

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

MARIANE BARDELLA DE CASTRO

Comparação do comportamento ao impacto do aço SAE 4140 nas condições
temperado e revenido e austemperado

São Carlos

2018

MARIANE BARDELLA DE CASTRO

Comparação do comportamento ao impacto do aço SAE 4140 nas condições
temperado e revenido e austemperado

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e Manufatura.

Orientadora: Profa. Dra. Luralice de Campos Franceschini Canale

São Carlos

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

C333c Castro, Mariane Bardella de
Comparação do comportamento ao impacto do aço SAE 4140 nas condições temperado e revenido e austemperado / Mariane Bardella de Castro; orientadora Lauralice de Campos Franceschini Canale. São Carlos, 2018.

Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.

1. Têmpera. 2. Revenido. 3. Austêmpera. 4. Tenacidade. 5. Bainita. 6. Martensita Revenida. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Mariane Bardella de Castro
Título do TCC: Comparação do comportamento ao impacto do aço SAE 4140 nas condições temperado e revenido e austemperado
Data de defesa: 21/11/2018

Comissão Julgadora	Resultado
Professor Titular Lauralice de Campos Franceschini Canale (orientador)	<i>APROVADA</i>
Instituição: EESC - SMM	
Professor Titular Waldek Wladimir Bose Filho	<i>APROVADA</i>
Instituição: EESC - SMM	
Pesquisador Roberto Ramon Mendonça	<i>APROVADA</i>
Instituição: EESC - SMM	

Presidente da Banca: **Professor Titular Lauralice de Campos Franceschini Canale**



(assinatura)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Edirlene e Amauri, por todo apoio, amor e por sempre me darem o que há de melhor. Ao meu irmão, Mateus, por seu apoio e exemplo. Ao meu namorado e amigo, Yago, por seu amor, suporte e companheirismo. E aos amigos que fiz ao longo do curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, pelos laços de amizade.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por permitir a minha jornada até aqui e por sempre me abençoar ao longo de minha vida.

À Profa. Dra. Lauralice de Campos F. Canale, pela orientação no desenvolvimento deste trabalho, pela confiança e oportunidades a mim oferecidas.

Ao Roberto Ramon Mendonça, pelo grande auxílio ao longo deste trabalho, por sua orientação e pelas discussões produtivas.

Ao Prof. Dr. Alessandro Fraga Farah (FATEC-Sertãozinho), por realizar alguns testes fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Danilo Assad Ludwigs e à empresa Durferrit do Brasil, pela realização dos tratamentos térmicos.

Ao meu amigo Bruno Castilho, por sua grande ajuda e por sua amizade.

EPÍGRAFE

“Ninguém consegue subir a escada do sucesso sem se esforçar muito”

- Ozires Silva

RESUMO

CASTRO, M. B. **Comparação do comportamento ao impacto do aço SAE 4140 nas condições temperado e revenido e austemperado, 2018.** Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Na literatura tradicional, estudos comparativos entre as microestruturas martensita revenida e bainita indicam que esta última apresenta melhores propriedades ao impacto. Existem alguns trabalhos realizados recentemente que relatam o oposto. Assim, este trabalho teve como objetivo estudar tais microestruturas e confirmar em qual condição o aço SAE 4140 apresenta melhor tenacidade. Foram realizados os seguintes tratamentos térmicos: austêmpera com banho de sal nas temperaturas de 375°C e 400°C por 40 minutos; e de têmpera e revenido. Foram obtidas durezas semelhantes em cada tipo de tratamento para permitir a comparação ao impacto, variando-se apenas a microestrutura. Analisando o comportamento ao impacto de cada condição e verificando a microestrutura formada após cada tratamento, foi evidenciado que os corpos de prova que passaram pelo tratamento de têmpera e revenido apresentaram resultados de energia absorvida no impacto aproximadamente 65% maiores quando comparado com os corpos de prova que passaram pelo tratamento de austêmpera.

Palavras-chave: Têmpera . Revenido. Austêmpera. Tenacidade. Bainita. Martensita revenida.

ABSTRACT

CASTRO, M. B. **Comparative impact behavior of SAE 4140 steel in quenched and tempered and austempered condition, 2018.** Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

In the traditional literature, comparative studies between the tempered martensite and bainite microstructures indicate that the latter shows better impact properties. There are some recent works that report the opposite. Thus, this work had as objective to study such microstructures and to confirm in which condition SAE 4140 steel presents better toughness. The following heat treatments were performed: austempering with salt bath at temperatures of 375°C and 400°C during 40 minutes; and quenching and tempering. The hardness of each specimen heat treated was similar in order to compare the impact results, varying only the microstructure. Analyzing the impact behavior of each condition and verifying the microstructure produced after each treatment, it was evidenced that the specimens that were quenched and tempered presented results of absorbed energy in the impact approximately 65% higher when compared with the specimens austempered.

Keywords: Quenching. Tempering. Austempering. Toughness. Bainite. Tempered martensite.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Diagrama IT do aço SAE 4140.....	28
Figura 2- Exemplo de diagrama CCT para um aço 0,37% C.....	28
Figura 3- Tratamento de austêmpera esquematizado no diagrama IT.....	29
Figura 4- Microestruturas bainita superior e bainita inferior	31
Figura 5- Influência do teor de carbono: a) na dureza do aço; b) nas temperaturas Mi e Mf ..	32
Figura 6- Dureza Vickers em função dos estágios de revenido	34
Figura 7- Energia de impacto em função da temperatura de revenido para o aço 4140, pelo tempo de 1 hora	34
Figura 8- Dimensões corpo de prova Charpy tipo A.....	37
Figura 9- Diagrama esquemático dos tratamentos de austêmpera	39
Figura 10- Gráfico de energia de impacto em função da temperatura de revenido.....	40
Figura 11- Diagrama esquemático dos tratamentos de têmpera e revenido	40
Figura 12- Pontos de medição da dureza.....	41
Figura 13- Dureza média em cada tratamento térmico.....	45
Figura 14- Energia média absorvida no ensaio Charpy.....	46
Figura 15- Análise macroscópica dos corpos de prova após o ensaio Charpy: A- amostra temperada e revenida; B- amostra austemperada	47
Figura 16- Ataque com reagente Nital 2%. Condição: Austemperado à 400°C por 40 minutos	49
Figura 17- Ataque com reagente LePera. Condição: Austemperado à 400°C por 40 minutos	49
Figura 18- Microestrutura obtida por MEV após austêmpera 400°C.....	50
Figura 19- Ataque com reagente Nital 2%. Condição: Austemperado à 375°C por 40 minutos	51
Figura 20- Ataque com reagente LePera. Condição: Austemperado à 375°C por 40 minutos	51
Figura 21- Microestrutura obtida por MEV após austêmpera 375°C.....	52
Figura 22- Ataque com reagente Nital 2%. Condição: Temperado e duplo revenido (520°C e 530°C). Microestrutura: martensita revenida	53
Figura 23- Ataque com reagente Nital 2%. Condição: Temperado e duplo revenido (460°C e 500°C). Microestrutura: martensita revenida	53
Figura 24- Microestrutura obtida por MEV após a têmpera e revenido.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Faixa de composição química aço SAE 4140	37
Tabela 2- Especificação do sal AS140	38
Tabela 3- Composição química do aço SAE 4140 (%)	43
Tabela 4- Valores de Ms e Bs calculados.....	43
Tabela 5- Valores obtidos após o ensaio de dureza na escala Rockwell C	44
Tabela 6- Energia absorvida no ensaio Charpy	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	25
1.1	Objetivos.....	25
1.1.1	Objetivo Geral.....	25
1.1.2	Objetivos Específicos.....	25
1.2	Justificativa.....	26
2.1	Tratamentos Térmicos.....	27
2.1.1	Diagramas TTT.....	27
2.1.2	Austêmpera.....	29
2.1.2.1	Bainita.....	30
2.1.3	Têmpera Convencional.....	31
2.1.3.1	Revenido.....	33
2.2	Ensaio de Impacto.....	35
2.2.1	Fatura Frágil.....	35
2.2.2	Fatura Dúctil.....	35
3	METODOLOGIA.....	37
3.1	Análise do Material.....	37
3.2	Tratamentos Térmicos.....	38
3.2.1	Austêmpera.....	38
3.2.2	Têmpera e revenimento.....	39
3.3	Ensaio de Dureza.....	41
3.4	Ensaio de Impacto.....	41
3.5	Preparação Metalográfica.....	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1	Análise do Material.....	43
4.1.1	Composição química.....	43
4.1.2	Cálculo de M_s e B_s	43
4.2	Ensaio de Dureza.....	44
4.3	Ensaio de Impacto.....	45
4.4	Análise Microestrutural.....	48
4.4.1	Microestrutura da Austêmpera.....	48
4.4.2	Microestrutura da Têmpera e Revenido.....	52

4.4.3 Observações Finais	54
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	57
6. TRABALHOS FUTUROS	59
REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

Os aços com médio carbono (entre 0,25 e 0,60%p de carbono) são tratados termicamente com o objetivo de melhorar suas propriedades mecânicas. É comum acrescentar elementos de liga como cromo, molibdênio e níquel para uma boa combinação de resistência e ductilidade pós têmpera e revenido. Estes aços são utilizados em peças de máquinas e componentes estruturais de alta resistência, que necessitam de um material com alta resistência e boa tenacidade (CALLISTER, 2012).

O aço SAE 4140, sendo da família 41xx, possui quantidades significativas de cromo (Cr 0,50% ou 0,95%) e molibdênio (Mo 0,12% ou 0,20%). A presença desses elementos melhora a capacidade da liga ser tratada termicamente, melhorando suas propriedades mecânicas (SILVA; MEI, 2010). Esse aço é empregado em peças que exigem elevada dureza, resistência e tenacidade, sendo constantemente usado em automóveis, aviões, eixos, engrenagens, indústria de petróleo, entre outros.

As propriedades mecânicas são determinadas pelas microestruturas presentes e, para um mesmo valor de dureza, microestruturas diferentes podem gerar propriedades diferentes.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho foi verificar a influência de diferentes microestruturas (bainita e martensita revenida) de mesma dureza, no comportamento da tenacidade ao impacto Charpy do aço SAE 4140.

1.1.2 Objetivos Específicos

Este trabalho teve como objetivo obter a microestrutura de bainita inferior para os tratamentos de austêmpera e, para isso, escolheu-se temperaturas baixas (375°C e 400°C), porém não muito próximas de Ms afim de se obter somente a microestrutura bainítica, ou seja, para que não ocorresse a possibilidade de formar martensita sem revenir. Para a visualização das microestruturas formadas foram analisadas imagens em microscopia ótica (MO) e em microscopia eletrônica de varredura (MEV). E, por fim, com o objetivo de comparar a

tenacidade das amostras tratadas (austemperadas e temperadas e revenidas), foi feito o ensaio de dureza na escala Rockwell C para a verificação das durezas e o posterior ensaio de impacto Charpy, o qual permitiu a comparação da energia absorvida de cada amostra.

