

COMPORTAMENTO EM FADIGA DE BAIXO CICLO DE UM AÇO 41B30H COM MICROESTRUTURA BIFÁSICA¹

Luiz Carlos Rolim Lopes²
Patrícia Rocha Maia³
Lucas Soncin Xavier³
Luciano Pessanha Moreira⁴

Resumo

Amostras do aço 41B30H, tratadas dentro do campo intercrítico do diagrama Fe-C, para produzir microestruturas bifásicas de ferrita+martensita, foram submetidas à testes de tração e de fadiga por deformação controlada e os resultados foram comparados com os de amostras deste aço, tratadas de modo convencional por têmpera a partir do campo austenítico, e revenido. Amostras do aço foram submetidas a tratamentos térmicos de têmpera a 737°C, 782°C e 900°C seguidos de revenido a 600°C. Foram obtidas microestruturas de ferrita+martensita, com respectivamente, 56%; 67% e 100% de martensita. Alguns corpos-de-prova foram submetidos exames ao MEV. As curvas monotônicas e cíclicas mostram que o material com maior teor de ferrita sofre endurecimento cíclico, enquanto que os outros dois, com maior teor de martensita mostram amolecimento cíclico. O diagrama de Coffin-Manson indica que a microestrutura mais rica em ferrita tem maior resistência a fadiga de baixo ciclo, enquanto que a microestrutura com 100% de martensita tem maior desempenho no campo de fadiga de alto ciclo. O material tratado a 782°C tem resistência à fadiga intermediária.

Palavras-chave: Fadiga de baixo ciclo; Microestrutura bifásica; Aço 41B30H.

LOW-CYCLE FATIGUE BEHAVIOR OF A 41B30H STEEL WITH DUAL-PHASE MICROSTRUCTURE

Abstract

In this work, the low-cycle fatigue behavior of samples of a 41B30H steel heat treated in the inter-critical temperature range has been studied and compared with samples treated in the austenitic region. Samples of this steel have been submitted to quenching treatment from 737°C, 782°C e 900°C and tempering at 600°C. Dual-phase microstructures of ferrite+martensite with 56%; 67% and 100% of martensite volume fractions were produced, respectively. Tensile and fatigue tests were realized to build monotonic and cyclic stress-strain curves and Coffin-Manson diagrams. Some samples have received metallographic preparation for surface observation in SEM. The data showed that the material with higher volume fraction of ferrite has a cyclic hardening behavior and the other two conditions, with higher martensite volume fraction, cyclic soften. Coffin-Manson plot shows that the microstructure with higher volume fraction of ferrite has higher performance in the low-cycle fatigue region while the microstructure with 100% of martensite shows higher strength in high-cycle fatigue region. The material heat treated at 782°C shows a intermediate behavior between the other two.

Key words: Low-cycle fatigue; Dual-phase microstructure; 41B30H steel.

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

² Eng. Metalúrgico, D.Sc., Escola de Eng. Ind. Metalúrgica de Volta Redonda UFF

³ Estudante de Engenharia Mecânica, Bolsista PIBIC/CNPq, Escola de Eng. Ind. Metalúrgica de Volta Redonda UFF

⁴ Eng. Mecânico, D.Sc., Escola de Eng. Ind. Metalúrgica de Volta Redonda, UFF

1 INTRODUÇÃO

O aço AISI41B30H é empregado na produção de cilindros para armazenamento de gás natural veicular (GNV). Alguns trabalhos anteriores mostraram que uma microestrutura bi-fásica, constituída Ferrita e Martensita, oferece, a este material, melhores propriedade para conformação que uma microestrutura normalizada.⁽¹⁾ Como, nas condições de serviço, este vaso de pressão é submetido a ciclos de pressurização e despressurização, é de particular importância o estudo da influência desta microestrutura sobre o comportamento em fadiga de baixo ciclo deste aço. Alguns autores publicaram em anos recentes estudo de propriedades cíclicas de alguma composições de aços com microestrutura bifásica.^(2,3) Entretanto, para a composição do aço AISI 41B30H, com estrutura bifásica, a literatura não apresenta previa publicação. Além disso, o tratamento comercialmente empregado para esse aço é o têmpera a partir do campo austenítico e revenido.

O objetivo deste trabalho é estudar o efeito da fração volumétrica de martensita sobre as propriedades cíclicas do aço 41B30H tratado dentro da região intercrítica do diagrama Fe-C, para a produção de microestruturas com diferentes frações volumétricas de ferrita e martensita, revelando seu comportamento cíclico e resistência à fadiga de baixo ciclo.

