

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E RESISTÊNCIA À FADIGA DO AÇO AISI 4140 SUBMETIDO A DIFERENTES TEMPERATURAS DE REVENIMENTO¹

Wanderlei Ferreira de Freitas²
 Elaine Carballo Siqueira Corrêa³
 Perrin Smith Neto⁴
 Ivan José de Santana³

Resumo

Verifica-se que a fadiga é uma das principais causas de falhas em equipamentos mecânicos em serviço e que componentes sujeitos a este tipo de esforço podem falhar sob tensões bem inferiores ao limite de escoamento do material e, muitas vezes, de forma catastrófica. Dada a diversidade de variáveis que podem influenciar na resposta de um componente submetido à fadiga, o entendimento e prevenção de falhas pede contínuo aprimoramento e pesquisas. Este trabalho avalia as propriedades mecânicas, microestrutura e, sobretudo, a resistência à fadiga, provocada por esforços de flexão, em corpos-de-prova confeccionados em aço AISI 4140 temperados e revenidos. Foram obtidas imagens por meio de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, ensaios de dureza, tração e fadiga, assim como análise das superfícies de fratura. Foi possível apontar algumas características físicas e mecânicas deste material, relacionando com seu comportamento em relação à fadiga de baixo ciclo e indicar qual seria a melhor temperatura de revenimento que lhe garantiria maior resistência a fadiga.

Palavras-chave: Aço; Fadiga; Tratamentos térmicos; Propriedades mecânicas.

EVALUATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES AND THE FATIGUE BEHAVIOR OF THE AISI 4140 STEEL SUBJECTED TO DIFERENT TEMPERING TEMPERATURES

Abstract

Fatigue is one of the main causes of flaws in metals in service. Components subjected to this type of effort can fail under a stress level considerably lower than the yield strength for a static load and, frequently, in a catastrophic way. Since several variables can affect the fatigue behavior of a component, understanding and prevention of flaws require continuous study in this subject. The aim of this work was the evaluation of the mechanical properties, specially the fatigue behavior, of AISI 4140 steel bars after oil quenching and tempering in several temperatures. In terms of microstructural characterization, optical microscopy and scanning electron microscopy were conducted in the metal before and after heat treatments. The mechanical behavior was investigated through hardness, tensile and fatigue tests. The fracture surface of the fatigue specimens was also examined. The results allowed the analysis of the properties of the material as well as the estimation of the tempering temperature whose value would lead to the higher fatigue strength.

Keywords: Steel; Fatigue; Heat treatments; Mechanical properties.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Msc., Professor do Departamento de Engenharia de Materiais – CEFET/MG.

³ Dr., Professor do Departamento de Engenharia de Materiais – CEFET/MG.

⁴ Dr., Professor do Departamento de Engenharia Mecânica – PUCMG.

1 INTRODUÇÃO

Existem basicamente três possibilidades de adequação das propriedades mecânica, físicas e tecnológicas dos materiais para aplicação em condições específicas de trabalho: (1) as operações nas quais se submete o material a uma deformação plástica, (2) as operações em que se trabalha a composição química e (3), por fim, aquelas que utilizam um ciclo térmico, conhecidas como tratamento térmicos.^(1,2) Contudo, é comum, mesmo após uma fase de projeto criteriosa, a ocorrência de falhas em diferentes equipamentos e dispositivos mecânicos sob tensões bem inferiores ao limite de escoamento do material utilizado no projeto e de forma abrupta.^(3,4) Grande parte destas falhas não acontece devido aos esforços estáticos e constantes, mas a esforços cíclicos ou flutuantes.^(3,4) O que justifica as várias pesquisas que foram e continuam sendo direcionadas ao entendimento e prevenção de falhas por fadiga, com o objetivo principal de elevar a vida útil de componentes mecânicos e garantir a sua confiabilidade.

Gür e Tuncer,⁽⁵⁾ por exemplo, publicaram um artigo propondo um método de caracterização microestrutural dos aços AISI 5140 e AISI 4140 pelo monitoramento da propagação do som, a partir dos quais se determina a resistência a fadiga de corpos-de-prova temperados e austemperados.

Starke et al.⁽⁶⁾ propuseram um método para determinar o comportamento à fadiga de componentes fabricados em aços AISI 4140 temperados e revenidos. Este método de investigação correlaciona as mudanças microestruturais, induzidas por deformação cíclica no material, com o comportamento à fadiga do material ao longo do tempo.

