



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

CAIO VICTOR FONSECA MORAES

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS DE
RECOZIMENTO PLENO, NORMALIZAÇÃO E TÊMPERA SOBRE A
MICROESTRUTURA, DUREZA E PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DO AÇO AISI**

1030

JOÃO PESSOA

2024

CAIO VICTOR FONSECA MORAES

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS DE RECOZIMENTO
PLENO, NORMALIZAÇÃO E TÊMPERA SOBRE A MICROESTRUTURA, DUREZA E
PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DO AÇO AISI 1030

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.

Orientador: Prof. Dra Cristiana dos Santos Nunes.

JOÃO PESSOA

2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M827e Moraes, Caio Victor Fonseca.

Estudo da Influência dos Tratamentos Térmicos de Recozimento Pleno, Normalização e Têmpera sobre a Microestrutura, Dureza e Propriedades Magnéticas do Aço AISI 1030. / Caio Victor Fonseca Moraes. - João Pessoa, 2024.

53 f.

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

1. Tratamento térmico. 2. AISI 1030. 3. Ensaio magnético. I. Nunes, Cristiana dos Santos. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 621(043.2)

CAIO VICTOR FONSECA MORAES

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS DE RECOZIMENTO
PLENO, NORMALIZAÇÃO E TÊMPERA SOBRE A MICROESTRUTURA, DUREZA E
PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DO AÇO AISI 1030

Trabalho de conclusão de curso submetido à **Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica da UFPB**, apresentado em sessão de defesa pública realizada em 30/04/2024, obtendo o conceito **APROVADO**, sob a avaliação da banca examinadora a seguir:

Documento assinado digitalmente



CRISTIANA DOS SANTOS NUNES

Data: 07/05/2024 05:39:49-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

Documento assinado digitalmente



JOAO PEREIRA LEITE

Data: 03/05/2024 16:29:13-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

Documento assinado digitalmente



JOSINALDO PEREIRA LEITE

Data: 06/05/2024 18:30:24-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

João Pessoa (PB)
ABRIL/2024

A Deus.

Aos meus pais, Suelio e Célia.

Aos meus avós, Hilda e José Camilo.

A minhas irmãs, Alinne e Suelen.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me manter firme em todo momento durante o curso, assim como na finalização deste trabalho de conclusão de curso.

A minha orientadora, Dra. Prof. Cristiana dos Santos Nunes por toda disponibilidade nos ensaios realizados deste trabalho, assim como no conhecimento transmitido e responsabilidade por guiar-me durante o 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 familiares, principalmente meu pai Suélio e mãe Célia por todo incentivo e auxílio financeiro durante a graduação.

A minha namorada Larissa que tanto me incentivou e acompanhou durante a graduação.

A minha falecida Tia-avó Sônia Suelene que me recebeu em sua residência e me tratou um dos seus filhos.

Aos técnicos do Laboratório de Solidificação Rápida (LSR) e Laboratório de Oficina Mecânica (LOM) pela disponibilidade e auxílio em manusear e realizar os cortes e usinagem das amostras, no qual foi de extrema importância para colaboração dos resultados.

RESUMO

O presente estudo investigou a influência dos tratamentos térmicos de recozimento pleno, normalização e têmpera sobre a microestrutura, dureza e propriedade magnética no aço AISI 1030. O aço carbono AISI 1030 é uma liga comum utilizada em diversas indústrias devido às suas propriedades mecânicas. Os tratamentos térmicos foram aplicados em amostras de aço, seguidos de análises microestruturais, ensaios de dureza Rockwell C, microdureza Vickers e ensaios magnéticos com sensor Hall. A austenitização foi realizada a 850°C, por um tempo de encharque de 30 minutos, seguido do resfriamento por recozimento, normalização e têmperas (óleo, água e salmoura) para induzir diversas microestruturas, como perlita, ferrita, e martensita. Os resultados revelaram diferenças na microestrutura, dureza e propriedades magnéticas, com destaque para a formação de martensita e a influência do meio de resfriamento. As análises microestruturais mostraram variações no tamanho dos grãos e presença de diferentes fases após os tratamentos térmicos. Os ensaios de dureza revelaram diferentes níveis de dureza, como a têmpera em salmoura resultando em maior valor de 18 HRC e 225 HV. Além disso, os ensaios magnéticos por sensor Hall permitiram avaliar a influência das mudanças de fases dos tratamentos térmicos nas propriedades magnéticas do aço AISI 1030. Os resultados do campo magnético induzido mostrou-se valores diferentes para cada mostra.

Palavras-chave: Ensaio magnético; tratamento térmico; AISI 1030.

ABSTRACT

The present study investigated the influence of full annealing, normalization, and quenching heat treatments on the microstructure, hardness, and magnetic properties of AISI 1030 carbon steel. AISI 1030 carbon steel is a common alloy used in various industries due to its mechanical properties. Heat treatments were applied to steel samples, followed by microstructural analyses, Rockwell C hardness tests, Vickers microhardness, and magnetic tests using a Hall sensor. Austenitization was performed at 850°C for a soaking time of 30 minutes, followed by cooling through annealing, normalization, and quenching (using oil, water, and brine) to induce various microstructures such as pearlite, ferrite, and martensite. The results revealed differences in microstructure, hardness, and magnetic properties, with particular emphasis on martensite formation and the influence of the cooling medium. Microstructural analyses showed variations in grain size and the presence of different phases after heat treatments. Hardness tests demonstrated varying hardness levels, with brine quenching resulting in a higher value of 18 HRC and 225 HV. Additionally, magnetic tests using a Hall sensor allowed for evaluating the influence of phase changes from heat treatments on the magnetic properties of AISI 1030 steel, with induced magnetic field values differing for each sample.

Keywords: Magnetic test; heat treatment; AISI 1030.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Diagrama Ferro-Carbono.....	18
Figura 2	– Relação Temperatura e dureza para os aços carbono.....	19
Figura 3	– Diagrama de fases Fe-C.....	20
Figura 4	– Transformações da estrutura por método de resfriamento.....	21
Figura 5	– O diagrama de transformação contínua durante o resfriamento (TRC) para o aço 1029, austenitizado a 880 °C.....	22
Figura 6	– Ciclo térmico esquemático dos tratamentos de recozimento pleno e normalização superpostos à curva CCT de um aço.....	23
Figura 7	– Microestrutura do tratamento térmico em normalização para o aço SAE 1045	24
Figura 8	– Ciclo Térmico do Recozimento.....	25
Figura 9	– Microestrutura do tratamento térmico de recozimento para o aço SAE 1045	25
Figura 10	– Microestrutura martensítica em ripas de um aço 1045 temperado em água e salmoura a 10%.....	26
Figura 11	– Microestrutura martensítica em placas (lenticular).....	26
Figura 12	– Morfologia da martensita em função do percentual de carbono representado no diagrama Fe-Fe ₃ C.....	27
Figura 13	– Curva de resfriamento de têmpera em água sob agitação.....	28
Figura 14	– (a) Meio do resfriamento por soluções salinas. (b) Curva para resfriamento para soluções de sais.....	28
Figura 15	– Curvas de resfriamento para diversos óleos.....	29
Figura 16	– Curva de magnetização.....	30
Figura 17	– Fluxograma do procedimento experimental.....	32
Figura 18	– a) Máquina de Corte; b) Amostra cortada com comprimento de 35 mm c) Amostra com dimensão final de 30 mm.....	33
Figura 19	– Preparação das amostras para o tratamento térmico.....	34
Figura 20	– Realização do tratamento térmico: a) Forno mufla; b) Disposição das amostras no interior do forno e c) Amostras no forno já dentro do recipiente com areia e carvão.....	35
Figura 21	– Óleo mineral.....	36

Figura 22 – Configuração Experimental: (1) Gerador; (2) Bancada de testes; (3) Placa de aquisição.....	37
Figura 23 – Durômetro.....	38
Figura 24 – Microscópio Zeiss/Axiotech.....	39
Figura 25 – Microdurômetro.....	39
Figura 26 – Microscopia óptica da microestrutura do aço carbono 1030 ampliada em 500x. Amostras: a) T0: Como recebido; b) T1: Recozimento; Ataque Nital 2%.....	40
Figura 27 – Microscopia óptica da microestrutura do aço carbono 1030 tratada termicamente por normalização ampliada em 500x.....	41
Figura 28 – Microscopia óptica da microestrutura do aço carbono 1030 ampliada em 500x. Amostras: a) T3: Têmpera em óleo; b) T4: Têmpera em água; c) T5: Têmpera em salmoura. Ataque Nital 2%.....	42
Figura 29 – Microscopia Óptica do Aço carbono AISI 1030 em têmpera em salmoura, com aumento de 500x. a) Centro da amostra; b) Borda da amostra.....	42
Figura 30 – a) Dureza em Rockwell C; b) Microdureza Vickers.....	44
Figura 31 – Medidas de dureza Rockwell C e microdureza para diâmetros diferentes do aço carbono 1030.....	46
Figura 32 – Análise magnética dos aços carbono AISI 1030 por sensor Hall.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química em peso de carbono (%).....	19
Tabela 2 – Composição química em peso (%).....	32
Tabela 3 – Informações dos tratamentos térmicos.....	36
Tabela 4 – Propriedades físico química do óleo de têmpera.....	36
Tabela 5 – Tamanho de grãos médios para as amostras de aço carbono AISI 1030.....	43
Tabela 6 – Dureza e microdureza para as amostras tratadas termicamente de aço carbono AISI 1030.....	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Medidas de dureza Rockwell C para diâmetros diversos em áreas diferentes do aço carbono 1030.....	21
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute)</i>
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CCT	<i>Continuous Cooling Transformation</i>
CFC	Cúbica de Face Centrado
ddp	Diferença de Potencial
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
TRC	Transformação com Resfriamento Contínuo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos gerais	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Aço carbono	17
2.1.1	<i>Aço carbono AISI 1030</i>	18
2.2	Tratamentos térmicos	19
2.2.1	<i>Austenitização</i>	16
2.2.2	<i>Normalização</i>	23
2.2.3	<i>Recozimento pleno</i>	24
2.2.4	<i>Têmpera</i>	25
2.2.4.1	<i>Têmpera em água</i>	27
2.2.4.2	<i>Têmpera em salmoura</i>	28
2.2.4.3	<i>Têmpera em óleo</i>	29
2.3	Ensaio magnético	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	Materiais	32
3.2	Preparação dos corpos de prova	33
3.3	Tratamentos térmicos	34
3.4	Ensaio magnético	37
3.5	Ensaio de dureza	37
3.6	Preparação metalográfica	38
3.7	Microscopia óptica	38
3.8	Ensaio de microdureza	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1	Caracterizações microestruturais	40
4.2	Tamanho dos grãos	43
4.3	Dureza e microdureza	43
4.4	Ensaio magnético por sensor Hall	46
5	CONCLUSÃO	49

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	50
REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o aço carbono emergiu como o metal predominante em uma ampla gama de setores de produção, graças às suas notáveis propriedades mecânicas. Paralelamente, observou-se significativo avanço na produção de novas ligas ferrosas e não ferrosas, bem como no desenvolvimento de materiais compostos inovadores. (Terzi; Mainier, 2008 *apud* Zortéa, 2020).

De acordo com Nogueira (2002 *apud* Zortéa, 2020) os aços são bastante utilizáveis na engenharia e indústria, dada sua adequação geral às demandas mecânicas e suas características elétricas ou magnéticas. Contudo, os aços carbono têm limitações, especialmente em termos de resistência à corrosão, ao calor e ao desgaste. Os aços carbono possuem em suas propriedades o ferro e carbono, além disto, contém certa quantidade de outros elementos como o manganês, enxofre e fósforo, e podem ter pequenas quantidades de silício, alumínio e cobre.

Os aços carbono são notáveis pela sua versatilidade e a capacidade de terem suas microestruturas significativamente alteradas. Os tratamentos térmicos são uma das principais técnicas para induzir essas mudanças, dotando o aço de uma variedade de propriedades. Entre elas, estão a alteração na proporção das fases presentes, a habilidade de se tornar mais duro, a variação na dureza e na tenacidade. Para Brito (2017) esses processos térmicos são essenciais para personalizar as propriedades dos aços, permitindo ajustar as características dos aços conforme as necessidades específicas de cada aplicação.

Os tratamentos térmicos são aplicáveis em aços desde baixo carbono até alto carbono, assim como em aços que apresentam elementos de liga e são obrigatoriamente aplicáveis àqueles aços de maior teor de carbono e com elementos de liga antes de serem colocados em serviço (Chiaverini, 1988 *apud* Oliveira, 2014).

