

EFEITOS DA TEMPERATURA DE REVENIMENTO NA MICROESTRUTURA E DUREZA DO AÇO AISI 5160*

*Leonardo Viana Dias¹
Daniel Meira Raydan²
Aderci de Freitas Filho³
Ivan José de Santana⁴*

Resumo

Dentre os tratamentos térmicos, a Têmpera seguida de Revenimento constituem um grupo fundamental para a indústria, tanto pelas características inerentes aos processos, quanto ao fato de proporcionarem a adequação do material às condições e solicitações mecânicas exigidas com o ajuste de variáveis, e baixo custo. Entretanto, estes processos térmicos ainda geram vários desafios, principalmente em relação à influência de algumas variáveis na adequada validação dos procedimentos e na avaliação da resistência das peças tratadas. Este trabalho avalia a influência da temperatura de Revenimento no aço AISI 5160, correlacionando essa variável com as microestruturas e propriedades mecânicas obtidas. Foram avaliadas cinco temperaturas de Revenimento: 200, 250, 300, 350, 400 e 450°C em corpos de prova temperados no óleo. A microestrutura foi caracterizada por metalografia e difração de raio x. As propriedades mecânicas em cada condição foram caracterizadas por meio de ensaios de dureza Rockwell e microdureza Vickers. Os resultados obtidos permitiram a construção da Curva de Revenimento e perfis de microdureza ao longo da seção transversal, correlacionando a diminuição da dureza do material com o aumento da temperatura de revenimento, o que se justifica pela precipitação de carbono oriundos da martensita, formação de carbonetos e diminuição do estado de tensões.

Palavras-chave: AISI 5160; Curva de Revenimento; Revenimento

EFFECTS OF TEMPERING TEMPERATURE IN THE MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF AISI 5160 STEEL

Abstract

Among the heat treatments, quenching and tempering is a group of fundamental importance for the industry, not only due to the inherent characteristics of the processes, but also to the fact that, through the right parametrization, it's possible to adequate the material to the conditions and mechanical demands, requiring low costs. However, these heat treatments are still challenging, mainly due the influence of some variables in the validation of the executed procedures and in the evaluation of the resistance of the treated parts. This work aims to evaluate the influence of tempering temperature on AISI 5160 steel, correlating this variable with the microstructures and mechanical properties obtained. Five different tempering temperatures were evaluated: 200, 250, 300, 350, 400 and 450°C in oil-tempered test specimens. The microstructure was characterized by metallography and x-ray diffraction. The mechanical properties obtained in each condition were characterized by Rockwell hardness and Vickers microhardness tests. The results allowed the construction of a tempering graphic, a microhardness profiles along the cross section, as well as directly correlate the decrease of the hardness with the increase of tempering temperature, which is justified by the precipitation of carbon from the martensite, forming carbides, decreasing the high state of tensions.

Keywords: AISI 5160; TemperingGraphics;Tempering.

- ¹ *Engenheiro de Materiais, Professor, Departamento de Metalurgia, Instituto Federal de Minas Gerais, Ouro Branco, MG Brasil.*
- ² *Engenheiro de Materiais, Estudante, DEMAT, CEFET MG, Belo Horizonte, MG Brasil.*
- ³ *Engenheiro Mecânico, Mestre, Professor, DEMAT, CEFET MG, Belo Horizonte, MG Brasil*
- ⁴ *Engenheiro Mecânico, Doutor, Professor, DEMAT, CEFET MG, Belo Horizonte, MG Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Aço AISI 5160 é utilizado como material prima para molas, devido ao seu ótimo custo benefício, alcançando boas propriedades mediante tratamentos térmicos [1-3]. Cada tratamento térmico tem um conjunto de variáveis a serem avaliadas, possibilitando mudanças microestruturais no material, alterando suas propriedades[3;4].

O Revenimento é um tratamento térmico utilizado para conferir a materiais temperados (com microestrutura martensítica) um aumento de ductilidade e redução da fragilidade[3;5;6]. Para alcançar esses resultados, o revenimento promove a segregação de carbono, formando martensita revenida, ferrita e carbonetos [7-9].