1.2 Justificativa

O aço SAE 4140 é muito empregado em aplicações que exigem boa tenacidade, sendo realizado o tratamento térmico de austêmpera para melhorar sua resistência ao impacto. A literatura (SILVA; MEI, 2010; BROOKS, 1996; COLPAERT, 2008) indica que este tratamento é o mais indicado para obter tais resultados, sendo que, para uma mesma dureza, a microestrutura bainítica é apontada como sendo a de melhor tenacidade quando comparada com a microestrutura de martensita revenida. Existem alguns trabalhos recentes (NUCCI, 2013; VATAVUK ET AL., 2015; ZUPPO, 2011) que mostram resultados diferentes do esperado, ou seja, os aços que possuem a microestrutura de martensita revenida estão apresentando uma melhor resistência quando submetidos ao impacto comparativamente com aços que possuem a microestrutura bainita. Portanto, há uma controvérsia entre qual é o melhor tratamento para que se obtenha uma melhor tenacidade ao impacto. Com isso, é de grande interesse das indústrias conhecer até que ponto o uso do tratamento térmico de austêmpera fornecerá maiores valores de energia absorvida comparativamente à têmpera e revenido.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tratamentos Térmicos

Tratamentos térmicos são operações de aquecimento e resfriamento controlados realizadas nos materiais com o objetivo de alterar suas propriedades de acordo com a aplicação desejada. Por meio dessas operações ocorre a mudança microestrutural do material, o que afeta diretamente suas propriedades. Durante o aquecimento e o resfriamento, os seguintes parâmetros devem ser considerados: temperatura, tempo, velocidade e meios de resfriamento, podendo-se controlar a mudança da estrutura conforme a variação de tais parâmetros (SILVA; MEI, 2010).

2.1.1 Diagramas TTT

Os tratamentos térmicos são baseados nos diagramas TTT, os quais são divididos em: diagrama IT (*Isothermal Transformation*), que indica a transformação isotérmica; e diagrama CCT (*Continuous Cooling Transformation*), que indica a transformação por resfriamento contínuo. Estes diagramas são afetados pela quantidade de carbono e de liga presente, e também pelo tamanho de grão da austenita (SANTOS; GOLDSTEIN; VATAVUK, 2011).

Na transformação isotérmica, a temperatura se mantém constante enquanto o tempo varia. É este tipo de transformação que se tem no tratamento térmico de austêmpera, por exemplo (FREITAS, 2014). O diagrama IT parte do princípio de que o aço é resfriado a partir da temperatura de austenitização até a temperatura de transformação, de modo que este resfriamento seja rápido o suficiente para que haja o equilíbrio da temperatura antes que ocorra qualquer outra transformação (BROOKS, 1996).

A figura 1 mostra o diagrama IT do aço SAE 4140, o qual foi utilizado neste trabalho.

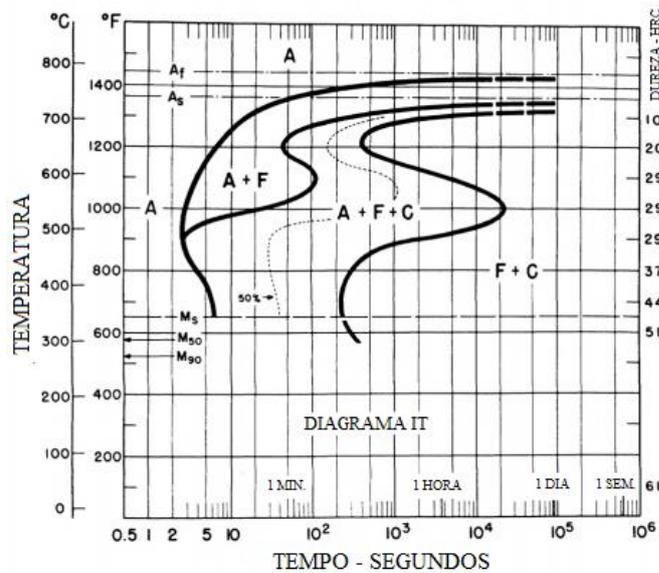


Figura 1- Diagrama IT do aço SAE 4140
Fonte: Brooks, 1996

No caso do tratamento térmico de têmpera, o aço deve ser resfriado continuamente a partir da temperatura de austenitização (REED-HILL, 1982). Para demonstrar essa mudança de temperatura, de forma a considerar diferentes taxas de resfriamento, é necessário conhecer o diagrama CCT do aço estudado, como, por exemplo, o de um aço com 0,37% C exemplificado na figura 2.

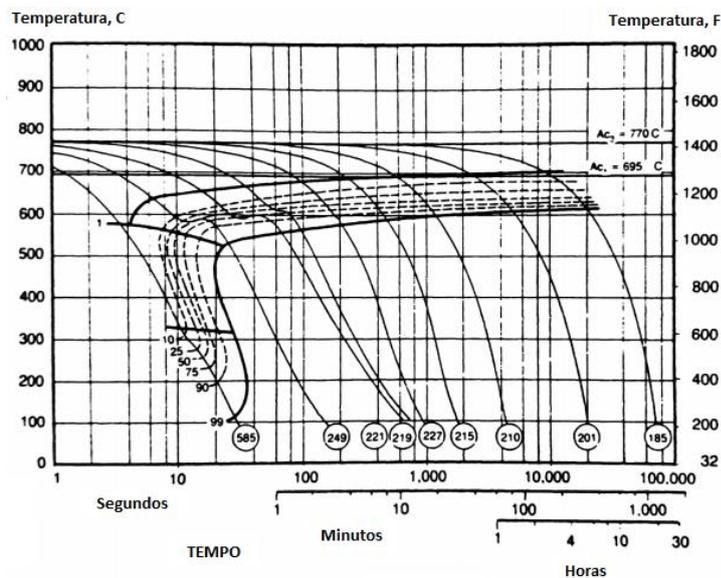


Figura 2- Exemplo de diagrama CCT para um aço 0,37% C
Fonte: Brooks, 1996

Com a utilização desses diagramas é possível prever, num ciclo de aquecimento e resfriamento, as fases que se formam em condições fora do equilíbrio. As diversas

composições e distribuições das fases presentes na microestrutura determinarão as propriedades mecânicas finais do componente de aço.

Assim, a escolha do tratamento térmico a ser utilizado depende dos requisitos de aplicação do componente. Essas propriedades podem variar desde alta ductilidade e pouca dureza até elevada dureza e baixa ductilidade. (SILVA; MEI, 2010)

2.1.2 Austêmpera

A austêmpera é o tratamento isotérmico que visa a obtenção da estrutura denominada bainita através da transformação isotérmica do aço em temperaturas abaixo da formação de perlita e acima da formação de martensita. (ASM Handbook, 1991)

Este tratamento consiste no aquecimento do aço até a temperatura de austenitização, seguido de um resfriamento em banho de sal ou chumbo, onde ocorre a transformação da austenita em bainita, e por fim é deixado para resfriar ao ar até a temperatura ambiente. Os aços utilizados para austêmpera devem ser selecionados segundo a análise de sua curva IT. A figura 3 esquematiza o ciclo de resfriamento para a formação da bainita através da curva IT do aço. Percebe-se que para a aplicação da austêmpera ser bem sucedida a localização do “nariz” da curva e o tempo para finalizar a transformação são de grande importância (SILVA; MEI, 2010).

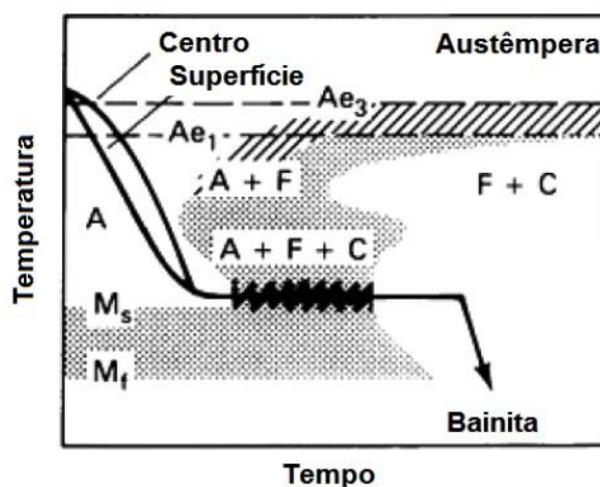


Figura 3- Tratamento de austêmpera esquematizado no diagrama IT
Fonte: Adaptado de ASM Handbook, 1991

A austêmpera possui como vantagens: aumento da ductilidade e tenacidade, redução da distorção e menor tempo de ciclo para endurecimento dentro de uma dureza de 35 a 55 HRC (ASM Handbook, 1991).

Com isso, este tratamento é baseado no fato de que, para uma mesma dureza, a bainita possui propriedades mecânicas mais favoráveis do que a martensita revenida (BROOKS, 1996).

Entretanto, estudos recentes mostram que o aço temperado e revenido apresenta melhor comportamento em termos de tenacidade ao impacto do que o aço austemperado. Segundo o trabalho de Nucci (2013) há uma supremacia da microestrutura de martensita revenida quando comparada à microestrutura bainítica, para os aços SAE 4140 e SAE O1. Vatavuk et al (2015) também mostram resultados de tenacidade superiores para a microestrutura martensita revenida.

2.1.2.1 Bainita

A bainita é um microconstituente composto de uma mistura refinada de ferrita e cementita. Existem dois tipos de bainita: a bainita superior, formada a temperaturas mais altas, e a bainita inferior, formada a temperaturas mais baixas. Com uma temperatura de formação mais baixa há o aumento da dureza. (ASM Handbook, 2004)

A bainita superior é composta por blocos formados por finas agulhas de ferrita. Dentro dos blocos essas agulhas são orientadas e paralelas. Sua formação é dada primeiramente pela formação das agulhas de ferrita, seguida da precipitação da cementita entre essas agulhas (SILVA; MEI, 2010).

Na bainita inferior, a cementita precipita dentro e entre as agulhas de ferrita, pois, devido a sua baixa difusão pelas temperaturas menores, o carbono não consegue se difundir totalmente para a austenita adjacente. Essa baixa difusão do carbono faz com que os carbonetos precipitados sejam mais finos, o que atribui uma maior tenacidade à bainita inferior, uma vez que os precipitados mais grosseiros na bainita superior facilitam a nucleação de trincas (SILVA; MEI, 2010).

Na figura 4 a seguir são esquematizadas ambas as microestruturas.

