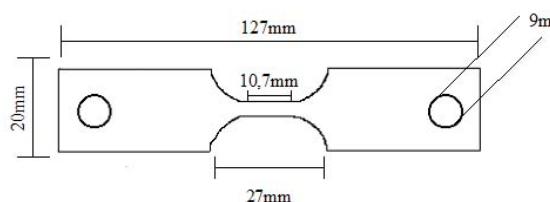


Figura 1. Corpos-de-prova para ensaios de tração e de fadiga.

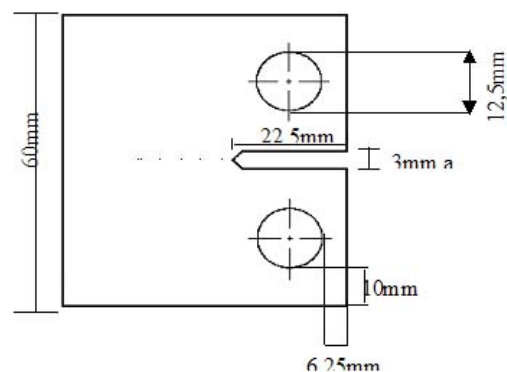


Figura 2. Corpos-de-prova para ensaios de tenacidade à fratura. $a/W = 0,5$.

Os ensaios de tenacidade à fratura foram realizados de acordo com a Norma ASTM E-1820.⁽¹⁵⁾ Curvas de integral J versus crescimento estável de trinca foram traçadas, e o parâmetro J_Q foi determinado para cada aço estudado. Foram utilizados cinco corpos-de-prova para cada situação.

Os ensaios de fadiga foram realizados na frequência de 30 Hz, numa razão R entre tensões de 0,1, de acordo com a Norma ASTM E-466.⁽¹⁶⁾ 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 de três a cinco corpos-de-prova para cada nível de tensão aplicado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As microestruturas dos aços bifásicos na direção transversal são mostradas nas Figuras 3(a,b) e 4(a,b), nas condições como recebido e após o tratamento termo-mecânico, respectivamente. Pode-se observar em ambos os casos a matriz ferrítica (clara) rodeada por ilhas de martensita (escura). Microestruturas idênticas foram obtidas na direção longitudinal, indicando que não existe tendência para fibramento mecânico.

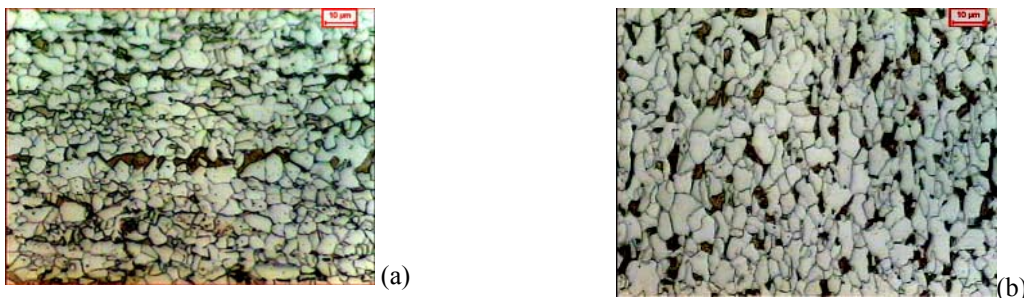


Figura 3. Microestrutura do aço DP-Cr. Direção transversal. Reativo Nital. 1000X. (a) condição como recebido. (b) após tratamento termo-mecânico.

