

INFLUÊNCIA DE TRATAMENTOS TÉRMICOS NA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO SAE 4140

Carlos Triveño Rios¹, Mariana P. do Amaral¹, Evellyn S. Souza¹

¹Engenharia de Materiais, CECS – Universidade Federal do ABC, CEP: 09210-170 – Santo André, SP – Brasil, Carlos.triveno@ufabc.edu.br

RESUMO

O presente estudo tem por objetivo avaliar o efeito de diferentes tratamentos térmicos nas propriedades do aço SAE 4140. A totalidade das amostras foram austenitizadas a 890°C, e seguidamente foram normalizadas e recozidas. As amostras normalizadas foram austenitizadas novamente em 850 °C e temperadas em água e óleo. Logo foram revenidas em 200, 350, 450, 500 e 600 °C por 30 minutos. Os resultados mostraram a formação de estrutura grosseira e fina de ferrita e perlita após recozimento e normalização. Também se observou mudanças estruturais da martensita em ferrita e cementita com aumento da temperatura de revenido. As análises de difração de raios-X mostraram presença de martensita até a temperatura de 350°C. Os ensaios de dureza e de compressão mostraram que a amostra temperada em água apresentou maior dureza e maior limite de escoamento que a amostra temperada em óleo. Entretanto com aumento da temperatura de revenido se observa uma queda substancial da dureza e do limite de escoamento.

Palavra-chave: Tempera, Revenido, Propriedades Mecânicas, Aço AISI/SAE 4140.

INTRODUÇÃO

O aço é um material de grande importância para o desenvolvimento da sociedade atual, sendo considerado um material extremamente versátil, possuindo boa combinação de propriedades e sendo empregado em diferentes tipos de aplicações. O aço possui inúmeras propriedades e conferem aos componentes a capacidade de suportar as mais diversas condições de serviço ao menor custo possível. Os aços se tornaram responsáveis pelo encadeamento de diferentes setores da cadeia produtiva, sendo utilizada na construção civil, produção de equipamentos, instalação de meios de comunicações, indústria bélica, naval e agrícola, indústria de bens de consumo duráveis, como na produção de automóveis e eletrodomésticos e, até mesmo na produção de bens de consumo não-duráveis como utensílios domésticos [1].

Os tratamentos térmicos são muito utilizados a fim de otimizar as propriedades físicas e mecânicas dos aços por operações de aquecimento e/ou resfriamento para se obter requisitos microestruturais para estágios intermediários do processo de produção, assim, como para aplicações em produtos finais [2]. Entre os tratamentos térmicos mais comuns, pode-se citar o recozimento, normalização, têmpera, revenimento, solubilização e envelhecimento. A temperatura, a velocidade de resfriamento e aquecimento e os elementos de liga presentes são os principais fatores que influenciarão as microestruturas formadas a partir destes tratamentos, e conseqüentemente as propriedades mecânicas do componente tratado.

A velocidade de resfriamento é um parâmetro determinante no tratamento térmico de têmpera, no qual o aço é submetido a um rápido resfriamento após a austenização, proporcionando um aumento da dureza e na resistência do aço. A temperatura também é outro fator que pode determinar as propriedades mecânicas do aço, sendo um parâmetro importante para o tratamento térmico de revenido.

O aço estudado no presente trabalho é um SAE 4140, conhecido como aço-cromo-molibdênio, de médio carbono (cerca de 0,4%). Contem também elementos de liga tais como molibdênio, manganês, silício e pequenas quantidades de enxofre e fósforo em sua composição. Apresentando alta temperabilidade, boa resistência à torção e à fadiga, elevada dureza, alta resistência mecânica e tenacidade, sendo muito utilizadas na produção de eixos, engrenagens, bielas, virabrequins, parafusos, e equipamentos para exploração de petróleo [3].

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

No presente trabalho foi utilizado o aço liga SAE 4140 em barras de diâmetro de 26 mm, produzido a partir de trefilação, fornecido pelo Laboratório de Engenharia de Materiais do CECS – UFABC. As barras foram cortadas com liquido de refrigeração em cortadeira ERIOS. As dimensões das amostras obtidas foram 8x7x26 (em mm).

Tratamentos Térmicos

Os tratamentos térmicos realizados nas amostras de aço 4140 foram o recozimento, a normalização, a têmpera em meios de água e óleo, seguido de

revenimento em diferentes temperaturas. A Figura 1 mostra de forma esquemática as rotas de processamento utilizadas.