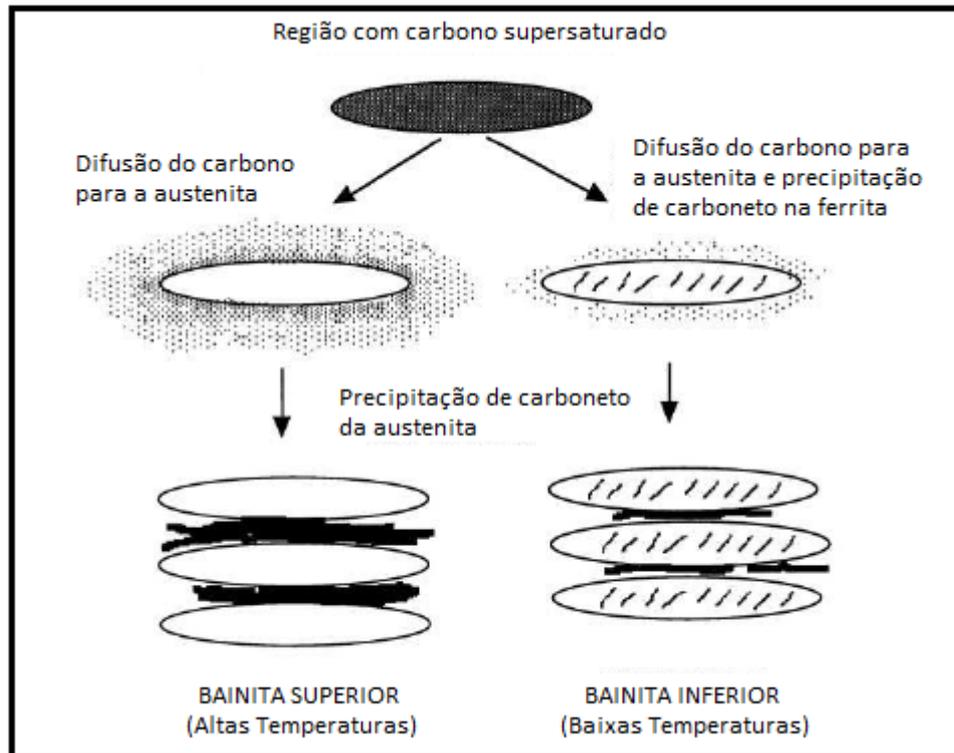


Figura 4- Microestruturas bainita superior e bainita inferior

Fonte: BHADESHIA, 2015

Como, na bainita superior, o carboneto precipita somente entre os blocos de ferrita, há uma tendência na formação de uma rede contínua de cementita, que liga todos os contornos de grão. Essa rede irá fragilizar o aço e isso pode ser evitado utilizando uma temperatura de transformação mais baixa (BHADESHIA, 2015)

Com isso, normalmente o que se objetiva na austêmpera é a obtenção da bainita inferior formada a temperaturas próximas de M_s , pois esta possui melhor tenacidade.

2.1.3 Têmpera Convencional

A têmpera é o tratamento térmico em que o aço é aquecido até a temperatura de austenitização e, em seguida, é resfriado rapidamente a fim de evitar transformações perlíticas e bainíticas, obtendo-se assim a estrutura metaestável martensita (SILVA; MEI, 2010).

A distribuição de dureza e a profundidade de endurecimento dependem de alguns fatores, como o tamanho e forma da peça, o meio de têmpera, a temperabilidade do aço e a temperatura de austenitização (COLPAERT, 2008).

A temperabilidade é a capacidade que um aço tem de transformar a austenita em martensita, parcialmente ou totalmente, até certa profundidade, quando resfriado sob determinadas condições (KRAUSS, 1990). Está relacionada à velocidade crítica de têmpera, que é a menor velocidade de resfriamento para obter a transformação martensítica, determinada a partir das curvas CCT (COLPAERT, 2008).

O teor de carbono influencia tanto na dureza quanto nas temperaturas de início e fim da martensita (figura 5). Já os elementos de liga adicionados ao aço tendem a retardar a decomposição difusional da austenita, resultando em uma velocidade crítica menor, ou seja, aumentando sua temperabilidade (COLPAERT, 2008).

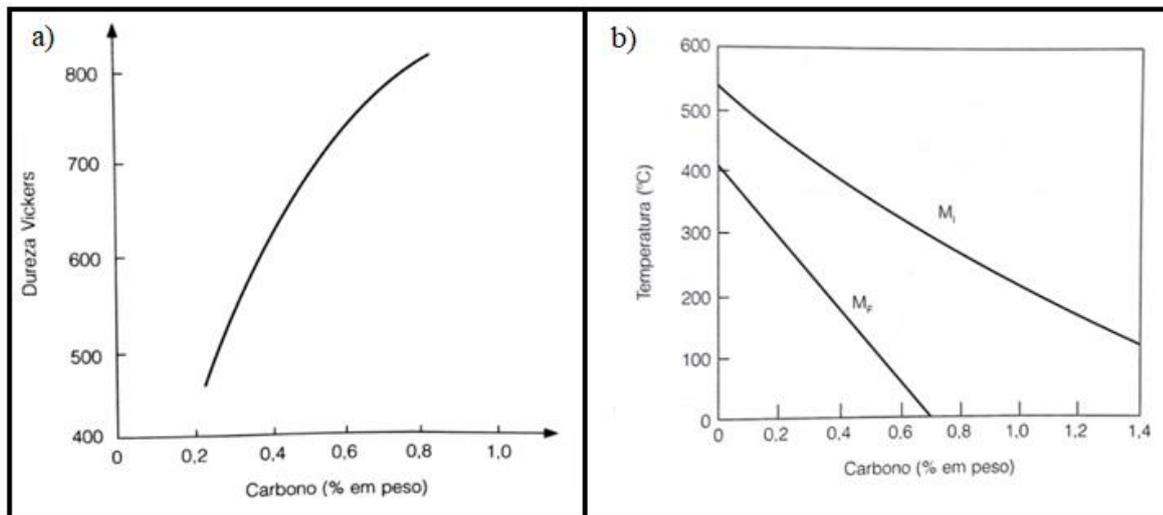


Figura 5- Influência do teor de carbono: a) na dureza do aço; b) nas temperaturas M_i e M_f
Fonte: SILVA; MEI, 2010

A taxa de resfriamento na têmpera depende da severidade do meio de resfriamento (capacidade de extrair calor). Os meios mais utilizados são: água, salmoura, óleo e ar, porém alguns meios gasosos também podem ser empregados. A escolha de um ou outro meio é baseada na velocidade crítica de resfriamento necessária àquele aço.

Entretanto, dependendo da severidade do resfriamento na têmpera surgem gradientes de temperatura entre o centro e a superfície da peça. Quanto maior a severidade do meio, maior será o gradiente. As tensões internas, que surgem na peça temperada, são devidas a estes gradientes (SILVA; MEI, 2010). Assim, existe um compromisso entre a severidade adequada para a obtenção da martensita e a necessidade de minimizar as tensões responsáveis pelas distorções e trincas.

A transformação martensítica ocorre sem difusão significativa, ou seja, esta transformação não está associada à mudança de composição química, e sim à mudança de estrutura

cristalina. Como em baixas temperaturas os átomos têm baixa mobilidade, o movimento dos átomos são coordenados, ocorrendo as transformações “militares” (COLPAERT, 2008).

A formação de martensita é dada em velocidades muito rápidas e em formas alongadas de “ripas” ou “placas”. O rápido crescimento de placas nucleadas permite seu alongamento ao invés do aumento de sua espessura. A interrupção do crescimento é devido ao encontro de obstáculos como os contornos de grão austenítico e as placas que já foram formadas anteriormente (COLPAERT, 2008).

A martensita é um constituinte que possui alta dureza, sendo, normalmente, submetida ao tratamento de revenimento para que haja o aumento de ductilidade e redução das tensões através da precipitação de carbonetos a partir do carbono que sai da solução supersaturada (COLPAERT, 2008).

2.1.3.1 Revenido

A estrutura martensítica possui alta dureza, porém sua tenacidade é baixa. O revenido tem como objetivo melhorar a tenacidade do aço sem grandes alterações em sua dureza. A estrutura formada após o revenimento é a martensita revenida (BROOKS, 1996).

No tratamento térmico de revenido, o aço é aquecido até uma temperatura abaixo da zona crítica, mantido nesta temperatura até que se obtenham as propriedades desejadas e, em seguida, é deixado ao ar para esfriar. Com isso há um alívio das tensões causadas pela têmpera.

Observa-se, na figura 6 a seguir, que com o revenimento há uma diminuição da dureza do aço. Isso se deve ao fato de que os átomos de carbono que estavam supersaturando a martensita (devido à estrutura metaestável) se difundem e precipitam como carbonetos, o que leva à diminuição da dureza (SILVA; MEI, 2010). Entretanto, em aços com alto teor de elementos de liga pode acontecer um aumento na dureza durante o revenido, chamado de endurecimento secundário, mas isso não se verifica no aço SAE 4140.

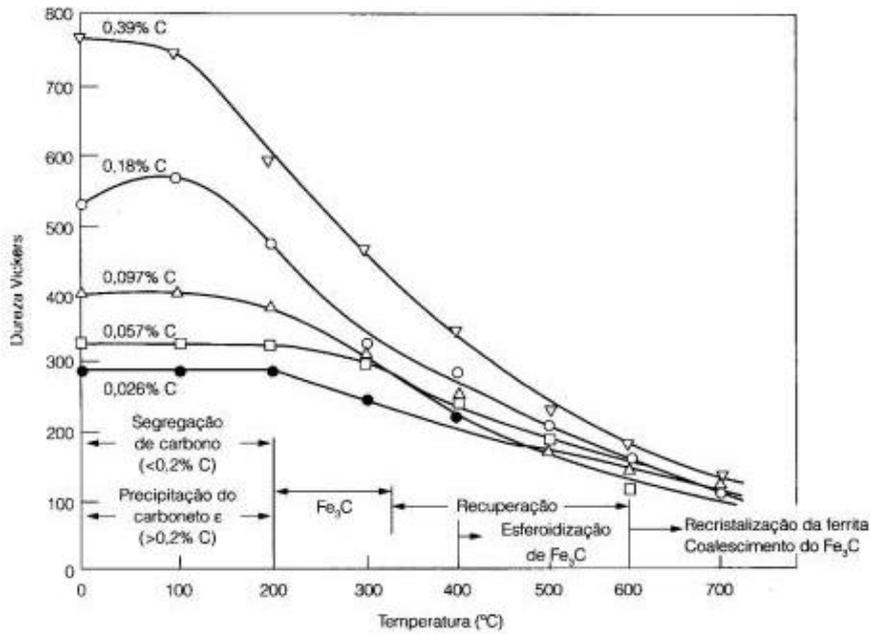


Figura 6- Dureza Vickers em função dos estágios de revenido
Fonte: SILVA; MEI, 2010

Com a diminuição da dureza é esperado um crescente aumento na ductilidade e tenacidade. Entretanto, muitos aços apresentam uma redução da tenacidade em determinadas temperaturas. Esse fenômeno é devido à fragilidade da martensita revenida. Na figura 7, gráfico de energia de impacto versus temperatura de revenido do aço SAE 4140 mostra um decaimento na energia de impacto entre as temperaturas de 260°C e 320°C (ASM Handbook, 1991).

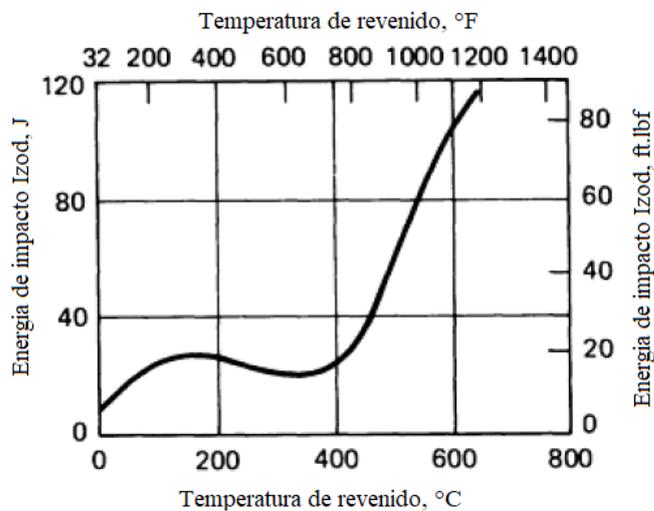


Figura 7- Energia de impacto em função da temperatura de revenido para o aço 4140, pelo tempo de 1 hora

Fonte: ASM Handbook, 1991

A fratura na fragilidade da martensita revenida é intergranular, ocorrendo nos antigos contornos de grãos da austenita. Isso se deve à segregação de impurezas (elementos como antimônio, estanho e fósforo) nos contornos e também está associado à morfologia da cementita (BROOKS, 1996). As impurezas mais prejudiciais são: estanho, fósforo, antimônio e arsênico, que, mesmo em pequenas quantidades, podem causar a fragilidade do revenido. Manganês e silício em grandes quantidades também podem causar este fenômeno (KRAUSS, 2005). Assim, durante o revenido é importante que se evite essa faixa de temperatura.