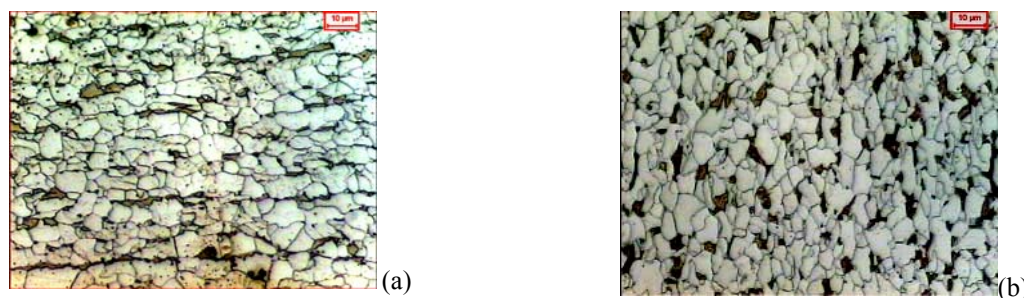


Figura 4. Microestrutura do aço DP-Si. Direção transversal. Reativo Nital. 1000X. (a) condição como recebido. (b) após tratamento termo-mecânico.

Resultados de metalografia quantitativa, obtidos com um analisador de imagens, são mostrados na Tabela 2. Propriedades mecânicas típicas destes materiais (direção transversal, temperatura ambiente) são também apresentadas na Tabela 2.

O tratamento termo-mecânico não alterou de forma significativa as microestruturas dos aços bifásicos, mas aumentou a sua resistência mecânica, através dos mecanismos de endurecimento por deformação (pré-deformação) e endurecimento por solução sólida / precipitação (*bake hardening*). Um aumento considerável nas tensões limite de escoamento e limite de resistência de aços bifásicos após tratamento termo-mecânico tem sido reportado na literatura.⁽¹⁷⁻²⁰⁾

Tabela 2. Resultados de metalografia quantitativa (20 medidas) e propriedades mecânicas de tração (3 corpos-de-prova), direção transversal.

Código	TG ferrita (µm)	FV martensita (%)	C martensita (%)	LE (MPa)	LR (MPa)	ALO (%)
DP-Cr-AR	4,50 ± 0,22	10,56 ± 1,03	25,47 ± 7,84	406 ± 20	569 ± 8	41 ± 2,5
DP-Cr-TM	4,43 ± 0,39	11,69 ± 0,59	25,91 ± 9,13	582 ± 18	644 ± 5	28 ± 1,2
DP-Si-AR	4,62 ± 0,45	7,67 ± 0,67	23,70 ± 6,54	489 ± 24	592 ± 4	37 ± 4,7
DP-Si-TM	4,85 ± 0,33	6,97 ± 0,44	23,01 ± 7,81	653 ± 47	705 ± 44	21 ± 5,6

AR = como recebido; TM = após tratamento termo-mecânico; TG = tamanho de grão; FV = fração volumétrica; C = conectividade; LE = limite de escoamento; LR = limite de resistência; ALO = alongamento.

A análise fratógrfica mostrou uma fratura transgranular e dúctil para os dois aços, com um mecanismo de nucleação, crescimento e coalescimento de microcavidades, independentemente de sua história prévia.

A tenacidade à fratura J_Q obtida para os aços estudados nas situações de como recebido e após tratamento termo-mecânico é apresentada na Figura 5, em função do limite de resistência dos materiais. Observa-se que o aço ao silício apresentou uma maior tenacidade à fratura do que o aço ao cromo, conforme já havia sido verificado por Godefroid et alli,^(5,13) Observa-se também que o tratamento termo-mecânico diminui a tenacidade à fratura de ambos aços bifásicos.

Elevados valores de resistência mecânica e de ductilidade em aços bifásicos contendo silício têm sido documentados por alguns pesquisadores.^(21,22) Estes resultados implicam numa tenacidade à fratura superior do aço ao silício do presente trabalho, em relação ao aço ao cromo. Por outro lado, o tratamento termo-mecânico efetuado com os dois aços bifásicos elevou demasiadamente a resistência mecânica, com diminuição da ductilidade, daí a perda de tenacidade à fratura.

