

EFEITOS DA TEMPERATURA DE REVENIMENTO NA ENERGIA ABSORVIDA NO IMPACTO E NA DUREZA DO AÇO AISI 5160*

Leonardo Viana Dias¹
Aderci de Freitas Filho³
Ivan José de Santana⁵

Resumo

Dentre os tratamentos térmicos, a Têmpera e o Revenimento constituem um grupo fundamental para a indústria, tanto por suas características, quanto por proporcionarem a adequação do material às condições e solicitações mecânicas exigidas com ajuste de variáveis, e baixo custo. Entretanto, estes processos ainda possuem desafios, principalmente em relação à influência de variáveis na 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 diferentes temperaturas de Revenimento: 200, 250, 300, 350, 400 e 450°C em corpos de prova temperados no óleo. A microestrutura foi caracterizada por metalografia. As propriedades mecânicas foram avaliadas por ensaio de dureza Rockwell e ensaio Charpy. As superfícies das fraturas foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura. Os resultados obtidos permitiram a construção das Curvas de Revenimento, assim como correlacionar a diminuição da dureza e o aumento da tenacidade com o aumento da temperatura de Revenimento. Verificou-se uma variação brusca de energia absorvida no impacto com o aumento da temperatura de Revenimento, principalmente a 400 e 450°C, possibilitando correlacionar este comportamento com a ocorrência de fratura dúctil.

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

EFFECTS OF TEMPERING TEMPERATURE IN THE IMPACT ABSORBED ENERGY AND HARDNESS OF AISI 5160 STEEL

Abstract

Among the heat treatments, quenching and tempering is a fundamental group for the industry, due its characteristics, and also due 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 processes 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 microstructure and mechanical properties obtained. Five different tempering temperatures were evaluated: 200, 250, 300, 350, 400, 450°C, in oil-tempered test specimens. The microstructure was characterized by metallography. The mechanical properties were characterized by Rockwell hardness test e Charpy test. The fracture surfaces were analyzed by sweep electronic microscope. The results allowed the construction of a tempering graphic, and to correlate the hardness decrease and toughness increase with the increase of tempering temperature. It was verified a great variation of impact absorbed energy with the increase of tempering temperature, mainly at 400 and 450°C, allowing to correlate this behavior with a ductile fracture.

Keywords: AISI 5160, Tempering temperature, Toughness.

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

² *Engenheiro Mecânico, Mestre, Professor, DEMAT, CEFET MG, Belo Horizonte, MG Brasil*

³ *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.

Como dito o objetivo do revenimento é aumentar a tenacidade, aliviar astensões 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 do material, fenômeno definido como fragilização pelo revenimento.

Quando se processa o revenimento em temperaturas entre 230°C e 370°C em algumas classes de aços há uma diminuição de tenacidade, [3;4]. Esta redução de tenacidade pode ou não ser atribuída a 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 de alumínio [4].

Conforme a temperatura de revenimento vai aumentando, para aços ao carbono, verificam-se, em algumas situações, as seguintes transformações [3;4;6].

- 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 Fe_3C 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.

Muitos estudos são feitos avaliando as diferentes propriedades e estruturas formadas em diferentes temperaturas de Revenimento. Li *et al* [9] estudou os efeitos da temperatura de Revenimento na microestrutura e propriedades do aço AISI 6150. Já Limet *a* [11] 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* [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 superfícies das fraturas foram analisadas por meio de microscopia eletrônica de varredura. As propriedades mecânicas obtidas em cada condição, foram caracterizadas por meio de ensaios de dureza Rockwell e ensaios de Charpy. Os resultados obtidos permitiram a construção das Curvas de Revenimento, em função da dureza e da energia absorvida em ensaios de impacto, 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, formando carbonetos, diminuindo o estado alto de tensões dessa microestrutura.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

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

Para as análises micrográficas e de dureza, foram obtidos 14 corpos de prova com dimensões de acordo com a Figura 01a. Já para o ensaio Charpy foram confeccionados 35 corpos de prova com seção quadrática de 10mm, comprimento de 55mm e entalhe a 45°, tal qual representado na Figura 01b [12]. Esses corpos de prova foram tratados termicamente como descrito na Tabela 01, sendo que em cada condição, foram utilizados 02 corpos de prova para os ensaios de dureza e 05 corpos de prova para os ensaios de impacto (exceto na amostra somente normalizada que exigiu apenas 1 corpo de prova)

