

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

*Leonardo Viana Dias¹
Samuel Kleber Mota Sá²
Aderci de Freitas Filho³
Carlos Eduardo dos Santos⁴
Ivan José de Santana⁵*

Resumo

Dentre os diversos tratamentos térmicos, a Têmpera seguida de Revenimento constitui um grupo de importância fundamental para a indústria, não só devido às características inerentes aos processos, como também ao fato de, mediante o ajuste correto das variáveis, proporcionarem a adequação do material às condições e solicitações mecânicas exigidas geralmente com baixo custo relativo. No entanto, esses processamentos térmicos, ainda, geram uma série de desafios, principalmente em relação à determinação das variáveis mais adequadas para a obtenção de microestruturas e propriedades desejadas. O trabalho proposto busca avaliar a influência da temperatura de Revenimento na microestrutura e propriedades mecânicas do aço AISI 5160 temperado em óleo. Foram avaliadas cinco (05) temperaturas de Revenimento diferentes: 200, 250, 300, 350, 400 e 450°C em diferentes corpos de prova. A microestrutura foi caracterizada com a utilização de técnicas metalográficas e técnicas de difração de Raio X. As propriedades mecânicas obtidas em cada condição foram caracterizadas por meio de ensaios de dureza, ensaios de impacto e ensaios de tração. As superfícies das fraturas foram analisadas utilizando microscopia eletrônica de varredura. Os resultados obtidos permitem a construção de diferentes Curvas de Revenimento, assim como correlacionar diretamente as microestruturas obtidas com a temperatura de Revenimento.

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

EFFECT OF TEMPERING TEMPERATURE IN HARDNESS AND STRENGTH OF AN AISI 5060 STEEL

Abstract

Among the many available heat treatments, quenching followed by tempering has become a procedure of fundamental importance in industrial processes. Not only due to its inherent characteristics to these processes, but also to the fact that with the correct adjustment of variables it can provide the material suitability to the required mechanical properties, within expected cost, relatively low. However, these heat treatments are still source of great challenges, especially in the definition of the right variables to obtain microstructure and properties as desired. This paper has the purpose of evaluating the influence of the temperature of tempering in the microstructure and mechanical properties in a steel AISI 5060, quenched in oil, using five (5) different temperatures for evaluation: 200, 250, 300, 350, 400 and 450°C in different test specimens. With the samples were performed microstructures analysis using metallographic techniques and x-ray techniques. In addition, mechanical properties obtained through hardness, impact and tensile tests. Each cracked surface has also gone through analysis, using scanning electron microscopy.

Obtained results, allowed the construction of different tempering curves and connecting the microstructures observed with the tempering curve.

Keywords: AISI 5160, tempering temperature, tempering.

¹ *Engenheiro de Materiais, Professor, Departamento de Metalurgia, Instituto Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Ouro Branco-MG Brasil.*

² *Engenheiro de Materiais, Gerente de Projetos, Nematik Brasil, Betim, MG Brasil.*

³ *Engenheiro Mecânico, Mestre, Professor, DEMAT, CEFET MG, Belo Horizonte, MG Brasil.*

⁴ *Engenheiro Mecânico, Mestre, Professor, DEMAT, CEFET MG, Belo Horizonte, MG Brasil.*

⁵ *Engenheiro Mecânico, Doutor, Professor, DEMAT, CEFET MG, Belo Horizonte, MG Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O aço AISI 5150 é um aço baixa liga, contendo predominantemente manganês e cromo, como elementos de liga. O aço AISI 5160 é muito utilizado como matéria prima para confecção de molas, devido ao seu ótimo custo benefício, alcançando boas propriedades mediante tratamentos térmicos [1 e 2].

Os Tratamento térmico correspondem a um ciclo térmico a que são submetidos os materiais sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera do ambiente circunvizinho e, posteriormente, velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar as suas microestruturas e ou composição química superficial para melhor adequá-los situações específicas [1, 2 e 3].