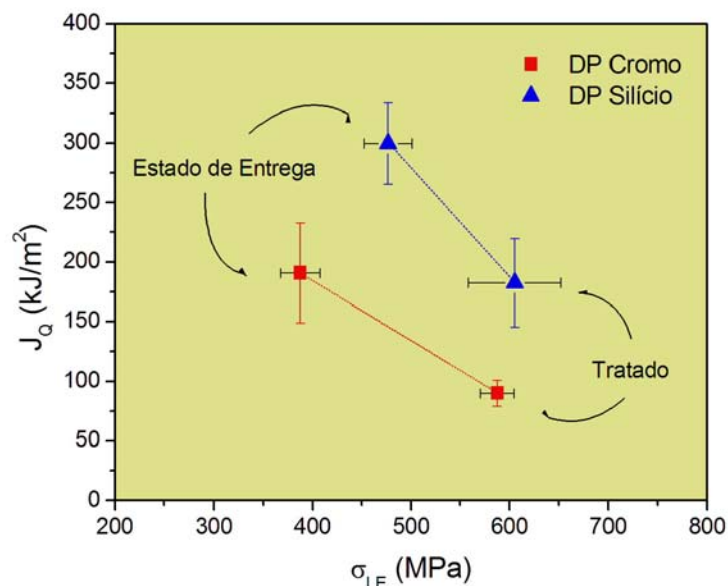


Figura 5. Variação da tenacidade à fratura com o limite de escoamento dos aços ao cromo e ao silício. Comparação entre o estado de entrega com o estado após tratamento termo-mecânico.

A análise fratógrfica mostrou uma fratura transgranular e dúctil para os dois aços, com um mecanismo de nucleação, crescimento e coalescimento de microcavidades, independentemente de sua história prévia. As Figuras 6(a,b) e 7(a,b) mostram estes resultados. A análise foi realizada numa região para tamanho de trinca próximo ao valor correspondente para a tenacidade J_Q .

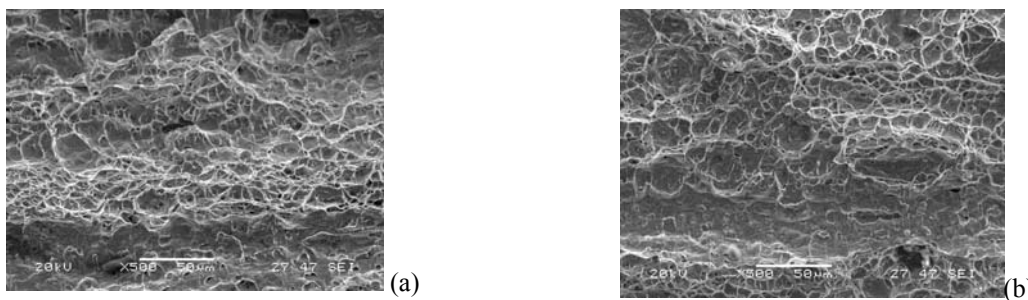


Figura 6. Fratógrafia do aço DP-Cr, direção transversal, 500X. (a) como recebido. (b) após tratamento termo-mecânico.

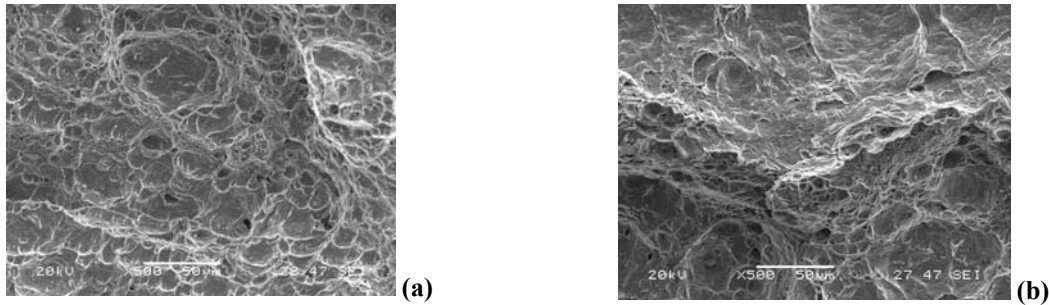


Figura 7. Fratografia do aço DP-Si, direção transversal, 500X. (a) como recebido. (b) após tratamento termo-mecânico.

