

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE TEMPERATURA E RESFRIAMENTO NA TÊMPERA DE AÇO SAE 4140

Henrique Ajuz Holzmann

Leonardo Augusto Rodrigues Puhl

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Coordenação de Tecnologia em Manutenção Industrial, Guarapuava, PR.
haholzmann@utfpr.edu.br
leonardorodrigues94@gmail.com

Márcio Ferreira Hupalo

Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) - Departamento de Engenharia de Materiais (DEMA), Ponta Grossa, PR.
mfhupalo@uepg.br

Dentre os muitos tratamentos térmicos, a têmpera tem grande empregabilidade no meio industrial, produzindo peças com maior confiabilidade, aumentando sua resistência a fadiga e ao desgaste. As propriedades do material dependem diretamente de sua microestrutura, desta forma realizar um controle da temperatura no processo de tempera é fundamental para a formação uniforme de martensita. Este trabalho tem como objetivo avaliar faixas de temperaturas e meios de resfriamento que mais se adequam para a obtenção da martensita no aço SAE 4140. Foram realizados ensaios de têmpera com aquecimento a 840 °C, 880 °C e 920°C em óleo e água. Analisou-se a dureza e a microestrutura das amostras antes e após os ensaios. Pode-se notar que a dureza em todas as amostras se elevaram, quanto a temperatura um aumento provocou a elevação e estabilidade da dureza. O meio de resfriamento utilizado não afetou drasticamente a dureza obtida, sendo que em água as amostras apresentaram trincas. Na análise microestrutural a elevação da temperatura propiciou um maior percentual de martensita. A partir dos resultados conclui-se que em óleo o controle do processo é mais eficiente, não apresentando problemas de trincas e que uma elevação da temperatura no aquecimento favorece a estabilidade de martensita.

Palavras chave: Aço SAE 4140, Têmpera, Microestrutura, Dureza.

1. INTRODUÇÃO

A produção e manufatura do aço em geral é custosa e reflete muito no valor do produto final. Como o setor passa por retração, afetando diretamente nos custos, trabalhar suas propriedades mecânicas através de processos de tratamento térmico, se torna de suma importância.

Define-se tratamento térmico como um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinados. As propriedades dos aços dependem, em princípio da sua estrutura. Os tratamentos térmicos modificam, em maior ou menor escala, a estrutura dos aços, resultando na alteração de suas propriedades (Totten, 2007 e ASM International, 1990).

Os tratamentos térmicos têm como finalidade modificar as principais propriedades físicas e mecânicas dos metais, sendo os aços, aqueles que melhor respondem a tais processos, resultando, mediante processos específicos de tratamento, em produtos mais resistentes à abrasão e ao desgaste, além de uma boa resistência ao choque (Totten, 2007 e Rasma, 2015).

Dentre os tratamentos térmicos, a têmpera tem grande importância no meio industrial, pois, este processo possibilita o aumento do limite de resistência à tração do aço e também da sua dureza. O processo de têmpera consiste no endurecimento do aço por aquecimento até a temperatura adequada para obter uma microestrutura austenítica, manutenção da peça neste patamar de temperatura por um tempo adequado e resfriamento em um meio que resulte em velocidade apropriada para obter a formação de martensita (Totten, 2007 e Colpaert, 2008).

A têmpera é geralmente empregada nos processos que necessitam de peças com elevada resistência e confiabilidade, através deste processo é possível se obter estruturas e propriedades que permitem o emprego do aço em peças como as que se encontram na indústria mecânica, de transporte e em outros segmentos industriais (ASM International, 1990; Zuppo, 2011 e ASM Handbook, 1991).

A faixa de temperatura utilizada no processo de têmpera varia conforme a porcentagem de carbono. Os meios de resfriamento mais empregados são: água, óleo, solução salina aquosa e solução aquosa de polímeros.

O controle da temperatura no processo é fundamental, pois necessita-se de uma adequada faixa para a formação da fase austenítica no material, devendo-se garantir que toda a peça esteja aquecida de forma homogênea, com o intuito de

formar martensita, evitando a formação de perlita e ferrita em seu interior (ASM International, 1990 e ASM Handbook, 1991).

