

TENACIDADE AO IMPACTO DO AÇO SAE 8640 TEMPERADO E REVENIDO EM DIFERENTES TEMPERATURAS

TENACITY TO THE IMPACT OF THE HARDENED AND TEMPERED SAE 8640 STEEL IN DIFFERENT TEMPERATURES

Eduardo Mühl Fabris¹; Lucas Dalla Maria²; Willian Haupt³

¹Engenheiro Mecânico, Universidade de Passo Fundo. E-mail: eduardomuhlfabris@gmail.com

²Mestre em Engenharia Mecânica, Pesquisador do Laboratório de Inovação Tecnológica da Universidade de Passo Fundo. E-mail: lucasdallamaria@gmail.com

³Doutor em Engenharia de Minas, Prof. da Universidade de Passo Fundo. E-mail: williamhaupt@upf.br

RESUMO

A energia que um material absorve durante a sua fratura é um parâmetro de grande importância nos aços. Em grande parte das aplicações no mercado busca-se um aço que seja resistente e ao mesmo tempo tenaz para que assim, sejam evitáveis falhas frágeis catastróficas. Deste modo, o tratamento térmico de têmpera e revenimento é uma das alternativas, sendo aplicado de maneira a modificar as propriedades mecânicas de uma grande variedade de aços. Assim, é importante que as influências de diferentes condições de tratamentos térmicos aplicadas em uma mesma liga metálica sejam estudadas, avaliando-se as propriedades mecânicas e microestruturais resultantes. Este trabalho teve o objetivo de avaliar o comportamento da tenacidade do aço SAE 8640, para isso foram confeccionados quinze corpos de prova, sendo estes temperados igualmente, e separados em três categorias de revenimento (200°C, 400°C e 600°C). Foram realizadas análise metalográficas para a obtenção das imagens microestruturais, assim como análises por Estereomicroscópio e Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para obtenção das imagens das superfícies fraturadas, juntamente com um teste de dureza e um teste de ensaio Charpy respeitando a norma ASTM E-23, após as análises foi possível concluir que o material tratado e revenido a 600°C teve sua dureza diminuída e sua tenacidade elevada juntamente com um comportamento mais dúctil quando comparado ao material revenido a 200°C e 400°C que mantiveram suas características semelhantes.

Palavras-chave: Charpy; Têmpera; Dureza; Aço; Resistência.

ABSTRACT

The energy that a material absorbs during its fracture is a very important parameter in the steels. In most parts of the applications in the Market, it is searched a kind of steel that can be resistant and in the same time can have tenacity so in that way, they can be able to avoid catastrophic and fragile failures. On this way, the heat treatment of hardening and tempering is one of the alternatives to be applied for changing the mechanical properties of a big variety of steels. Like this, it is very important that the influences of different conditions of heat treatment that are applied in the same alloy be studied, evaluating the mechanical and microstructural properties which were obtained after the heat treatment. This article has the aim to evaluate the behavior of tenacity of SAE 8640 steel, for that, fifteen pieces of tests were made, they were submitted to the same hardening process and separated in three categories of tempering process (200°C, 400°C e 600°C). It was performed metallographic analysis to get the images of the microstructure as stereomicroscope and electron microscope scanning to get the images of fractured surface together with a hardness test and rehearsal Charpy respecting the ASTM E-23 standard, after the analysis, it was possible to conclude that the material which was submitted to 600°C heat treatment had its hardness decreased and its tenacity increased together with a more ductile behavior than when it was submitted to the materials to 200°C e 400°C which kept similar characteristics.

Keywords: Charpy; Tempering; Hardness; Steel; Resistance.

1. INTRODUÇÃO

Durante muitos séculos, a confecção do ferro e suas ligas foi realizada de forma totalmente artesanal, a qual envolvia inúmeros processos de redução associados a trabalhos mecânicos com algum controle das condições de aquecimento e resfriamento. Apenas com a percepção de que adições significativas de carbono reduziam o ponto de fusão das ligas desenvolvidas naquelas épocas, é que possibilitou-se a produção em escala industrial do metal rico em ferro em meados do século XVII (COLPAERT, 2008).

O estudo aprofundado em relação aos metais, não apenas sobre a fratura, mas também em relação com as propriedades mecânicas foi aprofundado durante a Segunda Guerra Mundial quando inúmeros navios misteriosamente se partiram ao meio. Os acidentes chamaram atenção para o fato de que aços normalmente dúcteis podiam ter comportamentos frágeis sob determinadas condições, assim, um vasto programa de pesquisa foi desenvolvido com o intuito de apontar as causas desses acontecimentos para que, além de evita-los, fosse possível agregar o conhecimento a área da engenharia de materiais ferrosos (DIETER, 1981).

O aço SAE 8640 é um aço de boa temperabilidade e elevada resistência, os tratamentos térmicos aplicados ao aço, como recozimento, normalização, tempera e revenido apresentam particularidades, o recozimento com a elevação do tamanho de grão, a normalização trazendo a uniformização da estrutura, a têmpera aumentando a dureza, e o revenimento restabelecendo a ductilidade do material (MELLO DE FREITAS et al., 2016)

Com o aumento da ductilidade do aço devido ao revenimento, a tenacidade tende a aumentar, uma vez que o material sendo mais “mole” tem a capacidade de absorver mais energia durante a fratura, por outro lado quando somente temperado, devido a microestrutura martensítica, a tenacidade tende a permanecer baixa. Desta maneira o estudo presente neste trabalho se baseou por meio de ensaios Charpy em determinar a tenacidade do aço SAE 8640. O estudo também visou mostrar que os parâmetros de um processo de revenimento também são fundamentalmente influenciadores na tenacidade a fratura do aço SAE 8640.

2. AÇO SAE 8640

O aço SAE 8640 foi escolhido para fins de estudo, pois se caracteriza como um aço que possui ampla utilidade em diferentes áreas, sendo considerado um aço muito versátil e com ótimo desempenho. Segundo ASM Handbook (1990) é utilizado para fazer engrenagens, pinhões, pinos e ferramentas manuais forjadas.

Aços de alta resistência e baixa liga, como o SAE 8640, possuem a vantagem de serem igualmente equivalentes no quesito resistência (pela presença dos elementos de liga, entre outros fatores). Assim, também é viável a aplicação desses materiais onde a redução de peso é um requisito necessário para o projeto.

Chiaverini (1996) afirma que a utilização de estruturas e componentes cada vez maiores leva aos engenheiros a desenvolverem novas ligas ferrosas, as quais possuem uma maior resistência mecânica, assim evitando-se o uso de estruturas extremamente pesadas.

A composição do aço SAE 8640 constitui-se de um teor médio de carbono associado a um baixo teor de elementos de liga.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para investigar a tenacidade do aço SAE 8640 realizou-se o ensaio Charpy, no qual foram obtidos os valores da tenacidade dos corpos de prova, já as imagens das superfícies de fratura foram obtidas utilizando-se um Estereomicroscópio e o procedimento fractográfico foi realizado pelo Microscópio Eletrônico de Varredura, juntamente com as imagens microestruturais geradas pelo tratamento térmico que foram obtidas por meio do processo metalográfico convencional.

O diagrama mostrado na Figura 1 mostra a sequência dos procedimentos.

