

Vida em fadiga de aços carbono com estrutura bifásica ferrita-martensita

R. Magnabosco¹ e T. Botton²

¹ Mestre em engenharia, EPUSP/1996 – Doutorando em engenharia, EPUSP/2000, Professor do Departamento de mecânica da FEI – LabMat/FEI - rodmagn@cci.fei.br.
² Aluna de graduação do curso de engenharia mecânica da FEI – Bolsista PBIC/FCA

Resumo: As propriedades mecânicas de aços baixo-carbono com estrutura bifásica obtidas em pesquisas anteriores se aproximam das encontradas em aços temperados e revenidos de maior teor de carbono. Considerando-se a existência de ferrita equiaxial nestes materiais, pode-se então concluir que as estruturas bifásicas, se comparadas às martensíticas de mesma resistência mecânica, podem apresentar maior resistência à fadiga, juntamente com maior tenacidade, o que implica em associar maior confiabilidade aos componentes produzidos com aços bifásicos. Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho sob esforços cíclicos, ou vida sob fadiga, de aços com estrutura bifásica ferrita-martensita, descrevendo inclusive as variáveis necessárias para a obtenção da relação de Basquin-Morrow, relacionando para o aço em estudo tensão média, amplitude de tensões e número de ciclos até a fratura, permitindo a previsão de vida sob fadiga deste material sob diferentes ciclos de tensão.

Abstract: The mechanical properties of high strength low alloy steels with dual-phase (ferrite-martensite) structure are close to the ones found in quenched and tempered high strength structural steels. Considering the presence of ferrite in HSLA dual-phase steels in up to 79% volume fraction, one could assume that its fatigue life, compared to the fatigue life of martensitic conventional steels of the same mechanical resistance, can be higher. This work found the mathematical relation between fatigue life and cyclic loads applied to a dual-phase steel, describing the Basquin-Morrow equation for this material, allowing fatigue life pre-definition under certain cyclic loads applied.

Palavras-chave: aços bifásicos; vida em fadiga; ensaios mecânicos.

A categoria de aços bifásicos ferrita-martensita de alta resistência e baixa liga (ARBL) apresenta microestrutura constituída por 80 a 90% de ferrita poligonal e 10 a 20% de “ilhas” de martensita dispersas na matriz ferrítica, obtidas durante austenitização na zona intercrítica (campo de estabilidade de ferrita e austenita no diagrama de fases Fe-C), seguida de resfriamento rápido para transformação da austenita previamente formada em martensita^[1]. Da predominância na microestrutura destas fases advém o termo bifásico; contudo, pequenas quantidades de outras fases ou microconstituintes (como bainita, austenita retida e perlita) podem estar presentes^[2, 3].

O limite de resistência destes materiais, via de regra, atinge valores de 690 MPa, e o limite de escoamento típico é de 310 a 345 MPa. Por apresentarem baixo limite de escoamento e ainda comportamento contínuo no escoamento, podem ser conformados como os aços de baixa resistência; contudo, as peças produzidas apresentam elevada resistência mecânica por causa de seu elevado coeficiente de encruamento. Além disso, apresentam um alongamento total superior a qualquer outro aço ARBL de resistência similar^[2], além de alongamento uniforme superior a 18%^[3], possuindo portanto altos valores também de tenacidade.

Os aços bifásicos têm na indústria automobilística seu maior potencial de uso, como reportam VLAD *et alli*^[4]; tal tendência de fato se concretizou, particularmente na fabricação de rodas estampadas^[2,4-7]. Deve-se salientar, no entanto, que a formabilidade dos aços bifásicos não se manifesta apenas nos valores de alongamento obtidos nos ensaios de tração: o índice de anisotropia normal (r_m) e o coeficiente de encruamento (n) destes materiais demonstram a vocação destes materiais para a estampagem. O índice de anisotropia normal

(variando de 1 a 1,4) demonstra a resistência à redução de espessura apresentada por estes materiais, enquanto que o alto coeficiente de encruamento (com valores de até 0,21) indica a capacidade de distribuição uniforme da deformação nas peças produzidas deste material^[8]. No trabalho anteriormente citado^[4], curvas limite de conformação (CLC ou FLC, “*formability limiting curves*”) de aço bifásico e outro ARBL de mesma resistência são comparadas, e constata-se a melhor formabilidade dos aços bifásicos, já que as deformações necessárias para a ocorrência de ruptura nestes são maiores que as observadas no aço ARBL em questão.

