



UFPB

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

SÍLVIO ROMERO DE ALBUQUERQUE FILHO

**COMPORTAMENTO MAGNÉTICO DO AÇO AISI 4340 QUANDO SUBMETIDO
AO TRATAMENTO TÉRMICO DE TÊMPERA E REVENIMENTO**

JOÃO PESSOA

2024

SÍLVIO ROMERO DE ALBUQUERQUE FILHO

COMPORTAMENTO MAGNÉTICO DO AÇO AISI 4340 QUANDO SUBMETIDO AO
TRATAMENTO TÉRMICO DE TÊMPERA E REVENIMENTO

Trabalho de conclusão de curso apresentada para obtenção dos créditos da disciplina de Trabalho de Conclusão da Universidade Federal da Paraíba, Campus João Pessoa, como parte das exigências para graduação no curso de Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof. Dra. Cristiana dos Santos Nunes.

JOÃO PESSOA

2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A345c Albuquerque Filho, Silvio Romero de.

Comportamento magnético do aço aisi 4340 quando submetido ao tratamento térmico de têmpera e revenimento / Silvio Romero de Albuquerque Filho. - João Pessoa, 2024.

57 f. : il.

Orientação: CRISTIANA DOS SANTOS NUNES.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Aço AISI 4340. 2. têmpera. 3. microestrutura. 4. dureza. 5. comportamento magnético. I. NUNES, CRISTIANA DOS SANTOS. II. Título.

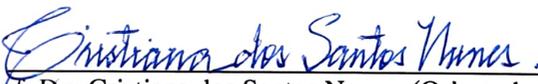
UFPB/BSCT

CDU 621(043.2)

SILVIO ROMERO DE ALBUQUERQUE FILHO

COMPORTAMENTO MAGNÉTICO DO AÇO AISI 4340 QUANDO SUBMETIDO AO
TRATAMENTO TÉRMICO DE TÊMPERA E REVENIMENTO

Trabalho de conclusão de curso submetido à **Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica** da UFPB, apresentado em sessão de defesa pública realizada em 25/10/2024, obtendo o conceito APROVADO, sob a avaliação da banca examinadora a seguir:



Prof. Dra Cristiana dos Santos Nunes. (Orientadora)
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)



Prof. Dr. Josinaldo Pereira Leite
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)



Prof. Dr. João Pereira Leite.
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

João Pessoa (PB)
OUTUBRO/2024

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, preciso agradecer ao Silvio do passado por sua determinação em seguir em frente e por não permitir que as dificuldades o fizessem desistir.

À minha orientadora, Dra. Prof.^a Cristiana dos Santos Nunes, por, desde o início, ser muito solícita e empática, sempre compreendendo as minhas circunstâncias e me guiando ao longo desse caminho até a conclusão do trabalho.

Ao Professor Dr. João Pereira Leite, pela disponibilidade e paciência para realizar os ensaios e sanar as minhas dúvidas que surgiam.

Aos meus pais, Romero e Clemenis, que sempre me apoiaram, tanto financeiramente quanto psicologicamente.

Ao meu tio Ricardo e sua esposa, Flávia, que me acolheram assim que souberam da minha aprovação para ingressar na Universidade, e desde então se mantêm presentes, me orientando para que eu siga firme na trajetória.

À minha tia Márcia e seu marido, Adalto, que me acolheram em sua casa bem antes de eu saber até onde chegaria.

Um agradecimento especial ao Bruno Higuity e à SODECIA por me abrirem as portas para o mercado de trabalho. Sem dúvidas, isso foi o combustível que me faltava para buscar essa graduação.

À minha namorada, Gabriele, por ter enfrentado as dificuldades ao meu lado e por ter tornado essa reta final um pouco menos árdua.

Aos amigos que fiz durante toda a graduação, com certeza vocês tornaram minha caminhada bem mais divertida.

RESUMO

Este estudo investigou a influência dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento na microestrutura, dureza e propriedades magnéticas do aço de alta resistência e baixa liga AISI 4340. O aço AISI 4340 é uma liga composta principalmente por ferro, carbono, níquel, cromo e molibdênio, reconhecida por sua excelente tenacidade, resistência à tração e capacidade de endurecimento por meio de tratamento térmico; amplamente utilizado em aplicações que demandam alto desempenho, como na fabricação de componentes de máquinas, eixos e engrenagens. No experimento, 06 amostras, cada uma com 30 mm de altura, foram submetidas a uma temperatura de austenitização de 870 °C durante 60 minutos. As amostras foram então temperadas usando diferentes meios: água, óleo e salmoura. Após a têmpera, três das amostras foram revenidas a 600 °C por mais 60 minutos. Os resultados dos ensaios de dureza indicaram que a amostra temperada em salmoura alcançou o valor mais alto de dureza, com 47 HRC. A amostra temperada em água apresentou o maior valor de microdureza Vickers, atingindo um resultado de 405,6 HV. Além disso, os ensaios magnéticos realizados com sensor Hall revelaram variações no campo magnético, atribuídas às mudanças de fase provocadas pelos tratamentos térmicos.

Palavras-chave: Aço AISI 4340; têmpera; microestrutura; dureza; comportamento magnético.

ABSTRACT

This study investigated the influence of heat treatments of quenching and tempering on the microstructure, hardness, and magnetic properties of high-strength low-alloy steel AISI 4340. AISI 4340 steel is an alloy primarily composed of iron, carbon, nickel, chromium, and molybdenum, recognized for its excellent toughness, tensile strength, and ability to harden through heat treatment. Due to these characteristics, AISI 4340 steel is widely used in applications that demand high performance, such as the manufacturing of machine components, shafts, and gears. In the experiment, 06 samples, each with a height of 30 mm, were subjected to an austenitizing temperature of 870 °C for 60 minutes. The samples were then quenched using different media: water, oil and brine. Following quenching, three of the samples were tempered at 600 °C for an additional 60 minutes. Hardness testing results indicated that the sample quenched in brine achieved the highest hardness value of 47 HRC. The water-quenched sample exhibited the highest Vickers with 405.6 HV. Furthermore, magnetic tests conducted using a Hall sensor revealed variations in the magnetic field, which were attributed to phase changes caused by the heat treatments.

Keywords: AISI 4340 steel; quenching; microstructure; hardness; magnetic behavior.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Diagrama de fases Fe-C	20
Figura 2	– Diagrama TTT para o aço AISI 4340	21
Figura 3	– Diagrama TRC para o aço AISI 4340, austenitizado a 850 °C	22
Figura 4	– Microestruturas diferentes para um mesmo material em diferentes taxas de resfriamento.....	23
Figura 5	– Curva de resfriamento em água com fluxo de velocidade de 0 a 0,75m/s	24
Figura 6	– Microestrutura de um aço AISI 4340 temperado em água.....	25
Figura 7	– Relação entre a dureza e a concentração de salmoura ao temperar sem agitação	26
Figura 8	– Curvas comparativas para resfriamento em água e óleo sem agitação	27
Figura 9	– Microestrutura de um aço 4340 temperado em óleo	27
Figura 10	– Ciclo de têmpera e revenimento.....	28
Figura 11	– Efeito do revenimento sobre o aço AISI 4340	29
Figura 12	– Representações esquemáticas do efeito Hall	30
Figura 13	– Fluxograma do procedimento experimental.....	31
Figura 14	– Preparação das amostras: (a) Barra e amostras cortadas com aproximadamente 33 mm de altura; (b) Máquina de corte; (c) Desenho 2d da amostra final com 30 mm de altura	32
Figura 15	– Forno do tipo mufla fabricante JUNG.....	33
Figura 16	– Fluxograma do procedimento de tratamento térmico utilizado neste estudo	34
Figura 17	– Ciclos térmicos aplicados no aço AISI 4340	35
Figura 18	– Configuração experimental: (1) Gerador; (2) Bancada de testes; (3) Placa de aquisição	36
Figura 19	– Durômetro DIGIMESS empregado no ensaio de dureza Rockwell...	37
Figura 20	– Microscópio Zeiss/Axiotech	38
Figura 21	– Microdurômetro MHV-2T/SHIMADZU	38

Figura 22	–	Microestrutura do aço AISI 4340, material como recebido. Ampliação 500X	39
Figura 23	–	Microestrutura do aço AISI 4340 submetido à tempera com resfriamento em água: a) borda e b) centro. Ampliação 500X	40
Figura 24	–	Microestrutura do aço AISI submetido à têmpera com resfriamento em óleo: a) borda e b) centro. Ampliação 500X.	41
Figura 25	–	Microestrutura do aço AISI 4340 submetido à têmpera com resfriamento em salmoura: a) borda e b) centro. Ampliação 500X ...	42
Figura 26	–	Microestrutura do aço AISI 4340, amostra A4, temperada em água e revenida a 600 °C, ampliada em 200X: a) borda e b) centro.....	42
Figura 27	–	Microestrutura do aço AISI 4340, amostra A5, temperada em óleo e revenida a 600 °C, ampliada em 200X: a) borda e b) centro	43
Figura 28	–	Microestrutura do aço AISI 4340, amostra A6, temperada em salmoura e revenido à 600 °C, ampliada em 200x	43
Figura 29	–	Dureza a) Rockwell B e b) Rockwell C	44
Figura 30	–	Localização dos pontos realizados no ensaio de dureza	45
Figura 31	–	Microdureza Vickers das amostras tratadas termicamente	46
Figura 32	–	Impressão da microdureza em relação a microestrutura presente na borda e no centro das amostras: a) A1, b) A2, c) A3, d) A4, e) A5 e f) A6. Ampliação 400X.....	47
Figura 33	–	Análise magnética do aço AISI 4340 por sensor Hall	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química de aços de alta resistência e baixa liga.....	18
Tabela 2 – Composição química do aço AISI 4340 (% em peso).....	19
Tabela 3 – Composição química do aço ARBL AISI 4340 (% em peso)	31
Tabela 4 – Identificação das amostras	32
Tabela 5 – Resumo dos tratamentos aplicados no aço AISI 4340	34
Tabela 6 – Fração volumétrica das fases presentes nas amostras do aço AISI 4340	41
Tabela 7 – Dureza média do aço AISI 4340	44
Tabela 8 – Microdureza média do aço AISI 4340.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ARBL	Alta Resistencia e Baixa Liga
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CCT	<i>Continuous Cooling Transformation</i>
CFC	Cúbica de Face Centrada
ddp	Diferença de Potencial
HRB	<i>Hardness Rockwell B</i>
HRC	<i>Hardness Rockwell C</i>
HV	<i>Hardness Vickers</i>
LOM	Laboratório de Oficina Mecânica
LSR	Laboratório de Solidificação Rápida
LTT	Laboratório de Tratamentos Térmicos
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
TTT	<i>Time-Temperature-Transformation</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos gerais	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Aços de alta resistência e baixa liga (ARBL)	17
<i>2.1.1 Aço AISI 4340</i>	18
2.2 Tratamentos térmicos	19
<i>2.2.1 Austenitização</i>	19
<i>2.2.2 Têmpera</i>	22
<i>2.2.4.1 Têmpera em água</i>	24
<i>2.2.4.2 Têmpera em salmoura</i>	25
<i>2.2.4.3 Têmpera em óleo</i>	26
<i>2.2.3 Revenido</i>	27
<i>2.2.4 Ensaio magnético</i>	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 Material	31
3.2 Preparação dos corpos de prova	31
3.3 Tratamentos térmicos	33
3.4 Ensaio Magnético	34
3.5 Ensaio de dureza	35
3.6 Preparação metalográfica	36
3.7 Microscopia óptica	36
3.8 Ensaio de microdureza	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 Comportamento magnético	38
4.2 Dureza e microdureza	39
4.3 Caracterizações microestruturais	40
5 CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS	46

APÊNDICE A – Imagens de análise do ImageJ	55
--	-----------

1. INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica e a necessidade de uma infraestrutura adequada para atender às crescentes demandas da sociedade impulsionaram o desenvolvimento de materiais de baixo custo, mas com alto desempenho mecânico, químico e físico. Nesse contexto, os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) destacam-se por sua versatilidade, sendo amplamente utilizados em produtos planos de aço. (Gorni, 2008)

Esses materiais são capazes de adaptar suas propriedades por meio da seleção criteriosa de elementos de liga e da aplicação de tratamentos térmicos ou termomecânicos. Exemplos dessa flexibilidade incluem chapas grossas para construção civil, que requerem alta resistência mecânica, aços ARBL para construção naval, que necessitam de fácil soldabilidade, e produtos planos para tubos de grande diâmetro, que exigem alta tenacidade para evitar falhas catastróficas, especialmente em situações em que os fluidos transportados são inflamáveis ou tóxicos. (Gorni, 2008)

Entre os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), o aço AISI 4340 se destaca por suas excelentes características mecânicas, como alta resistência a choques e impactos. Ele oferece uma combinação ideal de ductilidade, tenacidade e resistência, além de possuir elevada resistência à fadiga. Essas propriedades podem ser ajustadas e melhoradas significativamente através de tratamentos térmicos, como a têmpera e o revenimento, permitindo sua adaptação a diversas aplicações de alta demanda mecânica. (Atlas Steel, 2006)

Conforme afirma Chiaverini (2005), os tratamentos térmicos referem-se ao conjunto de processos de aquecimento e resfriamento que os aços sofrem sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, visando alterar suas propriedades ou conferir características específicas. As propriedades dos aços estão fundamentalmente ligadas à sua microestrutura, portanto os tratamentos térmicos modificam, em maior ou menor grau, essa estrutura, resultando em alterações mais ou menos significativas nas suas propriedades.

A microestrutura dos materiais exerce um papel significativo nas propriedades magnéticas. Fatores como a distribuição dos tamanhos dos cristais, a disposição das orientações cristalográficas dos grãos dentro do material, além da quantidade e distribuição de fases não magnéticas, influencia essas propriedades. (Fernando J.G. Landgraf, 2014)

Neste estudo, foi realizada uma análise microestrutural para investigar as fases geradas após os tratamentos térmicos, aplicando diferentes métodos de resfriamento. Além disso, foram avaliadas as alterações microestruturais e a dureza do material, assim como a

relação dessas variáveis com as mudanças na capacidade de magnetização, por meio de ensaios magnéticos utilizando sensor Hall.

1.1 Objetivos Gerais

Este estudo tem como objetivo realizar os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento em um aço de alta resistência e baixa liga, a fim de analisar as alterações microestruturais através de ensaios de dureza e microdureza, análise microscópica e ensaio magnético.

Portanto, os objetivos foram definidos como:

- a) Realizar a têmpera em água, óleo e salmoura e aplicar o revenimento em amostras do aço AISI 4340;
- b) Identificar a microestrutura do aço AISI 4340 por meio da microscopia óptica, ensaio de dureza e microdureza;
- c) Efetuar o ensaio magnético utilizando o sensor Hall.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL)

De acordo com Centro de Informação Metal Mecânica (CIMM), os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) são uma categoria específica de aços que combinam alta resistência mecânica com a adição de pequenas quantidades de elementos de liga. Esses aços foram desenvolvidos para oferecer desempenho superior em várias aplicações industriais e estruturais, onde resistência, durabilidade e peso são fatores críticos.

Os aços ARBL são classificados no mercado da seguinte forma:

- a) Aços microligados: pequenas adições de elementos como vanádio, titânio ou nióbio para o endurecimento por precipitação e/ou para obter um tamanho de grão refinado;
- b) Aços de laminação controlada: aços laminados a quente a fim de desenvolver uma estrutura austenítica altamente deformada, transformando-se no resfriamento em uma estrutura ferrítica equiaxial de grãos finos;
- c) Aço com ferrita circular: carbono com teor muito baixo e endurecibilidade suficiente para gerar uma estrutura de ferrita acicular muito fina e resistente no resfriamento, ao invés da usual estrutura ferrítica poligonal;
- d) Aços com perlita reduzida: baixo teor de carbono e, portanto, pouquíssima perlita na microestrutura. Além de conter pequenas adições de elementos, como o nióbio;
- e) Aços patináveis: aços projetados com a finalidade de obter elevada resistência à corrosão;
- f) Aços bifásicos: aços processados para ter uma microestrutura composta de ferrita com pequenas regiões de martensita de alto carbono uniformemente distribuídas. Esta configuração resulta em um produto com baixo limite de escoamento e alta taxa de encruamento, proporcionando alta resistência e excelente conformabilidade.

A Tabela 1 apresenta exemplos de ARBLs e suas respectivas faixas de composições segundo a norma ABNT:

Tabela 1 – Composições química de aços de alta resistência e baixa liga.