2 MÉTODOS EXPERIMENTAIS

2.1 Material e Tratamentos Térmicos

Amostras do aço AISI41B30H foram retiradas de tubos sem costura, na condição de normalizado na linha de produção, e receberam tratamentos térmicos na região intercrítica do diagrama de equilíbrio Fe-C, para produzir microestruturas com diferentes frações volumétricas de martensita. Dentro da região intercrítica, as amostras foram temperadas a partir de três temperaturas: 737°C, 782°C. Para efeitos de comparação com o tratamento convencional deste aço, foram também realizados tratamentos no campo austenítico a 900°C. Posteriormente, todas as amostras receberam um tratamento de revenido a 600°C. A composição química do aço 41B30H empregado neste trabalho é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço AISI 41B30H empregado neste trabalho.

Elemento (%)	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb	B	P	S
Min	4	15	2	2	8	15	-	1	5x10 ⁻³	-	-
Max	33	6	35	30	110	25	35	3	2	15	1

2.2 Microestrutura do Material

As frações volumétricas foram medidas com o auxílio da microscopia ótica e do aplicativo ImagePro, de análise de imagens metalográficas. Observações ao MEV foram realizadas sobre a superfície de alguns cp's, após ensaios de fadiga. Estes cp's receberam preparação metalográfica prévia. Alguns receberam ataque com Nital. Outros foram observados sem ataque metalográfico.

2.3 Ensaio Mecânicos

Os ensaios mecânicos, de tração e fadiga foram realizados em uma máquina servo-hidráulica de ciclo fechado, com capacidade de carga para ± 100 kN, Instron 8801. Todos os testes foram realizados na temperatura ambiente de aproximadamente 25°C. Para ambos os tipos de testes empregaram-se corpos-de-prova (cp) lisos com a geometria mostrada na Figura 1.



Figura 1. Geometria dos corpos-de-prova empregados nos testes de tração e fadiga.

As dimensões dos cp's são como se segue. Comprimento útil: 15mm de comprimento e 6mm de largura; nos ombros: 56mm de comprimento e 7,7 de largura; 8mm de espessura. Os testes de fadiga foram conduzidos sob controle de deformação, através de um extensômetro com 10mm de comprimento entre facas, com o objetivo de levantar as curvas tensão-deformação cíclica e os digramas de Coffin-Manson, para as diferentes condições microestruturais do material. Nos testes para construir a curva tensão-deformação a fez-se a amplitude de deformação total variar de 0,25% a 1%. Para o diagrama de Coffin-Manson foram usadas as amplitudes de deformação 0,2%, 0,3%, 0,4% e 0,6%.

3. RESULTADOS

3.1 Microestrutura

As frações volumétricas das fases ferrita e martensita resultantes dos tratamentos térmicos intercríticos são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Fração volumétrica das fases ferrita e martensita obtidas como resultado dos tratamentos térmicos de têmpera a partir das temperaturas indicadas e revenido à 600°C nas amostras do AISI 41B30H

737°C	782°C	900°C
44% ferrita + 56% martensita	33% ferrita + 67% martensita	100% martensita

3.2 Curvas Monotônicas e Tensão-Deformação Cíclicas

As Figuras 3 a 5 mostram as curvas monotônicas (CTD) e tensão-deformação cíclica (CTDC), para valores de deformação até 1%, para os diferentes tratamentos térmicos empregados neste trabalho.

As Tabelas 3 e 4 apresentam as propriedades retiradas das curvas de tração e cíclica para as três condições de tratamento. Como se pode observar nas Tabelas 3 e 4, os coeficiente de encruamento para as três condições em tração são maiores que os coeficientes de encruamento cíclicos. O coeficiente de encruamento cíclico para o material com 100% de martensita é aproximadamente nulo.

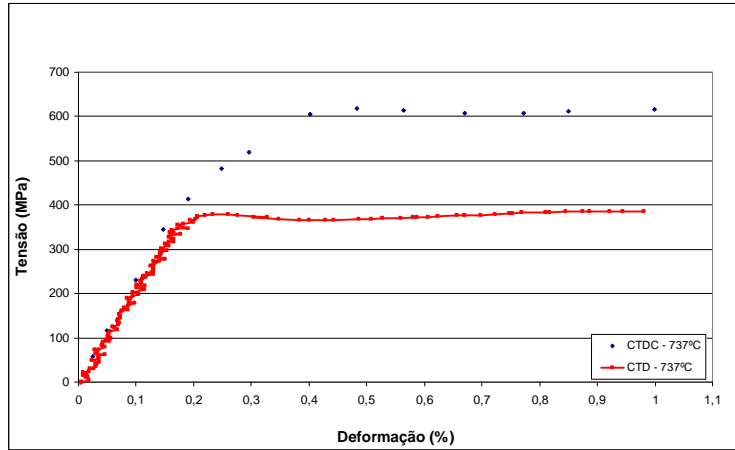


Figura 2. Curvas monotônica e tensão-deformação cíclica para o material temperado a partir de 737°C

