



ENSAIOS DE TEMPERABILIDADE DOS AÇOS 8640, 4140 E 4340

STEEL HARDENABILITY TEST 8640, 4140 AND 4340

Alex Silva Pereira^I
 Douglas Tadeu da Silva^{II}
 Maria Aparecida Bovério^{III}
 Omar Maluf^{IV}
 Antônio Carlos Muniz Ventura Júnior^V

RESUMO

O trabalho terá por finalidade analisar a estrutura e características dos aços AISI 4140, AISI 4340 e AISI 8640 quando temperados em diferentes faixas de temperatura. Após serem ensaiados termicamente utilizando o método de ensaio Jominy da extremidade temperada, que tem como objetivo verificar a temperabilidade do material; os corpos de prova foram submetidos a ensaios de dureza e metalográficos para caracterização das microestruturas obtidas e da variação das propriedades mecânicas para diferentes taxas de resfriamento. Buscando novas características nesses aços e assim orientar a engenharia de projetos na seleção de aços para as mais diversas aplicações de manufatura de componentes mecânicos. Os resultados mostraram que o aço AISI 4340 obteve uma melhor condição de temperabilidade, propriedades e microestrutura em função da variação de temperatura de tratamento de tempera.

Palavras-chave: Ensaio Jominy. Tratamento Térmico. Temperabilidade. Dureza. Microestrutura.

ABSTRACT

The work will aim to analyze the structure and characteristics of AISI 4140, AISI 4340 and AISI 8640 steel when quenched in different temperature ranges. After being thermally tested using the Jominy test method of the hardened end, which aims to check the material's hardenability; the specimens were subjected to hardness and metallographic tests to characterize the microstructures obtained and the variation of mechanical properties for different cooling rates. Searching for new characteristics in these steels and thus guiding project engineering in the selection of steels for the most diverse applications of manufacturing mechanical components. The results showed that the AISI 4340 steel obtained a better condition

^I Estudante do Curso Superior de Tecnologia em Mecânica: processos de soldagem da Faculdade de Tecnologia (FATEC) de Sertãozinho – São Paulo – Brasil. E-mail: alexsilva_stz@hotmail.com

^{II} Estudante do Curso Superior de Tecnologia em Mecânica: processos de soldagem da Faculdade de Tecnologia (FATEC) de Sertãozinho – São Paulo – Brasil. E-mail: dts28@hotmail.com

^{III} Profa. Pós-Dra. da Faculdade de Tecnologia (FATEC) de Sertãozinho – São Paulo – Brasil. E-mail: maria.boverio@fatec.sp.gov.br

^{IV} Prof. Pós-Dr. da Faculdade de Tecnologia (FATEC) de Sertãozinho – São Paulo – Brasil. E-mail: omar.maluf@fatec.sp.gov.br

^V Prof. Esp./mestrando da Faculdade de Tecnologia (FATEC) de Sertãozinho – São Paulo – Brasil. E-mail: acm.ventura@gmail.com



of hardenability, properties, and microstructure as a function of the temperature variation of the quenching treatment.

Keywords: Jominy test. Heat treatment. Hardenability. Hardness. Microstructure.

Data de submissão do artigo: 08/09/2020.

Data de aprovação do artigo: 05/11/2020.

DOI: 10.33635/sitefa.v3i1.124

1 INTRODUÇÃO

Devido a competitividade do mercado atual, as indústrias estão sempre na busca por materiais cada vez mais resistentes e com um menor custo. Um dos processos mais utilizados para modificar as características mecânicas dos materiais é o Tratamento Térmico, que se resume em um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento, controlados, com o objetivo de obter propriedades diferentes, adequadas às solicitações a que eles vão ser submetidos.

Nesse sentido, essa pesquisa aplicada consistiu na realização de ensaios de dureza e análise microestrutural em corpos de prova característicos, de aços SAE-AISI 8640, SAE-AISI 4140 e SAE-AISI 4340, submetidos ao ensaio de temperabilidade, do tipo *Jominy*, em diferentes faixas de temperatura. “O ensaio *Jominy* é constituído de um corpo-de-prova cilíndrico que, depois de aquecido até sua austenitização é arrefecido imediatamente por meio de um jato de água em uma de suas extremidades”. (FARENZENA, 2010 *apud* SANTOS; SILVA, 2016, p. 5).

Com o citado ensaio de é possível determinar, após completa austenitização, a temperabilidade de um aço, ou seja, qual sua susceptibilidade à formação de martensita em maiores distâncias, a partir da superfície submetida à condição severa de resfriamento. Logo após o patamar no aquecimento, uma de suas extremidades é alvejada com um jato d’água fazendo com que ela seja temperada. O restante do corpo não tem contado com a água, sendo, portanto, resfriado ao ar. Em duas faixas, diametralmente opostas, usinadas ao longo do comprimento do corpo de prova, são realizadas, a cada 1/16”, medições de dureza a partir da superfície resfriada com água (CARDOSO, 2011 *apud* SANTOS; SILVA, 2016, p. 5)

O ensaio *Jominy* pode ser realizado com outros fluidos, não necessariamente apenas água, sendo o mais comum para medir a temperabilidade do aço, pois permite, com apenas um corpo-de-prova, mensurar a queda de dureza que acontece com a diminuição da quantidade de martensita a partir da face resfriada (ZENG, 2008; MARTINS, 2002 *apud* SANTOS; SILVA, 2016, p. 6)

A escolha do tema visa analisar qual é a efetividade desse ensaio para aferir a habilidade de cada material em formar martensita, chamada de temperabilidade, a partir de três temperaturas: a recomendada e outras duas, abaixo e acima dela. Por meio desse ensaio é possível observar como as mudanças de microestrutura, sob condições diversas de temperatura, influenciam na variação da dureza. Permite, ainda, diferenciar têmpera de temperabilidade: a têmpera objetiva formar a martensita, cuja dureza depende exclusivamente do teor de carbono; e a temperabilidade indica a facilidade de formar a martensita, que é aumentada pela presença de elementos de liga que, normalmente, retardam a transformação da austenita facilitando a formação de martensita. A pesquisa foi escolhida, também, pelo fato da Fatec de Sertãozinho-SP-Brasil dispor de todas as condições laboratoriais para o desenvolvimento dos ensaios e



análises necessárias para as caracterizações. Assim, essa pesquisa permite avaliar, pelos resultados, se os tratamentos de têmpera a partir de temperaturas mais baixas, ou mais altas, são viáveis ou não. A hipótese inicial é a de que em caso positivo será possível propor novos parâmetros de tratamento com o intuito de tornar o processo mais econômico ou melhorar a qualidade do produto.

Nesse contexto, o objetivo geral dessa pesquisa é o de investigar, por meio do ensaio *Jominy*, se é possível modificar as condições de aquecimento e têmpera, conforme a norma ASTM A225-10, sem prejudicar as propriedades projetadas para os aços estudados, com o propósito de verificar se é possível atingir uma propriedade mecânica aceitável para a área metalúrgica com o menor tempo de forno possível, sem perder as principais características.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O aço AISI 4340 é um aço de alta temperabilidade, boa forjabilidade e difícil soldabilidade e usinabilidade. Esse aço, utilizado na fabricação de virabrequins para motores, pode ser utilizado, também, na fabricação de engrenagens, bielas e eixos para elevadas solicitações mecânicas. Possui uma boa combinação de resistência e tenacidade; propriedades benéficas alcançadas por têmpera e revenimento (ALVES; BIANCHI; AGUIAR, 2011). Estas características podem ser aplicadas para o aço AISI 4140, diferenciando com relação as propriedades com maiores limites de resistência à fadiga e à torção com elevada resistência a tenacidade. (ROCHA, 2004). Outro material empregado para esta mesma aplicação de peças e com propriedades de resistência mecânica e ótima temperabilidade, usinabilidade, forjabilidade e maiores limites de resistência à fadiga e à fratura é o aço AISI 8640 (CARVALHO, 2004; FREITAS; VASCONCELOS; MACEDO NETO, 2016).