O comportamento em fadiga está apresentado na Figura 8(a-d). Em cada gráfico, as linhas tracejadas superiores referem-se aos respectivos limites de resistência em tração dos aços bifásicos. A linha vertical correspondente a um valor de número de ciclos igual a 10^7 indica o valor do limite de fadiga, de acordo com a Norma ASTM E-466.⁽¹⁶⁾ As curvas são tendências de comportamento, na forma de decaimento exponencial.

Observa-se que o aço ao silício apresenta uma resistência à fadiga superior ao aço ao cromo, independente da história prévia. Este comportamento está relacionado ao fato do aço ao silício apresentar uma resistência mecânica em tração também superior ao aço ao cromo, uma vez que a resistência à iniciação de trinca por fadiga é diretamente proporcional à resistência mecânica em tração.

O efeito da pré-deformação e do tratamento de “bake hardening” na resistência à iniciação de trinca por fadiga tem sido estudado por diversos pesquisadores.^(20,23-33) Em geral, pode-se dizer que o comportamento dos aços bifásicos vai depender do grau de amolecimento ou endurecimento que estes materiais vão experimentar em fadiga, assim como do nível de carregamento imposto na ciclagem. No presente trabalho, o tratamento termo-mecânico garantiu para os dois aços um melhor desempenho em fadiga na região de fadiga de baixo ciclo, o mesmo não acontecendo na região de fadiga de alto ciclo.

A análise fratógrfica realizada nos dois aços, tanto no estado de entrega como após o tratamento termo-mecânico, 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 9 e 10.