Em trabalho desenvolvido no LabMat/FEI^[9], obteve-se para aço bifásico (0,11% C, 21% de fração volumétrica de austenita, limite de escoamento de 400 MPa, limite de resistência 700 MPa, alongamento total em 50 mm 22% - valores médios) índice de anisotropia normal médio variando entre 1,0 e 1,4, confirmando trabalhos anteriores, e índice de anisotropia planar igual a -0,18. A tenacidade de aço baixo-carbono com estrutura bifásica também foi objeto de pesquisas anteriores no LabMat/FEI^[10], indicando temperatura de transição dúctil-frágil (TTDF) em torno de -110°C, e energia absorvida no ensaio Charpy com corpos-de-prova de espessura reduzida (2,5 mm) de 20 J no patamar superior, 1 J no patamar inferior, e 10,5 J na região da TTDF.

Sun *et alli*^[11] estudaram o efeito das ilhas de martensita no “fechamento” de trincas de fadiga de alto ciclo se propagando na matriz ferrítica de aços bifásicos. O estudo mostrou que o fenômeno de “fechamento” torna-se mais intenso à medida que aumenta a fração volumétrica de martensita. Tal fato se deve à resistência oferecida pelas ilhas de martensita à propagação de trincas, levando a constantes desvios na direção de propagação destas;

esta propagação em “zigue-zague” provoca o efeito de fechamento de trincas, aumentando a vida sob fadiga. Este efeito benéfico, no entanto, não se observa nos casos de fadiga de baixo ciclo, no qual o aumento da fração volumétrica de martensita causa a diminuição da vida do material^[20].

O presente trabalho visa a caracterizar a vida em fadiga de aço ARBL de estrutura bifásica ferrita-martensita através do levantamento das variáveis necessárias para a definição da equação de Basquin-Morrow (eq. 1), que correlaciona a amplitude de tensões (σ_a) e a tensão média aplicada no ciclo de tensões (σ_m) com o número de ciclos até a ruptura (N_f) e as características do material: b , ou expoente de Basquin, e $\tilde{\sigma}_f$, ou a tensão real de ruptura do material^[13]:

$$\sigma_a = (\tilde{\sigma}_f - \sigma_m) N_f^b \quad (\text{eq. 1})$$

As definições de σ_a e σ_m encontram-se na Figura 1.

Materiais e Métodos

Corpos-de-prova de tração de aço ARBL de procedência nacional, cuja composição química encontra-se na Tabela I, foram retirados de chapas, orientados paralelamente ao sentido de laminação das chapas. A análise metalográfica do material após ataque com Nital 2% indica a presença de ferrita poligonal e ilhas de martensita (Figura 2), e estudo de estereologia quantitativa assistido pelo sistema QW500 Leica mostra 21% de fração volumétrica de martensita. A mesma análise, conduzida sob superfície polida, indica a presença de 0,32% de inclusões, distribuídas entre óxido-globular e sulfeto (Figura 3).

Ensaio de tração foram conduzidos com o intuito de se determinar a resistência mecânica do material (limite de escoamento, limite de resistência e limite real de ruptura), traçando os limites para os ensaios de fadiga, que foram conduzidos variando-se as cargas máxima e mínima para obtenção de ensaios com diferentes valores de tensão média e amplitude de tensões. Destes resultados, obteve-se o valor do expoente de Basquin, caracterizando o material quanto a vida sob fadiga.

Elemento (%)					
C	Si	Mn	Al	P	S
0,11	0,30	1,11	0,038	0,017	0,014

Tabela I: composição química do material em estudo.

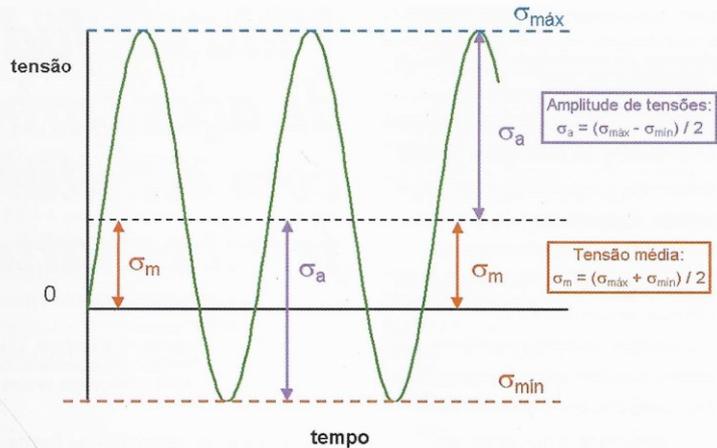


Figura 1: ciclo aleatório de tensões onde se define σ_a e σ_m .