O tratamento térmico consiste em aquecer o material até atingir a temperatura de austenitização e, em seguida, promover um resfriamento rápido ou lento. A microestrutura resultante dependerá diretamente da taxa de resfriamento do meio e poderá apresentar fases como perlita, ferrita, bainita ou martensita (Chiaverini, 2005).

Os tratamentos térmicos alteram as microestruturas do material, logo isto influenciará nas propriedades magnéticas, pois segundo Landgraf (2007) a microestrutura dos materiais desempenha um papel importante nas propriedades magnéticas, já que nos domínios magnéticos haverá a influência da distribuição dos tamanhos dos cristais, a orientação cristalográfica dos grãos no interior do material, a presença de fases não magnéticas e a densidade de defeitos cristalinos, como discordâncias introduzidas pela deformação plástica.

Os domínios magnéticos consistem em regiões volumétricas microscópicas onde os momentos magnéticos estão agrupados e alinhados na mesma direção, um fenômeno conhecido como direção de fácil magnetização. No entanto, sob a influência de um campo magnético externo, esses domínios tendem a reorientar-se, alinhando-se com a direção do campo aplicado (ALMEIDA, 2021).

Neste estudo, conduziu-se uma análise microestrutural para examinar as fases formadas após tratamentos térmicos em diferentes métodos de resfriamento. Também se avaliou as mudanças microestruturais, a dureza do material, e como elas se relacionaram com mudanças na capacidade de magnetização do material, utilizando o ensaio magnético com sensor hall.

1.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral deste trabalho consiste em realizar diferentes tratamentos térmicos em aço de médio carbono e analisar as mudanças microestruturais por meio de análise microscópica, ensaio de dureza e ensaio magnético.

E para isto, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- a) Realizar os tratamentos térmicos de recozimento, normalização, têmpera em água, têmpera em salmoura e têmpera em óleo em aço AISI 1030
- b) Caracterizar a microestrutura do aço AISI 1030 por meio de microscopia óptica, ensaio de dureza e microdureza.
- c) Executar a análise magnética com a utilização do sensor Hall.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aços Carbono

O aço carbono é uma categoria de aço que não recebe adição intencional de outros elementos além do carbono. Ele contém apenas os quatro elementos residuais que são naturalmente encontrados nos aços durante o processo de fabricação: manganês, silício, fósforo e enxofre. O aço carbono é uma liga em que o ferro é o componente predominante em termos de peso. Os aços carbono de uso comum possuem teores de carbono variando de 0,008% a 2,06% em peso. O carbono é o elemento de liga mais significativo na liga Ferro-Carbono, e é ele que determina as propriedades e o tipo específico de aço obtido (Souza, 1989 *apud* Oliveira, 2007).

Segundo Simon et al. (2012), o aço é uma liga composta principalmente de ferro e carbono. Sua resistência varia conforme a quantidade de carbono adicionada. Por esse motivo, os aços são classificados de acordo com seus teores de carbono, como mostra na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química em peso de carbono (%).

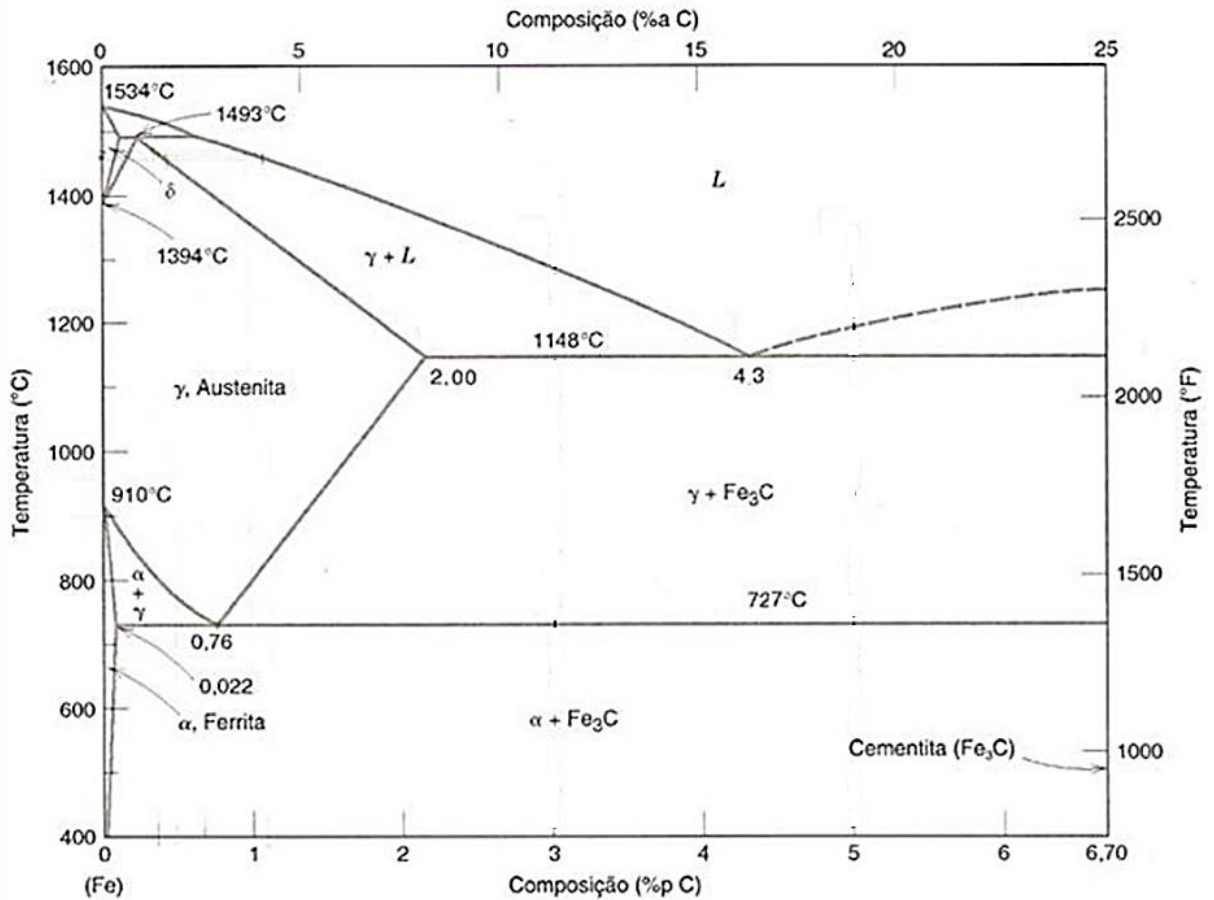
Baixo carbono	Aço doce	Aço médio carbono	Aço de alto carbono
$0,14 \leq$	0,15 – 0,29	0,30 – 0,59	0,60 – 2,06

Fonte: Simon et al. (2012)

As características mecânicas dos aços-carbono são principalmente influenciadas por dois fatores essenciais: composição química e microestrutura. No que concerne à composição química, nos aços em que ocorreu a transformação completa da austenita, o carbono emerge como o elemento predominante nas alterações das propriedades do material. À medida que o teor de carbono aumenta, observa-se uma aprimoração nas propriedades relacionadas à resistência mecânica, incluindo o limite de escoamento, o limite de resistência à tração e a dureza. Contudo, é importante notar que essa adição de carbono também pode ter impactos adversos nas propriedades de ductilidade e tenacidade, tais como o alongamento, a estrangulamento e a resistência ao impacto (Chiaverini, 2003 *apud* Brito, 2017).

Na Figura 1, estão apresentadas as fases em equilíbrio do sistema ferro-carbono e são ferrita (α), austenita (γ), ferro (δ) e cementita (Fe_3C) e consegue-se evidenciar o fundamento no qual se baseia todo o tratamento do aço. Esse diagrama estabelece a composição das regiões de temperatura em que várias fases do aço permanecem estáveis, bem como os limites de equilíbrio entre os diferentes campos de fase (Krauss, 1994 *Apud* Brito, 2017).

Figura 1 – Diagrama Ferro-Carbono.



Fonte: adaptado de Krauss (1994)

2.1.1 Aços Carbono AISI 1030

O aço carbono AISI 1030 é considerado de médio carbono, aplicado em diferentes indústrias o qual vê-se necessidade do aumento da resistência mecânica e para isto é possível tratar termicamente para induzir variedade de características microestruturais.

De acordo com Trefita (2019) cita que o aço AISI 1030 pode ser usado em alavancas, selos e molas, parafusos, pinos e porcas. Na forma de arame é utilizado na fabricação de pregos com haste com alta resistência e temperados.

A morfologia do tamanho do cristal se altera ao decorrer que passa por aquecimento e resfriamento, ocorrendo uma mudança na microestrutura (Martinez-Munoz et al, 2022).

Martinez-Munoz et al (2022) afirma que quando o aço de médio carbono é tratado termicamente por recozimento, este reduz a dureza do material, mas quando é feito tratamento por têmpera, estes resultam em uma maior dureza, devido as deformações na microestrutura.

Além disso, a morfologia e o tamanho do cristal se altera ao decorrer que passa por aquecimento e resfriamento, ocorrendo uma mudança significativa na microestrutura.

2.2 Tratamento Térmicos

2.2.1 Austenitização

A austenitização é um processo de tratamento térmico que por meio de aquecimento do aço acima da temperatura crítica promove-se a transformação da matriz existente em estrutura austenítica podendo ser parcial (aquecimento dentro da faixa de transformação) ou completa (aquecimento acima da faixa de transformação).

A austenitização é usada em estudos para melhoria da tenacidade à fratura de aços com alta resistência, pois é um dos métodos que possui o controle microestrutural (Tomita, 1995 *Apud* Castro, 2013).

A Figura 2 ilustra as temperaturas requeridas para a formação de austenita em diferentes tipos de aço, bem como o intervalo de dureza Brinell. A área destacada em vermelho indica a faixa de temperaturas que podem ser empregadas na austenitização do aço carbono AISI 1030 neste estudo.

Figura 2 – Relação Temperatura e dureza para os aços carbono.

Aços carbono ABNT/AISI	Temperatura de austenitização (°C)	Ciclo de* resfriamento de até (°C)	Faixa de dureza (Brinell)
1020	855 — 900	855 700	111 — 149
1025	855 — 900	855 700	111 — 149
1030	840 — 885	840 650	126 — 197
1035	840 — 885	840 650	137 — 207
1040	790 — 870	790 650	137 — 207
1045	790 — 870	790 650	156 — 217
1050	790 — 870	790 650	156 — 217
1060	790 — 840	790 650	156 — 217
1070	790 — 840	790 650	167 — 229
1080	790 — 840	790 650	167 — 229
1090	790 — 830	790 650	167 — 229
1095	790 — 830	790 650	167 — 229

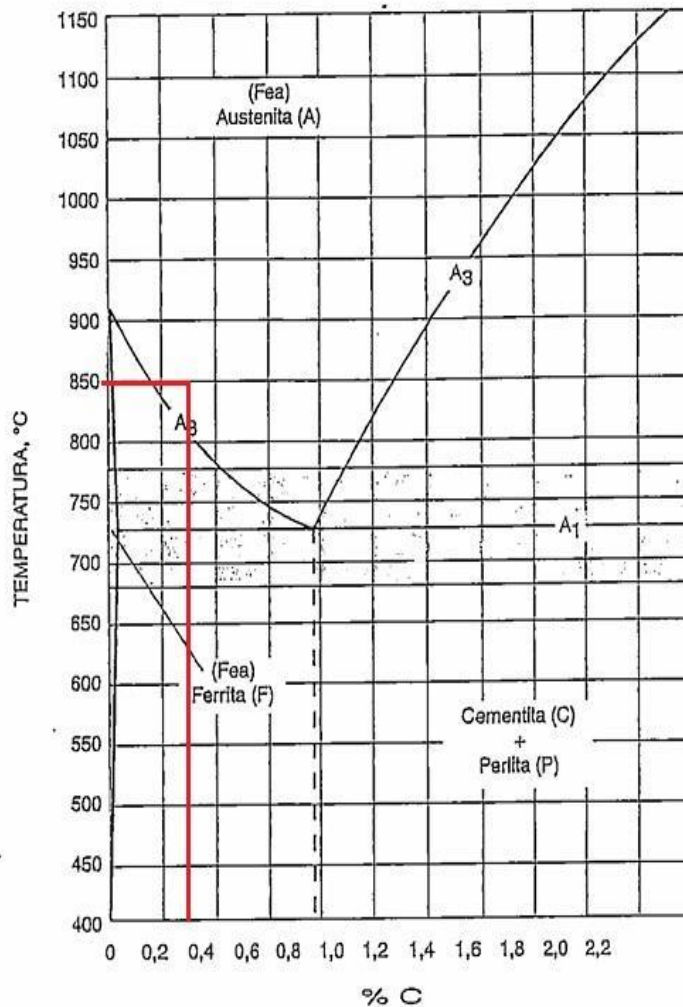
* Resfriamento a 25°C/h, no interior do forno

Fonte: Adaptada (Costa e Silva; Mei, 2010)

O diagrama $Fe-Fe_3C$, Figura 3, permite entender a modificação das estruturas cristalinas em função da variação da temperatura, e as faixas de temperaturas para diferentes

percentuais de carbono. Para um aço carbono com 0,30%pC a estrutura predominante a uma temperatura 850 °C é de austenita.