A Tabela 1 apresenta a composição química dos referidos aços.

Tabela 1 - Composição química dos aços-carbono ligados

Nº SAE	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
8640	0,38- 0,43	0,75- 1,00	≤ 0,030	≤ 0,040	0,15- 0,35	0,40- 0,70	0,40- 0,60	0,15- 0,25
4140	0,38- 0,43	0,75- 1,00	≤ 0,030	≤ 0,040	0,15- 0,35	NA	0,80- 1,10	0,15- 0,25
4340	0,38- 0,43	0,60- 0,80	≤ 0,030	≤ 0,040	0,15- 0,35	1,65- 2,00	0,70- 0,90	0,20- 0,30

Fonte: ABNT/SAE J404 (2000)

Esse trabalho aborda o tratamento térmico dos aços e os efeitos que o tratamento térmico provocou. “Tratamento térmico pode ser definido como o aquecimento ou resfriamento controlado dos metais com a finalidade de alterar suas propriedades físicas e mecânicas, sem alterar a forma do produto”. (GERDAU, 2018, p. 1). Alguns processos de fabricação podem alterar as propriedades dos materiais, mesmo que não intencionalmente, como o que acontece no processo de soldagem dos metais que causa ciclos de aquecimento e resfriamento, gerando têmpera e fragilização na zona termicamente afetada (ZTA), comprometendo a tenacidade da estrutura (GERDAU, 2018, p. 3).

Um dos efeitos do tratamento térmico é a mudança na dureza dos aços, que também será estudada nesse trabalho, pois de acordo com Chiaverini (2013, p. 134) a dureza de um material



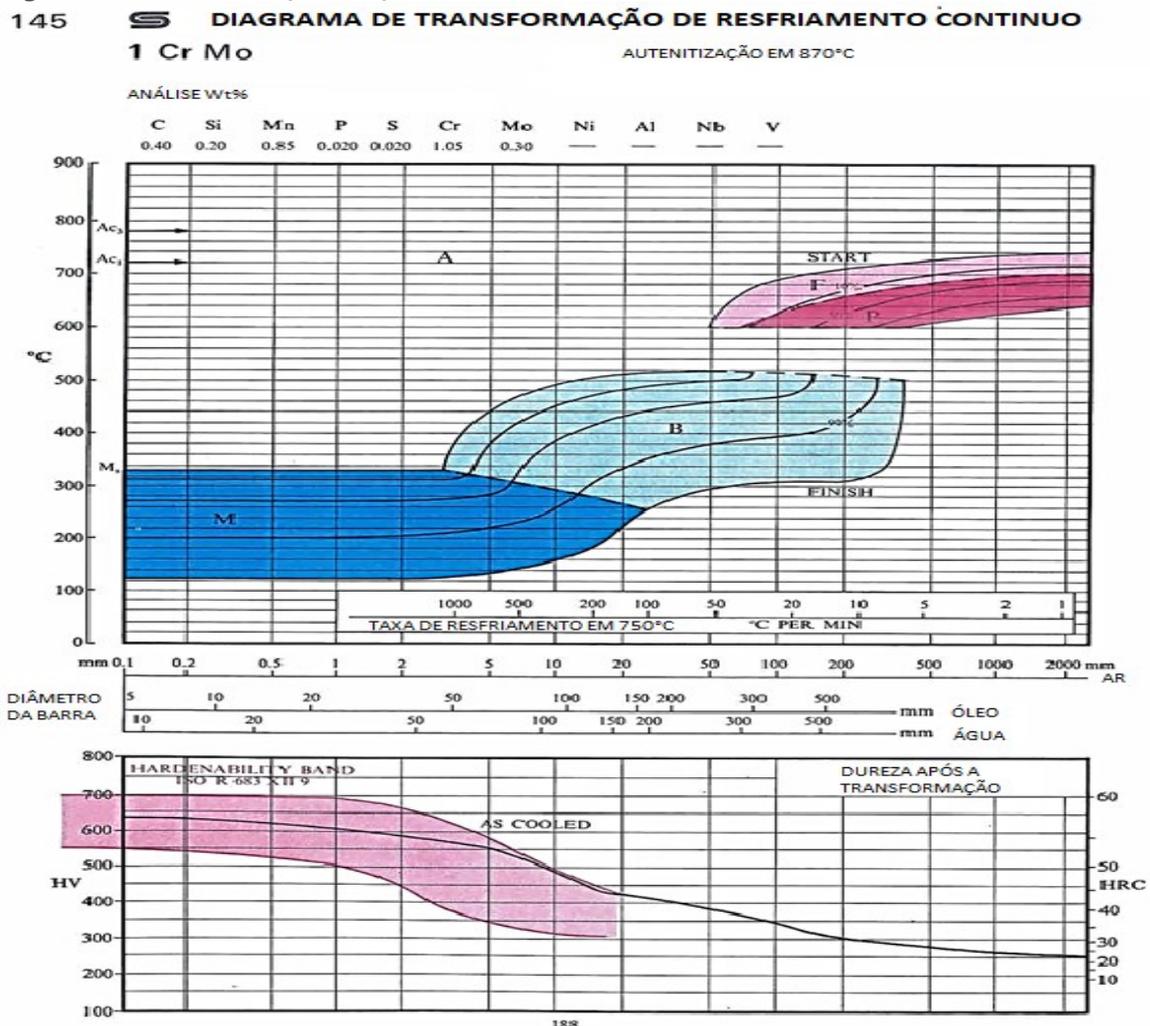
é a resistência à deformação permanente. Comumente para avaliar a dureza mede-se “a resistência à penetração e à ação do risco.” O método utilizado para medir a dureza dos aços é o Ensaio de Dureza *Rockwell*, que é o mais utilizado, devido a sua praticidade, capacidade de distinguir pequenas diferenças de dureza em aço temperado e, também, por não deixar marcas significativas do ensaio nas peças acabadas e prontas (CHIAVERINI, 2013, p.141).

A análise microestrutural dos aços é realizada por Metalografia, pois segundo Fernandes Junior (2011) o termo indica o estudo das características estruturais ou da constituição dos metais e suas ligas, para relacioná-los com suas propriedades físicas, químicas e mecânicas.

Para se conseguir essa relação entre estrutura observada, a olho nu, lupa ou microscópio, com as propriedades mecânicas, deve-se seguir uma linha mais ou menos definida de procedimentos. É o que se chama de exame metalográfico, que permite relacionar a estrutura observada no microscópio com as propriedades mecânicas. Para tanto, o plano de interesse da amostra é cortado, lixado, polido e atacado com reagente químico, revelando as interfaces entre os diferentes constituintes que compõe o metal (FERNANDES JUNIOR, 2011).

As curvas de resfriamento dos aços em estudo estão representadas abaixo. Para o aço AISI 4140, tem-se o Diagrama 1.