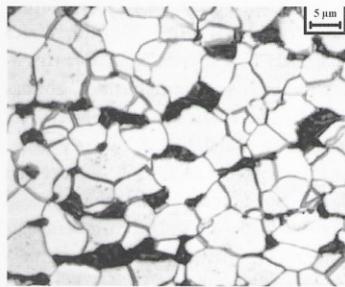


Figura 2: microestrutura do material em estudo. Ferrita (clara) e martensita (escura). Ataque: Nital 2%

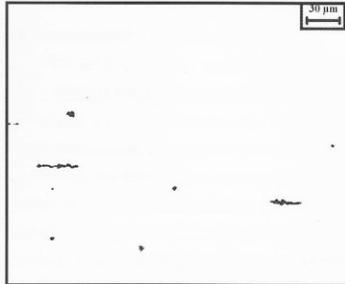


Figura 3: inclusões do material em estudo, do tipo óxido globular e sulfeto (alongadas). Superfície sem ataque.

Resultados experimentais e discussão

Na Tabela II encontram-se os valores de limite de escoamento, limite de resistência, alongamento total em 50 mm e limite de ruptura real para o aço em estudo, obtidos em ensaios de tração convencionais. De posse destes dados, experimentos de sollicitação sob carga cíclica de corpos-de-prova de tração foram realizados, mantendo-se constantes a tensão média e a amplitude de tensões aplicadas, sob frequência média de 13,5 Hz, levantando-se o número de ciclos para

a fratura de fadiga em função da tensão média e da amplitude de tensões imposta.

Limite de escoamento, σ_{LE} (MPa)	394
Limite de resistência, σ_{LR} (MPa)	656
Limite de ruptura real, $\tilde{\sigma}_f$ (MPa)	1064

Tabela II: propriedades mecânicas do material em estudo.

De posse do valor de limite de ruptura real do aço em questão, para caracterizá-lo quanto a sua vida em fadiga, se deve obter o expoente de Basquin, b . Para tanto, se a eq.1 for reescrita, obtém-se

$$\log \left[\frac{\sigma_a}{(\tilde{\sigma}_f - \sigma_m)} \right] = b \cdot \log(N_f) \quad (\text{eq. 2})$$

E, deste modo, se os resultados dos ensaios de fadiga conduzidos forem mostrados como na Figura 4, tem-se que a inclinação da reta traçada é o expoente de Basquin procurado. Na verdade, a Figura 4 mostra, além dos resultados experimentais, os resultados dos cálculos de vida sob fadiga considerando valores de 1064 MPa para o limite de ruptura real (Tabela II) e valor do expoente de Basquin -0,094, resultado da média dos valores de expoente calculados para cada um dos experimentos realizados. Assim, a equação que caracteriza a vida sob fadiga do aço em estudo é:

$$\sigma_a = (1064 - \sigma_m) N_f^{-0,094} \quad (\text{eq. 3}),$$

com σ_a e σ_m em MPa, e N_f como o número de ciclos até a ruptura.

A partir da eq.3 foi possível prever a vida sob fadiga do aço em questão, como mostra a Figura 4. Nota-se, no entanto, a grande dispersão de resultados, provavelmente associada à técnica de ensaio (a máquina de ensaios, hidráulica e de

comandos mecânicos) e à variabilidade de condição superficial imposta pela usinagem dos corpos-de-prova. Faz-se, portanto, necessário novo estudo, em equipamento já adquirido pela FCA/FEI (uma máquina universal de ensaios MTS servo-controlada de 25 kN de capacidade máxima) capaz de manter ciclos de tensão mais rigorosamente controlados, mantendo nos resultados apenas a incerteza inerente à condição superficial imposta.

Conclusões

O presente trabalho permite as seguintes conclusões:

→ A vida sob fadiga do aço ARBL ferrita-martensita estudado pode ser descrita por:

$$\sigma_a = (0.64 - \sigma_m) N_f^{-0.094} \quad (\text{eq. 3}),$$

com σ_a e σ_m em MPa, e N_f como o número de ciclo até a ruptura.

→ Existe grande dispersão entre os resultados experimentais e os valores esperados pelos cálculos efetuados com a equação acima, sendo necessário novo estudo, em equipamento capaz de manter ciclos de tensão mais rigorosamente controlados, mantendo nos resultados apenas a incerteza inerente à condição superficial imposta.