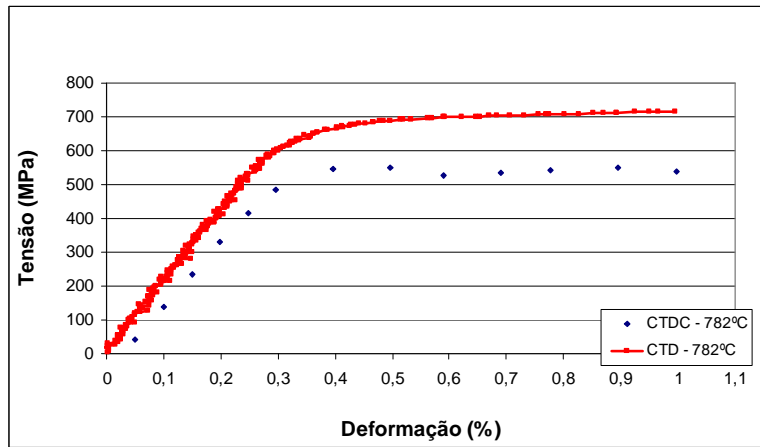


Figura 3. Curvas monotônica e tensão-deformação cíclica para o material temperado a partir de 782°C.

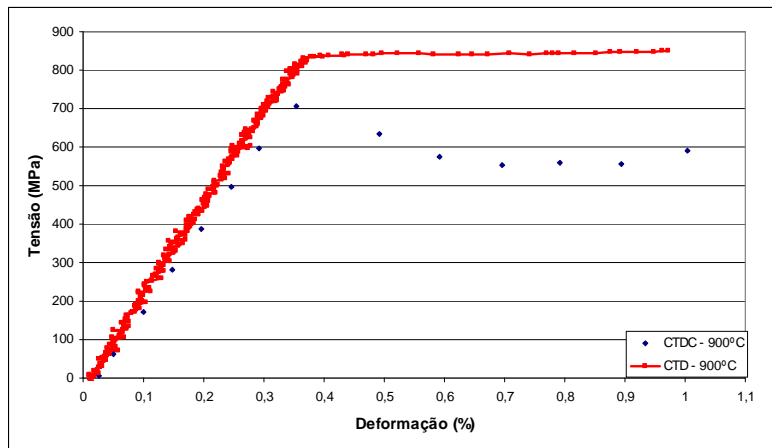


Figura 4. Curvas monotônica e tensão-deformação cíclica para o material temperado a partir de 900°C

Tabela 3. Propriedades obtidas a partir das curvas de tração para as três condições de tratamento térmico

Temperatura de Têmpera	Coefficiente de Encruamento (n)	Coefficiente de Resistência (K) (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Resistência à tração (MPa)
737°C	0,908	357,4	367	626,2
782°C	0,898	752,2	744	852,5
900°C	0,761	892,2	893	973,5

Tabela 4. Propriedades obtidas a partir das curvas tensão-deformação cíclicas, para as três condições de tratamento térmico

Temperatura de Têmpera	Coefficiente de Encruamento cíclico (n')	Coefficiente de Resistência cíclico (K') (MPa)	Limite de Escoamento Cíclico (MPa)
737°C	0,086	616	612
782°C	0,078	564	598
900°C	0,0066	652	680

3.3 Acomodação Cíclica

A Figura 5 mostra a variação do grau de acomodação cíclica ($[\text{resistência cíclica} - \text{resistência monotônica}] / \text{resistência monotônica}$), em valores percentuais, em função da amplitude de deformação total acima de 0,2%. Valores negativos de acomodação correspondem ao comportamento de amolecimento cíclico. Observando-se os dados referentes à temperatura de tratamento de 737°C, conclui-se que a fase ferrítica, mais dútil, tem um papel preponderante no endurecimento cíclico. A acomodação é máxima para amplitudes entre 0,4% e 0,6%, caindo em seguida, para amplitudes mais elevadas de deformação total. No caso dos materiais com maior teor de martensita, o grau de acomodação, caracterizado por amolecimento, é menor e dependente do teor de martensita. Para amplitudes de deformação próximas ao limite de escoamento, o amolecimento é maior para a microestrutura com maior teor de ferrita. Este comportamento se inverte para amplitude de deformação mais elevadas.

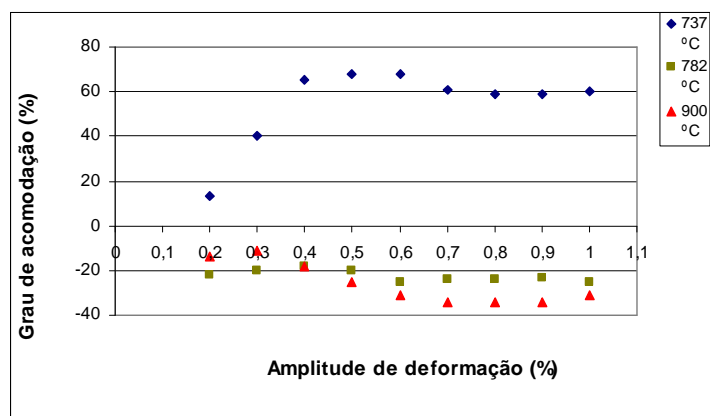


Figura 5. Grau de acomodação em função da amplitude de deformação total, para as três condições microestruturais estudadas.

