



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOÃO VITOR DE AMORIM OLIVEIRA

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE RESFRIAMENTO NA NORMALIZAÇÃO DO
AÇO AISI 4340

JOÃO PESSOA

2024

JOÃO VITOR DE AMORIM OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE RESFRIAMENTO NA NORMALIZAÇÃO DO
AÇO AISI 4340**

Trabalho de conclusão de curso apresentado 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

O48i Oliveira, Joao Vitor de Amorim.
INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE RESFRIAMENTO NA
NORMALIZAÇÃO DO AÇO AISI 4340 / Joao Vitor de Amorim
Oliveira. - João Pessoa, 2024.
63 f.

Orientação: Cristiana dos Santos Nunes.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. AISI 4340. 2. Normalização. 3. Microestrutura. 4.
Dureza. 5. Ensaio Magnético. I. Nunes, Cristiana dos
Santos. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 621(043.2)

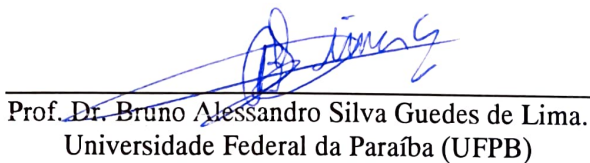
JOÃO VITOR DE AMORIM OLIVEIRA

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE RESFRIAMENTO NA NORMALIZAÇÃO DO
AÇO AISI 4340

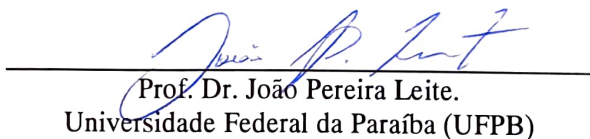
Trabalho de conclusão de curso submetido à **Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica** da UFPB, apresentado em sessão de defesa pública realizada em 23/10/2024, obtendo o conceito **APROVADO**, sob a avaliação da banca examinadora a seguir:



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



Prof. Dr. Bruno Alessandro Silva Guedes de Lima.
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)



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

João Pessoa (PB)
OUTUBRO/2024

A Deus, meu sustentador. Aos meus pais, Adriano e
Elisângela.

À minha irmã, Júlia. Aos meus avós, Evandro e Cleide.

À minha namorada, Isabela.

AGRADECIMENTOS

Ao Deus da minha vida, agradeço por tudo o que Ele tem feito por mim. Pelas misericórdias, pela força, pelo amor e pelo cuidado. Glórias sejam dadas a ti.

A minha orientadora, Dra. Prof. Cristiana dos Santos Nunes por toda sua paciência, disponibilidade, orientações e todo o ensino passado que levou à realização deste trabalho de conclusão de curso.

Ao Professor Dr. João Pereira Leite pela disponibilidade e ajuda para realizar os tratamentos térmicos feitos no Laboratório de Tratamento Térmico (LTT).

Aos meus pais, Adriano e Elisângela, e a minha irmã, Júlia, por todo incentivo, amor, entrega e pelas suas abdições, que ao longo do tempo, trocaram realizações pessoais pelas de seu filho e irmão. Sem eles, nada disso estaria sendo concretizado.

À Isabela Cristina, minha namorada, pelos seus incentivos, pelas palavras de coragem, pelo amor dedicado e pela alegria de tê-la ao meu lado.

Aos meus avós, Evandro e Cleide, amo-os.

Aos os professores, técnicos, funcionários que direta ou indiretamente participaram da realização deste trabalho de conclusão de curso, e àqueles que me ajudaram ao longo da caminhada.

RESUMO

O aço AISI 4340 é amplamente utilizado em diversas indústrias devido às suas excelentes propriedades mecânicas, incluindo alta resistência, dureza, tenacidade e resistência ao desgaste, sendo amplamente empregado em componentes críticos na indústria aeroespacial, automotiva e de perfuração de petróleo. Após o tratamento térmico de normalização, esse aço adquire uma estrutura perlítica e ferrítica refinada, melhorando suas propriedades mecânicas e microestruturais. O presente trabalho tem como objetivo estudar as mudanças nas propriedades mecânicas, microestruturais e no comportamento magnético do aço AISI 4340 submetido ao tratamento térmico de normalização sob diferentes condições de resfriamento. Foram projetados dispositivos para resfriamento ao ar forçado e realizados tratamentos térmicos com resfriamento ao ar calmo e ao ar forçado sob a vazão de ar de 61m³/h e 129m³/h, seguidos de análises microestruturais, de dureza Rockwell, microdureza Vickers e ensaios magnéticos com sensor Hall. Os resultados mostraram que os dispositivos de resfriamento permitiram a normalização com diferentes vazões de ar, resultando em microestruturas esperadas de ferrita e perlita. A amostra NF2, submetida à maior vazão de resfriamento forçado, apresentou o menor tamanho de grãos e maior quantidade de perlita, refletindo no refinamento da microestrutura e em um leve aumento de dureza. Os ensaios magnéticos indicaram uma boa homogeneidade no fluxo da densidade de campo magnético nas amostras com resfriamento forçado. A combinação de análises mecânicas, microestruturais e magnéticas mostrou-se essencial para compreender e otimizar o comportamento do aço AISI 4340 sob diferentes condições de tratamento térmico, destacando o potencial do resfriamento forçado para melhorar suas propriedades.

Palavras-chave: AISI 4340; normalização, microestrutura, dureza, ensaio magnético .

ABSTRACT

AISI 4340 steel is widely used in various industries due to its excellent mechanical properties, including high strength, hardness, toughness, and wear resistance, making it extensively employed in critical components in the aerospace, automotive, and oil drilling industries. After normalization heat treatment, this steel acquires a refined pearlitic and ferritic structure, enhancing its mechanical and microstructural properties. The present work aims to study the changes in the mechanical properties, microstructural characteristics, and magnetic behavior of AISI 4340 steel subjected to normalization heat treatment under different cooling conditions. Devices for forced air cooling were designed, and heat treatments were carried out with calm air cooling and forced air cooling at airflow rates of 61 m³/h and 129 m³/h, followed by microstructural analyses, Rockwell hardness, Vickers microhardness, and magnetic tests using a Hall sensor. The results showed that the cooling devices allowed normalization with different airflow rates, resulting in the expected ferritic and pearlitic microstructures. The NF2 sample, subjected to the highest forced cooling airflow, presented the smallest grain size and the highest amount of pearlite, reflecting a refined microstructure and a slight increase in hardness. Magnetic tests indicated good homogeneity in the magnetic flux density in the forced cooling samples. The combination of mechanical, microstructural, and magnetic analyses proved essential for understanding and optimizing the behavior of AISI 4340 steel under different heat treatment conditions, highlighting the potential of forced cooling to improve its properties.

Keywords: AISI 4340; normalization; microstructure; hardening; magnetic test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos aços pela ABNT ou AISI.....	17
Figura 2 – Diagrama Ferro-Fe ₃ C.....	18
Figura 3 – Recozimento pleno.....	21
Figura 4 – Têmpera.....	23
Figura 5 – Diagrama temperatura-porcentagem de carbono.....	24
Figura 6 – Ciclo de tempo versus temperatura.....	25
Figura 7 – AISI 4340 e a estrutura bainítica.....	26
Figura 8 - Microestrutura do aço 1045 normalizado.....	28
Figura 9 – Diagrama para resfriamento contínuo de um aço AISI 4340.....	28
Figura 10 – Esquematização do efeito HALL.....	29
Figura 11 – Diâmetro (a) e comprimento (b) das amostras.....	31
Figura 12 – Fluxograma da metodologia.....	32
Figura 13 – Amostras.....	33
Figura 14 - Construção dos dispositivos para resfriamento forçado: a) Dispositivo com ventilador 80 x 80 x 25 mm; b) Dispositivo com ventilador 120 x 120 x 25 mm.....	34
Figura 15 – Gerador.....	35
Figura 16 – Tratamento térmico: a) forno mufla; b) disposição das amostras na normalização.....	36
Figura 17 - Métodos de Resfriamento: (a) Ao ar livre; (b) Ventilador vazão menor (61m ³ /h); (c) Ventilador vazão maior (129 m ³ /h).....	36
Figura 18 - Sensor Magnético: (1) Gerador; (2) Bancada; (3) Placa de aquisição.....	38
Figura 19 – Lixadeira.....	38
Figura 20 - Localidade das durezas.....	39
Figura 21 – Durômetro.....	39
Figura 22 – Politriz.....	40
Figura 23 - Nital 2%.....	41
Figura 24 - Microscópio Óptico Zeiss/Axiotech.....	42
Figura 25 - Microdurômetro MHV-2T/SHIMADZU.....	43
Figura 27 - Microestrutura ao centro da CR.....	44
Figura 28 - Microestrutura ao centro da NC.....	47
Figura 29 - Microestrutura ao centro da NF1: a) Primeira região; b) Segunda região; c) Terceira região.....	48
Figura 30 - Microestrutura ao centro da NF2.....	50
Figura 31 - Dureza média das amostras.....	51
Figura 32 - Comparativo da microdureza.....	53
Figura 33 - Comparativo dos ensaios magnéticos.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos de aços de baixa-liga e faixas de composições indicando os valores máximos e mínimos para cada elemento.....	18
Tabela 2 – Composição química AISI 4340.....	19
Tabela 3 – Informações sobre os tratamentos térmicos realizados.....	35
Tabela 4 – Análise quantitativa dos grãos.....	44
Tabela 5 – Dureza das amostras do aço AISI 4340.....	49
Tabela 6 – Microdureza dos centros.....	50
Tabela 7 – Microdureza na borda.....	50
Tabela 8 – Valores ensaio magnético.....	53

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS GERAIS	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Aço carbono.....	16
2.2 Aço AISI 4340.....	18
2.3 Tratamentos térmicos.....	21
2.3.1 <i>Recozimento</i>	21
2.3.2 <i>Têmpera</i>.....	22
2.3.3 <i>Normalização</i>	24
2.3.4 <i>Austenitização</i>	26
2.4 Ensaio magnético	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 Material	31
3.2 Metodologia.....	31
3.3 Preparação das amostras	32
3.4 Projeto e confecção do dispositivo para resfriamento das amostras.....	33
3.5 Tratamentos térmicos de normalização.....	35
3.6 Ensaio magnético	37
3.7 Ensaio de dureza	39
3.8 Preparação metalográfica	40
3.9 Microscopia óptica	41
3.10 Ensaio de Microdureza	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1 Caracterização Microestrutural.....	44
4.1.1 <i>Efeito do resfriamento de normalização sobre a microestrutura</i>	44
4.2 Dureza Rockwell.....	50
4.3 Microdureza Vickers.....	52
4.4 Ensaio Magnético por sensor Hall	54
5 CONCLUSÃO.....	57
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
REFERÊNCIAS.....	58
APÊNDICE A – COOLER MAIOR.....	60

APÊNDICE B – COOLER MENOR.....	61
---------------------------------------	-----------

1. INTRODUÇÃO

Os aços são materiais essenciais na economia global, amplamente utilizados em diversos setores, como construção civil, indústria automotiva, fabricação de máquinas e equipamentos, além de aplicações na infraestrutura de transportes e energia. A combinação de resistência mecânica, ductilidade, durabilidade e baixo custo torna o aço um dos materiais mais versáteis e indispensáveis.

Segundo a World Steel Association (WSA), no mercado global, a produção mundial de aço bruto em 2022 atingiu cerca de 1,9 bilhões de toneladas. A China foi responsável por cerca de 54% dessa produção, evidenciando a magnitude e a demanda contínua por esse material. No Brasil, o setor siderúrgico também desempenha um papel central, com uma produção de aproximadamente 36 milhões de toneladas de aço bruto em 2022, o que posiciona o país como um dos principais produtores globais. Dessa forma, o aço continua sendo um pilar para a indústria e o mercado global, com influência direta no crescimento econômico e no progresso de setores fundamentais para a sociedade.

Para que o aço ganhe todas as suas formas e usos é necessária sua manipulação através dos tratamentos térmicos. Totten (2006), em seu livro "*Steel Heat Treatment Handbook*", disse que o tratamento térmico é o aquecimento e resfriamento controlados de um metal ou liga em seu estado sólido para produzir mudanças desejadas em suas propriedades físicas e mecânicas. Para Callister (2000), o estudo dos tratamentos térmicos dos materiais é de extrema importância, pois eles permitem o controle das propriedades mecânicas e microestruturais dos materiais, especialmente dos metais.

Uma das características físicas que mais sofre influência após os tratamentos térmicos é a dureza, que é definida como a resistência de um material à deformação plástica localizada, tipicamente medida por indentação (CALLISTER, 2007, p. 73). A dureza dos aços tem uma relação direta com o tratamento térmico e suas aplicações. Quanto maior a dureza, geralmente maior a resistência ao desgaste e à deformação, mas isso pode reduzir a ductilidade e a tenacidade. Segundo Callister (2007), a dureza de um aço aumenta com a formação de martensita durante o tratamento térmico, porém, essa dureza elevada também está associada a uma diminuição da ductilidade, o que pode limitar seu uso em algumas aplicações.

Além de possuírem influência e alterarem todo o arranjo da microestrutura dos aços, os tratamentos térmicos também "afetam as propriedades magnéticas dos aços por meio da modificação da microestrutura, onde processos como o recozimento podem reduzir as tensões internas e aumentar a permeabilidade magnética, tornando o material mais adequado

para aplicações em núcleos de transformadores" (CULLITY; GRAHAM, 2009, p. 327).

Os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), como o aço AISI 4340, são fornecidos para o mercado nas condições como recozido ou normalizado, sob recomendações de várias normas, como a ASTM A29, SAE I404, ASM 6414 e MIL-5-5000. Na condição como normalizado, alguns fabricantes fornecem o aço AISI 4340 com dureza aproximada de 28 a 32 HRC.

O tratamento térmico de normalização no aço AISI 4340 é um processo fundamental, pois visa melhorar suas propriedades mecânicas, reduzindo tensões residuais, aumentando sua resistência à corrosão; reduzindo a segregação de elementos químicos; equalizando a estrutura cristalina; reduzindo a dureza excessiva e melhorando a ductilidade e tenacidade.

Neste trabalho, realizou-se uma análise das propriedades mecânica e magnética e mudança microestrutural do aço AISI 4340 após tratamentos térmicos de normalização submetidos a diferentes condições de resfriamento. Foram projetados e contruídos dois dispositivos para indução de resfriamento forçado.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral do trabalho consiste em estudar as mudanças nas propriedades mecânicas, microestruturais e o comportamento magnético do aço AISI 4340 submetido ao tratamento térmico de normalização sob diferentes condições para resfriamento.

Os objetivos específicos são:

- a) Projetar e construir um dispositivo para resfriamento ao ar forçado a ser aplicado no tratamento térmico de normalização do aço AISI 4340.
- b) Realizar tratamentos térmicos de normalização com resfriamento convencional, ao ar calmo, e ao ar forçado.
- c) Analisar a microestrutura do aço AISI 4340 após a realização dos tratamentos térmicos através de microscopia óptica.
- d) Determinar as propriedades mecânica e magnética das amostras tratadas termicamente.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aço Carbono

O aço carbono é uma liga de ferro-carbono em que o ferro é o componente que possui predominância em sua estrutura, além desse elemento, há a presença de carbono, em que o teor varia, em peso, de cerca de 0,02 % a 2,1 %. Porém, além desses elementos, o aço carbono pode conter outros elementos em pequenas quantidades, como é o caso do silício, manganês, enxofre e fósforo.