Furuya⁽⁷⁾ avaliou o efeito do volume de corpos-de-prova de aço AISI 4140, temperados e revenidos, em ensaios de fadiga com frequências em torno de 20 kHz, como forma de acelerar os procedimentos.

Wei et al.⁽⁸⁾ realizaram estudos sobre o comportamento à fadiga de aços bifásicos (martensíticos/bainíticos) de alta resistência. A análise foi conduzida a partir da premissa de que a resistência à fadiga desses aços aumentaria com a resistência à tração e com a tenacidade e que seria possível aumentar as mesmas através de têmpera e revenimento em baixas temperaturas.

O presente trabalho busca comparar e avaliar o efeito das microestruturas oriundas de diferentes procedimentos de têmpera e revenimento na resistência mecânica e à fadiga de corpos-de-prova confeccionados em aço AISI 4140. A partir dos dados obtidos e da análise realizada, o presente trabalho, pretende corroborar, em particular, no entendimento da influência de diferentes temperaturas de revenimento na resistência a fadiga do aço AISI 4140 beneficiado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O aço utilizado neste trabalho foi o aço AISI 4140, a partir do qual foram confeccionados, utilizando torno com controle numérico (CNC), quarenta corpos-de-prova para os ensaios de fadiga e quinze para os ensaios de tração. As dimensões dos corpos-de-prova foram definidas em função das normas ASTM E 466-07⁽⁹⁾/ASTM A370,⁽¹⁰⁾ respectivamente.

Todos os corpos-de-prova foram inicialmente submetidos ao tratamento térmico de normalização (utilizando forno elétrico), para possibilitar o alívio de tensões residuais e garantir uma microestrutura (sobretudo tamanho de grão) semelhante entre estes (temperatura 860°C e tempo 30 min). Em seguida, todos os corpos-de-

prova foram temperados (temperatura 860°C, tempo 30min e resfriamento em óleo) utilizando forno com banho de sais. Após a têmpera os corpos-de-prova foram divididos em cinco grupos (G_1 , G_2 , G_3 , G_4 e G_5) e submetidos aos tratamentos de revenimento (temperaturas 200°C, 260°C, 320°C, 380°C e 460°C, respectivamente).

Todos os corpos-de-prova após os tratamentos térmicos tiveram sua superfície re-preparada de forma a remover a possível camada de óxido gerada durante a execução destes por usinagem ou lixamento, no intuito de obter valores de rugosidade semelhantes entre eles.

Todas as medições de rugosidade foram realizadas na região onde os corpos-de-prova sofrem maior ação do carregamento, ou seja, no comprimento útil. Foram realizadas seis medições em pontos equidistantes cobrindo toda a circunferência.

Os ensaios de tração foram realizados de acordo com a norma ASTM A370, à temperatura ambiente.

Mediu-se a dureza dos corpos-de-prova por meio do ensaio de dureza Vickers seguindo a norma ASTM E-384.⁽¹¹⁾ Os testes foram conduzidos com carga de 50 kgf (490,25 N) e tempo de aplicação de 15 s. Foram realizados no mínimo quatro testes de dureza para cada situação.

Para a análise microestrutural utilizando microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura as amostras foram preparadas por meio de corte com disco abrasivo, embutimento a frio com resina de poliéster, lixamento, polimento e ataque com reativo Nital 2%.

A análise da superfície de fratura do metal após os testes de fadiga foi realizada para as cinco condições de tratamento térmico avaliadas nos testes mencionados. A preparação das peças consistiu inicialmente no recobrimento com verniz da região de interesse dos corpos-de-prova ensaiados, com o objetivo de evitar a contaminação no corte subsequente. Após o mesmo, as amostras a serem observadas passaram por uma operação de limpeza com ultrassom imersas em acetona.

Para os ensaios de fadiga, utilizou-se um equipamento que possibilita a aplicação de flexão pura com diferentes níveis de tensão. Seu princípio de funcionamento está esquematizado na Figura 1. Foi utilizado um valor de tensão para o ensaio de fadiga, próximo ao limite de escoamento do material temperado sem revenimento (90% L_e), no intuito de obter um limite de fadiga de baixo ciclo, porém com o material trabalhando no regime elástico.