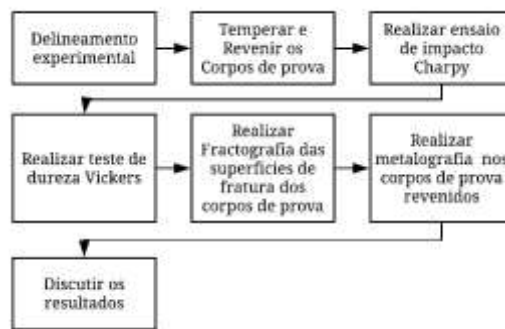


Figura 1: Etapas do procedimento experimental. Fonte: O autor (2018).

3.1 Materiais e equipamentos utilizados neste procedimento

Nos itens 3.1.1; 3.1.2; 3.1.3; 3.1.4; 3.1.5 e 3.1.6 estão apresentados os materiais e equipamentos utilizados para a execução deste procedimento experimental.

3.1.1 Material para análise

O material para análise foi fornecido pela Universidade de Passo Fundo e trata-se de uma barra de diâmetro 25,5 milímetros fabricada em aço SAE 8640. Para comprovar autenticidade do material foi extraída a composição química utilizando-se Espectrômetro de emissão óptica marca Oxford Instruments modelo FOUNDRY MASTER X-LINE. A composição química obtida está mostrada na tabela na Tabela 2.

Tabela 2: Composição química do aço SAE 8640.

Composição química do aço SAE 8640					
C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
0,419	0,747	0,296	0,46	0,524	0,149

Fonte: O autor (2018).

3.1.2 Corpos de prova

O processo de usinagem foi realizado respeitando as respectivas dimensões dos corpos de prova descritas pela norma ASTM E-23 como ilustrado na Figura 2.

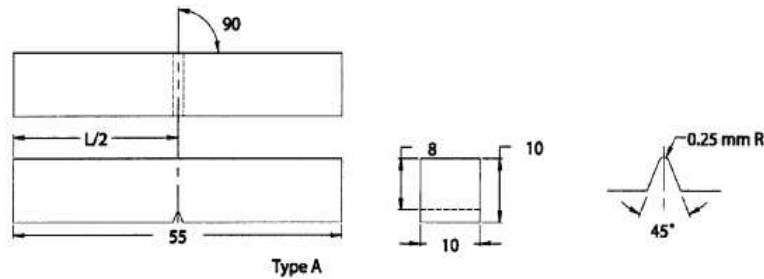


Figura 2: Dimensões do corpo de prova Charpy segundo ASTM E-23.

Fonte: ASTM E23 - Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials (2007).

Foram usinados quinze corpos de prova de um mesmo lote da seguinte maneira: primeiramente as barras foram cortadas no comprimento de 55 milímetros, após as arestas foram usinadas de maneira a dar a peça a geometria transversal quadrada de 10 milímetros, por fim o entalhe foi realizado pelo processo de Eletroerosão. A sequência do processo de confecção dos Corpos de prova está mostrada na Figura 3.

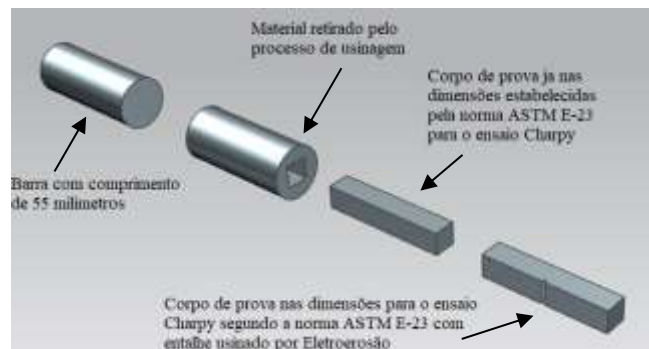


Figura 3: Sequência do procedimento de confecção do corpo de prova Charpy. Fonte: O autor (2018).

3.1.3 Durômetro

Foi utilizado um durômetro da marca Shimadzu de modelo HMV-G 20ST, a carga utilizada para a mensurar a dureza em Vickers foi de 1 Kgf pelo tempo de 15 segundos.

3.1.4 Fornos

Foram utilizados dois fornos para o tratamento de têmpera e revenimento um forno da marca Brasimet de modelo FO3935 e outro forno de marca Jung de modelo 4212.

3.1.5 Estereomicroscópio, MEV e Metalografia

As imagens das superfícies de fraturas dos corpos de prova de baixa ampliação foram obtidas por meio de um Estereomicroscópio de marca Zeiss modelo STEM 2000-C utilizando-se uma ampliação de 8 vezes.

O procedimento fractográfico foi realizado com um Microscópio Eletrônico de Varredura de marca Tescan modelo VEGA LM3, foram realizadas três ampliações, sendo elas: 50 vezes, 500 vezes e 5000 vezes.

Para a obtenção das imagens microestruturais foi utilizado um microscópio da marca Zeiss de modelo SCOPE A1. Os corpos de prova foram lixados utilizando-se lixas com granulometria na sequência de: 220, 400, 600 e 1200. O polimento dos corpos de prova foi realizado utilizando-se Alumina 1 micron e o ataque na superfície do aço SAE 8640 foi realizado utilizando-se Nital 2% com uma imersão de 5 segundos do corpo de prova no reagente.

3.1.6 Máquina de ensaios Charpy

O ensaio Charpy foi realizado em uma máquina da marca Heckert na temperatura ambiente de 20°C, desta máquina foram extraídos os valores da tenacidade de todos os corpos de prova submetidos ao tratamento térmico de têmpera e revenido. Os dados foram extraídos da máquina em unidades de energia (Joules) e foram organizados com o auxílio de uma Planilha eletrônica.

3.2 Métodos

As etapas necessárias para a execução do processo experimental foram planejadas visando a melhor qualidade possível em relação à confiabilidade dos resultados.

Após realizada a usinagem, os quinze corpos de prova foram enumerados e organizados em três categorias de revenimento, em seguida as amostras foram submetidas ao aquecimento até a temperatura de austenitização de 880°C, após, os corpos de prova foram retirados para que se realizasse o resfriamento rápido em óleo a temperatura ambiente (em torno de 20°C).

A medida que os corpos de prova foram temperados, teve início o processo de revenido em três categorias de temperaturas, 200°C, 400°C e 600°C por 60 minutos.

Concluídas as etapas de tratamento térmico, deu-se início ao ensaio de Charpy, etapa em que foram obtidos os valores da tenacidade de cada amostra. Após o ensaio, foram realizados mais três procedimentos; o processo metalográfico, para identificar a microestrutura gerada pelo tratamento térmico e a obtenção de imagens das superfícies pelo Estereomicroscópio e MEV.

3.2.1 Características do tratamento térmico

No Quadro 1 estão mostrados os parâmetros em relação as condições fixas em que o tratamento térmico foi realizado.

Quadro 1: Características do tratamento térmico.

Características fixas estabelecidas para o tratamento térmico	
Temperatura de austenitização do aço SAE 8640	880°C
Tempo de permanência da peça no forno em austenitização	30 minutos
Tempo de imersão da peça no óleo a temperatura ambiente ~20°C	35 segundos
Temperatura de revenimento	200°C, 400°C e 600°C
Tempo de permanência da peça em revenido	60 minutos
Número total de Corpos de Prova	15 (quinze) Corpos de prova
Número de Corpos de Prova por categoria de revenido	5 (cinco) Corpos de prova

Fonte: O autor (2018).

A Tabela 3 mostra os corpos de prova organizados (de um a quinze) já divididos nas três categorias em relação a temperatura de revenimento.

Tabela 3: Organização dos corpos de prova.