Aumentar a temperatura de revenimento aumenta a mobilidade atômica, facilitando o movimento do carbono para um estado de menor energia. Temperaturas ainda maiores podem promover a formação de cementita, a decomposição da austenita retida, e até a recristalização, formando microestruturas convencionais de mecanismos difusivos de formação [4;7]. Segundo Lima, 2007 [10], a temperatura de Revenimento utilizada depende das propriedades finais desejadas para o aço.

Muitos estudos são feitos avaliando as diferentes propriedades e estruturas formadas em diferentes temperaturas de Revenimento. Li *et al*, 2013 [9] estudou os efeitos da temperatura de Revenimento na microestrutura e propriedades do aço AISI 6150. Já Lim *et al* 2012 [5] analisou a influência de diferentes temperaturas de Revenimento na microestrutura do aço SAE 4340, encontrando que os átomos de carbono segregam ao longo dos contornos das ripas da austenita prévia, o que é reduzido pelo aumento da difusividade inerente ao aumento da temperatura de revenimento, gerando carbonetos. Outro exemplo foi o estudo de SALEMI *et al* 2008 [11], que encontrou um aumento de ductilidade e decréscimo de resistência à tração em diferentes temperaturas de Revenimento de aço NiCrMov. Apesar disso, são poucas as referências de estudos feitos para avaliar os efeitos das temperaturas de Revenimento no aço AISI 5160.

O trabalho proposto busca avaliar a influência da temperatura de Revenimento no aço AISI 5160, correlacionando essa variável com as microestruturas e propriedades mecânicas obtidas. Foram avaliadas cinco (05) temperaturas de Revenimento diferentes: 200, 250, 300, 350, 400 e 450°C em corpos de prova temperados no óleo. A microestrutura foi caracterizada com a utilização de técnicas de metalografia e técnicas de difração de raio x. As propriedades mecânicas obtidas em cada condição, foram caracterizadas por meio de ensaios de dureza Rockwell e microdureza Vickers. Os resultados obtidos permitem a construção da Curva de Revenimento, os perfis de microdureza ao longo da seção transversal, assim como correlacionar diretamente a diminuição da dureza do material com o aumento da temperatura de revenimento, o que se justifica pela precipitação de carbono oriundos da martensita, formação de carbonetos, diminuição do estado de tensões dessa microestrutura.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

Foram confeccionados corpos de prova de aço AISI 5160 com seção transversal circular de 19,40mm (Figura 01), cuja composição química foi verificada utilizando espectrômetro para análise de metais, Foundry Master Xpert.

Para a realização dos experimentos foram confeccionados 15 corpos de prova. Esses corpos de prova foram tratados termicamente como descrito na Tabela 01, sendo que em cada condição foram utilizados dois corpos de prova (exceto no corpo de prova somente normalizada).

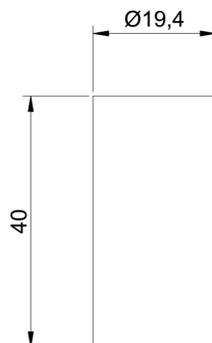


Figura 1. Dimensão dos corpos de prova usados

Tabela 1. Condições Tratamentos Térmicos.

Amostra	Normalização (°C)	Resf.	Têmpera (°C)	Resf.	Revenimento (°C)	Resf.
N	900	Ar	-	-	-	-
T	900	Ar	900	Óleo	-	-
R 200	900	Ar	900	Óleo	200	Ar
R 250	900	Ar	900	Óleo	250	Ar
R 300	900	Ar	900	Óleo	300	Ar
R 350	900	Ar	900	Óleo	350	Ar
R 400	900	Ar	900	Óleo	400	Ar
R 450	900	Ar	900	Óleo	450	Ar

Obs: Resf. – Resfriamento.

Para todos os tratamentos térmicos realizados, o tempo de encharque foi de 45 minutos, e a Normalização e a Têmpera foram realizados à 900°C, de modo a promover a completa austenitização dos corpos de prova[4].

Para a realização dos tratamentos térmicos foi utilizado o forno elétrico da marca Magnus do modelo N1040 e os corpos de prova, inseridos em recipiente de aço, foram cobertos por carvão vegetal para evitar oxidação e descarbonetação.