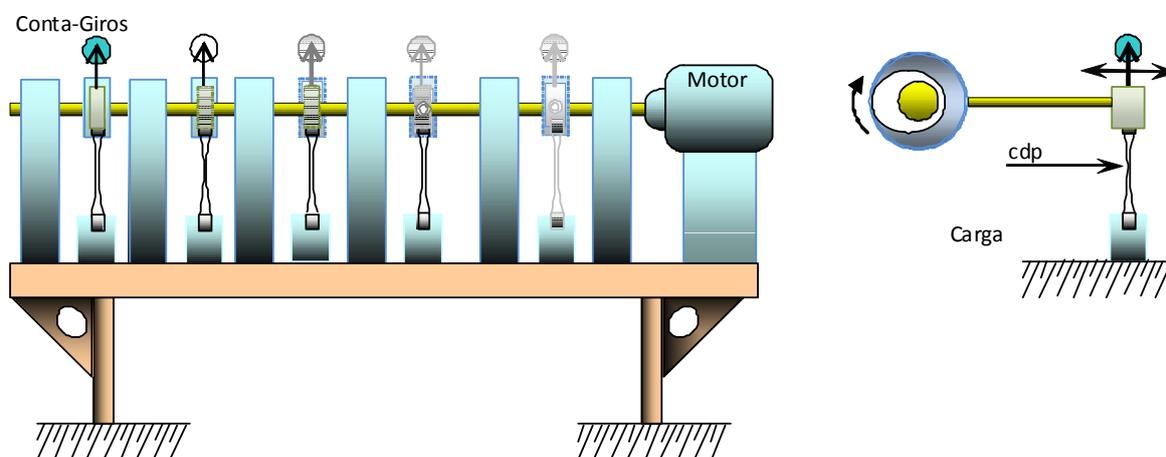


Figura 1 - Desenho esquemático da máquina de ensaios de fadiga

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes ao controle dimensional dos corpos-de-prova de fadiga são apresentados na Tabela 1.

Os resultados das medições de rugosidade estão apresentados de forma resumida na Tabela 2.

Percebe-se que os procedimentos adotados possibilitaram a obtenção de corpos-de-prova dentro de um controle dimensional rígido e com baixos valores de rugosidade (0,25 Ra) e baixa dispersão entre estes (valor do desvio padrão de 0,0587).

Estas observações (valores individuais e desvio padrão) possibilitaram inferir que as características individuais de cada corpo-de-prova (dimensões e aspectos relacionados à rugosidade) não comprometeriam a comparação das propriedades mecânicas destes, uma vez que estes de forma geral apresentam as mesmas características geométricas e de rugosidade.

Tabela 1 – Controle dimensional dos corpos-de-prova de fadiga

CP	Diâmetro da área útil	Flexão máxima medida
Média	7,787	0,184
DP	0,047	0,087

Tabela 2 – Controle da rugosidade Ra dos corpos-de-prova de fadiga

Medidas de rugosidade CP Fadiga (μm)									
CP	L1	L2	L3	Média	L1	L2	L3	Média	Média das médias
Média	0,243	0,231	0,239	0,238	0,253	0,254	0,242	0,251	0,247
D. Padrão				0,053				0,065	0,059

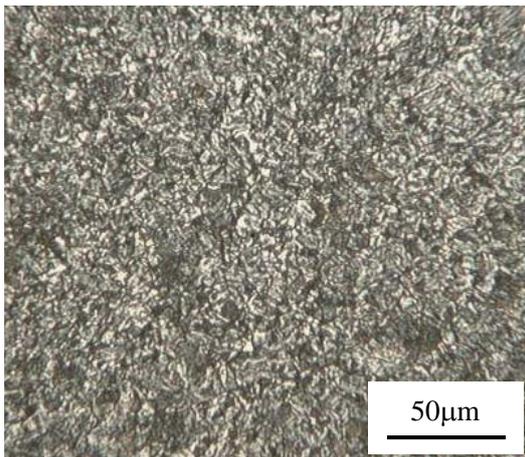
Obs: L1, L2 e L3 – Leitura executadas.