Procedimento de têmpera e revenido			
Corpo de prova	Tempo de austenitização a 880°C	temperatura de revenido	Tempo de revenido
1	30 min	200°C	1 h
2	30 min	200°C	1 h
3	30 min	200°C	1 h
4	30 min	200°C	1 h
5	30 min	200°C	1 h
6	30 min	400°C	1 h
7	30 min	400°C	1 h
8	30 min	400°C	1 h
9	30 min	400°C	1 h
10	30 min	400°C	1 h
11	30 min	600°C	1 h
12	30 min	600°C	1 h
13	30 min	600°C	1 h
14	30 min	600°C	1 h
15	30 min	600°C	1 h

Fonte: O autor (2018)

3.2.2 Têmpera

A têmpera foi realizada aquecendo-se os quinze corpos de prova juntos até a temperatura austenitização; em seguida, o resfriamento rápido em óleo imediatamente realizado, resfriando-se três amostras por vez.

3.2.3 Revenimento

O revenimento foi realizado da seguinte forma: cinco corpos de prova foram revenidos por seção de maneira que a temperatura do forno foi variada em cada grupo de Corpos de Prova, sendo 5 amostras, (amostras 1, 2, 3, 4, 5) para o revenido a 200°C, 5 amostras (amostras 6, 7, 8, 9, 10) para o revenido em 400 ° C, e 5 amostras (amostras 11, 12, 13, 14, 15) para o revenido em 600°C.

3.2.4 Ensaio de impacto Charpy

Concluídos os procedimentos, foi realizado o ensaio Charpy. Inicialmente com o auxílio de uma planilha eletrônica os materiais foram aleatorizados a fim de diminuir a possibilidade de variações nos resultados causadas por possíveis erros e incertezas. A ordem em que os ensaios foram realizados esta mostrada na Tabela 4, todos os corpos de prova foram ensaiados em temperatura ambiente (em torno de 20°C).

Tabela 4: Ordem dos Corpos de prova no ensaio Charpy

Ordem do experimento	Temperatura de revenimento	Corpo de prova
1	400°C	Corpo de prova 6
2	600°C	Corpo de prova 12
3	200°C	Corpo de prova 2
4	400°C	Corpo de prova 10
5	400°C	Corpo de prova 7
6	200°C	Corpo de prova 1
7	600°C	Corpo de prova 15
8	400°C	Corpo de prova 8
9	600°C	Corpo de prova 14
10	600°C	Corpo de prova 13
11	200°C	Corpo de prova 5
12	600°C	Corpo de prova 11
13	400°C	Corpo de prova 9
14	200°C	Corpo de prova 3
15	200°C	Corpo de prova 4

Fonte: O autor (2018)

3.2.5 Análise Metalográfica, Fractográfica, MEV e Dureza

O processo de análise metalográfica teve o objetivo de revelar a microestrutura gerada após processo de têmpera e revenido. Os corpos de prova foram lixados e polidos de acordo com o processo descrito no item 3.1.5 até que o nível de qualidade da superfície fora considerado adequado para que imagens com boa qualidade pudessem ser geradas.

Foram obtidas imagens das superfícies de fratura dos corpos de prova pelo meio de um Estereomicroscópio, juntamente com o procedimento fractográfico que também foi realizado por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura.

Os corpos de prova tiveram suas respectivas durezas mensuradas em escala Vickers com os parâmetros citados no Item 4.3 deste trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos do ensaio Charpy, as imagens da superfície de fratura de baixa ampliação obtidas por meio do Estereomicroscópio, as imagens obtidas por MEV, além das imagens microestruturais obtidas por meio do processo metalográfico, assim como os valores da dureza em escala Vickers. Estes dados serão discutidos neste capítulo analisando-se a influência da temperatura de revenido nos mesmos.

4.1 Ensaio Charpy

O ensaio Charpy foi realizado aleatorizando-se os corpos de prova, conforme descrito no item 3.2.4. Na Tabela 5, estão mostrados os valores da tenacidade de cada grupo de cinco corpos de prova gerados na máquina de ensaios, é possível observar a diferença gerada entre os Corpos de prova dentro dos grupos de revenimento, de maneira que a tenacidade dos materiais revenidos a 600°C variou entre 78 Joules e 82 Joules, já para os Corpos de prova revenidos a 400°C a maior tenacidade obtida foi de 18 Joules e a menor foi de 13 Joules, e para os Corpos de prova revenidos a 200°C a maior energia de impacto foi de 17 Joules e a menor foi de 10 Joules.

Tabela 5: Tenacidade de cada grupo de cinco corpos de prova em relação a temperatura de revenido.

Corpo de prova	Temperatura de revenimento	Tenacidade (Joules)
1	200°C	14
2	200°C	14
3	200°C	17
4	200°C	12
5	200°C	10
6	400°C	14
7	400°C	18
8	400°C	14
9	400°C	13
10	400°C	14
11	600°C	78
12	600°C	86
13	600°C	78
14	600°C	86
15	600°C	82

Fonte: O autor (2018)

Em seguida, foram calculadas as médias das tenacidades de cada grupo de revenimento, juntamente com o desvio padrão de cada categoria. É possível observar no gráfico da Figura 4, uma semelhança entre as tenacidades médias obtidas nas categorias de 200°C e 400°C, as quais resultaram em um valor de 13,4 Joules e 14,6 Joules à medida que, para a temperatura de revenimento de 600°C, a energia de impacto teve um significativo aumento, chegando a 82 Joules.

A baixa tenacidade nas temperaturas de revenimento de 200°C e 400° pode ser associada a presença da microestrutura martensítica oriunda do procedimento de têmpera que tem por característica ser gerar ao aço um comportamento frágil e pouco tenaz, já no revenimento realizado a 600°C, a martensita revenida gerada promove um aumento da tenacidade do aço e, conseqüentemente, um aumento da ductilidade.

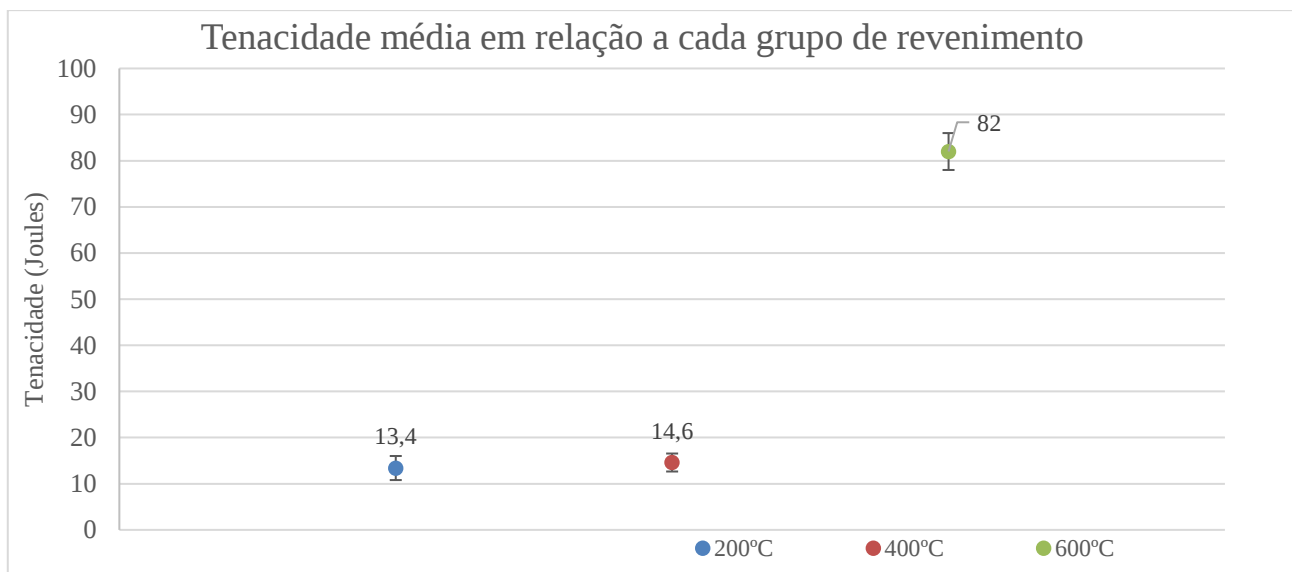


Figura 4: Média das tenacidades de cada grupo de revenimento juntamente com o desvio padrão amostral.