Os ensaios de dureza Rockwell C foram realizados utilizando um durômetro IGV do modelo RM401/A, carga de 150kgf, tempo de manutenção da carga 30s[12]. Após os tratamentos térmicos, foram feitas três medições em cada um dos 15 corpos de prova: uma na região central, outra na metade no raio e a última, próximo à extremidade (Figura 02). De posse dos valores de dureza foram calculados a média e o desvio padrão para cada condição de tratamento. A partir dos dados obtidos construiu-se a curva de Revenimento.

Para compor o perfil de microdureza, os corpos de prova foram cortados na metade da seção longitudinal, e o ensaio foi realizado utilizando um microdurômetro Vickers da marca Shimadzu modelo 2T com carga de 1kgf e tempo de manutenção de carga de 15s. Foram realizados onze ensaios de microdureza da extremidade até o centro, com intervalos de 0,5mm, como pode ser observado na Figura 3.

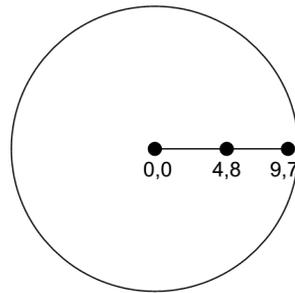


Figura 2. Representação esquemática dos pontos de obtenção dos valores de dureza Rockwell C, com a distância em milímetros.

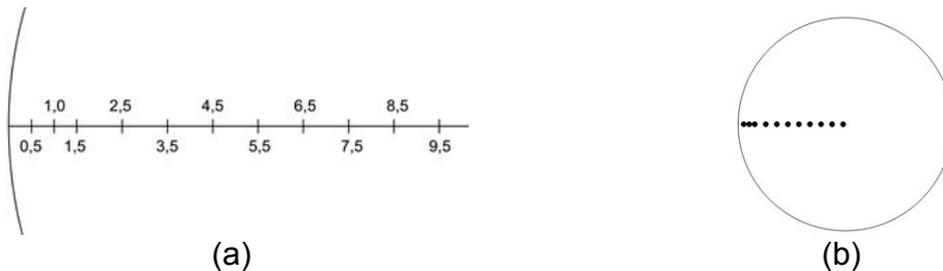


Figura 3. Representação do intervalo de medição de microdureza: a) distância relativa à superfície da peça em milímetros, b) representação dos pontos de medição.

As análises metalográficas foram realizadas nos corpos de prova após os ensaios de microdureza, esses foram lixados, polidos e atacados com solução de ácido nítrico, Nital 3%, e analisados com a utilização de um microscópio ótico Kontrol do modelo IM713. Para confirmação das fases cristalinas presentes nos corpos de prova foram ensaios de difração de raios-x. O equipamento utilizado foi o difratômetro marca Shimadzu modelo XRD 7000, com tubo de cobre, corrente de excitação de 30 mA e tensão 20 kV, com velocidade de varredura do goniômetro de 0,5° por minuto, e com ângulo (2 teta) entre 10 e 100 graus.

2.2 Resultados e Discussão

O resultado da análise química da amostra do aço utilizado no trabalho pode ser observada na Tabela 02 e, segundo METALS HANDBOOK 1988 [13] e Com base na designação COPANT, temos que, para o aço ser classificado como AISI 5150, o silício deve estar entre 0,15 e 0,30%, o manganês deve estar entre 0,70 e 0,90%, o cromo deve estar entre 0,70 e 0,90%, e o carbono, por fim, deve estar presente entre 0,48 e 0,53%. Portanto, mesmo com uma pequena variação nos valores de carbono, o material pode ser classificado como AISI 5160.

Tabela 02. Análise da composição química do aço AISI 5160.

Teste	% Fe	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Al	%Ta
1	97,1	0,59	0,24	0,87	0,017	0,027	0,85	0,015	0,046	0,027	0,1
2	97,1	0,6	0,23	0,87	0,018	0,031	0,85	0,015	0,045	0,027	0,11
Média	97,1	0,6	0,24	0,87	0,018	0,029	0,85	0,015	0,046	0,027	0,1

2.2.1 Dureza Rockwell C

Os resultados do ensaio de dureza Rockwell C nos diferentes corpos de prova com diferentes tratamentos térmicos consolidados estão representados na Tabela 03.