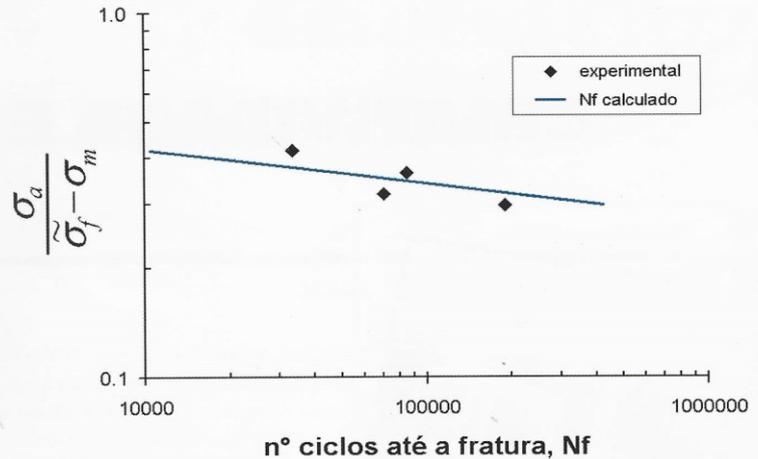


Figura 4: Valores de amplitude e média de esforços cíclicos aplicados em função número de ciclos até a fratura para o aço em estudo. Em azul, número de ciclos até a fratura, calculado pela eq.3 para as solicitações impostas nos diferentes ensaios realizados.

Agradecimentos

À Fundação de Ciências Aplicadas pelo suporte financeiro a este trabalho, e à equipe de técnicos do LabMat/FEI, Antonio M. Miron, Hamilton O. Silva, Marcos O. Gentil, Romildo de Freitas, Sandro A. A. Gimenez e Willian Naville pelo apoio nas atividades experimentais realizadas.

Bibliografia

- [1] High-strength structural and high-strength low-alloy steels. IN: METALS Handbook, 10ª ed., Metals Park: ASM, 1990. v.1: Properties and selection: irons, steels and high-performance alloys, p. 389-423.
- [2] SPEICH, G. R., *Dual-phase steels*. IN: METALS Handbook, 10ª ed., Metals Park: ASM, 1990. v.1: Properties and selection: irons, steels and high-performance alloys, p. 424-9.
- [3] SPEICH, G. R., *Physical metallurgy of dual-phase steels*. IN: KOT, R. A. BRAMFITT, B. L. (ed), *Fundamentals of dual-phase steels*. Proceedings, AIME/ASM, 1981, p. 3-46.
- [4] VLAD, C. M., *Mechanical-forming properties and the microstructure of direct off the rolling mill processed dual-phase steels*. IN: KORCHYSKY, M. (org) *HSLA steels - technology and applications*. Proceedings, ASM, 1983, p. 329-39.
- [5] GRITTI, J. A. et alli. *Tendências do mercado de rodas de aço para a indústria automobilística*. Metalurgia e materiais ABM: São Paulo 1995 p. 346-51.
- [6] BRITO, R. M. et alli. *Aços planos de alta resistência mecânica - alternativa para redução de peso de carrocerias de automóveis*. Metalurgia e materiais ABM: São Paulo 1995, p.316-23
- [7] GERMANO, R. L. S. et alli. *Desenvolvimento de aço microligado para uso em rodas automotivas*. Metalurgia e materiais ABM: São Paulo, 1995, p. 340-5.
- [8] JHA, B. K., et alli. *Tempering characteristics of a Cr-Mo dual phase steel*. Steel research, v.64, 1993, p.171-7.
- [9] MAGNABOSCO, R.; BORTOLUSSI, R.; MATHEISEN, A. S.; LIMA, C. G.; *ANISOTROPY INDEXES DETERMINATION IN HSLA STEELS*. In: XV COBEM (Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica), 22 a 26 de novembro de 1999 (anais em cd-rom).
- [10] MAGNABOSCO, R.; ROSSETTO, L. C. *TOUGHNESS ANISOTROPY IN HSLA STEELS*. In: XV COBEM (Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica), 22 a 26 de novembro de 1999 (anais em cd-rom).pp
- [11] SUN, L. et alli. *Dependence of fatigue crack closure behavior on volume fraction of martensite in dual-phase steels*. Scripta metallurgica et materialia, v.32, 1995, p.517-21.
- [12] BEATTY, J. H. et alli. *Strain distribution effects on the low cycle fatigue of Fe-C-Mo steels*. Metallurgical transactions A, v.22A, 1991, p.675-83.
- [13] SURESH, S. *Fatigue of materials* Cambridge Press: Boston 2ª ed., 1998, cap. 7.