Na Figura 2 são mostradas as fotomicrografias do aço AISI 4140 após o tratamento térmico de normalização. Pode ser observada a presença de ferrita e de perlita, conforme esperado após normalização.^(1,2)

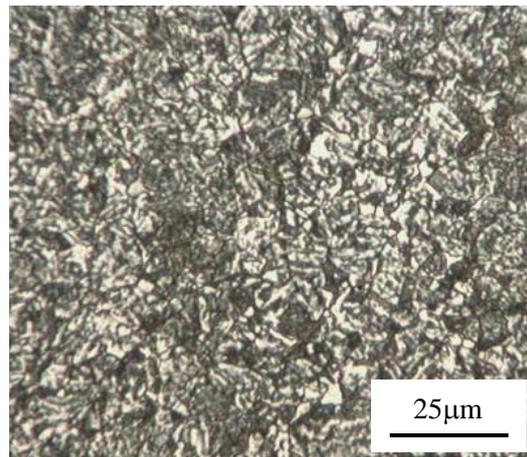
Nas Figuras 3 e 4 são mostradas as fotomicrografias do aço AISI 4140 após o tratamento térmico têmpera e revenimento a 180^oC e a 460^oC, respectivamente.

Observou-se em todas as amostras martensita revenida sutilmente se transformando em uma estrutura mais difusa à medida que se aumentou a temperatura de revenimento.^(1,2) Não foram verificados em nenhuma amostra defeitos ou não conformidades estruturais como micro trincas, precipitados grandes ou indícios de poros ou macro-segregação.

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios de dureza Vickers do aço AISI 4140 na condição normalizado e na condição temperado e revenido (em todas as temperaturas de revenimento, investigadas no trabalho). Nota-se que, como esperado, a dureza diminui com o aumento da temperatura de revenimento (transformação da martensita em ferrita e cementita), fenômeno que corrobora para o entendimento das microestruturas desenvolvidas pelo metal e exibidas anteriormente.

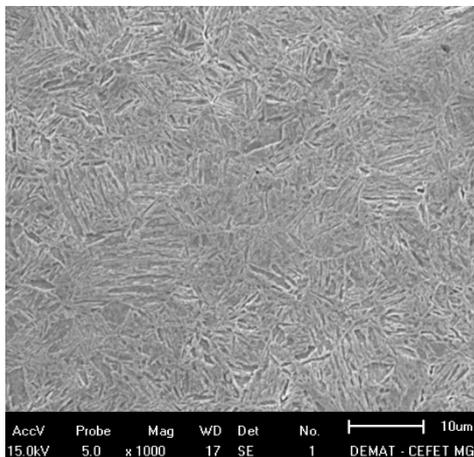


(a)

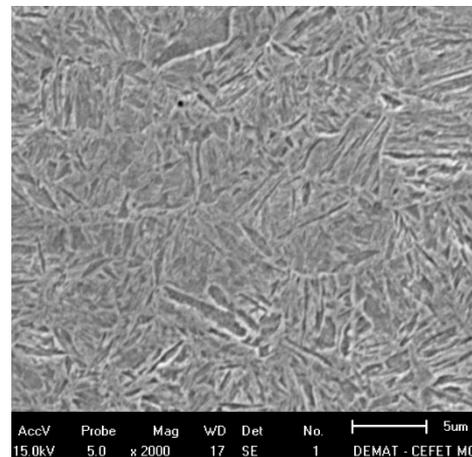


(b)

Figura 2 - Fotomicrografias (MO) do aço AISI 4140 normalizado, com diferentes ampliações (a) 200X e (b) 400X, aproximadamente.

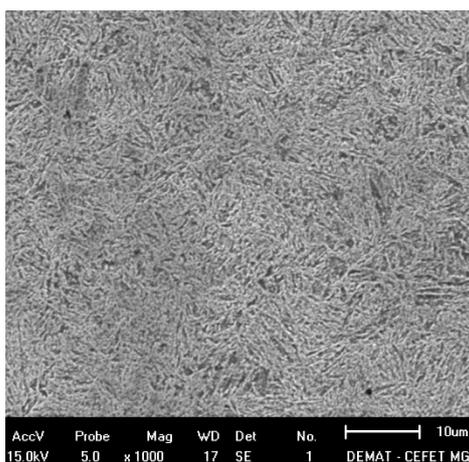


(a)

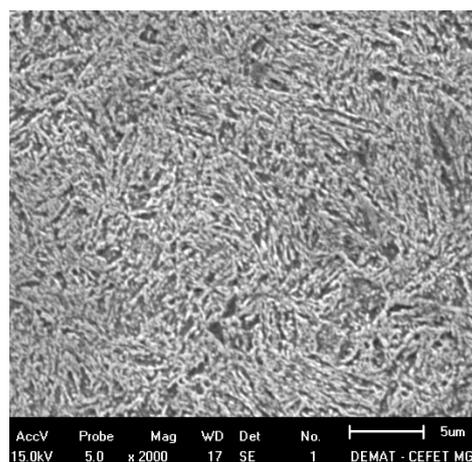


(b)

Figura 3 – Fotomicrografias (MEV) do aço AISI 4140 temperado a óleo e revenido a 180°C: com diferentes ampliações (a) 1.000X e (b) 2.000X, aproximadamente.