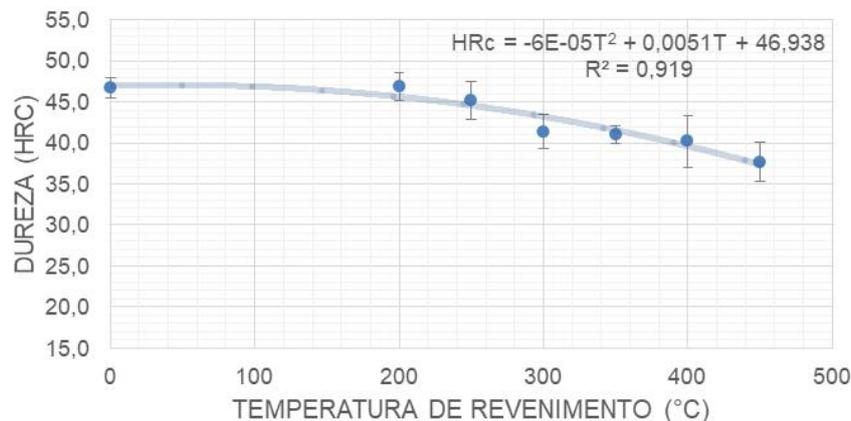
Tabela 03. Dados obtidos no ensaio de dureza Rockwell C

Amostra	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Med 6	Média
N	18	20	22	24	23	24	21,8
T	46	48	45	47	46	48	46,7
R 200	44	46	47	47	48	49	46,8
R 250	45	42	43	48	47	46	45,2
R 300	41	44	43	39	39	42	41,3
R 350	40	40	42	40	42	42	41,0
R 400	37	37	38	42	43	44	40,2
R 450	37	37	34	38	39	41	37,7

Obs: N – Normalizado, T – Temperado, R200 – Revenimento a 200°C, Med 1 – Medida 01.

É perceptível um grande aumento no valor de dureza quando se compara a dureza HRC média da situação apenas normalizada em relação à dureza HRC média da situação temperada, saindo de um valor médio de 21,8 HRC para um valor médio de 46,7 HRC. Esse resultado é devido à estrutura martensítica do aço temperado, que implica em uma grande quantidade de distorções decorrentes da mudança brusca de estrutura cristalina cúbica de fase centrada para tetragonal de corpo centrado [9;4]).

A Figura 04 apresenta a curva de revenimento obtida pelos valores médios de dureza dos corpos de prova com os seus respectivos valores de desvio padrão.

**Figura 4.** Curva de Revenimento do aço AISI 5250.

A equação obtida (HRC – Dureza em HRC, T – Temperatura em °C) que descreve a curva de tendência possui uma correlação de 0,919 (R^2). Observa-se no comportamento da curva um predomínio decréscimo dos valores de dureza média desde a amostra na condição apenas temperada, e continuando perante o aumento da temperatura de Revenimento, o que era esperado devido ao alívio de tensões internas causada pelo rearranjo local dos átomos [14]. Porém, observa-se uma variação máxima de dureza de aproximadamente 10HRC o que indica um material com boa temperabilidade se comparado com os aços ao carbono [4;6].

2.2.2 Perfil de MicrodurezaVickers

Os valores obtidos para compor o perfil de microdurezaVickers para os diferentes corpos de prova com diferentes tratamentos térmicos podem ser visualizados na Figura 05.