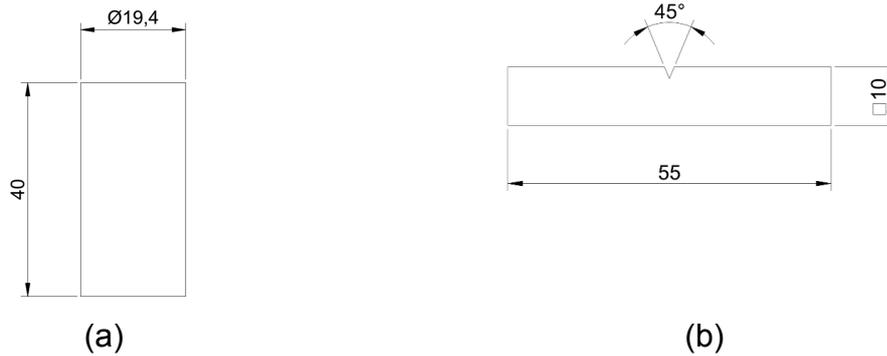


Figura 01. Dimensão dos corpos de prova utilizados.

Tabela 1. Condições Tratamentos Térmicos.

Amostra	Normalização (°C)	Resf.	Têmpera (°C)	Resf.	Revenimento (°C)	Resf.
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

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 completa austenitização do aço para os tratamentos[4].

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

Os ensaios de dureza Rockwell C foram realizados utilizando umdurômetro IGV do modelo RM401/A, utilizando 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). Com os 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.

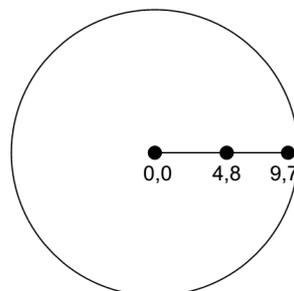


Figura 02. Representação esquemática dos pontos de obtenção dos valores de dureza Rockwell C, com a distância em milímetros.

Foram realizados 05 ensaios de Charpy para cada temperatura de revenimento à temperatura ambiente(25°C). Realizou-se a preparação do equipamento, ensaio em

vazio (sem corpo de prova), para a obtenção da perda de energia por atrito, valor que seria descontado dos resultados obtidos[12]. As superfícies das fraturas foram analisadas com a utilização de microscópio eletrônica de varredura (MEV) da marca Shimadzu, com ampliações de 100 e 500 vezes.

2.2 Resultados e Discussão

O resultado da análise química da amostra do aço utilizado no trabalho pode ser observada na Tabela 2 e, segundo METALS HANDBOOK [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
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

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 [4;9].

A Figura 03 apresenta a curva de revenimento obtida pelos valores médios de dureza dos corpos de prova com os seus respectivos valores de desvio padrão.

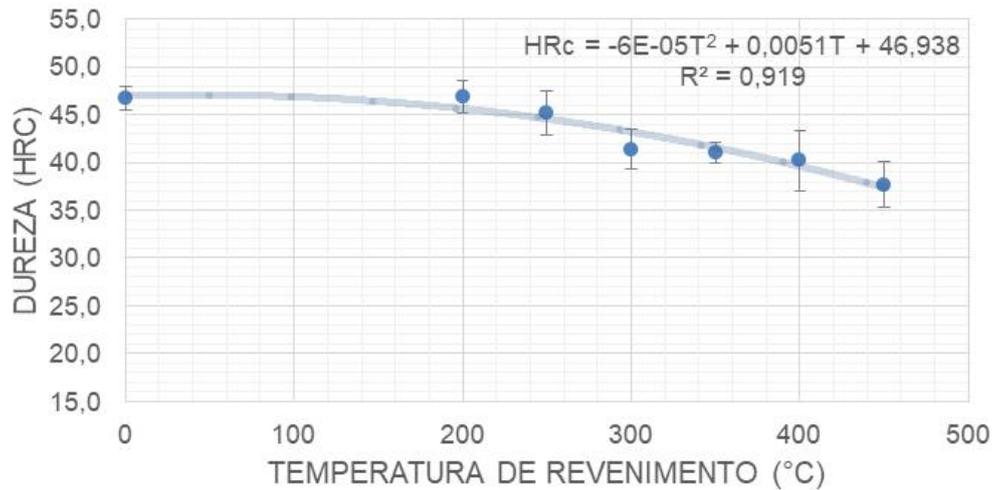


Figura 03. Curva de Revenimento do aço AISI 5250.