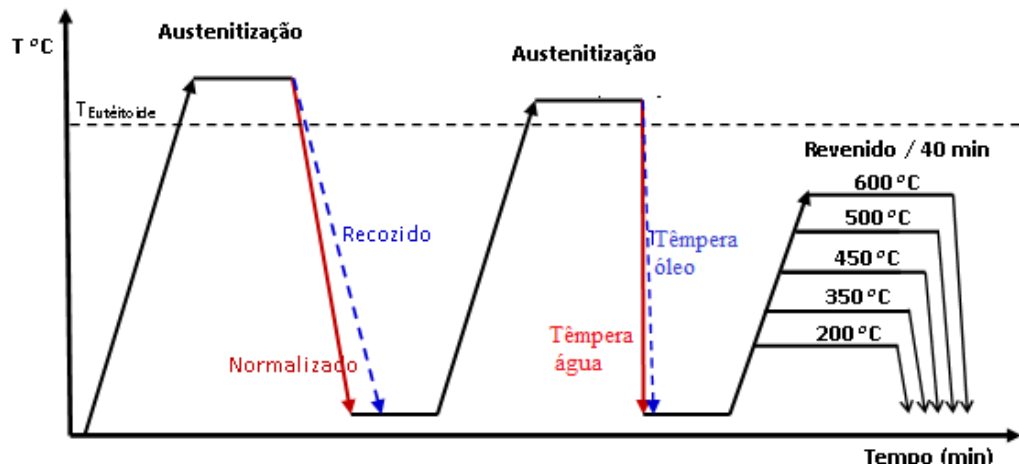


Figura 1. Diagrama esquemático de rotas de tratamento térmico do aço SAE 4140.

Durante o tratamento térmico de normalização e recozimento, as amostras retangulares (7x8x26 mm) foram aquecidas em temperaturas acima da transformação eutetóide, até completa austenitização em 890 °C. No tratamento térmico as amostras foram envolvidas com cavaco de ferro fundido, a fim de reduzir os níveis de descarbonetação e de oxidação da amostra. Seguidamente, o cadinho de grafite com as amostras envoltas em cavaco foram introduzidas no interior de um forno de resistência (Modelo JUNG) na qual a temperatura de 890 ± 20 °C foi controlado através de um termopar tipo “K”, pelo tempo de 30 minutos, após estabilização da temperatura de austenitização. Após esse tempo, parte das amostras foi resfriada dentro do forno para recozimento, e, a maior parcela das amostras foi resfriada no meio ambiente até próximo de 25 °C. As Figuras 2a-c mostram as amostras cortadas e envoltas em cavaco dentro do cadinho de grafite e após tratamento térmico.

Para o tratamento térmico de revenido, as amostras normalizadas foram austenitizadas novamente em temperatura de 850 ± 20 °C por 30 minutos (após estabilização), e seguidamente foram temperadas por resfriamento em meio H₂O e em meio óleo agitado em temperatura próxima a 80 °C. Seguidamente foi realizada o tratamento térmico de revenido em temperaturas de 200, 350, 450, 500 e 600°C para as amostras temperadas em água e óleo. Após alcançar tais temperaturas e mantidas por 40 minutos, as amostras foram retiradas do forno e resfriadas até a temperatura ambiente.



Figura 2. Amostras de aço 4140; (a) no interior do cadinho de grafite (b) envoltas em cavaco de ferro fundido, e c) retiradas do forno para o processo de normalização.

Caracterização Microestrutural E Mecânica

As amostras tratadas termicamente em diferentes condições foram submetidas à metalografia standard; corte (Isomet 4000, marca Buehler), lixamento e polimento (Arotec – Aropol 2V). O polimento foi realizado em pano feltro com suspensão de alumina 0,3 μm , seguido de ataque químico em solução de Nital (3% de HNO_3 em etanol) por um tempo de 7 segundos, seguidos de lavagem e secagem. A caracterização estrutural foi realizada usando microscópio óptico (Zeiss AXIO Scope.A1) com software de aquisição de imagens, e por difração de raios-X (Bruker modelo D8-Focus) com anodo de cobre de comprimento de onda médio $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ (Cu $K\alpha$), operando com 40 kV e 40 mA. A varredura, em modo contínuo, foi realizada na faixa de 20° a 90° (2θ). A caracterização mecânica foi realizada por medidas de dureza Rockwell C (Digimess, modelo OSM B) usando uma pré-carga de 10kgf e carga de 150kgf. E por ultimo por medidas do limite de escoamento de compressão em 0,2% de deformação. Para o qual foram utilizadas amostras retangulares 4x5x3 (em mm) submetidas a ensaios de compressão a frio com velocidade de deformação de 0,5 mm/min (Instron-Modelo 3369).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 3 são apresentadas as micrografias do aço 4140 para as condições de tratamento térmico de normalizado e recozido. A micrografia da amostra recozida (Fig. 3a) mostra uma microestrutura bastante grosseira, constituída por grãos de ferrita (tonalidade clara) e por grãos de perlita (estrutura com tonalidade escura), resultado de uma transformação lenta da fase austenita na fase de ferrita pró-