Aço	Composição química (% em peso)						
	C	Cr	Ni	Mo	V	Si	Fe
ABNT 4140	0,38	0,80	-	0,15	-	-	Em balanço
	0,43	1,10	-	0,25	-	-	
ABNT 8660	0,56	0,40	0,40	0,15	-	-	Em balanço
	0,64	0,60	0,70	0,25	-	-	
ABNT 8630	0,28	0,40	0,40	0,15	-	-	Em balanço
	0,33	0,60	0,70	0,25	-	-	
ABNT 5160	0,56	0,70	-	-	-	-	Em balanço
	0,64	0,90	-	-	-	-	
ABNT 5140	0,38	0,70	-	-	-	-	Em balanço
	0,43	0,90	-	-	-	-	
ABNT 6150	0,48	0,80	-	-	0,15	-	Em balanço
	0,53	1,10	-	-	0,15	-	

Fonte: apud Brunatto, 2016.

Entre as aplicações para os aços ARBL destaca-se o setor automotivo que busca sempre a redução de peso em sua estrutura que permitem reduzir o consumo de combustíveis, porem mantendo uma alta resistência mecânica. Além disso a construção naval utiliza desses aços por apresentarem boa soldabilidade, diminuindo assim o custo desse processo. Entretanto, a baixa estampabilidade dos ARBL traz uma desvantagem em seu uso. (GORNI, 2008)

2.1.1 Aço AISI 4340

O aço AISI 4340 é um aço nominalmente de baixa liga com 1,8% de Níquel-Cromo-Molibdênio de alta temperabilidade e endurecido a óleo. Quando tratado termicamente, apresenta a mais alta combinação de resistência à tração e à fadiga, juntamente com ductilidade. (ASM, 1954)

Tabela 2 - Composição química do aço AISI 4340 (% em peso).

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
0.41	0.70	0.25	0.020	0.020	0.80	1.80	0.25	Em balanço

Fonte: ASM (1991)

De acordo com Atlas Steel (2006), o aço AISI 4340 pode ser aplicado em operações onde são necessárias excelentes propriedades de fadiga e resistência do material. Este material é amplamente usado nas indústrias aeroespacial, automobilística e nuclear (BHATTACHARYA, 2010). Além disso, o aço AISI 4340 pode ser utilizado em material bélico (SANTO; WEBER e SUAREZ, 2007) como em canhão de tanques de guerra.

O aço 4340 tem como principais características uma ótima tenacidade, alta resistência mecânica e alta resistência à fadiga em temperaturas elevadas. Geralmente este aço é comercializado no estado normalizado, recozido ou com alívio de tensão. Pode também ser fornecido no estado temperado e revenido sob encomenda.

2.2 Tratamentos Térmicos

Tratamentos térmicos são operações controladas entre aquecimento e resfriamento, a fim de modificar as características de aço e ligas especiais. Quando estas operações são realizadas juntamente a etapas de conformação mecânica, são chamadas de tratamentos termomecânicos (COSTA E SILVA).

Para otimizar suas propriedades, aços e ligas especiais são submetidos a diversos tratamentos termomecânicos, utilizando de uma ampla faixa de temperaturas dos processos industriais, além de empregar diversas taxas de resfriamento, buscando a exata estrutura desejada (COSTA E SILVA).

Os principais tratamentos térmicos utilizados são:

- a) Austenitização;
- b) normalização;
- c) recozimento;
- d) têmpera;
- e) revenimento.

Segundo Gerdau (2020) os tratamentos térmicos recomendados para esse tipo de material é utilizando uma temperatura de austenitização de 855°C seguido de têmpera em óleo e revenido a 230°C durante 4 horas.

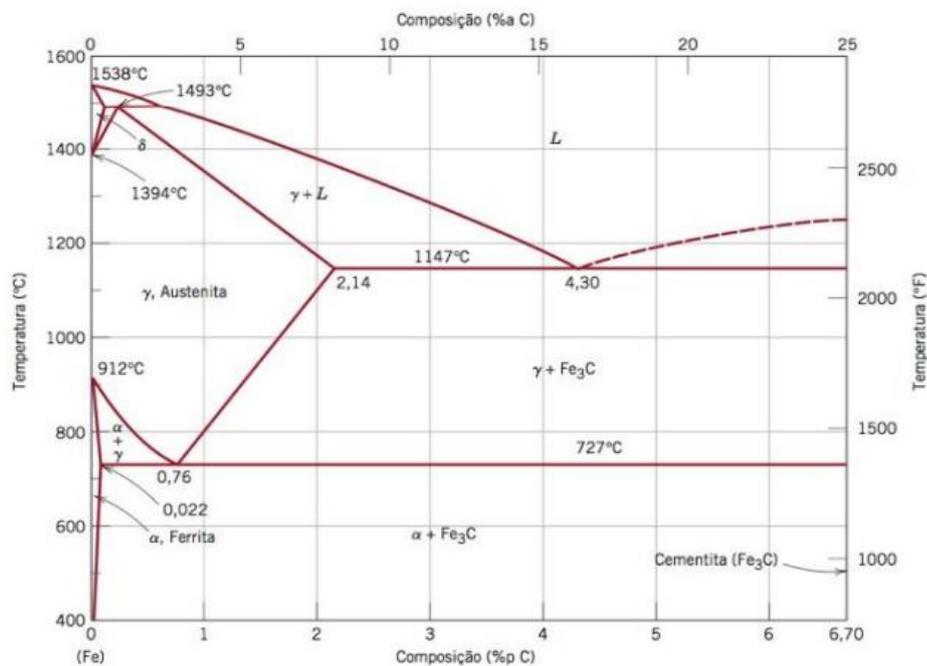
2.2.1 Austenitização

A austenitização é um processo pelo qual o aço, ao ser aquecido a uma temperatura suficientemente alta, transforma-se em austenita, que é uma fase de solução sólida de carbono

em ferro gama (γ). A austenitização ocorre tipicamente entre 727 °C e 912 °C para aços de carbono, dependendo da composição do material. Ao atingir a temperatura de 912 °C, essa austenita que possui uma estrutura cristalina CFC, perdura até 1394 °C sendo então convertida novamente para uma fase CCC, conhecida por ferrita δ . Esta que finalmente se funde a uma temperatura de 1538 °C. (Callister, 2012)

No diagrama de fases, Figura 1, é possível verificar as diferentes fases do ferro e suas transformações de acordo com a variação de temperatura (eixo vertical esquerdo) e da composição de carbono do material (eixo horizontal).

Figura 1 – Diagrama de fases Fe-C.



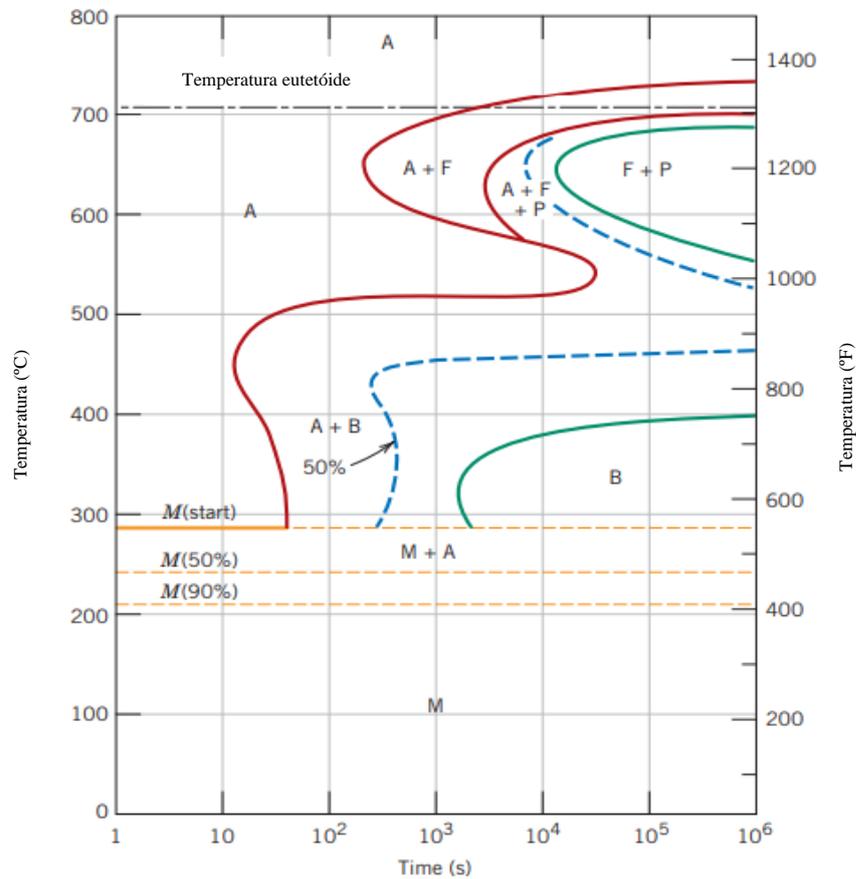
Fonte: Callister (2012)

A austenitização no aço AISI 4340 é realizada com o intuito de homogeneizar a microestrutura e assim obter um melhor resultado nos tratamentos térmicos subsequentes. Segundo ASM (1954), a faixa de temperatura de austenitização quando se deseja normalizar é de 870 a 925 °C, para temperar a temperatura varia em torno de 850 °C e para revenir a faixa de temperatura é de 455 a 650 °C seguido de resfriamento ao ar.

Além do diagrama Fe-C, existem também outras ferramentas essenciais para analisar as transformações de fases, como os diagramas de Tempo-Temperatura-Transformação (TTT) e o diagrama de *Continuous Cooling Transformation* (CCT). A Figura 2 ilustra a curva

TTT, que demonstra a relação entre a temperatura de transformação da austenita no aço AISI 4340 e as propriedades das fases resultantes ao longo do tempo.

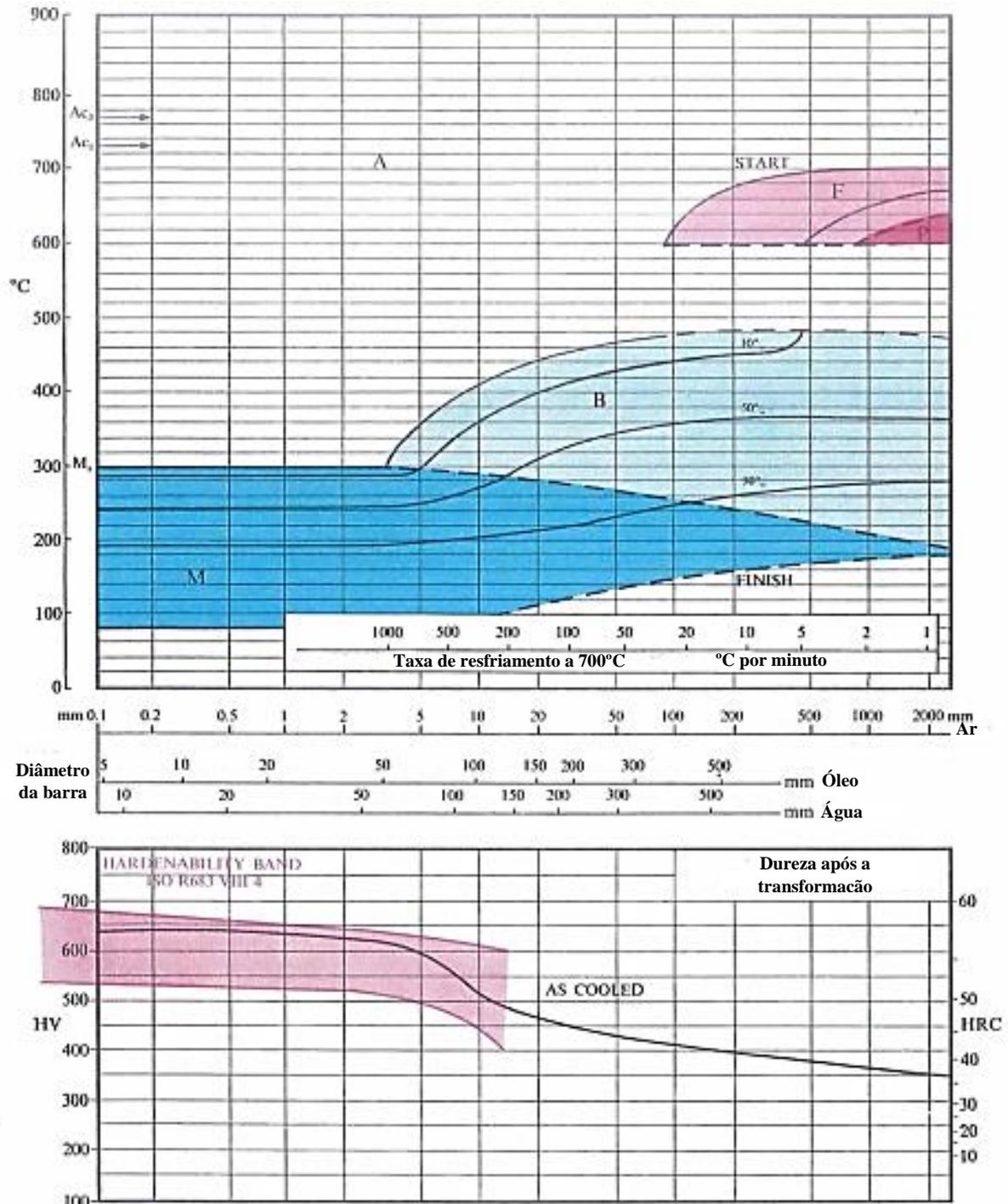
Figura 2 - Diagrama TTT para o aço AISI 4340.



Fonte: Adaptado (ASM, 1977)

Por sua vez, os diagramas CCT mostram a transformação de fases em função do tempo para uma temperatura em contínua diminuição. Elementos de liga têm efeitos distintos sobre essas transformações. Por exemplo, um maior teor de carbono desloca as transformações de ferrita, perlita e bainita para a direita, permitindo a formação de martensita. Já molibdênio, níquel e nióbio retardam a formação de ferrita e perlita, favorecendo a bainita. Assim, a combinação de elementos de liga e a taxa de resfriamento determinam as fases e suas frações volumétricas em aços para tubulação processados em condições específicas. Na Figura 3 é possível analisar os diferentes métodos de resfriamento aplicados a diferentes diâmetros do aço AISI 4340, assim como suas respectivas fases formadas.

Figura 3 - Diagrama TRC para o aço AISI 4340, austenizado a 850 °C.



Fonte: Atkins (1980)

2.2.2 Têmpera

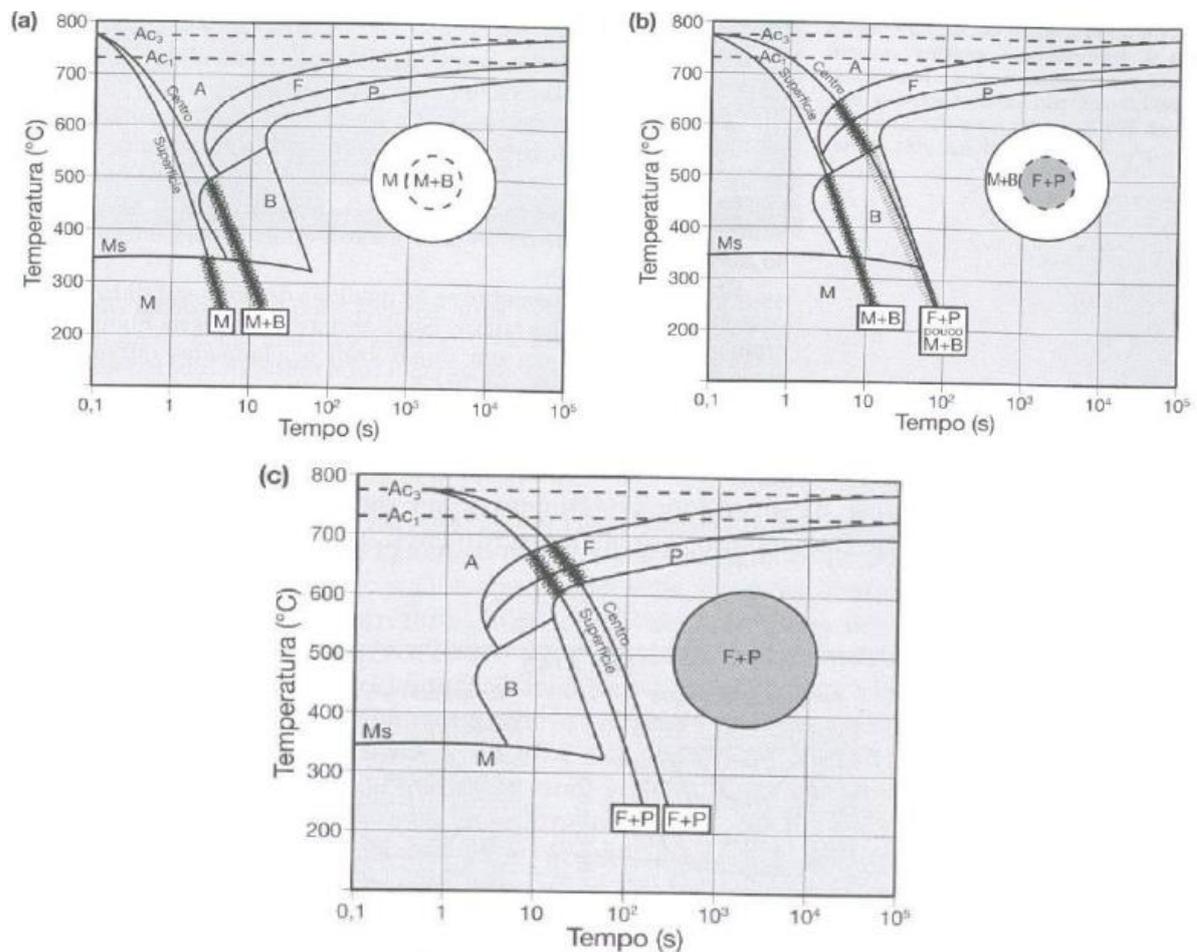
Segundo I. I. Novikov (1994), a têmpera é um tratamento térmico em que o principal objetivo é formar uma estrutura fora do equilíbrio, resultante da rápida aceleração do

resfriamento. Os parâmetros básicos que devem ser controlados no processo são a temperatura de aquecimento, o tempo de exposição e a velocidade de resfriamento.