Fonte: O autor (2018).

As tenacidades oriundas dos procedimentos de revenimento nas temperaturas de 200°C, 400°C e 600°C obtidas neste experimento podem ser relacionadas com as tenacidades mostradas na Tabela 6, na qual segundo ASM Handbook (1990) são observadas as características de um aço SAE 8640 de uma seção redonda de 13,5 milímetros tratado termicamente e revenido nas temperaturas de 205°C, 315°C, 425°C, 540°C e 625°C.

Tabela 6: Aço SAE 8640 submetido a um procedimento de têmpera com um procedimento revenido realizado nas temperaturas de 205°C, 315°C, 425°C, 540°C e 625°C

Temperatura de revenido (°C)	Resistência a tração (MPa)	Alongamento em 50 mm	Redução de Área (%)	Energia de impacto (Joules)	Dureza Brinell (HB)
205	1810	8,0	25,8	11,5	555
315	1585	9,0	37,3	15,6	461
425	1380	10,5	46,3	27,8	415
540	1170	14,0	53,3	56,3	341
625	870	20,5	61,0	96,9	269

Fonte: Adaptado de ASM Handbook, (1990).

Observa-se que os valores da tenacidade mostrados por ASM Handbook (1990) nas temperaturas de 205°C, 425°C e 625°C são semelhantes as tenacidades obtidas neste trabalho, mostradas Figura 4, de maneira que as diferenças percentuais entre as tenacidades foram de 14,17% para as temperaturas de 200°C e 205°C; 47,48% para as temperaturas de 400°C e 425°C e 15,37% para as temperaturas de 600°C e 625°C.

4.2 Estereomicroscópio e MEV

As imagens mostradas nas seções 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3 apresentam as características das superfícies de fratura dos corpos de prova submetidos ao ensaio de Charpy. Optou-se por selecionar, em cada grupo de revenimento, as amostras as quais obtiveram os maiores e menores valores de tenacidade, as ampliações ilustradas nas figuras 5; 6; 7; 8; 9 e 10 foram realizadas na região próxima ao entalhe (destacado em vermelho).

4.2.1 Revenimento a 200°C

Na categoria de revenimento realizado a 200°C a maior tenacidade encontrada foi de 17 Joules, sendo esta obtida no processo de fratura do corpo de prova de número 3, a superfície de fratura pode ser observada na Figura 5. A superfície de fratura ilustrada na Figura 5 (a) mostra uma fratura sem a ocorrência de deformação plástica, sendo uma superfície plana, o que informa que o material teve um comportamento frágil, na Figura 5 (b) e (c) é possível observar com mais clareza a fratura por clivagem (ou transgranular) a qual Segundo Bezerra Teixeira Da Rocha *et al.* (2016) é caracterizada pelo rompimento das ligações atômicas no decorrer dos planos cristalográficos onde, macroscopicamente, a superfície pode exibir uma textura granulada ou facetada como resultado das mudanças na orientação dos planos de fratura de um grão para o outro.

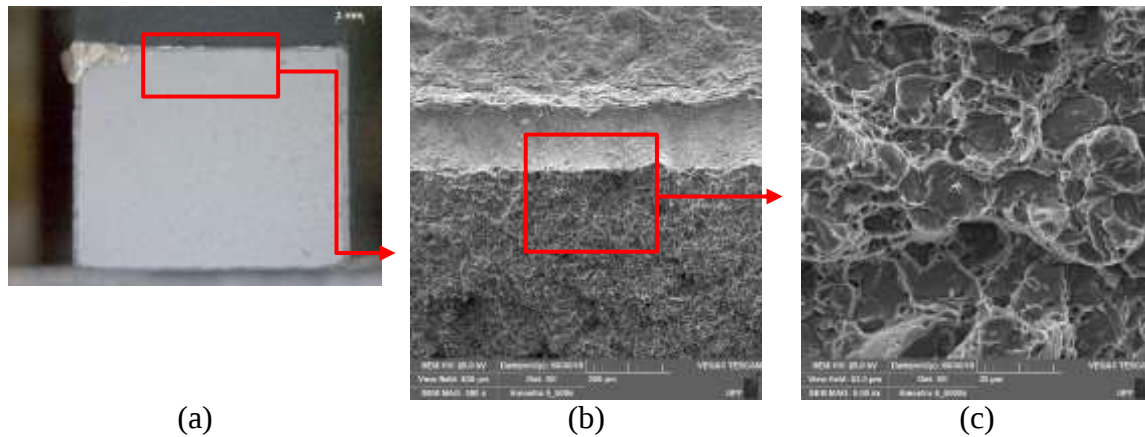


Figura 5: Superfície de fratura do Corpo de prova de número 3 o qual obteve a maior tenacidade (17 Joules) no grupo de revenimento a 200°C: (a) baixa ampliação de 8 vezes por meio de Estereomicroscópio; (b) e (c) ampliações de 500 vezes e 5000 vezes por meio de MEV. Fonte: O autor (2018).

A menor tenacidade encontrada para o revenimento a 200°C foi de 10 Joules, referente ao corpo de prova 5, a superfície de fratura pode ser observada na Figura 6. A superfície de fratura ilustrada na figura 6 (a), mostra uma superfície semelhante a encontrada na figura 5 (a), de maneira que não fica evidenciado a presença de deformações plásticas. A Figura 6 (b) e (c) mostram que a fratura ocorreu por clivagem.

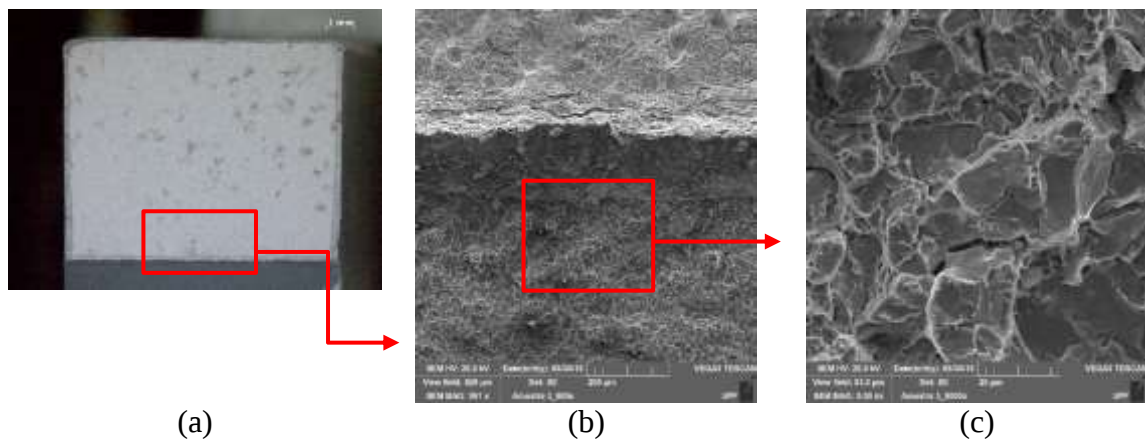


Figura 6: Superfície de fratura do Corpo de prova de número 5 o qual obteve a menor tenacidade (10 Joules) no grupo de revenimento a 200°C: (a) baixa ampliação de 8 vezes por meio de Estereomicroscópio; (b) e (c) ampliações de 500 vezes e 5000 vezes por meio de MEV. Fonte: O autor (2018).