O Revenimento é um tratamento térmico utilizado para conferir aos materiais temperados (com microestrutura martensítica) um aumento de ductilidade, ajuste de dureza e redução da fragilidade [1, 2 e 3]. Para alcançar esses resultados, o revenimento promove a segregação de carbono, formando martensita revenida, ferrita e carbonetos [1, 2, 3 e 4].

O aumento da temperatura de revenimento possibilita uma maior mobilidade atômica, facilitando, inicialmente, por exemplo, o movimento do carbono para um estado de menor energia. Esse aumento de temperaturas promove também a decomposição da austenita retida, a formação de carbonetos e até a recristalização, formando microestruturas convencionais de mecanismos difusivos [1, 2, 3 e 4].

Portanto, o Revenimento pode ser aplicado para aumentar a tenacidade, aliviar as tensões residuais surgidas durante o resfriamento e mudanças de fase que, em geral, não ocorrem de forma homogênea, no processo de têmpera, e ajustar a dureza. Entretanto, para alguns valores de temperatura, o revenimento pode ter efeito contrário, e diminuir a tenacidade de determinados materiais, fenômeno definido como fragilização pelo Revenimento [1, 2, 3 e 4].

Quando se processa o revenimento em temperaturas entre 230°C e 370°C em algumas classes de aços há uma diminuição de tenacidade [3 e 4]. 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 [1, 3 e 4].

Conforme a temperatura de revenimento vai aumentando, para aços ao carbono, verificam-se, em algumas situações, as seguintes transformações [1, 3 e 4].

- Entre 25° e 100°C, ocorre segregação ou uma redistribuição do carbono em direção a discordâncias, essa pequena precipitação localizada do carbono pouco afeta a dureza. O fenômeno é predominantemente em aços de alto carbono.
- Entre 100 e 250°C, às vezes chamado de primeiro estágio do revenido, ocorre precipitação de carboneto de ferro do tipo épsilon, de forma Fe_2-3C , reticulado hexagonal.
- Entre 200 e 300°C, às vezes chamado de segundo estágio, ocorre transformação de austenita retida em bainita.
- Entre 250 e 350°C, às vezes chamado de terceiro estágio, forma-se um carboneto metaestável, Fe_5C_2 , quando ocorre esta transformação em aços com alto teor de carbono, verifica-se ao microscópio uma microestrutura caracterizada por uma massa escura.

- Entre 400 e 600°C, ocorre uma recuperação de subestrutura de discordância, os aglomerados de Fe₃C passam a uma forma esferoidal, ficando mantida uma estrutura de ferrita fina acicular.
- Finalmente, entre 600 e 700°C, ocorre a recristalização e crescimento de grão, a cementita precipitada apresenta a forma nitidamente esferoidal e a ferrita apresenta forma equiaxial.

Alguns trabalhos foram conduzidos com o intuito de avaliar as diferentes propriedades e estruturas formadas em diferentes temperaturas de Revenimento.

Li [5], estudaram o efeito da temperatura de revenimento na microestrutura e nas propriedades mecânicas do aço AISI 6150. As temperaturas de Revenimento avaliadas foram: 200 e 600 °C, com tempo de encharque de 60 minutos. Foi observado que, com o aumento da temperatura de revenimento a martensita se transformou em ferrita e carbonetos. A Tensão limite de escoamento aumentou quando a temperatura de Revenimento passou de 200 para 300°C, assim como a ductilidade.

Lim[6] analisaram a influência de diferentes temperaturas de Revenimento na microestrutura do aço SAE 4340, Os resultados da microscopia eletrônica de transmissão mostraram uma variação na microestrutura e morfologia de carbonetos com a mudança na temperatura de Revenimento e que os átomos de carbono segregam ao longo dos contornos das ripas da austenita, o que é reduzido pelo aumento da difusividade inerente ao aumento da temperatura de Revenimento, gerando carbonetos.

Sayed [7] avaliaram o efeito da temperatura de revenimento na microestrutura e nas propriedades mecânicas de aços *dual phase*.