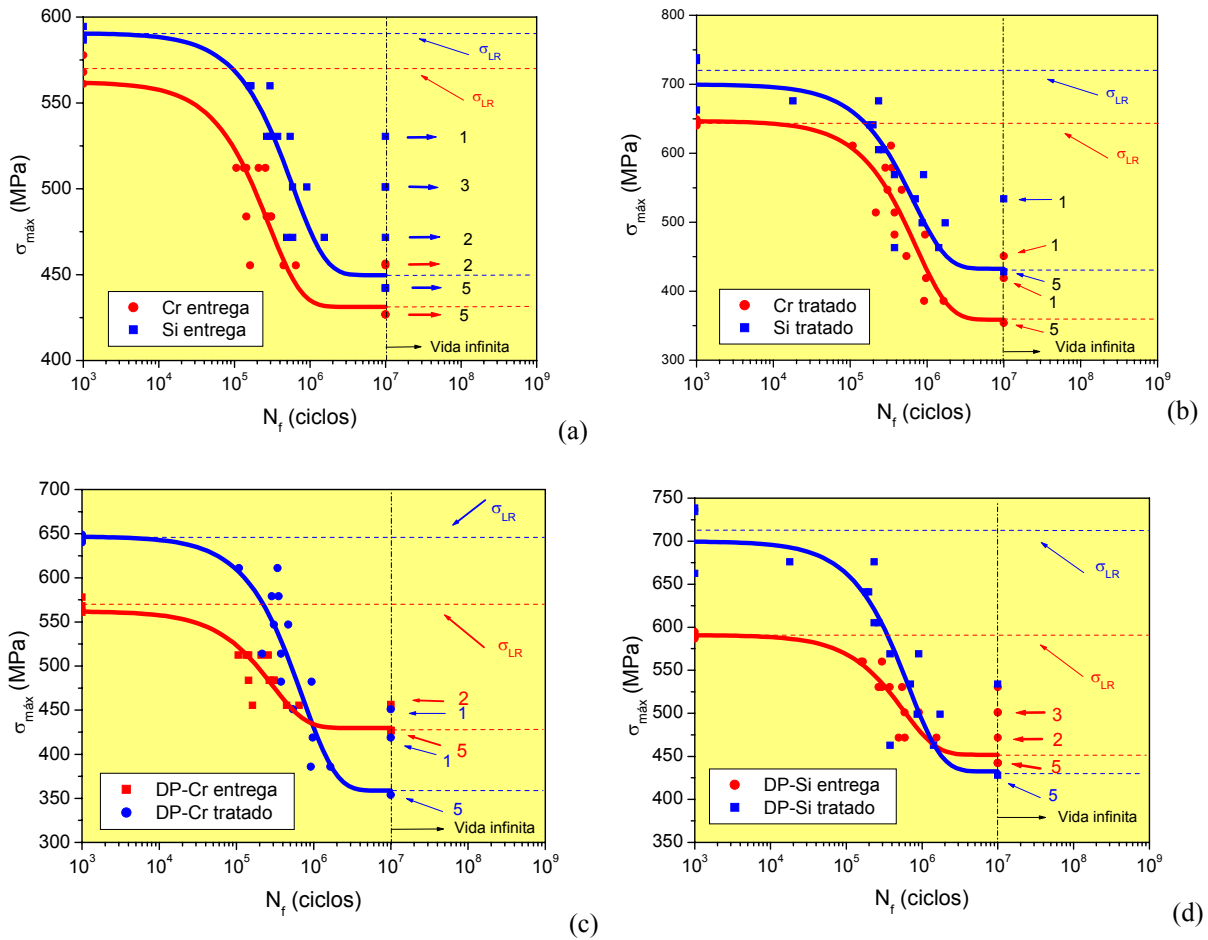


Figura 8. Curvas tensão máxima de fadiga versus número de ciclos para fratura. (a) comparação entre aço ao Cr e aço ao Si no estado de entrega. (b) comparação entre aço ao Cr e aço ao Si após tratamento termo-mecânico. (c) efeito da história prévia, aço ao Cr. (d) efeito da história prévia, aço ao Si.

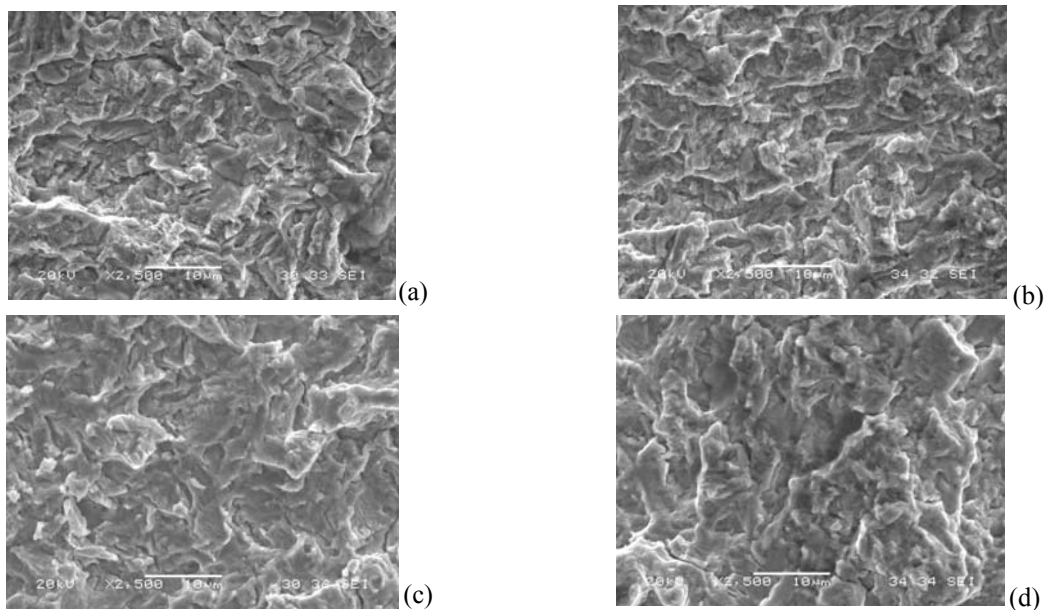


Figura 9. Fratografia do aço DP-Cr, direção transversal, 2500X. (a) como recebido, região de iniciação de trinca. (b) após tratamento termo-mecânico, região de iniciação de trinca. (c) como recebido, região de propagação de trinca. (d) após tratamento termo-mecânico, região de propagação de trinca.