eutetóide e em estrutura eutetóide (lamelas alternadas de cementita e ferrita). Resultado que concorda com os estudos de Voort [4]. Na amostra normalizada (Fig. 3b) a microestrutura é refinada e é constituída de ferrita e perlita. A ferrita (tonalidade clara) apresenta-se em plaquetas alongadas e grossas. Já a perlita (tonalidade escura) é uma alternância de plaquetas alongadas finas das fases ferrita e cementita. A microestrutura e a morfologia da amostra normalizada 4140 são diferentes do aço normalizado 1045 que apresenta uma estrutura refinada de grãos de perlita e de ferrita com ferrita pró-eutetóide nos contornos de grão [5]. A diferença microestrutural e morfológica entre os dois aços podem estar relacionada a diferença composicional. Sendo que os aços 1045 contem C e Mn e os aços 4140 contem C, Mn, Mo e Cr como principais elementos de liga.

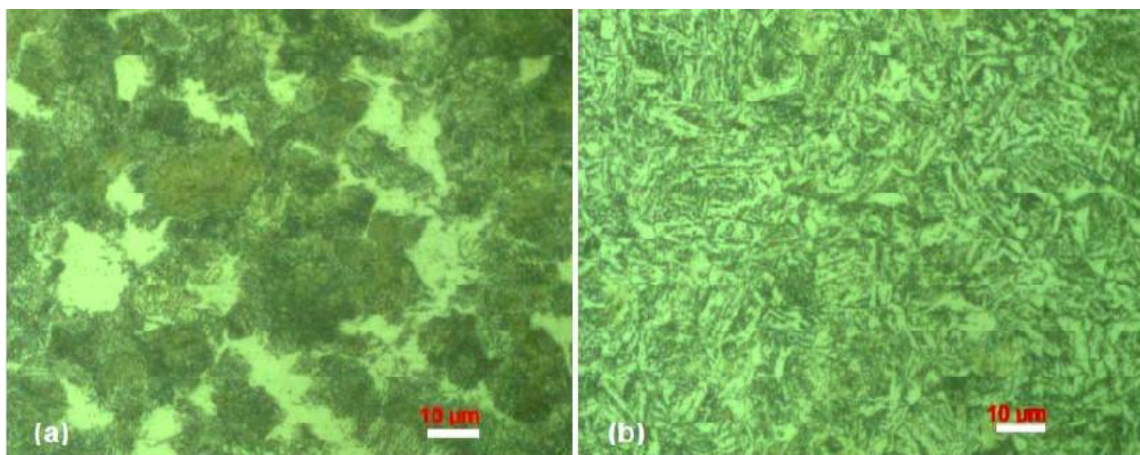


Figura 3. Micrografia do aço 4140 com tratamento térmico de; (a) recozimento, e, (b) normalização.

As Figuras 4a-f mostram micrografias do aço 4140 na condição de temperado em água e revenido em temperaturas de 200, 350, 450, 500 e 600 °C. A amostra temperada em água (Fig. 4a) é constituída por uma estrutura refinada de ripas alongadas e placas lenticulares, embora, não bem definidas, correspondem à fase martensítica. Além dessa fase, também, é observada outra fase clara, bem dispersa, porém com morfologia arredondada e que provavelmente corresponde à fase de austenita retida. A presença dessa fase pode estar relacionada à presença de elementos de liga gamagênicos (C e Mn) no aço 4140 que estabilizam a austenita e aumentam a energia necessária para formar martensita por queda do início de transformação martensítica (M_s) [6].