A equação obtida 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 Ensaio de Impacto

Os resultados do ensaio de Charpy nos diferentes corpos de prova com diferentes tratamentos térmicos consolidados estão representados na Tabela 04 e 05.

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	04	05	01	02	03	04	05	01	02	03	04	05	01	02	03	04	05
Energia absorvida (J)	3,2	2,6	2,5	2,2	3,1	4,8	4,6	4,8	4,6	4,4	5,6	4,1	4,6	4,6	4,6	5,6	5,1	5,7	4,8	5,0
Média	2,7					4,6					4,7					5,2				
Desvio padrão	0,4					0,2					0,5					0,4				

Tabela 05. Dados obtidos no ensaio Charpy para corpos de prova Temperado, e Temperado e Revenido a 200, 250, 300, 350, 400 e 450°C

Condição	Revenido 350°C					Revenido 400°C					Revenido 450°C				
CP	01	03	04	05	01	02	03	04	05	01	02	03	04	05	01
Energia absorvida (J)	6,3	6,4	7,4	6,6	6,5	21	16	18	14	11	29	31	26	27	26
Média	6,6					15,6					27,7				
Desvio padrão	0,4					3,8					2,2				

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. É possível observar o gradual aumento da energia absorvida pelos corpos de prova com o aumento da temperatura de Revenimento, sendo que, na condição temperada e temperada e revenida a 200, 250, 300 e 350°C a dispersão é muito baixa, com pouca energia absorvida, mostrando o caráter frágil das respectivas condições.

O Revenimento a 400°C, devido à maior valor de desvio padrão, pode ser considerado como o ponto de virada da fratura frágil/dúctil na temperatura ambiente, em que a energia absorvida foi maior que a dos ensaios predecessores. Já a condição de Revenimento a 450°C, apresentou uma diminuição do valor de desvio padrão em relação ao tratamento anterior, o que pode indicar uma convergência do caráter da fratura, agora dúctil, com alto valor de energia absorvida.

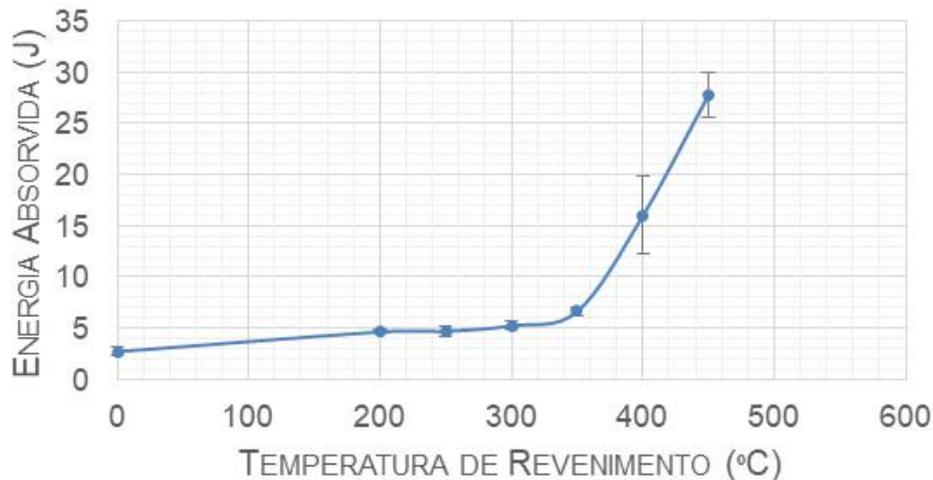


Figura 04. Curva de Revenimento do aço AISI 5250.

Em relação ao material somente temperado, os revenimentos feitos às temperaturas de 400 e 450°C tiveram um aumento percentual de energia absorvida de 474,26% e 914,65% respectivamente, sendo um resultado bastante expressivo de ganho de tenacidade. Entre a condição de Revenimento de 350°C e 400°C, observa-se o maior salto de energia absorvida, aumentando em 135,24%. Pode-se inferir, portanto, que nessa temperatura de Revenimento, o aço AISI 5160 tem sua transição dúctil/frágil. Essa melhor performance pode ser atribuída ao aumento da temperatura de Revenimento e ao aumento expressivo na formação de micro deformações na superfície de fratura (micro *voids* ou *dimples*) que absorvem grande quantidade de energia [15;16].