Salemi [8] Avaliaram a influência da temperatura de Revenimento na ductilidade e resistência à tração no aço NiCrMoV.

De-ning [9] investigaram a influência do Revenimento nas evoluções microestruturais e propriedades mecânicas do aço inoxidável supermartensítico Cr13Ni4Mo (SMSS). Após os tratamentos térmicos, a análise microestrutural foi realizada por microscopia eletrônica de varredura, as fases identificadas por difração de Raios-X e as propriedades mecânicas avaliadas por ensaios de dureza e de tração.

Outros autores podem ser citados, como: Gojic [10], Reguly [11], Albano[12], Castro[13], etc.

No entanto, resta muito a se investigar a respeito dos efeitos das temperaturas de Revenimento nas propriedades de diferentes materiais.

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. A superfície das fraturas foram analisadas por meio e microscopia eletrônica de varredura. As propriedades mecânicas obtidas em cada condição, foram caracterizadas por meio e ensaios de dureza Rockwell, ensaios de Charpy e ensaios de tração. Os resultados obtidos permitiram a construção das Curvas de Revenimento, em função da dureza, da energia absorvida em ensaios de impacto e resistência a tração, assim como correlacionar diretamente a variação das propriedades mecânicas com o aumento da temperatura de revenimento.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

Foram confeccionados 15 corpos de prova do aço AISI 5160 com seção transversal circular de 19,40mm por 40mm de comprimento, para a verificação da influência da temperatura de Revenimento na dureza final do material, Figura 01 (a), cuja composição química foi verificada com a utilização de um espectrômetro para análise de metais, Foundry Master Xpert.

Foram confeccionados, outros 21 corpos de prova para a verificação da influência do tempo de Revenimento na dureza final do material, Figura 01 (a).

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 01 (b)). 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.

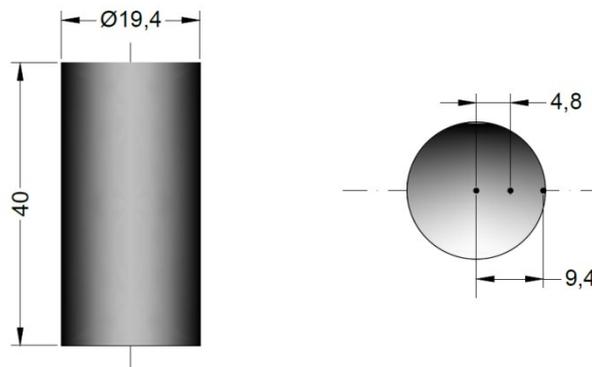


Figura 01. Corpos de prova utilizados para medição de dureza.

Foram usinados 21 corpos de prova, torno CNC Romi CENTUR 30D, para a verificação da influência da temperatura de Revenimento na resistência à tração do material, Figura 02, atendendo a norma NBR ISO 6892:2002 (SOUZA [14]).

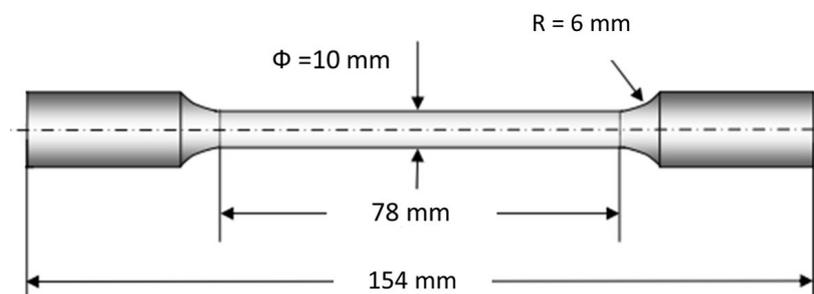


Figura 02. Dimensões dos Corpos de prova utilizados no ensaios de tração.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina universal com velocidade de deformação regulada para 0,45mm/min, característica de ensaios estáticos/semi-estático [14]. De posse dos valores de dureza foram calculados as médias e o desvio padrão para cada condição de tratamento. A partir dos dados obtidos construiu-se a curva de Revenimento.