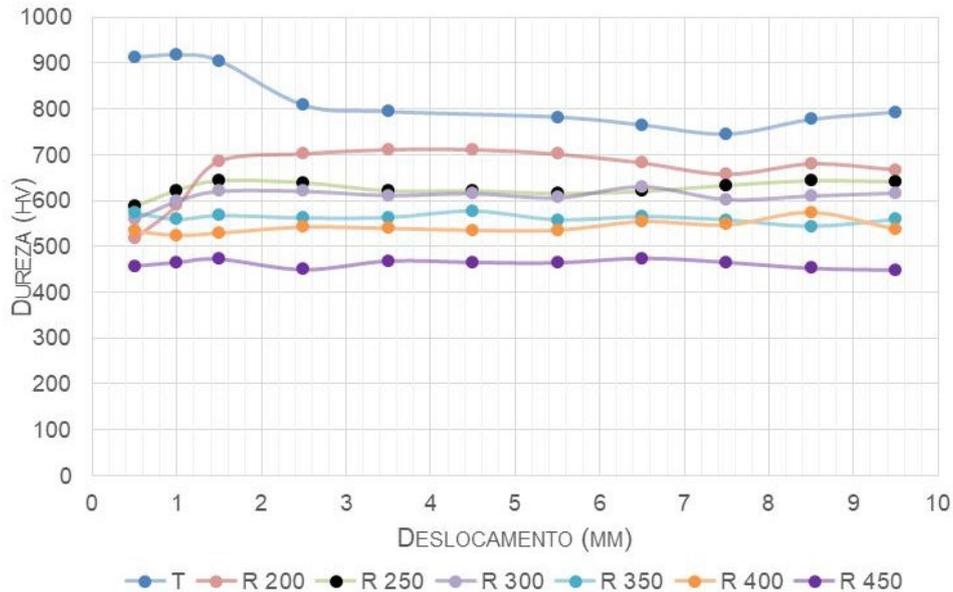


Figura 05. Perfil de microdureza para os corpos de prova nas diferentes situações de tratamento térmico.

Percebe-se na Figura 05 que apenas os corpos de prova sem Revenimento (T) e o revenido a 200°C apresentaram uma variação de dureza maior que 100HV. Os outros corpos de prova apresentaram um perfil homogêneo de dureza, o que indica, novamente, a boa temperabilidade do material. Além, disso os resultados indicam que o procedimento de cobrir os corpos de prova com carvão vegetal para evitar a oxidação e decarbonetação mostrou-se eficiente. Os resultados indicam que as temperaturas de 250 e 300°C apresentaram praticamente os mesmos resultados em relação a dureza obtida pelo material, assim como as temperaturas 350 e 400°C.

Portanto, para a obtenção de dureza de aproximadamente 550HV uma boa opção seria usar 300°C de temperatura de Revenimento, pois atingiria a dureza desejada e, possivelmente menos tensões residuais. O mesmo raciocínio se aplica para durezas um pouco acima de 600HV, assim a temperatura de 300° poderia ser a mais indicada [4;15].

2.2.3 Análises Microestruturais

A Figura 06 representa a micrografia obtida para a amostra do aço AISI 5160 apenas normalizada.

O tratamento de normalização é responsável pelo refinamento e maior uniformidade da microestrutura. Na imagem, é percebida uma microestrutura com a presença de grãos equiaxiais, referentes a ferrita, e lamelas de ferrita e cementita, característica da perlita[4;15].

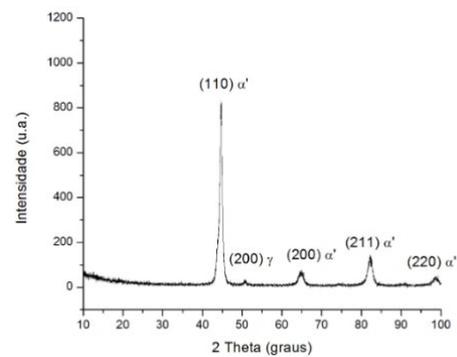


Figura 06. Micrografias do corpo de prova apenas normalizado.

A Figura 07exibe as microestruturas obtidas do aço AISI 5160 somente temperado, assim como o respectivo difratograma.



(a)

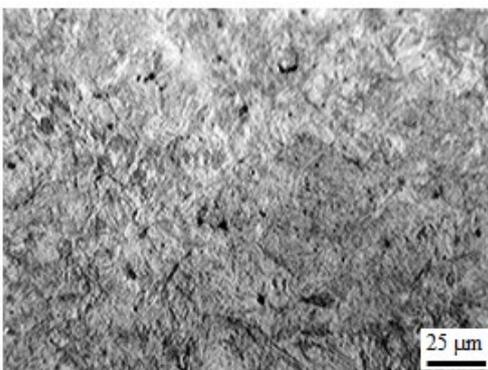


(b)