Diagrama 1 - Transformação do aço 4140



Fonte: Atkins (1980. p. 145)



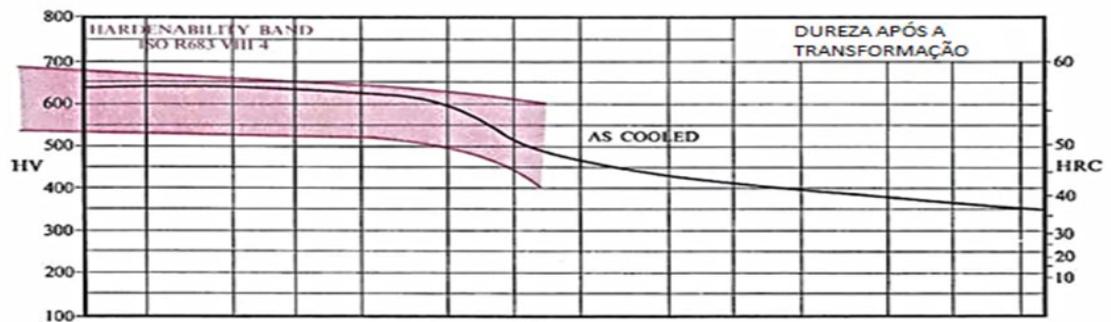
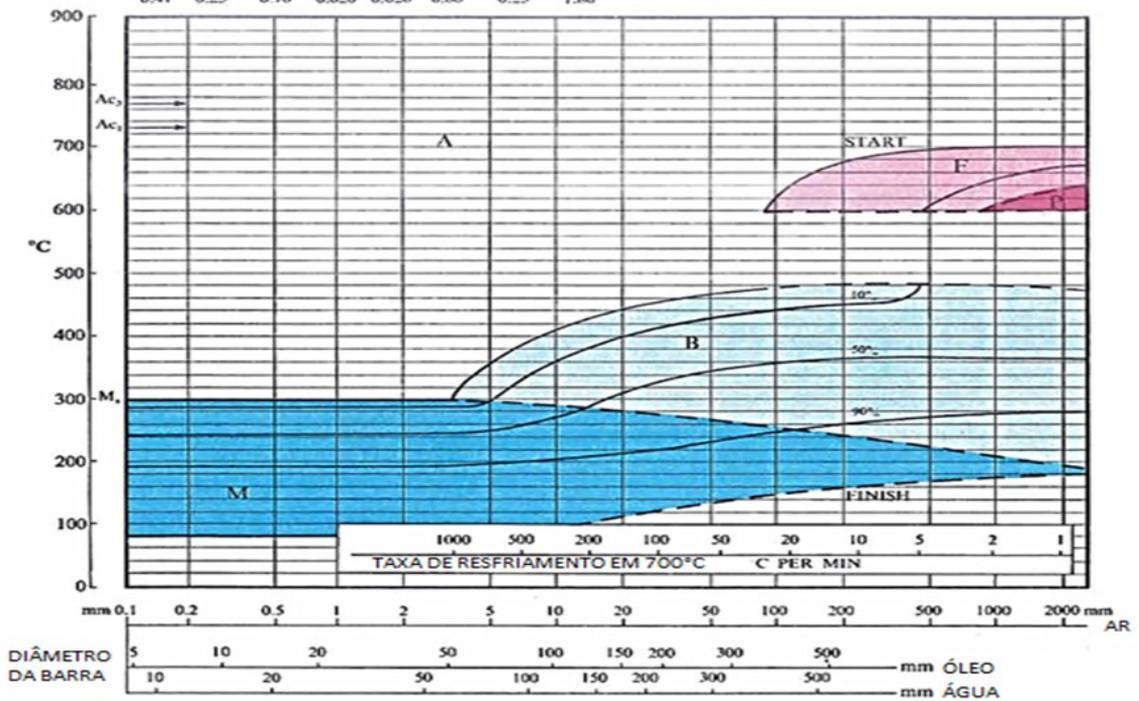
O Diagrama 2, representa a curva de transformação do aço AISI 4340.

Diagrama 2 - Transformação do aço 4340

107 **S** **DIAGRAMA DE TRANSFORMAÇÃO DE RESFRIAMENTO CONTINUO**
1 3/4 Ni Cr Mo AUTENITIZAÇÃO EM 850°C

ANÁLISE Wt %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Nb	V
0.41	0.25	0.70	0.020	0.020	0.80	0.25	1.80	—	—	—



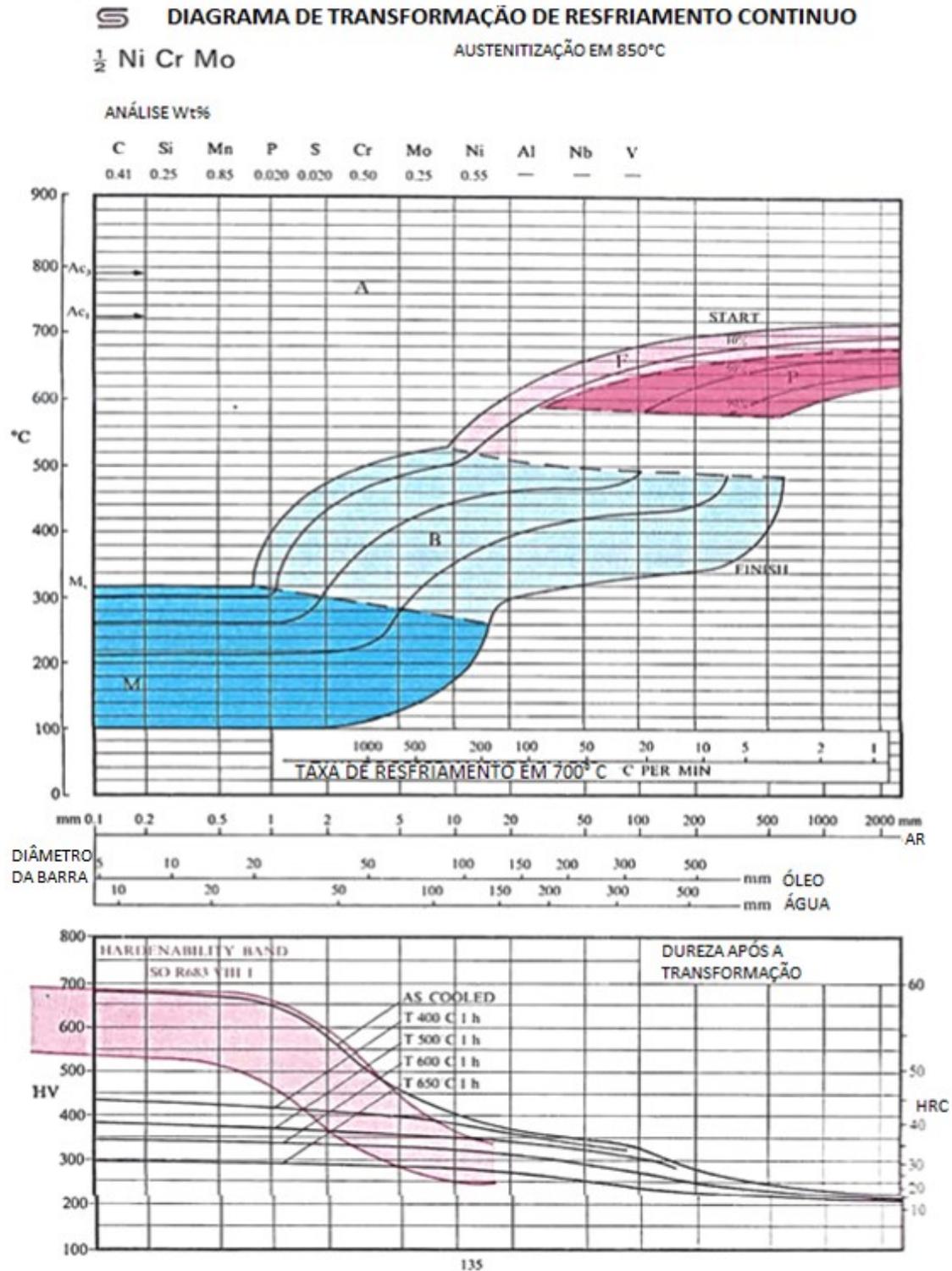
146

Fonte: Atkins (1980, p 107)



A curva de transformação do aço AISI 8640 é apresentado no Diagrama 3.