A partir dos diagramas TTT (temperatura-tempo-transformação) e CCT (curva de resfriamento continua) pode se estimar a microestrutura final após o tratamento térmico, podendo relacionar a taxa de resfriamento e a porcentagem de formação de martensita, Figura 1.

O diagrama CCT indica que dependendo da velocidade de resfriamento pode-se escolher os meios de resfriamentos mais adequados para a obtenção da martensita, pois relaciona a taxa de resfriamento com as regiões de formação das microestruturas.

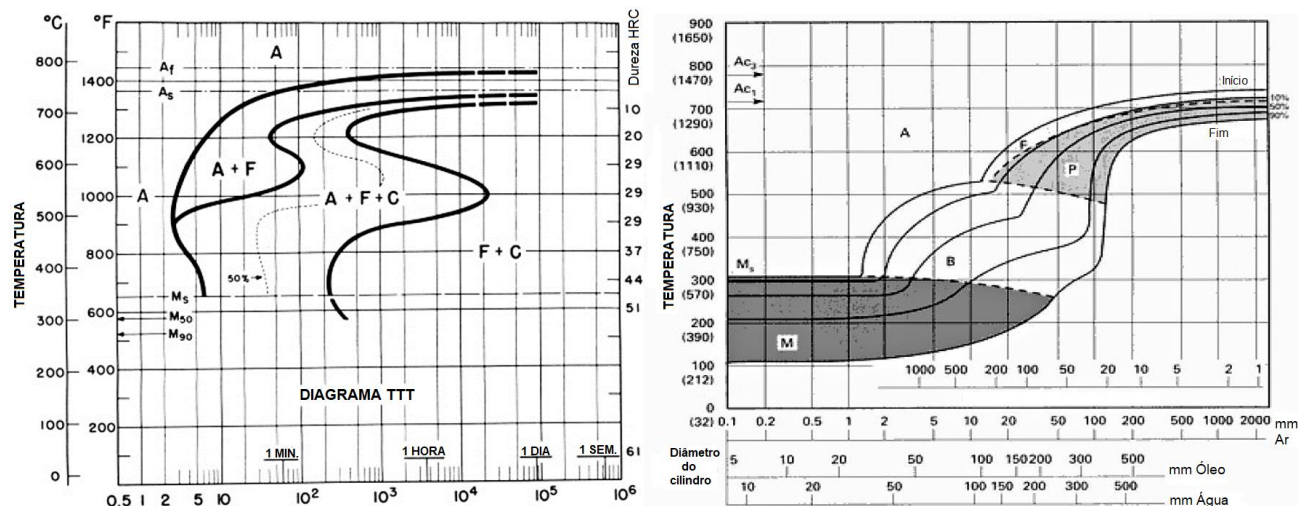


Figura 1 – a) Diagrama TTT para aço SAE 4140 e b) Curva CCT para aço SAE 4140.
(American Society for Metals, 1991)

Portanto, este trabalho tem como objetivo a obtenção de faixas de temperatura de aquecimento e meios de resfriamento que melhor se adequam no processo de têmpera, aumentando assim, sua dureza sem que ocorra deformações no aço durante o resfriamento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras utilizadas são constituídas de aço SAE 4140 laminado, foram produzidas 14 amostras nas dimensões de 27 mm x 50 mm x 15 mm, sendo 12 delas para ensaios de tempera e 2 para caracterização do material como recebido.

A Tab. 1 apresenta o ciclo de aquecimento utilizado, bem como o meio de banho para o resfriamento, sendo que ambos os casos os mesmos estavam inicialmente a 22°C. O tanque de resfriamento utilizado na tempera possuía 30 litros, sendo em formato cilíndrico com 30 cm de diâmetro (ASM International, 1990 e Sanij, 2012).