2.2 Ensaio de Impacto

O ensaio de impacto é o mais empregado para a determinação da tendência do comportamento à fratura de um material.

Quanto maior a energia absorvida, menos frágil é o material. Normalmente esses ensaios são feitos em uma ampla faixa de temperatura para que se determine a temperatura de transição dúctil-frágil. Comportamentos frágeis levam a falhas catastróficas, indicando que a microestrutura não tem capacidade de amortecer o crescimento de trincas.

2.2.1 Fratura Frágil

Na fratura frágil há uma rápida propagação da trinca, fazendo com que não haja uma deformação significativa no material. A superfície da fratura se dá de forma relativamente plana, uma vez que a direção da propagação da trinca é aproximadamente perpendicular à direção da tensão aplicada (CALLISTER, 2012).

A fratura frágil pode ser transgranular, que é quando ocorre o processo de clivagem, ou seja, a trinca se propaga pela quebra sucessiva e repetida de ligações atômicas ao longo de planos cristalográficos específicos. Outro tipo de fratura frágil é a intergranular, que é quando a trinca se propaga ao longo dos contornos dos grãos (CALLISTER, 2012).

2.2.2 Fratura Dúctil

Na fratura dúctil há uma deformação plástica do material antes de fraturar. Este tipo de fratura ocorre em vários estágios: primeiro, após o início da formação do empescoamento, microvazios se formam na seção transversal do material; em seguida, conforme a deformação continua, estes microvazios se tornam cada vez maiores até que coalescem e formam uma

trinca elíptica; este processo de coalescência continua, resultando no crescimento da trinca até que ocorre a fratura pela rápida propagação de uma trinca ao redor do contorno externo do pescoço, por meio de uma deformação cisalhante à aproximadamente 45° em relação ao eixo de tração (CALLISTER, 2012).

Quando o metal é muito dúctil, apresentam uma grande deformação plástica, sendo que no seu rompimento, as partes ficam separadas somente por um ponto ou gume (SOUZA, 1982).

3 METODOLOGIA

3.1 Análise do Material

O material utilizado neste trabalho foi o aço SAE 4140, o qual possui quantidades significativas de Cr e Mo, conforme mostra a tabela 1.

Tabela 1- Faixa de composição química aço SAE 4140

%C	%Mn	%Si	%Cr	%Mo	%Ni
0,38 - 0,43	0,75 - 0,90	0,15 - 0,30	0,90 - 1,10	0,15 - 0,25	<0,08

Fonte: ArcelorMittal

Como a composição química do material pode haver variações dependendo do fornecedor, 3 amostras do material foram submetidas a uma análise da composição química pelo método Fe-10-F da Spectro, na FATEC em Sertãozinho.

Para a realização do ensaio de impacto Charpy, as amostras foram usinadas conforme as especificações da norma ASTM E-23 para a fabricação dos corpos de prova Charpy tipo A (figura 8).

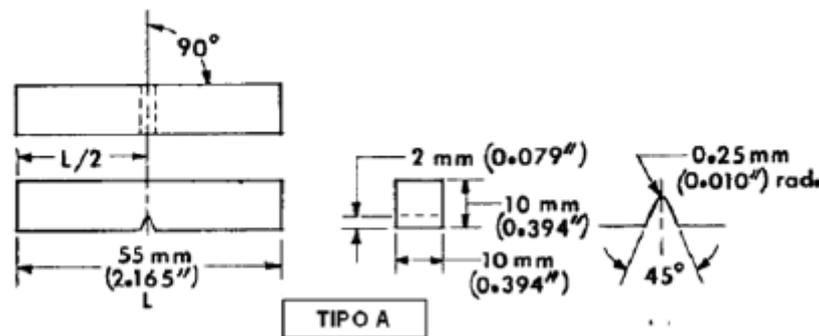


Figura 8- Dimensões corpo de prova Charpy tipo A
Fonte: ASTM E-23

Inicialmente, os 12 corpos de provas foram usinados nas dimensões 10 mm x 10 mm x 55 mm. O entalhe foi usinado somente após a realização dos tratamentos térmicos, pois ele se comporta como um concentrador de tensões, havendo a possibilidade da formação de trincas durante a realização dos tratamentos.

O diagrama IT do aço SAE 4140 (figura 1 da revisão bibliográfica) foi utilizado como base para a definição dos parâmetros para a realização do tratamento isotérmico de

austêmpera. É possível verificar que a faixa de transformação bainítica fica entre 320°C a 550°C aproximadamente. Como o que se desejava era a obtenção de bainita inferior, as temperaturas mais adequadas seriam as mais próximas de Ms, porém acima dessa temperatura. A temperatura Ms é função da composição química. Assim para verificar quão perto 320°C está de Ms, fez-se o cálculo desta temperatura, utilizando a equação empírica abaixo (ZUPPO, 2011):

$$Ms (\text{°C}) = 539 - 423 \text{ C\%} - 30,4 \text{ Mn\%} - 17,7 \text{ Ni\%} - 12,1 \text{ Cr\%} - 7,5 \text{ Mo\%} \quad (1)$$

A temperatura de início de formação da bainita (Bs) foi calculada por meio da equação empírica abaixo (CLARK, 2013), sendo possível a comparação com o diagrama IT.

$$Bs (\text{°C}) = 630 - 45 \text{ Mn\%} - 40 \text{ V\%} - 35 \text{ Si\%} - 30 \text{ Cr\%} - 25 \text{ Mo\%} - 20 \text{ Ni\%} - 15 \text{ W\%} \quad (2)$$

3.2 Tratamentos Térmicos

Os tratamentos térmicos foram realizados pela empresa *Durferrit do Brasil Química LTDA*, localizada na cidade de Diadema – SP.

Dos 12 corpos de prova, 6 passaram pelo tratamento térmico de austêmpera e os outros 6 passaram por têmpera e revenimento.

3.2.1 Austêmpera

Foram realizados dois tratamentos de austêmpera, submetendo-se 3 corpos de prova para cada tratamento. Em ambos, a austenitização foi feita a uma temperatura de 860°C, no forno Muffla em atmosfera de Argônio 270 mL/min, e o sal utilizado para a austêmpera foi o AS140, fornecido pela própria *Durferrit do Brasil Química LTDA* e especificado na tabela 2.

Tabela 2- Especificação do sal AS140

Sal	Ponto de fusão (°C)	Composição	Concentração (%)
AS140	138	Nitrito de sódio	≥ 25
		Nitrato de sódio	≥ 10

Fonte: Próprio Autor

As temperaturas dos banhos de sal foram definidas de acordo com os valores de Ms e Bs calculados, sendo 400°C e 375°C as temperaturas escolhidas para o tratamento. O tempo de austêmpera definido foi de 40 minutos para ambos os tratamentos.

Na figura 9 estão esquematizados os tratamentos de austêmpera realizados:

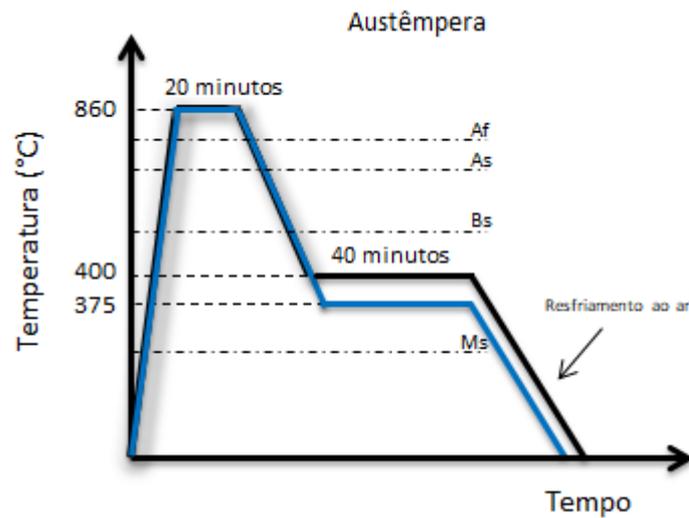


Figura 9- Diagrama esquemático dos tratamentos de austêmpera

Fonte: Próprio Autor

3.2.2 Têmpera e revenimento

Os outros 6 corpos de prova restantes passaram pelos tratamentos de têmpera e revenimento.

Na têmpera, a temperatura de austenitização também foi de 860°C. Houve um resfriamento no sal AS140 fundido à 160°C por 30 segundos e, em seguida, os corpos de prova foram deixados para resfriar ao ar.

Após a realização do tratamento de austêmpera, verificaram-se as durezas obtidas e assim pode-se definir as temperaturas de revenimento. Sabendo-se os valores de dureza, foi necessário definir as temperaturas de revenido de modo que não estivessem dentro da faixa de fragilidade da martensita revenida, levantada em trabalho anterior (Nucci, 2013). A figura 10 relaciona a energia de impacto para diferentes temperaturas de revenido para o aço SAE 4140.

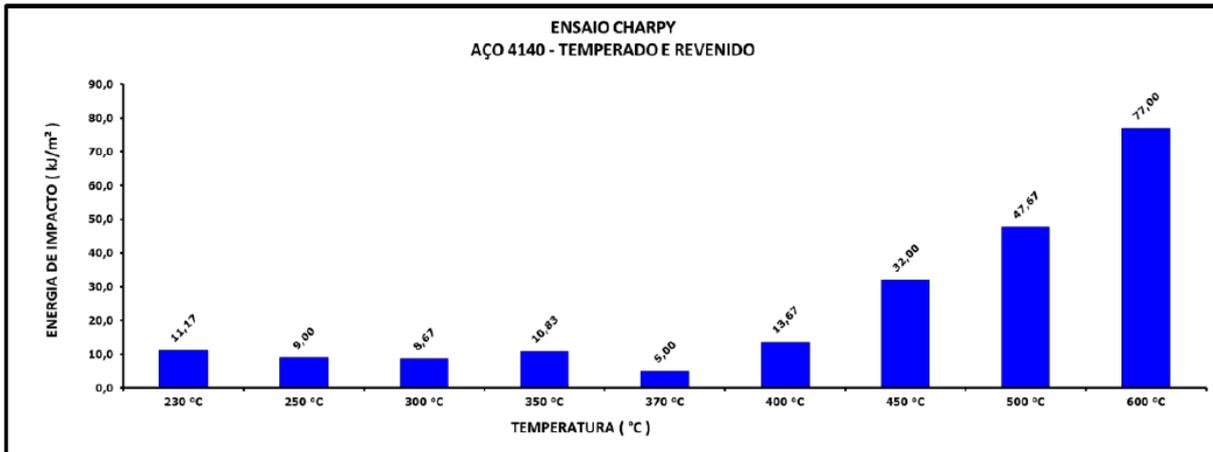


Figura 10- Gráfico de energia de impacto em função da temperatura de revenido
Fonte: NUCCI, 2013

Assim, de modo a evitar a faixa de fragilidade da martensita revenida, foi realizado duplo revenido em ambos os tratamentos. Em 3 corpos de provas, os revenidos foram feitos nas temperaturas de 460°C e 500°C. Nos 3 corpos de prova restantes, as temperaturas de revenido utilizadas foram de 520°C e 530°C.