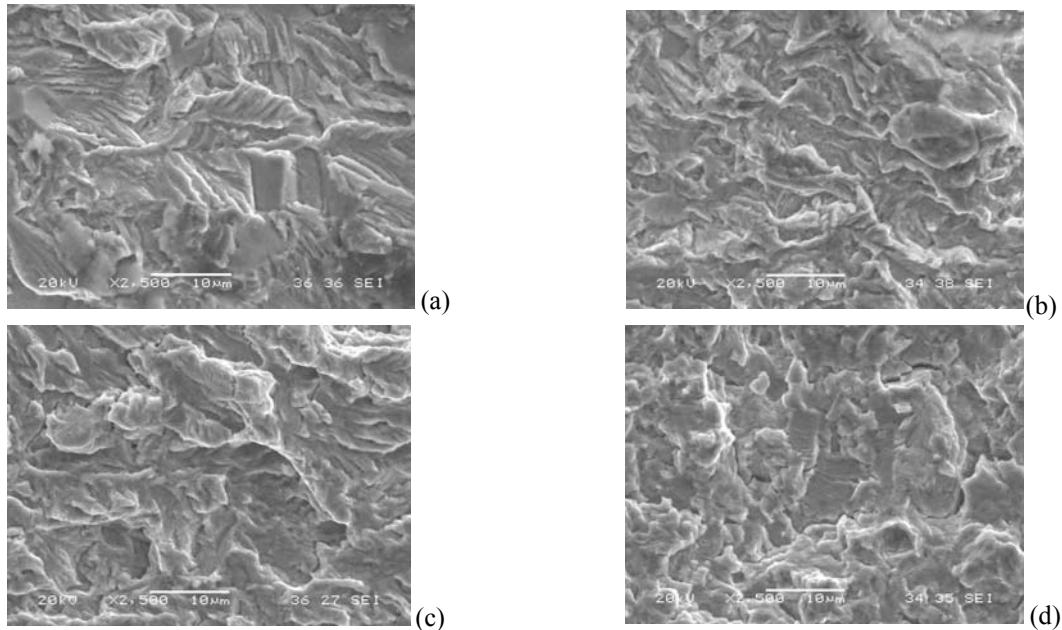


Figura 10. Fratografia do aço DP-Si, direção transversal, 2500X. (a) como recebido, região de iniciação de trinca. (b) após tratamento termo-mecânico, região de iniciação de trinca. (c) como recebido, região de propagação de trinca. (d) após tratamento termo-mecânico, região de propagação de trinca.

CONCLUSÕES

- 1) A pré-deformação e o tratamento térmico de “*bake hardening*” não alteraram de forma significativa a microestrutura dos aços bifásicos estudados, mas promoveram uma elevação na sua resistência mecânica em tração.
- 2) O aço ao silício apresentou tenacidade à fratura superior à do aço ao cromo, independente da sua história prévia.
- 3) Para os dois aços considerados, a pré-deformação e o tratamento térmico de “*bake hardening*” diminuíram sua tenacidade à fratura.
- 4) O aço ao silício apresentou uma resistência à iniciação de trinca por fadiga superior ao do aço ao cromo, independente da sua história prévia.
- 5) Para os dois aços considerados, a pré-deformação e o tratamento térmico de “*bake hardening*” aumentam a resistência à iniciação de trinca por fadiga na região de fadiga de baixo ciclo, o contrário se verificando na região de fadiga de alto ciclo.

