

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO AÇO SAE 4140 TRATADO TERMICAMENTE EM DIFERENTES MEIOS DE RESFRIAMENTO

Bruno Maijo Pivoto¹; Raisi Natalia Lenz Baldez²; Diogo Kramer Topolski³

RESUMO

Os aços de construção mecânica, como o SAE 4140 são aplicados na fabricação de componentes que necessitam trabalhar em ambientes de grande exigência, pois são facilmente conformados e possuem bom desempenho. As propriedades finais são obtidas tratando termicamente o material utilizando uma taxa de resfriamento controlada. Assim, esse trabalho objetiva avaliar a influência do resfriamento na microestrutura e dureza do aço SAE 4140. Para isso, amostras do aço, previamente normalizadas, foram aquecidas a temperatura de 870 °C por uma hora e resfriadas em 4 meios: água, óleo, ar e dentro do forno. Após o resfriamento as amostras tiveram a dureza medida e foram preparadas metalograficamente para avaliar a microestrutura obtida por microscopia ótica. Os resultados obtidos mostram que foi possível obter a estrutura martensítica de alta dureza nas peças resfriadas em água e óleo e, que quanto mais severo o meio de resfriamento, maior foi a dureza obtida.

Palavras-chave: Aço Cr-Mo, Dureza Rockwell; Tempera; Temperabilidade.

Eixo Temático: Tecnologia, Inovação e Desenvolvimento Sustentável (TIDS)

1. INTRODUÇÃO

Os aços são ligas metálicas compostas por ferro e carbono que possuem grande importância comercial, sendo fabricadas nas mais diversas composições químicas e em uma ampla gama de microestruturas e formatos. Esta variedade de produtos é resultado da continua melhoria de desempenho exigido pelo mercado industrial e, também, é consequência da utilização da liga em praticamente todos os

¹ Autor/Apresentador - Universidade Franciscana - UFN. E-mail: bruno.pivoto@ufn.edu.br

² Autora - Universidade Franciscana - UFN. E-mail: raisi.lenz@ufn.edu.br

³ Orientador - Universidade Franciscana - UFN. E-mail: diogo.topolski@ufn.edu.br

setores, como construção civil, automobilística, naval, petrolífera, agrícola, defesa e bens de consumo (CALLISTER, 2018; CHIAVERINI, 2008; PIRI et al, 2018).

As propriedades mecânicas obtidas pela liga ferrosa são diretamente influenciadas pela porcentagem de carbono e pela estrutura obtida no material. Os aços médio carbono são classificados assim por possuírem entre 0,3 e 0,6% de carbono e se caracterizam por possuírem boa resistência mecânica aliada a tenacidade. Usualmente estes materiais são utilizados tratados termicamente e possuem versões com adição de elementos de liga específicos visando melhorar características específicas (COLPAERT, 2000; METALS HANDBOOK, 2004).

A liga SAE 4140 é um aço de construção mecânica (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2000) e pode ser classificado como um aço de baixa liga. Possuem adições de cromo e molibdênio visando, respectivamente, aumentar a resistência à corrosão e à oxidação e melhorar a temperabilidade ao mesmo tempo que atenua a fragilidade do revenido (SENTHILKUMAR et al, 2011; SILVA, 2012)

Estes aços são conhecidos pela sua versatilidade de aplicações, sendo amplamente utilizados na indústria metal-mecânica devido as suas propriedades e possibilidades de aplicações como por exemplo, na fabricação de eixos, bielas, virabrequins, engrenagens e até rolos de laminação (GERDAU, 2021; LIU et al, 2017)

Quanto às suas propriedades, o material possui alta temperabilidade, grande dureza, boa resistência a tração, desgaste e a fadiga, e é produzido na condição temperado e revenido, especialmente quanto utilizado na manufatura de componentes expostos a regimes cíclicos de cargas. Assim sendo, a aplicação do tratamento térmico cria uma estrutura que aumenta a vida útil desses componentes (DING E SHIN; 2019).