Na figura 11 estão esquematizados os tratamentos de têmpera e revenido realizados:

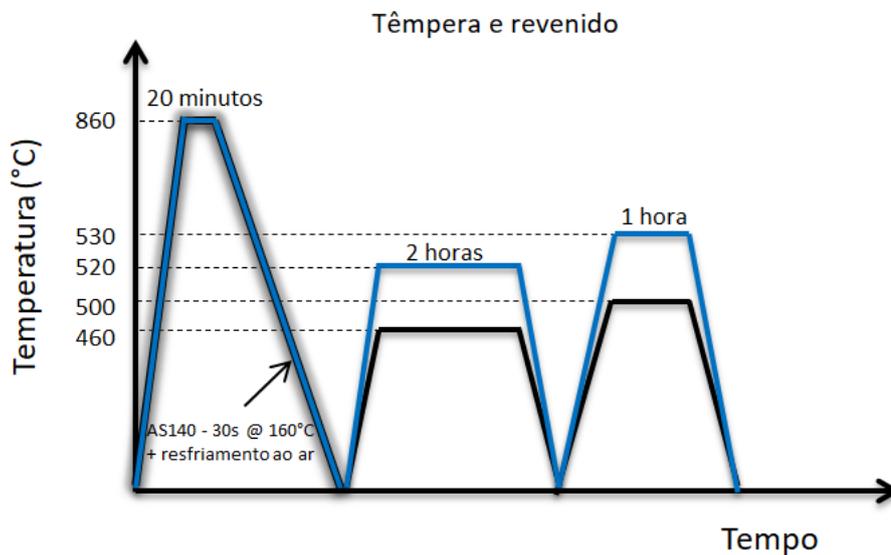


Figura 11- Diagrama esquemático dos tratamentos de têmpera e revenido
Fonte: Próprio Autor

O ciclo em azul foi feito para atingir a dureza obtida na austêmpera realizada a 375°C, enquanto que o ciclo em preto foi realizado para atingir a dureza obtida na austêmpera a 400°C.

3.3 Ensaio de Dureza

Os 12 corpos de prova passaram por um ensaio de dureza, realizado na máquina *Lecco RT-240 Hardness Tester*.

Utilizou-se a escala de dureza Rockwell C e os valores foram medidos em cinco pontos na superfície das amostras e em dois pontos ao longo de sua seção, conforme ilustrado na figura 12:

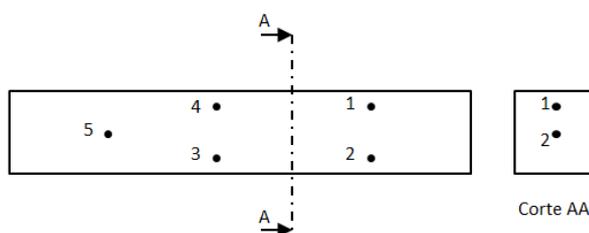


Figura 12- Pontos de medição da dureza
Fonte: Próprio Autor

3.4 Ensaio de Impacto

Após a realização dos tratamentos térmicos, fez-se a usinagem do entalhe para, posteriormente, realizar o ensaio de impacto a fim de obter as energias absorvidas por cada amostra previamente tratada.

Neste ensaio o corpo de prova é entalhado de maneira a produzir um estado triaxial de tensões possibilitando a fratura do corpo de prova. Entalhes mais profundos tendem a causar uma ruptura de caráter frágil, sendo utilizados para mostrar as diferentes energias absorvidas nos ensaios de metais que possuem um caráter mais dúctil.

Neste ensaio um martelo pendular é solto e atinge o corpo de prova Charpy, apoiado na máquina de ensaio, no lado oposto ao entalhe. Uma vez rompido o corpo de prova, o martelo sobe até certa altura. Quanto mais alto o martelo subir após o rompimento, menor será a energia absorvida pelo corpo de prova. A energia absorvida é lida diretamente na máquina (SOUZA, 1982).

Os procedimentos do ensaio de impacto Charpy foram feitos de acordo com a norma ASTM E23. O ensaio foi realizado na FATEC - Sertãozinho, utilizando-se uma máquina de teste de impacto marca *TIME GROUP INC*, modelo *JB-W300A*, com o martelo de 300J.

3.5 Preparação Metalográfica

Com os resultados dos ensaios de dureza e de impacto, foi necessário realizar uma análise das microestruturas formadas em cada tratamento térmico.

Para a preparação metalográfica das amostras, utilizaram-se os corpos de prova fraturados no ensaio Charpy. Primeiramente, foram cortadas pequenas amostras na máquina *Arotec – Arocor 60*, com refrigeração e 3250 rpm.

As amostras cortadas foram embutidas em baquelite na prensa de embutimento metalográfico *Arotec Pre-30S*. Em seguida, iniciou-se o lixamento utilizando-se a sequência de lixas: 120, 320, 500, 800, 1200, 1500, 2000 e 2500. Por fim, as amostras foram polidas com alumina 1 μ , na politriz *TECLAGO – PL 02 ETD*.

Para as amostras temperadas e revenidas, o reagente utilizado no ataque químico foi o Nital 2%. Já as amostras austemperadas foram atacadas com dois reagentes diferentes: Nital 2% e LePera modificado (metabissulfito de sódio a 0,5% e picral 2%).

Uma das aplicações do nital é na revelação de características da bainita e martensita, escurecendo estas microestruturas. Entretanto, quando há microestruturas multifásicas a observação pelo microscópio óptico se torna mais complicada utilizando este ataque (SOUZA, 2008).

O LePera é um reagente utilizado no ataque químico de metalografia colorida. Este ataque revela a bainita preta ou marrom escura, a ferrita castanho-amarelada, a martensita e a austenita retida brancas (SPEER; MATLOCK, 2003).

Após a realização dos ataques foram feitas imagens das microestruturas por meio do microscópio óptico Axio Vert.A1 Zeiss.

Para a observação mais precisa das microestruturas, foram feitas imagens por meio do microscópio eletrônico de varredura MEV-FEG FEI Magellan 400L, utilizando as amostras atacadas com nital 2%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise do Material

4.1.1 Composição química

A análise da composição química mostrou valores esperados para o aço SAE 4140. A tabela 3 mostra os resultados dos constituintes do aço e sua porcentagem para três amostras.

Tabela 3- Composição química do aço SAE 4140 (%)

Elemento	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	Desvio
C	0,43	0,42	0,39	0,41	0,02
Si	0,23	0,23	0,22	0,22	0,00
Mn	0,88	0,88	0,86	0,87	0,01
P	0,02	0,02	0,01	0,02	0,00
S	0,03	0,03	0,03	0,03	0,00
Cr	1,02	1,01	1,00	1,01	0,01
Mo	0,15	0,15	0,15	0,15	0,00
Ni	0,14	0,14	0,14	0,14	0,00
Fe	96,80	96,80	96,90	96,83	0,06

Fonte: Próprio Autor

4.1.2 Cálculo de M_s e B_s

Com as quantidades de cada constituinte do aço obtidas pela análise da composição química, foi possível realizar o cálculo da temperatura M_s e da temperatura B_s , utilizando, respectivamente, as equações 1 e 2. Os valores destas temperaturas estão relacionados na tabela 4:

Tabela 4- Valores de M_s e B_s calculados

Amostra	M_s (°C)	B_s (°C)
1	316,4	545
2	317,9	545,5
3	331,4	546,9
Média	321,9	545,8
Desvio	6,3	0,7

Fonte: Próprio Autor

Por meio destes resultados foi possível verificar que as temperaturas utilizadas nos tratamentos de austêmpera estão dentro da faixa de formação de bainita para o aço em questão, o que pode ser confirmado na figura 1 da revisão bibliográfica.

Com os valores da temperatura Bs tem-se uma noção do início da formação de bainita superior, logo espera-se que as temperaturas utilizadas, de 375°C e 400°C, tenham como microestruturas resultantes próximas à bainita inferior.

4.2 Ensaio de Dureza

Os resultados obtidos pelo ensaio de dureza estão representados na tabela 5 e na figura 13.

Tabela 5- Valores obtidos após o ensaio de dureza na escala Rockwell C

Dureza (HRC)					
Tratamento	Amostra	Média Superfície	Média Centro	Média Total	Desvio
Austêmpera 400°C	1	36,5	36,9	36,55	0,47
	2	36,68	35,7		
	3	36,48	37,05		
Têmpera e revenido (460°C e 500°C)	1	39,46	39,8	39,11	0,78
	2	39,6	39,6		
	3	38,12	38,1		
Austêmpera 375°C	1	39,04	38,7	38,69	0,40
	2	38,16	39,25		
	3	38,52	38,45		
Têmpera e revenido (520°C e 530°C)	1	41,18	41,5	41,11	0,61
	2	40,66	41,5		
	3	40,12	41,7		

Fonte: Próprio Autor

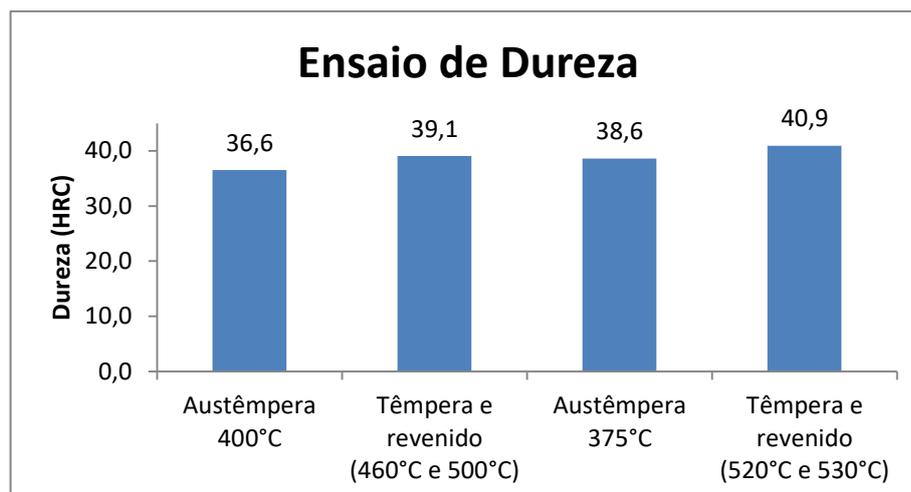


Figura 13- Dureza média em cada tratamento térmico

Fonte: Próprio Autor

Os resultados de dureza obtidos mostram que os tratamentos de têmpera e revenido apresentaram valores bem próximos, ainda que um pouco superiores, aos valores obtidos pelos tratamentos de austêmpera. Sendo assim, o comportamento ao impacto de cada microestrutura pode ser comparado.