Diagrama 3 - Transformação do aço 8640



Fonte: Atkins (1980. p 96)



3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos foram realizados nos laboratórios de Processos de Fabricação e Tratamentos Térmicos, de Ensaio Mecânicos, de Ensaio Não Destrutivos, de Preparação Metalográfica e de Microscopia, da Fatec/Sertãozinho-SP-Brasil. O método experimental consiste em “submeter os objetos de estudo à influência de certas variáveis, em condições controladas e conhecidas pelo investigador, para observar os resultados que a variável produz no objeto”. (GIL, 2008, p. 50).

3.1 Materiais e métodos

O ensaio *Jominy* foi efetuado a partir de nove corpos de prova na forma de barras redondas medindo 1.1/4” de diâmetro, sendo 3 corpos de prova de cada aço em estudo. Os corpos de prova foram usinados em um torno mecânico, seguindo as dimensões especificadas na norma ASTM A 255-07, conforme apresentados na fotografia 1.

Fotografia 1 - corpos de prova



Fonte: fotografado pelos autores (2020)

No laboratório de tratamento térmico foi utilizado um forno elétrico a resistência (mufla), com controle digital de temperatura. Cada material em estudo foi aquecido a 3 temperaturas diferentes, sendo 850°C (temperatura de austenitização dos aços AISI 4340 e AISI 8640) e 870°C (temperatura de austenitização do aço AISI 4140) e em faixa superior (940°C) e inferior (780°C), conforme apresentado na Fotografia 2. O resfriamento foi realizado no dispositivo *Jominy*, que submete uma extremidade de cada corpo de prova, austenitizado, a um jato de água, até seu total resfriamento, conforme demonstra a fotografia 3.

Fotografia 2 - corpos de prova no forno elétrico



Fonte: fotografado pelos autores (2020)

Fotografia 3 - resfriamento dos corpos de prova no dispositivo Jominy



Fonte: fotografado pelos autores (2020)



Para medir a dureza foi utilizado um durômetro analógico da marca Pantec, modelo: PAN 300JW, ao longo de todo o eixo axial dos corpos de prova. Primeiro foi aplicada uma pré-carga para garantir um contato firme entre o penetrador e o material ensaiado, e, em seguida, aplicou-se a carga de ensaio. Mediu-se, então, a profundidade de penetração permanente h sob efeito da carga, após a retirada dela. As leituras da dureza do material ensaiado foram feitas diretamente no dispositivo indicador da máquina de ensaio, conforme apresenta a Fotografia 4. No laboratório de Preparação Metalográfica da Fatec de Sertãozinho foi realizada a preparação dos corpos de prova para o ensaio metalográfico, de acordo com a norma ASTM E3-11(2017), conforme mostra a fotografia 5.

Fotografia 4 - Realização das medidas de dureza no Durômetro analógico da marca Pantec



Fonte: fotografado pelos autores (2020)

Fotografia 5 - Preparação dos corpos de prova para o ensaio metalográfico



Fonte: fotografado pelos autores (2020)

Após a metalografia as amostras foram observadas no microscópio Modelo Axio vert.A1, marca Zeiss, do laboratório de Microscopia da Fatec de Sertãozinho, para analisar a microestrutura encontrada, conforme apresenta a fotografia 6.

Fotografia 6 - Amostras analisadas no microscópio Modelo Axio vert.A1, marca Zeiss



Fonte: fotografado pelos autores (2020)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como resultado obtido do processo de tratamento de tempera, observa-se no ensaio de dureza Jominy uma alteração de zona de transformação temperada proporcionando uma diminuição da dureza



à medida que a distância aumenta com relação a superfície temperada. Quanto maior a quantidade de elementos de liga, maior é a temperabilidade do aço e, portanto, maior a “profundidade” que a dureza se mantém elevada, antes de começar a cair, pois os elementos de liga retardam o início de transformação da austenita, facilitando a formação da martensita. Dessa maneira, fica evidente que a dureza é maior quando a microestrutura é martensítica, e começa a diminuir quando acontece a mistura com outras fases ou microconstituintes. Pelos diagramas CCT dos aços estudados, observa-se que a presença de bainita, perlita e ferrita de maneira mais significativa indica que a velocidade de resfriamento menor facilita a transformação da austenita. Pode-se supor que longe das faces que tiveram o contato direto com a água, as microestruturas se apresentam com o aspecto semelhante àquelas “temperadas ao ar”.

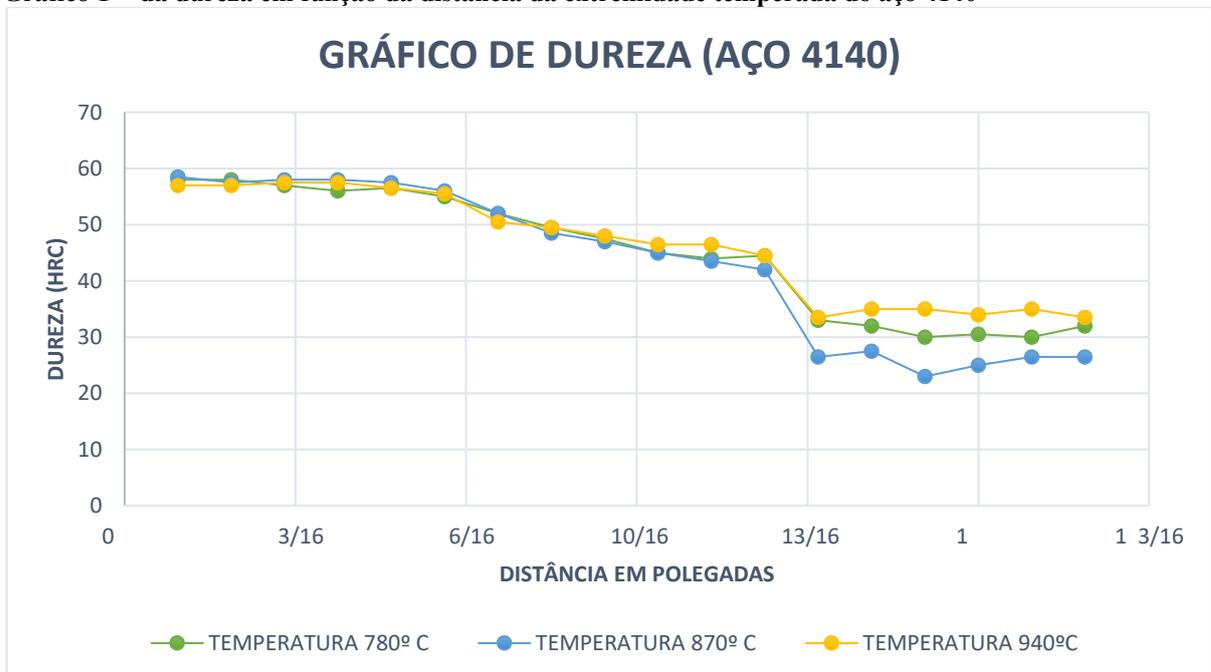
Observa-se que nas regiões vizinhas à superfície temperada com água a microestrutura é:

- Acicular refinada - morfologia de todos os aços estudados nas temperaturas ideais.
- Acicular, mas um pouco diferentes (grosseiras) - morfologia de todos os aços estudados nas temperaturas abaixo das ideais.
- Acicular, mas bem diferentes (muito grosseiras) daquela na condição ideal - morfologia de todos os aços estudados nas temperaturas acima das ideais.

4.1 AÇO AISI 4140

No aço AISI 4140 os resultados de dureza (Gráfico 1) nas 3 faixas de temperatura, que foram adotadas para o desenvolvimento do estudo em questão, mostraram-se próximos ao esperado, conforme o diagrama de transformação (Diagrama 1).