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, cobertos por carvão vegetal para evitar oxidação e descarbonetação.

O tratamento térmico de normalização foi o primeiro a ser aplicado em todos os corpos de prova, para alívio de tensões residuais e uniformizar as propriedades mecânicas [1, 3 e 4].

Para todos os tratamentos térmicos de Normalização e Têmpera (em óleo) a temperatura utilizada foi de 900°C de modo a promover a completa austenitização do material [1, 3 e 4].

Para os corpos de prova destinados a avaliar a influência da temperatura de Revenimento os tratamentos térmicos foram realizados seguindo a Tabela 01, sendo que para cada condição, foram utilizados dois corpos de prova para os ensaios de dureza e três para os ensaios de tração.

Tabela 01. Condições Tratamentos Térmicos, temperatura de Revenimento.

Corpo de prova	Normalização (°C)	Resf.	Têmpera (°C)	Resf.	Revenimento (°C)	Resf.
T	900	Ar	900	Óleo	XXXX	XXXX
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.: T- Temperado; R200 – Revenimento a 200°C; Resf. – resfriamento.

Para os corpos de prova destinados a avaliar a influência do tempo de encharque no Revenimento os tratamentos térmicos foram realizados seguindo a Tabela 02, sendo que para cada condição, foram utilizados três corpos de prova e os tempos de encharque foram 30, 45 e 60min.

Tabela 02. Condições Tratamentos Térmicos tempo de encharque e temperatura.

Corpo de prova	Normalização (°C)	Resf.	Têmpera (°C)	Resf.	Revenimento (°C)	Resf.
T	900	Ar	900	Óleo	XXXX	XXXX
R 300	900	Ar	900	Óleo	200	Ar
R 325	900	Ar	900	Óleo	250	Ar
R 350	900	Ar	900	Óleo	300	Ar
R 375	900	Ar	900	Óleo	350	Ar
R 400	900	Ar	900	Óleo	400	Ar

As análises metalográficas foram realizadas nos corpos de prova seguindo os procedimentos a seguir: lixamento, polimento e ataque 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 realizados ensaios de difração de Raios-X. O equipamento utilizado foi o difratômetro da 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

2.2.1 Análise química

O resultado da análise química da amostra do aço utilizado no trabalho pode ser observada na Tabela 02 e, com base na designação COPANT, temos que, para o aços classificados como AISI 5150, o silício deve estar entre 0,15 e 0,30%, o manganês entre 0,70 e 0,90%, o cromo entre 0,70 e 0,90%, e o carbono, por fim, entre 0,48 e 0,53%. Portanto, o material avaliado só apresentou, segundo a norma, discrepância em relação ao teor de carbono, que foi ligeiramente superior, 13%.

Tabela 2. 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 temperaturas de Revenimento podem ser avaliados na Tabela 03.

Tabela 03. Valores de dureza em função da temperatura de Revenimento

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

Obs: cp – corpo de prova, N – normalizado, T – temperado, R200 – Revenimento a 200°C, Med 1 – medida 01.

Pode se observar que mesmo a têmpera em óleo possibilitou que o material dobrasse sua dureza em relação à condição normalizada. O Revenimento a 200°C possibilitou um sutil aumento de dureza em relação ao corpo de prova só temperado, o que pode ser atribuído à eliminação da austenita retida. Pode se observar, também, como era previsível para essa classe de aços [1, 3 e 4], a uma diminuição de dureza com o aumento da temperatura de Revenimento..

O aumento de dureza na Têmpera é decorrente, principalmente dos mecanismos de endurecimento da martensita e, e a diminuição, após Revenimento, da dissolução desta fase, metaestável, sobretudo em ferrita e carbonetos [3 e 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.