Tabela 1. Planejamento dos experimentos, com temperaturas e meios de resfriamentos utilizados.
(Autoria própria)

Amostra e Réplica	Faixa de Temperatura	Meio de Resfriamento	Tempo de Forno após estabilizada a temperatura
1 e 2	840°C	Água	2 horas
3 e 4	880°C	Água	2 horas
5 e 6	920°C	Água	2 horas
7 e 8	840°C	Óleo Mineral	2 horas
9 e 10	880°C	Óleo Mineral	2 horas
11 e 12	920°C	Óleo Mineral	2 horas

Após tratamento térmico, as amostras foram seccionadas centralmente, a fim de produzir uma superfície que abrangesse a área externa e interna do material. Com o perfil em mãos marcou-se pontos de medição de dureza espaçados de 3 milímetros, partindo do centro da amostra (ponto 0) em direção as extremidades. Os ensaios de dureza foram realizados no durômetro mecânico, na escala Rockwell C.

Para maior precisão nos dados coletados, foi utilizado o cálculo de desvio padrão para o ensaio de dureza, dado pela Equação 1. Para cada posição realizou-se 20 medições e na sequência a média e desvio padrão de cada ponto.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (1)$$

Onde:

x o valor de cada medição obtida.

$\bar{x}$ o valor da média das medições em determinado ponto.

n o tamanho amostral.

A Figura 2 mostra a metodologia de medição e marcação para as amostras.



Figura 2. Metodologia adotada a) Divisão de pontos utilizados na medição de dureza das amostras; b) Amostra embutida para metalografia.
(Autoria própria)

Para análise metalográfica as amostras foram cortadas e embutidas, obtendo-se uma região de metal que abrange do centro até a extremidade. Na sequência realizou-se a preparação e ataque com Nital 3%, para revelação da microestrutura da amostra, sendo observadas em microscópio marca Olympus – Modelo BX51M, equipado com câmera digital acoplada Q-Color3.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da medida de dureza das amostras originais, pode-se obter uma dureza média de $18,6 \pm 0,33$ HRC, não havendo grandes variações entre o centro e a extremidade da amostra, convergindo para o que a literatura apresenta como valores aceitáveis de dureza ao aço 4140.

Observa-se que em ambas as amostras ocorreu um aumento de dureza em todo o perfil analisado, devido a alteração da maioria da microestrutura do material para martensítica. No centro das amostras nota-se um valor reduzido na medida de dureza se comparado às extremidades, pois ocorre um resfriamento mais lento, e, com isto, menor porcentagem de formação da martensita, conforme pode-se avaliar através dos diagramas TTT e CCT para o aço 4140. A tendência de elevação de dureza nas amostras se deu de maneira similar, tanto para medição na horizontal, quanto para vertical, apresentada na Fig. 3. Percebe-se que quanto maior a temperatura de aquecimento, para o tratamento realizado em óleo, mais próxima a dureza do centro e da extremidade das amostras.

Nas amostras resfriadas em água quanto mais próximo às extremidades, nota-se o aumento maior de dureza, pois nesta região ocorre uma maior taxa de resfriamento comparada ao centro, e por consequência, maior porcentagem de formação de martensita em sua microestrutura.

No resfriamento em água, os valores de dureza variaram entre a amostra e sua réplica, este fenômeno ocorre, provavelmente, pois no resfriamento em água sem agitação, ocorre a formação de uma película de vapor em torno da peça, o que retarda seu resfriamento inicial (American Society for Metals, 1991).