A temperatura de aquecimento e o tempo de exposição precisam ser adequados para que ocorram as transformações de fase desejadas, como a formação de uma fase estável em altas temperaturas a partir de uma ou mais fases estáveis em baixas temperaturas. Por outro lado, a velocidade de resfriamento deve ser rápida o suficiente para evitar, durante a queda de temperatura, as transformações de fase por difusão, bem como a formação de estruturas metaestáveis. (I. I. Novikov, 1994)

Além desses parâmetros, as diversas condições de resfriamento utilizadas no processo de têmpera podem levar a variações significativas nas distribuições microestruturais do material. Essas diferenças dependem da temperabilidade do aço em questão, das dimensões da amostra e do meio de resfriamento selecionado, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Microestruturas diferentes para um mesmo material em diferentes taxas de resfriamento.



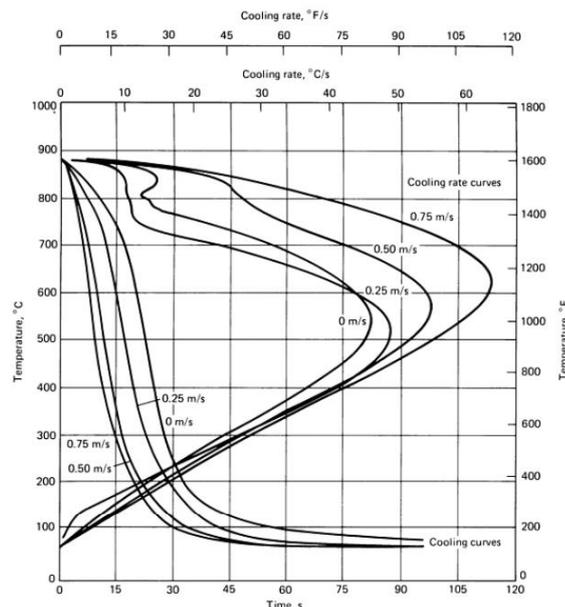
Fonte: Colpaert (2008)

2.2.2.1 Têmpera em água

A têmpera em água é um dos métodos mais comuns e eficientes de resfriamento utilizado em processos de tratamento térmico. A água, quando vigorosamente agitada, oferece taxas de resfriamento que se aproximam das máximas atingíveis por líquidos de têmpera, tornando-a uma escolha viável para aplicações que demandam um resfriamento rápido e eficaz. Além de ser um recurso barato e amplamente disponível, a água tem a vantagem de ser facilmente descartada, desde que não esteja contaminada, com um impacto mínimo ao meio ambiente e à saúde (ASM, 1991).

Esse método é amplamente utilizado para a têmpera de metais não ferrosos, aços inoxidáveis austeníticos e outros metais tratados em solução a altas temperaturas. Além disso, a água também é eficaz na remoção de carepa da superfície de peças de aço temperadas em fornos sem atmosferas protetoras. No entanto, sua rápida taxa de resfriamento pode persistir em temperaturas mais baixas, aumentando o risco de distorções e trincas, especialmente em peças complexas ou feitas de aços de baixa temperabilidade. O aprisionamento de vapor é outra desvantagem da água pura, podendo resultar em dureza desigual e uma distribuição desfavorável de tensões, o que pode levar à deformação ou à formação de pontos moles na peça (ASM, 1991). É possível verificar as curvas de resfriamento de têmpera em água de acordo com seu fluxo de velocidade na Figura 5.

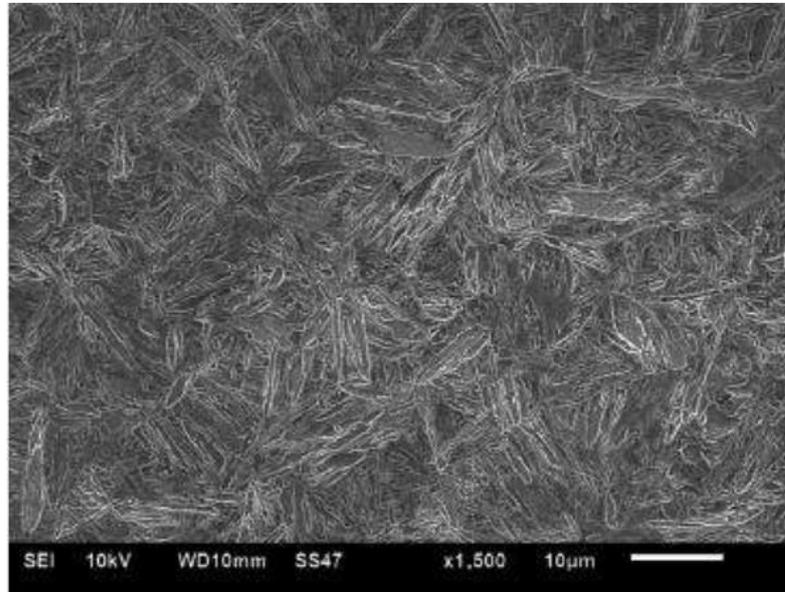
Figura 5 - Curva de resfriamento de têmpera em água com fluxo de velocidade de 0 a 0,75m/s.



Fonte: ASM (1991)

Na Figura 9 é possível identificar a microestrutura de um aço AISI 4340 submetida ao tratamento térmico de têmpera em água.

Figura 6 - Microestrutura de um aço AISI 4340 temperado em água.



Fonte: EL RAYES et al. (2014)

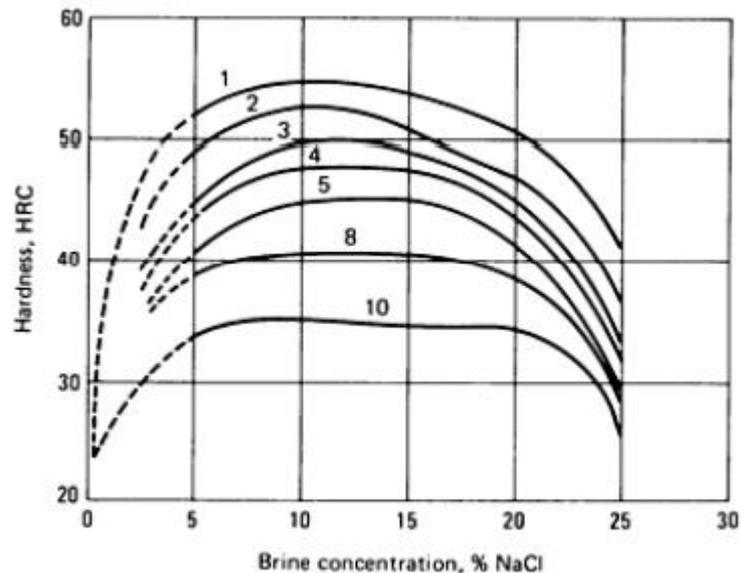
2.2.2.2 *Têmpera em salmoura*

William E. Bryson (2009) afirma que o uso de uma solução de salmoura, com cerca de 10% de sal, reduz o possível dano causado pela têmpera em água pura, pois o sal cria uma camada protetora na superfície da peça, ajudando a reduzir a formação de carepa e proporcionando uma dureza mais uniforme. A água resfria o aço de maneira eficiente, porém, requer cuidados especiais para evitar distorções e tensões internas, que podem ocorrer devido ao resfriamento rápido e desigual.

O posicionamento adequado das peças durante a têmpera é vital, com seções planas e tubulares sendo imersas verticalmente para garantir um resfriamento uniforme. Além disso, a agitação dinâmica da água é essencial para manter o resfriamento constante, pois o aquecimento do líquido em torno da peça pode comprometer o processo, levando a um endurecimento inadequado.

A concentração de salmoura afeta diretamente a dureza após a realização da têmpera. Essa relação é visualizada na Figura 7.

Figura 7 - Relação entre a dureza e a concentração de salmoura ao temperar sem agitação.



Fonte: ASM (2014)

2.2.2.3 *Têmpera em óleo*

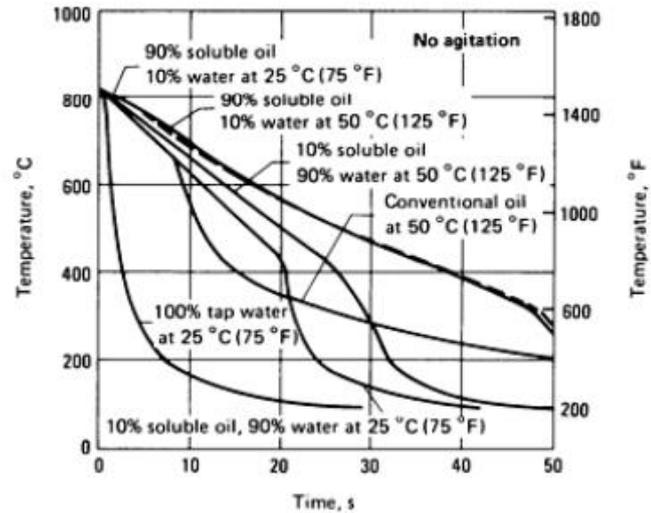
A têmpera em óleo é amplamente utilizada no tratamento térmico de aços devido ao seu resfriamento mais lento e uniforme em comparação com a água ou soluções de salmoura. O óleo oferece um meio de resfriamento mais controlado, o que reduz os riscos de distorção e trincamento, tornando-o ideal para aços com maior temperabilidade e peças mais complexas. Diferentes tipos de óleos são usados na têmpera, classificados conforme suas características de resfriamento, como óleos lentos, convencionais, rápidos e de martêmpera. A escolha do óleo depende das propriedades desejadas na peça final e da sensibilidade do material ao choque térmico (ASM, 1991).

Óleos de têmpera rápida apresentam velocidades de resfriamento moderadamente elevadas durante a fase inicial de resfriamento, semelhante à água, mas oferecem uma taxa de resfriamento mais lenta nas fases finais, reduzindo o risco de trincas. Aditivos especiais são frequentemente utilizados para melhorar as propriedades de resfriamento dos óleos e garantir que o processo de têmpera seja consistente ao longo do tempo (ASM, 1991).

Embora os óleos ofereçam maior segurança e menor risco de distorção, sua eficiência pode ser influenciada pela temperatura do banho, pela agitação do meio e pelo tamanho da peça. Em geral, a têmpera em óleo é preferida para aços de maior temperabilidade

e peças que requerem um endurecimento uniforme, com menor risco de defeitos superficiais ou estruturais (ASM, 1991). Na Figura 8 é possível identificar as curvas comparativas para o resfriamento em óleo e em água sem agitação.

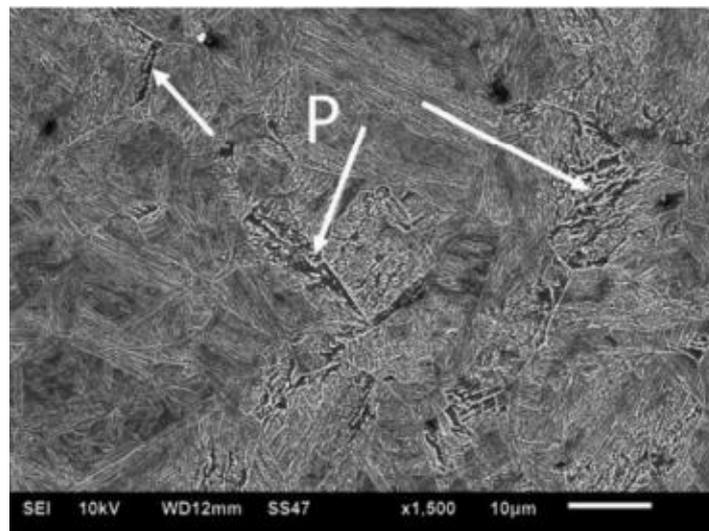
Figura 8 - Curvas comparativas para resfriamento em água e óleo sem agitação.



Fonte: ASM (1991)

El Rayes et al (2014) verificou que a microestrutura do aço AISI 4340 temperada em óleo, Figura 9, é composta em sua maioria por perlita, cerca de 80%, e apenas 20% de ferrita.

Figura 9 - Microestrutura de um aço 4340 temperada em óleo.



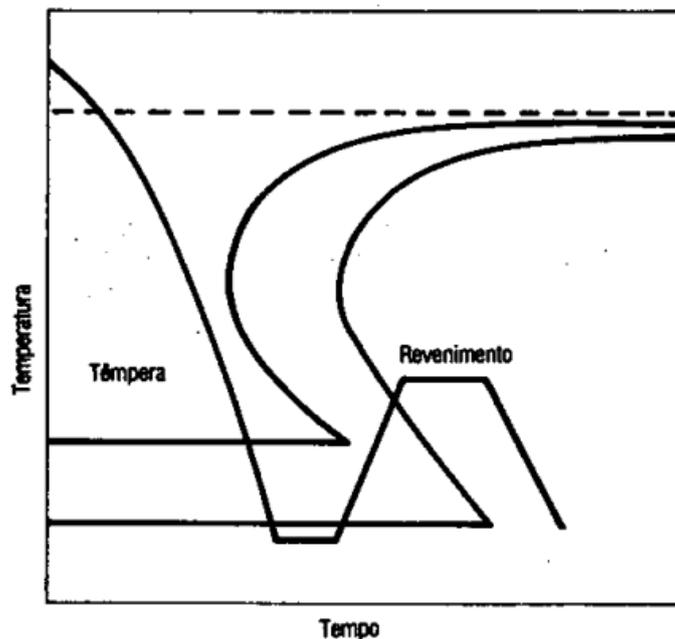
Fonte: EL RAYES et al (2014)

2.2.3 Revenido

Segundo Chiaverini (2005), o revenido é um tratamento térmico que geralmente acompanha a têmpera, pois corrige muitos dos problemas causados por esse processo. Ele alivia ou elimina as tensões internas e ajusta a dureza excessiva e a fragilidade do material, melhorando sua ductilidade e resistência a impacto

Este tratamento envolve aquecer o material de forma uniforme até uma temperatura inferior à de austenitização, mantendo o aço nessa temperatura pelo tempo necessário para equilibrar a temperatura e alcançar as propriedades desejadas, Figura 10. (Costa e Silva)

Figura 10 - Ciclo de têmpera e revenimento.