Segundo Callister et al. (2000), os aços são ligas de ferro-carbono que podem conter concentrações apreciáveis de outros elementos de liga e que suas propriedades mecânicas são sensíveis ao teor de carbono, que é normalmente inferior a 1% pp (percentual peso).

Os aços são classificados de acordo com seu teor de carbono em sua microestrutura, podendo ser chamados de aços de baixo carbono, ou, usualmente, chamados de aços doces, pois possuem até 0,25 % pp de carbono, adquirindo em sua microestrutura as fases ferrita e/ou perlita, com alta ductilidade e são bons para conformações mecânicas. Além dos aços doces, também há a existência dos aços com médio teor de carbono, que, segundo Callister et al. (2000), são aços que possuem concentrações de carbono entre aproximadamente 0,25 e 0,60% p.p. E essas ligas podem ser tratadas termicamente por austenitização, têmpera, e depois revenimento para melhorar as propriedades mecânicas. Assim, por último, os aços podem ser de alto teor de carbono, ou aços “duros”, em que têm p.p acima 0,6% de carbono. Esses aços, por esse teor alto de carbono, possuem baixas conformabilidade e tenacidade, além de possuírem altas durezas.

Para além dessa usual classificação, muito difundida pelo mercado, há as classificações de algumas sociedades especializadas em estudos dos materiais, como a “*Society of Automotive Engineers – SAE*” e a “*American Iron and Steel Institute – AISI*”, então, segundo a AISI, os aços podem ser classificados em dois grandes grupos: aços ao carbono e os aços baixa-liga, e aços alta-liga. Essa classificação também é adotada pela “Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT”.

Os aços-aço-carbono são classificados por meio de 4 (quatro) números que são precedidos por uma letra maiúscula na qual indicam o processo de fusão. Para adicionar mais informações à classificação, a ABNT ainda deixa a critério a adesão de letras após o quarto número de tal classificação, em que cada letra adicionada terá uma informação diferente a passar.

Outrossim, a Figura 1 apresenta como se dá a classificação feita pela ABNT acerca

da classificação dos aços ao carbono e dos aços baixa-liga.

Figura 1 - Classificação dos aços pela ABNT ou AISI

ABNT ou AISI	TIPO DE AÇO
C10XX	Aços-ao-carbono
C11XX	Aços de usinagem fácil (com alto teor de S)
C12XX	Aços de usinagem fácil (com altos teores de P e S)
13XX	Aços ao Mn (de 1,5 a 2,0% Mn)
23XX	Aços ao Ni (de 3,25 a 3,75% Ni)
25XX	Aços ao Ni (de 4,75 a 5,25% Ni)
31XX	Aços ao Ni-Cr (1,10-1,40% Ni e 0,55-0,90% Cr)
E33XX	Aços ao Ni-Mo (3,25-3,75% Ni e 1,40-1,75%Cr)
40XX	Aços ao Mo (0,20-0,30% Mo)
41XX	Aços ao Cr-Mo (0,40-1,20% Cr e 0,08-0,25%Mo)
43XX	Aços ao Ni-Cr-Mo (1,6-2,0% Ni; 0,4-0,9% Cr; 0,2-0,3% Mo)
46XX	Aços ao Ni-Mo (1,40-2,00%Ni e 0,15-0,30% Mo)
48XX	Aços ao Ni-Mo (3,25-3,75% Ni e 0,20-0,30% Mo)
50XX	Aços ao Cr (0,27-0,50% Cr)
51XX	Aços ao Cr (0,70-1,20% Cr)
61XX	Aços ao Cr-V (0,70-1,10% Cr e 0,10%V)
86XX	Aços Ni-Cr-Mo (0,2-0,4% Ni; 0,3-0,5% Cr; 0,08-0,15% Mo)
87XX	Aços Ni-Cr-Mo (0,4-0,7% Ni; 0,4-0,6% Cr; 0,2-0,3 %Mo)
92XX	Aços ao Mn-Si (1,4-2,0 %Si e 0,60-0,90% Mn e 0-0,7% Cr)
XXBXX	Aços ao B contendo 0,0005-0,003% B (Ex.: aço 10BXX = aço-ao-carbono com B; aço 50BXX = aço ao Cr com B)

Fonte: ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Para termos de exemplificação, a classificação é feita de forma simples, tendo em vista que o primeiro número representa o elemento de liga presente no aço, o segundo número representa o teor desses elementos de liga, já o terceiro e quartos números representam o teor de carbono presente multiplicado por 100.

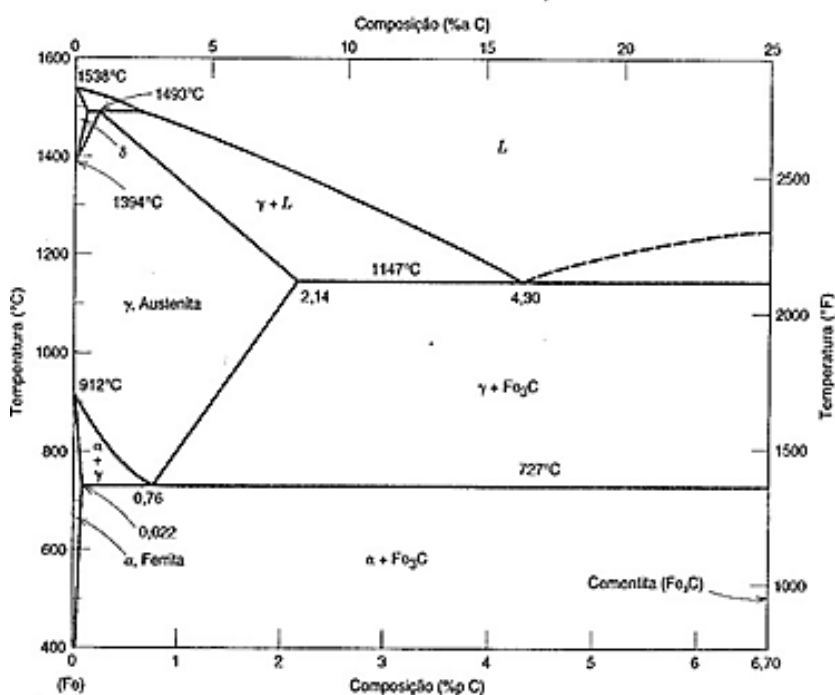
A presença de carbono nos aços vai além de um simples elemento presente em uma microestrutura, pois a relação entre os aços e o teor de carbono é um tema fundamental na metalurgia e na ciência dos materiais e tem influência direta na microestrutura, além de possuírem poder para alterar as características dos aços. De acordo com Callister (2018) e Rethwish (2018), os aços com diferentes teores de carbono podem apresentar diferentes características físicas, tendo em vista que a microestrutura sofre desenvolvimento tanto pelo teor de carbono quanto pelo tratamento térmico utilizado; então, à medida que o teor de carbono aumenta, há a melhoria de características como a resistência à tração e dureza.

Segundo Chiaverini (2003) a adição de carbono aos aços pode também ter impactos nas propriedades de ductilidade, tenacidade e soldabilidade. Sendo assim, mostra-se a importância de elencar as fases em equilíbrio com os quais o aço carbono possui em sua

microestrutura, pois saem delas o teor de carbono presente e a alteração a ser feita de acordo com esse teor e do tratamento térmico a ser utilizado.

Conforme Krauss (1994), o diagrama Fe-Fe₃C estabelece a composição das regiões de temperatura em que as diversas fases do aço permanecem estáveis, bem como os limites de equilíbrio entre os diferentes campos de fase. À vista disso, as fases em equilíbrio do sistema ferro-carbono são a ferrita (α), austenita (γ), ferro (δ) e cementita (Fe₃C). A Figura 2, presente , vem elencar a distribuição dessas fases em forma de diagrama e como as temperaturas e a quantidade de carbono influenciam na microestrutura, e, conseqüentemente, influenciará nas características do material.

Figura 2 - Diagrama Ferro – Fe₃C



Fonte: ASM (1954)

2.2 Aço AISI 4340

O aço AISI 4340 é uma liga de aço de baixa liga, contendo níquel, cromo e molibdênio, conhecido por suas excelentes propriedades mecânicas. Ele possui alta resistência à tração e à fadiga, sendo ideal para aplicações que envolvem altas cargas. Além disso, mantém boa ductilidade, o que significa que pode ser deformado antes de se romper. Outra característica importante é sua alta tenacidade, o que o torna capaz de resistir a impactos e cargas cíclicas sem fraturar. Embora tenha resistência moderada ao desgaste e à corrosão, essas propriedades

podem ser melhoradas por meio de tratamentos térmicos.

O aço AISI 4340 é considerado um aço ARBL, Aço de Alta Resistência e Baixa Liga. Isso ocorre devido às suas características que se alinham com a definição geral de aços ARBL, que são materiais que combinam alta resistência mecânica com teores relativamente baixos de elementos de liga, que tipicamente apresentam até 2% de elementos como cromo, níquel, molibdênio e vanádio.

O aço AISI 4340 é amplamente utilizado em diversas indústrias. Na indústria aeroespacial, é aplicado em componentes críticos como eixos de trens de pouso e peças de turbinas, que são submetidos a altos níveis de tensão e fadiga. Na indústria automotiva, ele é empregado em eixos de transmissão, virabrequins e engrenagens, onde a alta resistência e durabilidade são essenciais. Na área de perfuração de petróleo, esse aço é usado em componentes como eixos e engrenagens, que operam sob alta pressão e carga; também é utilizado na fabricação de ferramentas de alta performance e peças de máquinas, como parafusos e porcas de alta resistência, além de ser comum em eixos e pinos que necessitam de alta resistência ao desgaste e à fadiga.

De acordo com a classificação da AISI-SAE, o aço AISI 4340 é o tipo de aço caracterizado pela numeração “4340”, em que o primeiro dígito, “4”, refere-se a aços de liga ao cromo-molibdênio, o segundo dígito, “3”, refere-se a presença de níquel como elemento adicional, já os últimos dígitos da nomenclatura, “40”, referem-se ao teor de carbono que é de aproximadamente 0,40% em sua composição. Porém, além disso, o tipo de material citado ainda possui ferro em sua microestrutura.

Para fins de exemplificação, a ABNT cita a composição química do aço 4340 de forma a apresentar intervalos para a porcentagem de cada elemento, que será demonstrado pela Tabela 1.

Tabela 1 - Exemplos de aços de baixa-liga e faixas de composições indicando os valores máximos e mínimos para cada elemento

Aço	Composição (% em peso)					
	C	Cr	Ni	Mo	V	Si
ABNT 4340	0,38	0,70	1,65	0,20	-	-
	0,43	0,90	2,00	0,30	-	-
ABNT 4140	0,38	0,80	-	0,15	-	-
	0,43	1,10	-	0,25	-	-
ABNT 4130	0,28	0,80	-	0,15	-	-
	0,33	1,10	-	0,25	-	-
ABNT 8660	0,56	0,40	0,40	0,15	-	-
	0,64	0,60	0,70	0,25	-	-

Fonte: ABNT

A ASM (1954), afirma que os aços AISI 4340 possuem uma composição química com presença de carbono, magnésio, fósforo, níquel, cromo, molibdênio e com presença de enxofre, como exemplifica bem a segunda coluna da Tabela 2, que vem a representar suas respectivas porcentagens em peso. A presença desses microconstituintes presentes na composição química do aço AISI 4340 alteram as propriedades físicas do material, com isso, a presença de cromo em sua microestrutura corrobora para a melhora da resistência à corrosão, além de formar carbonetos duros com o carbono, o que aumenta a dureza e a resistência ao desgaste do aço. A presença, na composição, do molibdênio vem a auxiliar o material a possuir um aumento da resistência ao desgaste e à fadiga, especialmente em ambientes onde há esforços cíclicos ou cargas elevadas. Já o níquel, aumenta a tenacidade, melhora a resistência ao impacto e aperfeiçoa a ductilidade do material. (LANCASTER,1999)

Tabela 2 - Composição química AISI 4340

Composição	Forno elétrico	Siemens-martin
Carbono	0,38 - 0,43	0,38 - 0,43
Magnésio	0,60 - 0,80	0,60 - 0,85
Fósforo	0,025 - max.	0,04 - max
Enxofre	0,025 - max.	0,04 - max
Silício	0,20 - 0,35	0,20 - 0,35
Níquel	1,65 - 2,00	1,65 - 2,00
Cromo	0,70 - 0,90	0,70 - 0,90
Molibdênio	0,20 - 0,30	0,20 - 0,30
Ferro	<i>Balanço</i>	<i>equilíbrio</i>

Fonte: ASM (1954)

De acordo com Callister (1999), o aço AISI 4340, submetido a um processo de tratamento térmico de revenimento, possui um limite de resistência à tração de 980 a 1960 MPa, um limite de escoamento de 895 a 1570 MPa e tem sua aplicação típica para buchas e tubulações em aeronaves; contudo, o AISI 4340 é considerado um aço de baixa-liga, pois detém cerca de 5% de elementos de liga, além do ferro e do carbono, em sua composição.

Segundo Pfeil (2000), as características físicas dos aços na faixa normal de temperatura atmosférica são dadas por: módulo de deformação longitudinal ou módulo de elasticidade (E) de 200.000 MPa, coeficiente de Poisson (ν) de 0.3, coeficiente de dilatação térmica (β) de $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ e massa específica ρ_a igual a 7850 kg/m^3 . Dessa forma, pelo estudo de Pfeil (2000), o aço AISI 4340 encaixa-se dentre essas características físicas em faixas normais de temperatura. Ademais, a ASM (1954) afirma que seu ponto de fusão é aproximadamente de 2740°F , que equivale a cerca de 1504°C .

2.3 Tratamentos térmicos

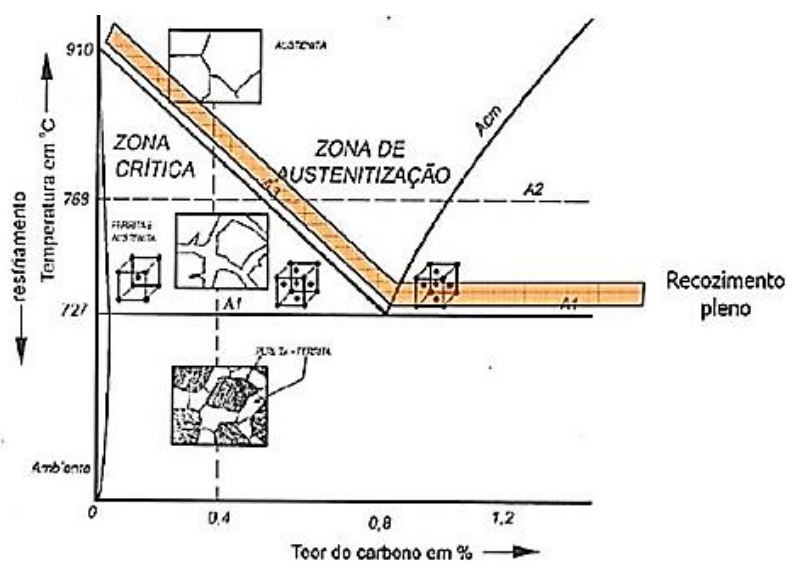
Krauss (1994), em seu livro *“Heat Treatment of Steel”*, define tratamento térmico como um conjunto de processos que envolvem o aquecimento e resfriamento controlados de um material para modificar suas propriedades físicas e mecânicas. Esses processos são realizados para melhorar a performance do material, ajustando características como dureza, resistência ao desgaste, ductilidade e tenacidade. O tratamento térmico altera a estrutura interna do material, como a formação de fases e a modificação do tamanho e distribuição dos grãos.