A amostra revenida em 200 °C (Fig. 4b) não apresenta mudanças estruturais referente à micrografia da amostra temperada em água. Comportamento que concorda com a literatura [7]. Sugerindo, que esse tratamento térmico é considerado como alívio de tensões da amostra martensítica devido a que o fim da transformação martensítica do aço 4140 é próximo a 220°C. A mostra revenida em 350 °C (Fig. 4c) apresenta uma microestrutura bastante refinada com presença de fases de tonalidade clara e tonalidade escura, sem presença de ripas de martensita. Sugerindo uma transformação da martensita em fases metaestáveis. Segundo Chiaverini [7] na faixa de 250 a 350 °C, ocorrem a formação de carbonetos metaestáveis tipo fase- ϵ (Fe_{2-3}C) e de Fe_5C_2 com contrastes de tonalidade escura. A amostra revenida em 450 °C (Fig. 4d) apresenta um re-arranjo microestrutural, onde a fase de tonalidade clara tende a engrossar, porém ainda pode ser notada a presença de precipitados finos de tonalidade clara e escura. Aumentando-se a temperatura de revenido para 500 °C (Fig. 4e) a microestrutura se torna mais definida e são observadas fases grossas com tonalidade clara. Ainda são observadas fases alongadas com tonalidade clara alternada com fase de tonalidade escura. Entretanto, no revenido em 600 °C (Fig. 4f) não são observadas as fases alongadas de ferrita- α e de cementita (Fe_3C) da Fig. 4e. De forma contrária, se observa uma tendência à esferoidização fina das fases escuras, que corresponde à fase cementita, Fe_3C , e de aglomeração da fase de tonalidade clara, que corresponde à fase- α . Essas mudanças estruturais estão de acordo à literatura [7], que sugerem que na faixa de 400 a 600 °C, ocorrem a decomposição da fase austenita retida em ferrita e cementita, assim como da estabilização dos carbonetos metaestáveis, crescimento de ferrita e cementita e da esferoidização da cementita. Ainda em temperaturas superiores a 500 °C, pode ocorrer a precipitação de outros carbonetos com Cr e Mo no aço 4140.

As figuras 5a-f correspondem a micrografias do aço 4140 temperado em óleo e revenido em 200, 350, 450, 500 e 600 °C. De forma geral se observou que as microestruturas temperadas e revenidas em água são quase similares às micrografias das amostras temperadas em óleo. Entretanto, na amostra temperada em óleo (Fig. 5a) se observa maior presença de austenita retida quando comparada à temperada em água, o que pode estar associado ao meio de tempera óleo que é menos severo que a água. A micrografia da amostra revenida a 200 °C (Fig. 5b) é

bastante similar ao da amostra temperada em água, sugerindo que houve apenas um alívio de tensões. Já na micrografia da amostra revenida em 500 °C (Fig. 5e) a presença de fases alongadas e alternadas de ferrita e de cementita são mais resolvidas, que da temperada em água e revenida na mesma temperatura, e, na micrografia da amostra revenida em 600 °C (Fig. 5f), a fase de tonalidade clara (ferrita- α) encontra-se em contornos de grão, apresentando uma tendência de esferoidização assim como dos precipitados finos de cementita.