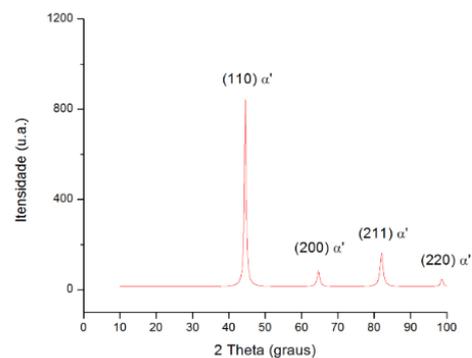
Figura 7. a) Micrografias do corpo de prova apenas temperado e (b) seu difratograma.

Na Figura 07(a) fica clara a presença de estrutura em forma de ripas, característica da martensita. A análise do difratograma, permiti a identificação das fases presentes, tornando possível inferir que há presença de austenita retida, no corpo de prova somente temperado[4;15].

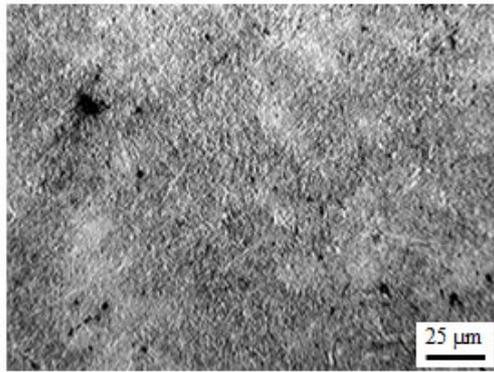
Conforme a foto micrografia da Figura 08, é possível inferir que há uma redução da fração de martensita com o revenimento, poisas regiões de placas, típicas da martensita, passam a perder nitidez[4;15].



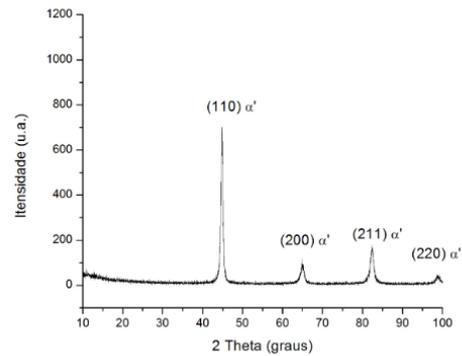
(a)



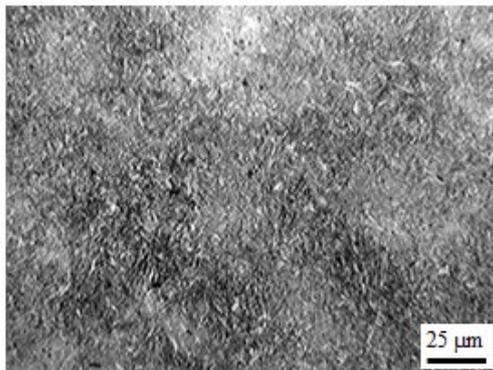
(a1)



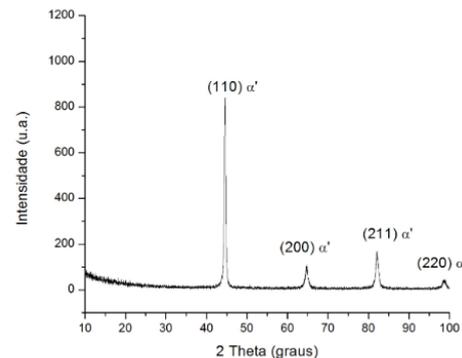
(b)



(b1)



(c)



(c1)

Figura 11. Micrografia e difratogramas dos corpos de prova: R200 (a) (a1); R300 (b) (b1) e R450 (c) (c1).

Com a progressão do revenimento, as estruturas grosseiras da martensita vão se tornando mais difusas, com aspecto menos nítido, caracterizando a martensita revenida, que consiste em partículas de carbonetos de ferro uniformemente dispersos na matriz martensítica [4;15].

O revenimento possibilita a saída do carbono da estrutura martensítica, formando carbonetos e a diluição de austenita retida [9], que já ocorre na faixa de temperatura, entre 200°C e 300°C, como é possível verificar nos difratogramas [4;15].