Figura 3 – Diagrama de fases Fe-C

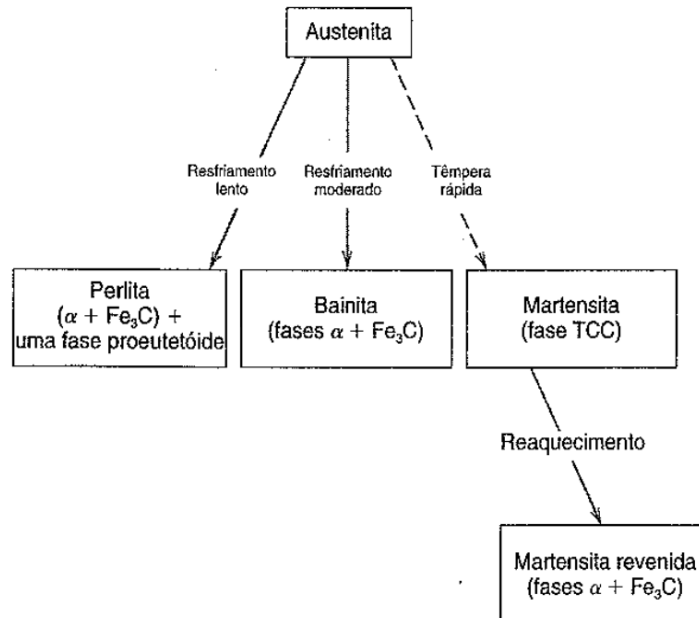


Fonte: Adaptada (Chiaverini, 2005)

Além do diagrama $Fe-Fe_3C$, as ferramentas essenciais para entender as transformações de fase em aços são os diagramas TTT e TRC. O diagrama TTT fornece informações sobre as transformações de fase à medida que a temperatura e o tempo se alteram, permitindo obter microestruturas desejadas. Já o diagrama TRC trata da transformação com resfriamento contínuo de um material, mostrando como a microestrutura irá se alterar quando variamos a taxa de resfriamento.

Na Figura 4 é possível observar que apartir da austenitização, os diferentes tipos de resfriamento causam diferentes alterações nas fases presentes.

Figura 4 – Transformações da estrutura por método de resfriamento



Fonte: Callister (2008)

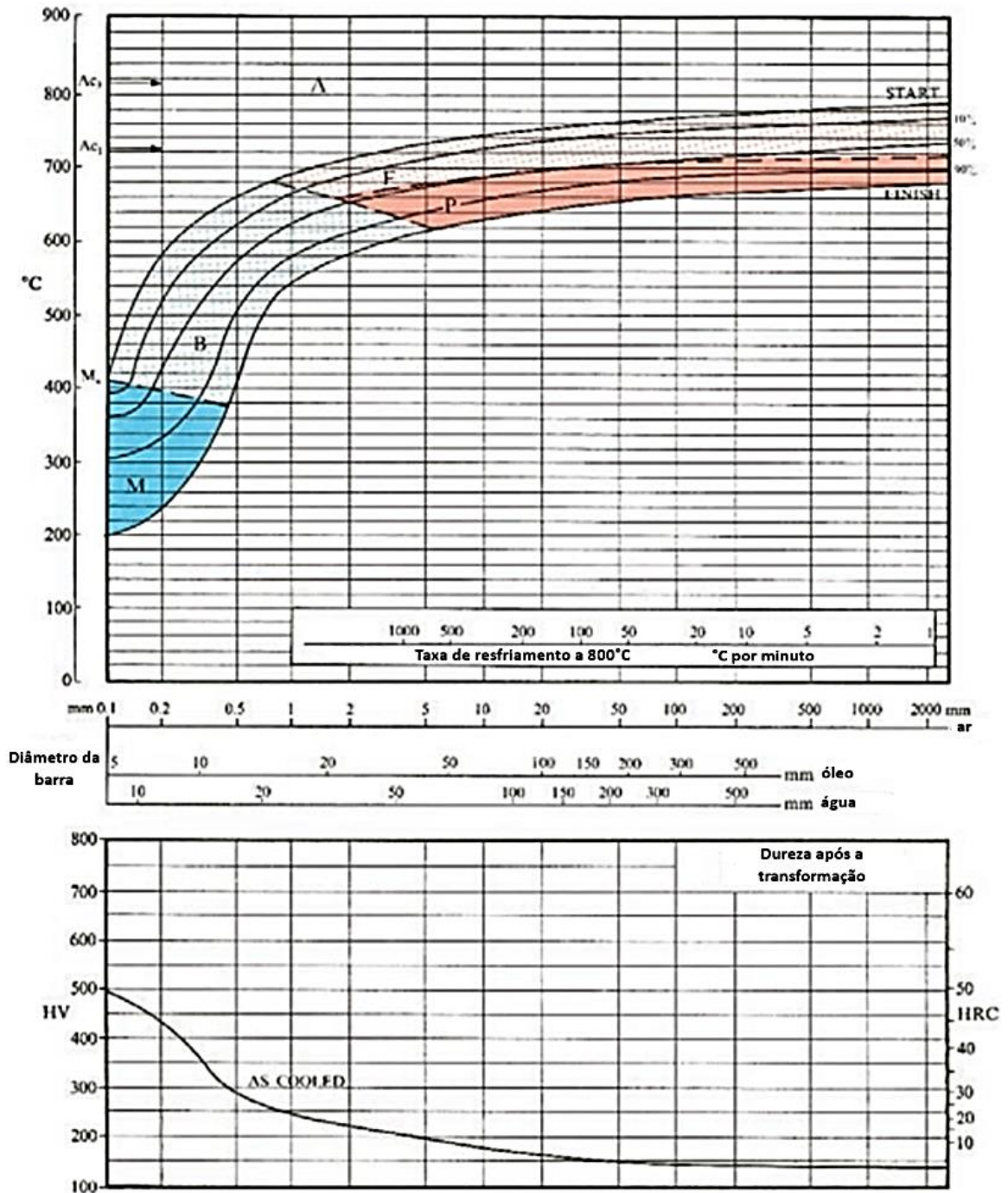
Conforme demonstrado, quando um material é submetido a um tratamento térmico, sua estrutura é alterada, dependendo do método de resfriamento utilizado. Isso, por sua vez, afeta a dureza do material. No Quadro 1, pode-se observar a dureza esperada para têmpera em água. Na Figura 5, analisa os diferentes métodos de resfriamento aplicados a diferentes diâmetros do aço carbono 1030. Sendo assim, é possível analisar os possíveis valores esperados de dureza e microdureza, assim como as suas respectivas fases formadas.

Quadro 1 - Medidas de dureza Rockwell C para diâmetros diversos em áreas diferentes do aço carbono 1030.

Diâmetro da barra redonda		Dureza como temperado no(a) (tempera média: água)		
mm	pol	superfície	meio raio	centro
12.7	0.5	50 HRC	50 HRC	23 HRC
25.4	1	46 HRC	23 HRC	21 HRC
50.8	2	30 HRC	93 HRBW	90 HRBW
101.6	4	97 HRBW	88 HRBW	85 HRBW

Fonte: Adaptado (Bethlehem Steel Company, 1987)

Figura 5 - O diagrama de transformação contínua durante o resfriamento (TRC) para o aço 1030, austenitizado a 880 °C.



Fonte: Adaptado (Atkins, 1980)

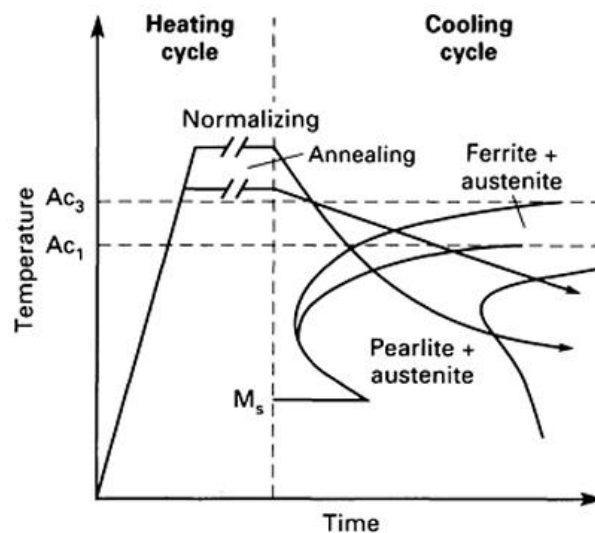
2.2.2 Normalização

A normalização envolve o processo de austenitização total do aço, seguido pelo resfriamento ao ar. Geralmente recomendada para promover a homogeneização da estrutura após a etapa de forjamento e antes do tratamento térmico de têmpera ou revenimento (Costa e Silva; Mei, 2010).

A normalização é o processo térmico recomendado para alcançar uma estrutura uniforme e refinada nos aços, visando melhorar sua resistência e tenacidade. Além disso, em muitos casos, para garantir uma resposta consistente a outros tratamentos térmicos, como a têmpera, é essencial começar com uma estrutura uniforme obtida por meio da normalização. Dessa forma, a normalização pode ser utilizada como um tipo de recozimento para promover a homogeneização da estrutura (Colpaert, 2008).

Na Figura 6, é apresentada a relação entre os ciclos de tempo e temperatura para recozimento e normalização. O ciclo de recozimento, que envolve um resfriamento mais lento, resulta em fases distintas em comparação ao tratamento térmico de normalização. No caso da normalização, a estrutura esperada é composta por perlita e austenita.

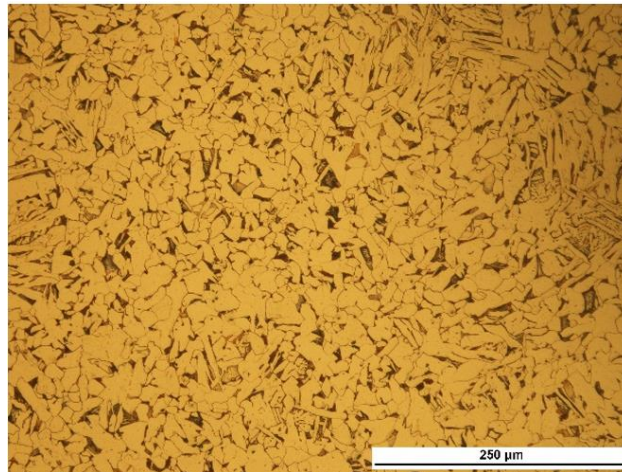
Figura 6 – Ciclo térmico esquemático dos tratamentos de recozimento pleno e normalização superpostos à curva CCT de um aço.



Fonte: ASM Metals Handbook Vol.4 (1991)

Na Figura 7 mostra a microestrutura de um aço tratado termicamente por normalização, logo microestrutura esperada são pequenos grãos mais refinados.

Figura 7 – Microestrutura do tratamento térmico em normalização para o aço SAE 1045.



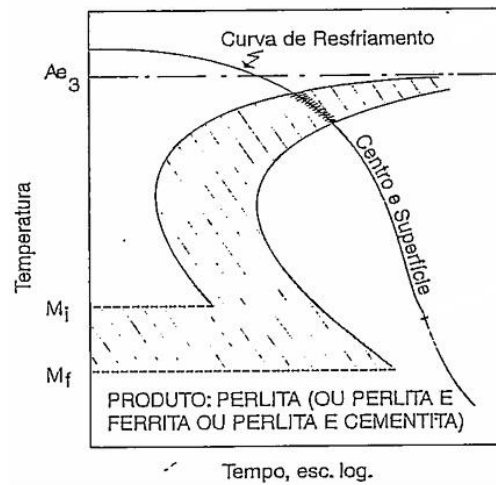
Fonte: Mori et all (2018)

2.2.3 Recozimento Pleno

O recozimento pleno consiste no aquecimento dentro da zona crítica, seguido de resfriamento lento dentro do forno. No entanto, como demonstrado na Figura 6 de acordo com a temperatura utilizada e o método de resfriamento, temos diferentes variações do recozimento, sendo eles: O recozimento Subcrítico que é aplicável quando a temperatura estiver abaixo da temperatura crítica inferior (Ac_1). Usado em aços hipoeutetóides. Recozimento Intercrítico que é obtido quando a temperatura está entre Ac_1 e Ac_3 . Isso ocorre em aços hipereutetóides. Já o recozimento pleno é possível analisar acima da temperatura crítica superior (Ac_3). Para aços hipoeutetóides, essa temperatura fica em torno de 50°C acima de Ac_3 , enquanto para aços hipereutetóides, é cerca de 50°C acima de Ac_1 (Chiaverini, 2005).