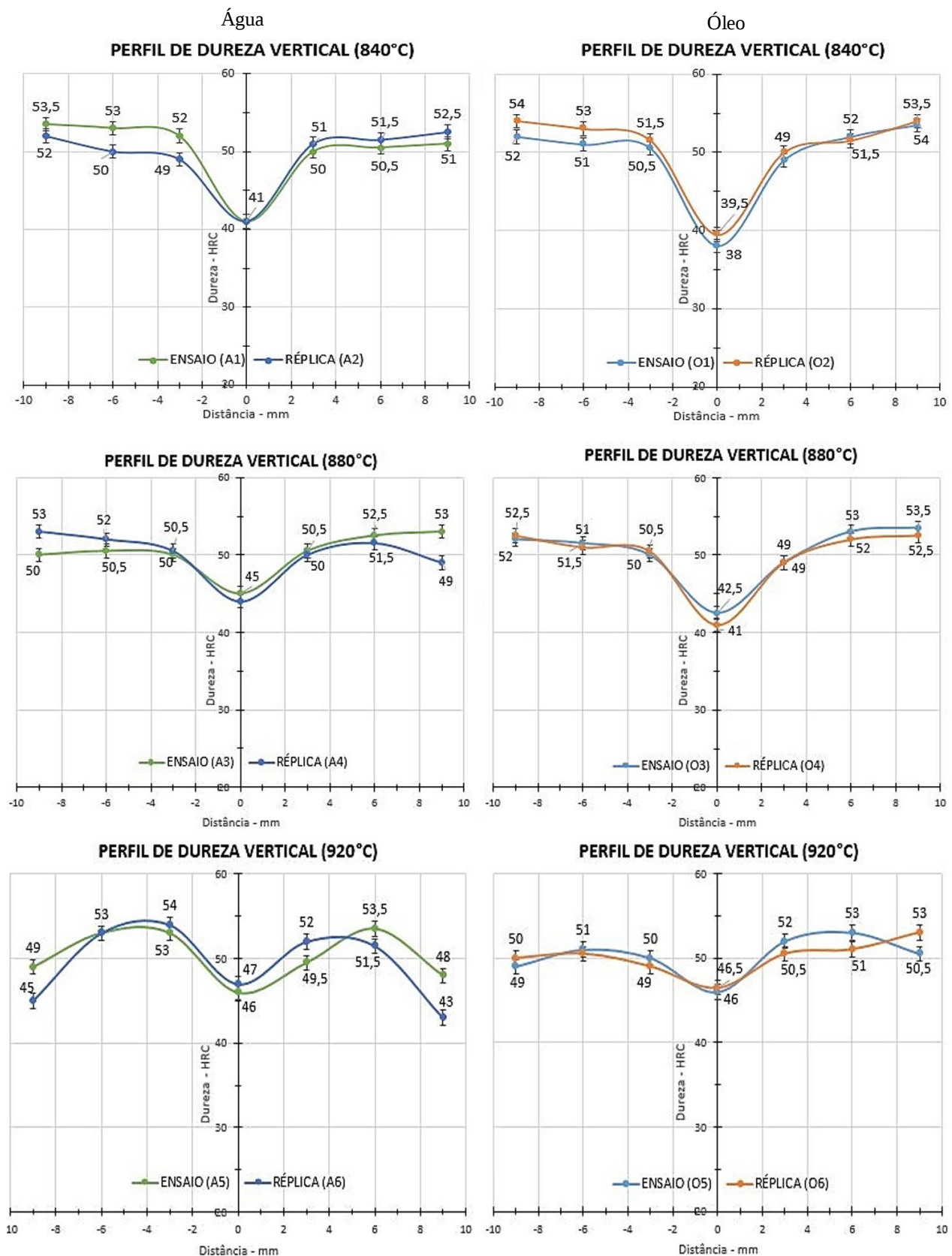


Figura 3. Gráficos de dureza obtidos na vertical, para cada amostra, nos diferentes meios refrigerantes.
(Autoria própria)

A tempera em óleo apresentou maior constância de resultados entre ensaio e réplica, sem apresentar trincas superficiais ou problemas de fragilização das amostras. Já para o resfriamento em água, a partir da temperatura de 880 °C, nota-se

uma diminuição de dureza nas extremidades, isto se deve pela ocorrência de trincas em sua superfície, que por sua vez foram ocasionadas pela severidade do resfriamento, sendo apresentadas na Fig. 4.

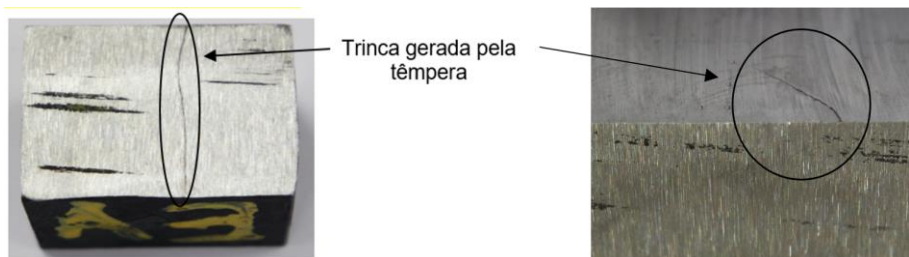


Figura 4. Trinca gerada na superfície e centro da amostra - tratamento de têmpera em água com temperatura de 920 °C. (Autoria própria)

As trincas de têmpera podem ocorrer devido ao rápido resfriamento, onde há maior diferença de temperatura, gerando assim gradientes de temperatura no interior da peça e, conseqüentemente, gradientes de tensão interna.