Callister (1999) divide os tipos de tratamentos térmicos em: recozimento, têmpera, normalização e austenitização.

2.3.1 Recozimento

O recozimento é um dos processos de tratamento térmico mais importantes aplicados aos metais, especialmente aos aços, com o objetivo de melhorar suas propriedades mecânicas e torná-los mais fáceis de trabalhar. Esse processo envolve o aquecimento do material a uma determinada temperatura, até acima ou dentro da zona crítica (temperatura situada entre 727 °C e 910 °C), conforme a Figura 3, a depender do teor de carbono do aço e é seguido de um resfriamento controlado, normalmente dentro do forno, o que resulta em uma série de efeitos desejáveis nas propriedades do metal.

Figura 3 - Recozimento Pleno



Fonte: TSCHIPTSCHIN, 2020.

O recozimento é realizado para melhorar a usinabilidade e a conformabilidade a frio, para restaurar a ductilidade, para reduzir ou eliminar a não homogeneidade estrutural, para refinar o tamanho do grão, para aliviar tensões internas e para preparar a estrutura do aço para o tratamento. (PRABHUDEV,1988)

O recozimento pode ser dividido em diferentes categorias, dependendo do objetivo específico do tratamento:

- a) Recozimento pleno ou total: Este é o processo clássico de recozimento descrito por Callister (2012) que envolve o aquecimento do aço até a faixa de temperatura austenítica, seguido de resfriamento lento dentro do forno. É utilizado principalmente para aços hipoeutetóides, visando obter uma estrutura ferrítica-perlítica mais equilibrada, que oferece melhor ductilidade e resistência moderada.
- b) Recozimento de alívio de tensões: De acordo com Avner (1974), este tipo de recozimento é realizado a temperaturas mais baixas, entre 500°C e 650°C, apenas para aliviar tensões internas sem alterar a microestrutura do material. É comumente usado em peças de soldagem ou usinagem para evitar distorções.
- c) Recozimento de recristalização: Silva (2004) menciona que esse processo é aplicado principalmente a metais deformados a frio, com o objetivo de recristalizar os grãos que foram distorcidos ou alongados durante o trabalho a frio, restaurando a ductilidade e eliminando a dureza excessiva.
- d) Recozimento isotérmico: Neste tipo de recozimento, o material é aquecido até a temperatura desejada, resfriado rapidamente até uma temperatura mais baixa e mantido nessa temperatura por um tempo específico antes do resfriamento final. Isso resulta em uma microestrutura mais uniforme, conforme descrito por Callister (2012).

2.3.2 Têmpera

De acordo com Totten (2006), em *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*, a têmpera é um processo que envolve o aquecimento do aço até a fase austenítica e o subsequente resfriamento rápido, o que resulta na transformação da austenita em martensita, uma fase extremamente dura.

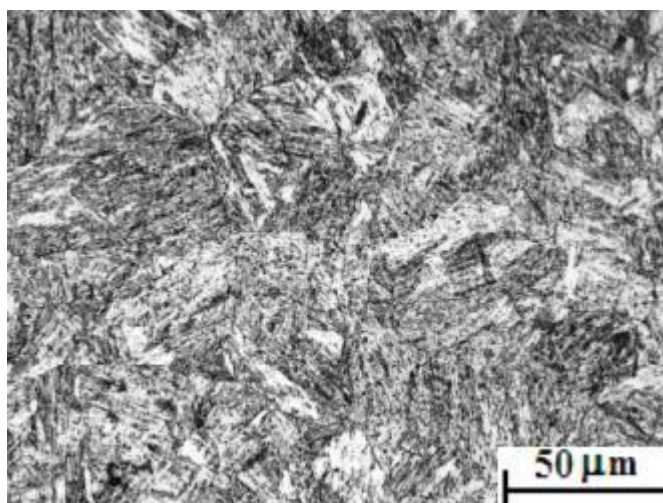
Segundo Reed-Hill (1964), o aço é aquecido até a faixa de austenitização, que

depende da composição do aço, mas geralmente varia entre 800°C e 1000°C. Nesta etapa, a transformação completa da estrutura cristalina para austenita garante que o carbono fique dissolvido e pronto para ser resfriado na forma de martensita durante o resfriamento.

Verhoeven (2007) destaca que, embora a têmpera aumente significativamente a dureza do aço, ela também gera fragilidade. O processo de têmpera também pode resultar em deformações e trincas se não for cuidadosamente controlado. O rápido resfriamento causa contrações desiguais que podem levar ao surgimento de tensões internas elevadas. Para mitigar esses riscos, a escolha correta do meio de resfriamento e a manutenção de uma taxa de resfriamento adequada são cruciais.

De acordo com Krauss e Grossman (1980), nos aços que contêm entre 0,2% e 0,6% de carbono, a formação de martensita ocorre predominantemente em forma de ripas. Já em aços com teores de carbono entre 1,0% e 1,4%, espera-se a presença de martensita lenticular, ou seja, em forma de placas na microestrutura do material. No intervalo de 0,6% a 1,0% de carbono, ocorre uma combinação das duas formas, com a presença tanto de martensita em ripas quanto de martensita lenticular. A Figura 4 apresenta uma micrografia óptica de uma amostra de aço temperado, com uma ampliação e uma escala de referência de 50 μm . A microestrutura exibida na imagem é típica de um aço que passou por um processo de têmpera, onde a fase dominante é a martensita. A martensita aparece com uma morfologia acicular (em forma de agulhas) e em placas, que são características dessa fase formada por resfriamento rápido a partir da austenita.

Figura 4 - Têmpera



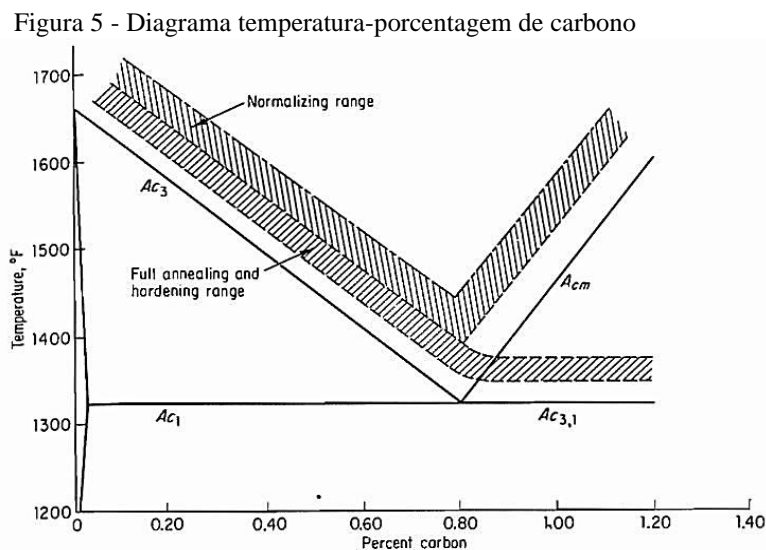
Fonte: Maia (2010)

2.3.3 Normalização

A normalização é um tratamento térmico indicado para obter uma estrutura homogênea e refinada nos aços, com o objetivo de aumentar sua resistência e tenacidade. Além disso, em muitos casos, para assegurar que o material reaja de forma consistente a outros tratamentos térmicos, como a têmpera, é fundamental iniciar com uma estrutura uniforme obtida através da normalização (Costa e Silva, 2010).

Segundo Avner (1974), a normalização do aço AISI 4340 é realizada aquecendo o material aproximadamente a 100 °F (815 °C) acima da linha de temperatura crítica superior (A, ou A_{cm}) seguido de resfriamento em ar parado até a temperatura ambiente. Em termos de dureza, de acordo com Callister (2012), para o aço AISI 4340 normalizado, a dureza Rockwell varia entre 80 e 90 HRB em condições de resfriamento ao ar. No entanto, essa faixa pode mudar quando submetido a tratamentos térmicos como têmpera e revenimento.

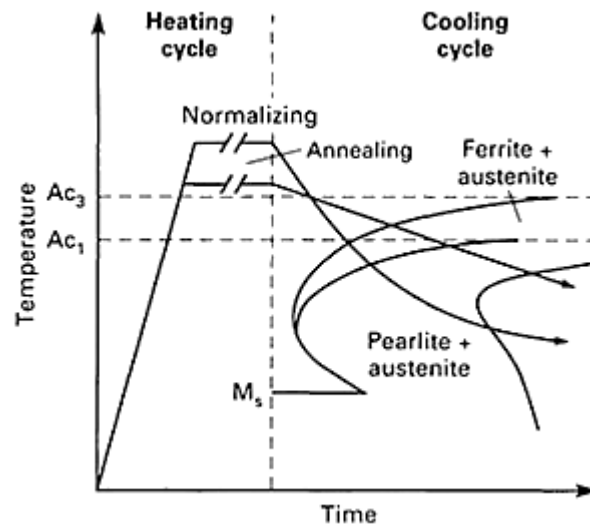
A faixa de temperatura para normalização é mostrada pela Figura 5.



O aço 4340, após a normalização, adquire uma estrutura predominantemente perlítica e ferrítica com grãos refinados. Isso proporciona uma distribuição uniforme de carbono e outros elementos de liga, como o níquel, cromo e molibdênio. Segundo Callister (2000), esse refinamento é essencial para melhorar as propriedades mecânicas do aço.

A Figura 6 relaciona os ciclos de tempo e temperatura dos tratamentos térmicos de recozimento e normalização, em que para a normalização, ao resfriar ao ar, espera-se uma estrutura composta por perlita e austenita.

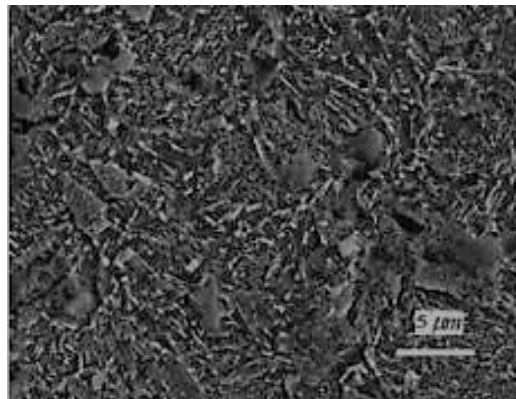
Figura 6 - Ciclo de tempo versus temperatura



Fonte: ASM (1991)

Embora a microestrutura do aço AISI 4340 ser predominante perlita e ferrita, Santos (2007) encontra uma estrutura predominantemente bainítica para o aço, como demonstra a Figura 7.

Figura 7 - AISI 4340 e a estrutura bainítica

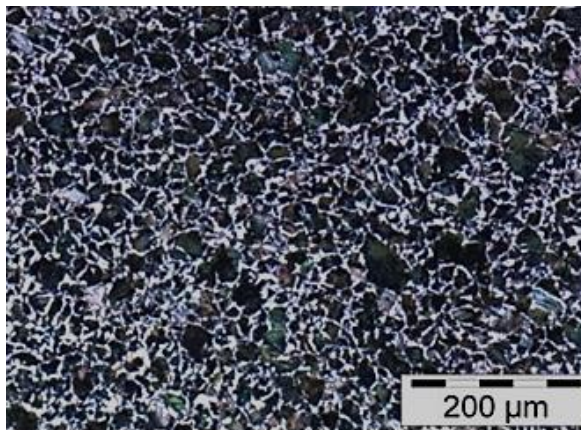


Fonte: Santos (2007)

Já no estudo de Costa (2010), conforme Figura 8, mostra a microestrutura de uma amostra de aço 1045 normalizado, obtida através de microscopia óptica, com ampliação e escala de referência de 200 μm. A amostra de aço 1045 normalizada exibe uma estrutura composta principalmente por ferrita (a área clara) e perlita (a área mais escura). A ferrita, rica em ferro e pobre em carbono, se distribui ao longo dos contornos de grão e entre as colônias de perlita. A perlita, composta de camadas alternadas de ferrita e cementita, aparece nas regiões mais escuras, refletindo a presença de carbono na microestrutura. Como esperado após o processo de normalização, não se observa formação de martensita ou bainita, já que o resfriamento é

relativamente lento, permitindo a transformação total em ferrita e perlita.

Figura 8 - Microestrutura do aço 1045 normalizado



Fonte: Santos (2007)

Após o processo de normalização, o aço AISI 4340 é amplamente utilizado em diversas aplicações industriais que exigem uma combinação de alta resistência. Segundo Callister (2000), a alta resistência desse aço o tornam ideal para componentes estruturais críticos em aeronaves. Segundo a ASM (1991), a dureza e a resistência ao desgaste desse aço o tornam adequado para suportar as condições adversas encontradas em ambientes de perfuração e extração de petróleo. Além disso em aplicações que envolvem altas cargas, como eixos de motores de grande porte e partes de transmissões pesadas, o aço 4340 normalizado é preferido.

Em termos de microdureza, o aço AISI 4340, em condição normalizada, tende a apresentar uma microestrutura de ferrita e perlita, resultando em uma microdureza inferior, tipicamente na faixa de 200 a 300 HV, conforme descrito por Callister, W. D. (2012).

2.3.4 Austenitização

A austenitização é uma etapa crucial nos processos de tratamento térmico dos aços, na qual o material é aquecido a uma temperatura específica para formar austenita, uma fase cristalina cúbica de face centrada (CFC), que se caracteriza por ser mais dúctil e capaz de dissolver uma quantidade significativa de carbono. O processo é fundamental para prepará-los para outras etapas de tratamento térmico, como a têmpera e o revenimento.

Totten (2006), em seu livro *Steel Heat Treatment Handbook*, destaca que a austenitização adequada é essencial para garantir a formação da microestrutura desejada após o resfriamento, seja martensita, bainita ou perlita. A distribuição uniforme de carbono na

austenita determina a dureza, a resistência e outras propriedades mecânicas do aço após o tratamento.

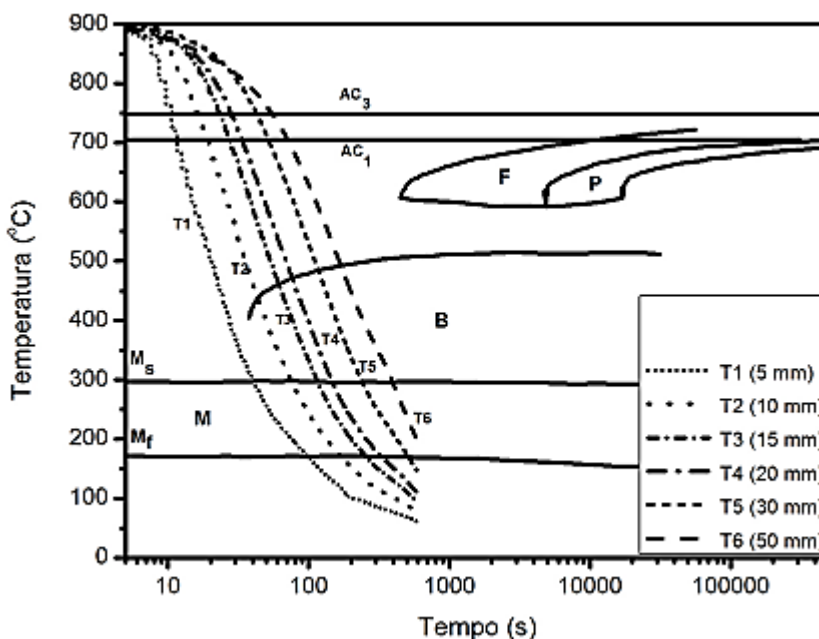
De acordo com Honeycombe e Bhadeshia (1995), no livro *Steels: Microstructure and Properties*, os principais fatores que afetam a austenitização são:

- a) Temperatura de austenitização: A temperatura exata varia com a composição do aço. Por exemplo, aços com maior teor de elementos de liga têm temperaturas de austenitização mais elevadas.
- b) Tempo de manutenção: O aço deve ser mantido na temperatura de austenitização por tempo suficiente para permitir a dissolução completa dos carbonetos e a homogeneização da austenita.
- c) Tamanho de grão: A austenitização promove o crescimento de grão. Grossman e Bain (1980) argumentam que um crescimento excessivo dos grãos durante a austenitização pode comprometer as propriedades mecânicas do aço após o resfriamento, tornando-o mais frágil.