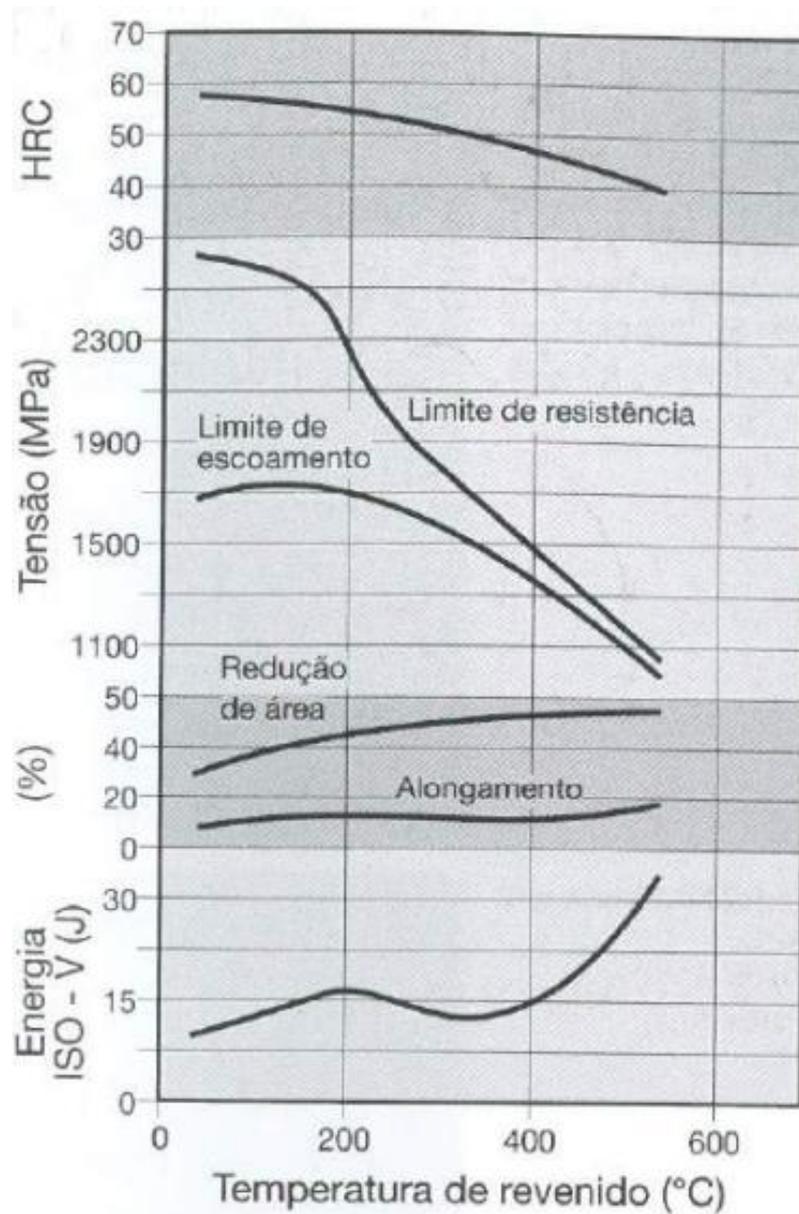


Fonte: COSTA e SILVA (1988)

No revenimento, o comportamento típico envolve a redução da dureza e da resistência mecânica, junto com o aumento da ductilidade. No entanto, em certos casos, como em aços-ferramenta, pode ocorrer um aumento da dureza devido ao endurecimento por precipitação, conhecido como endurecimento secundário. A tenacidade, por sua vez, não segue um padrão uniforme. Embora normalmente aumente com a elevação da temperatura de revenimento, há intervalos de temperatura onde ocorre uma redução da tenacidade, chamada de fragilização. Esses fenômenos são importantes porque não se manifestam claramente em outras propriedades do aço nem em mudanças microestruturais fáceis de identificar (Callister, 2012).

Na Figura 11 é apresentado o efeito do revenimento sobre as propriedades mecânicas do aço AISI 4340.

Figura 11 - Efeito do revenimento sobre o aço AISI 4340.



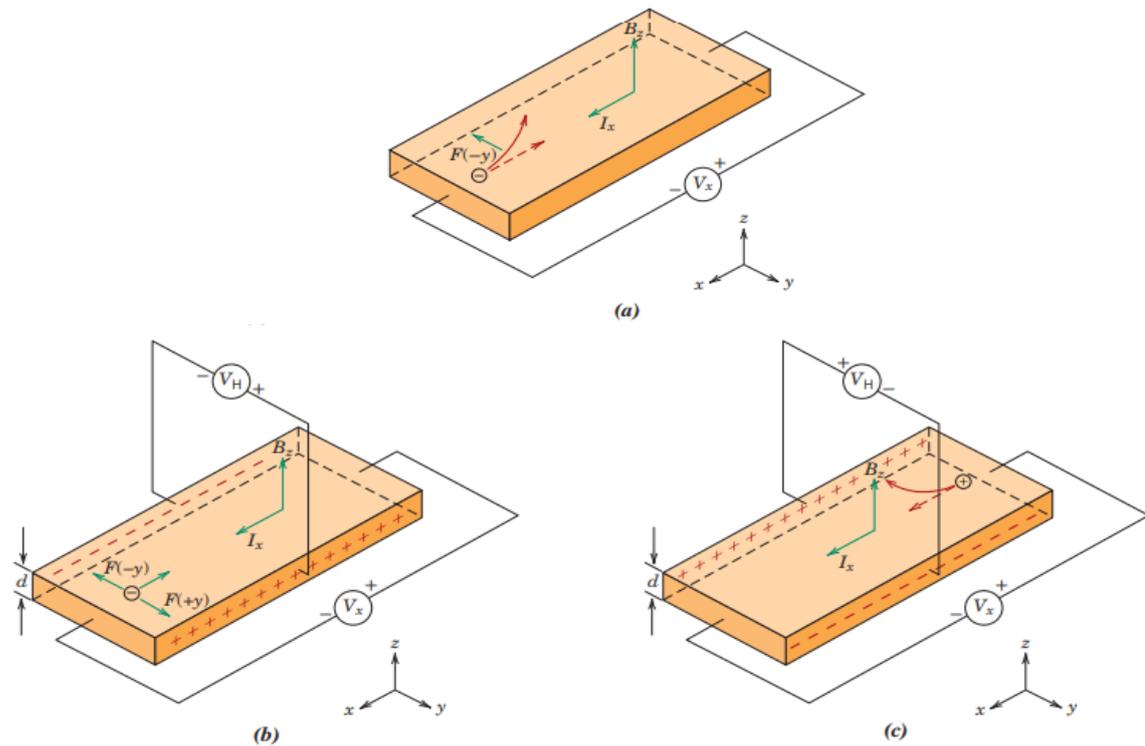
Fonte: Colpaert (2008)

2.2.4 Ensaio Magnético

Para certos materiais, pode ser necessário determinar o tipo, a concentração e a mobilidade dos portadores de carga predominantes. Essas características não podem ser obtidas apenas por meio de uma medição de condutividade elétrica; é preciso realizar um experimento baseado no efeito Hall. Esse efeito ocorre quando um campo magnético é aplicado de forma

perpendicular à trajetória de uma partícula carregada, gerando uma força conhecida como força de Lorentz, que atua perpendicularmente tanto ao campo magnético quanto à direção do movimento da partícula. (Callister, 2016)

Figura 12 - Representações esquemáticas do efeito Hall



Fonte: Callister, 2016

Para a maioria dos metais e semicondutores: Figura 12a) O movimento dos elétrons é linear e na direção $-x$ (seta tracejada) antes da aplicação do campo magnético, B_z ; quando B_z é aplicado, um elétron em movimento é submetido a uma força de Lorentz $F(-y)$, uma deflexão em direção à face traseira da amostra, e uma trajetória indicada pela seta curva; e Figura 12b) A situação em estado estacionário, na qual uma voltagem (voltagem de Hall, V_H) é estabelecida entre a face traseira da amostra, carregada negativamente, e a face frontal, carregada positivamente. Figura 12c) Uma demonstração do efeito Hall para semicondutores do tipo p.

As medições magnéticas são eficazes na caracterização das alterações na estrutura de materiais ferromagnéticos, pois os processos de magnetização estão profundamente ligados à microestrutura desses materiais. Essa característica torna as medições magnéticas uma opção clara para ensaios não destrutivos, possibilitando a detecção e a análise de modificações e/ou defeitos em materiais e produtos elaborados com esses materiais. (Vértesy, 2004)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Material

Neste trabalho o material estudado foi o aço AISI 4340, recebido na forma de uma barra redonda com diâmetro de 25 mm e comprimento de 300 mm, cedida pelo Laboratório de Tratamento Térmico (LTT), localizado na UFPB. Na Tabela 2 estão os dados da composição química do aço.

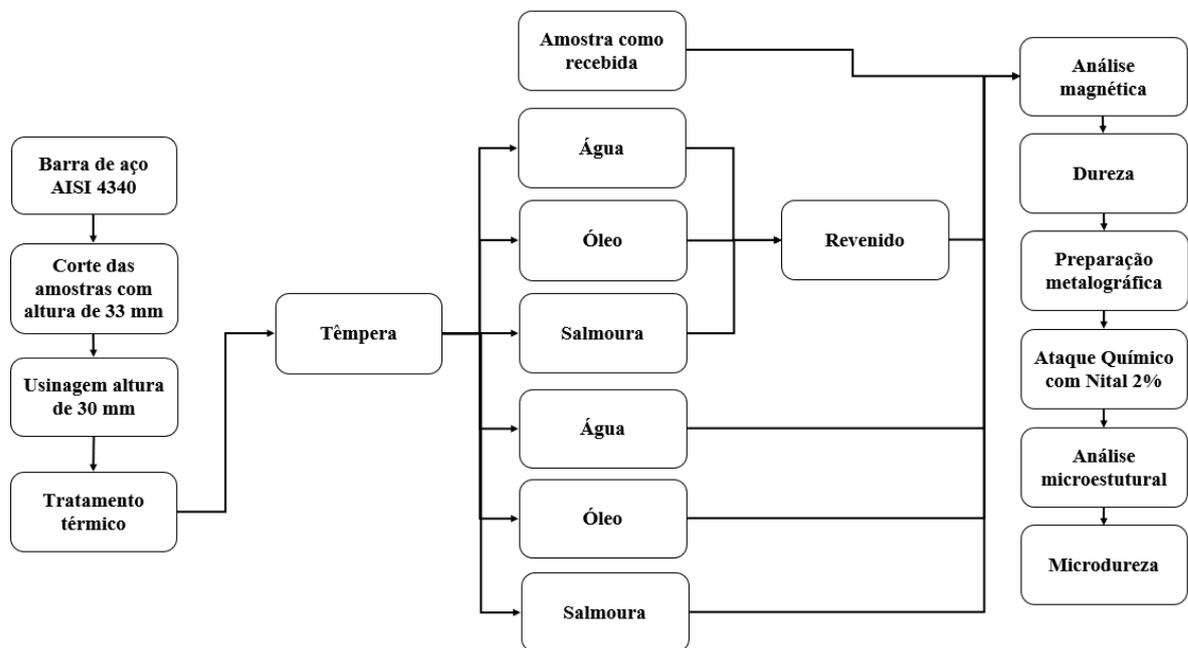
Tabela 3 - Composição química do aço ARBL AISI 4340 (% em peso).

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
0.41	0.70	0.25	0.020	0.020	0.80	1.80	0.25	Em balanço

Fonte: ASM (1991)

O procedimento experimental utilizado neste trabalho está representado no fluxograma da Figura 13.

Figura 13 - Fluxograma do procedimento experimental

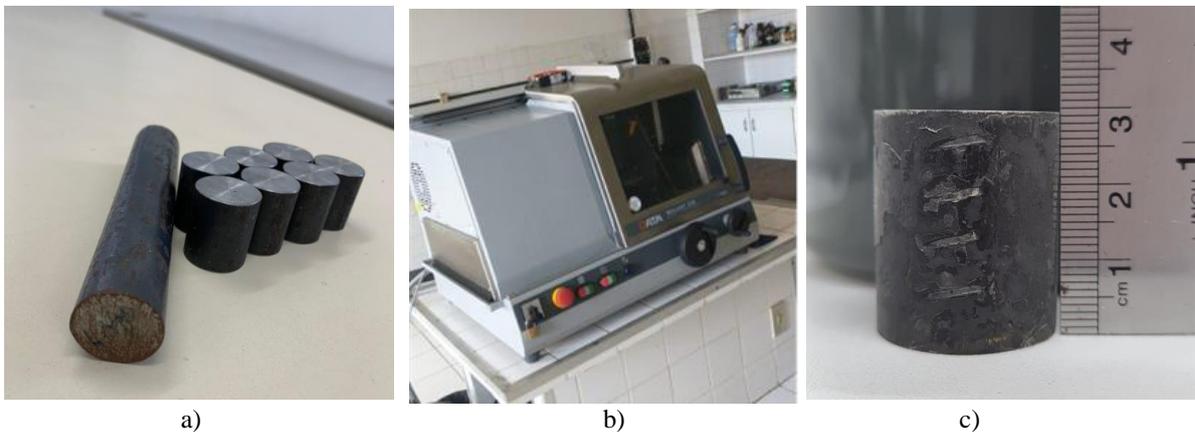


Fonte: Próprio autor (2024)

3.2 Preparação dos corpos de prova

A partir de uma barra redonda de aço AISI 4340 foram extraídas 07 (sete) amostras com aproximadamente 33 mm de altura conforme a Figura 14a. Para a confecção das amostras foi utilizado uma cortadeira de bancada da marca, modelo BRILLANT 230, Figura 14b, localizada no Laboratório de Solidificação Rápida (LSR) da UFPB. Para deixar as 07 amostras com a altura padrão de 30 mm, figura 14c, para conduzir a análise magnética através da leitura do sensor Hall, foi utilizado o torno mecânico que se encontra no Laboratório de Oficina Mecânica (LOM) da UFPB.

Figura 14 – Preparação das amostras: a) Barra e amostras cortadas com aproximadamente 33 mm de altura; b) Máquina de corte; c) Amostra final com 30 mm de altura



Fonte: Próprio autor (2024)

Das sete amostras confeccionadas, uma foi reservada para análise do material em seu estado original, enquanto as outras seis foram divididas e identificadas com marcações em forma de ranhuras que permitem distinguir o tratamento térmico aplicado a cada amostra, conforme mostrado na Figura 16. Além dessas marcações, para facilitar a compreensão durante o estudo, as amostras receberam os seguintes nomes:

Tabela 4 – Identificação das amostras

Amostra	Tratamento térmico	Nº de marcações
A0	Como recebido	Material de referência
A1	Têmpera em água	Sem marcação
A2	Têmpera em óleo	04 marcações
A3	Têmpera em salmoura	05 marcações
A4	Têmpera em água e revenimento	03 marcações
A5	Têmpera em óleo e revenimento	02 marcações
A6	Têmpera em salmoura e revenimento	01 marcação

Fonte: Próprio autor (2024)

3.3 Tratamentos térmicos

As amostras foram tratadas termicamente em um forno mufla, fabricante JUNG, localizado no Laboratório de Solidificação Rápida (LSR) da UFPB, Figura 15. A velocidade de aquecimento empregada foi de 100°C/min até a temperatura de 870°C. O tempo de encharque adotado foi de 60 minutos, conforme as recomendações da ASM (1991).

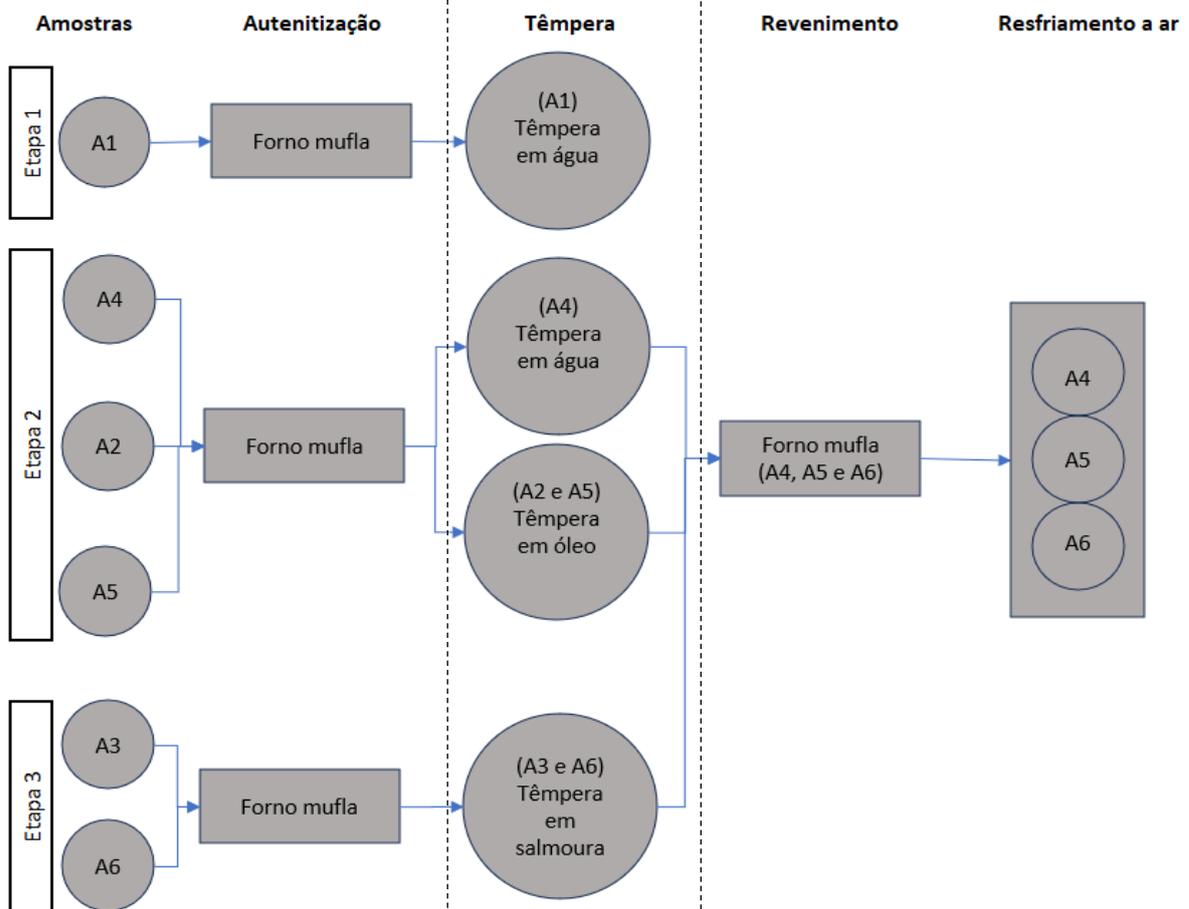
Figura 15 - Forno mufla fabricante JUNG



Fonte: Próprio autor (2024)

O tratamento térmico de têmpera e revenimento foi realizado o fluxograma descrito na Figura 16. A têmpera foi realizado com três resfriamentos diferentes, e para cada um deles foram tratadas duas amostras.