REFERÊNCIAS

- 1 Melo, T.M.F., Pinheiro, A.S. and Souza, M.V., 1998, "Resistência à fadiga de aços para rodas automobilísticas", Proceedings of the 53rd Annual Brazilian Metallurgy Congress, ABM, São Paulo, Brazil, pp.1264-1278.
- 2 Souza, M.V.G., Melo, T.M.F., Andrade, G.M., Gritti, J.A. and Costa, J.A., 1997, "Desenvolvimento de aço bifásico ferrita-martensita para aplicação em rodas", Proceedings of the XXXIV Conference on Rolling, ABM, São Paulo, Brazil, pp. 27-40.
- 3 Souza, M.V.G., Melo, T.M.F., Ribeiro, J.C., and Gritti, J.A., 2000, "Desenvolvimento de aço bifásico ferrita-martensita com alto cromo para aplicação em rodas", Proceedings of the XXXVII Conference on Rolling, ABM, São Paulo, Brazil, CD-ROM.
- 4 Gritti, J.A., Costa, J.A. and Toledo, J.R.A., 1994, "Tendências do mercado de rodas de aço para a indústria automobilística", Proceedings of the XXXI Conference on Rolling, ABM, São Paulo, Brazil, pp. 346-351.
- 5 Godefroid, L. B. ; Cangue, F. ; Cândido, L.C. ; Gritti, J. ; Melo, T. F. ; Morais, W.A. . Caracterização metalográfica e fractográfica do crescimento de trinca de fadiga em aços bifásicos. In: Congresso em Ciência dos Materiais do Mercosul, 2002, Joinville. CD-ROM do SULMAT 2002. Joinville : UDESC, 2002.
- 6 Godefroid, L. B. ; Gritti, J. ; Melo, T. F. ; Cangue, F. ; Morais, W.A. ; Cândido, L.C. ; Silva, B. V. ; Pedrini, R. H. . Crescimento de trinca de fadiga em dois aços dual-phase usados em rodas automotivas. In: 57 Congresso Anual da ABM, 2002, São Paulo. CD-ROM do 57 Congresso Anual da ABM. São Paulo : Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002.
- 7 Godefroid, L. B. ; Cândido, L.C. ; Morais, W.A. ; Gritti, J. ; Melo, T. F. ; Cangue, F. . Fatigue crack growth in two dual-phase steels used in automotive wheels discs. In: International Fatigue'2002 Conference, 2002, Stockholm. Proceedings of the International Fatigue'2002 Conference. Londres : Elsevier Science, 2002.
- 8 Godefroid, L. B. ; Guimaraes, C. R. ; Silva, A. P. F. S. . Fatigue Crack Propagation and Closure Behaviour of a Dual-Phase Steel. In: 17th International Congress on Mechanical Engineering, 2003, São Paulo. CD-ROM do COBEM2003. São Paulo : Associação Brasileira de Engenharia Mecânica, 2003.
- 9 Godefroid, L. B. ; Cândido, L.C. ; Barrado, F. ; Melo, T. F. . Efeito de parâmetros do recozimento contínuo nas propriedades mecânicas em tração de aço dual-phase. In: 40 Seminário de Laminação da ABM, 2003, Vitória. CD-ROM do 40 Seminário de Laminação da ABM. São Paulo : Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003.
- 10 Godefroid, L. B. ; Rodrigues, E. ; Pedrini, R. H. ; Cruz, J. R. B. ; Gritti, J.; Cândido, L.C. . Tenacidade à fratura de dois aços bifásicos de emprego automobilístico. In: 58 Congresso Anual da ABM, 2003, Rio de Janeiro. CD-ROM do 58 Congresso Anual da ABM. São Paulo : Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003.
- 11 Godefroid, L. B. ; Cândido, L.C. ; Silva, A. P. F. S. ; Machado, F. A. ; Gritti, J. ; Melo, T. F. . Effect of prestrain and bake hardening heat treatment on the fatigue crack growth and fatigue crack closure of two dual-phase steels. In: 18th COBEM, 2005, Ouro Preto. 18th International Congress of Mechanical Engineering. São Paulo : Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 2005.