Em aços baixa liga, como o AISI 4340, a austenitização é essencial para preparar o material para uma têmpera eficaz. Como mencionado por Reed-Hill (2009), os aços que passam por austenitização adequada e são posteriormente temperados podem atingir níveis elevados de dureza e resistência, mantendo uma microestrutura martensítica, que é a mais dura entre as possíveis fases de transformação.

A Figura 9 demonstra o diagrama para resfriamento contínuo de um aço AISI 4340, com curvas de resfriamento, de modo a indicar as várias microestruturas que podem ser obtidas. No aço AISI 4340, que é um aço de baixa liga, o comportamento de transformação depende muito da taxa de resfriamento. A formação de martensita é típica de resfriamento rápido, como em tratamentos térmicos como têmpera. A bainita, por outro lado, ocorre em resfriamentos mais lentos. Este gráfico é essencial para selecionar as condições corretas de resfriamento para obter as propriedades mecânicas desejadas no aço (como dureza e tenacidade).

Figura 9 - Diagrama para resfriamento contínuo de um aço AISI 4340



Fonte: Xavier (2014)

2.4 Ensaio Magnético

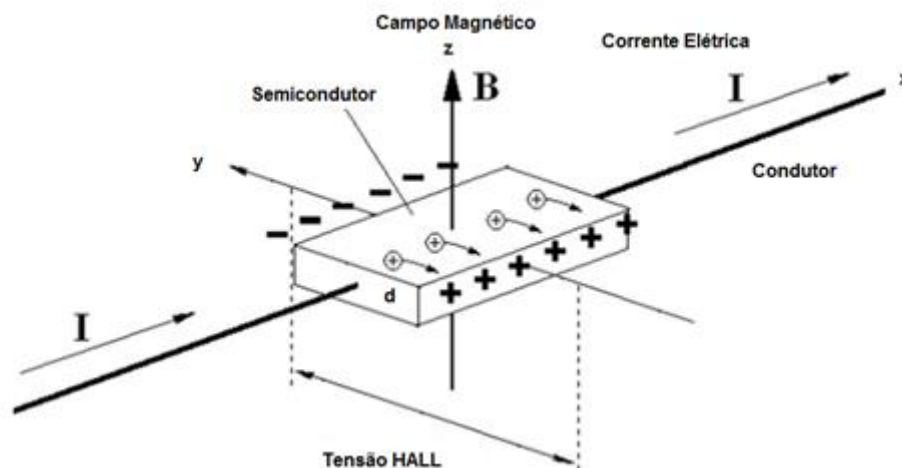
Os ensaios magnéticos são técnicas de ensaio não destrutivos que permitem avaliar a integridade e propriedade dos materiais. São importantes pois são utilizados para detecção de defeitos, controle de qualidade e segurança. (Junior, 2006 Apud Moreira 2014).

O estudo de ensaio magnético utilizando sensores de efeito Hall é uma técnica de medição e detecção de campos magnéticos em materiais ou dispositivos, em que o sensor Hall é um dispositivo semiconductor que gera uma tensão proporcional à intensidade do campo magnético aplicado perpendicularmente a ele.

Segundo Pradeep et al. (2010), o sensor Hall é capaz de detectar defeitos de até alguns micrômetros de tamanho, dependendo da intensidade do campo magnético aplicado e da proximidade do sensor com a superfície da peça. O método é amplamente utilizado em materiais ferromagnéticos, como aços e ligas ferrosas, onde as variações no campo magnético são mais pronunciadas. Porém, como apontado por Jiles (1991), o sensor Hall também pode ser usado para detectar campos magnéticos residuais ou gerados por correntes induzidas em materiais condutores, permitindo uma inspeção em diferentes tipos de materiais. Esse ensaio é amplamente utilizado para avaliar propriedades magnéticas, detectar falhas ou medir a intensidade e distribuição de campos magnéticos. Os valores dos campos magnéticos são

representados por β , cuja unidade de medida é o Gauss. A Figura 10 vem a demonstrar o efeito Hall em um material semiconductor submetido a um campo magnético.

Figura 10 - Esquematização do efeito Hall



Fonte: Cassiolato (2010)

Há presença de uma corrente elétrica que flui no eixo x ao longo do material semiconductor. Um campo magnético B é aplicado perpendicularmente à corrente, no eixo z . Então, devido à ação do campo magnético, os portadores de carga (elétrons ou lacunas) são desviados para um dos lados do semiconductor. No diagrama, os elétrons, cargas negativas, são desviados para a parte superior e as lacunas, cargas positivas, para a parte inferior. Essa separação de cargas cria uma diferença de potencial, chamada tensão Hall, no eixo y , perpendicular à corrente e ao campo magnético. A tensão Hall é proporcional à intensidade do campo magnético e da corrente elétrica que atravessa o material.

2.5 Método dos Interceptos

A norma ASTM E112 define os métodos padrão para medir o tamanho de grãos em materiais metálicos utilizando diferentes técnicas, sendo o método dos interceptos um dos mais comumente empregados. Esse método é amplamente utilizado na indústria e na pesquisa para avaliar as propriedades microestruturais dos metais, já que o tamanho dos grãos está diretamente relacionado às propriedades mecânicas, como resistência e dureza.

O método dos interceptos é uma técnica que estima o tamanho de grão por meio da interseção de uma linha reta com os contornos dos grãos visíveis em uma microestrutura. Para a realização desse método, faz-se necessário que a amostra esteja polida e atacada quimicamente para tornar visíveis os contornos dos grãos sob o microscópio óptico. Além disso,

uma rede de linhas paralelas é desenhada sobre a imagem da microestrutura ou sobre a tela do microscópio. Essas linhas podem ser aplicadas manualmente ou por meio de software de análise de imagem.

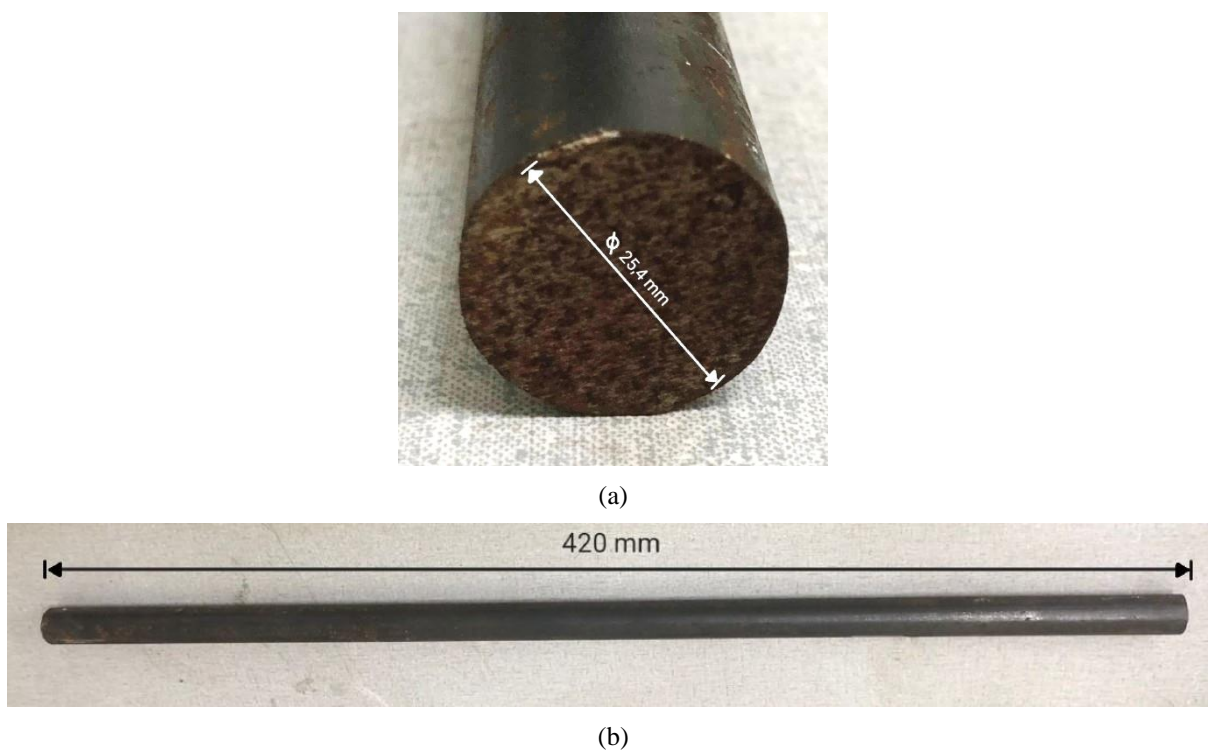
Segundo ASTM E112-13, a contagem do número de interceptos ocorrem entre as linhas e os contornos dos grãos. O número total de interceptos é dividido pelo comprimento total das linhas para calcular a média do número de interceptos por unidade de comprimento. O tamanho médio dos grãos é calculado a partir da fórmula estabelecida pela norma, utilizando o número de interceptos e a ampliação da imagem.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Material

O material que foi utilizado no trabalho constitui-se de uma barra redonda de aço carbono AISI 4340 de diâmetro de 25,4 mm e comprimento de 420 mm, ilustradas na Figura 11 (a) e (b), e cedida pelo Laboratório de Tratamento Térmico (LTT) da UFPB para que se pudesse extrair as amostras e realizar as devidas etapas.

Figura 11 - Diâmetro (a) e comprimento (b) das amostras

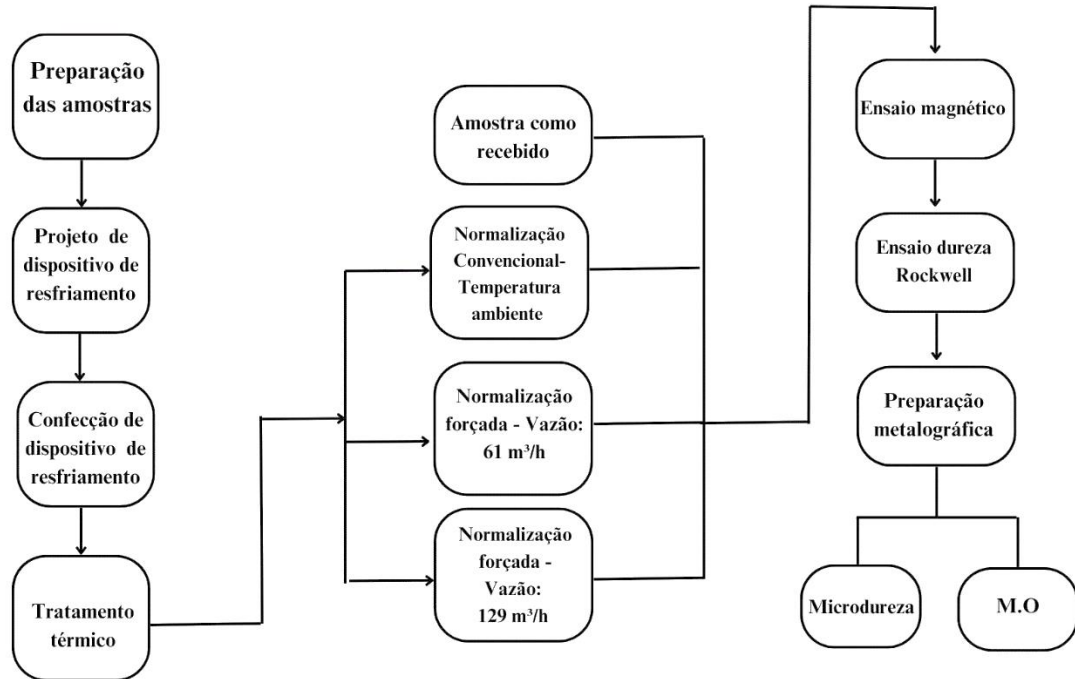


Fonte: Próprio autor (2024)

3.2 Metodologia

Posteriormente à seção do material, realizou-se um fluxograma com as etapas do método utilizado neste trabalho para que fiquem bem definidas as etapas seguintes. Tal fluxograma pode ser observado pela Figura 12.

Figura 12 - Fluxograma da metodologia



Fonte: Próprio autor (2024)

3.3 Preparação das amostras

Para efetivação dos processos posteriores, realizou-se a extração de 4 amostras da barra de aço AISI 4340, com alturas de 35mm cada uma, em que seus cortes foram realizados pelos técnicos do Laboratório de Oficina Mecânica (LOM). Além disso, foram realizadas usinagens, também feitas pelo LOM, nas amostras com o objetivo de deixá-las com altura de 30mm, medida considerada como ideal para a realização dos ensaios magnéticos do sensor Hall. As amostras demonstradas pela Figura 13 especificam os corpos de prova, que passaram por tratamento térmico, em seu tamanho final de 30 mm.

Figura 13 - Amostras



Fonte: Próprio autor (2024)

Para fins de diferenciação, as amostras foram marcadas de maneiras distintas, em que a Figura 13 mostra as diferentes marcações e que possuem as seguintes divisões: a primeira amostra, sem demarcações, é a amostra como recebida. Já a que possui um único traço, realizou-se nela uma normalização em que seu processo de resfriamento foi ao ar, porém, a amostra que possuem dois e três traços, passaram por processos de normalizações e seus resfriamentos foram feitas de forma que o ar fosse induzido em vazões maiores do que a ambiente e diferentes entre si.

As amostras foram nomeadas da seguinte forma: CR: Como recebida, NC: Normalizada e resfriada ao ar ambiente, NF1: Normalizada e resfriada à vazão menor, NF2: Normalizada e resfriada à vazão maior.

3.4 Projeto e confecção do dispositivo para resfriamento das amostras

Para ajudar no resfriamento das amostras após os tratamentos térmicos, confeccionou-se dois dispositivos capazes de realizar o resfriamento de forma efetiva. Projetou-os com o auxílio de 4 (quatro) ventiladores de 12 V, em que dois deles possuem 80 x 80 x 25 mm de tamanho, Figura 14 a, e dois ventiladores possuem 120 x 120 x 25 mm, Figura 14 b. Os desenhos técnicos dos dispositivos encontram-se nos Apêndices A e B deste trabalho.

Figura 14 - Construção dos dispositivos para resfriamento forçado: a) Dispositivo com ventilador 80 x 80 x 25 mm; b) Dispositivo com ventilador 120 x 120 x 25 mm.