(a)



(b)

Figura 4 – Fotomicrografias (MEV) do aço AISI 4140 temperado a óleo, revenido a 180°C e revenido a 460°C: (a) e (b) aumentos distintos.

Tabela 3 – Resultados de dureza Vickers (carga 50 kgf) do Aço AISI 4140 submetidos aos diferentes tratamentos térmicos – valores médios e desvio padrão

Aço AISI 4140	Dureza Vickers
normalizado	321,6 ± 8,2
temperado e revenido a 180°C	645,8 ± 15,5
temperado, revenido a 180°C e revenido a 200°C	612,2 ± 13,2
temperado, revenido a 180°C e revenido a 260°C	556,3 ± 16,1
temperado, revenido a 180°C e revenido a 320°C	523,7 ± 5,6
temperado, revenido a 180°C e revenido a 380°C	503,7 ± 27,9
temperado, revenido a 180°C e revenido a 460°C	419,8 ± 27,1

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios de limite de escoamento e limite de resistência do aço AISI 4140 na condição normalizado e na condição temperado e revenido.

Observa-se um aumento de resistência entre o material revenido a 200°C (após revenimento inicial a 180°C) e simplesmente revenido a 180°C, o que está de acordo com a literatura, que sempre sugere a realização de revenimento após a têmpera para melhorar a resistência do material.^(1,2)

A Tabela 3.5 exibe os resultados obtidos nos ensaios de fadiga (cada valor corresponde à média de três ensaios).

Tabela 4 – Resultados de limite de resistência e limite de escoamento do Aço AISI 4140 submetidos aos diferentes tratamentos térmicos – valores médios

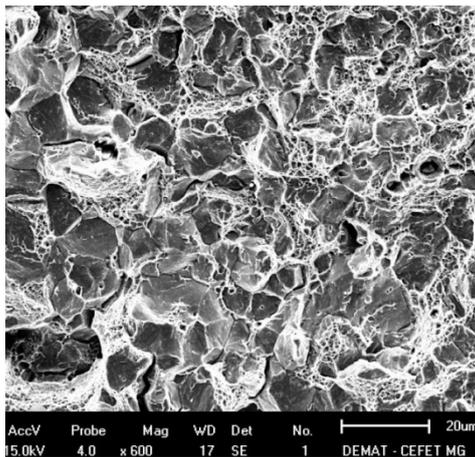
Aço AISI 4140	σ_r (MPa)	σ_e (MPa)
normalizado	1136	760
temperado e revenido a 180°C	2069	1780
temperado, revenido a 180°C e revenido a 200°C	2152	1730
temperado, revenido a 180°C e revenido a 260°C	1911	1700
temperado, revenido a 180°C e revenido a 320°C	1715	1620
temperado, revenido a 180°C e revenido a 380°C	1646	1555
temperado, revenido a 180°C e revenido a 460°C	1402	1379

Tabela 5 – Resultados de numero de ciclos até a fratura do aço AISI 4140 submetido a diferentes temperaturas de revenimento – valores médios

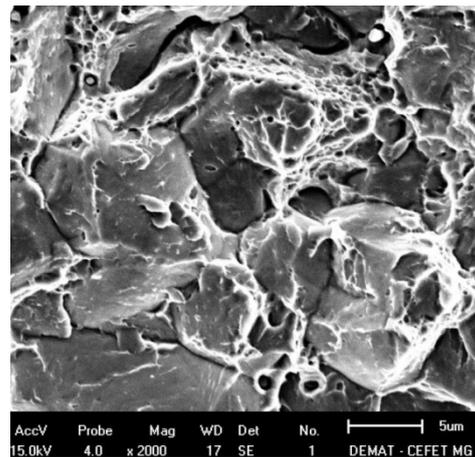
Aço AISI 4140	Ciclos até fratura
temperado, revenido a 180°C e revenido a 200°C	22638
temperado, revenido a 180°C e revenido a 260°C	29008
temperado, revenido a 180°C e revenido a 320°C	36562
temperado, revenido a 180°C e revenido a 380°C	22956
temperado, revenido a 180°C e revenido a 460°C	12414