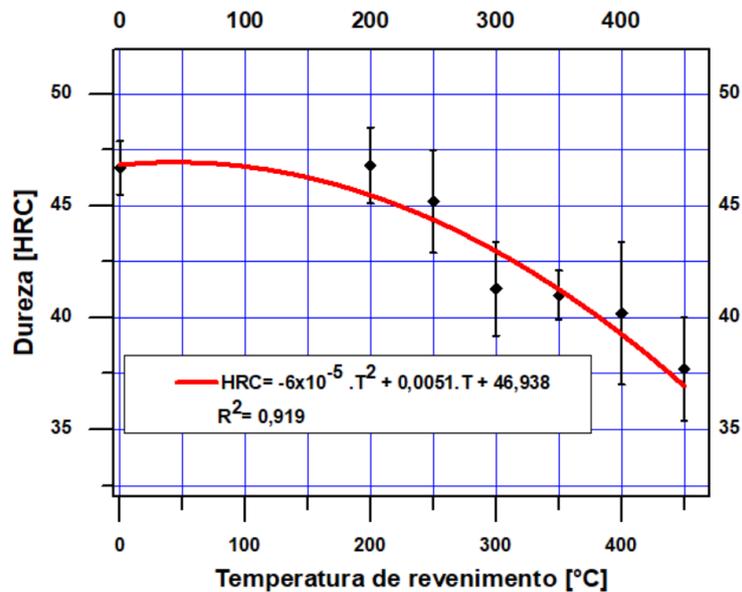


Figura 04. Curva de Revenimento do aço AISI 5250.

A curva encontrada possibilitou obter a curva de tendência e a equação (Equação 01), que representa a dureza em função da temperatura de Revenimento, com uma correlação de 0,919 (R^2), o que indica uma boa correlação.

$$HRC = -6E - 5T^2 + 0,005T + 46,938$$

Em que: HRC– Dureza e T - temperatura

Os resultados do ensaio de dureza Rockwell C nos diferentes corpos de prova com diferentes tempos de encharque e temperaturas de Revenimento podem ser avaliados na Tabela 03.

Tabela 03. Valores de dureza em função da temperatura de Revenimento

Cp	Dureza Média (HRC)			Dureza Média (HRC)	Desvio padrão (HRC)
	Tempo (30min)	Tempo (45min)	Tempo (60min)		
Temperado	45	49	46	46,7	1,7
Rev. 300°C	46	45	43	44,8	1,2
Rev. 325°C	47	43	46	45,3	1,7
Rev. 350°C	47	43	46	45,6	1,7
Rev. 375°C	46	45	40	43,3	2,5
Rev. 400°C	42	39	40	40,3	1,0

A Figura 05 apresenta a curva de Revenimento obtida pelos valores médios de dureza dos corpos de prova com diferentes tempos de encharque e temperaturas de Revenimento.

Observando os resultados, percebe-se que o tempo de encharque, no intervalo avaliado não alterou significativamente os resultados, portanto, a princípio o indicado seria utilizar o menor possível, em função da diminuição dos custos operacionais.

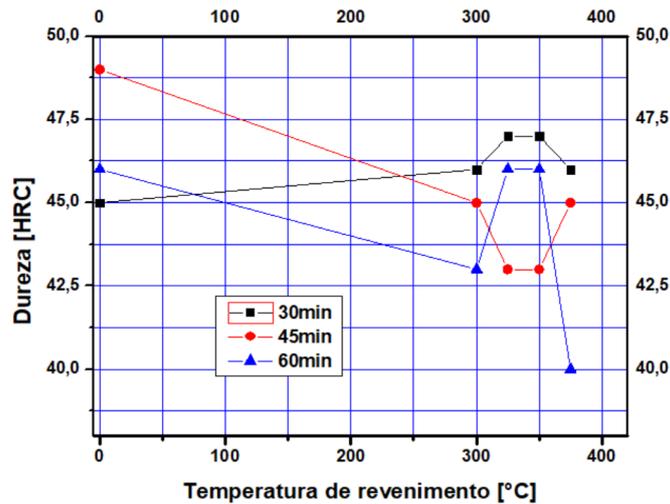


Figura 05. Curva de Revenimento do aço AISI 5250.