O desempenho do material depende da sua composição química e histórico de tratamentos térmicos realizados. A correta combinação destes fatores pode proporcionar ganhos em tenacidade, resistência mecânica, estabilidade dimensional e até mesmo melhorias nas propriedades em relação ao desgaste (COLPAERT, 2000).

Os processos de tratamento térmico são compostos por três etapas: aquecimento, manutenção da temperatura (encharque) e resfriamento. A taxa de aquecimento, usualmente, é limitada a capacidade do equipamento ou a possibilidade de criar distorções. O encharque deve ser longo o suficiente para garantir que todo o material atinja a temperatura e permita as reações de transformação do material em austenita. (METALS HANDBOOK, 2013; NUNURA et al, 2015).

Para completar o tratamento térmico dos aços é necessário algum tipo de meio de resfriamento, podendo ser ar, água ou óleo. A taxa de resfriamento utilizada vai ser a responsável pela estrutura criada ao fim do tratamento. A têmpera é gerada quando o resfriamento brusco resulta em uma estrutura predominantemente martensítica, de alta dureza e resistência. Água e óleo são os meios mais comuns para se obter esta estrutura. Caso o material tenha a formação de perlita e/ou bainita irá resultar em uma combinação com características mecânicas menos satisfatórias (CHIAVERINI, 2008; METALS HANDBOOK, 2004; PIRI et al, 2018).

Desta forma, para determinar as propriedades do material é necessário entender o comportamento das transformações de fase geradas no aço SAE 4140 quando exposto a diferentes meios de resfriamento. Este trabalho tem o objetivo verificar as estruturas formadas quando amostras de pequena dimensão são resfriadas em água, óleo, ar e forno a fim de compreender e fixar os mecanismos envolvidos nas mudanças microestruturais induzidas pela dependência em relação ao tempo.

2. METODOLOGIA

O material utilizado no trabalho foi um aço SAE 4140 fornecido pela Gerdau – Usina Charqueadas na forma de uma barra cilíndrica de $\frac{1}{2}$ polegada produzida por laminação a quente. Na Tabela 1 é apresentado a composição química fornecida pelo fabricante. A barra foi seccionada utilizando uma policorte refrigerada AROTEC (modelo Arocor – 40) produzindo 5 corpos cilíndricos de 5 mm de altura e 12,7 mm de diâmetro.

Tabela1 – Composição química do aço SAE 4140 fornecida pelo fabricante.

	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
% massa	0,38 a 0,43	0,75 a 1,00	<0,03	<0,04	0,15 a 0,35	0,80 a 1,10	0,15 a 0,25

Fonte: Gerdau (2021)

Foi separado uma amostra para representar a estrutura como recebida da barra (nomeada de Original). As outras amostras foram recozidas plenamente, seguindo as recomendações do fabricante afim de homogeneizar qualquer defeito microestrutural presente, num forno mufla SANCHIS, aquecidas com uma taxa de 5 °C/min até uma temperatura de 870 °C por uma hora e deixadas resfriar dentro do forno. Uma amostra foi separada representando este ambiente de resfriamento.

Após o recozimento foram realizados os tratamentos térmicos em 3 diferentes meios de resfriamento. Os corpos de prova foram aquecidos até 870 °C, utilizando uma taxa de 5 °C/min, e, após uma hora de patamar, resfriados nos diferentes meios: água, óleo e ar.

Para realizar os ensaios de dureza, os corpos de provas tratados termicamente foram lixados com diferentes lixas (# 120 e 220) para não conter nenhum desnível ou alguma impureza que atrapalhasse a realização dos testes. Após essa preparação os corpos de provas foram colocados no durômetro de bancada INSTRUTHERM DB-300. Foram realizadas medidas em 5 pontos diferentes dos corpos-de-prova, partindo do núcleo até a superfície, conforme norma vigente (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016). Esses ensaios foram realizados em escala Rockwell C utilizando um penetrador cônico de diamante. A pré-carga aplicada foi de 10 kgf e a carga total foi de 150 kgf.