Como os carbonetos apresentam um teor elevado de carbono, a fração volumétrica desta fase é muito baixa para ser diferenciada de ruídos usando o DRX.

Apesar das alterações da martensita, ela se manteve estabilizada. Essa estabilidade tem influência direta dos elementos de liga presentes no aço AISI 5160, sendo que Cr e Si atuam na medida dessa estabilização do constituinte, funcionando como barreiras para a difusão atômica, o que propicia inclusive a estabilidade dos carbonetos que não dissolvem formando cementita [4;15;16].

3 CONCLUSÃO

Pelo desenvolvimento do trabalho, com suas inerentes análises, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- Há uma diminuição da dureza média perante o aumento da temperatura de Revenimento, porém os valores não ultrapassaram 10HRc. Resultado que indica uma temperabilidade relativa boa para esse aço.

- Aumento nos valores de dureza Rockwell C, dobrou o valor, mesmo temperando o aço em óleo, quando se compara à condição do corpo de prova apenas normalizado.
- A temperatura de revenimento não exerceu grande influência nos perfis de microdureza obtidos para as diferentes situações de tratamento térmico.
- A estabilização da martensita nas temperaturas de revenimento utilizadas no trabalho, pode estar diretamente ligado à ação de elementos de liga estabilizadores como o Cri.
- A austenita retida está presente em amostras temperadas, e começa a ser diluída já no revenimento a 200°C.

Agradecimentos

Registram-se nossos agradecimentos às pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento do trabalho, sobretudo aquelas vinculadas ao Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG. Agradecimentos especiais são direcionados à professora Elaine Carballo Siqueira Corrêa, sempre disposta a colaborar.

REFERÊNCIAS

- 1 Albano LLM. Estudo comparativo das propriedades mecânicas de aço AISI 5160 submetidos à têmpera convencional e têmpera intensiva [dissertação]. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2012.
- 2 Castro, DBV et al. Influence of phosphorus content and quenching/tempering temperatures on fracture toughness and fatigue life of SAE 5160 steel. *Materials Research*. 2010;13(4):445-455.
- 3 Chiaverini V. Aços e ferros fundidos. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais; 2008.
- 4 Krauss G. Steels: Heat treatment and processing principles. Ohio: ASM International, 2000.
- 5 Lim NS, Bang CW, Das S, Jin HW, Ayer R, Park CG. Influence of tempering temperature on both the microstructural evolution and elemental distribution in AISI 4340 steels. *Springer: Metals and Materials International*. 2012;18(1):87-94.
- 6 Callister WDJr. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. Rio De Janeiro: LTC; 2006.
- 7 Speich GR, Leslie WC. Tempering of steel, *Metall. Trans.* 1972;3:1043–1054.
- 8 Bhadeshia HKDH; Honeycombe, RWK. Steels: microstructure and properties. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2006.
- 9 Li H-y, Hu J-d, Li J, Chen G, Sun X-j. Effect of tempering temperature on microstructure and mechanical properties of AISI 6150 steel. *J. Cent. South Univ.* 2013;(20):866–870.
- 10 Lima, DRS de. Desenvolvimento de tecnologia de forjamento de aço SAE 8640 destinado à produção de brocas de perfuração [dissertação]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, 2007. [citado 2018-06-05].
- 11 Salemi A, Abdollahzadeh A. The effect of tempering temperature on the mechanical properties and fracture morphology of a NiCrMoV steel. *Materials Characterization*, 2008, 59(4): 484-487.
- 12 Souza AS. Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos. São Paulo: Blucher, 1989.
- 13 *Metals Handbook. Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, V. 1, Ninth Edition, 1988
- 14 De-ning Z, Ying H, Wei Z, Xu-dong F. Influence of tempering process on mechanical properties of Cr13Ni4Mo supermartensitic stainless steel. *Journal of*

- Iron and Steel Research, International. 2010;17(8):50-54.
- 15 Reed-Hill RE. Princípios de metalurgia física. 2ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara dois; 1982.
 - 16 Totten, GE. Steel heat treatment: metallurgy and technologies. 2. ed. Portland: CRC, 2007.