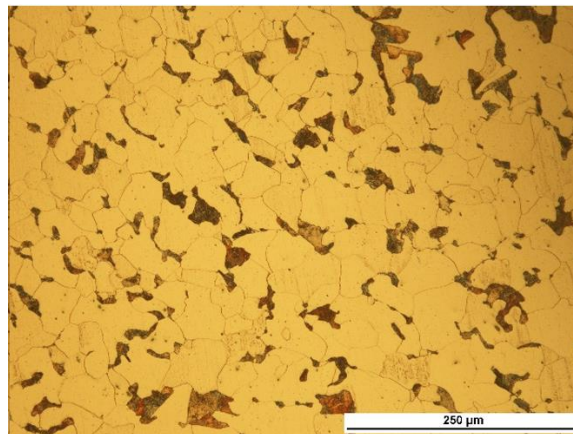
O recozimento é utilizado para o alívio de tensões, eliminar tratamentos térmicos feitos anteriormente e alterar propriedades mecânicas. (Colpaert, 2008). Como é observado na Figura 8, a curva de resfriamento do recozimento é lento, o que ocorre na microestrutura do material é que a migração dos átomos de carbono, formando novas fases, e o nome para este processo é chamado de reação eutetóide, que indica que depois do resfriamento quando o material é aquecido na temperatura de austenitização, é transformado em duas outras fases, a ferrita e cementita, e este processo de transformação é dado quando o aço entra na austenitização a estrutura está em CFC, porém quando o resfriamento cruza a temperatura eutetóide a austenita se decompõem para formar a ferrita, uma estrutura agora CCC. A ferrita se dá a partir de pontos de maior energia, neste caso nos contornos de grão. À medida que a ferrita cresce, o carbono em excesso vai sendo expulso para as regiões adjacentes, dando origem à cementita, como pode-se ver na Figura 9 (Carvalho et al, 2009).

Figura 8 – Ciclo Térmico do Reozimento



Fonte: Chiaverini (2005)

Figura 9 – Microestrutura do tratamento térmico de recozimento para o aço SAE 1045.

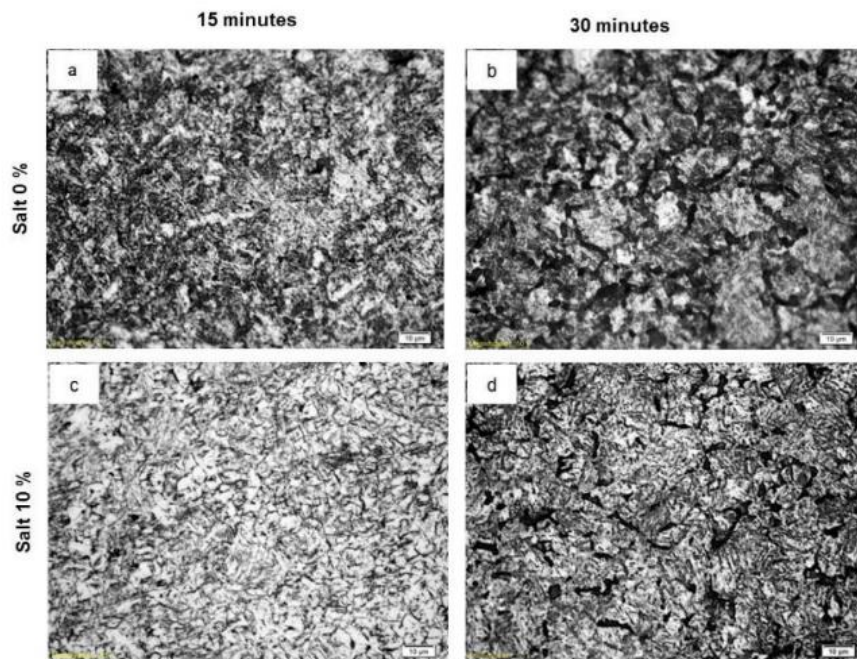


Fonte: Mori et al (2018)

2.2.4 Têmpera

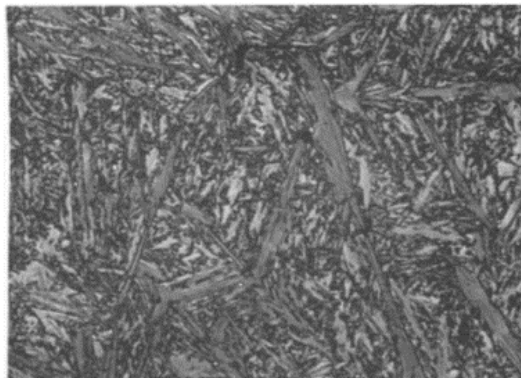
Segundo Castro (2007) a têmpera é caracterizada como um processo de tratamento térmico que envolve o resfriamento rápido do material após sua austenitização, com o intuito de induzir a transformação da austenita em martensita. Dependendo da composição química a martensita pode aparecer na forma de ripas ou placas, conforme as Figuras 10 e 11. Durante o aquecimento para a austenitização do componente a ser temperado, é crucial adotar medidas preventivas: aquecer o material de maneira uniforme; evitar a oxidação, a decarbonetação e a deformação da peça.

Figura 10 – Microestrutura martensítica em ripas de um aço 1045 temperado em água e salmoura a 10%.



Fonte: Basori (2019)

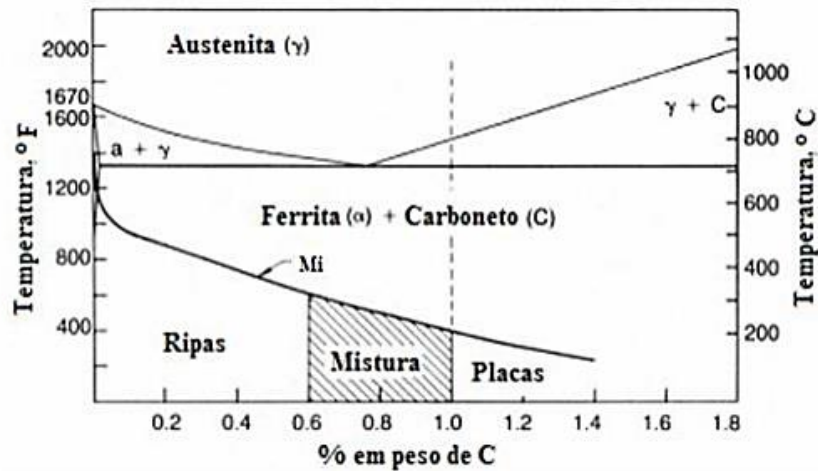
Figura 11 – Microestrutura martensítica em placas (lenticular)



Fonte: Bramfitt, (1997)

De acordo com Krauss e Grossman (1980 *apud* Santos, 2021) para aços com teores de carbono entre 0,2 a 0,6%pC a formação de martensita em ripas é favorecida, enquanto para teores entre 1,0 a 1,4%pC espera-se a presença de martensita lenticular, ou seja, formando placas na microestrutura do material. No intervalo ente 0,6 a 1,0%pC há uma mistura de martensita em ripa com lenticular. A morfologia em função do percentual de martensita é apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Morfologia da martensita em função do percentual de carbono representado no diagrama Fe-Fe₃C.



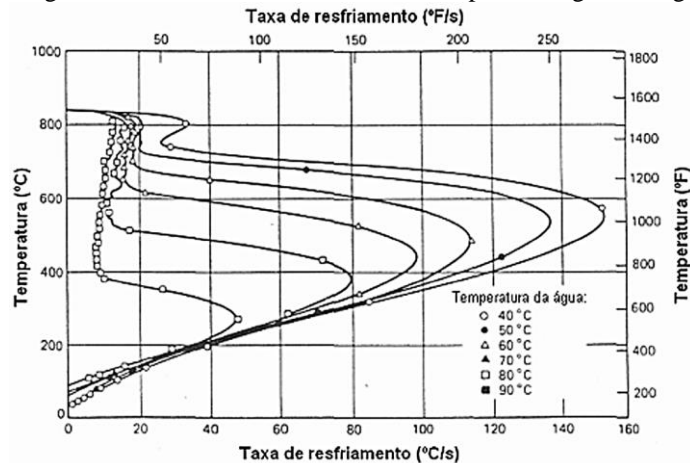
Fonte: Krauss e Grossmann (1980, adaptado por Santos,2021)

2.2.4.1 Têmpera em água

No processo de resfriamento em água é bastante utilizado pelo seu baixo custo, alta disponibilidade e por não apresentar características inflamáveis ou tóxicas. Entretanto, a capacidade de resfriamento da água diminui rapidamente devido ao aumento da temperatura. Como é visto na Figura 13, pode ser aplicada a uma agitação na água com intuito de aumentar a velocidade de resfriamento, permitindo o contato direto da água com a superfície do material, induz o aumento da taxa de resfriamento (Bashford; Mills, 1984 *apud* Sousa, 2007).

Chiaverini (2005) complementa que para este meio de resfriamento é obtido martensítica conjuntamente com ferrita e assim uma elevada dureza, porém em menor número comparado a têmpera em salmoura.

Figura 13 – Curva de resfriamento de têmpera em água sob agitação

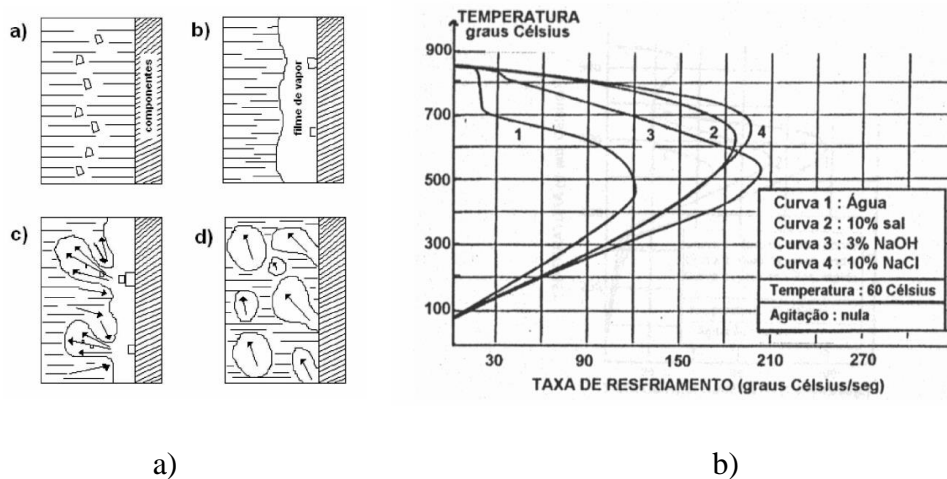


Fonte: Totten et al. (1993 adaptado por Sousa, 2007)

2.2.4.2 Têmpera em salmoura

As têmperas em salmoura são soluções de cloreto de sódio e água onde possui velocidade de resfriamento maior do que apenas em água mesmo em que esteja em certo grau de agitação. Porém ele é mais agressivo comparado aos outros métodos de resfriamentos. Como pode-se ver na Figura 14a, durante o resfriamento, pequenos cristais de sal após depositados na superfície do material são fragmentados violentamente, rompendo o filme vapor, o que resultou em um resfriamento mais rápido (Totten et al., 1993 *apud* Sousa, 2007). Chiaverini (2005) cita que velocidade de resfriamento ultrapassa a velocidade crítica, e como mostra a Figura 14b, a influência das soluções salinas aumenta a taxa de resfriamento, e assim produz uma superfície inteiramente martensítica, portanto, a máxima dureza do material.

Figura 14 – (a) Meio do resfriamento por soluções salinas. (b) Curva para resfriamento para soluções de sais.