4.3 Ensaio de Impacto

Os resultados de energia absorvida obtidos pelo ensaio Charpy estão relacionados na tabela 6 e figura 14:

Tabela 6- Energia absorvida no ensaio Charpy

Tratamento	Amostra	Energia (J)	Energia Média (J)	Desvio (J)	Dureza Média (HRC)	Desvio (HRC)
Austêmpera 400°C	1	20	18,7	0,9	36,55	0,47
	2	18				
	3	18				
Têmpera e revenido	1	54	55,7	2,2	39,11	0,78
	2	59				
	3	54				
Austêmpera 375°C	1	18	16,0	4,0	38,69	0,40
	2	10				
	3	20				
Têmpera e revenido	1	46	46,0	1,3	41,11	0,61
	2	48				
	3	44				

Fonte: Próprio Autor

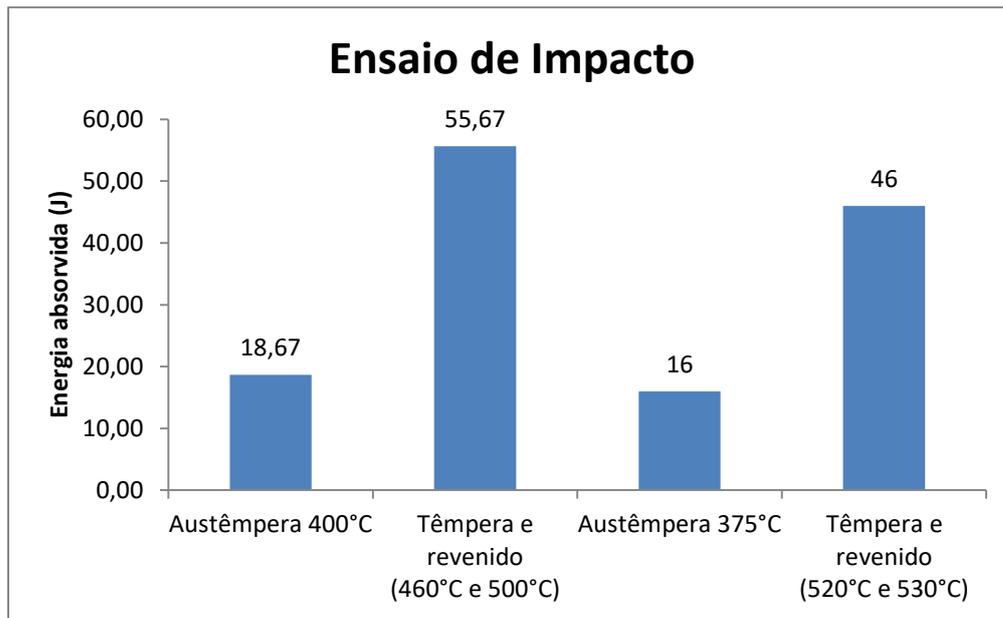


Figura 14- Energia média absorvida no ensaio Charpy
Fonte: Próprio Autor

Analisando os resultados obtidos, observa-se que as amostras austemperadas apresentaram um valor de energia de impacto aproximadamente 3 vezes menor do que as amostras temperadas e revenidas.

A figura 15 mostra uma análise macroscópica da fratura ocorrida nos corpos de prova após o ensaio de impacto Charpy. É nítido que a amostra temperada e revenida (A) apresentou uma região de deformação plástica na região da fratura, enquanto que a amostra austemperada (B) mostrou pouca deformação na área fraturada. Isso indica que a amostra temperada e revenida se comportou de modo mais tenaz do que a amostra austemperada, uma vez que nesta última condição não ocorreu a propagação da trinca formada, resultando em quase nenhuma deformação plástica antes da fratura.

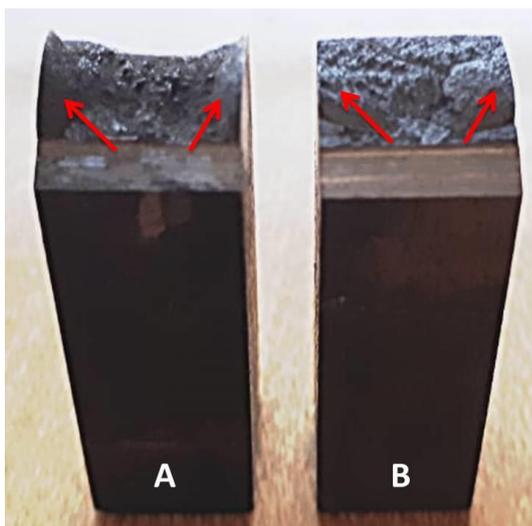


Figura 15- Análise macroscópica dos corpos de prova após o ensaio Charpy: A- amostra temperada e revenida; B- amostra austemperada
Fonte: Próprio Autor

Os resultados obtidos neste trabalho se mostraram contrários às afirmações presentes na literatura tradicional. Callister (2012), Silva e Mei (2010), Brooks (1996), Krauss (1990) e Barreiro (1985) afirmam que, para uma mesma dureza, a microestrutura bainita apresenta tenacidade superior comparada com a microestrutura martensita revenida.

Porém, existem alguns trabalhos que apresentam resultados similares aos obtidos no presente trabalho. Nucci (2013), em sua dissertação de mestrado, comparou os aços SAE 4140 e SAE O1 nas condições austemperados e temperados e revenidos com ou sem banho criogênico. Em seu trabalho, estudou a faixa de fragilidade da martensita revenida e, para fazer a comparação dos tratamentos, evitou-se o revenido nesta faixa. Com isso, confirmou a supremacia da microestrutura martensita revenida sobre a microestrutura bainita.

Vatavuk et al. (2015) mostraram que, para o aço O1, a martensita revenida, mesmo com uma dureza superior de 52 HRC, obteve uma energia absorvida ao impacto Charpy maior do que a bainita de dureza 40 HRC.

Outro trabalho que apresenta um resultado semelhante ao obtido neste trabalho é a dissertação de mestrado de Zuppo (2011). Ele estudou o comportamento do aço SAE 4140 nas condições temperado e revenido e austemperado com ou sem conformação a frio. A microestrutura martensita revenida, quando a faixa de fragilidade da martensita revenida é evitada, apresentou maior energia absorvida no impacto comparada com a microestrutura bainita.

Em contrapartida, no ASM Handbook (1991, p. 376) está indicando que a austêmpera é aplicável em aços com seções não muito espessas que necessitam de uma boa tenacidade na faixa de dureza de 40 a 50 HRC.

Silva e Mei (2010, p. 134), Brooks (1996, p. 252), Krauss (1990, p. 268) e Barreiro (1985, p. 282) mostram exemplos em que a bainita apresenta melhor tenacidade do que a martensita revenida. Porém, em todos os exemplos, a dureza obtida está em torno de 50 HRC, comprovando o que indica no ASM Handbook.

No presente trabalho a dureza média das amostras ficou abaixo de 40 HRC, portanto, fora da faixa prevista acima. Porém, esta faixa de dureza (aproximadamente 40 HRC) não está bem definida e divulgada entre a literatura tradicional, sendo mais comum encontrar a informação da supremacia bainítica sem indicação da faixa de dureza.

Os estudos destes tratamentos são muito importantes para oferecer subsídios nos casos industriais onde a utilização de um determinado tratamento leva em conta fatores econômicos e de desempenho, sendo uma decisão estratégica de muitas empresas. Por isso é interessante o conhecimento do intervalo no qual a estrutura bainita se sobressai sobre a martensita revenida.

Seria de fundamental importância que se verificasse nos trabalhos onde a bainita se apresentou com melhor comportamento ao impacto, se a microestrutura de martensita revenida que serviu de comparação não teve o seu revenimento feito dentro da faixa de fragilidade, o que por certo derrubaria os valores de energia absorvida.

4.4 Análise Microestrutural

4.4.1 Microestrutura da Austêmpera

Nas micrografias reveladas no ataque com nital, a diferença das regiões marrom claro e branca não ficou muito nítida, dificultando a caracterização das fases formadas além da bainita.

Os ataques com LePera revelaram a bainita na cor marrom escuro e claro (quando em altas quantidades), a martensita e austenita retida em tonalidades mais claras. A identificação da bainita se mostrou bastante eficaz por meio deste reagente.

A figura 16 mostra, através do ataque com Nital 2%, a microestrutura formada no tratamento térmico de austêmpera a 400°C. É possível identificar em preto e marrom a

formação da estrutura bainita, apresentando ripas mais espessas em diferentes orientações cristalográficas.

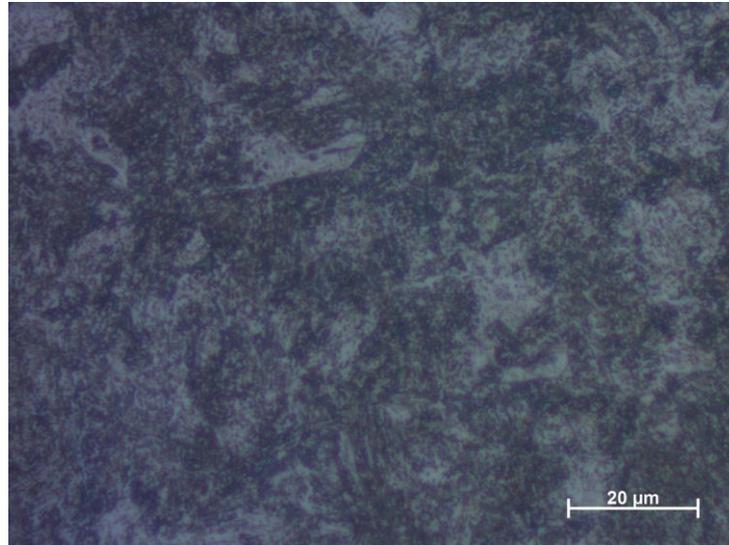


Figura 16- Ataque com reagente Nital 2%. Condição: Austemperado à 400°C por 40 minutos

Na figura 17 é mostrada a microestrutura formada na austêmpera a 400°C, revelada pelo reagente Le Pera. É possível identificar em marrom claro e escuro a formação da estrutura bainita. As regiões que estão mais claras (quase branco) podem caracterizar martensita, porém não é possível concluir com certeza, por meio da rota de tratamento utilizada, que esta microestrutura foi formada.

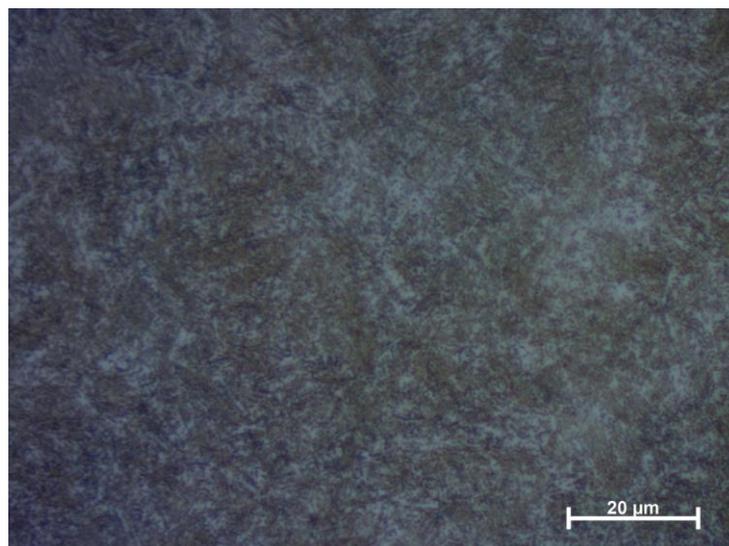


Figura 17- Ataque com reagente LePera. Condição: Austemperado à 400°C por 40 minutos

Utilizando a microscopia eletrônica de varredura foi possível obter uma visualização melhor da microestrutura formada após a austêmpera a 400°C. A figura 18 mostra a imagem obtida. Observa-se uma grande proporção de bainita.