Figura 16 - Fluxograma do procedimento de tratamento térmico utilizado neste estudo.



Fonte: Próprio autor. (2024)

A primeira amostra, A1, foi removida do forno e submetida à têmpera em água em um recipiente contendo 11 litros de água. Após esse primeiro tratamento, o processo continuou com outras três amostras. As amostras A2 e A5 foram temperadas em óleo, enquanto a amostra A4 foi temperada em água. Por fim, as duas últimas amostras, A3 e A6, foram submetidas à têmpera em salmoura, utilizando uma solução aquosa com 10% de NaCl.

Após a etapa de têmpera, três das amostras, cada uma submetida a diferentes meios de resfriamento, retornaram ao forno para o processo de revenimento. A temperatura de revenimento utilizada foi de 600°C, com um tempo de encharque de 60 minutos.

Os tratamentos térmicos utilizados neste trabalho seguem os parâmetros listados na Tabela 5.

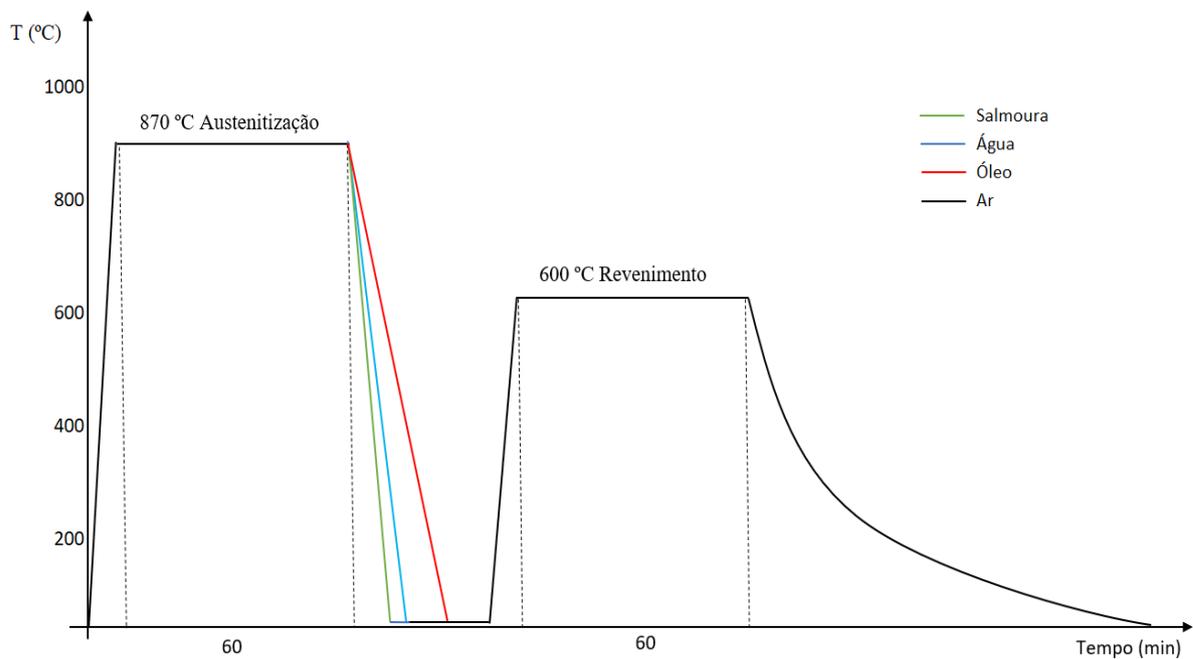
Tabela 5 - Resumo dos tratamentos aplicados no aço AISI 4340.

Amostra	Tratamento aplicado	Tempo (min)	Resfriamento
A0	Como recebido	-	-
A1	Têmpera em água	60	Água sem aditivos, sob agitação moderada
A2	Têmpera em óleo	60	Óleo de têmpera
A3	Têmpera em salmoura	60	Solução aquosa de NaCl à 10%
A4	Têmpera em água e revenimento	60 + 60	Água sem aditivos + Ar tranquilo
A5	Têmpera em óleo e revenimento	60 + 60	Óleo de têmpera + Ar tranquilo
A6	Têmpera em salmoura e revenimento	60 + 60	Solução aquosa de NaCl à 10% + Ar tranquilo

Fonte: Próprio autor (2024)

Os ciclos térmicos aplicados nas amostras estão representados na Figura 17.

Figura 17 - Ciclos térmicos aplicados no aço AISI 4340.

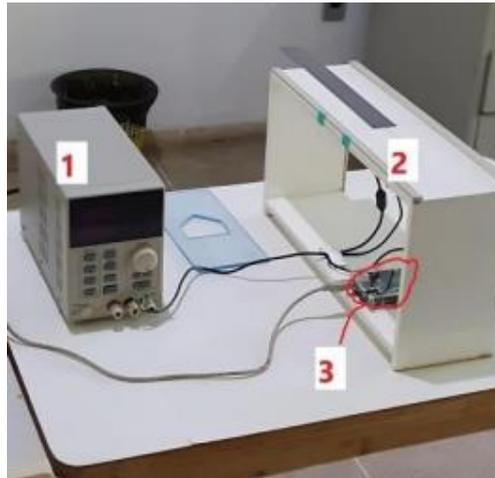


Fonte: Próprio autor. (2024)

3.4 Ensaio magnético

O equipamento empregado nos ensaios magnéticos foi desenvolvido no LTT da UFPB, sendo composto por um módulo de emissão e outro de aquisição. É possível verificar a disposição dos equipamentos utilizados para realizar o ensaio na Figura 18.

Figura 18 - Configuração experimental: (1) Gerador; (2) Bancada de testes; (3) Placa de aquisição.



Fonte: MORAES (2024)

Para calcular o campo magnético, as extremidades das amostras passaram por lixas de carvão de silício (SiC) de 180, 240 e 400 *Mesh*. Esse procedimento foi realizado após o tratamento térmico e também na amostra no estado como recebido, com intuito de deixar a superfície lisa para não haver interferência na medição.

O sensor utilizado é de efeito Hall, alimentado com uma tensão contínua inicialmente de 1.5V, depois com 2V e finalizando com uma tensão de 2,5V, a fim de entender melhor a variação do campo juntamente com a intensidade da tensão aplicada. Segundo o Callister, seu funcionamento se dá aplicando uma corrente elétrica I percorrendo pelo material condutor, e encontra-se sob a influência de um campo magnético de intensidade B , orientado de forma perpendicular ao fluxo dos portadores de carga, resultando em uma ddp.

3.5 Ensaio de dureza

Foi realizado o ensaio de dureza Rockwell, utilizando o durômetro da marca Digimess do Laboratório de Tratamento Térmico (LTT) da UFPB, Figura 19, seguindo os procedimentos de acordo com a norma ABNT NBR ISO 6508- 1:2019. A fim de garantir a confiabilidade dos dados, a dureza foi medida em 05 (cinco) pontos em cada amostra. A força

de pré-carga utilizada no ensaio foi de 10 kgf, já as de carga têm um valor de 100 kgf para durezas Rockwell B e 150 kgf para dureza Rockwell C.

Figura 19 – Durômetro DIGIMESS empregado no ensaio de dureza Rockwell.



Fonte: MORAES (2024)

3.6 Preparação metalográfica

As amostras não foram embutidas, pois as suas dimensões permitiram o preparo metalográfico. No preparo das amostras, foi realizado o lixamento em lixadeira manual com lixas de carvão de silício de 180, 320, 400, 600 e 1200 *Mesh*. Após este procedimento foi feito o polimento das amostras com alumina de 1,0 e 0,3 μ m. Para revelar a microestrutura do material as amostras foram submetidas ao ataque metalográfico com o reagente Nital 2% (solução com 2% de HNO₃ e 98% de álcool etílico P.A.), com tempo de exposição de 23 segundos.

3.7 Microscopia Óptica

Foram realizadas análises detalhadas das amostras através de um microscópio óptico marca Zeiss/Axiotech, equipado com software destinado à avaliação de imagens, como pode ser visto na Figura 20. Com o auxílio do software ImageJ foi determinado o percentual das fases presente nas amostras.

Figura 20 - Microscópio Zeiss/Axiotech.



Fonte: MORAES (2024)

3.8 Ensaio de Microdureza

A medição de microdureza foi feita pelo Microdurômetro MHV-2T/SHIMADZU, como mostrado na Figura 25 no LSR, obedecendo o distanciamento da norma ABNT NBR NM-ISO 6507-1:2008.

Figura 21 – Microdurômetro MHV-2T/SHIMADZU



Fonte: MORAES (2024)

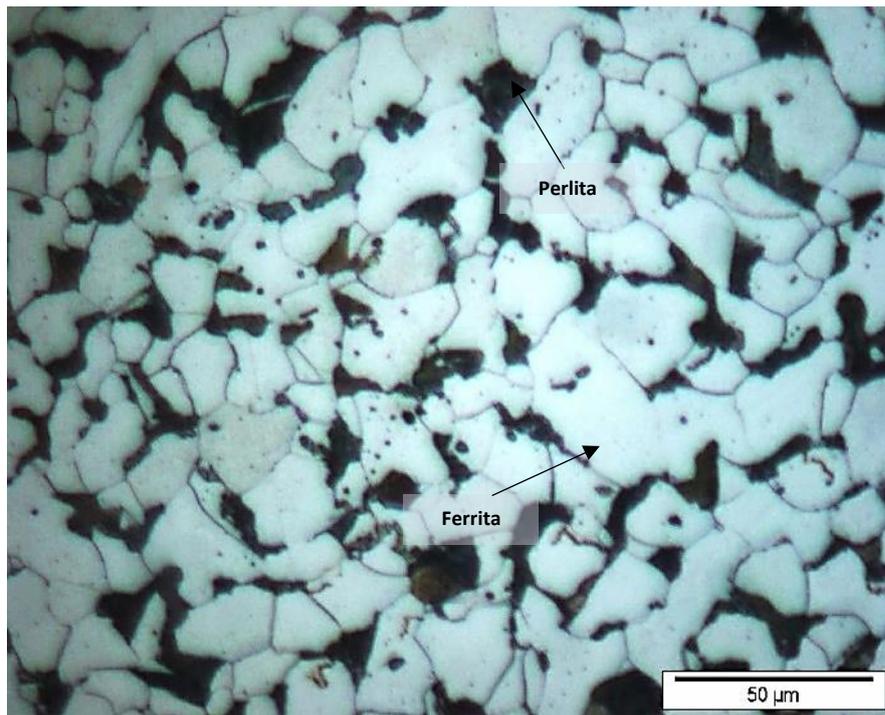
A força de penetração aplicada foi de 1,961 N ou uma carga de 0,2 kgf, com um tempo estimado de cada indentação de 10 segundos, contemplando 10 pontos em cada amostra, sendo 05 pontos localizados próximos à borda e 05 pontos no centro das amostras.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterizações microestruturais

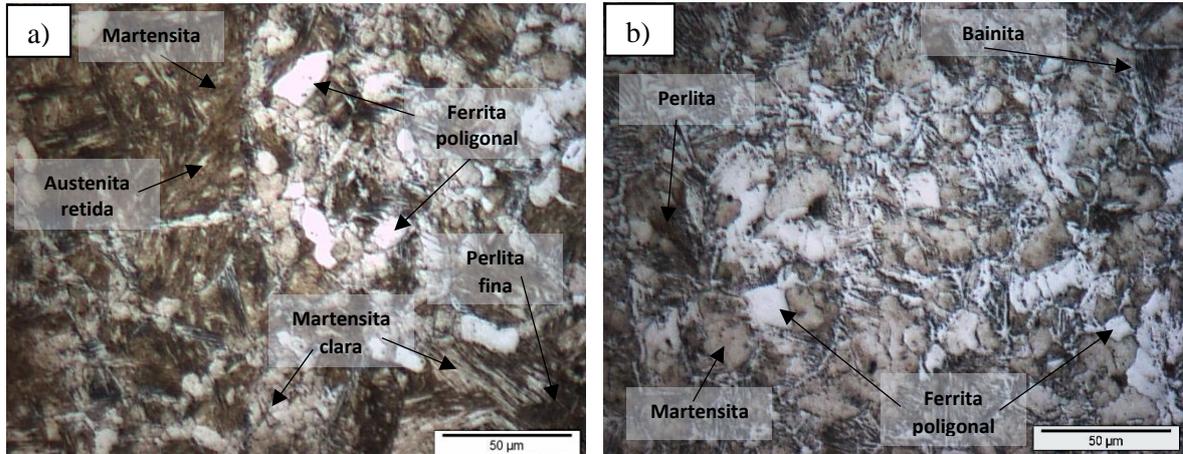
As Figuras de 22 a 28 apresentam as micrografias com a descrição das fases presentes nas amostras estudadas. A Figura 22 ilustra a amostra A0, material como recebido. Nesta, observa-se uma estrutura ferrítica (fase clara) e perlítica (fase escura). A microestrutura encontrada está de acordo com a literatura, COLPAERT, 2088, que cita que este material é fornecido na condição como normalizado com microestrutura fina de ferrita e perlita. Conforme foram realizados os tratamentos térmicos de têmpera, notam-se a mudanças na morfologia dos grãos e a presença de novas fases.

Figura 22 - Microestrutura do aço AISI 4340, material como recebido. Ampliação 500X.



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 23 - Microestrutura do aço AISI 4340 submetido à tempera com resfriamento em água: a) borda e b) centro. Ampliação 500X



Fonte: Próprio autor (2024)

Na Figura 23, amostra A1, temperada em água, revelou a presença de vários microconstituintes como ferrita poligonal, perlita fina, martensita clara, martensita e austenita retida. A ferrita poligonal é um tipo de microestrutura que surge ao adicionar mais de uma amostra ao forno, esse procedimento permite que a temperatura de aquecimento das amostras não seja uniforme. Magalhães (2024) explica em seu trabalho que ao abrir a porta do forno para realizar a tempera, as amostras são resfriadas e a curva de aquecimento tende a formar outras fases além da martensita, que seria o desejado. Isso também justifica a formação de perlita fina neste experimento; contudo, é possível verificar que tanto na borda quanto no centro da amostra, há a presença de martensita, sendo este o microconstituente mais predominante, atingindo cerca de 60,60% de toda microestrutura presente, Tabela 6. As análises das quantidades de fases pelo ImageJ estão no APÊNDICE A.

Tabela 6 – Fração volumétrica das fases presentes nas amostras do aço AISI 4340.