Outro fator favorável a ocorrência de trincas é devido à variação de volume que ocorre durante a transformação martensítica, pois a martensita tem estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC), e esta estrutura pode ser visualizada como uma distorção da estrutura CCC, ou seja, um alongamento em uma direção, causada pelo interstício do elemento carbono (Berrahmoune, 2006).

Já na análise microestrutural percebe-se claramente o aumento da porcentagem de martensita ao longo das amostras, nota-se a transformação martensítica em todas as regiões, porém, percebe-se diferenças na quantidade de martensita formada em cada local. Na extremidade onde o resfriamento foi mais rápido, formou-se alta quantidade de martensita, em forma de “agulha” ou “ripas” (região em preto no quadro), a Fig. 5 apresenta a amostra aquecida a 840 °C, resfriada em óleo. No centro e no meio, formaram grandes regiões de austenita retida (AR) que não se transformou durante o resfriamento (regiões de tons de marrom), para as regiões de tons claros, pode ter ocorrido as fases ferríticas em forma de placas, onde ocorreu o resfriamento mais brando comparada a extremidade (ASM International, 1990; Colpaert, 2008; Meysami et. al., 2010 e Sanij et.al., 2012).

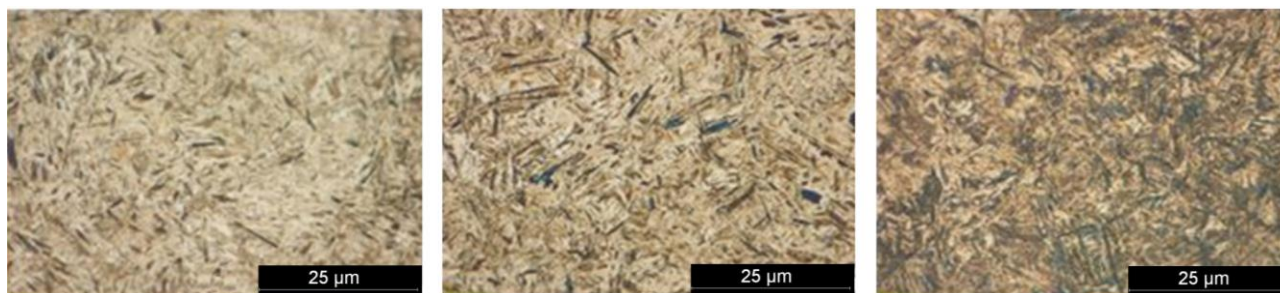


Figura 5. Microestrutura obtida no tratamento da amostra com aquecimento a 880 °C, em meio refrigerante óleo, sendo posição central – meio – extremidade da amostra embutida. (Autoria própria)

Em todos os ensaios realizadas, ocorre uma elevação da quantidade de martensita no interior das amostras, conforme se eleva a temperatura de aquecimento, o que pode ser comprovado com a elevação da dureza apresentada na Figura 2. Quanto ao meio refrigerante, notou-se que em água as amostras para uma mesma temperatura apresentaram maior percentual de martensita na extremidade externa, no centro não se observou grandes diferenças na quantidade de martensita.

4. CONCLUSÕES

Quanto ao meio de resfriamento, nota-se que o perfil de dureza para ambos os meios de refrigeração são semelhantes, não havendo grandes dispersões.

No resfriamento em água ocorreram trincas de têmpera em 4 amostras, muito prejudiciais para a peça, condenando assim seu uso posterior. No resfriamento em óleo, atingiu-se valores de dureza satisfatórios, sem o revés das trincas.

Portanto, pode-se afirmar pelos resultados obtidos que o meio de resfriamento mais eficaz para o processo de têmpera no aço SAE 4140 é em óleo, pela constância nos valores de dureza, sem a ocorrência de trincas.