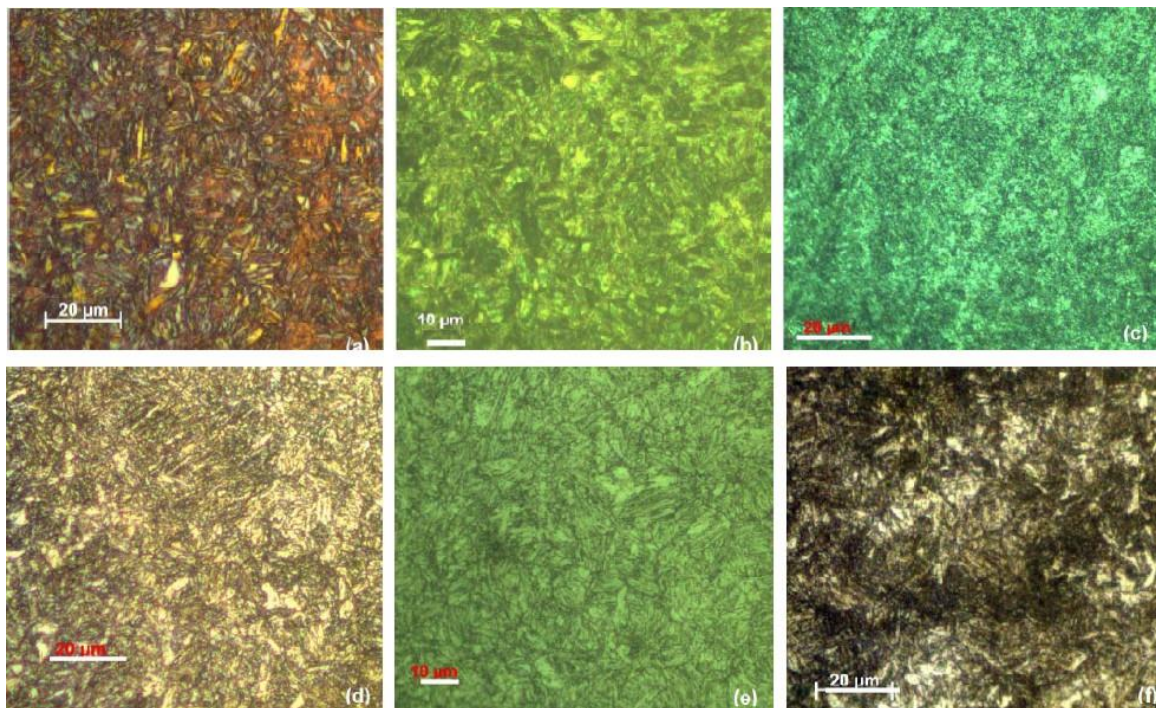


Figura 4. Micrografias do aço 4140 tratadas termicamente em: (a) têmpera em água e, revenido em: (b) 200 °C, (c) 350 °C, (d) 450 °C, (e) 500 °C, e, (f) 600 °C.

Os padrões de difração de raios-X de amostras tratadas termicamente por recozimento, têmpera em água, têmpera em óleo, e revenimento em temperaturas de 200, 350, 450, 500 e 600 °C, são mostradas nas figuras 6a-b. Observa-se que em ambos meios de resfriamento, os padrões de difração de raios-X, são bastante similares. Nesses padrões observa-se uma sobreposição de picos difratados que correspondem às fases ferrita- α e martensita- α' , indexadas através de fichas JCPDS [8]. A sobreposição desses picos pode ser explicada devido ao fato que a fase metaestável martensita é formada por ferrita saturada de carbono [9]. Outra característica que reforça a presença de fase metaestável “martensita” nas amostras

temperada em água e em óleo e revenidas em 200 e 350 °C, é que estas apresentam picos menos intensos e de maior largura do que os picos das amostras revenidas a 450, 500 e 600 °C e da amostra recozida, que apresentam fases cristalinas mais estáveis, tal como a ferrita- α . Sugerindo que a martensita perde a sua estrutura tetragonal por difusão de carbono em temperaturas próximas a 350 °C, para formar estruturas cristalinas mais estáveis.

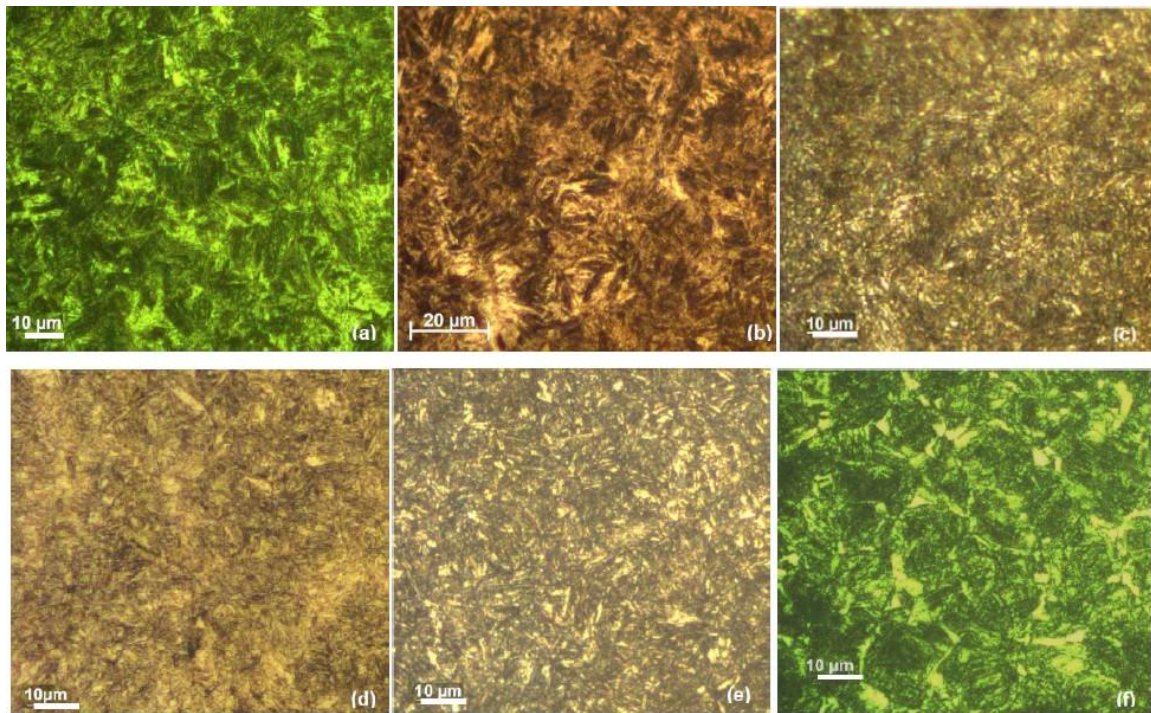


Figura 5- Micrografias do aço 4140 tratadas termicamente em: (a) têmpera em óleo e, revenida em: (b) 200 °C, (c) 350 °C, (d) 450 °C, (e) 500 °C, e, (f) 600 °C.