O diagrama IT do aço SAE 4140 mostra que nesta temperatura, aproximadamente 20 minutos já são suficientes para obter a completa transformação da austenita em bainita, logo os 40 minutos utilizados para a austêmpera deveriam garantir que nenhuma martensita tenha sido formada. Com isso, como não foi possível distinguir a formação de martensita pela microscopia, não se pode inferir que há a presença desta microestrutura. No entanto, mesmo que a martensita tenha sido formada, para justificar os valores obtidos de energia absorvida, a microestrutura deveria aparecer mais claramente e em maior proporção, o que não foi o caso.

Caso haja a presença de certa quantidade de martensita junto à bainita, pode ser devida aos efeitos de segregação dos elementos de liga presentes no aço. Os carbonetos dos elementos de liga, como Cr, Mo e Mn tendem a segregar em regiões intercelulares. Nestas regiões de segregação, a reação bainítica, associada com a decomposição da austenita em ferrita e carboneto, se torna mais lenta; portanto, a transformação não é completa durante o tempo de tratamento. Com o resfriamento, essas regiões não transformadas podem formar estruturas martensíticas (NAGARAJAN ET AL, 2017).

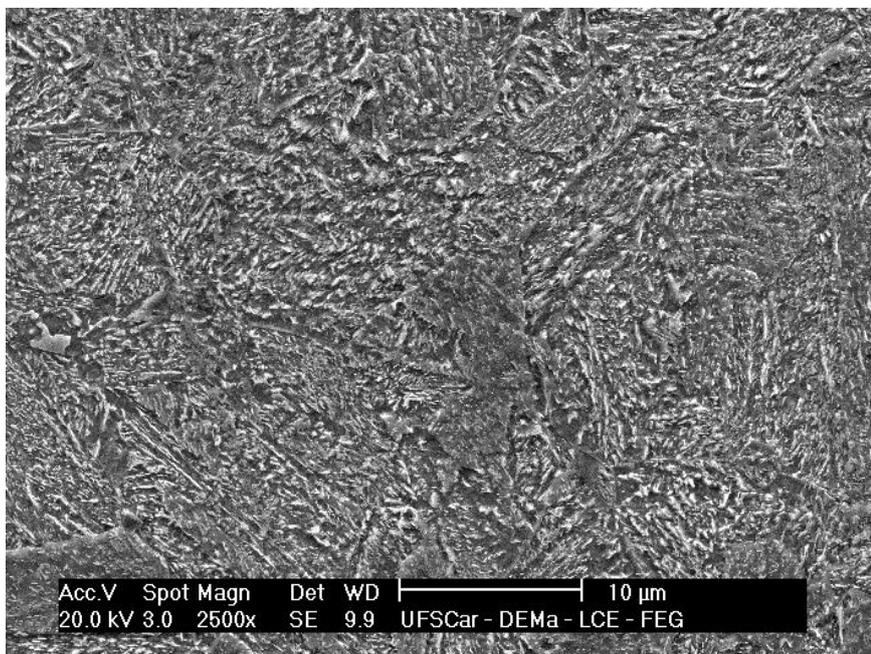


Figura 18- Microestrutura obtida por MEV após austêmpera 400°C

A microestrutura formada na austêmpera a 375°C é mostrada na figura 19 utilizando-se o reagente Nital 2%. É possível identificar em preto e marrom a formação da estrutura bainita, apresentando ripas mais finas em diferentes orientações cristalográficas.

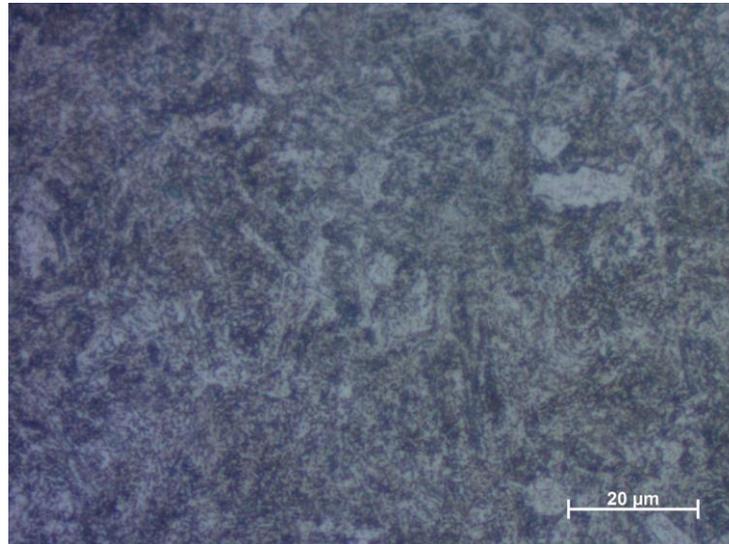


Figura 19- Ataque com reagente Nital 2%. Condição: Austemperado à 375°C por 40 minutos

A revelação, feita com o reagente Le Pera, da microestrutura formada pelo tratamento térmico de austêmpera a 375°C é mostrada na figura 20. É possível identificar em marrom claro e escuro a formação da estrutura bainita. As regiões que estão mais claras (quase brancas) podem caracterizar martensita, porém não é possível concluir com certeza, por meio da rota de tratamento utilizada, que esta microestrutura foi formada.

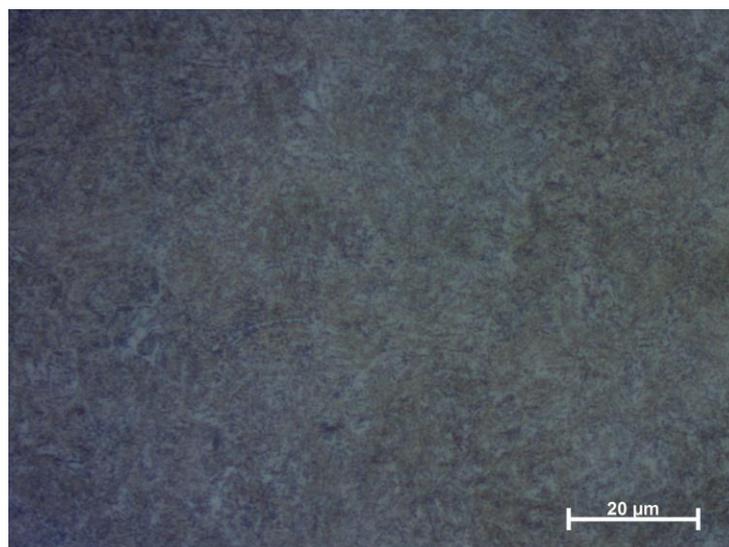


Figura 20- Ataque com reagente LePera. Condição: Austemperado à 375°C por 40 minutos

A figura 21 apresenta esta mesma condição observada a partir da microscopia eletrônica de varredura. Neste caso, a bainita aparece também como microestrutura predominante.

Como no caso anterior espera-se que 40 minutos sejam suficientes para a transformação completa da austenita em bainita na faixa de 375°C. Como não foi possível caracterizar a martensita nas imagens observadas, não se pode afirmar que houve a formação desta microestrutura.

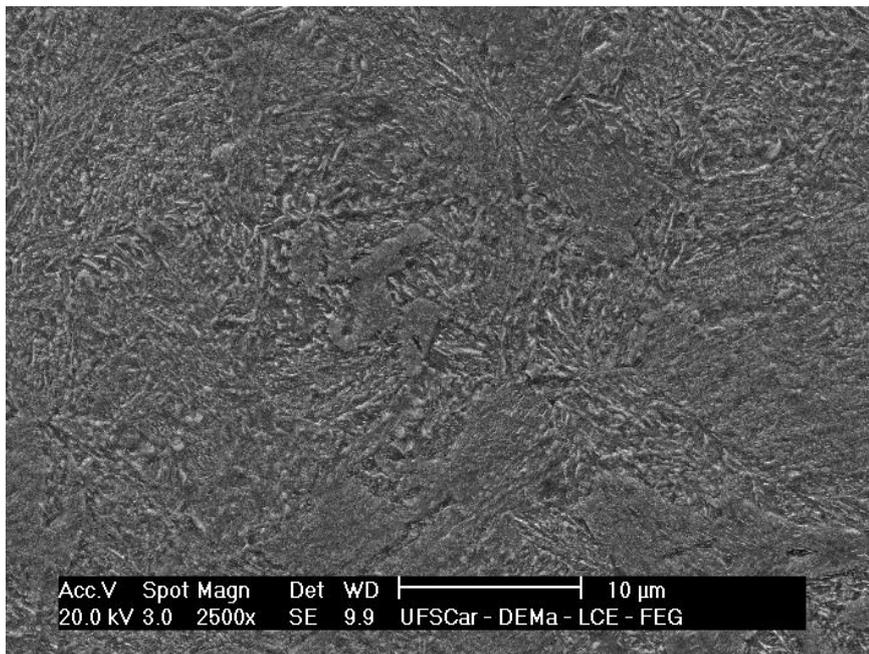


Figura 21- Microestrutura obtida por MEV após austêmpera 375°C

Comparando-se as microestruturas formadas em ambos os tratamentos, verifica-se que na austêmpera a 400°C a bainita formada é mais grosseira do que a que se formou na austêmpera a 375°C.

4.4.2 Microestrutura da Têmpera e Revenido

As amostras temperadas e revenidas foram atacadas com nital 2%, como dito anteriormente e em ambas as condições de tratamento (duplo revenido de 520°C/530°C e 460°C/500°C) foi verificada a presença predominante de martensita revenida.

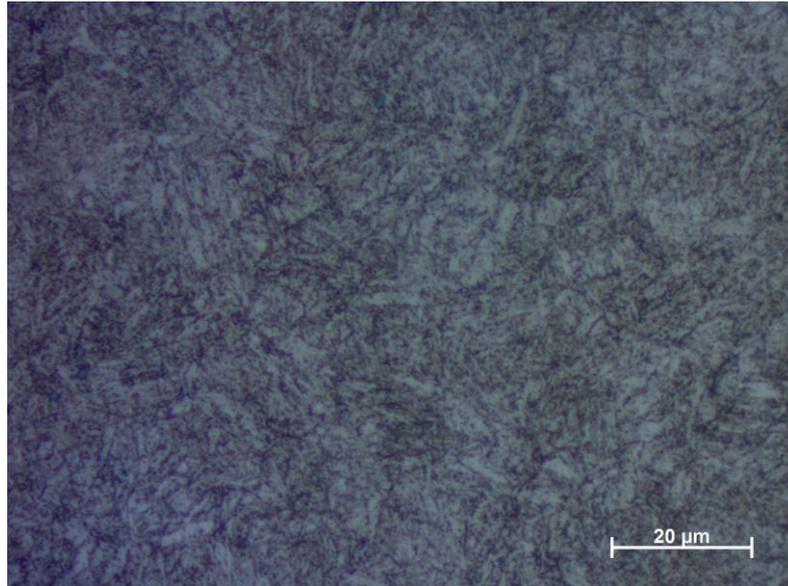


Figura 22- Ataque com reagente Nital 2%. Condição: Temperado e duplo revenido (520°C e 530°C).
Microestrutura: martensita revenida

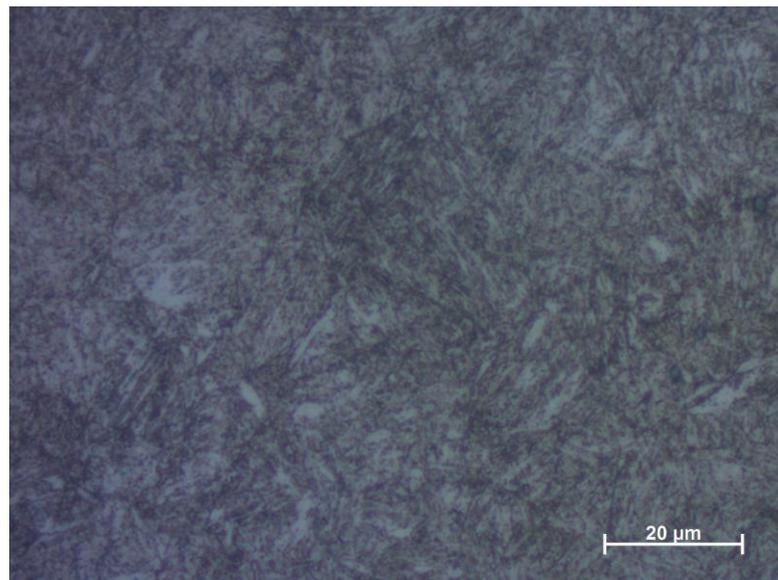


Figura 23- Ataque com reagente Nital 2%. Condição: Temperado e duplo revenido (460°C e 500°C).
Microestrutura: martensita revenida

A figura 24 mostra a martensita revenida revelada pela microscopia eletrônica de varredura.