2.2.3 Análise da Fratura no Impacto

A Figura 05 apresenta as fotos da superfície de fratura dos corpos de prova, nas submetidos às diferentes temperaturas de Revenimento. Na Figura 5(a) é possível perceber a homogeneidade da região fraturada, em uma imagem mais clara, caracterizando uma fratura bastante frágil. Esse padrão de fratura se mantém nas Figuras 5(b), 5(c), 5(d) e 5(e), com pequenas mudanças no visual, sendo que em 5(b) e em 5(c) é possível se observar uma faixa mais escura, caracterizando irregularidade na estrutura, podendo ser uma pequena mudança de direção da fratura. As Figuras 5(f) e 5(g), por outro lado, confirmam o aumento que teve os valores de energia absorvida para os corpos de prova revenidos a 400° e 450°C respectivamente. Na figura 5(f), nota se uma mudança considerável de profundidade na seção da fratura, indicando a ocorrência de uma maior deformação plástica antes do rompimento do corpo de prova, o que também é percebido para a imagem 5(g), porém, com maior intensidade.

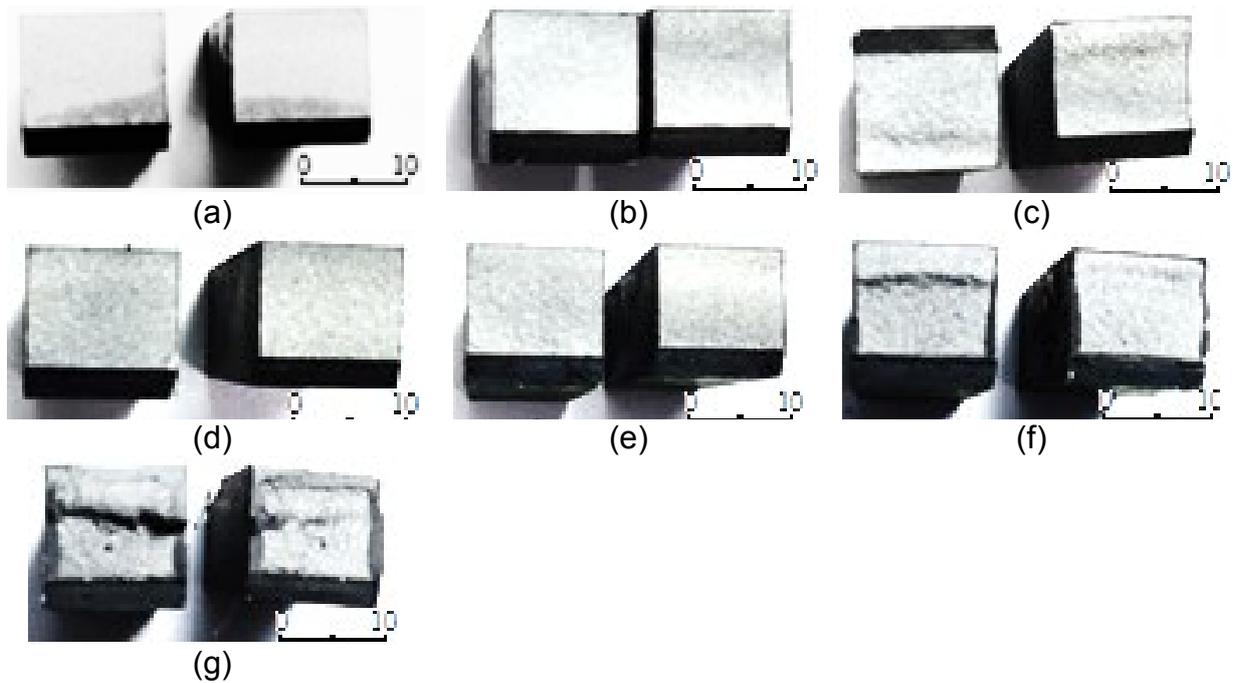


Figura 5. Fraturas para cada tratamento. (a) Temperado, (b) Revenido a 200°C, (c) Revenido a 250°C, (d) Revenido a 300°C, (e) Revenido a 350°C, (f) Revenido a 400°C e (g) Revenido a 450°C.