2.2.1 Ensaio de Tração

Tabela 04. Dados obtidos no ensaio Charpy para corpos de prova Temperado, e Temperado e Revenido a 200, 250, 300, 350, 400 e 450°C

Condição	Temperado			Revenido 200°C			Revenido 250°C			Revenido 300°C		
CP	01	02	03	01	02	03	01	02	03	01	02	03
Resistência a tração (Mpa)	1374	1120	996	1405	1342	1375	1776	2146	1969	1817	2085	1714
Média (Mpa)	1163			1374			1964			1872		
Desvio padrão (Mpa)	111			31			185			191		

Condição	Revenido 350°C			Revenido 400°C			Revenido 450°C		
CP	01	02	03	01	02	03	01	02	03
Resistência a tração (Mpa)	1857	1927	1817	1755	1774	1734	1561	1585	1542
Média (Mpa)	1867			1754			1563		
Desvio padrão (Mpa)	55			20			22		

A Figura 04 apresenta a curva de Revenimento obtida pelos valores médios de resistência dos corpos de prova com os seus respectivos valores de desvio padrão. Pode se observar, novamente que o Revenimento a 200°C possibilitou um sutil aumento de resistência em relação ao corpo de prova só temperado, o que pode ser atribuído, principalmente à eliminação da austenita retida, nível de tensão residual e a presença de carbonetos frágeis [3 e 4].

Pode se observar, também, que o pico máximo de resistência ocorre na temperatura de 250°C.

A partir da temperatura de revenimento de 250°C, é possível observar aumento mais expressivo na resistência a tração, consequente do alívio das tensões residuais e mudanças microestruturais.

A partir do revenimento de 400°C é possível observar tendência de queda na resistência devido à redução na fração volumétrica de martensita presente [3 e 4].

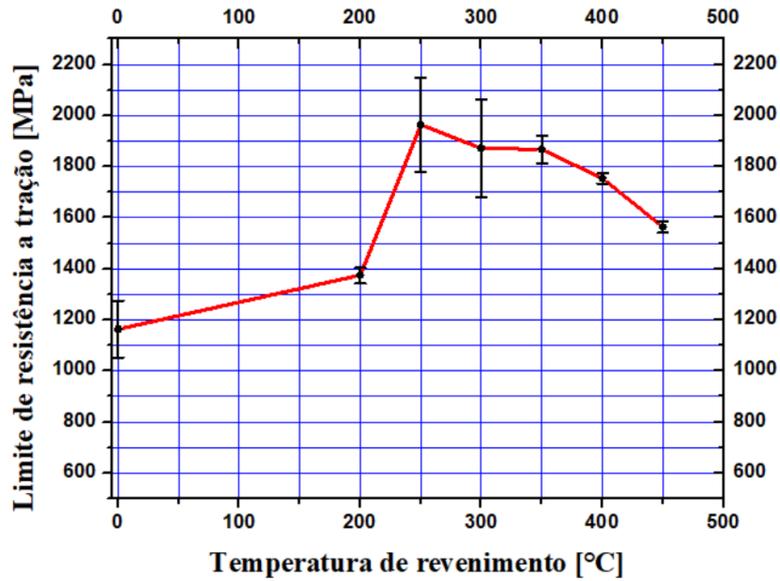


Figura 04. Curva de Revenimento obtida a partir dos ensaios de tração.

2.2.4 Análises Microestruturais

A Figura 06 exibe as fotos microestruturas obtidas do aço AISI 5160 em diferentes condições de tratamento térmico.