As microestruturas formadas em ambos os tratamentos de têmpera e revenido foram muito parecidas, isso era esperado, pois as durezas obtidas e as temperaturas dos revenidos (460°C/500°C e 520°C/530°C) foram muito próximas. Apesar disso, foi possível observar que, mesmo para uma dureza semelhante, o revenido se mostrou significativo nos resultados

de energia absorvida, uma vez que a diferença de energia entre as amostras temperadas e revenidas foi de 10J.

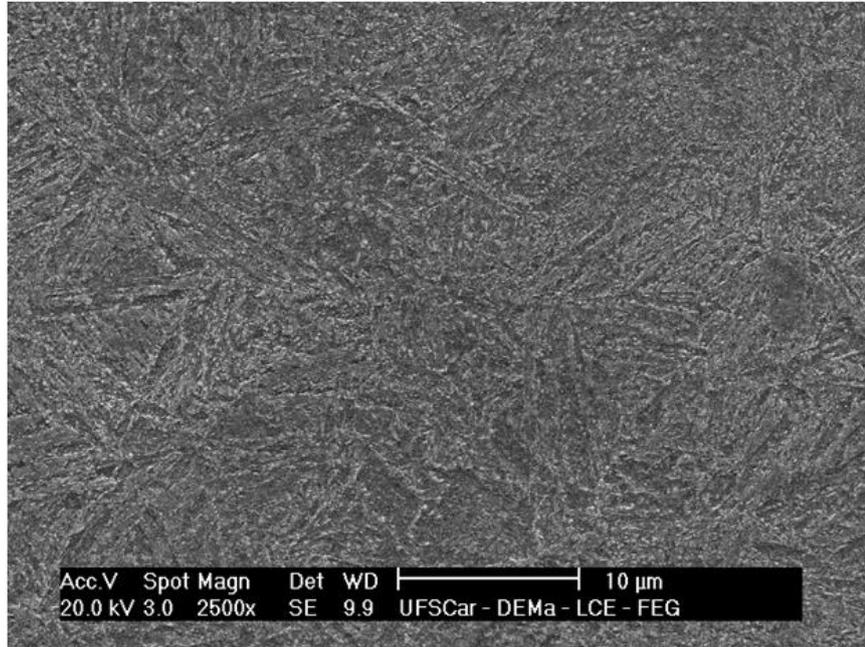


Figura 24- Microestrutura obtida por MEV após a têmpera e revenido

4.4.3 Observações Finais

A caracterização microestrutural por microscopia ótica e por MEV, em ambas as condições de austêmpera, juntamente com a rota de tratamento utilizada, não permitiram concluir que houve a formação de martensita “fresh”. Pode ser que haja uma pequena quantidade de martensita justificada pelo efeito da segregação de elementos de liga, mas, para uma conclusão certa, deve-se realizar uma investigação mais aprofundada. No entanto, a microestrutura dominante foi a bainita, ligeiramente mais refinada para a temperatura de 375°C. Embora a presença de martensita “fresh” possa trazer alguma fragilidade, as diferenças de comportamento são muito grandes e somente a presença destas pequenas áreas de martensita não seria suficiente para justificar a diferença no comportamento ao impacto.

As imagens obtidas para os tratamentos de austêmpera a 375°C e a 400°C não possibilitaram a definição exata das microestruturas formadas. É possível visualizar, em ambos os tratamentos, que houve a formação da bainita e nas amostras austemperadas a 375°C observou-se uma microestrutura mais refinada. Entretanto, não há como distinguir se a bainita formada é classificada como superior ou inferior, por meio da microscopia ótica e

tampouco por microscopia eletrônica de varredura. Para que essa distinção fosse possível de se visualizar, seria necessário realizar uma microscopia eletrônica de transmissão.

Com isso, como as durezas obtidas foram baixas (menores que 40 HRC) é possível que a bainita formada seja superior, uma vez que a bainita inferior possui valores de dureza mais altos (em torno de 40 HRC a 50 HRC), conforme discutido anteriormente. A bainita superior não apresenta resultados significativos de tenacidade, o que explicaria os baixos valores de energia absorvido encontrados para as amostras austemperadas.

Comparando-se os comportamentos entre as duas condições de austêmpera, embora haja pequena variação de dureza (maior valor para a austemperada em menor temperatura), praticamente em termos de tenacidade ao impacto o comportamento de ambas é frágil, com ligeira piora para os valores de maior dureza.

Na comparação entre as amostras temperadas e revenidas, os dois ciclos de revenimento geraram diferenças maiores no comportamento ao impacto, com uma diferença de aproximadamente 10J entre elas, para uma diferença de dureza de apenas 2 HRC. Aparentemente o comportamento de energia absorvida da martensita revenida é mais sensível às variações de dureza do que a microestrutura bainítica.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os tratamentos de têmpera seguida de revenimento e os tratamentos de austêmpera realizados no presente trabalho apresentaram valores de dureza bem próximos permitindo que a comparação da energia absorvida no impacto pudesse ser realizada.

Para a austêmpera realizada a 375°C, as ripas de bainita observadas foram mais refinadas do que para a austêmpera realizada a 400°C. Em temperaturas mais baixas há a tendência de formação de bainita inferior, a qual possui uma microestrutura mais refinada. Porém, não foi possível afirmar que a bainita encontrada é inferior devido ao baixo valor de dureza encontrado.

Comparando-se os resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy ficou claro a supremacia das amostras temperadas e revenidas sobre as austemperadas. Os valores se diferenciaram em aproximadamente três vezes.

No revenimento, é muito importante verificar a faixa de fragilização da martensita revenida de modo a evita-la. Esta faixa produz uma queda nos valores de energia absorvida. Com isso, muitas vezes se faz necessário a realização de um duplo revenido, como feito neste trabalho, para conseguir desviar dos valores que podem produzir uma queda na tenacidade.

6. TRABALHOS FUTUROS

Algumas literaturas indicam que a supremacia da microestrutura bainita é dada em uma faixa de dureza de 40 HRC a 50 HRC. Como os valores obtidos neste trabalho foram inferiores a 40 HRC, uma proposta de estudo seria a comparação das microestruturas utilizando uma dureza dentro desta faixa. Para isso, é interessante realizar estudos levando em consideração diferentes tempos de banho e diferentes temperaturas de austêmpera.

REFERÊNCIAS

- ARCELORMITTAL. Guia do Aço. Março, 2013. Página 25. Disponível em: <<http://brasil.arcelormittal.com.br/pdf/quem-somos/guia-aco.pdf>>. Acesso em: 26 Out. 2018.
- ASM METALS HANDBOOK (1991). Heat Treating. ASM International. v. 4.
- ASM METALS HANDBOOK (2004). Metallography and Microstructures. ASM International. v. 9.
- BARREIRO, J. A. (1985). Tratamientos térmicos de los aceros, 8ª. ed. Madrid, Espanha: Editorial Dossat S.A.
- BHADESHIA, H. K. D. H. (2015). Bainite in Steels Theory and Practice, 3ª ed. Institute of Materials, Minerals & Mining, UK.
- BROOKS, C. R.; Principles of Heat Treatment of Plain Carbon and Low Alloy Steels, 1996.
- CALLISTER, W. D. Jr.; RETHWISCH, D. G.; Ciência e Engenharia de Materiais Uma Introdução. 8ª edição. LTC, 2012.
- CLARK, A. (2013); Comparison of Austempering and Quench-and-Tempering Processes for Carburized Automotive Steels. University of Windsor, Ontario, Canada.
- COLPAERT, H. (2008). Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. 4a. ed. São Paulo: Edgard Blucher.
- DE, A. K.; SPEER, J. G.; MATLOCK, D. K. (2003). Color Tint-Etching for Multiphase Steels. Colorado School of Mines Golden, Colorado.
- FREITAS, P. S. Tratamento Térmico dos Metais: da Teoria à Prática. São Paulo, Senai-SP Editora, 2014.
- KRAUSS, G. (1995). Steels: Heat treatment and processing principles. Ohio: ASM International.
- KRAUSS, G. (2005). Steels: Processing, Structure and Performance. Materials Park: ASM International.

NAGARAJAN, V. R.; PUTATUNDA, S. K.; BOILEAU, J. (2017). Fatigue Crack Growth Behavior of Austempered AISI 4140 Steel with Dissolved Hydrogen. Wayne State University, Detroit, USA.

NUCCI, J. E. (2013). Comportamento ao Impacto dos Aços SAE 4140 e SAE O1 sob Diferentes Condições de Tratamento Térmico: Temperado e Revenido (com e sem Banho Criogênico) e Austemperado. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos.

REED-HILL; ROBERT, E. (1982). Princípios de Metalurgia Física. 2a. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A.

SANTOS, D. F.o.; GOLDENSTEIN, H.; VATAVUK, J. (2011). The Modified Martempering and Its Effect on the Impact Toughness of a Cold Work Tool Steel. São Paulo: Congresso SAE BRASIL.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. (2010). Aços e Ligas Especiais. 3ª. ed. São Paulo: Ed. Edgard Blucher.

SOUZA, S. A.; Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos Fundamentos Teóricos e Práticos. 5ª edição; Ed. Edgard Blucher, 1982.

VATAVUK, JAN; TOTTEN, G. E. ; NUCCI, J. E. ; ALBANO, L. L. M. ; CANALE, L. C. F. . Comparative Impact Behavior of High C Steel After Conventional Quenching and Tempering and Austempering. Rechuli (Ellenike Psuhiatrike Etaireia), v. 06, p. 21-27, 2015.

ZUPPO, R. M. (2011). Análise Comparativa do Efeito da Têmpera e Revenido e da Austêmpera Seguida ou não de Conformação a Frio na Microestrutura e nas Propriedades do Aço SAE 4140H, Dissertação (Mestrado) – Universidade de Campinas – UNICAMP, Campinas.