3.4 Resistência à Fadiga

A Figura 6 apresenta o diagrama de Coffin-Manson, $\epsilon-2N_f$, para as três condições microestruturais estudadas neste trabalho. Como pode-se observar, as diferentes frações volumétricas de ferrita + martensita influenciam no comportamento do material do seguinte modo:

- com menor fração volumétrica de martensita, o material tratado a 737°C tem um melhor desempenho que os demais, na região do diagrama correspondente a grandes deformações, ou seja, na região de fadiga de baixo ciclo;
- com a maior fração volumétrica de martensita, sendo mais resistente, o material tratado a 900°C tem um melhor desempenho que os demais na região do diagrama onde as deformações são pequenas, ou seja, região de fadiga de alto ciclo;
- por parte do aço tratado a 782°C, observa-se uma resistência à fadiga intermediária em relação às outras duas condições, tendo boas combinações de resistência e ductilidade;

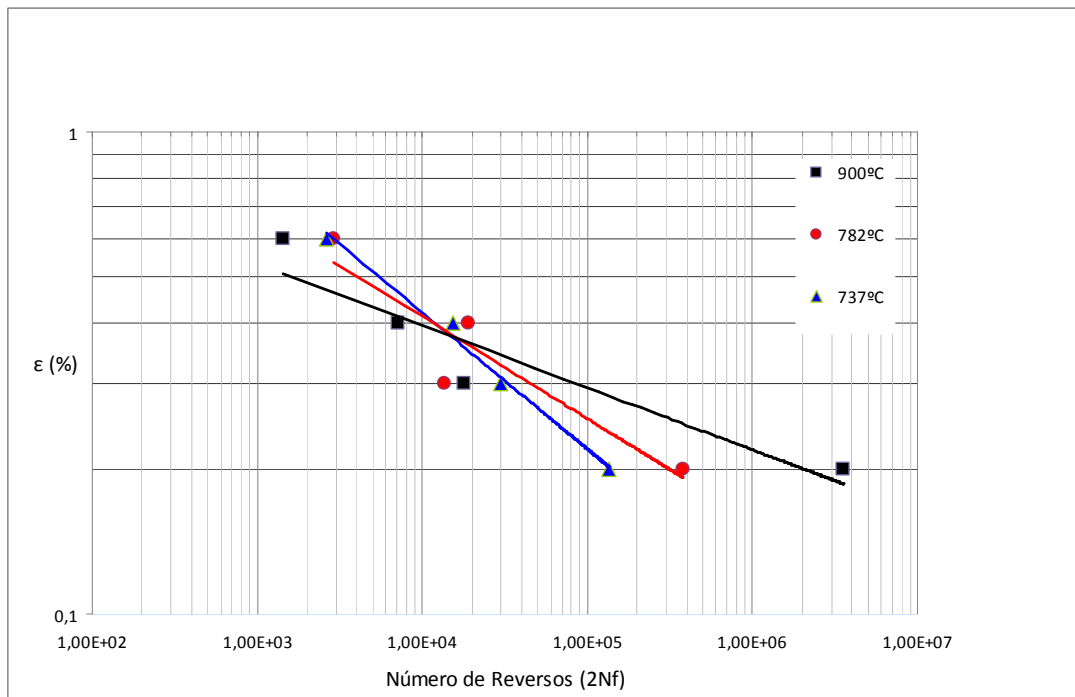


Figura 6. Diagrama de Coffin-Manson, amplitude de deformação total- número de reversos (N_r) para as três condições microestruturais estudadas.

A Figura 7 apresenta a influência do grau de acomodação sobre o número de ciclos para a fratura, independente da condição microestrutural do material, para três amplitudes de deformação. Observa-se que o grau de acomodação cíclica só, efetivamente, afeta a vida em fadiga, para a amplitude de deformação mais baixa, 0,2%, próxima ao limite de escoamento. Outra constatação é que no campo do amolecimento cíclico, quanto menor o grau de acomodação maior a vida em fadiga. O grau de acomodação que conduz ao maior número de ciclos na fratura depende da amplitude de deformação.