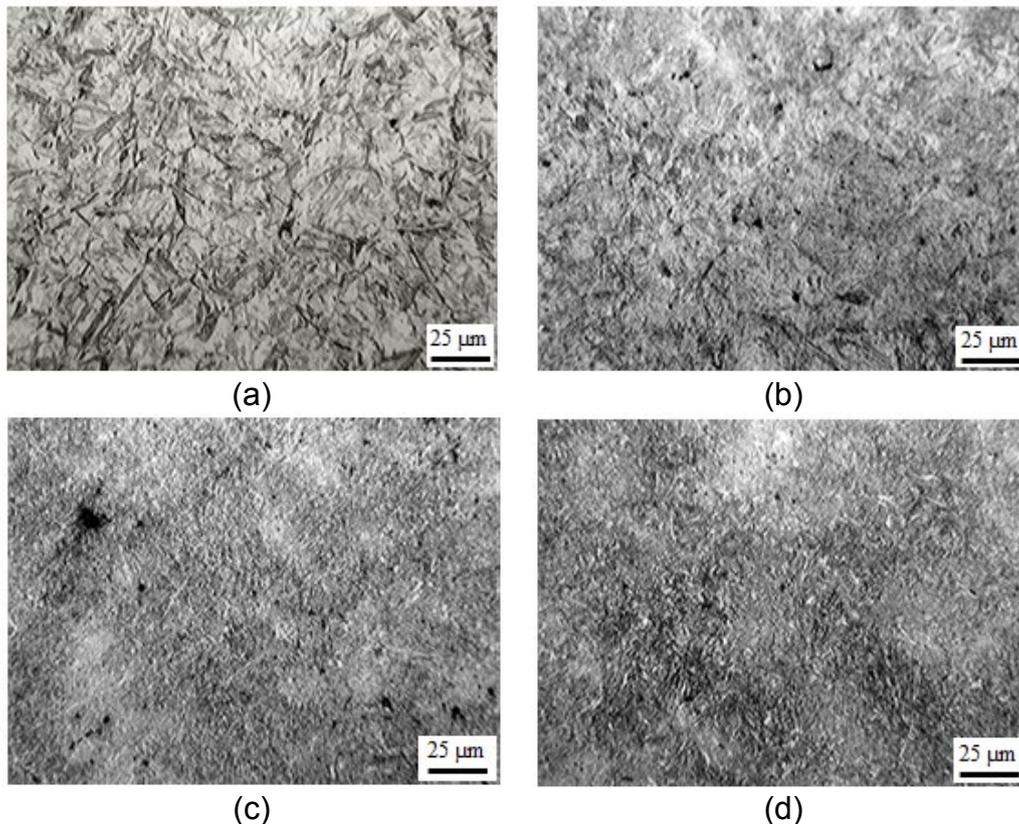


Figura 06. Micrografia dos corpos de prova a) Temperada, b) R200 c) R300 d) R450.

Percebe-se pela análise das microestruturas, que o aço temperado (a), tem presente uma microestrutura em forma de ripas, característica da martensita, justificando sua fragilidade e menor absorção de energia. Com o aumento da temperatura de

revenimento, acontece o aumento da difusão de carbonetos, o que é característico da martensita revenida. Esses carbonetos mais difusos estão mais uniformemente espalhados pelo material, possibilitando a formação dos *microvoids* e a fratura menos frágil observada principalmente no revenimento a 450°C [3 e 4]

2.2.4 DRX

As Figura 06, exibe as imagens dos difratogramas obtidos para as diferentes temperaturas de revenimento.