4.2.2 Revenimento a 400°C

Entre os materiais revenidos a temperatura de 400°C o corpo de prova de número 7 apresentou a tenacidade de 18 Joules, sendo esta, a maior tenacidade da categoria. A superfície de fratura ilustrada na Figura 7 (a) mostra a ausência de deformação plástica, revelando assim uma fratura tipicamente frágil. Na Figura 7 (b) e (c) revela uma fratura que ocorrera por clivagem com a presença de algumas trincas.

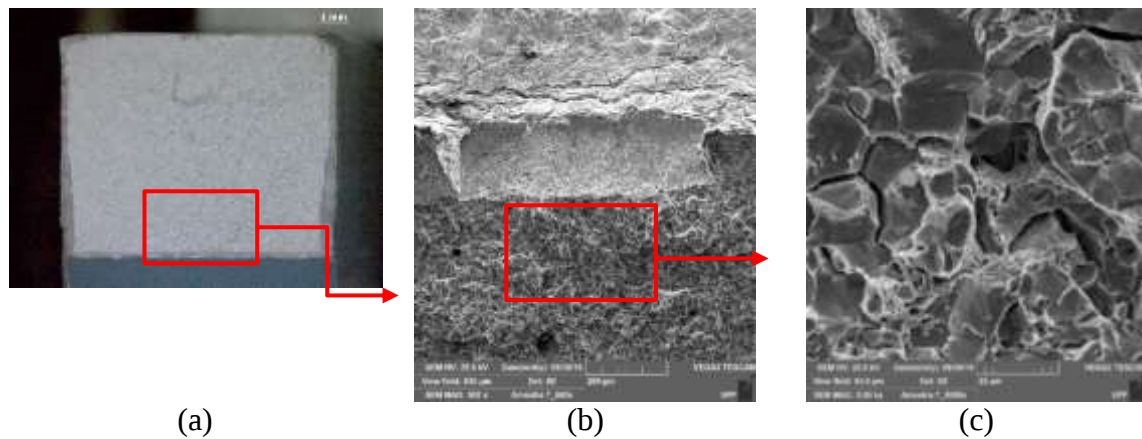


Figura 7: Superfície de fratura do Corpo de prova de número 7 o qual obteve a maior tenacidade (18 Joules) no grupo de revenimento a 400°C: (a) baixa ampliação 8 vezes por meio de Estereomicroscópio; (b) e (c) ampliações de 500 vezes e 5000 vezes por meio de MEV. Fonte: O autor (2018).

A menor tenacidade para esta categoria de revenimento foi obtida pelo corpo de prova de número 9, sendo esta de 13 Joules. Na Figura 8 (a) observa-se a ausência de deformação plástica aparente, já na Figura 8 (b) e (c) observa-se que a fratura também ocorreu por clivagem.

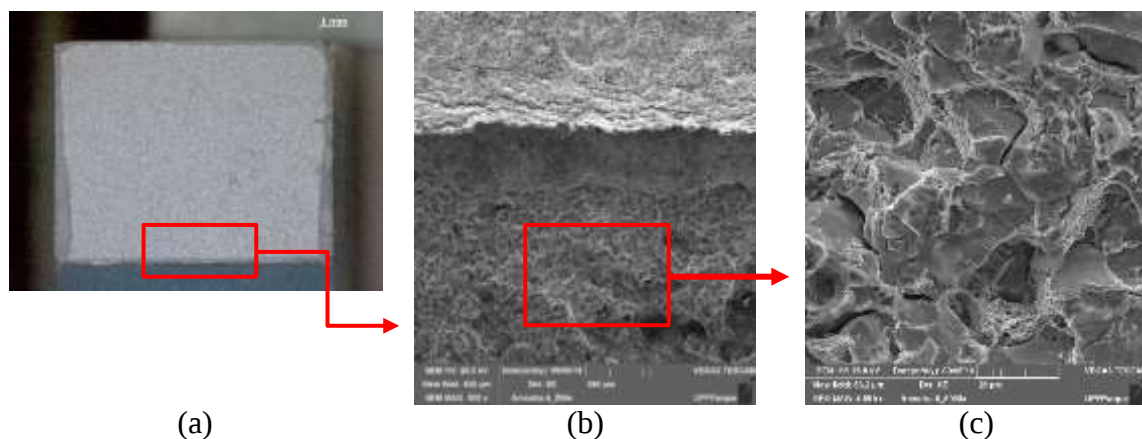


Figura 8: Superfície de fratura do Corpo de prova de número 9 o qual obteve a menor tenacidade (13 Joules) no grupo de revenimento a 400°C: (a) baixa ampliação 8 vezes por meio de Estereomicroscópio; (b) e (c) ampliações de 500 vezes e 5000 vezes por meio de MEV. Fonte: O autor (2018).

No grupo de materiais revenidos a 200°C, é possível relacionar a baixa tenacidade de 13,4 Joules com o tipo de fratura identificado. Devido a sua microestrutura martensítica, materiais frágeis tendem a apresentar fraturas por clivagem.

No grupo de materiais revenidos a 400°C a tenacidade média dos materiais foi de 14,6 Joules, juntamente com uma fratura propagada por clivagem, o que indica, da mesma maneira, que o aço 8640 permaneceu frágil. A fragilização de revenido é um fenômeno a ser considerado neste caso. Segundo Dieter (1981), a fragilização de revenido se refere ao decréscimo da tenacidade ao entalhe que frequentemente ocorre em aços liga quando aquecidos ou resfriados lentamente através do intervalo de temperaturas que giram em torno dos 400°C, sendo que, este fenômeno torna se um problema quando relacionado a peças com seções muito grandes, nas quais o resfriamento através deste intervalo de temperaturas não pode ser realizado rápido o bastante para evitar a fragilização.