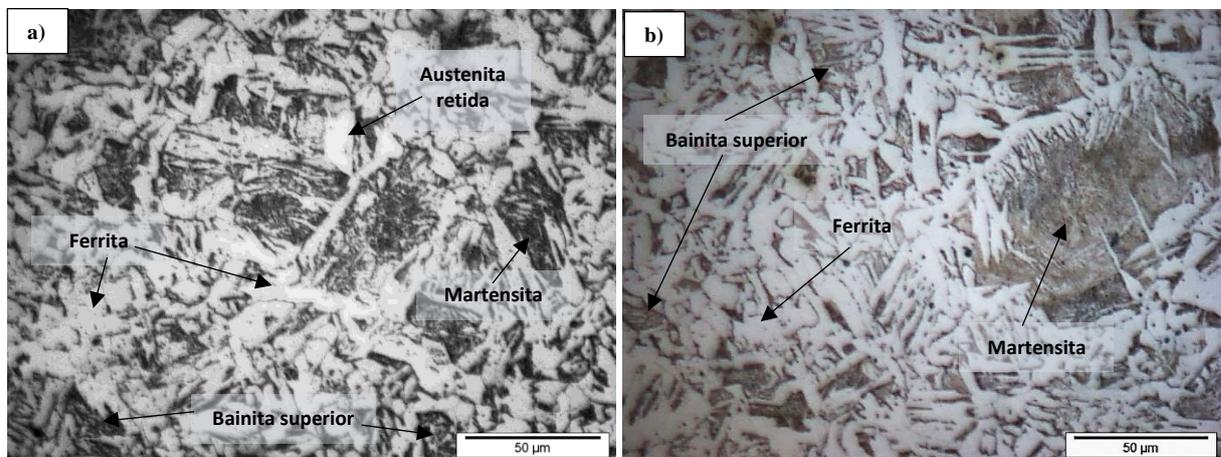
Amostra	Condição	% de microconstituente							
		F	P	B	M	M+B	M-A	MR	MR+P
A0	Sem tratamento	58,56	41,44	-	-	-	-	-	-
A1	Têmpera em água	6,58	7,27	-	60,60	-	25,55	-	-
A2	Têmpera em óleo	53,89	-	44,26	1,85	46,11	-	-	-
A3	Têmpera em salmoura	-	-	-	-	45,18	54,82	-	-
A4	Têmpera em água e revenimento	47,25	-	-	-	-	-	52,25	-
A5	Têmpera em óleo e revenimento	50,28	-	-	-	-	-	-	49,72
A6	Têmpera em salmoura e revenimento	32,81	-	-	-	-	-	67,19	-

F – Ferrita, P – Perlita, B – Bainita, M – Martensita, M-A – Austenita retida, MR – Martensita Revenida.

Fonte: Próprio autor (2024)

A amostra A2, Figura 24, apresenta as fases ferrita, bainita superior e martensita, resultado do resfriamento em óleo que é menos severo do que os métodos utilizados nas outras amostras. Nesta condição há a presença efetiva de microestrutura ferrítica tanto na borda, Figura 24^a, quanto no centro 24^b, indicando que a taxa de resfriamento foi abaixo do esperado para têmpera em óleo.

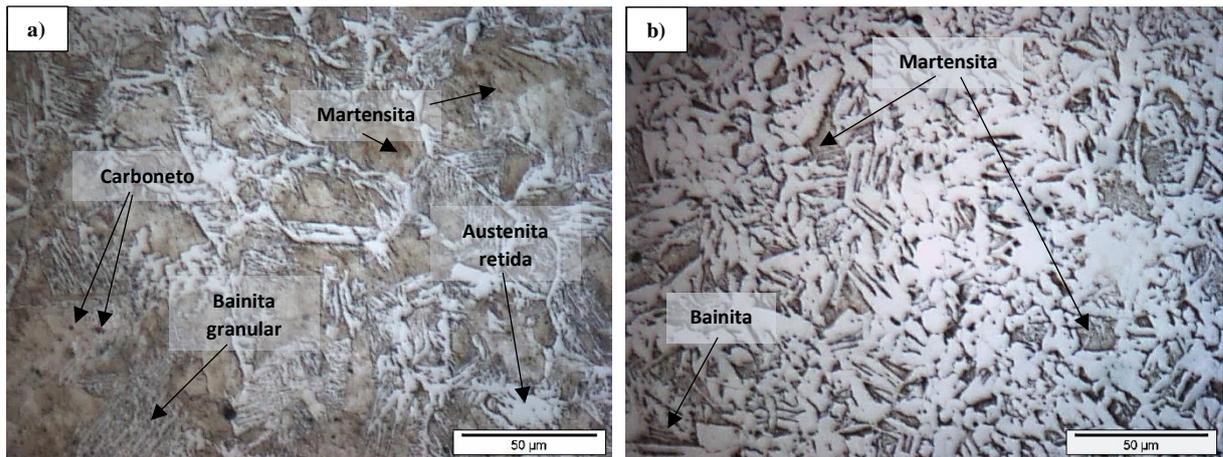
Figura 24 - Microestrutura do aço AISI submetido à têmpera com resfriamento em óleo: a) borda e b) centro. Ampliação 500X.



Fonte: Próprio autor (2024)

Na Figura 25, amostra A3, temperada em salmoura, os microconstituintes presentes são martensita, bainita granular e austenita retida. A aplicação do resfriamento da têmpera por meio aquoso com sal mostrou-se mais eficiente quando comparada aos outros dois tratamentos promovendo grande parcela de estrutura martensítica, Tabela 6.

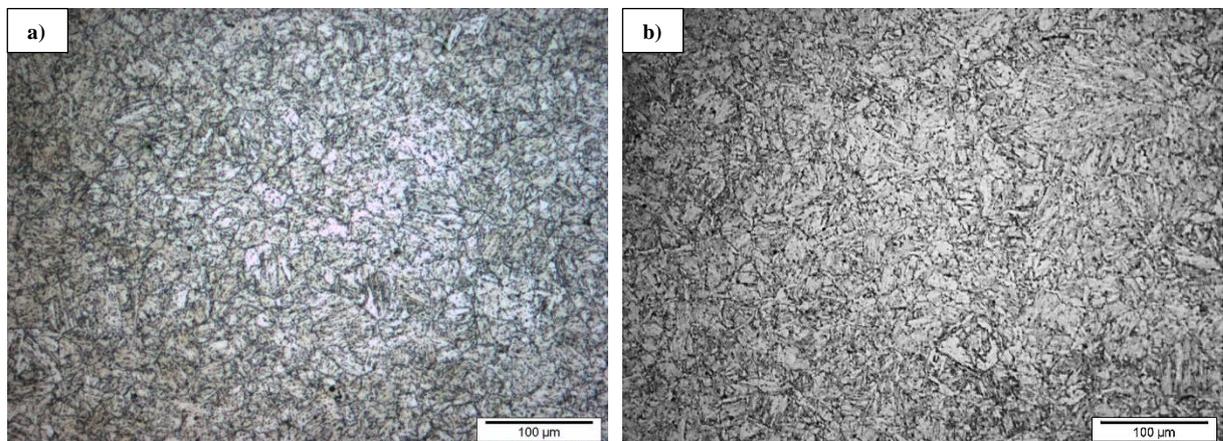
Figura 25 - Microestrutura do aço AISI 4340 submetido à têmpera com resfriamento em salmoura: a) borda e b) centro. Ampliação 500X.



Fonte: Próprio autor (2024)

A Figura 26 representa a amostra A4, temperada em água e revenida, indica a grande presença da microestrutura martensita revenida, indicando que o tratamento térmico de têmpera e revenimento surtiu efeito. Neste tratamento térmico, formou-se uma fina estrutura revenida próxima à borda da amostra e um crescimento de grão no centro.

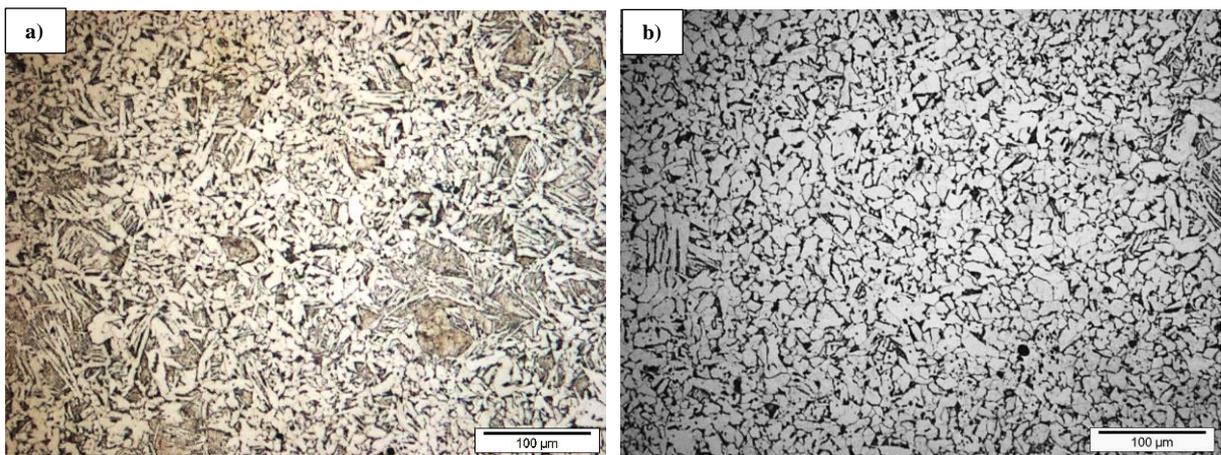
Figura 26 - Microestrutura do aço AISI 4340, amostra A4, temperada em água e revenida à 600 °C, ampliada em 200X: a) borda e b) centro.



Fonte: Próprio autor (2024)

A Figura 27a, amostra A4, temperada em óleo e revenida, exibe a presença da microestrutura martensita revenida e bainita, indicando que o tratamento térmico de têmpera foi efetivo apenas nos grãos de martensita; contudo, o centro da amostra, Figura 27b, não apresentou o mesmo resultado. A martensita presente na borda se mostrou muito menor no centro, devido ao resfriamento neste local ser mais lento.

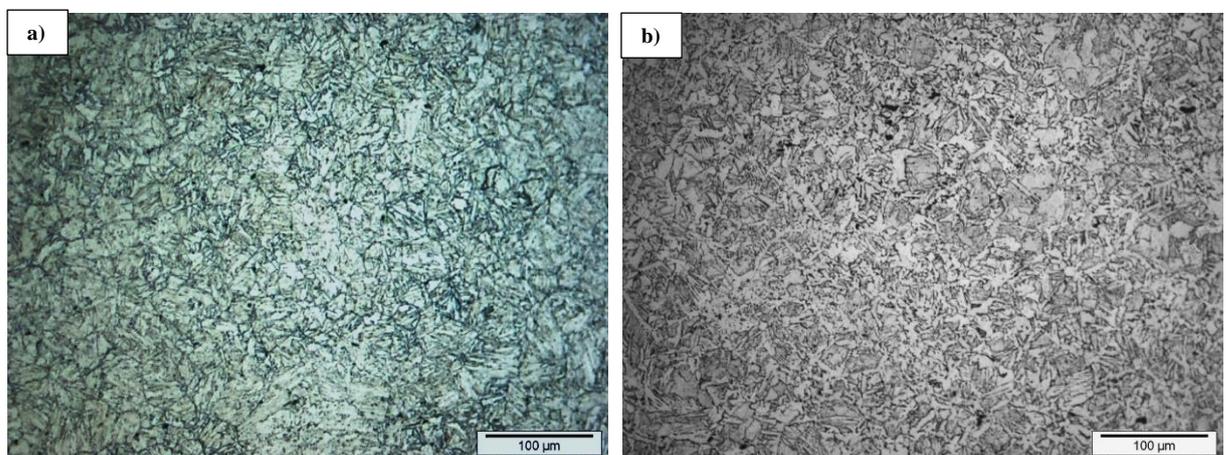
Figura 27 - Microestrutura do aço AISI 4340, amostra A5, temperada em óleo e revenida à 600 °C, ampliada em 200X. a) borda; b) centro



Fonte: Próprio autor (2024)

O revenimento na amostra A6, temperada em salmoura, promoveu um refinamento do grão martensítico e bainítico, Figura 28a, atingindo cerca de 48,51% de toda amostra; entretanto no centro da amostra nota-se grande presença de fase ferrítica, indicando que a temperatura de revenimento transformou a martensita em ferrita novamente.

Figura 28 - Microestrutura do aço AISI 4340, amostra A6, temperada em salmoura e revenida à 600 °C, ampliada em 200x. a) borda; b) centro



Fonte: Próprio autor (2024)

Ao analisar os resultados do tratamento térmico de têmpera através da microestrutura, pode-se dizer que este não se mostrou tão efetivo nas amostras A1 e A2, quanto na amostra A3, uma vez que o microconstituente ferrita se mostrou presente apenas nas duas primeiras. Enquanto o tratamento térmico de revenimento de fato promoveu um refinamento de grão e além disso a temperatura utilizada de 600°C promoveu a transformação da martensita em ferrita.

4.2 Dureza e microdureza

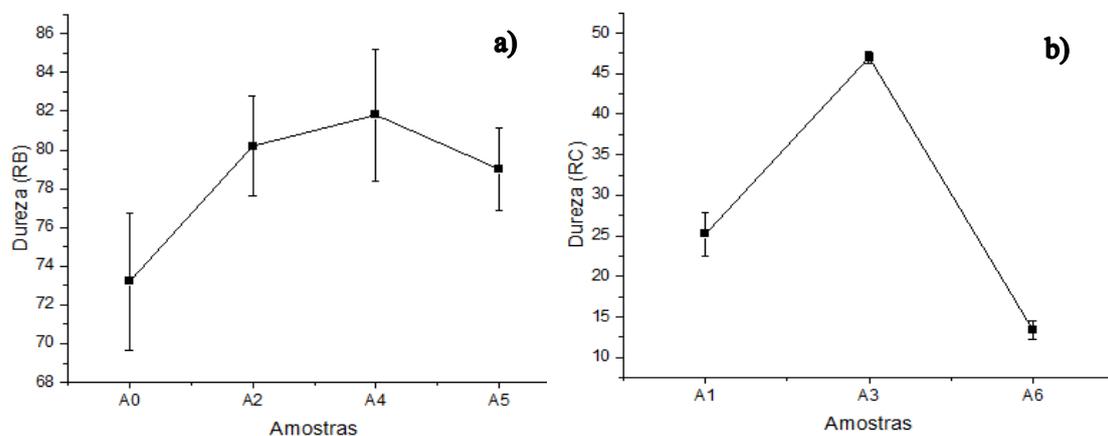
O ensaio de dureza foi realizado em Rockwell C e Rockwell B, e os respectivos resultados podem ser visualizados na Tabela 7 e graficamente na Figura 29.

Tabela 7 – Dureza média do aço AISI 4340.

Amostras	Dureza	Desvio padrão
A0	73,2 HRB	3,56
A1	25,2 HRC	2,68
A2	80,2 HRB	2,59
A3	47 HRC	0,71
A4	81,8 HRB	3,42
A5	79 HRB	2,59
A6	13,4 HRC	0,71

Fonte: Próprio autor (2024)

Figura 29 - Dureza a) Rockwell B e b) Rockwell C.



Fonte: Próprio autor (2024)

Na condição como recebido, amostra A0, o material apresentou uma dureza de 73,2 HRB. O método de dureza Rockwell B foi escolhido pois não foi possível obter valores na escala Rockwell C.

A partir dos resultados de dureza foi possível verificar que o processo de tempera resultou em aumento de dureza quando comparado com a amostra como recebido. Essa elevação na dureza é mais perceptível na amostra A3, temperada em salmoura, que obteve uma dureza média de 47 HRC, enquanto a amostra A5, temperada em óleo, ficou com um valor bem abaixo de acordo com o diagrama TRC do aço AISI 4340. Zordão (2018) observou em um trabalho que um aço com 0,45%pC ao ser temperado em água obteve um valor de dureza abaixo do esperado, devido a dimensão do corpo de prova.

Os pontos de medição de dureza se concentraram na região intermediária e centro das amostras, como é possível identificar na Figura 30.

Figura 30 - Localização dos pontos realizados no ensaio de dureza.



Fonte: Próprio autor (2024)

As amostras temperadas e revenidas apresentaram valores abaixo da literatura, sendo todas analisadas com o penetrador esférico, uma vez que o penetrador cônico estava deformando a superfície das amostras indicando que o aço estava mais macio do que deveria. Ladeira et al (2017) conclui que com o processo de revenimento a dureza do aço AISI 4340 diminui significativamente nos tratamentos com temperatura de encharque superiores a 400°C. Essa análise justifica a queda dos valores de dureza uma vez que neste estudo a temperatura de encharque no revenido foi 600°C.