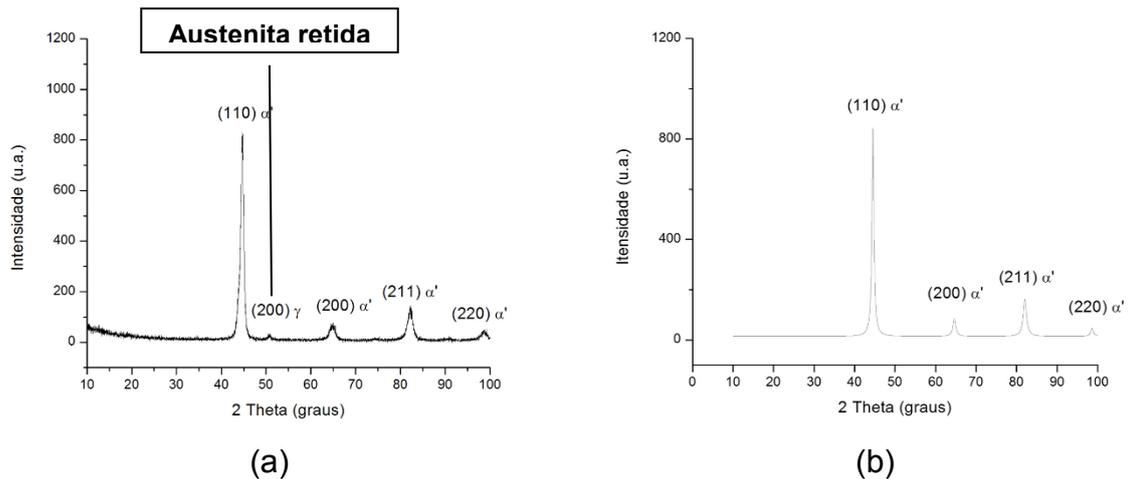


Figura 6. Difratogramas para os materiais (a) Temperado e (b) Revenido a 200°C.

A partir da identificação das fases presentes, é possível inferir que, realmente houve uma eliminação da austenita retida (γ), quando se aplicou o Revenimento de 200°C, conseqüentemente contribuindo para o aumento de dureza e resistência, como revelado anteriormente.

Como os parâmetros de rede da ferrita (CCC) e martensita (TCC) são os mesmos, os picos se sobrepõe tornando muito difícil o cálculo da fração volumétrica dessas fases, a partir desta técnica, porém, é possível inferir que há uma redução da fração de martensita, com conseqüente aumento no teor de ferrita, a partir das análises mecânicas feitas no material, que indica uma queda de dureza e resistência, como aumento da temperatura de revenimento [3 e 4].

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 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.
- A resistência a tração é beneficiada pelo revenimento, o que pode ser atribuído, principalmente à eliminação da austenita retida, nível de tensão residual e a presença de carbonetos frágeis já que há um alívio de tensões residuais e mudanças microestruturais, decorrentes do processo.

Agradecimentos

Agradecimentos são direcionados aos responsáveis pelo Departamento de Engenharia de Materiais e Departamento de Engenharia de Produção Civil do CEFET-MG, e para os responsáveis pelos laboratórios do Centro de Desenvolvimento Tecnológico-CDTN (MG).

REFERÊNCIAS

- 1 Chiaverini V. Aços e ferros fundidos. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais; 2008.
- 2 Callister WDJr. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. Rio De Janeiro: LTC; 2006.
- 3 Krauss G. Steels: Heat treatment and processing principles. Ohio: ASM International, 2000.
- 4 Reed-Hill RE. Princípios de metalurgia física. 2ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara dois; 1982.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 Sayed AA, Kheirandish S. Effect of the tempering temperature on the microstructure and mechanical properties of dual phase steels. Materials Science and Engineering A. 2012; 532(1):21–25.
- 8 Salemi A, Abdollah-zadeh A. The effect of tempering temperature on the mechanical properties and fracture morphology of a NiCrMoV steel. Materials Characterization. 2008;59(4):484-487.
- 9 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.
- 10 Gojic M, Kosec L, Matkovic P. The effect of tempering temperature on mechanical properties and microstructure of low alloy Cr and CrMo steel. Journal of Materials Science. 1998; (33):395-403.
- 11 Reguly A, Stohaecker TR, Krauss G, Matlock D. Quench embrittlement of hardened 5160 steel as a function of austenitizing temperature. Metallurgical and Materials Transactions A. 2004;(35):153-162.
- 12 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.
- 13 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.
- 14 Souza AS. Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos. São Paulo: Blucher, 1989.