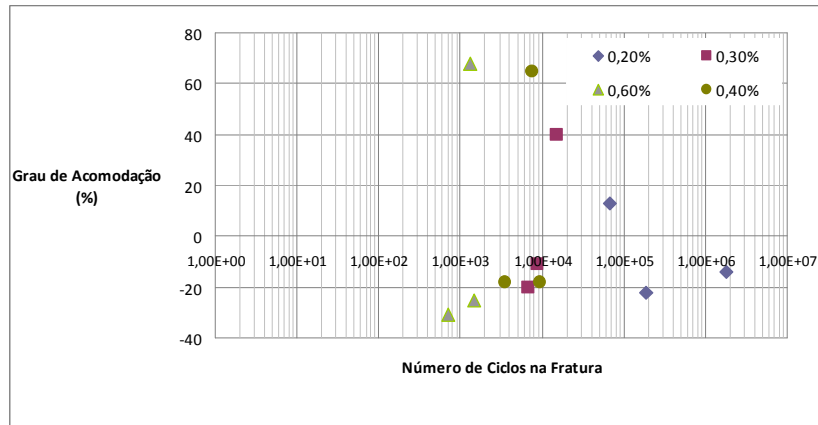


Figura 7. Efeito do grau de acomodação cíclica sobre a vida em fadiga, para três amplitudes de deformação total, para as três condições microestruturais.

3.5 Medidas da Deformação Plástica

A Figura 8 mostra a variação da amplitude de deformação plástica, medida através da largura do ciclo de histerese, em função da amplitude de deformação total aplicada aos cp's.

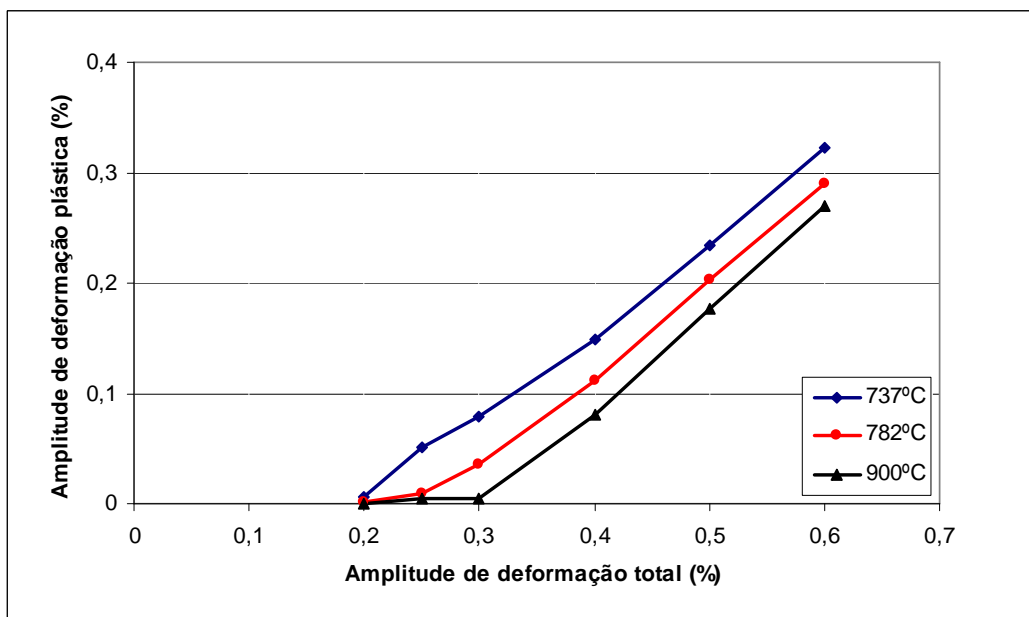


Figura 8. Variação da amplitude de deformação plástica em função da amplitude de deformação total imposta aos cp's.

Para material tratado a 737°C, que possui o menor nível de resistência observamos que a deformação plástica é superior a das outras duas condições microestruturais., para amplitudes deformação total maiores que 0,2%, A partir da amplitude total de 0,25% a plasticidade é considerável. Já para o material tratado a 782°C, a deformação plástica começa a ser significativa, a partir da amplitude de deformação total de 0,3%. Para o material tratado a 900°C, a plasticidade torna-se significativa acima de 0,3% de deformação total.

4 DISCUSSÃO

4.1 Acomodação Cíclica

A partir dos dados de comparação das curvas tensão-deformação cíclica e monotônica, observa-se que o material com um teor de martensita de 56% (737°C) apresenta um comportamento de endurecimento cíclico, demonstrado pela posição da curva tensão-deformação cíclica acima da curva monotônica. Por outro lado, as outras duas condições microestruturais, com 67% e 100% de martensita, exibem comportamento de amolecimento cíclico, como demonstra a posição da curva tensão-deformação cíclica abaixo da curva monotônica. Estes resultados se refletem nos dados das Tabela 3 e 4.