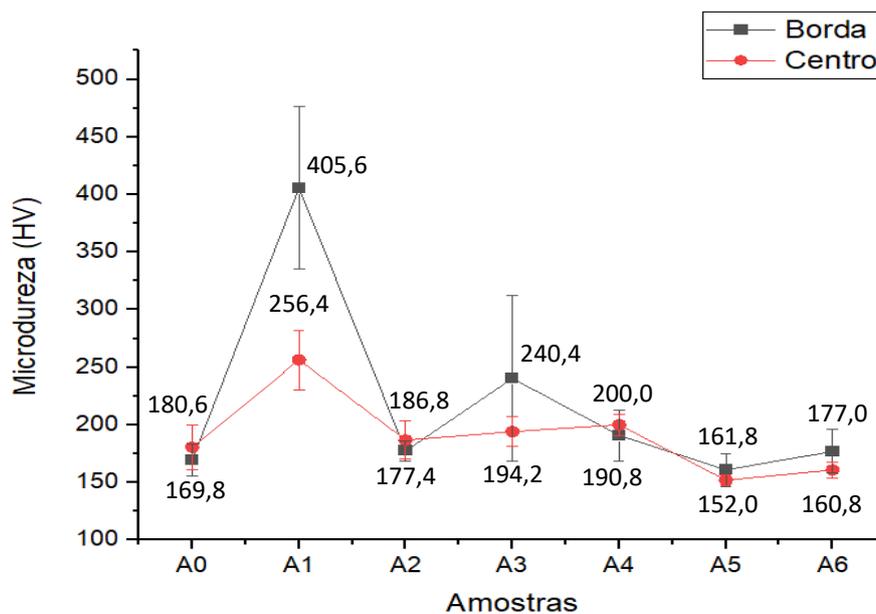
Os resultados obtidos no ensaio de microdureza tanto para a borda quanto para o centro das amostras podem ser visualizados na Tabela 8 e na Figura 31.

Tabela 8 – Microdureza média do aço AISI 4340.

Amostras	Borda	Desvio padrão	Centro	Desvio padrão
A0	169,8 HV	13,70	180,6 HV	19,23
A1	405,6 HV	70,52	256,4 HV	25,80
A2	177,4 HV	8,79	186,8 HV	16,59
A3	240,4 HV	72,36	194,2 HV	13,18
A4	190,8 HV	22,22	200,0 HV	9,06
A5	161,8 HV	14,23	152,0 HV	4,36
A6	177,0 HV	18,93	160,8 HV	6,83

Fonte: Próprio autor (2024)

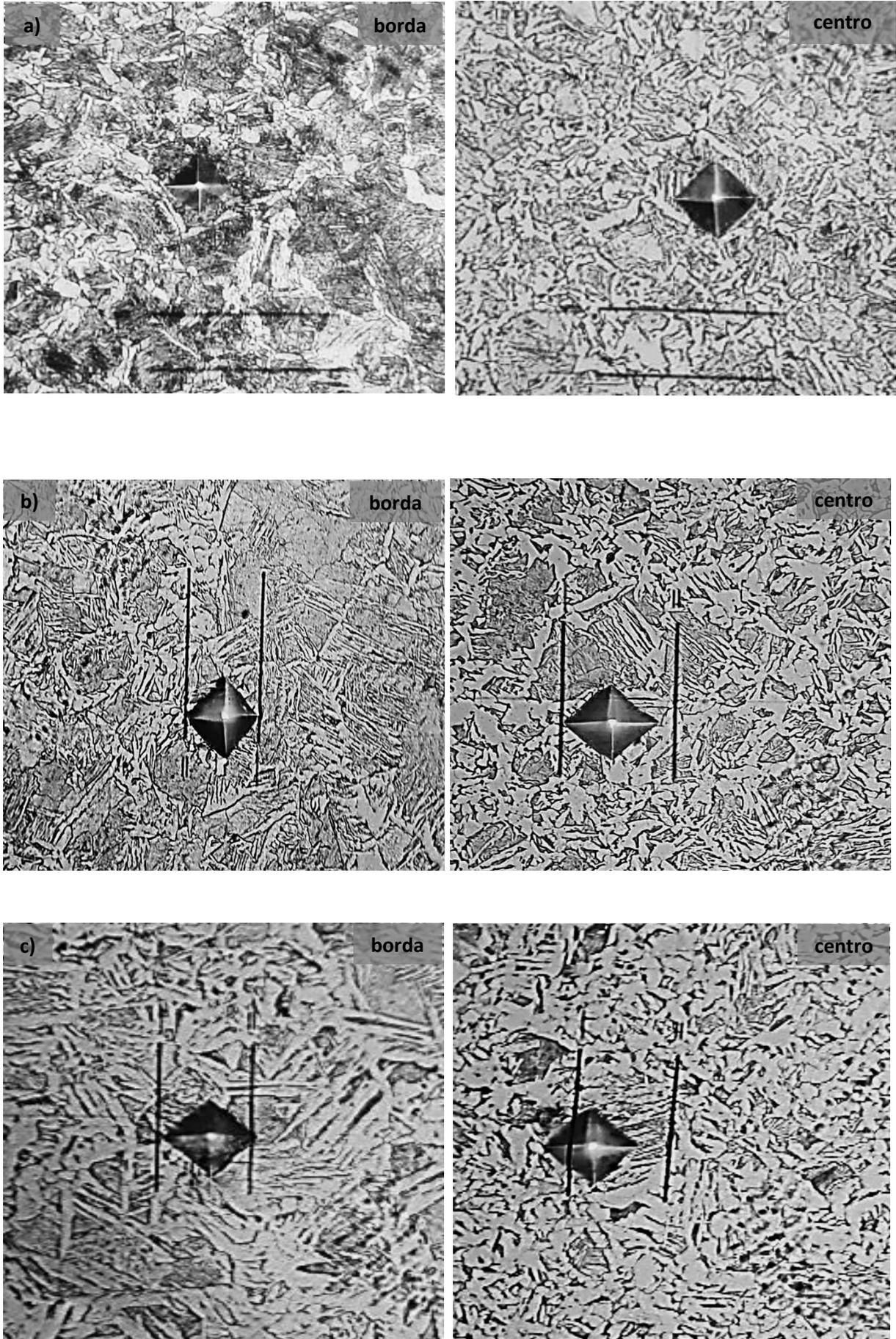
Figura 31 - Microdureza Vickers das amostras tratadas termicamente.

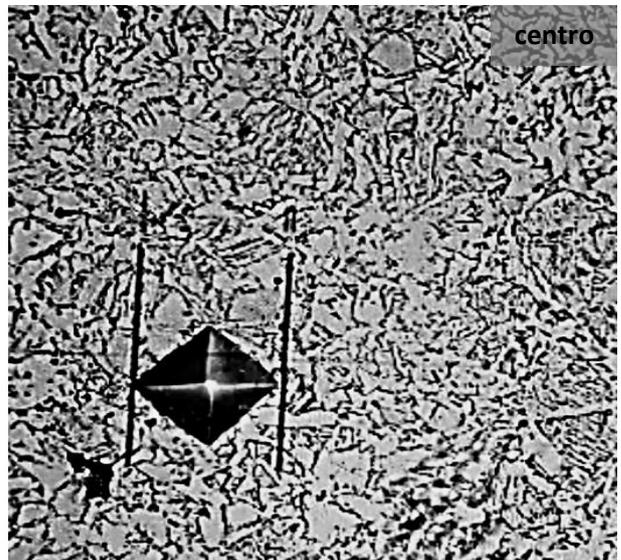
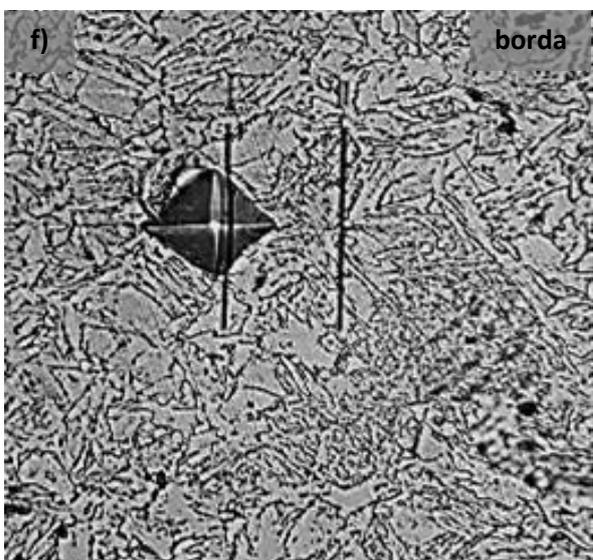
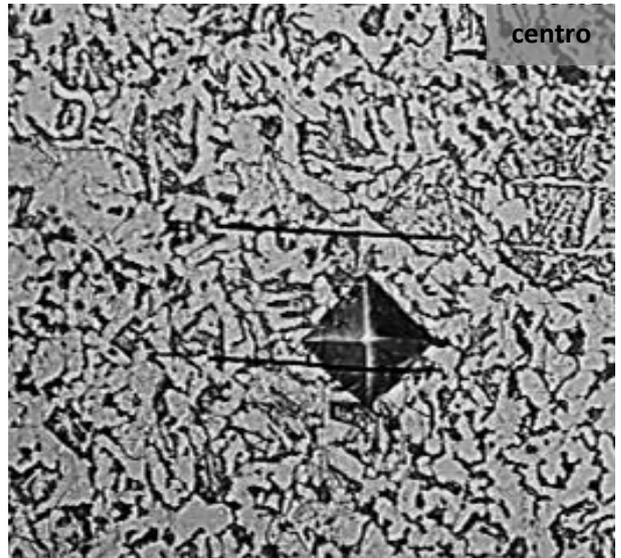
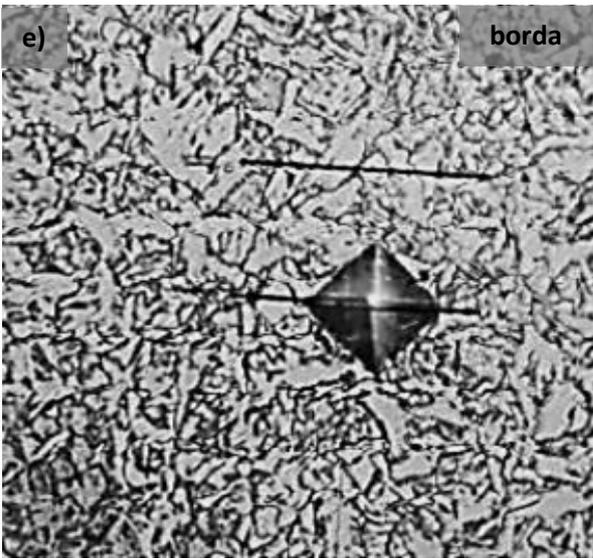
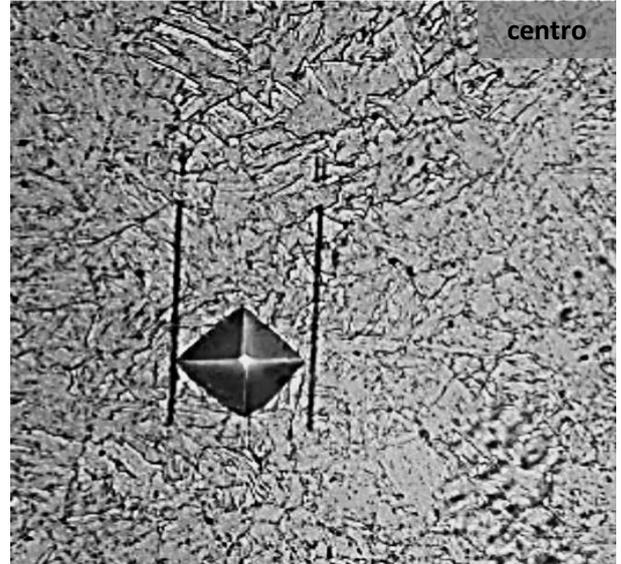
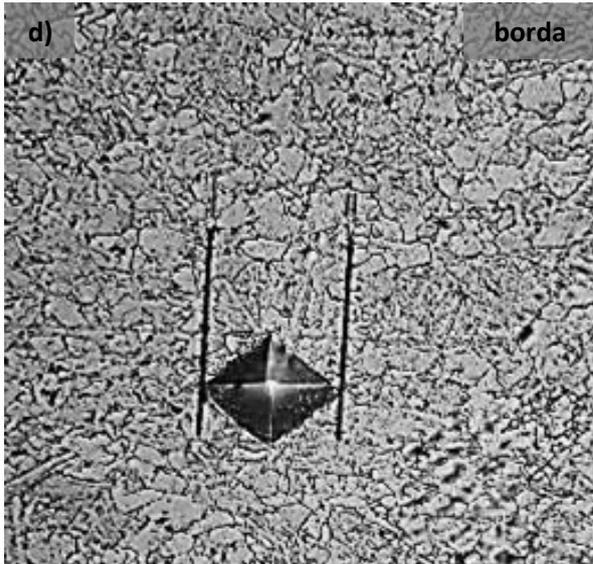


Fonte: Próprio autor (2024)

A microdureza da amostra A1 na borda obteve um valor médio de 405,6 HV, diferente do valor medido no centro que correspondia a um valor médio de 256,4 HV, apresentado um valor muito menor. A discrepância nos valores de microdureza entre as medidas da borda e centro se deve a diferença microestrutural entre a borda e o centro da amostra, como pode ser observado na Figura 32^a. Esta mudança da microestrutura dá-se pelo fato de que a borda da amostra atinge temperaturas mais altas antes em comparação com o centro, e conseqüentemente, também resfria mais rápido.

Figura 32 - Impressão da microdureza em relação a microestrutura presente na borda e no centro das amostras: a) A1, b) A2, c) A3, d) A4, e) A5 e f) A6. Ampliação 400X.



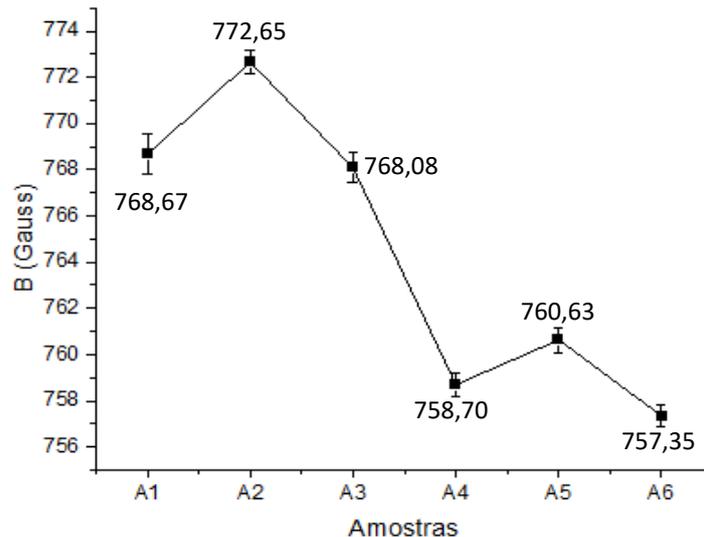


Fonte: Próprio autor (2024)

4.3 Comportamento magnético

Na Figura 26 está representado o resultado do ensaio magnéticos realizados nas amostras tratadas termicamente.

Figura 33 - Análise magnética do aço AISI 4340 por sensor Hall



Fonte: Próprio autor (2024)

O resultado do ensaio de campo magnético foi consistente com os procedimentos realizados. Das amostras temperadas e revenidas, a que obteve o maior campo magnético foram as amostras temperadas em óleo. Isso ocorre porque, apesar do resfriamento rápido, ele é menos brusco do que nas têmperas em água e salmoura, permitindo a formação de estruturas mais dúcteis, como a bainita. Por sua vez, a têmpera em salmoura com mais severo, obteve um menor valor de B comparado às outras duas têmperas, pois sofreu um maior refinamento de grão e maior quantidade de martensita que é um material magneticamente duro.

As amostras temperadas e revenidas tiveram os menores valores de B. Essas amostras além de serem constituídas por martensita revenida, também mostraram a presença de carbonetos, que são inclusões não magnéticas resultantes desse tratamento térmico. Das amostras tratadas termicamente, a amostra A6, temperada em salmoura e revenida teve o menor valor de B, com 757,35 Gauss. Isto se deve a maior quantidade de carbonetos, denominado de sorbita na microestrutura.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo permitiu concluir que:

- A amostra temperada em água apresentou, além de martensita, o microconstituente ferrita poligonal, que indica anomalia no resfriamento.
- A amostra temperada em salmoura, A3, obteve dureza próxima da literatura; enquanto as demais não atingiram.
- A quantificação das fases contribuiu para entender os resultados nos ensaios de dureza e magnético.
- Houve uma redução considerável nos valores de B para as amostras A4, A5 e A6, quando comparadas com as amostras temperadas A1, A2 e A3. A maior quantidade de carbonetos nas amostras revenidas pode ter contribuído para esta diminuição de B.
- A diferença da microestrutura existente entre as bordas e centros das amostras influenciaram nos resultados da microdureza, sendo mais evidente na amostra A1, temperada em água.