Fonte: Canalle et al. (1995 adaptado por Sousa, 2007)

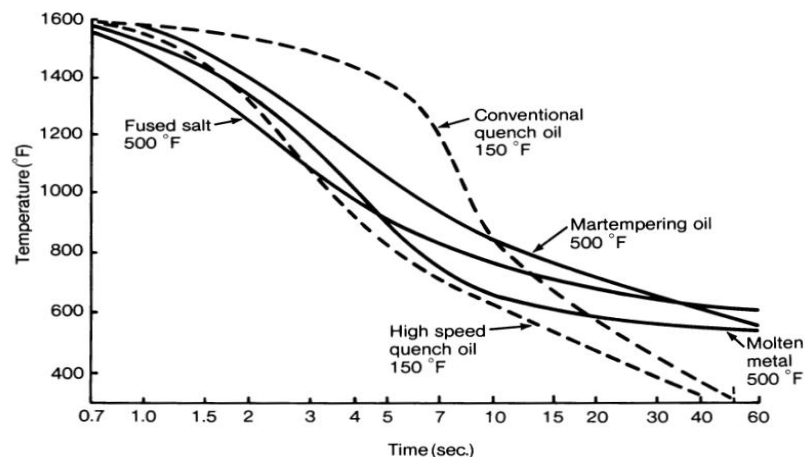
2.2.4.3 Têmpera em óleo

O método de resfriamento em óleo consiste em mergulhar o material em óleo. Esse método é utilizado para resfriamento e é mais moderado do que a imersão em água ou salmoura. A eficácia desse método se deve à diminuição do gradiente de temperatura entre a superfície e o centro do material. Por ser menos agressivo, o resfriamento em óleo é amplamente empregado (Sousa, 2007).

Chiaverini (2005) afirma que, no processo de resfriamento, o centro da peça se transforma parcialmente em martensítica, logo pode conter grande quantidade de austenita.

A Figura 15 mostra a influência de resfriamento para alguns óleos, e assim gerando curvas de resfriamento diferentes, isto se deve a pontos importantes na escolha do óleo, precisando considerar, o seu ponto de fulgor, viscosidade, densidade e acidez.

Figura 15 – Curvas de resfriamento para diversos óleos.



Fonte: Totten et all. (1993)

2.3 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)

Edwin Herbert Hall (1855–1938) desenvolveu um princípio físico que fundamenta o funcionamento de um ensaio magnético por sensores, que conhecidamente ficou chamado de efeito Hall que opera com uma corrente elétrica que atravessa um material condutor sob a ação de um campo magnético. Esse campo induz uma polarização no material, resultando em uma diferença de potencial. Conhecendo as dimensões geométricas do condutor, a corrente que o

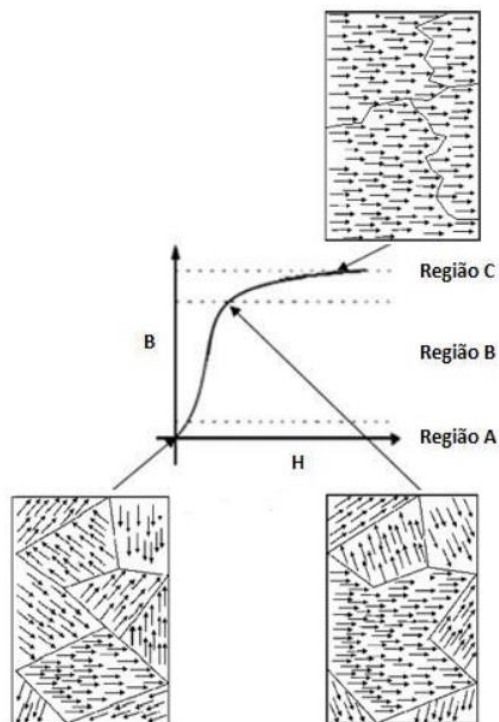
percorre e medindo a ddp gerada perpendicularmente ao fluxo de carga, é possível determinar o campo magnético (Soares et al, 2023).

A diferença de potencial gerada pelo acúmulo de cargas pode ser utilizada em um circuito externo para fins de sensoriamento. Isso ocorre porque a tensão criada é diretamente proporcional à intensidade do campo magnético. Em outras palavras, a variação da tensão elétrica pode ser medida e relacionada à presença ou força do campo magnético (Goularte, 2020).

Os domínios magnéticos são áreas onde os momentos magnéticos são direcionados e alinhados. Em um material ferromagnético inicialmente desmagnetizado, a aplicação de um campo magnético externo induz o crescimento dos domínios, impulsionado pelo movimento das suas fronteiras (Pinho, 2009 *apud* Silva, 2019).

Na Figura 16 mostra que acontece quando é aplicada uma intensidade de campo magnético externo.

Figura 16 – Curva de magnetização



Fonte: Silva (2019)

A curva de magnetização é composta por três zonas distintas e é representada por (H), que indica a intensidade do campo magnético aplicado, e (B), que denota a densidade de fluxo magnético. Na região A, temos o fenômeno de deslocamento reversível das paredes dos

domínios magnéticos, onde uma baixa intensidade de campo magnético não altera a orientação aleatória dos domínios. Esta é a zona de reversibilidade. Já na região B, ocorre a irreversibilidade do movimento das paredes dos domínios: os domínios começam a se alinhar com o campo magnético aplicado. Com o aumento da intensidade do campo, os domínios alinhados crescem, enquanto os desalinhados reduzem ou desaparecem. No término desta zona, os domínios estão alinhados conforme a direção de fácil magnetização do material. Na região C, os domínios são forçados a girar e ficar alinhados com a direção do campo magnético externo aplicado (Andrade, 2016 *apud* Silva, 2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Material

O material utilizado no trabalho foi uma barra redonda de aço carbono AISI 1030 com diâmetro de 25mm e comprimento de 180mm cedida pelo Laboratório de Tratamento Térmico (LTT) da UFPB para a extração das amostras para o tratamento térmico. Na Tabela 2 estão os dados da composição do aço utilizado como referência neste trabalho.

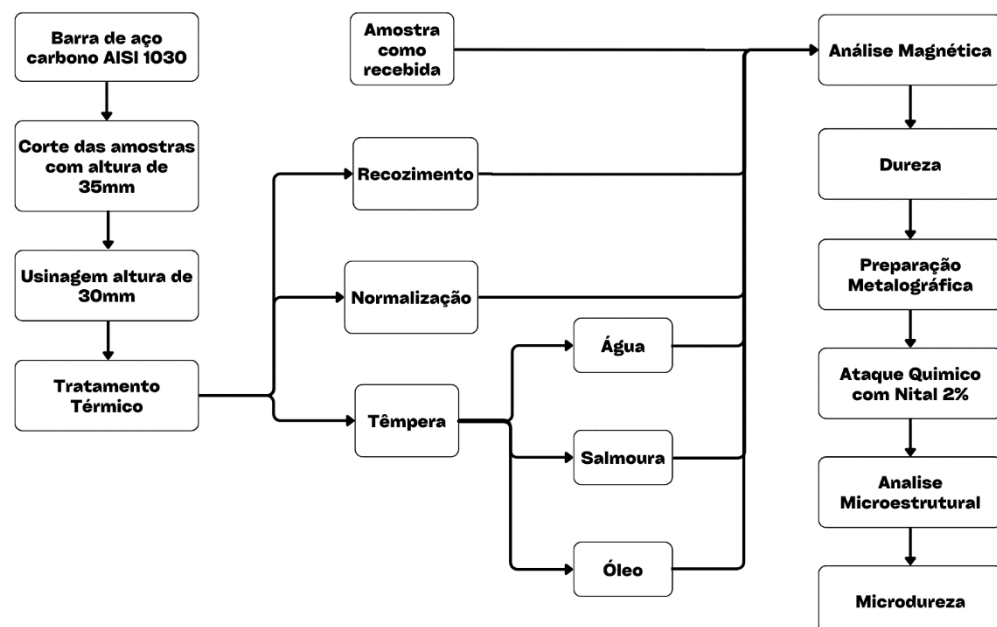
Tabela 2 – Composição química em peso (%).

C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	$M_{O_{wt}}$
0,33	0,017	0,066	0,035	0,013	2,46	0,64	0,48

Fonte: Martinez-Munoz et al. (2022)

Na Figura 17 as etapas do método utilizado neste trabalho estão representadas no fluxograma.

Figura 17 – Fluxograma do procedimento experimental

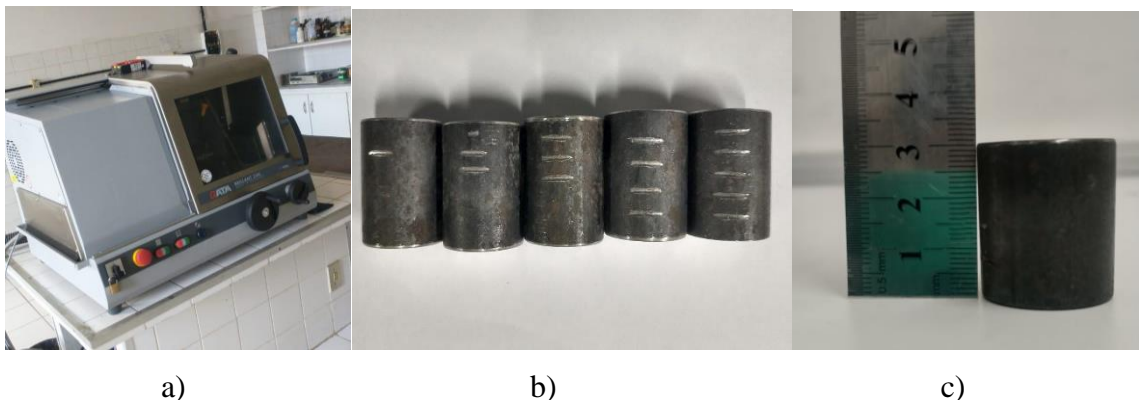


Fonte: Autor (2024)

3.2 Preparação dos corpos de prova

Para a realização dos tratamentos térmicos foram extraídas 05 (cinco) amostras da barra de aço AISI 1030, Figura 18b, com altura de 35 mm, utilizando a máquina de corte de bancada BRILLANT 230, Figura 18a, localizada no Laboratório de Solidificação Rápida (LSR). Posteriormente, as amostras cortadas foram usinadas em um torno mecânico, que se encontra no Laboratório de Oficina Mecânica (LOM), com o objetivo de obter uma altura de 30 mm, como demonstrada na Figura 18c. Essa redução de tamanho foi definida como a dimensão ideal para conduzir a análise magnética adequada para a leitura do sensor Hall.

Figura 18– a) Máquina de Corte; b) Amostra cortada com comprimento de 35 mm; c) Amostra com dimensão final de 30 mm.



Fonte: Autor (2024)

As 05 (cinco) amostras cortadas e usinadas foram divididas e identificadas por meio de marcações, ranhuras em forma de traço, que permitem distinguir o tratamento térmico aplicado na amostra. As marcações foram feitas na seguinte sequência: 01 Traço: recozimento; 2 Traços – Normalizado; 3 Traços – Têmpera em óleo; 4 Traços – Têmpera em água; 5 Traços – Têmpera em salmoura.

Para análise comparativa foi separada uma amostra “como recebida”; esta amostra foi cedida pelo LTT. As amostras foram nomeadas da seguinte forma: T0: Como Recebida; T1: Recozido; T2 – Normalizado; T3 – Têmpera em óleo; T4 – Têmpera em Água; T5 – Têmpera em Salmoura, totalizando 06 (seis) amostras para serem utilizadas neste trabalho.

Não havia um histórico de tratamento térmico anterior na amostra T0, de modo que optou-se por não utilizá-la nos ensaio de dureza e ensaio magnético.

3.3 Tratamento térmicos

Para preparar as amostras para o tratamento térmico, elas foram amarradas a um arame de aço e inseridas em um recipiente contendo areia e carvão. A areia serve como material refratário, enquanto o carvão previne a descarbonetação do material. Essa configuração pode ser visualizada na Figura 19.

Figura 19 – Preparação das amostras para o tratamento térmico.