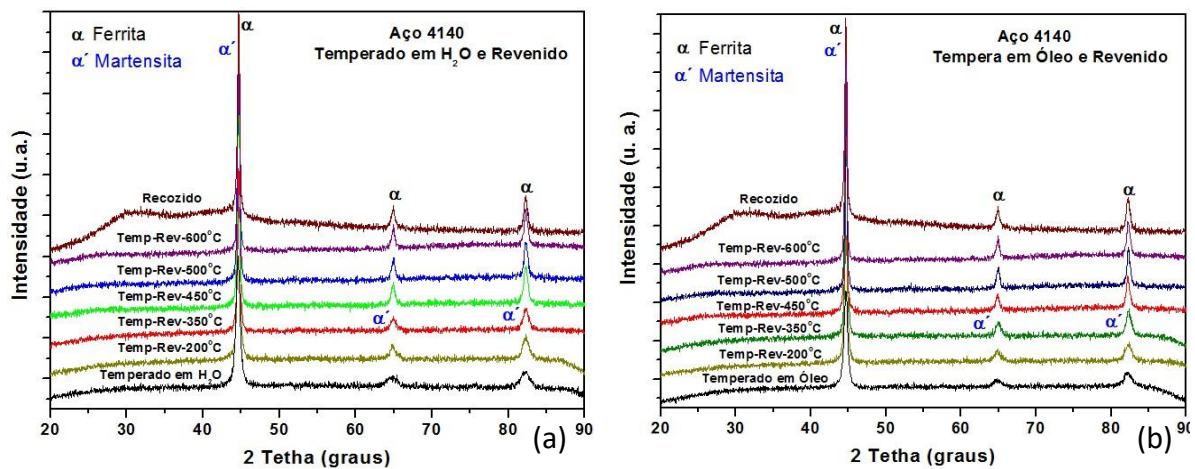


Figura 6. Padrões de difração de raios-X de amostras (a) Temperada e água e Revenidas, e, (b) Temperada em óleo e Revenidas em 200, 350, 450, 500 e 600 °C.

A Figura 7 apresenta medidas de Dureza Rockwell C, para diferentes condições de tratamento térmico e meio de tempera. Observa-se que a dureza da amostra temperada em água é 60,3 HRC maior que da amostra temperada em óleo (55,8 HRC). Esses valores sofrem uma queda contínua com aumento da temperatura de revenido, devido a uma transformação gradual da martensita em fases estáveis; ferrita e cementita, o que influencia as propriedades mecânicas do aço [10]. De acordo com a literatura [7], as amostras temperadas quando revenidas até temperaturas de 200 °C sofrem um alívio de tensão residual interna e não apresentam mudanças estruturais sensíveis, sofrendo apenas uma ligeira queda na dureza. Em temperaturas entre 200 a 350 °C a martensita perde carbono devido à formação de carbonetos metaestáveis, induzindo a um amaciamento gradual da martensita. Em temperaturas maiores até 600 °C, o amaciamento do aço temperado continua devido à formação de fases mais estáveis e mais grossas, e, inclusive, podendo ocorrer uma esferoidização da fase cementita e engrossamento da ferrita, conferindo ao aço características de usinabilidade, com durezas em torno de 30 HRC. Aparentemente, no presente trabalho, se observa um aumento de dureza (retardo de amaciamento) na faixa de 350 a 500 °C, provavelmente associados à formação de carbonetos. Por outro lado, a amostra normalizada apresenta uma dureza (35,2 HRC) maior que da amostra recozida (17,2 HRC) devido a apresentar uma microestrutura refinada, constituída por plaquetas de ferrita e de perlita e por apresentar maior quantidade de barreiras para a movimentação de discordâncias, sem reduzir significativamente sua plasticidade. Esses valores concordam bem com os resultados da literatura [11, 12].

A Figura 8 apresenta medidas de limite de escoamento com 0,2% de deformação em função de diferentes condições de tratamento térmico e meio de tempera. O limite de escoamento foi obtido de curvas tensão-deformação compressivo realizados a frio. Observa-se que as amostras temperadas em água e em óleo apresentam o maior limite de escoamento em torno de 1981 e 1750 MPa, respectivamente. Esses valores sofrem uma queda linear com aumento da temperatura de tratamento de revenido, sendo reduzidos drasticamente até 580 e 633 MPa para as amostras revenidas em 600 °C, tanto em água como em óleo. Também foi observado que a deformação plástica da amostra temperada em água ($\varepsilon = 16,2\%$) foi menor que da temperada em óleo ($\varepsilon = 28,2\%$), aumentando para valores superiores a 40% de deformação plástica com aumento da temperatura de

revenido. O que pode estar associado a mecanismos de alívio de tensões residuais, amaciamento da martensita por mecanismos de difusão de átomos intersticiais e substitucionais para formar fases mais estáveis.