(a)

(b)

Fonte: Próprio autor (2024)

As montagens desses dispositivos consistiu na instalação de 02 (dois) ventiladores, com tamanhos iguais, fixos às chapas de aço e formaram um único dispositivo. A união entre as chapas e os ventiladores se deram através de parafusos comerciais bicromatizados M8, 4 (quatro) deles para o ventilador superior e 4 (quatro) deles para o ventilador da base. Os parafusos das bases de ambos os ventiladores serviram também como apoio para o dispositivo, tendo em vista que o ventilador inferior, posicionado na base, precisava de uma certa distância para a superfície com objetivo de permitir que a vazão de ar fluísse da base para o centro, local em que se encontrava a amostra.

Para que as amostras tratadas termicamente ficassem fixas e recebesse o ar que provinha dos ventiladores de forma igualitária, houve a fixação de duas chapas no centro dos dispositivos. A vazão de ar que fluía tanto do ventilador superior quanto do inferior chegava de forma igualitária às amostras, posicionadas ao centros dos dispositivos. Além disso, para auxiliar nesse princípio de igualdade dos fluxos de ar, foram realizados rasgos nas chapas que apoiavam as amostras, para que o ar fluísse de forma efetiva do ventilador da base para a amostra.

Todos os ventiladores possuíam fios de ligação que foram conectados a um gerador,

como demonstrado na Figura 15. O gerador é responsável pelo acionamento dos ventiladores a uma tensão elétrica variável de acordo com a vazão de ar pretendida. Para o trabalho a tensão aplicada foi de 13 V e a corrente de aproximadamente 0,578 A, ou seja, o máximo de tensão elétrica nominal que os ventiladores suportam conforme a especificação do fabricante. Posteriormente à montagem dos dispositivos, partiu-se para os tratamentos térmicos.

Figura 15 - Gerador

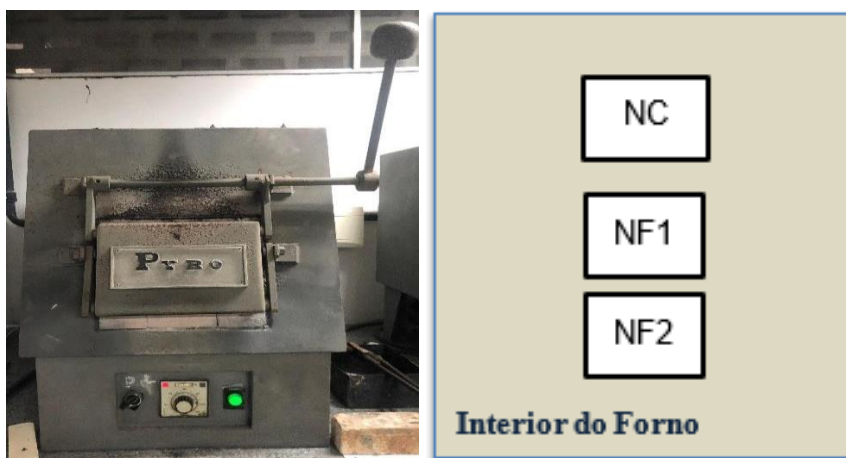


Fonte: Próprio autor (2024)

3.5 Tratamentos térmicos de normalização

Após serem cortadas nos tamanhos adequados, mencionados anteriormente, as amostras partiram para o forno para a realização dos tratamentos térmicos. Então, utilizou-se o forno mufla da marca Pyro, localizado no LTT da UFPB, Figura 16a. As peças foram postas na ordem que seguem na Figura 16b, introduzindo ao forno a NC, a NF1 e a NF2, consecutivamente, tudo isso para a realização das normalizações.

Figura 16 - Tratamento térmico: a) Forno Mufla; b) Disposição das amostras na normalização: Vista de topo;



Porta do forno

(a)

(b)

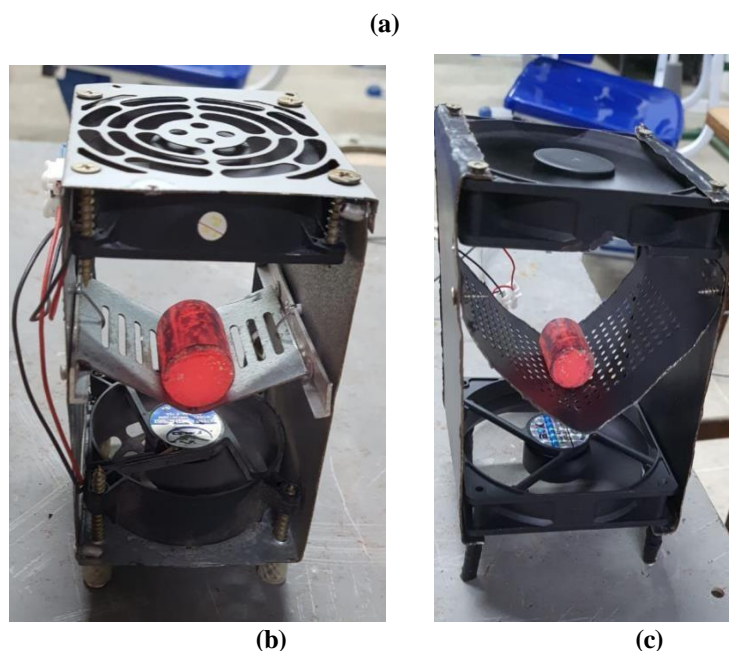
Fonte: Próprio autor (2024)

A ASM (1991), recomenda que as temperaturas de normalizações para os aços AISI 4340 sejam entre 870 a 925 °C, além disso, a literatura ainda afirma que o tempo de permanência no forno deve ser de uma hora ou de quinze a vinte minutos para cada polegada de espessura máxima da seção. Neste trabalho foi adotado o tempo de encharque de 01 hora ao forno. Por isso, utilizou-se a temperatura de 870°C para o processo de normalização e seu devido tempo.

As peças normalizadas após passarem uma hora no forno, foram retiradas e submetidas a seus devidos resfriamentos. Em que a amostra NC foi resfriada ao ar livre, Figura 17a, a amostra NF1 foi resfriada com auxílio de um equipamento composto por ventiladores com vazão de ar 61 m³/h, Figura 17b, e a amostra NF2 foi resfriada pelos ventiladores à 129 m³/h, Figura 16c.

Figura 17 - Métodos de Resfriamento: (a) Ao ar livre; (b) Ventilador vazão menor (61m³/h); (c) Ventilador vazão maior (129 m³/h).





Fonte: Próprio autor (2024)

A tabela 3 demonstra os tratamentos térmicos utilizados, bem como seu tempo de utilização ao forno e o meio de resfriamento.

Tabela 3 - Informações sobre os tratamentos térmicos realizados

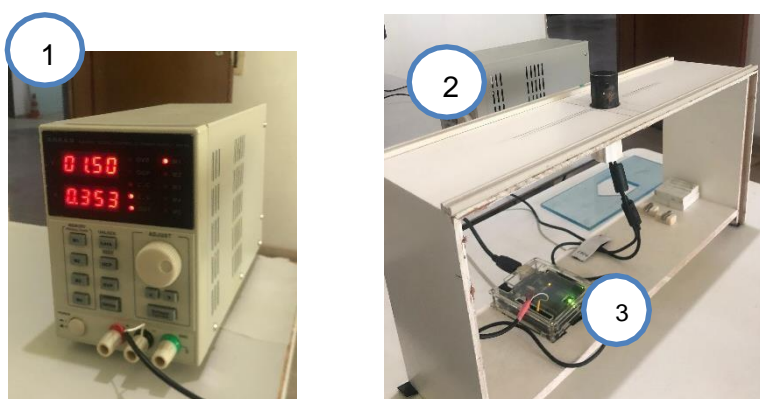
Amostras	Tratamento Térmico	Temperatura de Normalização (°C)	Tempo (min)	Meio de Resfriamento
CR	-	-	-	Como recebida
NC	Normalização	870	60	Resfriada ao ar ambiente
NF1	Normalização	870	60	Resfriada à vazão menor
NF2	Normalização	870	60	Resfriada à vazão maior

Fonte: Próprio autor (2024)

3.6 Ensaio Magnético

Para realização do ensaio magnético utilizou-se um equipamento desenvolvido no LTT da UFPB, em que é composto por três partes: um gerador, uma bancada de testes constituída de um módulo de emissão e um de aquisição, além de possuir uma placa de aquisição. A Figura 18 ilustra cada componente utilizado no ensaio magnético.

Figura 18 - Sensor Magnético: (1) Gerador; (2) Bancada; (3) Placa de aquisição



Fonte: Próprio autor (2024)

Para a realização do teste magnético, as amostras passaram, anteriormente, a lixamentos com lixas de carbeto de silício (SiC) de 220 e 420 *Mesh* com o auxílio da lixadeira da marca Lunn Minor, conforme Figura 19, que se encontra no Laboratório de Solidificação Rápida (LSR) na UFPB. Esses lixamentos possuem a função de, após os tratamentos térmicos realizados, deixar a superfície de cada uma das amostras lisa o suficiente para que não ocorram interferências de nenhuma incrustação nas superfícies e não venham a atrapalhar na geração do campo magnético.

Figura 19 - Lixadeira



Fonte: Próprio autor (2024)

As amostras são postas sobre marcação feita na bancada e através do gerador e do sensor utilizado, que é de efeito Hall, é alimentado com tensões de 1,5V, 2V e 2,5 V, respectivamente, para cada amostra, é que o teste é realizado. Em que, segundo Soares et al (2021) descreve seu funcionamento onde é emitido uma corrente elétrica percorrendo pelo material condutor e há a influência de um campo magnético com intensidade B e que sua orientação encontra-se de forma perpendicular ao fluxo dos portadores de carga, calculando

assim o campo magnético que será analisado posteriormente.

3.7 Ensaio de dureza

As amostras passaram pelo método de dureza em que foi realizado medidas em cada amostra, dessa forma, a Figura 20 demonstra onde e como as amostras ficaram.

Figura 20 – Localidade das durezas



Fonte: Próprio autor (2024)

Os ensaios de dureza foram realizados com o auxílio do durômetro, Figura 21, da marca Digimess presente no LTT da UFPB. Nesse equipamento, houve a medição de durezas Rockwell B para as amostras normalizadas e a amostra como recebido. Foram feitas 06 medições, sendo a primeira medição desprezada para ajuste do penetrador na máquina. Portanto, cada amostra passou por 05 (cinco) medições de dureza cada uma delas.

Figura 21 - Durômetro



Fonte: Próprio autor (2024)

Segundo a ABNT NBR ISO 6508- 38 1:2019, a recomendação das forças de pré-carga para normalizações é de 10 kgf, já as de carga têm um valor de 100 kgf para durezas Rockwell B, que foram feitas para as amostras normalizadas. Segundo a Digimess (2023), o tempo de aplicação da carga sobre as amostras é de 10 s.

A realização dos ensaios ocorreu na seguinte ordem: primeiro realizou-se a pré-carga da amostra de 10 kgf e, posteriormente, aplicou-se a carga de 100 kgf, esperou-se 10s, para aplicação da força, e mediu-se a medida. Então, repetiu-se o mesmo processo 04 (quatro) vezes mais, em que todos os valores foram anotados e, por fim, feito uma média aritmética de todos os valores obtidos. Portanto, nesses moldes, realizou-se as medições de dureza para as amostras.

3.8 Preparação Metalográfica

Para que as amostras pudessem ser analisadas no microscópio, elas passaram pela fase metalográfica, sendo necessário o uso de lixas de carbetto de silício (SiC), que têm o objetivo de deixar as amostras uniformes e sem incrustações e com sua microestrutura uniforme para que se possa fazer a análise de forma clara. Sendo assim, as lixas utilizadas foram as de 220, 320, 400, 600 e 1200 *Mesh*. O lixamento iniciou-se com as lixas de 220, que possui granulometria maior, e conseqüentemente menor acabamento, pois quanto maior o número da lixa utilizada, maior é o acabamento e menor a granulometria, então passou-se para as lixas de 320, rotacionou-se as amostras em 90° e utilizou-se as lixas de 400 *Mesh*, então repetiu-se os processos de rotação até as lixas de 1200 *Mesh* de granulometria.

Após este procedimento foi realizado o polimento das amostras lixadas, em que se utilizou a politriz semiautomática Panambra DP-09, encontrada no LTT, como mostra a Figura 22 :

Figura 22 - Politriz

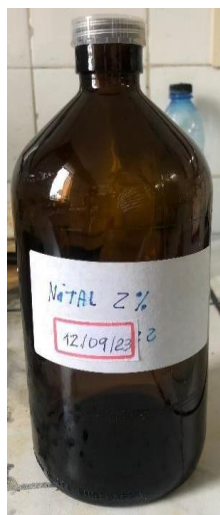


Fonte: Próprio autor (2024)

Para a realização dos polimentos, as amostras são postas sobre um pano especial para polimento, que pode ser observado pela Figura 22. Aplicou-se às amostras alumina (Al_2O_3), óxido de alumínio, que é um material que não adere a superfície polida já que seu grau de absorção de óleos é de 32%, então é possível obter polimento e limpeza de resíduos sem nenhuma oleosidade superficial. Para as amostras em questão, foram feitos polimentos com alumina com granulometria de 1 e de 0,3 μm , conseqüentemente.

Para revelar os grãos, foi usado um ataque químico com Nital 2%, como frasco exposto pela Figura 23. As amostras foram imersas na solução por 20s, e, posteriormente, borrifadas com álcool 70%, lavadas e secadas ao secador comercial.

Figura 23 - Nital 2%



Fonte: Próprio autor (2024)

3.9 Microscopia Óptica

Foram realizadas análises detalhadas das amostras fazendo uso do microscópio óptico, localizado no LSR, de marca Zeiss/Axiotech, que possui o software analySIS instalado para o auxiliar na captura de fotografias das microestruturas e realizar as devidas correções das imagens, como pode ser observado pela Figura 24.

Figura 24 - Microscópio Óptico Zeiss/Axiotech



Fonte: Próprio autor (2024)

Para o microscópio em questão foram utilizadas as lentes de aumento de 100 (cem), 200 (duzentas) e 500 (quinhentas) vezes com o objetivo de examinar as áreas de todas as amostras para formular a avaliação das diferentes formas de grãos, suas quantidades e realizar o estudo comparativo das amostras que passaram por tratamento térmico e a amostra como recebida.

3.10 Ensaio de Microdureza

O ensaio de microdureza realizado contou com o microdurômetro MHV-2T/SHIMADZU, pertencente ao LSR, como observado na Figura 25. O ensaio de microdureza seguiu a recomendação de distanciamento da norma ABNT NBR NM-ISO 6507-1:2008.