Entretanto, o material tratado a 737°C possui níveis de resistência mais baixos, tanto em relação à curva de tração quanto à curva cíclica que os materiais tratados em temperaturas mais elevadas. O material tratado a 782°C exibe uma resistência intermediária em relação às outras duas condições microestruturais. Outros autores, estudando um aço com composição química diferente daquele estudado no presente trabalho, com frações volumétricas de martensita de 45% e 60%, chegaram a resultados similares ao deste trabalho: endurecimento para o material com 45% e amolecimento para 60% de martensita.⁽²⁾ Neste quadro, pode-se concluir que a fração volumétrica de ferrita tem um papel particular no fenômeno de acomodação cíclica do material tratado a 737°C. Se a fase martensítica tende a amolecer, como mostram os dados de acomodação para o material tratado 900°C, a fase ferrítica tende ao endurecimento. E uma fração de 44% de ferrita é suficiente para suplantar o amolecimento da martensita. O grau de endurecimento do material com maior fração volumétrica de ferrita é significativo, atingindo quase 70%, no caso de amplitudes de deformação totais entre 0,4% e 0,6%, caindo para 60% para amplitudes de deformações maiores.

O endurecimento é o resultado do mecanismo de discordâncias em funcionamento na ferrita, fase mais dútil. Para amplitudes de deformações baixas, próximas ao limite de escoamento a deformação plástica fica confinada à fase dútil. O endurecimento é o resultado de um rearranjo da subestrutura de discordâncias que tende a formar, ao longo da deformação cíclica, uma estrutura de células, através de um processo de interação entre discordâncias pertencentes a diferentes sistemas de deslizamento.⁽⁴⁾ Tendo em vista as laboriosas tarefas experimentais para previsão da resistência à fadiga, é de particular interesse investigar a influência da acomodação cíclica sobre a resistência à fadiga. Entretanto, os dados da Figura 7 mostram que só para amplitudes próximas ao limite de escoamento encontram dados com níveis de resistência com diferenças significativas.

É conhecido o papel dos mecanismos de discordâncias na formação de trincas em fadiga.⁽⁵⁾ Tendo em vista que os dados da Figura 7 não consideram a configuração microestrutural, mas apenas o grau de acomodação, pode-se dizer que os dados mostram que mecanismo de discordâncias, per si tem um papel importante na formação de trincas somente na região de fadiga de baixo ciclo, onde apenas a fase mais dútil contribui para a deformação plástica. Neste caso, a ocorrência de amolecimento entre 10% e 20% causa aumento da resistência. Porém, observe-se que, como mostra a Figura 8, para a amplitude de deformação total de 0,2% o amolecimento cíclico não induziu deformação plástica significativa. Isto indica que os mecanismos de discordância não induzem rearranjo significativo da subestrutura criada no tratamento térmico, para o caso de amolecimento cíclico.

4.2 Resistência à Fadiga

Os dados do diagrama de Coffin-Manson (Figura 6) mostram que a microestrutura com fração volumétrica de 56% de martensita, e que propicia menores níveis de resistência (Figuras 2 a 4), exibe maior resistência à fadiga para amplitudes de deformação total maiores que 0,4%, correspondendo no diagrama, a número de reversos inferiores ($2N_f$) a 10^4 ciclos. Isto é, dentro do campo da fadiga de baixo ciclo. Já o material com 100% de martensita exibe resistência superior para amplitudes de deformação total inferiores a 0,4%, correspondendo a números de reversos superiores a 10^4 , ou seja, no campo da fadiga de alto ciclo. O material com 67% de martensita apresenta resistência intermediária entre os outros dois.

O fenômeno de formação de trincas é o resultado de danos por desenvolvimento de plasticidade, com a formação inicial de bandas de deslizamento persistente (BDP's), seguindo-se a formação de micro-trincas e conseqüente propagação e falha.⁽⁵⁾

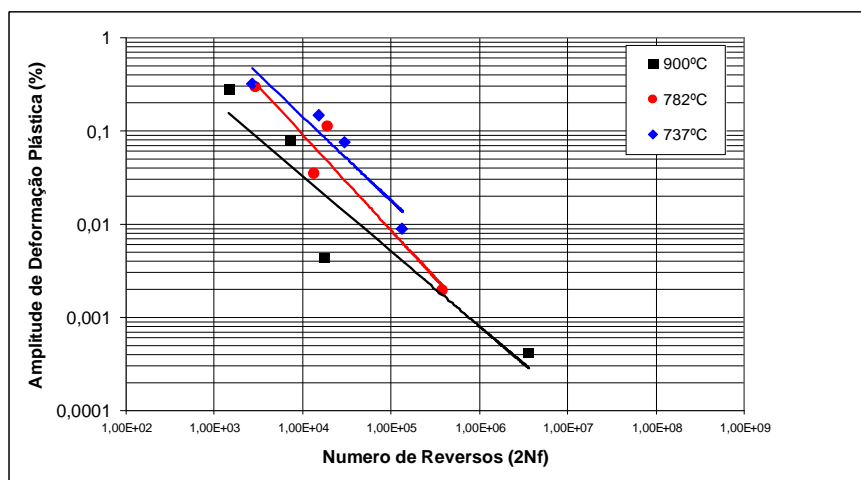


Figura 9. Amplitude de deformação plástica em função do número de reversos, para as três condições microestruturais estudadas.