A Figura 5 exibe a superfície de fratura de um dos corpos-de-prova revenidos a 200°C, condição que foi inferior à condição de revenimento de 320°C, fato que é compreendido quando se observa as superfícies de fratura que apresentam planos de clivagens (frágil) típicas de uma estrutura frágil (martensita).^(3,4)

A Figura 6 exibe a superfície de fratura de um dos corpos-de-prova revenidos a 320°C. Esta melhor performance pode ser compreendida quando se observa os valores de dureza e resistência mecânica e o aumento expressivo na formação de micro deformações na superfície de fratura (micro voids ou dimples) que absorvem grande quantidade de energia.^(3,4)

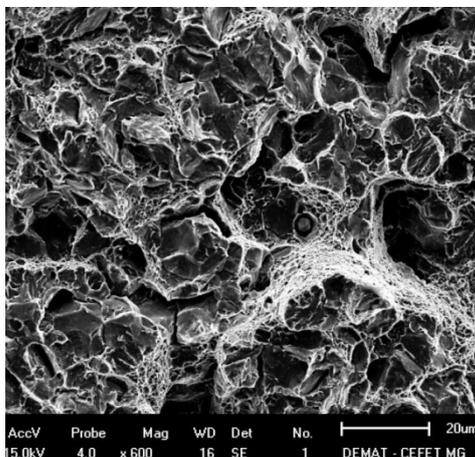


(a)

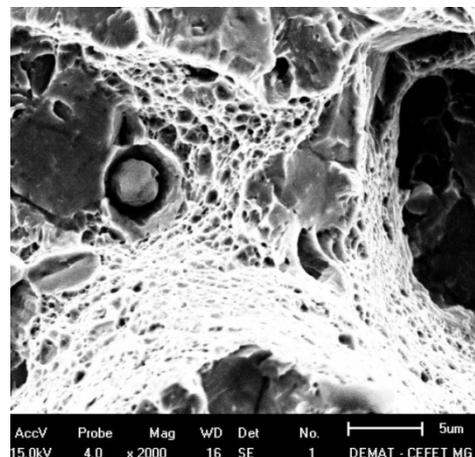


(b)

Figura 5 – Imagens da superfície da fratura (MEV) do aço AISI 4140 temperado a óleo, revenido a 180°C e revenido a 200°C: (a) e (b) aumentos distintos.



(a)



(b)

Figura 6 – Imagens da superfície da fratura (MEV) do aço AISI 4140 temperado a óleo, revenido a 180°C e revenido a 320°C: (a) e (b) aumentos distintos.

A Figura 7 exibe a superfície de fratura de um dos corpos-de-prova revenidos a 460°C que resistiu a 12.414 ciclos (pior condição).

Esta redução de tenacidade pode ou não ser atribuída à segregação de impurezas nos antigos contornos de grão da austenita, a formação de uma rede ou película de carbonetos (Fe_3C) que envolve as agulhas de martensita durante a transformação da austenita retida no revenimento e a formação de nitretos de alumínio⁽¹⁾. Os resultados podem ainda ser associados à decoesão dos grãos que parece estar relacionada com a presença de impurezas (fósforo) no aço, que segregam próximo aos antigos contornos dos grãos da austenita,⁽¹⁾ uma vez que se observa uma grande quantidade de micro trincas na superfície de fratura.

Por fim, observa-se que o revenimento realmente se faz necessário após a têmpera do aço AISI 4140 e que este pode otimizar a resposta deste material frente a solicitações de fadiga e que para as condições estudadas a mais apropriada foi a que o material foi temperado e revenido a 180°C e posteriormente a 320°C.