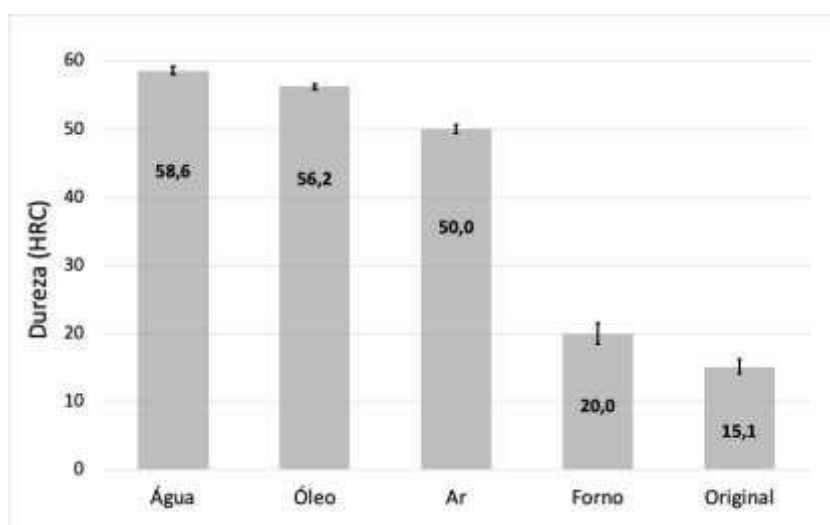
As microestruturas obtidas após os tratamentos térmicos realizados no aço SAE 4140 foram avaliadas por meio de metalografia qualitativa utilizando microscópio ótico. A preparação das amostras seguiu o procedimento recomendado na norma técnica (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1995). As amostras foram embutidas a quente com baquelite utilizando prensa embutidora (AROTEC PRE-30Mi) em uma temperatura de 150 °C por 5 minutos. Após o resfriamento foram lixadas sequencialmente de forma manual em granulometrias diferentes (120, 220, 320, 400,

600, 1200), alternando sempre a direção dos corpos de prova em 90°. Na sequência, as amostras foram polidas - utilizando alumina de granulométrica de 1 µm em uma politriz automática AROTEC modelo Aropol 2V – e submetidas ao ataque químico da superfície espelhada - Nital 2% durante um tempo de 8 segundos - para realizar a revelação da microestrutura. O ataque seletivo provoca transformações eletroquímicas acentuando o contraste entre as fases.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Analisando a média dos resultados de dureza Rockwell C (visíveis junto com o desvio padrão na Figura 1) é possível observar uma tendência de alteração dos resultados ao utilizar diferentes meios de resfriamento. A maior dureza obtida foi da amostra resfriada em água, de 58,6 HRC, esse resultado é consequência da maior taxa de resfriamento imposta pela alta capacidade calorífica da água. A tempera em óleo gerou uma microestrutura de dureza semelhante, 56,2 HRC. Na literatura são referendados durezas entre 53 e 60 HRC para a martensita gerada pela tempera do SAE 4140. Considerando a variabilidade dos dados e a incerteza inerente ao ensaio os resultados não apresenta diferença significativa (GERDAU, 2021; HOLZWEISSIG et al, 2015; METALS HANDBOOK, 2013).

Figura 1 – Média e desvio padrão das medidas de Dureza Rockwell C do aço SAE 4140 resfriado em diferentes meios.



Fonte: Autores

O resfriamento ao ar obteve uma dureza média de 50 HRC. Este valor se justifica pela intensa taxa de resfriamento causada pela pequena espessura da amostra quando exposta ao ar. A amostra resfriada no forno obtiveram uma dureza de 20 HRC, dentro da faixa esperada para o tratamento de recozimento pleno– 16 a 22 HRC. O maior desvio padrão desta amostra é, possivelmente, devido ao valor estar muito próximos do limite mínimo de utilização da escala HRC (METALS HANDBOOK, 2013; SENTHILKUMAR et al, 2011).

As microestruturas das amostras tratadas termicamente são mostradas a seguir. Na Figura 2 é possível observar que o resfriamento em água gerou uma estrutura martensítica fina e homogênea. Esta fase possui uma morfologia no formato de ripas (agulhas) alongadas e é a responsável pela alta dureza obtida no tratamento térmico (58,6 HRC) (COLPAERT,2000; SENTHILKUMAR et al, 2011).