Quanto as faixas de temperaturas de aquecimento, foram utilizados três valores:

Para as temperaturas de 840°C e 880°C, foi obtido o aumento de dureza desejado, sem que ocorresse trincas nas amostras resfriadas em óleo, já para a temperatura de 920°C, as duas amostras O5 e O6 apresentaram trincas.

Para as amostras resfriadas em água, ocorreu trincas nas faixas de aquecimento à 880°C e 920°C, ou seja, a faixa de temperatura de 920°C foi a menos eficaz, pois nesta faixa que se deu trinca em todas as quatro amostras.

Sendo assim, para o resfriamento em óleo, pode-se escolher entre a temperatura de 840°C e 880°C, pois ambas foram eficientes em aumentar a dureza, sem a ocorrência de trincas.

Com a análise metalográfica das amostras, pode-se concluir que, através da têmpera houve a transformação martensítica em todos os pontos de análise, tanto em água, quanto em óleo. Com presença de martensita, austenita retida e regiões ferríticas.

4. REFERÊNCIAS

- Totten, G.E., "Steel Heat Treatment Handbook", 2 Ed., New York, Crc Press, 2007.
- ASM International, "Asm Handbook: Metallography and Microstructures", 10 Ed, Novelty, Russell Township, 1990.
- Rasma, E.T. "Caracterização Estrutural e Mecânica do Aço AISI/SAE 4140 Tratado sob Diferentes Tratamentos Térmicos", Dissertação de Mestrado, UENF, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.
- Colpaert, Hubertus et al. "Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns". Editora Blucher, 2008.
- Zuppo, Ricardo M. "Análise Comparativa do Efeito de Têmpera e Revenimento e da Austêmpera Seguida ou Não de Conformação a Frio na Microestrutura e nas Propriedades do Aço SAE 4140H". Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2011.
- ASM Handbook Committee (1991) ASM Handbook. Heat Treating, Vol 4. ASM International, Materials Park.
- Meysami, A. H. et al. "An Investigation on the Microstructure and Mechanical Properties of Direct-Quenched and Tempered AISI 4140 Steel". *Materials & Design*, V. 31, N. 3, P. 1570-1575, 2010.
- Sanij, M. K. et al. "The Effect of Single and Double Quenching and Tempering Heat Treatments on the Microstructure and Mechanical Properties of AISI 4140 Steel". *Materials & Design*, V. 42, P. 339-346, 2012.
- Berrahmoune, M. R. et. al. "Delayed Cracking in 301LN Austenitic Steel After Deep Drawing: Martensitic Transformation and Residual Stress Analysis". *Materials Science and Engineering: A*, V. 438, P. 262-266, 2006.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND COOLING PARAMETERS ON SAE 4140 STEEL QUENCHING

Henrique Ajuz Holzmann

Leonardo Augusto Rodrigues Pulh

Federal University of Technology - Parana (UTFPR) - Department of Technology in Industrial Maintenance, Guarapuava, PR.

haholzmann@utfpr.edu.br

leonardorodrigues94@gmail.com

Márcio Ferreira Hupalo

State University of Ponta Grossa (UEPG) - Materials Engineering Department (DEMa), Ponta Grossa, PR.

mfhupalo@uepg.br

Among the many heat treatments, quenching has great employability in the industrial environment, producing parts with greater reliability, increasing its resistance to fatigue and wear. The properties of the material directly depend on its microstructure, so performing a temperature control in the process is essential for the uniform formation of martensitic. This work aims to evaluate temperature ranges and cooling media that are most suitable for obtaining martensite in SAE 4140 steel. Quenching tests were carried out with heating at 840 °C, 880 °C and 920°C in oil and water. The hardness and microstructure of the samples were analyzed before and after the tests. It can be noted that the hardness in all the samples increased, as for the temperature an increase caused the increase and stability of the hardness. The cooling medium used did not drastically affect the hardness obtained, and in water the samples showed cracks. In the microstructural analysis, the rise in temperature provided a higher percentage of uniform martensite. From the results it can be concluded that in oil the control of the process is better with no cracks problems and that an elevation of the temperature in the heating favors the stability of martensite.

Keywords: *SAE 4140 steel, quenching, microstructure, hardness.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.