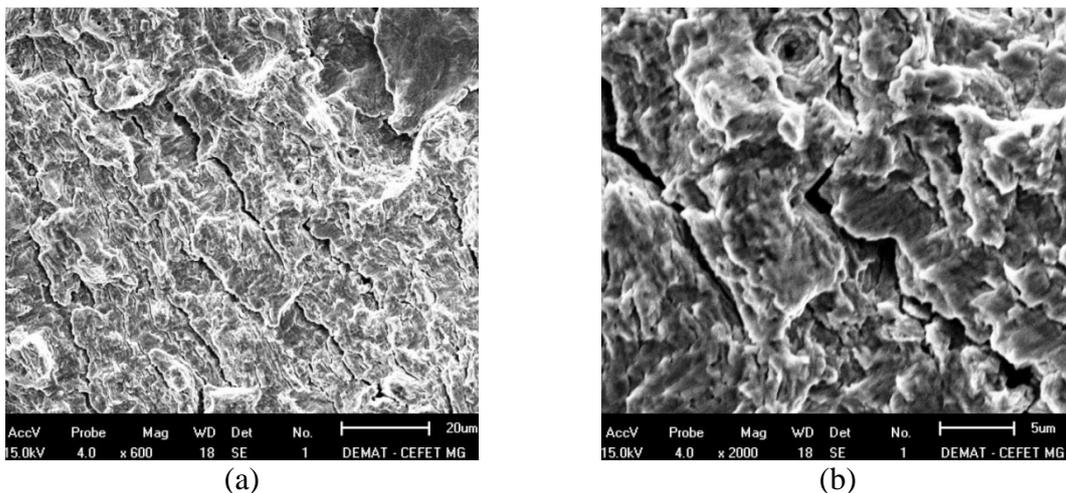


Figura 7 – Imagens da superfície da fratura (MEV) do aço AISI 4140 temperado a óleo, revenido a 180°C e revenido a 460°C: (a) e (b) aumentos distintos.

5 CONCLUSÕES

- A partir dos dados obtidos e da análise realizada, conclui-se que a operação de revenimento é de suma importância para adequar melhor o aço AISI 4140 temperado às situações de carregamento que levem a esforços de fadiga.
- Verifica-se que a análise da superfície de fratura por meio de MEV é uma ferramenta capaz de revelar com clareza de detalhes características da fratura para diferentes temperaturas de revenimento.
- A resistência à fadiga do aço AISI 4140 pode ser otimizada pelo revenimento e neste trabalho foi possível indicar a temperatura de aproximadamente 320°C como a mais apropriada para as condições utilizadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem a colaboração e sugestões dos Professores do DEMAT – CEFET/MG, em especial, aos Professores Sidney Nicodemos da Silva e Rachel Mary Osthues. Os autores agradecem ainda o apoio recebido pela direção do CEFET/MG pelo apoio ao trabalho de pesquisa e à Fundação CEFET MINAS.

REFERÊNCIAS

- 1 KRAUSS, G. Steels: heat treatment and processing principles. 6 ed. Ohio: ASM International, 2000. 497p.
- 2 TOTTEN, G.E. Steel heat treatment: metallurgy and technologies. Boca Raton: CRC Press, 2006. 820p.
- 3 COLLINS, Jack A. Failure of materials in mechanical design: Analysis, Prediction, Prevention. 2. ed. New York: John Wiley & sons, 1993.
- 4 DOWLING, N. E.. Mechanical Behavior of materials. 3 edition. New Jersey Pearson Prentice Hall, 2007, 912p.
- 5 GÜR, C.H.; TUNCER, B.O. Characterization of microstructural phases of steels by sound velocity measurement. Materials Characterization, v. 55, n. 2, p. 160–166, 2005.
- 6 STARKE, P; WALTHER, F.; EIFLER, D. PHYBAL — A new method for lifetime prediction based on strain, temperature and electrical measurements. International Journal of Fatigue, v. 28, n. 9, p. 1028–1036, 2006.



- 7 FURUYA, Y. Specimen size effects on gigacycle fatigue properties of high-strength steel under ultrasonic fatigue testing. *Scripta Materialia*, v. 58, p. 1014–1017, 2008.
- 8 WEI, D.Y.; GU, J.L.; FANG, H.S.; BAI, B.Z.; YANG, Z.G. Fatigue behavior of 1500 MPa bainite/martensite duplex-phase high strength steel. *International Journal of Fatigue*, v. 26, n. 4, p. 437-442, 2004.
- 9 American Society for Testing and Materials ASTM E466: Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials [Pensilvânia] : ASTM, 2002. 5p.
- 10 American Society for Testing and Materials ASTM A370: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. [Pensilvânia] : ASTM, 2010. 47p.
- 11 American Society for Testing and Materials ASTM E384: Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials. [Pensilvânia] : ASTM, 2010. 42p.