Gráfico 1 - da dureza em função da distância da extremidade temperada do aço 4140



Fonte: elaborado pelos autores (2020)

Os resultados encontrados nas análises metalográficas do aço AISI 4140 foram:

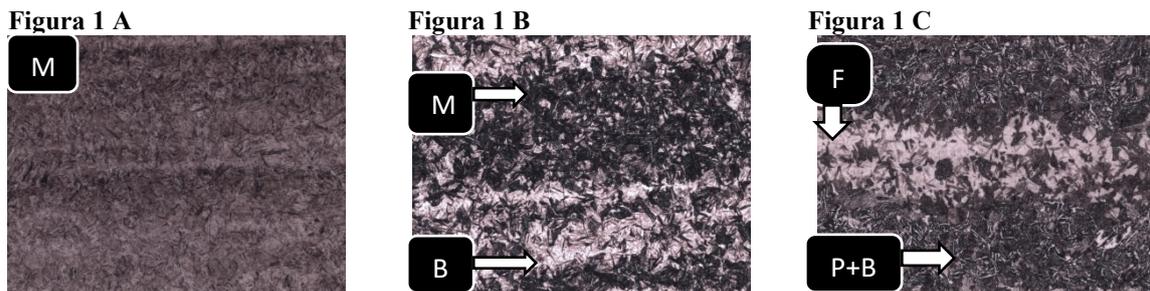
- Aço AISI 4140 a 860°C (Temperatura de austenitização)

No início da medição de dureza, a partir da extremidade temperada, encontra-se uma microestrutura martensítica (M) (acicular) fina em toda a área observada, conforme mostra a Figura 1A, pois a tempera alcançou seu objetivo.



Na região onde os valores dureza começam a apresentar uma queda significativa apresenta-se uma microestrutura martensítica (M) acicular (escura) mais grosseira, com áreas de bainita (B) (clara), conforme mostrado na Figura 1B., pois a velocidade de resfriamento, sendo menor, permite que alguma austenita transforme-se em bainita.

Na região mais distante da extremidade temperada, a dureza se estabiliza nos valores mais baixos em função do resfriamento mais lento. Dessa maneira, a microestrutura observada, fruto da transformação da austenita, apresenta áreas de ferrita (F), perlita (P) e bainita (B) (Figura 1C).



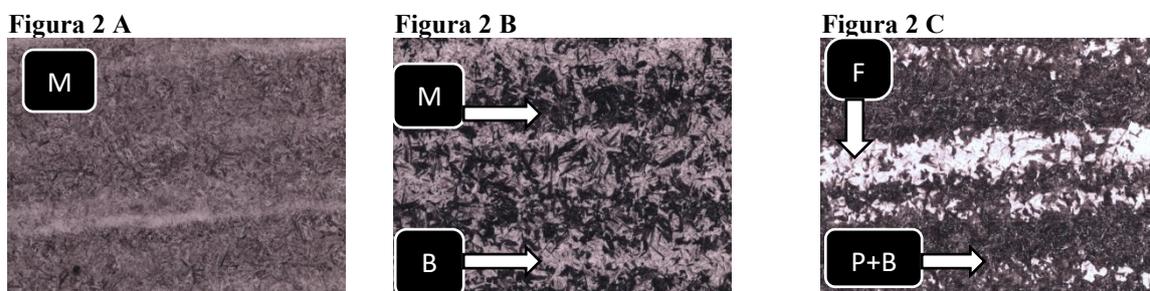
Fonte: Imagens obtidas do microscópio Modelo Axio vert.A1, marca Zeiss, com aumento de 200x, durante a realização da pesquisa (2020)

- Aço AISI 4140 a 780°C (Temperatura abaixo da indicada)

Na extremidade temperada, onde iniciou-se a medição de dureza dos corpos de prova Jominy, encontrou-se uma microestrutura martensítica (M) (acicular) mais grosseira que a obtida na temperatura indicada, conforme mostra a Figura 2A, pois a temperatura de transformação da austenita estava mais próxima.

Na região onde os valores dureza começam a apresentar uma queda significativa apresenta-se uma microestrutura martensítica acicular (M) (escura) diferente daquela obtida com o melhor procedimento, com áreas de bainita (B) (clara), conforme mostrado na Figura 2B., pois a velocidade de resfriamento, sendo menor, permite que alguma austenita transforme-se em bainita.

Mais distante da extremidade temperada, a dureza se estabiliza nos valores mais baixos como se o resfriamento da tempera acontecesse ao ar. Dessa maneira, a microestrutura observada, fruto da transformação da austenita, apresenta áreas de ferrita (F), perlita (P) e bainita (B) (Figura 2C).



Fonte: Imagens obtidas do microscópio Modelo Axio vert. A1, marca Zeiss, com aumento de 200x, durante a realização da pesquisa (2020)

- Aço AISI 4140 a 940°C (Temperatura acima da indicada)

Na extremidade temperada, onde iniciou-se a medição de dureza dos corpos de prova Jominy, encontrou-se uma microestrutura martensítica (M) (acicular) muito mais grosseira que a obtida na



temperatura indicada, conforme mostra a Figura 3A, pois a temperatura de austenitização foi muito elevada e causou crescimento exagerado dos grãos microestruturais.

Na região onde os valores dureza começam a apresentar uma queda significativa apresenta-se uma microestrutura martensítica (M) acicular (escura) mais grosseira que aquela obtida com o melhor procedimento, com áreas de bainita (B) (clara) mais distribuídas, conforme mostrado na Figura 3B. Mais distante da extremidade temperada, a dureza se estabiliza nos valores mais baixos comportando-se como o mesmo material temperado e esfriado ao ar. Dessa maneira, a microestrutura observada, fruto da transformação da austenita, apresenta áreas de grãos grosseiros de ferrita (F), perlita (P) e bainita (B) (Figura 3C).

Figura 3 A

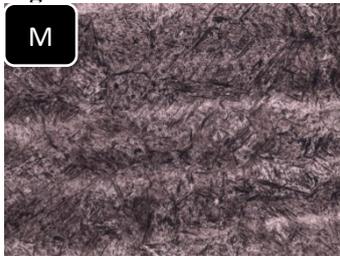


Figura 3 B

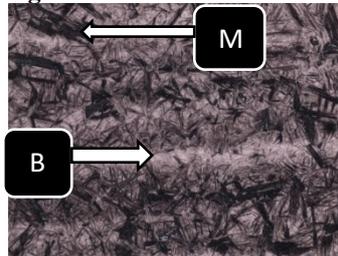
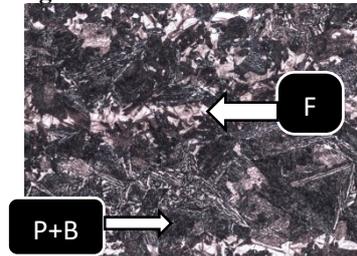