2.2.4 Análises Microestruturais

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

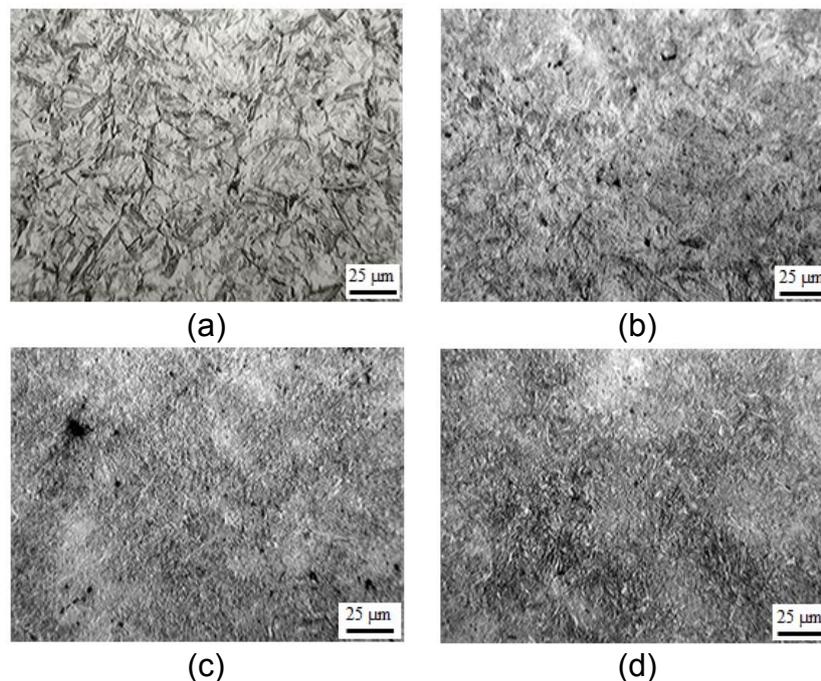


Figura 06. Micrografia dos corpos de prova a) Temperada, b) R200 c) R300 d) R450.

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 dúctil observada principalmente no revenimento a 450°C[4;17].

2.2.4 Análises da análise da superfície de fratura MEV

A Figura 07 exibe as superfícies de fratura obtidas por MEV do aço AISI 5160 em diferentes condições de tratamento térmico.