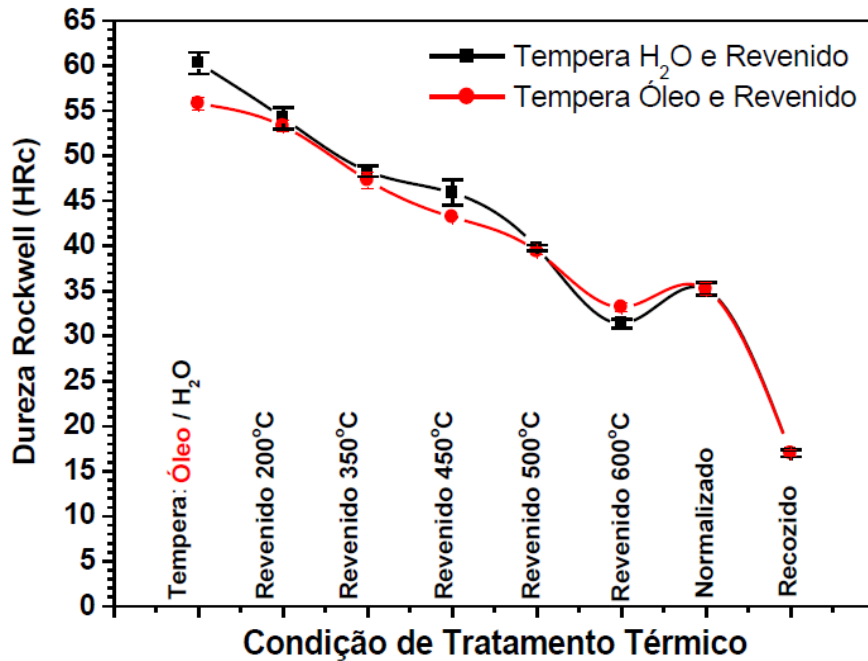


Figura 7. Perfil de variação de dureza Rockwell C para diferentes tratamentos térmicos do aço 4140.

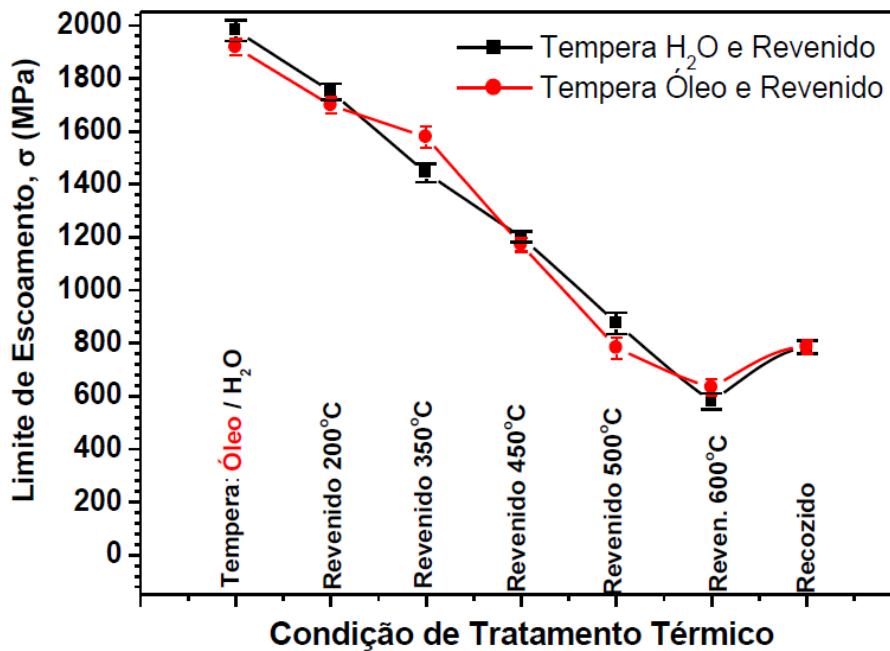


Figura 8. Perfil de limite de escoamento compressivo ($\sigma_{0,2\%}$) para diferentes tratamentos térmicos do aço 4140.