Figura 3 C

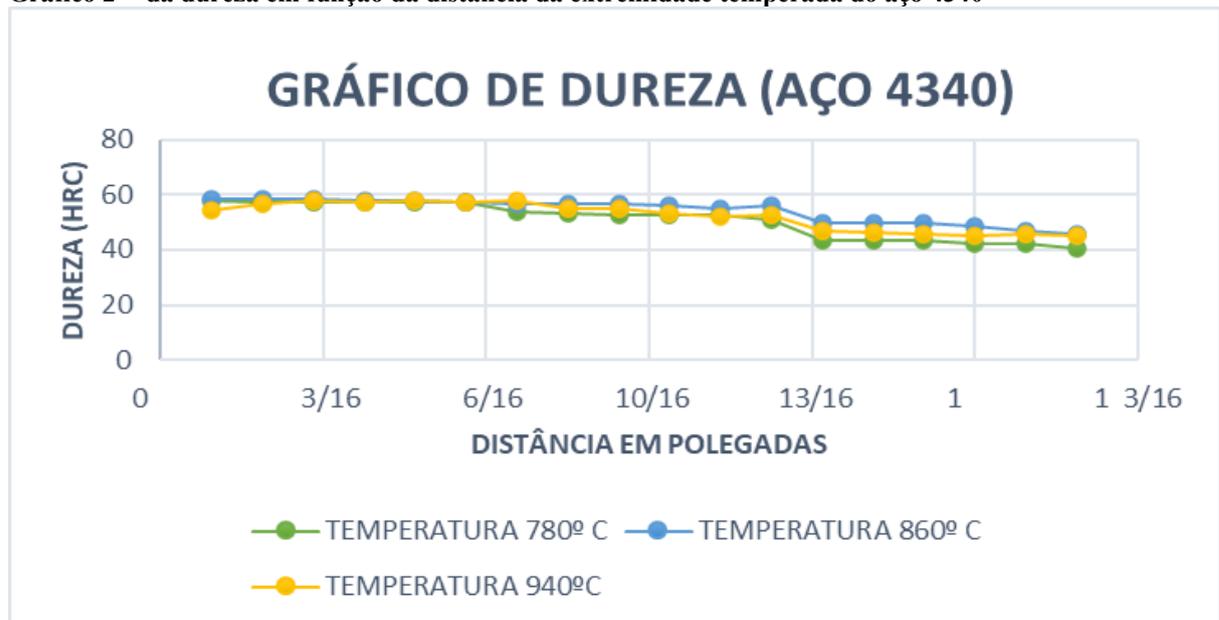


Fonte: Imagens obtidas do microscópio Modelo Axio vert. A1, marca Zeiss, com aumento de 200x, durante a realização da pesquisa (2020)

4.2 AÇO AISI 4340

No aço AISI 4340 os resultados de dureza (Gráfico 2) nas 3 faixas de temperatura que foram adotadas para o desenvolvimento do estudo em questão, foram semelhantes ao esperado de acordo com o diagrama de transformação (Diagrama 2

Gráfico 2 - da dureza em função da distância da extremidade temperada do aço 4340



Fonte: elaborado pelos autores (2020)

Os resultados encontrados nas análises metalográficas do aço AISI 4340 foram:



- Aço AISI 4340 a 850°C (Temperatura de austenitização)

No início da medição de dureza, a partir da extremidade temperada, observa-se uma microestrutura martensítica (M) (acicular) refinada em toda a área observada, conforme mostra a Figura 4A, pois a temperatura utilizada foi adequada e a taxa de extração de calor bastante alta.

Quando os valores de dureza começaram a apresentar uma queda significativa observou-se microestrutura martensítica (M) acicular (escura) pouco menos refinada, com áreas de bainita (B) (clara), conforme mostrado na Figura 4B. A justificativa para a austenita ter tempo para transformar-se em bainita é a menor taxa de resfriamento na medida em que se distancia da extremidade temperada com água.

A maiores distâncias do ataque com água, a dureza se estabiliza em valores, comparativamente, mais baixos encontrados, pois a microestrutura revela comportamento de têmpera com esfriamento ao ar. Dessa maneira, a microestrutura observada, fruto da transformação da austenita, apresenta áreas de ferrita (F), bainita (B) e martensita (M) (Figura 4C).

Figura 4 A

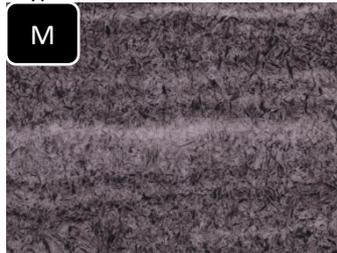


Figura 4 B

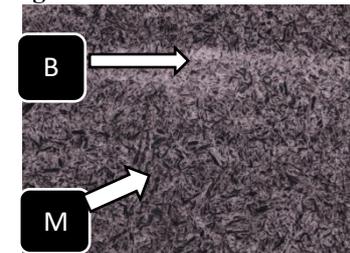
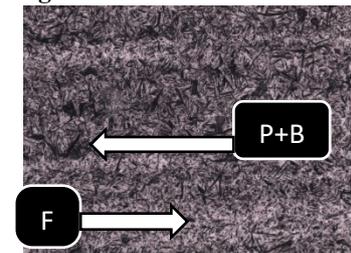


Figura 4 C



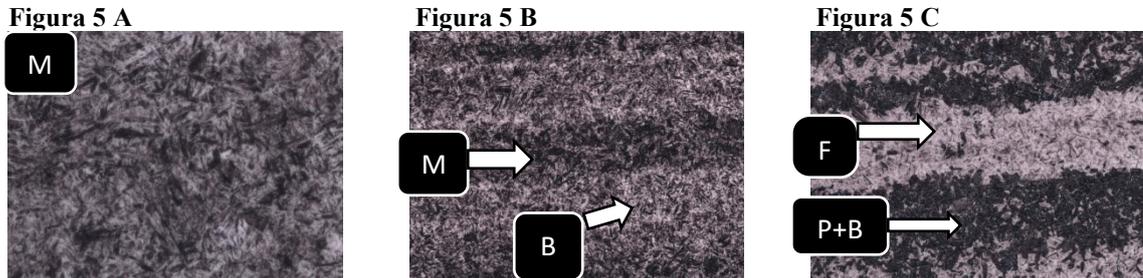
Fonte: Imagens obtidas do microscópio Modelo Axio vert. A1, marca Zeiss, com aumento de 200x, durante a realização da pesquisa (2020)

- Aço AISI 4340 a 780°C (Temperatura abaixo da indicada)

Junto da superfície temperada com água, onde a dureza foi mais elevada, observou-se a presença de microestrutura martensítica (M) (acicular) mais grosseira que naquela observada na condição considerada ideal, muito em função da proximidade da zona de transformação austenítica, conforme mostra a Figura 5A.

Na região onde a dureza mais elevada começa a apresentar queda significativa de valor, observa-se microestrutura menos refinada, de martensítica (M) acicular (escura) e bainita (B) (clara), do que as obtidas sob as melhores recomendações (Figura 5B). A menor taxa de resfriamento é a responsável por facilitar a transformação da austenita em bainita.

Observando a microestrutura de onde a curva de dureza se estabiliza em valores, comparativamente, bem mais baixos, nota-se que a microestrutura apresenta ferrita (F), bainita (B) e martensita (M). (Figura 5C), pois a distância da superfície de têmpera com água acarreta menores taxas de resfriamento e, conseqüentemente, maior facilidade para a transformação da austenita.

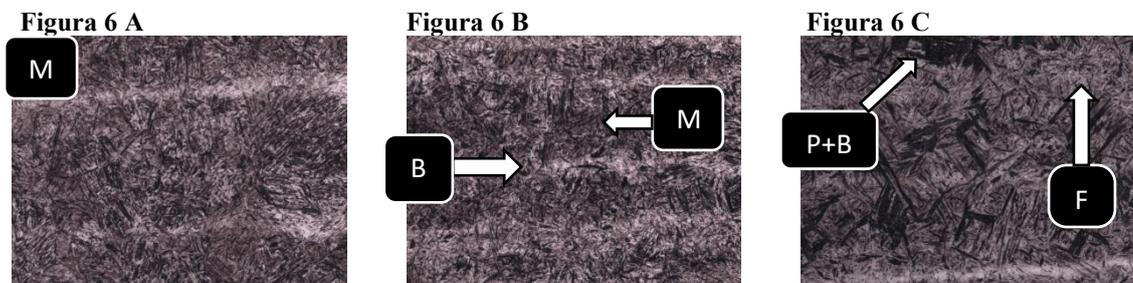


Fonte: Imagens obtidas do microscópio Modelo Axio vert. A1, marca Zeiss, com aumento de 200x, durante a realização da pesquisa (2020).