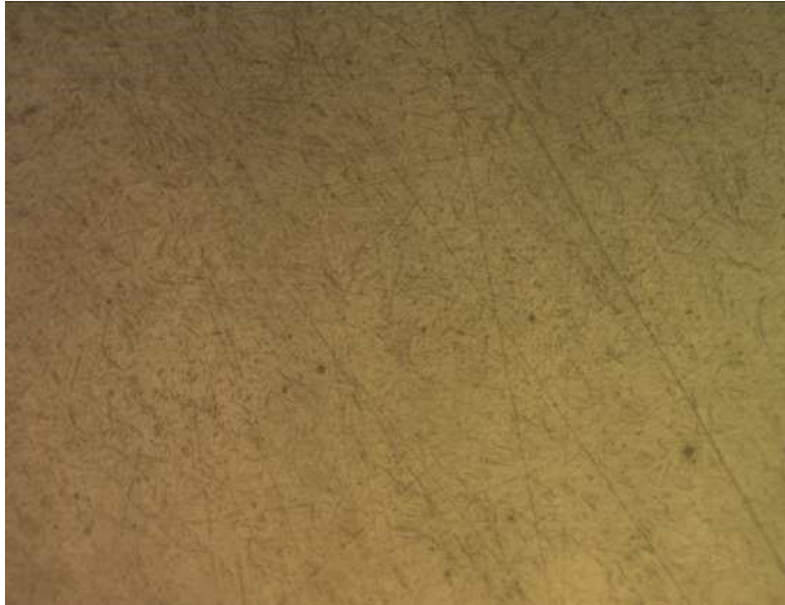
Figura 2 - Micrografia do aço SAE 4140 temperado em água com aumento de 200 x.



Fonte: Autores

A micrografia visível na Figura 3 confirma que o resfriamento em óleo, assim como em água, foi capaz de temperar o aço SAE 4140. A estrutura gerada possui alta dureza (56,2 HRC). A morfologia acicular da martensita é facilmente visualizada (METALS HANDBOOK, 2013; WINCK, 2020)

Figura 3- Micrografia do aço SAE 4140 temperado em óleo com aumento de 200 x.



Fonte: Autores

A Figura 4 apresenta a micrografias da estrutura obtida pelo resfriamento ao ar. Nela é possível observar a presença de bainita inferior (parte mais escura) e martensita (clara) em maior quantidade. Essa estrutura mista é responsável pela alta dureza obtida (50,0 HRC) (COLPAERT,2000, METALS HANDBOOK, 2013).

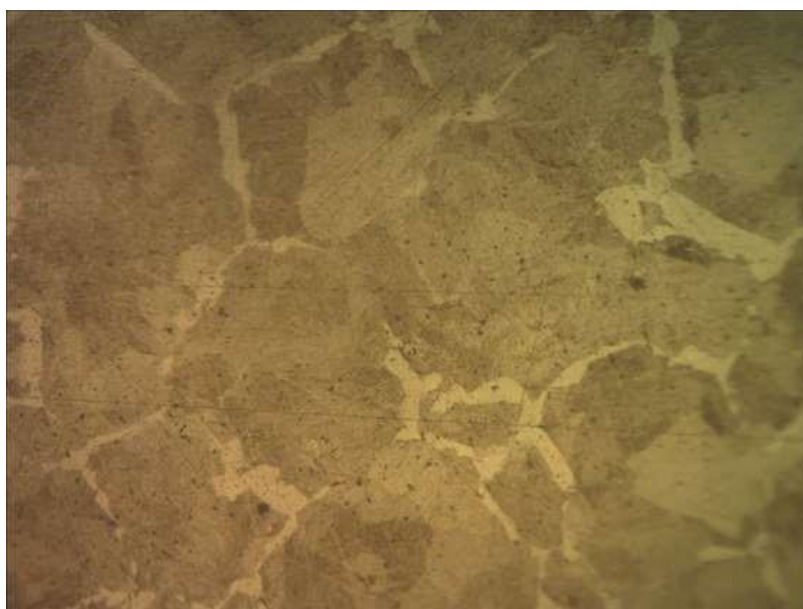
Figura 4- Micrografia do aço SAE 4140 temperado ao ar com aumento de 200 x.