4.2.3 Revenimento a 600°C

À temperatura de 600°C os valores da tenacidade apresentaram valores mais elevados, quando comparados aos casos anteriores (200°C e 400°C). O corpo de prova número 12 apresentou a maior tenacidade de 86 Joules. A presença de deformação plástica ficou mais evidenciada nesta categoria de revenimento, uma vez que na Figura 9 (a) é possível observar claramente a deformação plástica aparente juntamente com a Figura 9 (b) e (c) que mostra a presença de pequenas cavidades (dimples)

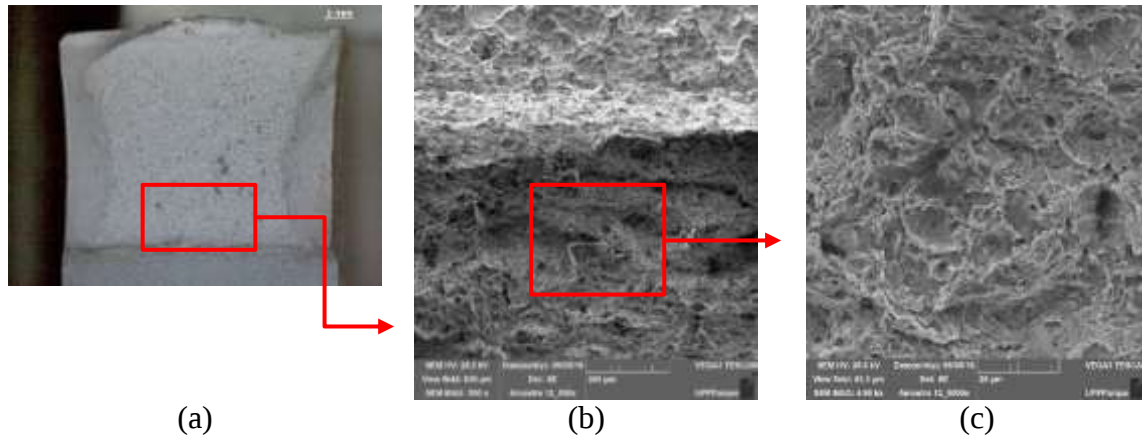


Figura 9: Superfície de fratura do Corpo de prova de número 12 o qual obteve a maior tenacidade (86 Joules) no grupo de revenimento a 600°C: (a) baixa ampliação 8 vezes por meio de Estereomicroscópio; (b) e (c) ampliações de 500 vezes e 5000 vezes por meio de MEV. Fonte: O autor (2018).

Uma tenacidade de 78 Joules, foi encontrada no corpo de prova número 13, sendo a menor tenacidade da categoria de 600°C. Na Figura 10 (a), é notável a presença da deformação plástica, já na Figura 10 (b) e (c) também se identifica a presença de dimples.

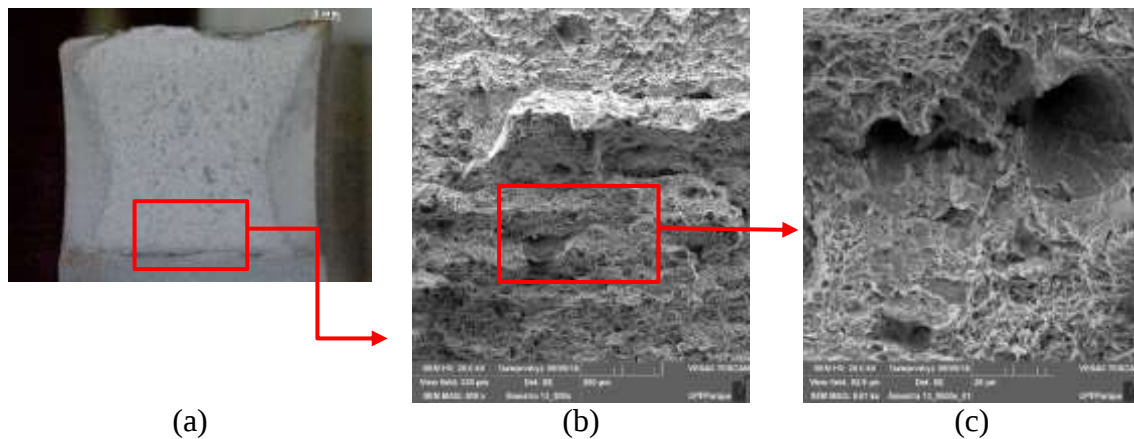


Figura 10: Superfície de fratura do Corpo de prova de número 13 o qual obteve a menor tenacidade (78 Joules) no grupo de revenimento a 600°C: (a) baixa ampliação 8 vezes por meio de Estereomicroscópio; (b) e (c) ampliações de 500 vezes e 5000 vezes por meio de MEV. Fonte: O autor (2018).

Nesta categoria de revenimento, a tenacidade de 82 Joules justifica o meio no qual as fraturas ocorreram, a presença de deformação plástica juntamente com as regiões de maior tenacidade (formadas por dimples). Conforme Dieter (1981), as superfícies de fratura por dimples possuem uma característica fibrosa a qual absorve a luz incidente que, por este motivo possuem uma aparência escura (como pode ser visto nas cavidades da Figura 8 (c)). Estas características indicam um comportamento dúctil do material revenido a 600°C, este comportamento é justificável e esperado, uma vez que, quando revenido na temperatura de 600°C, esta alta temperatura transforma a microestrutura totalmente martensítica

oriunda do processo de tempera em martensita revenida, aumentando a tenacidade e diminuindo a dureza do aço.

4.3 Dureza dos Corpos de prova

Os corpos prova revenidos e uma amostra de material não submetida ao tratamento térmico tiveram suas durezas mensuradas por cinco vezes, conforme apresentado na Tabela 7.

No revenimento realizado na temperatura de 200°C os valores de dureza variaram entre 622,8 Vickers (corpo de prova número 1) e 476,6 Vickers (corpo de prova número 5), a dureza média foi de 549,2 Vickers como mostrado na Figura 11.

Para os corpos de prova revenidos a 400°C a dureza variou entre 477,8 Vickers (corpo de prova número 6) e 437,4 Vickers (corpo de prova número 9), a dureza média na categoria foi de 459,2 Vickers.

Já no revenimento a 600°C a variação da dureza ficou entre 337,8 Vickers referente ao corpo de prova número 13 e 309,6 Vickers referente ao corpo de prova número 11, onde a dureza média calculada foi de 326,8 Vickers.

Tabela 7: Dureza dos corpos de prova em Vickers.

Número do Corpo de prova	Temperatura de revenimento °C	Medições					Dureza média (Vickers)
		1º	2º	3º	4º	5º	
1	200°C	611	594	616	654	639	622,8
2	200°C	568	600	595	575	575	582,6
3	200°C	544	616	604	571	536	574,2
4	200°C	432	445	509	482	579	489,4
5	200°C	445	460	467	506	505	476,6
6	400°C	445	479	495	474	496	477,8
7	400°C	468	474	462	492	488	476,8
8	400°C	439	470	447	455	439	450
9	400°C	438	436	444	440	429	437,4
10	400°C	470	450	449	459	442	454
11	600°C	305	306	302	316	319	309,6
12	600°C	334	320	318	324	348	328,8
13	600°C	326	342	348	344	329	337,8
14	600°C	342	337	325	299	309	322,4
15	600°C	336	321	329	342	331	331,8
Amostra sem tratamento	-	305	306	302	316	319	309,6

Fonte: O autor (2018)

A dureza média está apresentada a seguir na Figura 11.