- Aço AISI 4340 a 940°C (Temperatura acima da indicada)

Próximo da superfície temperada, onde a dureza aferida é maior, a microestrutura apresenta microestrutura martensítica (M) (acicular) muito mais grosseira, Figura 6A, que aquela obtida na temperatura indicada. Observa-se, também, que a dureza máxima obtida foi comparativamente menor que aquela obtida na temperatura ideal, muito em função do excesso de temperatura que ocasionou crescimento exagerado dos grãos.

Onde a dureza começa a apresentar queda significativa de valor, a microestrutura observada é de martensita (M) acicular (escura), muito diferente daquela obtida nas condições consideradas ideais com áreas de bainita (B) (clara) mais distribuídas ao longo da área observada. (Figura 6B). Quando a dureza se estabiliza em durezas muito baixas, a microestrutura apresenta ferrita (F), bainita (B) e martensita (M) (Figura 6C). Nessa distância da extremidade temperada, o que aparece é praticamente o que se encontra neste aço temperado ao ar.



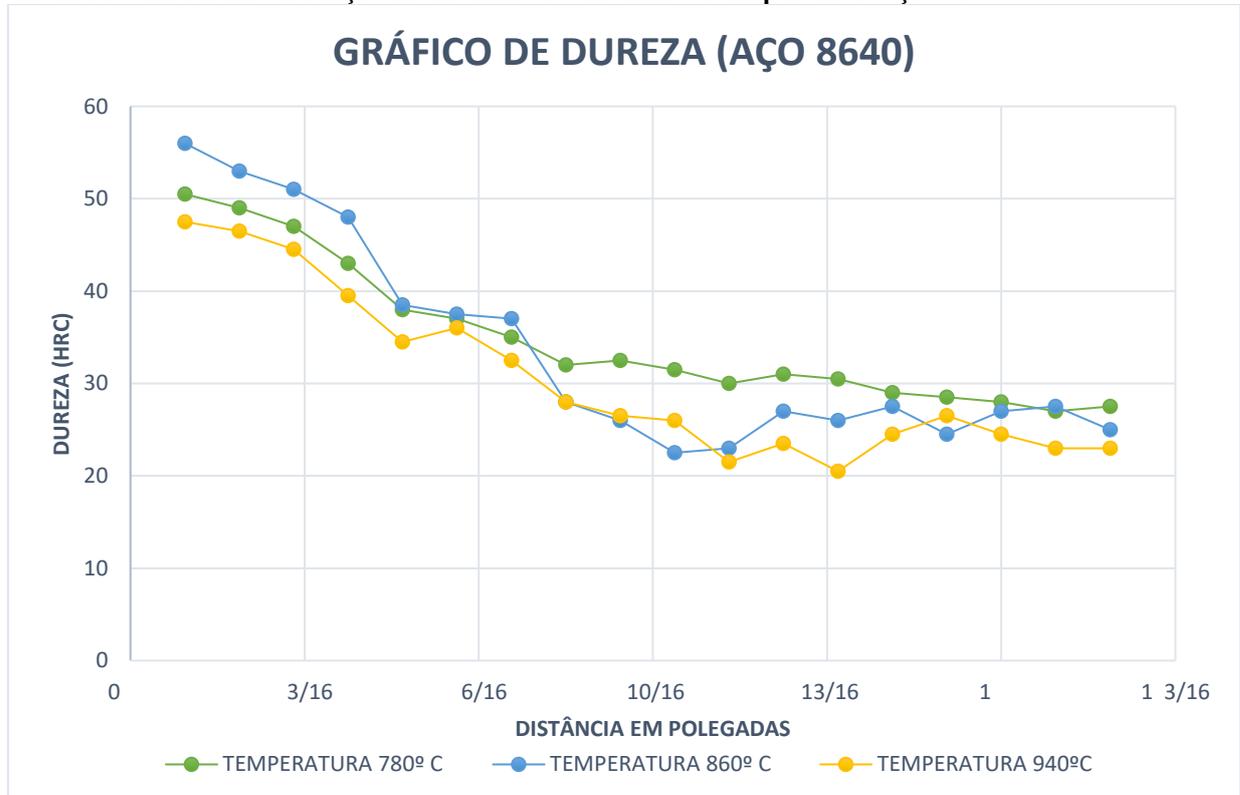
Fonte: Imagens obtidas do microscópio Modelo Axio vert. A1, marca Zeiss, com aumento de 200x, durante a realização da pesquisa (2020).

4.3 AÇO AISI 8640

Para o aço AISI 8640 os resultados de dureza (gráfico 3), nas 3 faixas de temperatura de austenitização, mostraram-se significativamente diferentes nas proximidades da extremidade temperada com água, confirmando a assertividade de utilizar a temperatura recomendada, principalmente quando a temperabilidade do aço é menor. No entanto, mesmo com as diferenças encontradas os valores atendem a faixa de dureza do diagrama de transformação mostrado no diagrama 3.



Gráfico 3 - da dureza em função da distância da extremidade temperada do aço 8640



Fonte: elaborado pelos autores (2020)

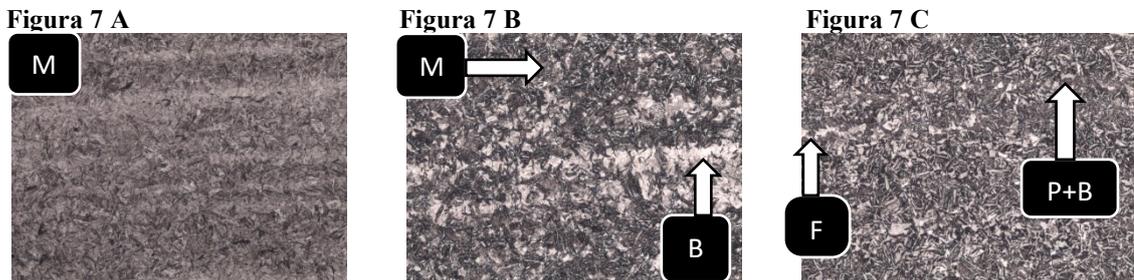
Os resultados encontrados nas análises metalográficas do aço AISI 8640 foram:

- Aço AISI 8640 a 850°C (Temperatura de austenitização)

Como esperado, nas proximidades da extremidade temperada os valores de dureza aferidos são os mais elevados em função da microestrutura apresentar microestrutura martensítica (M) (acicular) refinada em toda a área observada, conforme mostrado na Figura 7A. A taxa de resfriamento foi tão elevada que a austenita não teve tempo para transformar-se.

Como a temperabilidade do aço AISI 8640 não é muito elevada, a dureza começa a diminuir não muito longe da camada temperada, pois começam a ser criadas as condições para que a transformação da austenita comece a ocorrer. Dessa maneira, a análise microestrutural revela microestrutura martensítica (M) acicular (escura), não tão refinada, com áreas distribuídas de bainita (B), mais clara. (Figura 7B).

A microestrutura da região onde a dureza se estabiliza em valores, comparativamente, muito mais baixos que aqueles vizinhos da extremidade temperada, apresentou ferrita (F), perlita (P) e bainita (B), como mostrado na Figura 7C. A ocorrência dessas fases e microconstituintes são em função da transformação da austenita.