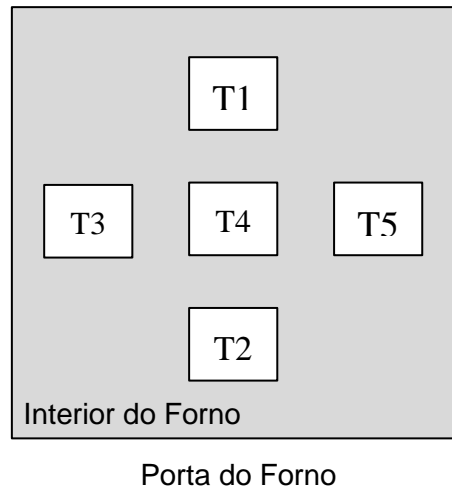
Fonte: Autor (2024)

Todas as amostras foram preparadas conforme a Figura 19, e foram colocadas no forno mufla da marca *Pyro* localizada no laboratório LTT da UFPB, Figura 20a. A temperatura de austenitização utilizada nas amostras foi de 850°C. O tempo de encharque adotado foi de 30 minutos de acordo como recomendado pela *ASM Metals Handbook Vol.4* (1991). Contudo, existe a literatura de Atkins (1980) e *Bethlehem Steel Company* (1987) onde a austenitização é proporcional ao diâmetro da barra. As amostras foram arranjadas no interior do forno de acordo com a sequência de resfriamento por tratamento térmico, conforme a figura 20b e 20c .

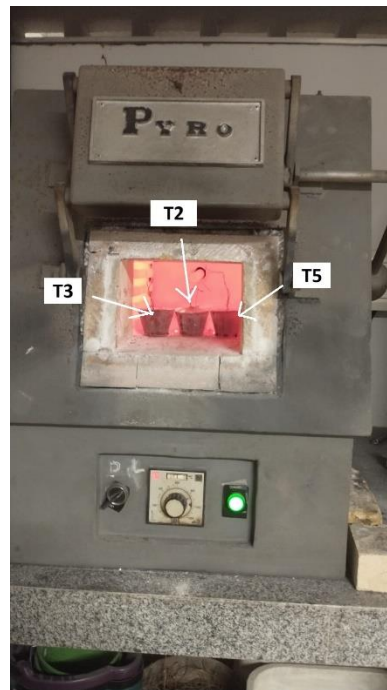
Figura 20 – Realização do tratamento térmico: a) Forno mufla; b) Disposição das amostras no interior do forno e c) Amostras no forno já dentro do recipiente com areia e carvão.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor (2024)

Cada amostra foi retirada e submetida ao método de resfriamento apropriado. A única exceção foi uma amostra destinada ao tratamento térmico por recozimento; nesse caso, o forno foi desligado, permitindo que a amostra resfriasse gradualmente no interior do forno.

Os tratamentos térmicos utilizados neste trabalho tiveram como parâmetros como está destacado na Tabela 3.

Tabela 3 – Informações dos tratamentos térmicos.

Amostras	Tratamento Térmico	Temperatura de Austenitização(°C)	Tempo (min)	Meio de Resfriamento
T1	Recozimento Pleno	850	30	Dentro do forno
T2	Normalização	850	30	Ao ar
T3	Têmpera em Óleo	850	30	Em óleo mineral de têmpera (Figura 21)
T4	Têmpera em Água	850	30	água sem aditivos, sob agitação moderada
T5	Têmpera em Salmoura	850	30	Solução aquosa de NaCl à 10%

Fonte: Autor (2024)

Para a têmpera em óleo foi usado um óleo mineral na Figura 18, com as respectivas propriedades físico-químicas descritas na Tabela 4.

Figura 21 – Óleo mineral



Tabela 4 – Propriedades físico-química do óleo de têmpera.

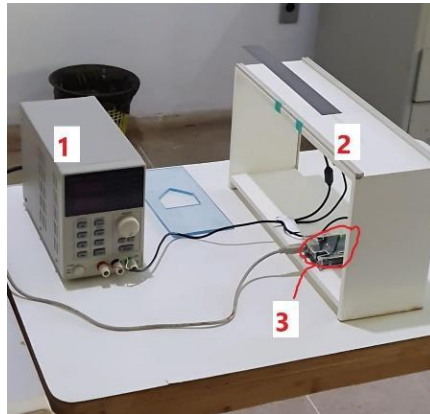
Propriedade	Valor
Densidade	0,875 g/cm ³
Ponto de Fulgor	180 °C
Viscosidade Cinemática	32
Cor visual	Amarelo
Aparência Visual	Líquido límpido

Fonte: Cuteleiro (2024)

3.4 Ensaio magnético

O equipamento utilizado para os ensaios magnéticos foi desenvolvido no LTT da UFPB, a bancada é constituída de um módulo de emissão e outro de aquisição. A configuração experimental utilizada está mostrada na Figura 22.

Figura 22 - Configuração Experimental: (1) Gerador; (2) Bancada de testes; (3) Placa de aquisição.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Inicialmente para calcular o campo magnético, as extremidades das amostras foram lixadas com lixas de carvão de silício (SiC) de 180 e 300 *Mesh*. Esse procedimento foi realizado após o tratamento térmico e também nas amostras 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 de 2V, onde segundo Soares et al (2023) descreve seu funcionamento 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

Mediu-se a dureza para as respectivas amostras por meio de dureza Rockwell C, utilizando o durômetro da marca Digimess do Laboratório de Tratamento Térmico (LTT) da UFPB, Figura 23, seguindo os procedimentos de acordo com a norma ABNT NBR ISO 6508-1:2019. Foram realizadas 03 (três) medidas de dureza em cada amostra. A força aplicada durante o ensaio foi de 150 kgf.

Figura 23 – Durômetro



Fonte: Autor (2024)

3.6 Preparação metalográfica

Para a análise metalográfica das superfícies das amostras foram utilizadas lixas de carbeto de silício de 180, 320, 600 e 1200 *Mesh*. Após este procedimento foi feito o polimento das amostras com pasta diamante de 6, 3 e 1 μm .

Para a revelação dos grãos foi usado um ataque químico com Nital 2%, com um tempo de 15 segundos em cada amostra.

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 24.

Figura 24 - Microscópio Zeiss/Axiotech



Fonte: Autor (2024)

Foi empregado o microscópio óptico para examinar as áreas de todas as amostras, e com isto foram analisadas as diferentes formas de grãos e quantidade de grãos para as amostras que passaram pelos tratamentos térmicos e a amostra como recebida.

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 25 - Microdurômetro.



Fonte: Autor (2024)

A força de penetração aplicada foi de 4,903 N ou 0,5 HV, com um tempo estimado de cada indentação de 15 segundos, contemplando 5 pontos em cada amostra.

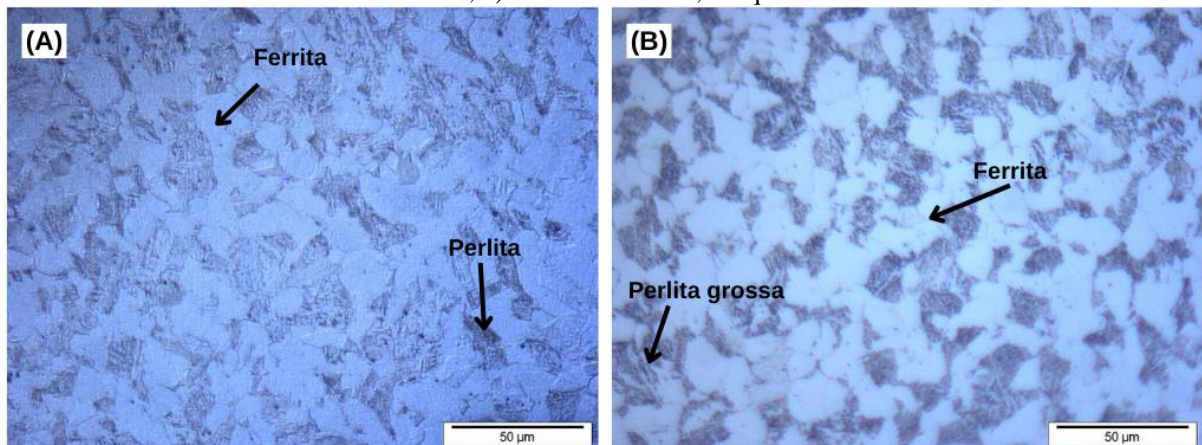
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterizações microestruturais

As micrografias com a descrição das fases presentes nas amostras estudadas estão apresentadas na Figura 26. Na Figura 26a que é representado pela amostra como recebido, é possível ver a presença de ferrita (fase clara) e perlita (fase escura).

Com o processo de recozimento pleno, Figura 26b, a amostra revelou uma microestrutura grosseira constituída por ferrita e perlita. Devido a característica do resfriamento lento dentro do forno essa microestrutura apresentou tamanho de grão maior que a amostra T0, devido ao processo de difusão que permitiu o crescimento da ferrita, além da presença de perlita grossa.

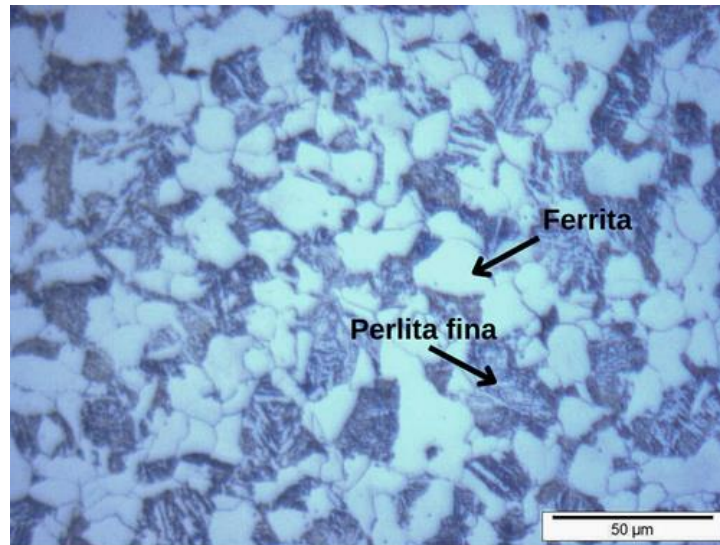
Figura 26 – Microscopia óptica da microestrutura do aço carbono 1030 ampliada em 500x. Amostras: a) T0: Como recebido; b) T1: Recozimento; Ataque Nital 2%.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Na Figura 27 mostra a presença de grãos mais refinados quando é comparado com as imagens das amostras T0 e T1. Isto acontece devido a taxa de resfriamento ao ar ser maior que a taxa de resfriamento no interior do forno, resultando em uma microestrutura com granulação mais fina, formando ferrita (Fe- α) e perlita fina.

Figura 27 – Microscopia óptica da microestrutura do aço carbono 1030 tratada termicamente por normalização ampliada em 500x.



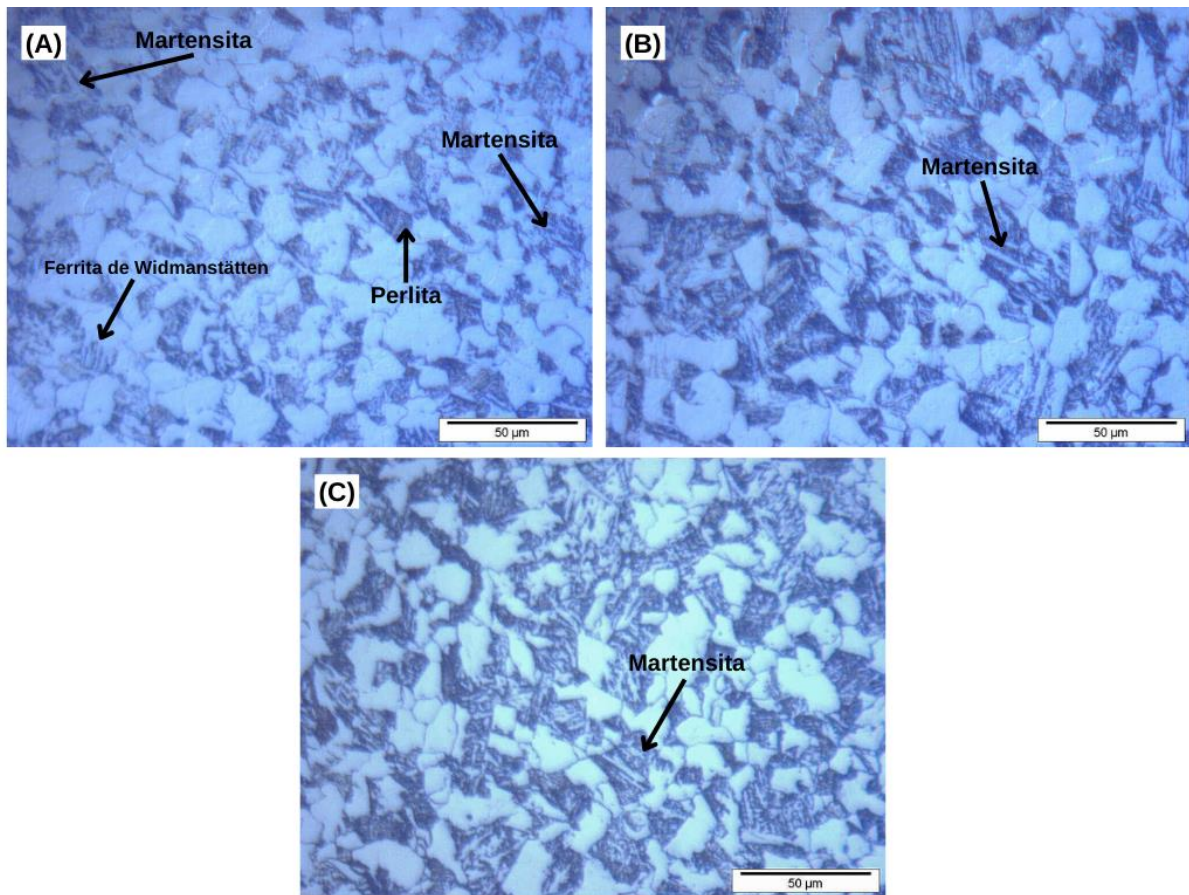
Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Na amostra T3, temperada em óleo, Figura 28a, o resfriamento é rápido, porém menos agressivo em comparação com a têmpera em água ou salmoura. Nesse processo, é esperada a formação de martensita devido ao resfriamento brusco, que impede a criação de outras fases cristalinas mais estáveis. Foi possível observar a presença da microestrutura da martensita, da perlita fina e da ferrita *Widmanstätten*.