Observando-se o diagrama da Figura 8, constata-se que quanto maior a fração volumétrica de martensita menor o desenvolvimento de plasticidade. Deste modo, pode se constatar que a fração volumétrica da fase mais resistente é mais eficiente no campo da fadiga de alto ciclo, contribuindo para redução da plasticidade no material. Entretanto, como já demonstrado por Rolim-Lopes e Charlier⁽⁴⁾ e por Bueno,⁽⁶⁾ a distribuição inhomogênea da deformação plástica dentro da estrutura do agregado policristalino é um fator de particular importância na formação resistência à fadiga de baixo ciclo.

Dentro do quadro da deformação não-homogênea em agregados policristalinos, descrito por Ashby,⁽⁷⁾ e à luz das observações realizadas em policristais com deformações não-homogêneas,^(4,5) pode-se explicar a resistência à fadiga do agregado policristalino bifásico estudado neste trabalho. Em baixas deformações a plasticidade fica confinada à fase mais dútil, em particular para atender às condições geométricas de compatibilidade nas interfaces com a fase mais dura. As micrografias das Figuras 10 e 11 ilustram este caso. Com pode-se observar a deformação plástica no material tratado a 737°C fica restrita a poucos grão e poucas BDP's concentram a deformação. Deste modo a concentração de deformação em poucas bandas conduz a uma menor vida em fadiga.

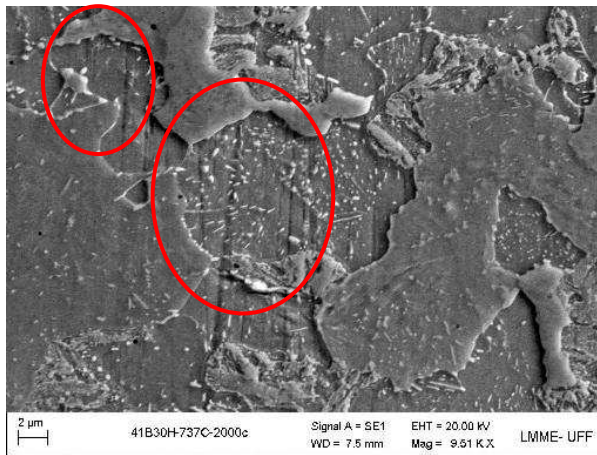


Figura 10. Material tratado a 737°C e submetido à amplitude de deformação total de 0,2%, após 2000 ciclos. Micrografia obtida em MEV. Os círculos indicam BDP's formadas na fase ferrítica. Superfície atacada com Nital.

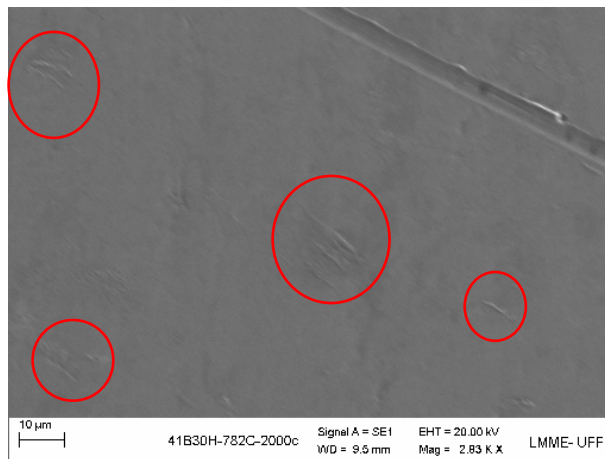


Figura 11. Material tratado a 782°C submetido à amplitude de deformação total de 0,2%, após 2000 ciclos. Micrografia obtida em MEV. Os círculos indicam BDP's formadas na fase ferrítica. Superfície sem ataque.

Já no material tratado 782°C a deformação é acomodada por BDP's mais espalhadas pela seção do corpo-de-prova. Quando a deformação plástica é acomodada de modo mais difundido pela seção do material ocorre um retardo na formação de trincas.

No caso do material com 100% de martensita a deformação plástica ocasiona um rearranjo local da estrutura de discordâncias para uma configuração mais favorável à acomodação da deformação plástica. Isto ocasiona a concentração de plasticidade nestas regiões e a formação de trincas por contração de deformação nas BDP's. A Figura 12 ilustra a concentração de deformação neste material.