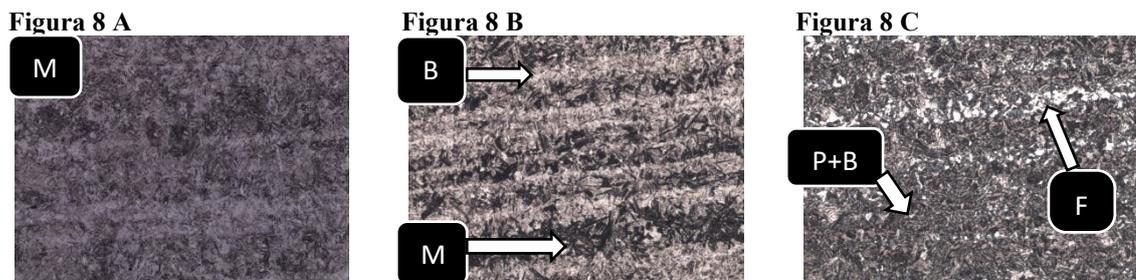
Fonte: Imagens obtidas do microscópio Modelo Axio vert. A1 marca Zeiss, com aumento de 200x, durante a realização da pesquisa (2020).

- Aço AISI 8640 a 780°C (Temperatura abaixo da indicada)

Nas proximidades da extremidade temperada os valores de dureza aferidos, apesar de elevados, não alcançam aqueles obtidos na temperatura recomendada, indicando que reduzindo a temperatura de austenitização perde-se efetividade na têmpera. Mesmo assim, nessa região observa-se microestrutura martensítica (M) (acicular) ainda que mais grosseira, conforme mostra a Figura 8A.

Em função da temperabilidade do aço AISI 8640 não ser muito elevada, a dureza começa a diminuir não muito longe da camada temperada, pois criam-se as condições para que a transformação da austenita comece a ocorrer. Dessa maneira, a análise microestrutural revela microestrutura martensítica (M) acicular (escura), diferente da ideal, com áreas de bainita (B) (clara). (Figura 8B).

A microestrutura da região onde a dureza se estabiliza em valores mais baixos que aqueles vizinhos da extremidade temperada, apresentou ferrita (F), perlita (P) e bainita (B), como mostrado na Figura 8C.



Fonte: Imagens obtidas do microscópio Modelo Axio vert. A1, marca Zeiss, com aumento de 200x, durante a realização da pesquisa (2020).

- Aço 8640 a 940°C (Temperatura acima da indicada)

Nas proximidades da extremidade temperada os valores de dureza aferidos, apesar de elevados, não atingem aqueles obtidos na temperatura recomendada nem em temperaturas abaixo dela, indicando que com o aumento da temperatura de austenitização perde-se efetividade na têmpera, pois há crescimento exagerado dos grãos. Dessa forma a microestrutura é martensítica (M) (acicular), mas muito mais grosseira, conforme mostra a Figura 9A.

Em função da temperabilidade do aço AISI 8640 não ser muito elevada, a dureza começa a diminuir não muito longe da camada temperada, pois criam-se as condições para que a transformação da austenita comece a ocorrer. Dessa maneira, a análise revela microestrutura martensítica (M) acicular (escura), diferente da ideal, com áreas de bainita (B), mais clara. (Figura 9B).



A microestrutura da região onde a dureza se estabiliza em valores mais baixos que aqueles vizinhos da extremidade temperada, apresentou ferrita (F), perlita (P) e bainita (B), como mostrado na Figura 9C.

Figura 9 A

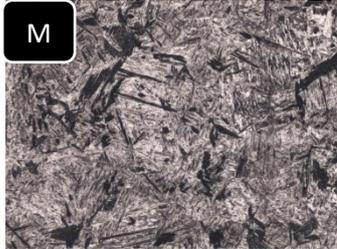


Figura 9 B

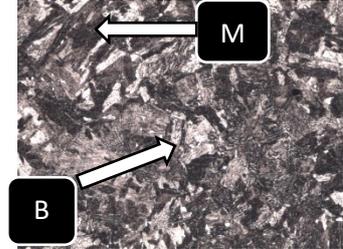
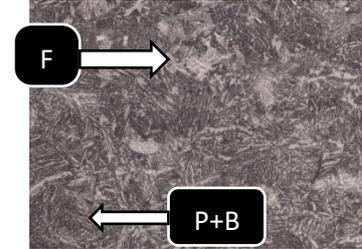


Figura 9 C



Fonte: Imagens obtidas do microscópio Modelo Axio vert. A1, marca Zeiss, com aumento de 200x, durante a realização da pesquisa (2020)

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nas três amostras de estudo apresentaram as mesmas microestruturas de solidificação após a tempera superficial na base das barras. As variações de temperatura dos ensaios indicaram que as estruturas foram coerentes, e influenciadas diretamente pela temperabilidade dos aços em estudo, pois deslocaram as curvas de transformação da austenita para a direita, aumentando as condições para que o tratamento térmico de tempera para a formação da estrutura martensita.

Dentre as amostras ensaiadas, a variação da temperatura de austenitização mostrou-se mais significativa para o aço AISI 8640, que apresenta menor temperabilidade, sendo, portanto, mais susceptível à variação da dureza ao longo da barra. A temperatura em excesso para a austenitização do aço AISI 8640, apresenta condições para o crescimento exagerado dos grãos e, também, em função do excesso de vapor gerado na superfície de contato entre o corpo de prova *Jomyni* e o jato de água, retardando seu resfriamento e diminuindo a dureza.

Nos aços AISI 4140 e AISI 4340 obteve-se menores variações de dureza em função da temperatura de austenitização e apresentaram boa temperabilidade. O aço AISI 4340 apresentou uma dureza mais uniforme ao longo da barra, em função da variação de temperatura de tratamento, representando uma melhor distribuição das estruturas de solidificação após tratamento térmico, indicando uma homogeneidade no ciclo de resfriamento. O aço AISI 4140, apresenta uma queda de dureza e isso pode estar relacionada aos elementos de liga na matriz, comparada com o AISI 4340.

Portanto, o objetivo de analisar o efeito sobre o tratamento térmico de tempera na utilização de temperaturas diversas de austenitização, corroboraram com os resultados da literatura, assim como as durezas e microestruturas obtidas.

REFERÊNCIAS

ALVES, Manoel Cléber de Sampaio; BIANCHI, Eduardo Carlos; AGUIAR, Paulo Roberto de. Influence of lubrication-cooling on the surface quality of metal grinding. Rem: **Rev. Esc. Minas, Ouro Preto**, v. 64, n. 4, p. 505-512, Dec. 2011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370:44672011000500017&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 22 maio 2019.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **SAE J404**: composição química dos aços-carbono ligados ao sistema de classificação dos aços. 2000

ASTM E3-1. **Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ATKINS, M. **Atlas of Continuous Cooling Transformation Diagrams for Engineering Steels**. American Society for Metals. 1980. 260 p.

CARVALHO, A. R. T. **Estudo da influência da agitação e da severidade de têmpera do meio de resfriamento na determinação de velocidades críticas de têmpera**. São Luís, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. 2004.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica: Estruturas e propriedades das ligas metálicas**. v. 1. 2. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.

FERNANDES JÚNIOR., Paulo. **Ensaio Metalográficos**. 2011. Disponível em: <https://profpaulofj.webs.com/>. Acesso em: 23 nov. 2018.

FREITAS, B. M.; VASCONCELOS, S. M.; MACEDO NETO, J. C. Beneficiamento do Aço SAE 8640 sob Tratamentos Térmicos. In: **Anais do CONTECC - Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia**, Foz do Iguaçu. 2016

GERDAU. **Tratamento térmico**. 2018. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4354027/mod_resource/content/3/Aula%20-%20Tratamentos%20T%C3%A9rmicos.pdf. Acesso em: 23 nov. 2018.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

SANTOS, Ariel; SILVA, Edson Roberto. **Diferença de temperabilidade entre aço ABNT 4340 e aço ABNT 1045 através do ensaio de Jominy**. 2018. Disponível em: <http://www.unirv.edu.br/conteudos/fckfiles/files/Ariel%20dos%20Santos.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2018.