A micrografia da amostra T4, Figura 28b, revela que o procedimento de têmpera em água resultou em microestruturas martensíticas em maior quantidade, comparado a amostra T3, visto que a têmpera em óleo apresentou menor quantidade dessas estruturas. Isso ocorre porque o resfriamento em água é mais severo e rápido, favorecendo a formação da martensita. As agulhas da martensita ficaram mais evidentes.

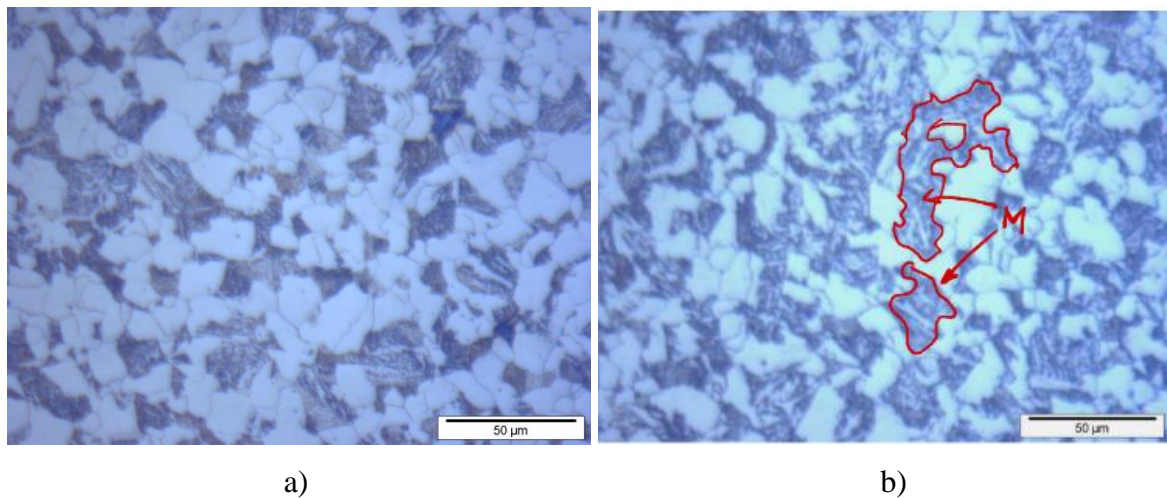
Em comparação com a têmpera em água e óleo, o tratamento térmico em salmoura, amostra T5, resultou em uma microestrutura mais refinada, com maior quantidade de agulhas martensíticas, como mostrado na Figura 28c. De maneira mais detalhada, buscou-se verificar a formação da microestrutura martensítica sobre a superfície da amostra, realizando a microscopia óptica próxima à borda da amostra e no centro, Figura 29. No centro da amostra, há menor presença de martensita, enquanto nas bordas já se observou uma maior fração de martensita em forma de ripas destacadas em vermelho. Essa diferença ocorre devido à taxa de resfriamento mais elevada nas bordas em comparação com o centro.

Figura 28 – Microscopia óptica da microestrutura do aço carbono 1030 ampliada em 500x. Amostras: a) T3: Têmpera em óleo; b) T4: Têmpera em água; c) T5: Têmpera em salmoura. Ataque Nital 2%.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Figura 29 - Microscopia Óptica do Aço carbono AISI 1030 em têmpera em salmoura, com aumento de 500x. a) Centro da amostra; b) Borda da amostra



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

4.2 Tamanho dos grãos

Com base na Tabela 5, é possível observar o tamanho de grão médio para cada amostra. Esses resultados apresentam uma correlação com os gráficos de dureza e microdureza. Conforme o tamanho de grão diminui, a dureza tende a aumentar, o que era esperado.

Tabela 5 – Tamanho de grãos para as amostras de aço carbono AISI 1030.

Amostras	Tamanho do grão médio (μm)
T0	7,93
T1	10,73
T2	9,01
T3	8,12
T4	7,24
T5	7,07

Fonte: Autor (2024)

4.3 Dureza e microdureza

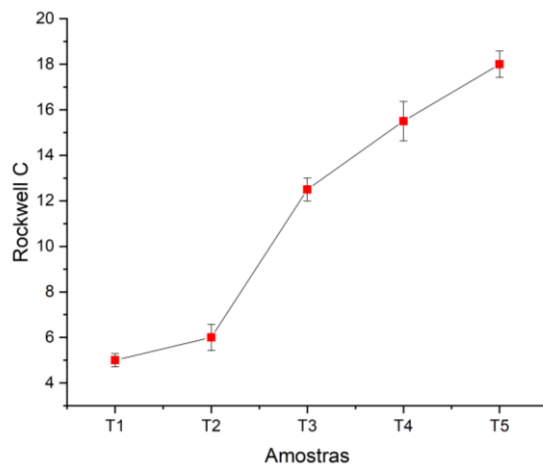
A Tabela 5 mostra os valores adquiridos nos ensaios de dureza Rockwell e microdureza Vickers, assim como a Figura 30 os respectivos gráficos em função das amostras tratadas termicamente.

Tabela 6 – Dureza e microdureza para as amostras tratadas termicamente de aço carbono AISI 1030.

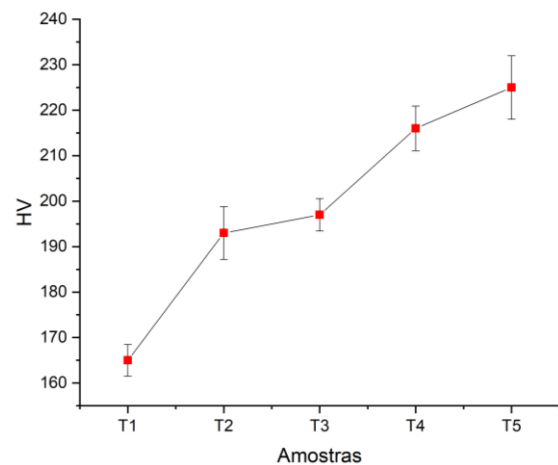
Tratamentos Térmicos	Rockwell C	Desvio Padrão	Microdureza Vickers	Desvio Padrão
T1	5	0,289	165	3,500
T2	6	0,577	193	6,686
T3	12,5	0,500	197	3,564
T4	15,5	0,866	216	4,919
T5	18	0,577	225	6,986

Fonte: Autor (2024)

Figura 30 - a) Dureza em Rockwell C; b) Microdureza Vickers



b)



b)

Fonte: Autor (2024)

Os resultados do tratamento térmico de recozimento pleno obtiveram 5 HRC. Isso ocorre devido ao resfriamento lento dentro do forno, que preserva grande parte da microestrutura na fase de austenita. Durante esse processo, a austenita se transforma em ferrita e perlita. Na amostra T1 a perlita apresenta um espaçamento interlamelar maior que a T2, enquanto a ferrita assume uma forma equiaxial, com grãos relativamente grosseiros e em grande quantidade. Essas mudanças resultam em diminuição da dureza e resistência e, ao mesmo tempo, aumento da ductilidade do material.

Para a amostra T2, aço normalizado, houve um pequeno aumento na dureza. Esse aumento é resultante do resfriamento ao ar, o que produz um refinamento no grão, menor

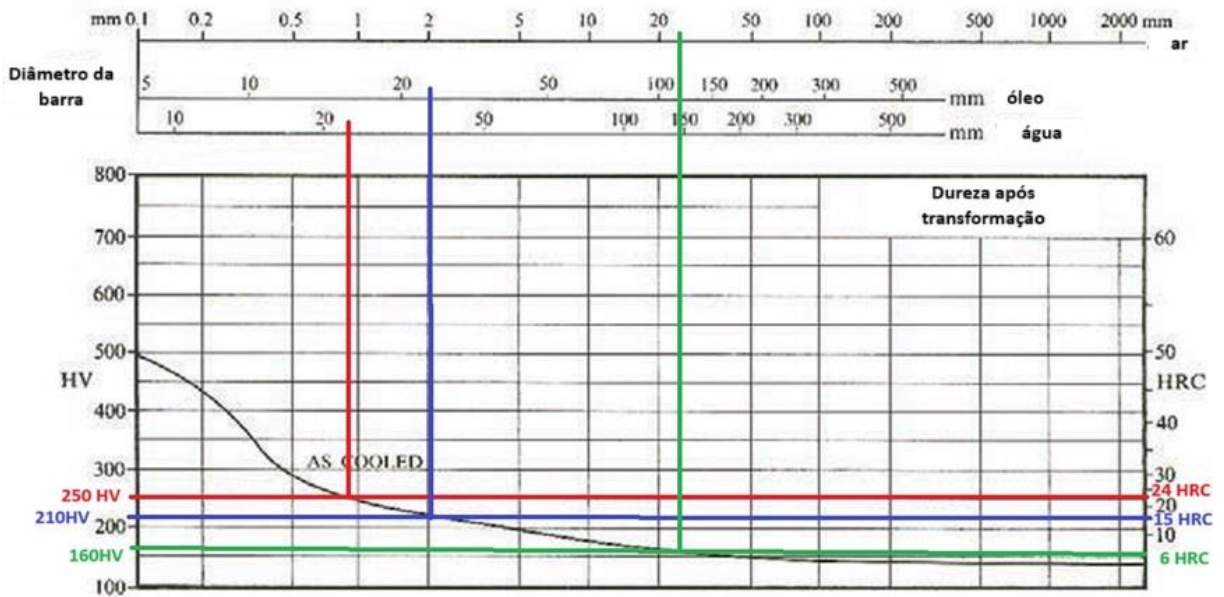
tamanho de grão. É esperado que haja uma menor quantidade de ferrita e maior quantidade de perlita. A perlita, com seu espaçamento interlamelar reduzido, torna-se mais dura do que o estado recozido.

Em relação às têmperas que passam por um resfriamento rápido, os átomos de carbono permanecem dentro da estrutura cristalina dos átomos de ferro antes que possam se dissipar para fora. Isso resulta em uma ligeira distorção do grão, formando a martensita. Essa tensão interna é responsável pelo aumento da dureza. Observou-se que, na amostra T3, temperada em óleo, a dureza da amostra dobrou quando comparada com a amostra T2. Embora a amostra T3 tenha apresentado uma pequena presença de grupos de martensita e abundante presença de austenita, esta foi suficiente para aumentar a dureza do material.

Na amostra T4, temperada em água, houve formação de martensita com formato ligeiramente alongado e fino, resultando em maior dureza, comparado à amostra T3. Por outro lado, na têmpera em salmoura, amostra T5, apresentou uma maior quantidade de martensita, com a morfologia mais alongada e espessa, conferindo uma dureza ainda maior que a T4 esperava-se que a dureza do material fosse próxima de 46 HRC para a têmpera em água, conforme indicado pela literatura, Bethlehem Steel Company (1987), ou 24 HRC, conforme o diagrama TRC do aço AISI 1030, Figura 31, contudo o valor de dureza obtido foi de 15,5 HRC. Isso indica que possivelmente o tempo de austenitização de 30 minutos utilizado não foi suficiente para uma completa transformação da austenita em martensita, evidenciado nas micrografias das Figuras 28a, 28b e 28c, sendo necessário um tempo maior para alcançar esse objetivo.

Os valores de ensaio de dureza para as amostras T2 e T3, apresentaram valores próximos aos medidos na literatura.