CONCLUSÕES

A análise microestrutural do aço SAE 4140 em diferentes tipos de tratamentos térmicos mostrou que a normalização apresenta uma microestrutura refinada e por recozimento se observa uma microestrutura grosseira de ferrita e perlita. Os tratamentos térmicos de tempera em água como em óleo produzem microestruturas quase similares de martensita refinada, porém, a amostra temperada em óleo, aparentemente apresenta maior quantidade de austenita retida. Os tratamentos térmicos de revenido das amostras temperadas induzem á mudanças graduais de microestrutura com aumento da temperatura de revenido. Decompondo-se a martensita metaestável em outras fases metaestáveis seguido de fases cristalinas estáveis de ferrita e cementita em temperaturas de 600 °C. Por análises de difração de raios-X observa-se que a estrutura tetragonal da martensita se mantém até temperaturas em torno de 350 °C, porém, não foi possível identificar a austenita retida. A dureza Rockwell C foi de 55,8 HRC para a amostra temperada em água e de 53,3 HRC para a temperada em óleo. Já o limite de escoamento foi de 1981 MPa para a temperada em água, e, de 1750 MPa, para a temperada em óleo. Valores que sofrem uma queda substancial na dureza e no limite de escoamento para valores em torno de 32 HRC e de 650 MPa, tornando-os usináveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Central Experimental Multiusuário da UFABC, e Laboratório de Engenharia de Materiais da UFABC.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CAMISASCA, M. M; NEVES, O. R., Aço Brasil: uma viagem pela indústria do aço. Belo Horizonte: Escritório de Histórias, 2013.
- [2] CHIAVERINI, V., Aços e Ferros Fundidos, 7ª. Ed. São Paulo: ABM, 2008.
- [3] LANFREDI, A.; PRADOS, E.F., Tópicos Experimentais em Materiais. Roteiro de laboratório; Dureza e Tratamento térmico. Universidade Federal do ABC, 2015.
- [4] RASMA, E.T., Caracterização Estrutural e Mecânica do Aço AISI/SAE 4140 tratado sob diferentes tratamentos térmicos. Dissertação de Mestrado – CCT - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Rio de Janeiro, 2015.
- [5] VOORT, G.F.V., Atlas of time temperature Diagrams for Irons and Steels: Materials Data Series. [S.I.]: ASM International, 1ª ed, 1991. 804 p.

- [6] MARTINS, M., Temperabilidade Jominy e Influência do Revenido sobre a Dureza – Um Estudo em Aços Estruturais Nacionais. Dissertação de Mestrado - Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2002.
- [7] COLLINS, D. N., Deep cryogenic treatment of tool steels: a review. *Heat Treatment of Metals*. v. 23, n. 2, p. 40-42, 1996.
- [8] JCPDS-2001, International Centre for Diffraction Data. Base de Dados PCDDF Win.
- [9] Silva, S.E.P.T., Análise das Propriedades Mecânicas e Estruturais do Aço SAE 4140 submetido a tratamento criogênico. Dissertação de Mestrado, CCT-Universidade E. do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.Campo dos Goytacazes, 2012.
- [10] FREITAS, W. F., Avaliação das propriedades mecânicas e resistência à fadiga do aço AISI 4140 submetido a diferentes valores de temperatura de revenimento. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas, Belo Horizonte. 2010.
- [11] GUR,C.H; TUNCER, B.O., Trabalho técnico. Investigating the microstructure-ultrasonic property relationships in steels, Metallurgical & Materials Eng. Dept., Middle East Technical University.
- [12] AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS. ASM Handbook, Volume 4: Heat Treater's Guide – Practices and Procedures for Irons and Steels (American Society of Metals), Materials Park, Ohio, USA, 1995.

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF SAE 4140 STEEL

ABSTRACT

This study aims to evaluate the effect of different heat treatments on the properties of SAE 4140 steel. Initially all the samples were austenitized at 890 °C, followed of normalized and annealed. The normalized samples, of new were austenitized at 850 °C, and then quenched in water and oil. The quenched samples followed were heat treatments at 200, 350, 450, 500 e 600 °C by 30 minutes. The results showed the formation of coarse and fine pearlite structure after heat treatment of annealing and normalized, respectively. Also it was observed a structural change from martensite obtained by quenched to ferrite and cementite phases by annealing at 600 °C. The X-rays diffraction reveals the presence of martensite until the temperature of 350 °C. The hardness and compression tests showed that the water quenched sample was harder and of higher yield strength than the oil quenched sample. However with increasing tempering temperature it is observed a substantial drop in hardness and yield strength.

Key-Words: Quenched, tempering Mechanical properties, SAE/AISI 4140 steel.