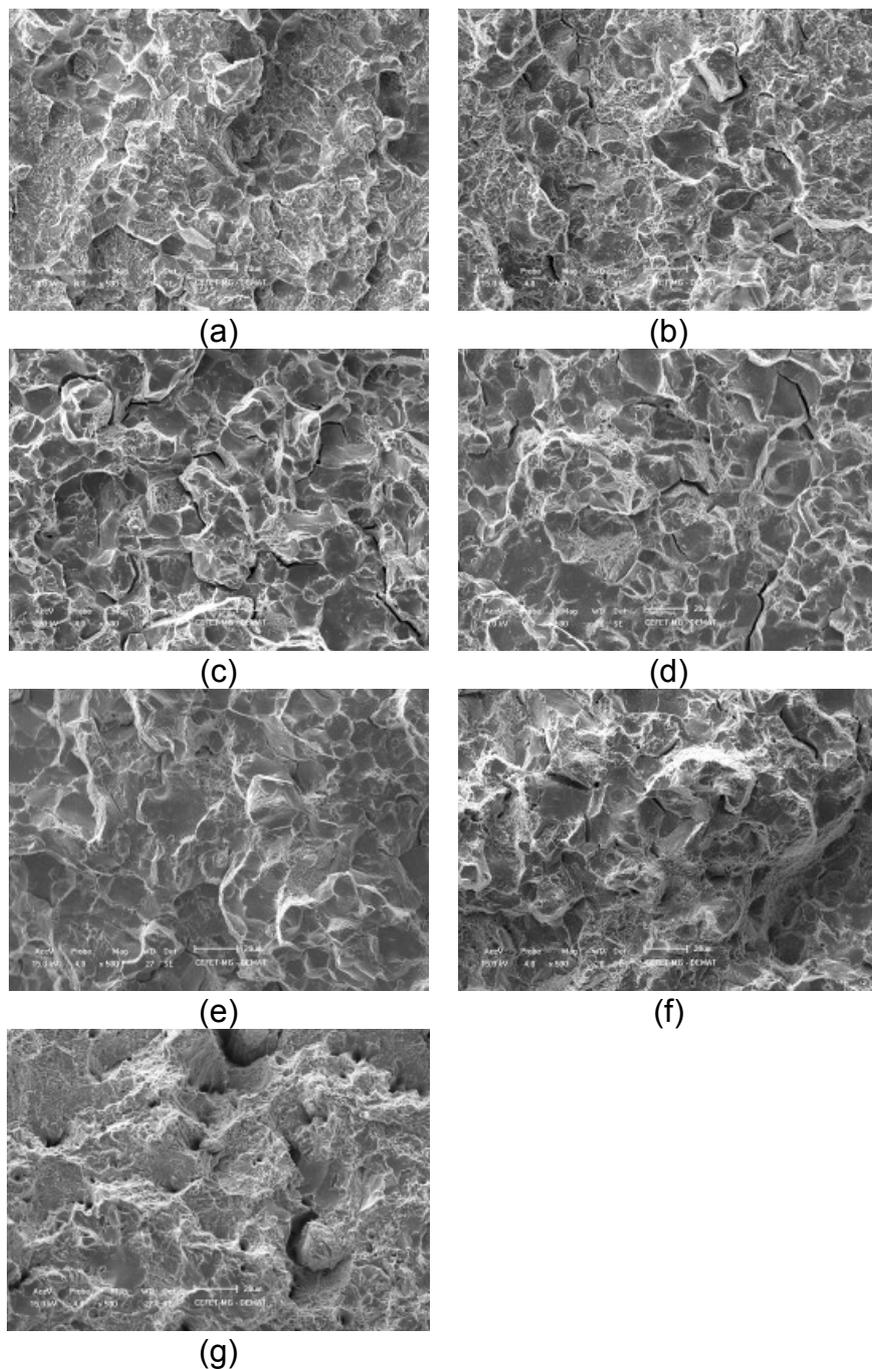


Figura 6.Imagens da fratura das amostras obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura:06(a) Temperado06(b) Revenido a 200°C, 06(c) Revenido a 250°C, 06(d) Revenido a 300°C, 06(e) Revenido a 350°C, 06(f) Revenido a 400°Ce 06(g) Revenido a 450°C.

A evolução do mecanismo de fratura é evidente nas imagens obtidas com o MEV, começando nas imagens tanto 06(a), quanto em 06(b), a estrutura da região fratura se mantém com maior uniformidade. Fato que é compreendido quando se observa a fratura exibindo planos de clivagens típicas de uma estrutura frágil (martensita)[16]. É possível perceber regiões de fratura frágil intergranular, que se justifica pela da presença de carbonetos na microestrutura, como relatado por REGULY *et al* [18]. Com o aumento da temperatura de revenimento, os carbonetos precipitados tendem a ocupar o contorno da austenita prévia [5], o que pode justificar o aumento das regiões de fratura frágil intergranular Figura 06c e 06d. Em 06(e) apareceu maior heterogeneidade topográfica, indicando maior dissipação da energia, e em 06(f), o aspecto dos grãos perdeu nitidez, indicando maior deformação plástica, além da heterogeneidade da fratura como um todo, e dos riscos escuros que podem caracterizar uma propagação de trinca para o meio da peça, além de algumas calotas escuras, os *dimples ou voids*[16], que segundo GOJIC *et al*[19], podem ser formados em regiões onde tinham carbonetos pequenos. Por fim, na imagem (g), o aspecto da fratura é completamente diferente. Sua nucleação pode ser explicada por formação de *microvoids* formados por carbonetos não dissolvidos [4]. É possível visualizar também os *dimples*, que podem ser formados mediante embotamento da fratura.

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 difusão do carbono da martensita com o aumento de temperatura de revenimento influenciou diretamente nas características da fratura dos corpos de prova Charpy.
- As temperaturas de Revenimento de 350 e 400°C propiciaram o mesmo valor de dureza aos corpos de prova, porém em relação a energia absorvida no ensaio de impacto a segunda situação levou o material a absorver 15,6J enquanto a primeira situação 6,6J. Resultado que não deixa dúvidas que a entre estas duas temperaturas de Revenimento a de 400°C é a mais indicada.
- A temperatura de Revenimento de 450°C possibilitou um aumento de 917,65% de energia absorvida em relação ao material somente temperado. Deixando claro a importância do Revenimento após a Têmpera do material.
- Observação das superfícies de fratura possibilita a análise do comportamento do material, que quando possui fratura intergranular, com regularidade topográfica, pode ser definido como frágil e que muda de forma gradativa, até a fratura dúctil, com presença “*dimples*” e topografia irregular.

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. Mat. Res. São Carlos. 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 CallisterWDJr. 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.
- 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. Ensaios 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 Collins JA. Failure of materials in mechanical design: Analysis, Prediction, Prevention. New York: John Wiley & sons, 1993.
- 16 Dowling, NE. Mechanical Behavior of materials. New Jersey: Pearson Prentice Hall. 2007.
- 17 Reed-Hill RE. Princípios de metalurgia física. 2ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara dois; 1982.
- 18 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.
- 19 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.