- 12 Godefroid, L. B. ; Cândido, L.C. ; Silva, A. P. F. S. ; Machado, F. A. ; Gritti, J. ; Melo, T. F. . Efeito de pré-deformação e de Tratamento Térmico de bake hardening na Propagação de Trinca de Fadiga de dois Aços Bifásicos de Emprego Automotivo. In: 42 Congresso de Laminação, 2005, Santos. CD-ROM do Congresso. São Paulo : Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.
- 13 Godefroid, L. B. ; Cândido, L.C. ; Cangue, F. ; Rodrigues, E. ; Gritti, J. ; Melo, T. F. . Tenacidade à fratura e crescimento de trinca por fadiga de dois aços bifásicos de emprego automotivo. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 58, n. 1, p. 45-50, 2005.
- 14 Vander Voort, G.F., 1984. *Metallography – Principles e Practice*. Edited by McGraw Hill-Book Company.
- 15 *ASTM E-1820-01. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*. 2001 Annual Book of ASTM Standards.
- 16 *ASTM E-466-01. Standard Practing for conducting force controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*. 2001 Annual Book of ASTM Standards.
- 17 Chang, P.H., 1984a, “Temper-aging of continuously annealed low carbon dual-phase steel”, *Metallurgical Transactions*, Vol. 15A, pp. 73-86.
- 18 Chang, P.H., 1984b, “Effects of prior cold rolling and post temper rolling on the properties of continuously annealed low carbon dual-phase steel”, *Metallurgical Transactions*, Vol. 15A, pp. 671-678.
- 19 Davies, R.G., 1981, “Tempering of dual-phase steel”, *Fundamentals of dual-phase steels*, AIME, pp. 265-277.
- 20 Fredriksson, K., Melander, A. and Hedman, M., 1988, “Influence of prestraining and aging on fatigue properties of high- strength sheet steels”, *International Journal of Fatigue*, Vol. 10, pp. 139-151.
- 21 Davies, R.G., 1979, “On the ductility of dual-phase steels”, *Formable HSLA and Dual-Phase Steels*, Proceedings of an AIME Symposium, pp. 25-39.
- 22 Kato, T., Hashiguchi, K., Takahashi, I., Irie, T. E Ohashi, N., 1981, “Development of as-hot-rolled dual-phase steel sheet”, *Developments of Dual-Phase Steels*, Proceedings of an AIME Symposium, pp. 199-220.
- 23 Mizui, M., Soneda, S., Sekine, T., 1984. *Nippon Steel Tech. Rep.*, Vol. 23, pp. 19-30.
- 24 Mizui, M., Takahashi, M., 1991. *ISS 33rd Mechanical Working and Steel Processing (MWSP) Conference*, pp. 31-38, St. Louis, USA.
- 25 Quesnel, D.J., Meshhii, M., 1977. *Mat. Sci. Engng.*, Vol. 30, , pp. 223-241.
- 26 Aichbhaumik, D., “Steel variability effects on low cycle fatigue behavior of a single grade of high strength low alloy steel”. *Metall. Trans. A*, 1979, Vol. 10, pp. 269-278.
- 27 Sherman, A.M., 1975. “Fatigue properties of high strength low alloy steels”. *Metall. Trans. A*, Vol. 6, pp. 1035-1040.
- 28 Sherman, A.M., Davies, R.G., 1979. “Fatigue of a dual-phase steel”. *Metall. Trans. A*, Vol. 10, pp. 929-933.
- 29 Nagase, Y., Kanri, T., *Fat. Fract. Engng. Mat. Struct.*, Vol. 15, 1992, pp. 213-223.
- 30 Juhas, M.C. e Bernstein, I.M., 1983. “Effect of prestrain on the mechanical properties of eutectoid steel”. *Metall. Trans.*, Vol. 14A, pp. 1379-1388.
- 31 Sperle, J.O., 1985. “Fatigue strength of high strength dual-phase steel sheet”. *Int. J. Fatigue*, Vol. 7, pp. 79-86.
- 32 Uemura, T., 1998. “A fatigue life estimation of specimens excessively prestrained in tension”. *Fat. Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 21, pp. 151-158.
- 33 Tosal-Martínez, L., Keichel, J., Akdut, N., 2001. “Fatigue behavior of multiphase steels for automotive applications”. *Proceedings of the 10th International Congress on Fracture*, Elsevier Science.