Figura 25 - Microdurômetro MHV-2T/SHIMADZU



Fonte: Próprio autor (2024)

A força de penetração a qual foi aplicada é de 1,961N ou 0,2 HV, *Hardeness Vickers*, com um tempo de 10s de aplicação de carga, em que se realizou dez aplicações de carga para cada amostra, tendo em vista que foram feitas cinco aplicações ao centro e cinco aplicações nas bordas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

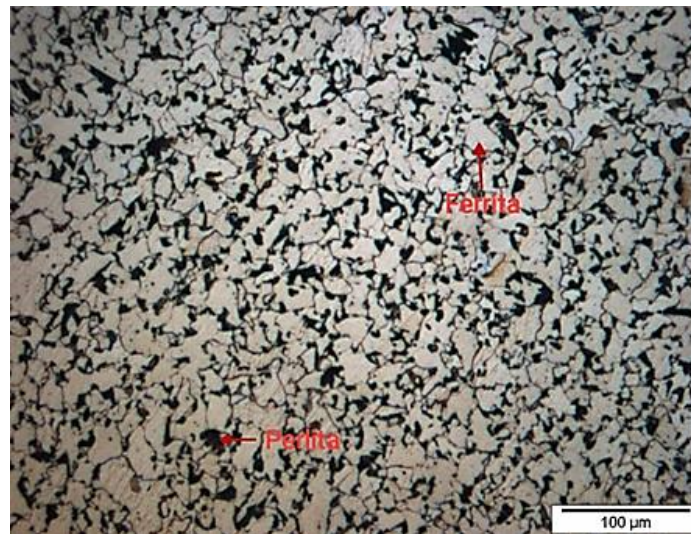
4.1 Caracterização Microestrutural

4.1.1 Efeito do resfriamento de normalização sobre a microestrutura

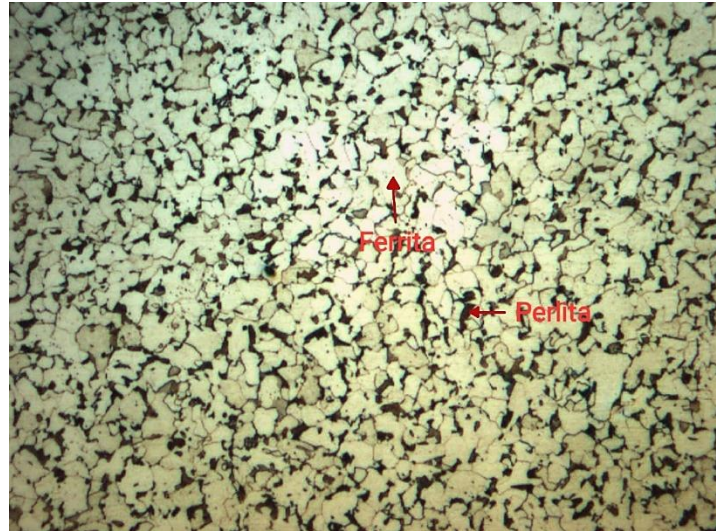
As microestruturas presentes na Figura 26 exemplificam o efeito do resfriamento nas amostras estudadas na região próxima à borda. A micrografia da amostra como recebida (CR) está na Figura 26a, enquanto a amostra normalizada ao ar calmo, 26b, e as amostras normalizadas ao ar forçado, NF1 e NF2, representadas pelas Figuras 26c e 26d, respectivamente.

A quantificação das fases presentes nas microestruturas identificadas na Figura 26 estão disponíveis na Tabela 4, que exemplifica a fração de fases para cada amostra.

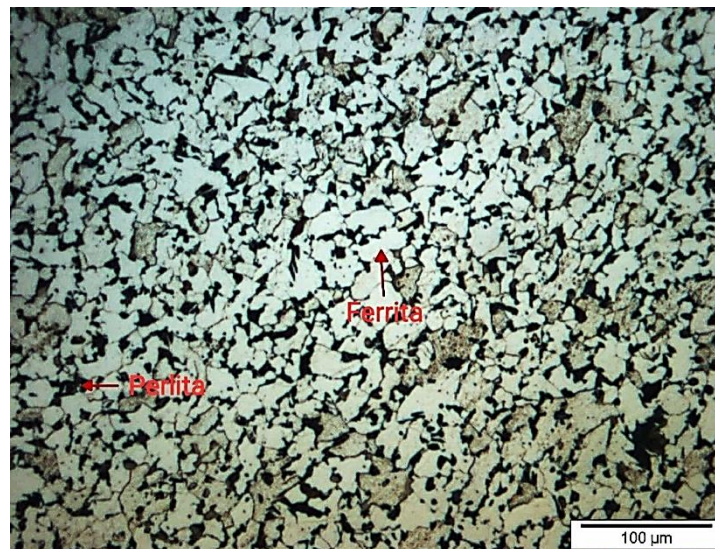
Figura 26 - Microestrutura das amostras: a) CR; b) NC; c)NF1; d) NF2. Ampliação 200X.



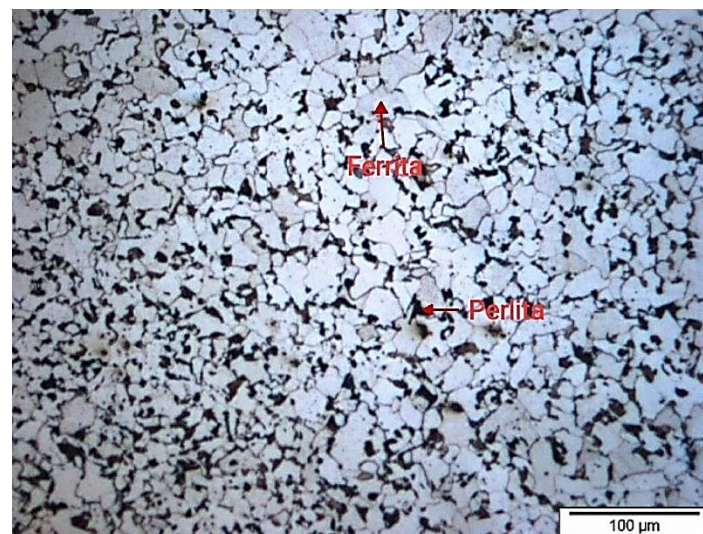
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Próprio autor (2024)

Tabela 4 – Análise quantitativa dos grãos

Amostras	CR		NC		NF1 - borda		NF2 - borda	
	Ferrita	Perlita	Ferrita	Perlita	Ferrita	Perlita	Ferrita	Perlita
Média do Tamanho dos grãos (μm^2)	1456,8	655,2	1255	399,6	661,5	113,1	468,1	112,1
Desvio Padrão	259,1	668,9	406,4	89,6	254,3	58,0	244,2	43,7
Fase (%)	58,56%	41,44%	59,73%	40,27%	53,97%	46,03%	56,28%	43,72%
Tamanho do grão (ASTM E112)	7,0		7,3		8,4		8,8	

Fonte: Próprio autor (2024)

Na amostra CR, Figura 26a, notou-se a presença de ferrita (área branca) e perlita (área escura). A porcentagem de ferrita encontrada foi de 58,56% e a de perlita foi de 41,44%. A ferrita, com porcentagem maior, é uma fase com baixo teor de carbono, sendo maleável e dúctil, além de formar a matriz do aço. Os grãos perlita, dispersos e com tamanhos variados, estão presentes como perlita fina. Os grãos de ferrita apresentaram um tamanho médio de 1456,8 μm^2 enquanto que para perlita obtiveram uma média de 655,2 μm^2 .

A amostra NC, Figura 26b, resfriada ao ar calmo, possui a presença tanto de perlita quanto de ferrita. Foi observado o refinamento dos grãos quando comparados ao da amostra CR, e uma maior uniformidade na perlita, pois o desvio padrão no tamanho de grão é muito menor com um valor de 89,6. A perlita teve um tamanho do grão médio de 399,6 μm^2 , além disso, a média dos grãos de ferrita também foi alterada de 1456,8 μm^2 , amostra CR, para 1255 μm^2 na amostra NC. Em termos comparativos com a porcentagem de fases presentes, a NC obteve um acréscimo na fração de fase ferrita, 59,73%, enquanto que para a perlita, obteve uma diminuição pequena da quantidade, resultando em 40,27%. A redução no tamanho de grão e maior quantidade perlita na amostra NC resultará em uma maior dureza do material quando comparado a amostra CR.

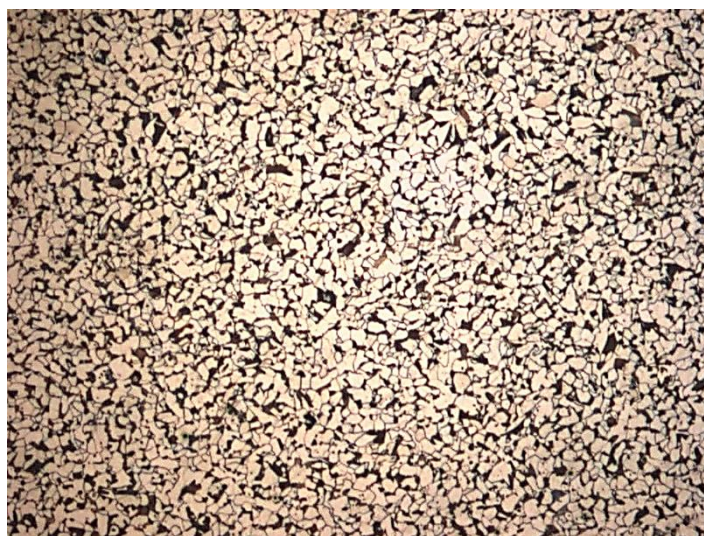
Os microconstituintes de ferrita e perlita também estão presentes na amostra NF1, Figura 26c. A fração de fase para ferrita diminuiu de forma considerável, visto que saiu de um valor 59,73%, na NC, para 53,97%. Consequentemente, a fração de fase de perlita aumentou em proporção, ficando com valor de 46,03%. O aumento da taxa de resfriamento resultou na formação de mais perlita e menos ferrita, já que o resfriamento mais rápido impede a formação

de grãos grandes de ferrita. No entanto, os valores oscilantes sugerem que a taxa de resfriamento pode estar variando em torno de um valor crítico, onde as duas fases coexistem em proporções variadas. Além do mais, há um pequeno aumento de dureza por ter sido resfriada de forma um pouco mais rápida. No entanto, a taxa de resfriamento não foi rápida o suficiente para atingir totalmente a microestrutura com o valor de dureza esperada no aço AISI 4340 normalizado.

A Figura 26d retrata a microestrutura da amostra NF2 após tratamento térmico de normalização e resfriamento à vazão maior, no qual observou-se um aumento das frações de fase de ferrita, 56,28%, em comparação com a amostra NF1. Porém, houve uma diminuição nessa porcentagem de ferrita quando comparados com a CR e com a NC. Já a perlita encontra-se abaixo, em termos de porcentagem de fase, quando comparados com a CR e NC. A média dos tamanhos dos grãos tanto de ferrita, $468,1 \mu\text{m}^2$, quanto de perlita, $112,1 \mu\text{m}^2$, diminuiu de forma considerável comparados com as amostras anteriores, sugerindo que o aumento na taxa de resfriamento limitou o tempo para que os átomos se rearranjassem, levando à nucleação de muitos grãos pequenos ao invés do crescimento de poucos grãos grandes, promovendo assim um refinamento maior da microestrutura, tendo em vista que o desvio padrão é o menor dentre todas as amostras. Essa taxa de resfriamento mais elevada também corrobora para que haja a formação de grãos de perlita mais uniformes, como pode ser observado pela Figura 25d.

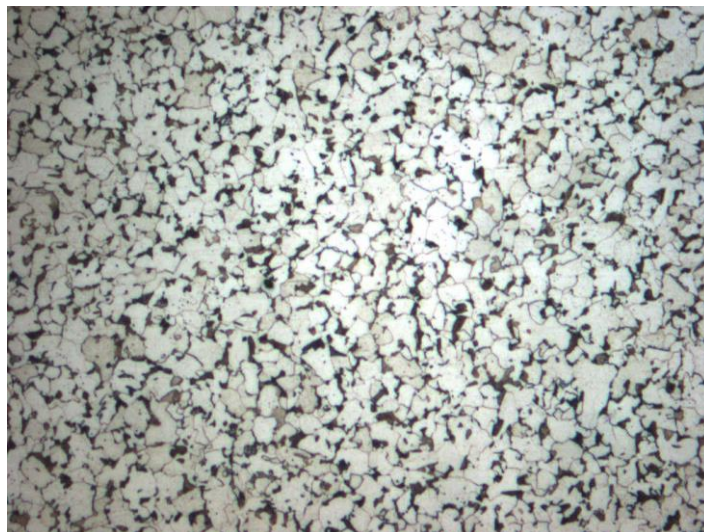
As Figuras 27, 28, 29 e 30 exemplificam as microestruturas presentes devido ao efeito do resfriamento nas amostras estudadas na região próxima ao centro. A micrografia da amostra como recebida (CR) está na Figura 27, enquanto a amostra normalizada ao ar calmo encontra-se presente na Figura 28.

Figura 27 - Microestrutura ao centro da CR



Fonte: Próprio Autor (2024)

Figura 28 - Microestrutura ao centro da NC



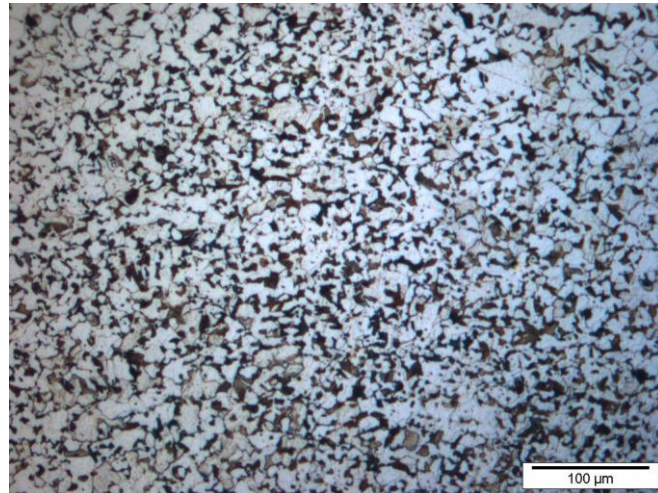
Fonte: Próprio Autor (2024)

Bem como a análise da NC com resfriamento nas bordas, a NC com resfriamento ao centro revela grãos de ferrita e perlita predominantemente pequenos e relativamente uniformes, o que se espera para o processo de normalização convencional ao ar calmo. Isso é corroborado pois o processo de aquecimento e resfriamento controlados evitam o crescimento excessivo dos grãos, mantendo uma estrutura devidamente refinada que melhora características como a tenacidade e a resistência mecânica.

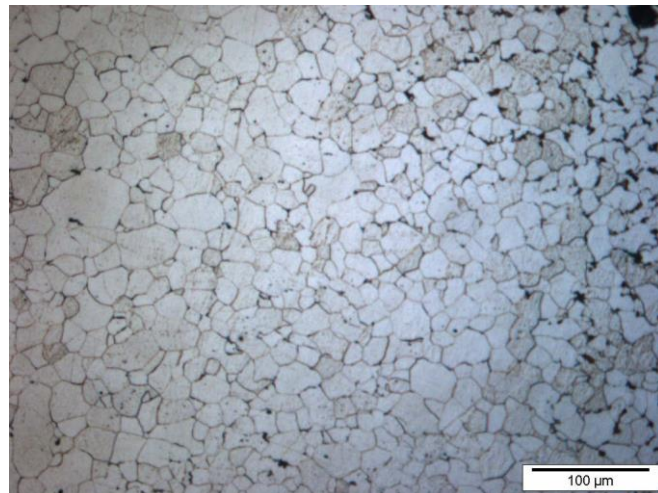
Já a amostra normalizada ao ar forçado com vazão menor, NF1, está representada pela Figuras 29a, 29b e 29c. Por fim, a amostra NF2 localiza-se representada pela Figura 30. Para além disso, a Tabela 5 exemplifica as frações de fases para cada amostra, além de demonstrar a quantidade de ferrita e perlita encontradas na microestrutura com seus desvios padrões respectivos.