Figura 31 - Medidas de dureza Rockwell C e microdureza para diâmetros diferentes do aço carbono 1030.



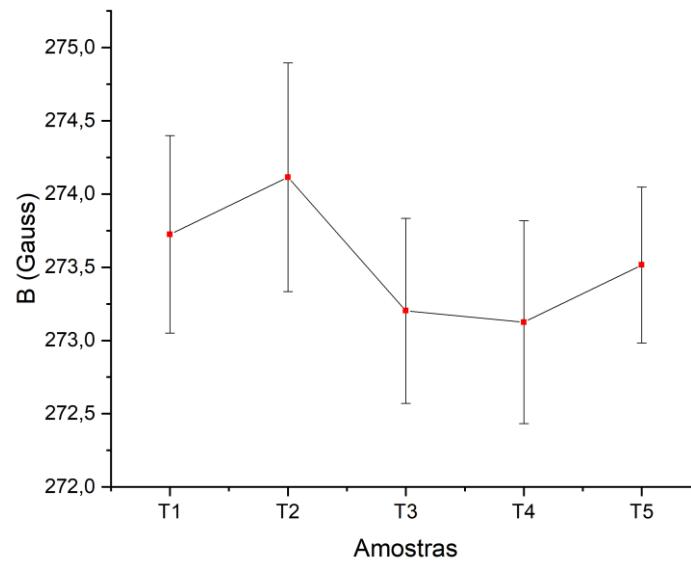
Fonte: Adaptado (Atkins, 1980)

Os valores do ensaio de microdureza teve comportamento semelhante ao ensaio de dureza Rockwell, ou seja, um aumento no valor da dureza no sentido da amostra T1 à T5, contudo não houve uma diferença elevada de dureza quando comparadas as amostras T2 e T3. Isto pode ter ocorrido pela característica do ensaio, uma vez, que a microdureza permite medir a dureza de um grão.

4.4 Ensaio Magnético por sensor Hall

Na Figura 32 está representado o resultado do ensaio magnéticos realizados nas amostras como recebida e nas amostras tratadas termicamente.

Figura 32 - Análise magnética dos aços carbono AISI 1030 por sensor Hall.



Fonte: Autor (2024)

Para a amostra T1, recozida, o valor do campo magnético induzido foi de 273,72 Gauss, isto acontece devido a mudança da microestrutura dos grãos que quando foi submetido ao tratamento térmico, os grãos mudaram de morfologia, e apresentaram um aumento no tamanho de grão médio, significando, que o tamanho do grão da perlita é maior quando comparado com o da amostra T2. A perlita é um material magneticamente duro em relação à ferrita, de maneira que o valor de B pode ser menor, como apresentado na Figura 31.

A diferença do tamanho de grão está disponibilizada na Tabela 5, e esta diferença nos mostra que quando os grãos são grandes podem apresentar anisotropias magnéticas diferentes para outras direções, além disso, os contornos dos grãos atuam como barreiras para os domínios magnéticos, dificultando o alinhamento. Por outro lado, quando os grãos são menores, há menos contornos de grãos devido ao afinamento. Além disso, há menos anisotropia magnética, facilitando o alinhamento dos domínios magnéticos. Como resultado, esses grãos menores possuem um campo magnético menor.

Para as amostras T1 e T2, ambos resultaram em campo magnético induzido maior do que as têmperas, isso sugere que para a T1, como são produzidos grãos maiores, produz uma estrutura menos magnética, diferente da normalização que possui grãos mais refinados devido o resfriamento rápido ao ar, levando a uma susceptibilidade magnética maior do que o recozimento.

Já para as amostras temperadas, T3, T4 e T5, possuem um campo magnético induzido levemente menor em relação as amostras T1 e T2. Esta redução está associada à formação de martensita, uma fase com estrutura mais endurecida que afeta a orientação dos domínios magnéticos, de modo que à medida a quantidade de fase aumenta e a sua esta estrutura se torna muito mais finas, à depender da severidade do resfriamento, menor será o campo magnético. Como a martensita possui maior dureza mecânica em relação as fases perlita e ferrita, conseqüentemente irá refletir em sua dureza magnética, visto que a martensita possui maior quantidade de interfaces devido a sua morfologia, possui alta densidade de discordâncias e carbono em solução sólida que gera tensões elásticas na rede cristalina.

5 CONCLUSÃO

Ao analisar os resultados dos tratamentos térmicos realizados no aço carbono AISI 1030, a dureza da amostra T4, temperada em água, não atingiu o valor esperado de 24 HRC e microdureza de 250 HV, conforme o diagrama TRC do aço. De acordo com a literatura, a dureza do material é diretamente proporcional ao seu diâmetro. Logo, é possível que o material não tenha sido austenitizado completamente em um tempo de 30 minutos. Foi observado que não houve a transformação completa da austenita em martensita e que possivelmente o tamanho da amostra, principalmente o diâmetro exigisse maior tempo de encharque. Além de que quando foi colocado a amostra dentro de um reservatório com areia também poderia ter implicado na necessidade de um maior tempo de encharque. No entanto, a têmpera em óleo e a normalização obtiveram resultados satisfatórios, aproximando-se do diagrama TRC. Foi perceptível uma mudança na microestrutura das amostras, uma vez que os resfriamentos rápidos formaram a fase martensítica, resultando em uma estrutura mais endurecida e, de fato, produziram uma dureza maior.

A microestrutura discutida neste trabalho apresentou diferenças nos tamanhos de grãos, condizentes com o esperado, obtendo maiores tamanhos de grãos para o tratamento térmico de recozimento e menores tamanhos de grãos para a normalização. Para as têmperas foi apresentando grãos mais refinados devidos o resfriamento rápido e inclusive formação de martensita.

O ensaio magnético serviu para mostrar que a mudança de fase, a morfologia e quantidade da fase presente reflete na propriedade magnética do material, visto que isto afeta a dureza magnética do material, refletindo na mudança no campo magnético induzido (B). Porém, essa variação foi muito discreta, uma vez que não houve mudanças significativas na microestrutura do aço tratado termicamente.

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar tratamentos térmicos com maior tempo de encharque na mesma temperatura de austenitização e nas mesmas configurações de preparação da amostra, para avaliar as mudanças microestruturais e a presença de martensita nos tratamentos de têmpera.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Elton Mesquita de. **Efeito do tratamento térmico nas propriedades magnéticas e na corrosão localizada do aço inoxidável duplex UNS S31803**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. p. 261. 2021.
- 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 28
- BASORI, I., Pratiwi, W.D. and Dwiyati, S.T., 2019, December. **Effect of Salt quenching on the microstructures and mechanical properties of AISI 1045 steel**. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1402, No. 5, p. 055102). IOP Publishing.
- BETHLEHEM STEEL COMPANY. **Modern Steels and Their Properties: Carbon and Alloy Steel Bars and Rods**, Material Treating Institute, 1987, p 96–99
- BRAMFITT, Bruce L. Effects of composition, processing, and structure on properties of irons
- BRITO, Carlos Magno Gomes de. **Influência dos tratamentos térmicos de recozimento pleno e normalização na microestrutura e propriedades mecânicas de aços com baixo e alto teor de carbono**. 2017. 39 f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- CALLISTER, W. D. Jr; **Ciência, de materiais, engenharia. Uma introdução**. 7ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- CASTRO, Danilo Borges Villarino de. **Influência da temperatura de austenitização para têmpera e de revenimento na tenacidade e na vida em fadiga do aço SAE 5160 para diferentes teores de fósforo**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. doi:10.11606/D.88.2007.tde-04092008-163946. Acesso em: 2024-03-30.
- CASTRO, Filipe Ribeiro de. **Avaliação do comportamento mecânico e tenacidade à fratura do aço SAE/AISI 4140 submetido a tratamento térmico criogênico**. Campos dos Goytacazes, 2013. xx, 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, Laboratório de Materiais Avançados, 2013.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 6. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 1988. 576p.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2005. 599p
- CHIAVERINI, V. **Tratamentos térmicos das ligas metálicas**. São Paulo: ABM, 2003.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed., São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2008. 652p.
- COSTA E SILVA, A.L.; MEI, P.R. **Aços e ligas especiais**. 3.ed. Sumaré: Editora Blucher, 2010.
- CUTELEIRO. **Óleo de Têmpera**. 2024. Disponível: <https://www.lojadocuteleiro.com.br/produtos/oleo-de-tempera-11/>. Acesso: 27 de abril de 2023.
- de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2021.
- GOULARTE, C. **Desenvolvimento de um Mancal Magnético Híbrido**. Trabalho de Conclusão de Curso, UCS, Caxias do Sul, RS. 2020.
- JUNIOR, Silvério Ferreira da Silva; MARQUES, Paulo Villani. **Ensaio Não Destrutivos**. Belo Horizonte, 2006.
- KRAUSS, G. S. (1994) **Heat treatment and processing principles**. Ohio: ASM International.

- LANDGRAF, F. J. G. **Microestrutura e Propriedades Magnéticas**. USP - Escola Politécnica. São Paulo, p.61, 2007. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7892550/mod_resource/content/1/Microestrutura%20e%20magnetismo%20v4%20ref.%20ok.pdf. Acesso em: 2024-03-30.
- MOREIRA, H. A. **Avaliação do desempenho de técnicas não destrutivas: um estudo de caso na inspeção de componentes para molas pneumáticas**. Trabalho de Conclusão de Curso, UFC, Fortaleza, CE, Brasil. 2014.
- MORI, Gabryella Neres De; Cesconeti, Lorena Bertranda; Villela, Marcella Minchio. **ANÁLISE DAS PROPRIEDADES METALGRÁFICAS DO AÇO SAE 1045 NOS PROCESSOS TÉRMICOS DE NORMALIZAÇÃO, REVENIMENTO E TÊMPERA**, p. 846-856. In: *73º Congresso Anual da ABM*, São Paulo, 2018. ISSN: 2594-5327, DOI 10.5151/1516-392X-31511.
- OLIVEIRA, Everton Gustavo de. **Efeito dos parâmetros de tratamento térmico na microestrutura e nas propriedades dos aços SAE 4340 e 8640 temperados e revenidos**. 2014. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.
- OLIVEIRA, N. P. **Propriedades mecânicas de um aço de baixo carbono com estrutura ferrita acicular**. 2007, 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.
- MARTINEZ-MUNOZ, P. E., Martinez-Hernandez, H. D., A. Lara-Guevara A., Millan-Malo B., Rojas-Rodriguez I. and M. E. Rodriguez-Garcia, Mater. **Effect of tempering on the metallurgical, structural, and thermal properties of AISI/SAE 1030 steel**.
- SANTOS, Hedipo Pereira dos. **Caracterização microestrutural dos aços 1020, 1045, 5160, 8620, após os determinados tipos de tratamentos térmicos de têmpera, revenimento, normalização e recozimento**. 2021. 76 f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.
- SILVA, Francisco Eduardo Mendes da. **Desenvolvimento de um ensaio eletromagnético através de medidas de permeabilidade e simulações pelo método dos elementos finitos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. p. 98, 2019.
- SIMON, Fabiana Camila et al. **Análise prática de penetração de solda em aço 1045**. 2º semana internacional das engenharias da FAHOR. Horizontina, out. 2012.
- SOARES e et al. **Polaridade Magnética e Sensor Hall: Uma Proposta de Experimento para o Ensino Fundamental e Médio**. Universidade Federal de São Carlos, Sococara - SP. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/Bh6jbyqdrfPN6B6hjjjhrn/?format=pdf&lang=pt>. Acesso: 30 de março de 2023.
- SOUSA. Ester. C. de. **Estudo da Oxidação do Óleo de Soja com diferentes concentrações de Aditivos Antioxidantes, para uso em Tratamentos Térmicos de Têmpera**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais. Escola de Engenharia de São Carlos, 2007.
- SOUZA, A, S. **Composição química dos aços**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda. 1989. 134p. Today Commun. 31,103535(2022). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103535>. Acesso em: 2024-03-30.
- tipos de tratamentos térmicos de têmpera, revenimento, normalização e recozimento**.
- TOTTEN, G. E; BATES, C. E; CLINTON, N. A. ; **Handbook of quenchants and quenching technology**, ASM International, 1993.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro TREFITA. **Aços 1030**. 2019. Disponível em: <https://acostrefita.com.br/acos/1030/>. Acesso: 30 de março de 2023.

ZORTÉA, Jéssica Balbinot. **Estudo do meio corrosivo e da corrosão de diferentes aços carbono em água clarificada de uma planta de tratamento de água industrial.** Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2020.