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar tratamento térmico de têmpera com amostras aquecidas individualmente e em conjunto para comparação entre as microestruturas.
- Estudar a influência da taxa de resfriamento na têmpera.

REFERÊNCIAS

ABDALLA, A.J.; Anazawa, R.M.; Hashimoto, T.M.; Pereira, M.S.; SOUZA, G. A.; CARRER, G. R.; SILVA, O.M.M. **Caracterização Microestrutural de Aços Multifásicos por Microscopia Óptica com a Utilização de Diferentes Ataques Químicos**, Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, Porto de Galinhas – PE, 2008.

ANDRADE, Rodrigo Luiz Dornelas de; SANTOS, Dagoberto Brandão **Análise da influência da redução a frio e ciclo de recozimento contínuo nas propriedades mecânicas e microestrutura de um aço ARBL**, In: Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 2011, São Paulo, SP, Brasil. ISSN: 1516-392X.

ASM METALS HANDBOOK, “**Heat Treating**”, Volume 04, 1991.

Atkins M. **Atlas of Continuous Cooling Transformation Diagrams for Engineering Steels**, American Society for Metals, 1980, p 107.

ASM **Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams**, American Society for Metals, 1977, p 181.

Atlas Specialty Metals **Through-Hardening Low Alloy Steel Bar 4340**, 2006. Disponível em: <https://www.atlassteels.com.au/documents/Atlas4340.pdf>.

BRUNATTO, S. F. **Introdução ao Estudo Dos Aços**, 2016.

BRYSON, William E. **Heat Treatment, Selection, and Application of Tool Steels**, Segunda Edição, 2009.

CALLISTER, William D., Jr. David G. Rethwisch **Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução** Nona Edição 2016.

CALLISTER, William D., Jr. David G. Rethwisch **Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução** Oitava Edição 2012.

CHIAVERINI, Vicente **Aços e ferros fundidos**, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 7ª edição, 2005.

COLPAERT, Hubertus **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**, 4ª Edição, São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2008. p 285 e p 303.

COSTA E SILVA, A.L.; MEI, P.R. **Aços e ligas especiais** 2ª Edição, Sumaré-SP, 1988. p 93 e p 123.

COTRELL, Sir Alan **An Introduction to Metallurgy**, The Institute of Materials Segunda Edição, 1995.

ECKERT, M.; Michal Krbata; Igor Barennyi; Jozef Majerik; Andrej Dubec e Michal Bokes **Effect of Selected Cooling and Deformation Parameters on the Structure and Properties of AISI 4340 Steel**, *Materials* **2020**, 13, 5585, DOI: 10.3390/mai13235585.

EL RAYES, M. M.; EL-DANAF, E. A.; ALMAJID, A. A. **Ultrasonic Characterization of Heat-Treatment Effects on SAE-1040 and 4340 Steels**. Journal of Materials Processing Technology, Arabia Saudita, 2014.

Engineering Alloy Digest Inc. Upper Montclair **DATA ON WORLD WIDE METALS AND ALLOYS AISI 4340**

GOMES, E. F. R.; L., M. A. L.V.H.; L., M. R. R. e O., B. F. **Efeito da Temperatura de Recozimento sobre a Microestrutura e as Propriedades Mecânicas do Aço ARBL Microligado NBR 6656 LNE 380**, Revista Perspectivas Online: Exatas & Engenharias Julho de 2017, Vol.7, nº 18

GORNI A. A. **Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas**, Corte & Conformação dos Metais, 2008.

KASHYAP, Isa **Master of Technology in Metallurgical & Materials Engineering**, 2017.

LADEIRA, D. G.; SANTOS, J. A. dos; OLIVEIRA, G. P.; PEÇANHA, L. A. F.; OLIVEIRA, M. M. de; TOMAZ, I. de V. **Avaliação do revenimento na dureza e microestrutura do aço AISI 4340**, VERTICES, Campos dos Goytacazes/RJ, v.19, n.2, p. 99-105, 2017.

LAI G. Y.; W. E. WOOD, R. A. CLARK, V. F. ZACKAY, AND E. R. PARKER **The Effect of Austenitizing Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of As-Quenched 4340 Steel**, University of California, Berkley, California, 1973, Vol. 5.

LIMA, Louise Gomes de **Análise de Tratamentos Térmicos em um Aço AISI 4340 pelo Ruído Magnético de Barkhausen**, Dissertação de Mestrado (Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica) Instituto Federal de Educação, João Pessoa – PB, 2023.

MAGALHÃES, Roberto **Ferrita vs. Austenita Retida: Métodos de Identificação Claros**, 2024. Disponível em: <https://compraco.com.br/blogs/industria/ferrita-vs-austenita-retida-metodos-de-identificacao-claros>

MATERKOWSKI, JAMES e George Krauss **Tempered Martensite Embrittlement in SAE 4340 Steel**, Colorado School of Mines, 1978, Vol. 10A.

MEHRABI, A.; S. H, ASADABAD, M. A.; NAJAFABADO, R. A.; RAJAEI, A., **Improvement of AISI 4340 steel properties by intermediate quenching – microstructure, mechanical properties, and fractography**, Artigo International Journal of Materials Research, 2020.

NOGUEIRA, R. de C. **Caracterização Mecânica e Análise Microestrutural com a Utilização da Técnica de Tríplice Ataque do Aço Multifásico AISI 4350**, Tese de Doutorado (Doutor em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

NOVIKOV, Ilia **Teoria Dos Tratamentos Térmicos dos Metais**, Editora UFRJ, 1994. p 241

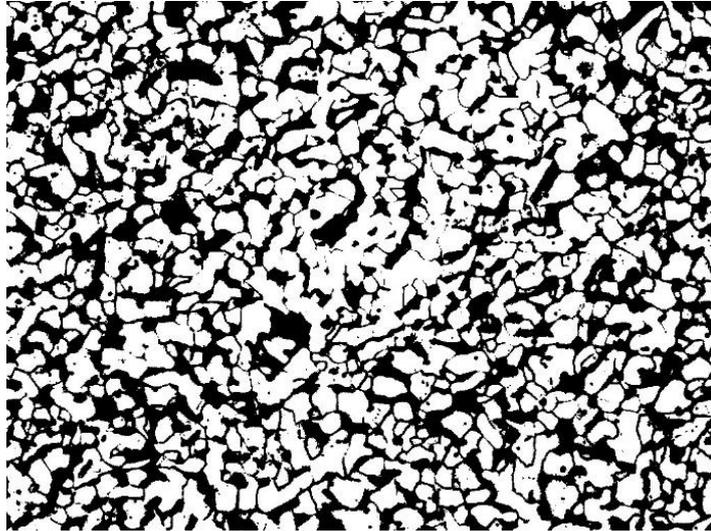
SANTOS, A. C. G. dos; W., R. P; S., J. C. M. **Tratamento Térmico de um Aço AISI 4340 para Aplicação em Material Bélico**, Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM, Vitoria – ES, 2007.

TOMITA, YOSHIYUKI e KUNIO OKABAYASHI **Mechanical Properties of 0.40 Pct C-Ni-Cr-Mo High Strength Steel Having a Mixed Structure of Martensite and Bainite**, University of Osaka Prefecture, Japan, 1983, Vol. 16A.

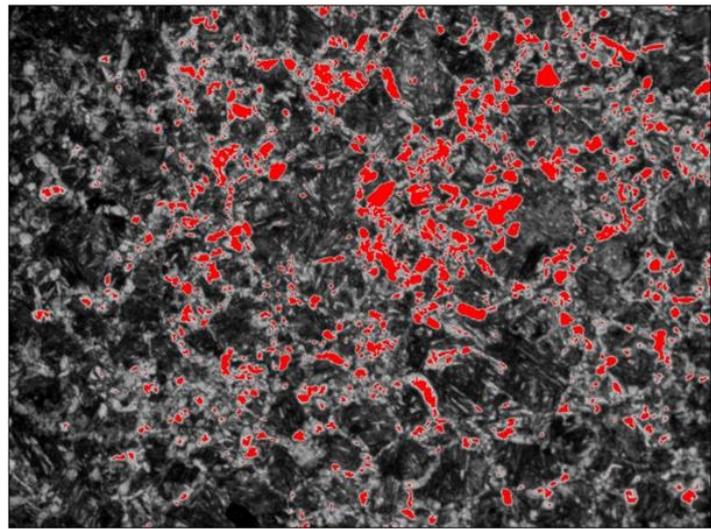
ZORDÃO, LUÍS H. PIZETTA. **Avaliação de Meios de Resfriamentos a Base de Soluções Iônicas**. 2018, 94 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

APÊNDICE A – Imagens de análise do ImageJ

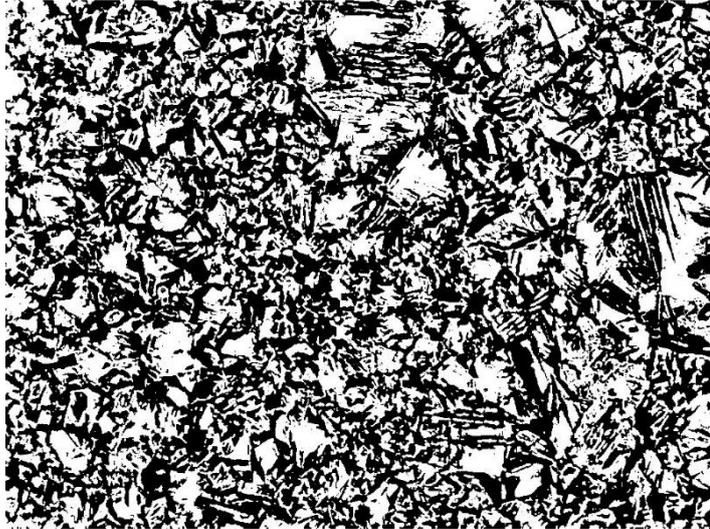
A – Amostra como recebida: quantidade de perlita.



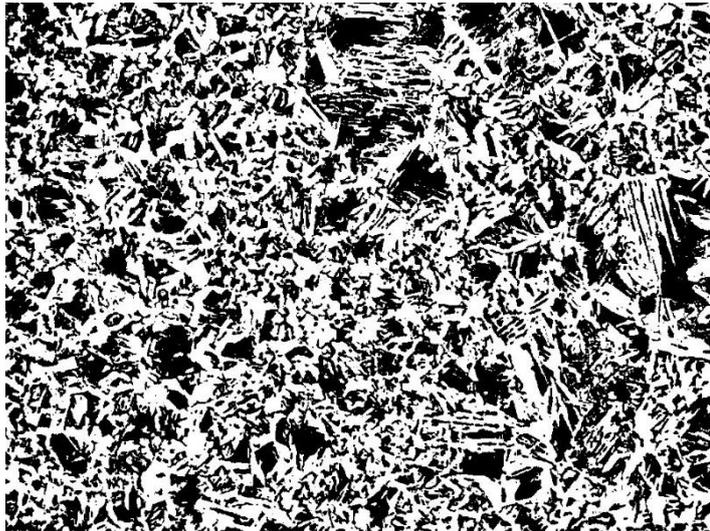
A – Amostra temperada em água: ferrita poligonal.



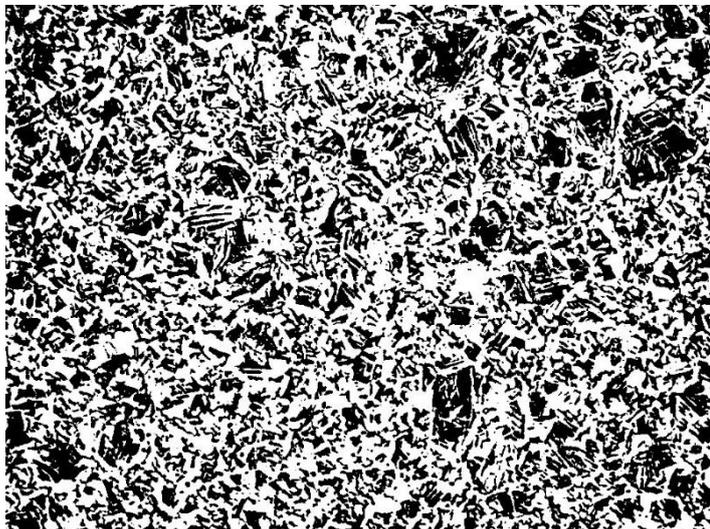
A – Amostra temperada em óleo: ferrita.



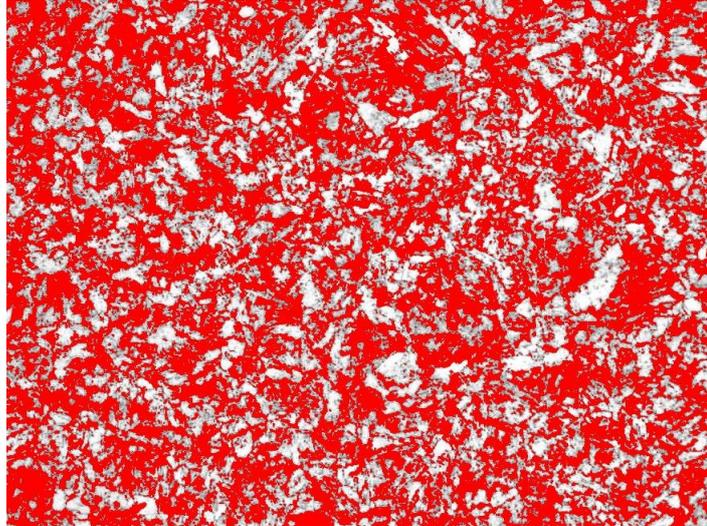
A – Amostra temperada em óleo: martensita e bainita.



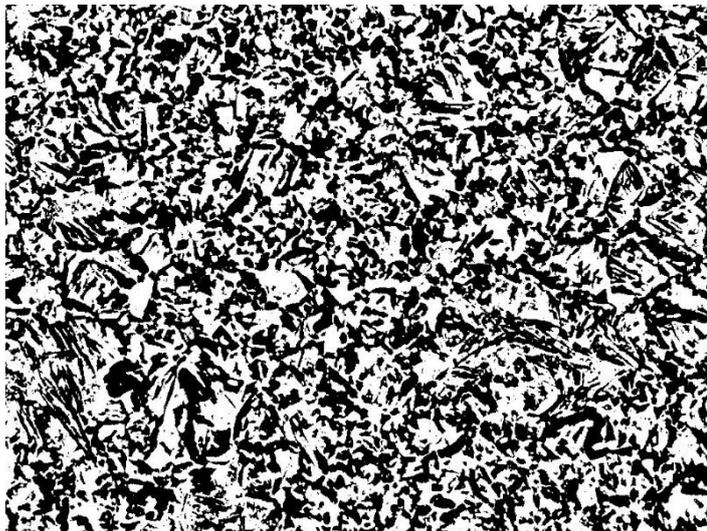
A – Amostra temperada em salmoura: bainita.



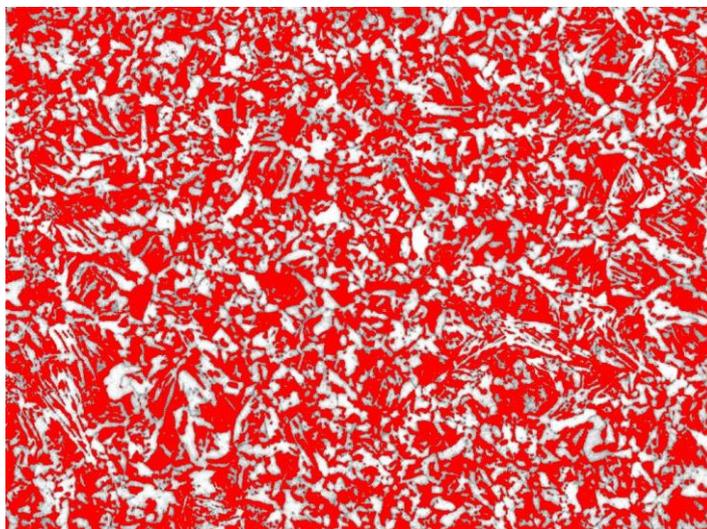
A – Amostra temperada em água e revenida: martensita revenida.



A – Amostra temperada em óleo e revenida: ferrita.



A – Amostra temperada em óleo e revenida: martensita revenida e perlita.



A – Amostra temperada em salmoura e revenida: martensita revenida.