Em termos comparativos, a Tabela 4 também apresenta os tamanhos dos grãos segundo a norma ASTM E112 é um padrão que estabelece métodos para determinar o tamanho de grão em materiais metálicos, utilizando técnicas como a contagem de grãos e o método de interceptação. Essa norma é essencial na caracterização de materiais, pois o tamanho do grão pode influenciar as propriedades mecânicas, como resistência, ductilidade e dureza. Os grãos das amostras ficaram da seguinte maneira: $7\mu\text{m}^2$ para a CR, 7,3 para a NC, 8,4 para a NF1 e 8,8 para a NF2, mostrando que as amostras NF2 tiveram os grãos mais refinados, possivelmente, deve a taxa de resfriamento maior. Com os grãos menores, a amostra NF2 apresentará maior dureza quando comparada as outras amostras.

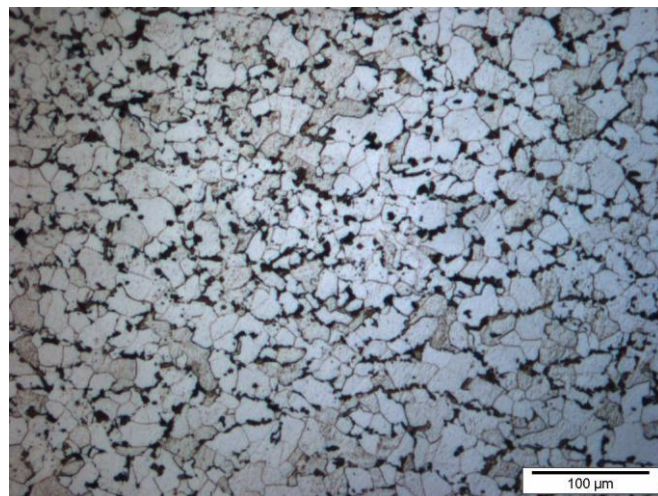
Figura 29 - Microestrutura ao centro da NF1: a) Primeira região; b) Segunda região; c) Terceira região.



(a)



(b)

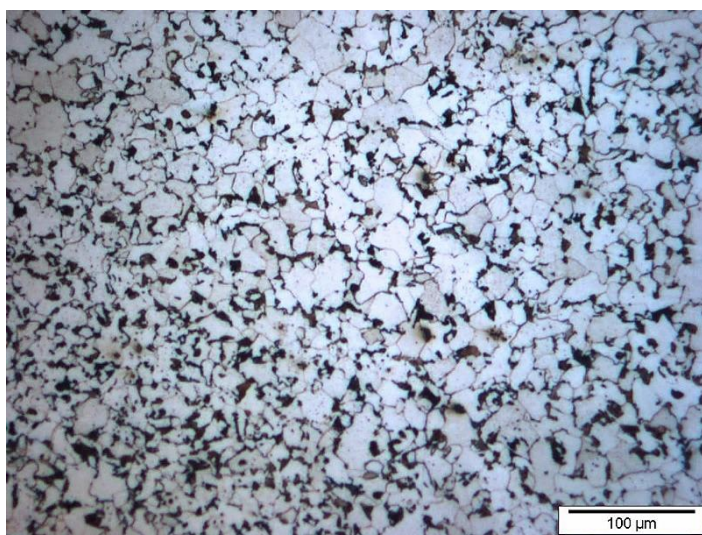


(c)

Fonte: Próprio autor (2024)

A amostra NF1, em seu centro, demonstrou um comportamento um pouco diferente das demais amostras ao centro, tendo em vista que observou-se regiões com variação na distribuição dos microconstituintes presentes, ou seja, regiões com maior e menor quantidade de perlita, como mostrado nas Figuras 29a, 29b e 29c. Esta variação de microconstituintes pode ser o resultado de uma região com resfriamento localizado, concentrado principalmente nas direções em que estavam posicionados os ventiladores do dispositivo para o resfriamento, proporcionando dessa forma uma não homogeneidade de resfriamento no corpo da amostra. Possivelmente, a vazão menor de ar para resfriamento tenha contribuído para isso.

Figura 30 - Microestrutura ao centro da NF2



Fonte: Próprio autor (2024)

Para a amostra NF2, não foi visualizado, ao centro, uma variação tão grande na microestrutura quando comparada a da NF1, que o resfriamento gerou certa mudança na variação da microestrutura de acordo com a posição em que se media. Portanto, essa maior uniformidade de microestrutura da NF2 se deve ao resfriamento com maior vazão de ar, 129 m³/h, que possibilitou uma distribuição de perda de calor mais homogênea se comparado à NF1. Essa maior homogeneidade pode ser observada pela Figura 30.

4.2 Dureza Rockwell

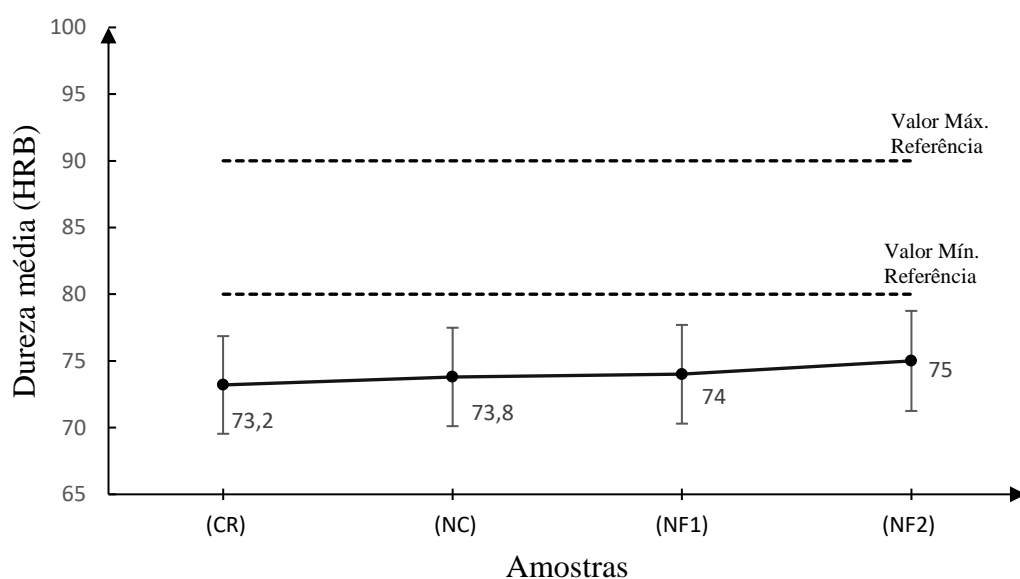
Na Tabela 5 e Figura 31 estão os valores e as curvas obtidos nos ensaios de dureza Rockwell B das amostras estudadas.

Tabela 5 - Dureza das amostras do aço AISI 4340.

Amostras	Dureza (HRB)					Média	Desvio Padrão
CR	74	67	74	75	76	73,2	3,56
NC	72	75	74	74	74	73,8	1,10
NF1	74	73	75	75	73	74	1,00
NF2	74	75	75	76	75	75	0,71

Fonte: Autor (2024)

Figura 31 - Dureza média das amostras



Fonte: Próprio autor (2024)

Para a CR, a dureza média foi de 73,2 HRB, com seu desvio padrão de 3,56, com isso, nota-se que a dureza está ligeiramente fora da faixa típica para o aço AISI 4340 em condição normalizada, indicando que a amostra pode estar em um estado mais macio, recozido ou não totalmente normalizado. Enquanto que para a amostra NC, o valor médio de dureza foi de 73,8 HRB, com um desvio padrão menor, mas a dureza ainda permaneceu fora dos valores esperados para o aço AISI 4340 normalizado ao ar.

Na amostra NF1, mesmo tendo uma indução do resfriamento da amostra com vazão de ar de 61 m³/h, há um pequeno aumento na dureza em comparação com a amostra NC, mas ainda se encontra em termos de inferioridade quanto aos valores típicos de dureza para o aço AISI 4340. O aumento na dureza foi devido ao refinamento do grão de perlita.

A NF2 apresentou a maior dureza média e o menor desvio padrão entre todas as amostras, correspondendo ao resultado esperado, pois esta amostra estava submetida a uma taxa de resfriamento maior, devido a maior vazão de ar de 129 m³/h do dispositivo. Observou-se que

para esta amostra o valor de dureza esteve próximo do valor mínimo ao que a literatura recomenda, com uma pequena diferença de apenas 1 HRB. A amostra NF2 mostrou um ligeiro aumento na dureza em relação à NF1. Esse aumento pode estar relacionado ao fato de a amostra NF2 ter sido normalizada com uma vazão maior de ar, o que resultou em um resfriamento mais eficiente e uniforme.

4.3 Microdureza Vickers

Na Tabela 6 e 7 estão demonstrados os dados encontrados após a efetivação dos ensaios de microdureza nos centros e nas bordas das amostras, respectivamente.

Tabela 6 - Microdureza dos centros.

Amostras ao centro	Microdureza HV02					Média	Desvio Padrão
CR	168	160	179	186	210	180,6	17,20
NC	144	142	144	160	143	146,6	6,74
NF1	135	146	136	138	160	143	9,34
NF2	147	157	139	144	150	147,4	6,02

Fonte: Próprio autor (2024)

Tabela 7 - Microdureza na borda.

Amostras na borda	Microdureza HV02					Média	Desvio Padrão
CR	182	184	181	160	151	171,6	13,48
NC	145	141	148	126	146	141,2	7,93
NF1	163	164	145	160	150	156,4	7,55
NF2	139	147	145	138	142	142,2	3,43

Fonte: Próprio autor (2024)

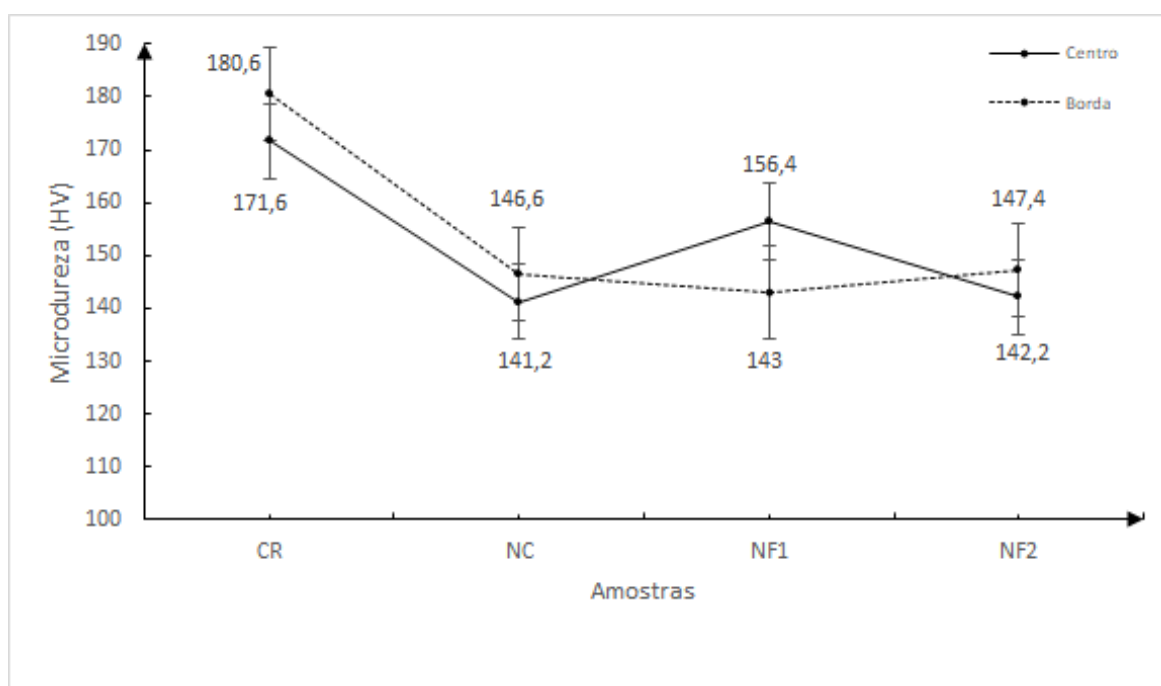
O centro da amostra como recebida (CR) teve o valor médio de microdureza de 180,6 HV. Este valor é significativamente menor do que o esperado para o aço AISI 4340 após normalização completa, indicando uma condição mais macia. A literatura, como mencionado pela ASM (1991), sugere que a microdureza típica do AISI 4340 após normalização seja de 229

a 302 HB (Brinell), o que corresponde aproximadamente a dureza Rockwell de 100 a 120 HRB ou em torno de 200 a 300 HV, em termos de microdureza.

A amostra normalizada e resfriada ao ar calmo (NC) teve média de 146,6 HV, distante da faixa esperada para a condição normalizada. A dureza reduzida pode ser explicada por uma taxa de resfriamento lenta, levando à formação de perlita grosseira. Contudo, as amostras NF1 e NF2, em ambos os casos, têm médias de 143-147 HV. Valores diferentes dos valores típicos esperados para a normalização completa, porém o desvio padrão mostrou-se pequeno, assim, conclui-se que houve um resfriamento efetivo, tendo em vista que a microdureza aumentou para as amostras ao ar forçado.

A Figura 32 demonstra o comparativo entre as variações das medidas de microdureza para cada uma das amostras, tomando como base os valores das médias apresentadas ao centro e nas bordas.

Figura 32 - Comparativo da microdureza



Fonte: Próprio autor (2024)

Em termos comparativos tem-se que, na CR, ao centro da amostra a média de 180,6 HV com desvio padrão de 17,20 foi encontrada, já na borda obteve-se média de 171,6 HV com desvio padrão de 13,48. A microdureza da amostra na borda foi ligeiramente menor que no centro, mas ambas as regiões apresentam um desvio padrão relativamente alto, indicando variações dentro da amostra. Isso indica que a microestrutura na borda é um pouco mais suave,

possivelmente devido a tensões residuais ou alterações de processamento na superfície da peça. Para a NC, o centro possuiu média de 146,6 HV, com desvio padrão de 6,74, já na borda possuiu uma microdureza média de 141,2 HV, com desvio padrão de 7,93. Em ambos os casos, os desvios padrões encontram-se elevados e apresentam um valor de microdureza inferior ao centro, o que é esperado devido ao resfriamento mais rápido nas bordas em comparação com o interior, resultando em uma microestrutura menos endurecida. No entanto, os valores estão próximos, sugerindo uma boa homogeneidade no tratamento.

A amostra NF1 apresentou, ao centro, valor médio de 143 HV com desvio padrão de 9,34, enquanto na borda possuiu média de 156,4 HV com desvio padrão de 7,55. Com isso, observa-se que a borda nesta condição apresenta uma microdureza superior à do centro. Isso pode ser explicado por uma diferença no resfriamento mais rápido nas bordas, levando à formação de uma quantidade perlita fina, estrutura mais dura em comparação com o centro, que foi resfriado mais lentamente. A NF2, em seu centro, apresentou média de 147,4 HV com desvio padrão de 6,02 e sua borda apresenta média de 142,2 HV com desvio padrão de 3,43. Ademais, a microdureza na borda foi ligeiramente menor do que no centro, mas ambas as regiões apresentam valores próximos, indicando um resfriamento mais uniforme. O desvio padrão da borda é o menor de todos, sugerindo uma boa uniformidade do tratamento térmico nesta condição.