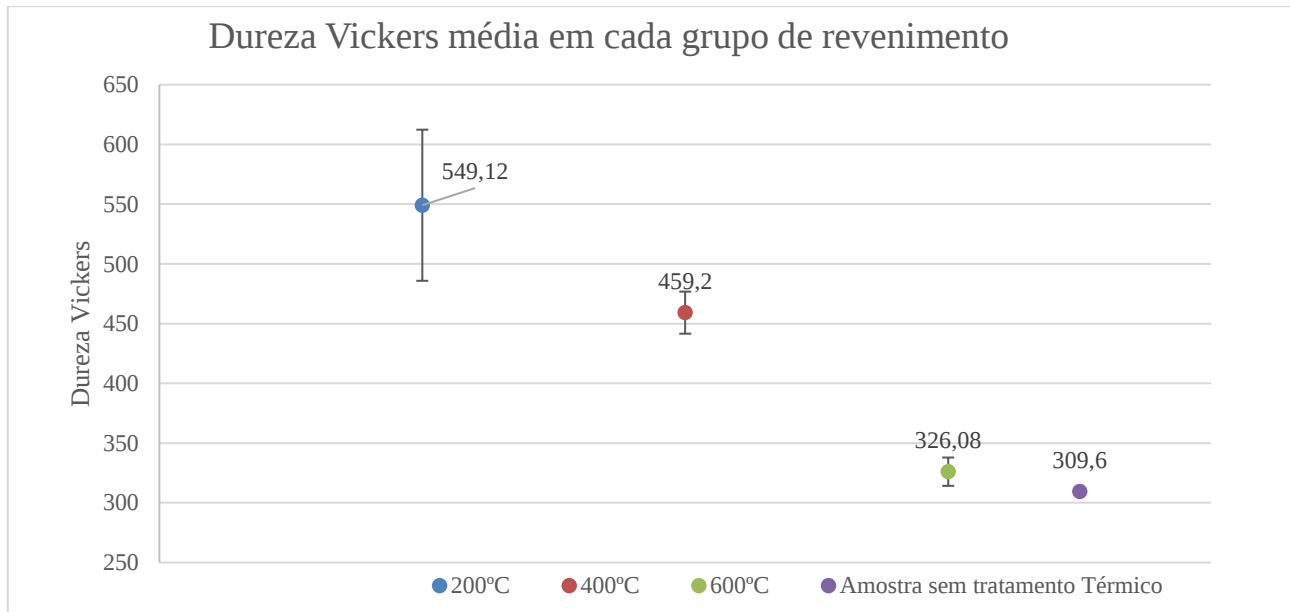


Figura 11: Dureza dos Cinco corpos de prova de cada grupo em relação a temperatura de revenimento juntamente com a amostra sem tratamento térmico. Para este gráfico foi calculada a média das médias entre os cinco corpos de prova de cada categoria de revenimento. Fonte: O autor (2018).

É possível observar a medida que a temperatura de revenido foi elevada a 600°C, a dureza média foi reduzida a 326,08 Vickers.

Em relação aos materiais revenidos no grupo a 400°C foi observado um decréscimo de 90 Vickers (16,39%) em relação ao grupo de revenimento a 200°C, já no grupo de revenimento a 600°C o decréscimo foi maior chegando a uma diferença de 223 Vickers (40,61%) quando comparado ao grupo de revenimento a 200°C.

Conforme Zuchetto *et al* (2018), a concentração de carbono do aço 8640 limita a sua dureza, porém, de outro modo, sua composição constituída de manganês, silício, cromo e molibdênio contribuem para o aumento da mesma. Desta maneira, como mostrado anteriormente, na Figura 10 e Figura 11, a dureza do aço SAE 8640 pode variar consideravelmente a medida que as características do tratamento térmico são modificadas, no caso deste trabalho, a temperatura de revenimento.

4.4 Metalografia

No item 4.4.1 constam as imagens resultantes do procedimento de metalografia, o qual foi realizado seguindo os parâmetros descritos no item 3.1.5 deste trabalho. Os corpos de prova utilizados foram os mesmos da seção 4.1 deste trabalho, juntamente com o corpo de prova sem tratamento térmico.

4.4.1 Revenimento a 200°C, 400°C e 600°C

Na temperatura de 200°C conforme a Figura 12 (A e B), o corpo de prova número 3 e número 5 apresentaram uma microestrutura totalmente martensítica.

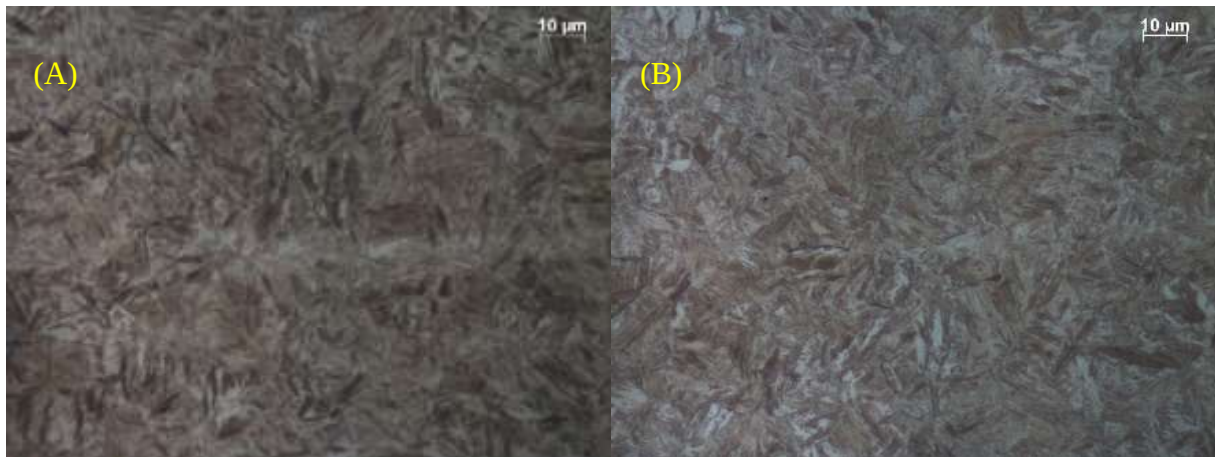


Figura 12: Microestrutura do corpo de prova 3 e 5 revenidos a 200°C com uma tenacidade de 17 e 10 Joules respectivamente conforme imagens (A e B). Fonte: O autor (2018).

No revenimento a 400°C a microestrutura gerada também foi unicamente martensítica, como mostrado na Figura 13 (A e B).

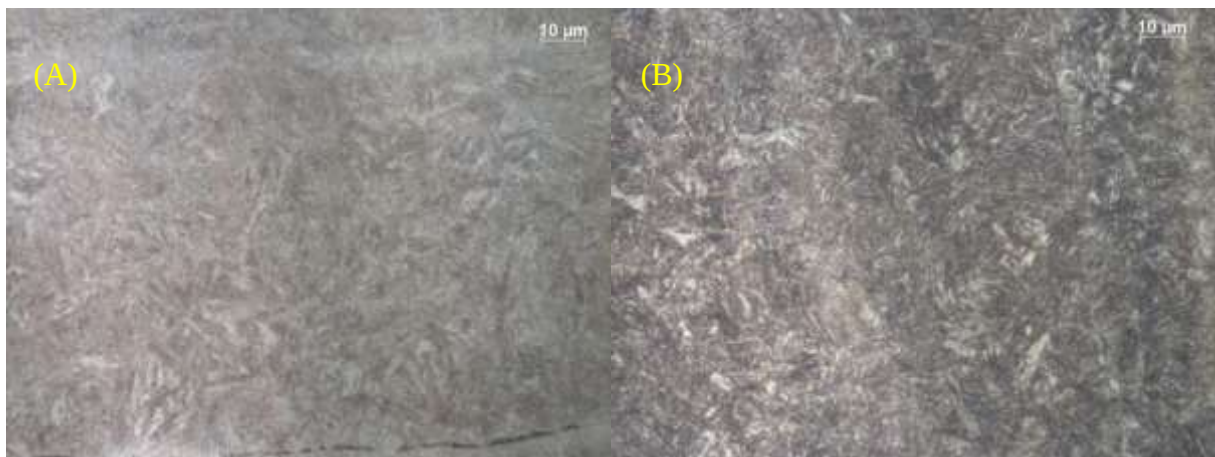


Figura 13: Microestrutura do corpo de prova 7 e 9 revenidos a 400°C com uma tenacidade de 18 e 13 Joules. Fonte: O autor (2018).