Fonte: Autores

O tratamento térmico de recozimento pleno tem sua estrutura mostrada na Figura 5, onde é observado que ao resfriar o aço SAE 4140 lentamente ao forno é formado ferrita poligonal, característica da formação pré eutética, e perlita. O objetivo do recozimento é gerar a estrutura com grande tamanho de grão e baixa dureza. Essa estrutura é coerente com a dureza obtida de 20 HRC (CHIAVERINI, 2008; WINCK, 2020).

Figura 5 -Micrografia do aço SAE 4140 resfriado ao forno com aumento de 200 x.



Fonte: Autores

4. CONCLUSÃO

A partir da análise dos resultados obtidos de dureza Rockwell C e da microestrutura é possível afirmar que os tratamentos térmicos de têmpera em água e em óleo foram efetivos para formar martensita no aço SAE 4140. As faixas de dureza apresentadas após os tratamentos realizados são coerente com os encontrados na literatura e o fornecido pelo fabricante e as micrografias apresentam a morfologia .

A alta dureza da amostra resfriada ao ar é devida a baixa massa da amostra. Desta forma ela obtém altas taxas de resfriamento.



REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6508-1 : Materiais metálicos — Ensaio de dureza Rockwell Parte 1: Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13284: Preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica – Procedimento** . Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 87: Aço carbono e ligados para construção mecânica: Designação e composição química**. Rio de Janeiro. 2000.

CALLISTER, William. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2018. 590 p.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferro fundido**. 7. ed. São Paulo - Sp: Abm - Assoc. Bras. de Metalurgia, 2008. 599 p.

COLPAERT, Hubertus, **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**, 3. ed. São Paulo: Blucher, 2000. 651 p.

GERDAU. **Catálogos e Manuais**. [acesso 13 ago 2021] Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais>.

HOLZWEISSIG, M. J., LACKMANN, J., KONRAD, S., SCHAPER, M. Influence of Short Austenitization Treatments on the Mechanical Properties of Low-Alloy Steels for Hot Forming Applications. **Metall and Mat Trans A** 46 (2015) 3199–3207

LIU, Y., QIN, S., HAO, Q.. Finite Element Simulation and Experimental Verification of Internal Stress of Quenched AISI 4140 Cylinders. **Metall Mater Trans A** 48, 1402–1413 (2017)

METALS HANDBOOK, **Metallography and microstructure**. Volume 9. USA: ASM (American Society for Metals), 2004. - ISBN: 978-0-87170-706-2

METALS HANDBOOK, **Steel Heat Treating Fundamentals and Processes**. Volume 4A. USA: ASM (American Society for Metals), 2013

NUNURA, C. R. N.; SANTOS, C. A.; SPIM, J. A. Numerical – Experimental correlation of microstructures, cooling rates and mechanical properties of AISI 1045 steel during the Jominy end-quench test. **Materials & Design**, v. 76, p. 230-243, 2015.



PIRI, R., GHASEMI, B., YOUSEFPOUR, M. The Effects of One and Double Heat Treatment Cycles on the Microstructure and Mechanical Properties of a Ferritic–Bainitic Dual Phase Steel. **Metall Mater Trans A** 49, 938–945 (2018)

SENTHILKUMAR, D., RAJENDRAN, I., PELLIZZARI, M. Effect of treatment on the hardness and tensile behavior of AISI 4140 steel. **International Journal of Microstructure and Materials Properties (IJMMP)**, 2011. v. 6, n. 5:366-377.

SILVA, S. E. **Análise das propriedades mecânicas e estruturais do aço SAE 4140 submetido a tratamento criogênico.** Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Campos dos Goytacazes, RJ, 2012.

WINCK, Licurgo. Análise dos efeitos da têmpera e revenimento em diferentes temperaturas e avaliação nas propriedades mecânicas e microestruturas do aço SAE 4140, **Revista Mundi**, Engenharia, tecnologia e gestão, v.5, n.5, p. 269-01, 269-22, 2020.