4.4 Ensaio Magnético por sensor Hall

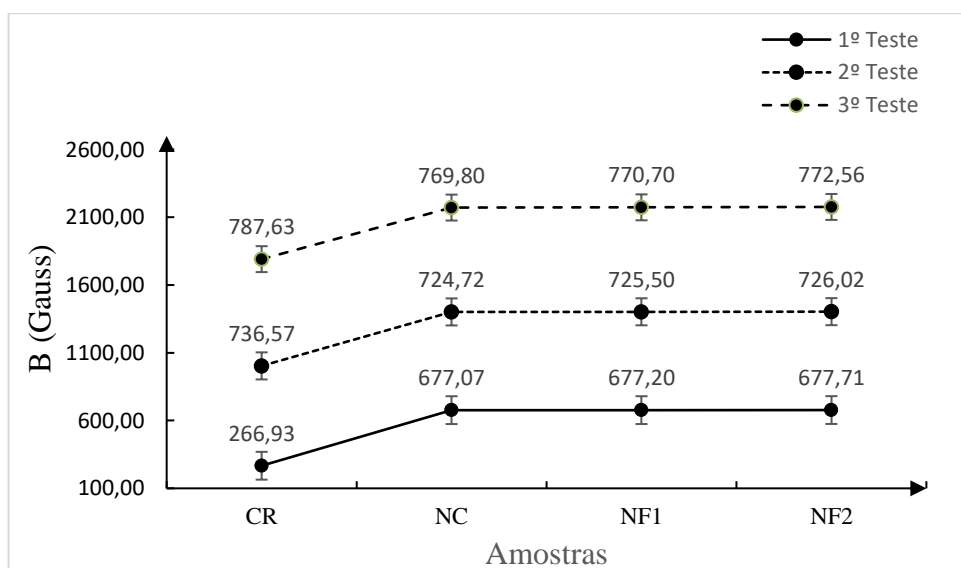
O estudo de ensaio magnético utilizando sensores de efeito Hall é uma técnica de medição e detecção de campos magnéticos em materiais ou dispositivos, com base no efeito Hall. Esse ensaio é amplamente utilizado para avaliar propriedades magnéticas, detectar falhas ou medir a intensidade, distribuição de campos magnéticos e é sensível a mudanças estruturais. Os valores da densidade de fluxo magnético são representados por B , medido em Gauss, e, para o trabalho em questão, estão expostos pela Tabela 8 e representados pela Figura 33, que representa o efeito do resfriamento de normalização na capacidade de penetração das linhas de campo magnético em 03 condições de ensaio que variou a tensão de excitação no sensor Hall e o fluxo de corrente. O 1º teste foi realizado com uma tensão de 1,5V e uma corrente de 0,351A, enquanto que para o 2º teste utilizou-se uma tensão de 2V e uma corrente de 0,449A e, por fim, para o 3º teste, a tensão de 2,5V e a corrente de 0,548A foram utilizadas.

Tabela 8 - Valores ensaio magnético.

Ensaio Magnético sensor Hall	B	Desvio Padrão
CR		
1º Teste (1,5 V e 0,351 A)	266,93	0,37
2º Teste (2 V e 0,449 A)	736,57	0,50
3º Teste (2,5 V e 0,548 A)	787,63	0,58
NC		
1º Teste (1,5 V e 0,351 A)	677,07	0,36
2º Teste (2 V e 0,449 A)	724,72	0,45
3º Teste (2,5 V e 0,548 A)	769,80	0,48
NF1		
1º Teste (1,5 V e 0,351 A)	677,20	0,45
2º Teste (2 V e 0,449 A)	725,50	0,50
3º Teste (2,5 V e 0,548 A)	770,70	0,46
NF2		
1º Teste (1,5 V e 0,351 A)	677,71	0,45
2º Teste (2 V e 0,449 A)	726,02	0,22
3º Teste (2,5 V e 0,548 A)	772,56	0,50

Fonte: Próprio autor (2024)

Figura 33 - Comparativo dos ensaios magnéticos



Fonte: Próprio autor (2024)

Para as condições de resfriamento observa-se que o valor de campo magnético

induzido (B) aumentou com os tratamentos de normalização e que a partir deles o valor de B tendeu a estabilização nos 03 (três) testes, indicando que a permeabilidade não interfere nos valores de B. As pequenas variações nos valores de B são consequências nas alterações das microestruturas das amostras.

Para a amostra como recebida tem-se que o primeiro teste apresentou um valor de β de 266,93 G, que é consideravelmente menor em comparação com os demais testes, indicando uma menor resposta magnética. Já os 2º e 3º testes, observou-se que valores mais altos de β 736,57G e 787,63G são obtidos quando aumenta-se a tensão e a corrente, sugerindo que o aumento da densidade de corrente induz uma maior resposta magnética.

Para a amostra normalizada, resfriada ao ar, tem-se que o valor de β no 1º teste foi 677,07G que é significativamente maior do que a amostra como recebida, mostrando que a normalização aumentou a resposta magnética do material. O aumento de β nos testes subsequentes, 2º e 3º testes, seguiu um padrão similar.

A NF1 apresentou um padrão de resposta muito próximo ao da condição NC, com β variando de 677,20G no 1º Teste até 770,70G no 3º Teste. Pequenas diferenças em relação ao NC indicam que a taxa de resfriamento menor não influencia significativamente a resposta magnética, mas pode gerar microestruturas ligeiramente diferentes.

A NF2 teve resposta magnética muito similar ao das amostras NC e NF1. O valor de β no 3º Teste é de 772,56G, mostrando-se ligeiramente superior, o que pode indicar uma maior homogeneidade na microestrutura devido ao resfriamento mais rápido.

O comportamento magnético, refletido pelos valores de β , varia significativamente dependendo do tratamento térmico e das condições de teste. A normalização, especialmente nas condições NC e NF1, tende a aumentar a resposta magnética em relação à condição como recebida. O resfriamento rápido na condição NF2 também resultou em uma resposta magnética ligeiramente melhor, mas sem diferenças significativas em comparação com o resfriamento mais lento NF1.

Esses resultados demonstram que o tratamento térmico afeta diretamente as propriedades magnéticas do aço AISI 4340, corroborando com os princípios discutidos por autores especializados no comportamento magnético de metais.

5 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados dos experimentos, conclui-se para o estudo da influência do tratamento térmico de normalização do aço AISI 4340 sob diferentes condições de resfriamento que:

- A construção dos dois dispositivos de resfriamento permitiu realizar o tratamento térmico de normalização sujeito ao meio com ar forçado em vazões diferentes com valores de 61 m³/h e 129 m³/h, respectivamente.
- Os tratamentos térmicos realizados nas amostras NC, NF1 e NF2 produziram os microconstituintes ferrita e perlita, ou seja, microestrutura esperada para o tratamento térmico de normalização.
- Para o aço 4340 que possui na sua composição Ni, Cr e Mo, além de ferro e carbono, mesmo que resfrie lentamente, não é possível obter-se a perlita grossa, conforme a sua curva de Transformação por Resfriamento Contínuo (TRC), de maneira que neste trabalho obteve-se a perlita fina em todas as condições de resfriamento conforme a normalização realizada.
- A maior diferença na microestrutura resultante das amostras é a quantidade de fases perlita e ferrita e o tamanho dos grãos. As amostras NC, NF1 e NF2 tiveram o tamanho do grão menor que a amostra como recebido. A amostra NF2, com resfriamento forçado de maior vazão, teve o menor tamanho de ferrita e perlita com 468,1 e 112,1 μm², respectivamente. O tamanho do grão ASTM para NF2 foi de 8,8 μm², obtendo o maior refinamento dos grãos quando comparado as outras amostras. A amostra NF2 teve uma maior quantidade percentual de perlita, 43,72%, do que as amostras CR e NC, com 41,44%.
- A amostra NF1 obteve maior variação na microestrutura formada no centro do corpo de prova, gerando regiões com maior quantidade de perlita quando comparada com região vizinha constituída pela predominância de ferrita. Esta diferença refletiu uma não homogeneidade de resfriamento no interior do material, impactando nos valores de microdureza medido.
- A dureza da amostra NC teve um valor médio de 73,8 HRB, próximo ao do material como recebido (CR) que apresentou a dureza média de 73,2 HRB. Isto pode ser justificado pela fração de fases presentes na amostra NC ter uma

quantidade próxima ao da amostra CR.

- Observou-se que o resfriamento mais rápido, como no caso da amostra NF levou a um leve aumento da dureza, apresentado um valor médio de 75 HRB e uma microestrutura mais homogênea, ainda que os valores obtidos estejam abaixo do esperado para um aço AISI 4340 normalizado.
- Finalmente, os ensaios magnéticos demonstraram que o tratamento térmico influencia a resposta magnética do aço AISI 4340. A normalização resultou em um aumento da resposta magnética, com variações discretas entre as diferentes condições de resfriamento, sugerindo uma boa homogeneidade nas amostras NF1 e NF2. Esses resultados confirmam que a combinação de análise mecânica, microestrutural e magnética é fundamental para entender e otimizar o comportamento de aços como o AISI 4340 em diferentes condições de tratamento térmico.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- A) Modelagem da taxa de resfriamento e seu impacto nas propriedades mecânicas do aço AISI 4340;
- B) Efeitos da taxa de resfriamento em propriedades de dureza e tenacidade do aço AISI 4340.

REFERÊNCIAS

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE (AISI); SOCIETY of Automotive Engineers. **SAE Handbook**. Warrendale: SAE, 2000.

ASM International. **Alloy Digest**. Vol. 3. Materials Park, 1954.

ASM International. **ASM Handbook: Heat treating**. Vol. 4. Materials Park: ASM International, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 16700: Aços – Classificação e designação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASTM A29/A29M-2D: **Standard Specification of General Requirements for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought**, 2006.

AVNER, S. H. **Introduction to physical metallurgy**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1974.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering: an introduction**. 7. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM), 2003.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: materiais e tratamento térmico**. 2. ed. São Paulo: LTC, 2005.

COSTA, A. P. **Ciência dos materiais: uma introdução prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

COSTA E SILVA, A.; MAIA, L. **Introdução aos aços**. São Paulo: Blucher, 2010.

CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction to magnetic materials**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.

DIGIMESS. **Durômetro Rockwell**. São Paulo: Digimess, 2023.

HONEYCOMBE, R. W. K.; BHADESHIA, H. K. D. H. **Steels: microstructure and properties**. 2. ed. London: Edward Arnold, 1995.

KRAUSS, G. **Steels: processing, structure, and performance**. Materials Park: ASM

International, 1994.

KRAUSS, G.; GROSSMAN, M. A. **Principles of heat treatment of steel**. Metals Park: ASM International, 1980.

MAIA, L. **Aços ferramenta: propriedades e aplicações**. São Paulo: ABM, 2010.

MASSALSKI, T. B. (Ed.). **Binary alloy phase diagrams**. 2. ed. Vol. 1. Materials Park: ASM International, 1990.

PRABHUDEV, K. N. **Handbook of heat treatment of steels**. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1988.

PRADEEP, T., Rajagopalan, R., & Narayanan, S. (2010). **Modern Sensors and Instrumentation Techniques**.

REED-HILL, R. E. **Physical metallurgy principles**. New York: D. Van Nostrand, 1964.

SANTOS, S. **Tratamentos térmicos dos aços**. São Paulo: Edgard Blücher, 2007.

SOCIETY of Automotive Engineers (SAE); AMERICAN Iron and Steel Institute (AISI). **SAE Handbook**. Warrendale: SAE, 2000.

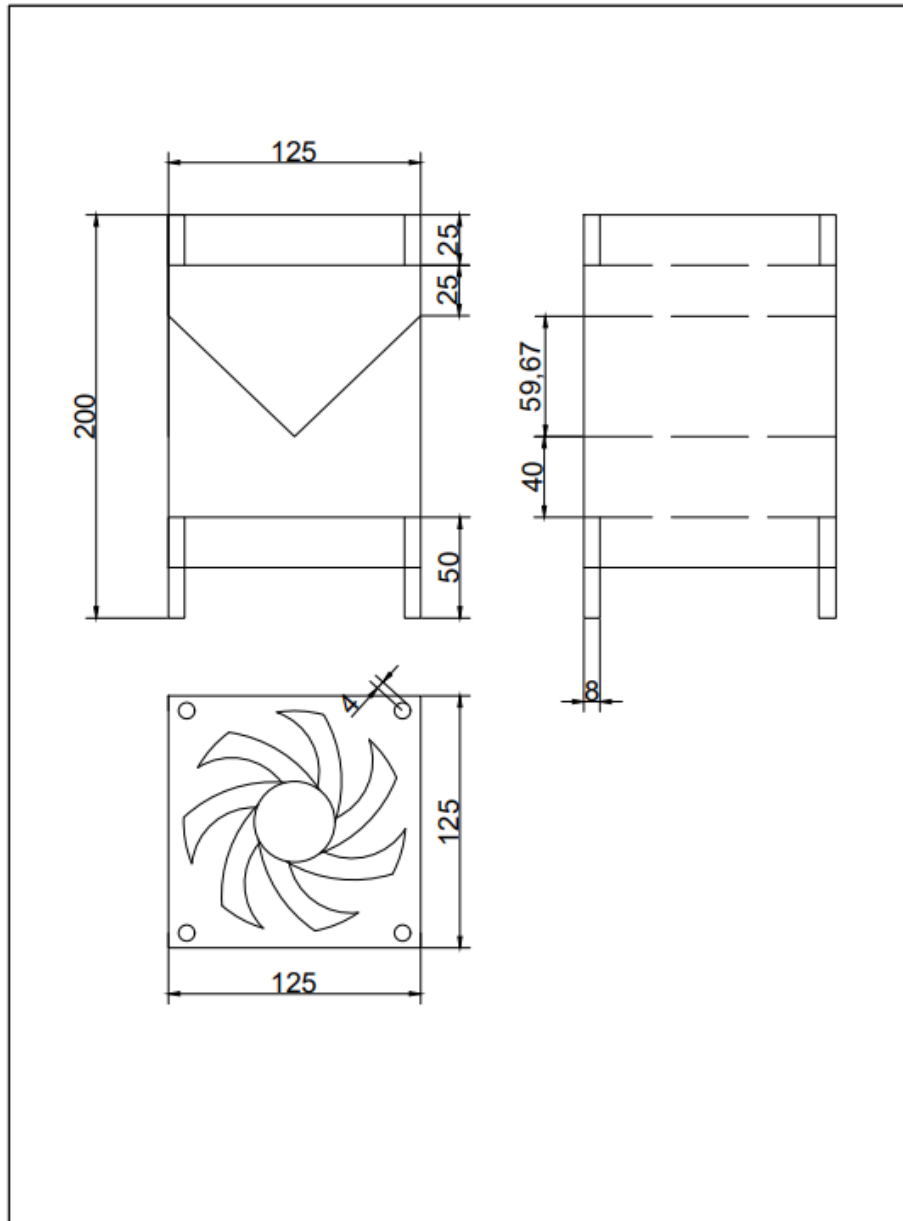
TOTTEN, G. E. **Steel heat treatment handbook**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.

TSCHIPTSCHIN, A. P. **Aços inoxidáveis: propriedades e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2020.

VERHOEVEN, J. D. **Steel metallurgy for the non-metallurgist**. Materials Park: ASM International, 2007.

WORLD Steel Association. **World steel in figures**. Disponível em: <https://www.worldsteel.org>. Acesso em: 04 out. 2024.

APÊNDICE A – COOLER MAIOR



APÊNDICE B – COOLER MENOR