A microestrutura encontrada no revenimento a 600°C foi de martensita revenida, como observa-se na Figura 14 (A e B).

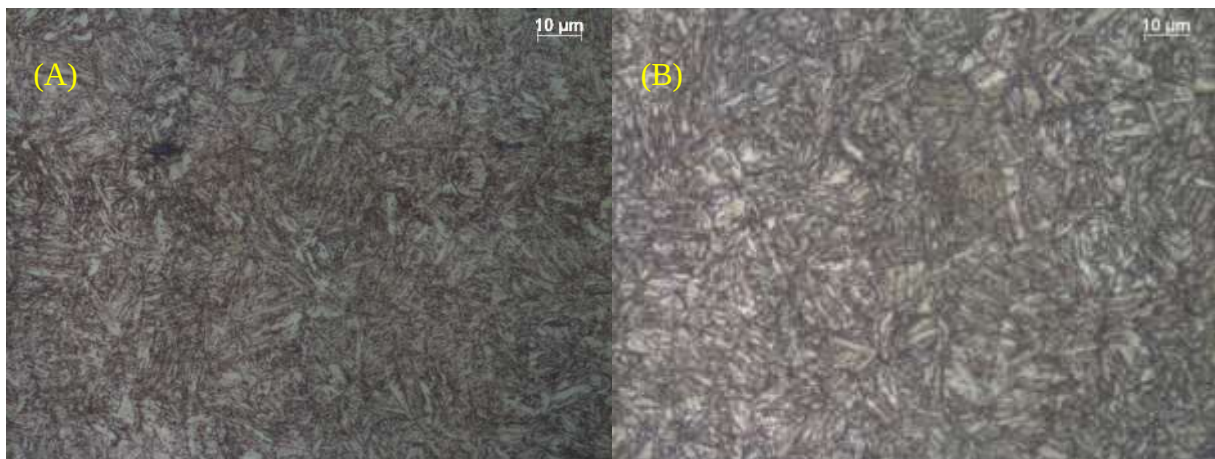


Figura 14: Microestrutura do corpo de prova 12 e 13 revenidos a 600°C apresentaram uma tenacidade de 86 e 78 Joules. Fonte: O autor (2018).

Na amostra sem tratamento térmico foi identificada uma microestrutura constituída de ferrita e perlita, ilustrado na Figura 15.



Figura 15: Microestrutura da amostra sem tratamento térmico. Fonte: O autor (2018).

A microestrutura constituída de ferrita e perlita prova a ausência de tratamentos térmicos na amostra base evidenciando assim que de fato as modificações microestruturais mostradas nos itens 4.4.1 4.4.2 e 4.4.3, foram resultados oriundos do tratamento de termico de têmpera e revenimento.

A presença da martensita nos corpos de prova revenidos a temperatura de 200°C e 400°C relacionam-se com características de tenacidade, dureza e modo de fratura estudados nos itens 4.1, 4.2 e 4.3 deste trabalho. Colpaert (2008) comenta que a martensita se forma em velocidades de resfriamento extremamente rápidas, tendo como característica a aparência em formas alongadas em “ripas” ou em “placas” sendo que essa morfologia é afetada principalmente pelo teor de carbono presente no aço. Desta maneira a alta velocidade de resfriamento oriunda da têmpera, associada a temperaturas de revenimento consideradas mais brandas mantiveram a fragilidade ao aço SAE 8640.

No revenimento a 600°C a tenacidade e a dureza média dos corpos de prova foram respectivamente de 82 Joules e 326,08 Vickers, estes parâmetros tiveram comportamentos inversamente proporcionais. A microestrutura constituída de martensita revenida deu ao Aço SAE 8640 uma maior ductilidade o que fica evidenciado pela fratura apresentar dimples.

Da Silva *et al.* (2015) Realizou um tratamento termico de têmpera em barras de 12 milímetros de comprimento por 10 milímetros de diametro em dois tipos de aços (AISI 8620 e AISI 8640) onde as amostras foram aquecidas a uma temperatura de 900°C pelo tempo de 30 minutos e revenidas nas temperaturas de 150°C, 250°C 350°C 450°C 550°C e 650°C por 40 minutos. O autor comenta que, no revenimento, a partir da temperatura de 150°C o carbono se difunde e promove um alívio de tensões, porém ainda sem alterações microestruturais. Já na temperatura de 400°C as alterações começam a ser evidenciadas pela redução da dureza de maneira que a 600°C é observada a maior redução da dureza no aço AISI 8640 onde a microestrutura tipicamente gerada é a martensita revenida.

5. CONCLUSÕES

Com base nos dados provenientes dos procedimentos de análise apresentados neste trabalho foi possível concluir que:

Em relação ao revenimento a 200°C: a presença de martensita provocou uma baixa tenacidade ao aço SAE 8640 quando revenido na temperatura de 200°C, este fato fica reforçado pela alta dureza e a elevada fragilidade na fratura (sem a presença de deformação plástica) juntamente com o modo de fratura por clivagem, que é uma característica de comportamento de um aço frágil.

Em relação ao revenimento a 400°C: a baixa tenacidade e a dureza elevada do aço SAE 8640 permaneceram semelhantes à temperatura de 200°C quando o aço foi revenido 400°C, apesar da temperatura ter sido elevada para 400°C, seu comportamento também foi totalmente frágil. A microestrutura 100% martensítica comprova o fato, juntamente com o modo de fratura de característica frágil por clivagem. Na temperatura de 400°C a fragilidade de revenido foi um fator determinante para que o aço tivesse este comportamento.

Em relação ao revenimento a 600°C: o aço SAE 8640 quando revenido a 600°C teve sua tenacidade elevada, o que, por consequência, aumentou sua ductilidade, uma vez que a dureza foi reduzida quando comparada aos outros dois grupos de materiais revenidos a 200°C e 400°C. O modo de fratura com deformação plástica aparente ainda com a presença de dimples também evidencia o comportamento dúctil do aço quanto submetido a esta configuração de tratamento térmico.

6. REFERÊNCIAS

ASM HANDBOOK. **Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys.** [S.l.]: The Materials Information Company, 1990.

ASTM E23 - Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. [S.l.]. 2007.

BEZERRA TEIXERA DA ROCHA , G. et al. Análise Fractográfica em MEV - Fratura Dúctil x Fratura Frágil. **Instituto Militar de Engenharia (IME)**, 2016.

CHIAVERINI,. **Aços e Ferros Fundidos.** São Paulo: Livros ABM, 1996.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.** São Paulo-SP: Editora Blucher, 2008.

DA SILVA JUNIOR, et al. Comparação Microestrutural de Dois Aços para Beneficiamento de Compósitos, Rio de Janeiro, Agosto 2015. 8.

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica.** Segunda Edição. ed. Rio de Janeiro RJ: Guanabara Koogan S.A, 1981.

ZUCHETTO, et al. **Tratamento Térmico de Têmpera em Aço ABNT 8640: Análise das Propriedades Mecânicas.** Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria RS. 2018.

MELLO DE FREITAS , B.; MONTEIRO DE VASCONCELOS , S.; DA COSTA MACEDO NETO , Beneficiamento do Aço SAE 8640 Sob Tratamentos Térmicos. **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC**, Foz do Iguaçu - PR, 2016.