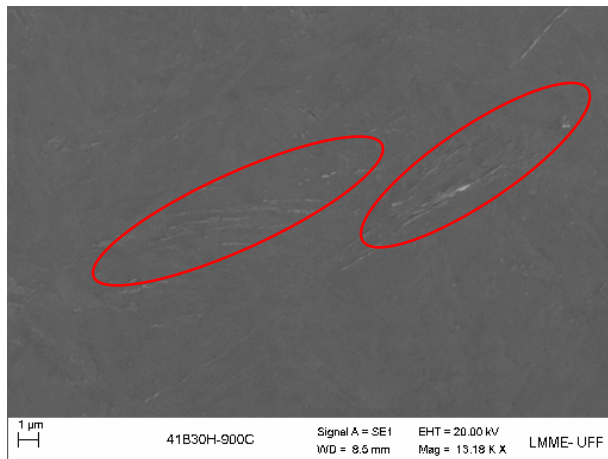


Figura 12. Material tratado a 900°C submetido à amplitude de deformação total de 0,4%, após 2000 ciclos. Micrografia obtida em MEV. Os círculos indicam BDP's formadas na fase martensítica. Superfície sem ataque.

Para amplitudes de deformação mais elevadas, as exigências de compatibilidade nas interfaces conduzem ao aumento da atividade plástica, conduzindo à produção de deslizamentos secundários e interações entre discordâncias de diferentes sistemas de deslizamento nestas regiões.^(4,6) Segundo Bazinski et al.,⁽⁸⁾ é o relevo topográfico produzido por estas interações que dá início a formação de microtrincas por fadiga. Isto conduz à formação de trincas na região de interfaces ferrita-martensita. Este fenômeno de formação de trincas na interface ferrita-martensita foi observado por Chakraborti et al.⁽²⁾

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, estudou-se o comportamento em fadiga de amostras do aço 41B30H, submetidas a tratamentos térmicos para a produção de microestruturas bifásicas de ferrita e martensita com 56%, 67% e 100%. Os dados produzidos por ensaios de fadiga, para a construção de curvas tensão-deformação cíclica e diagramas de Coffin-Manson, indicaram o seguinte:

1. Tratamentos térmicos intercríticos neste material podem produzir microestruturas bifásica ferrita-martensita que apresentam melhores resistências à fadiga de baixo ciclo do que o tratamento térmico adotado comercialmente de têmpera e revenido, a partir do campo austenítico, com microestrutura com 100% de martensita;
2. O material com fração volumétrica de 56% de martensita exibe um comportamento de endurecimento cíclico, com sua curva tensão-deformação cíclica situando acima da curva monotônica. Os materiais com 67% e 100% de martensita apresentam comportamento de amolecimento cíclico, com suas curvas tensão-deformação cíclicas situando-se abaixo das suas curvas monotônicas;
3. Com respeito às curvas tensão-deformação cíclicas, a resistência à deformação cíclica aumenta com a fração volumétrica de martensita;
4. A resistência à fadiga pode ser explicada pelas teorias de deformação não-homogênea e suas aplicações à deformação cíclica.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FINEP pelo apoio financeiro e à PROPPi/UFF pelo apoio ao Núcleo de Projeto e Seleção de Materiais (PROSEL) da EEIMVR/UFF. Dois dos autores, P.R.M. e L.S.X., agradecem ao CNPq pelas bolsas de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

- 1 Bittencourt T.S., Rodrigues G., Amorim G.B., Rolim Lopes L.C., Moreira L.P., Ferreira F., Evaluation of Mechanical Properties of the AISI 41B30H Steel with the Changing of the Volume Fraction of Ferrite and Martensite Phases by Means Different Heat Treatment Temperatures in the Intercritical Region. SAE-STP 2006-01-2701, pp.1-5, 2006.
- 2 CHAKRABORTI, P.C., MITRA, M.K., Room tempratura low cycle fatigue behaviour of two high strength lamellar duplex ferrite-martensite (DFM) steels, International Journal of Fatigue, v. 27, pp.511-518, 2005.
- 3 HWANG, B.-C., CAO, T.-Y., SHIN, S.Y, KIM, S.-H., LEE, S.-H., KIM, S.-J., Effects of ferrite grain size and martensite volume fraction on dynamic deformation behaviou of 0.15C-2.0Mn-0.2Si dual phase steels, Materials Science and Technology v. 21, nº 8, pp. 967-975.
- 4 ROLIM-LOPES, L.C., CHARLIER, J., Effect of grain size and intergranular stresses on the cyclic on the cyclic behaviour of a ferritic steel, Materials Science & Engineering, A 169, pp. 67-77, 1993.
- 5 SURESH, S. Fatigue of Materials, Cambridge University Press, 2^a ed., 1994.
- 6 BUENO, D.P., Estudo do comportamento em fadiga do aço 316L através da análise dos parâmetros Geométricos das bandas de deslizamento persistentes, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Mateteriais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p.151, 1996.
- 7 ASHBY, M. F., The deformation of plastically non-homogenous materials, *Philosophical Magazine*, Vol. 21, pp. 399-424, 1970.
- 8 BASINSKI, Z.,W., BASINSKI, S.,J., Surface-related phenomena in low amplitude of FCC metals., Scripta Matallurgica & Materialia, vol. 26, pp. 1505-1510, 1992.