

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

OSÉIAS LUIZ DE OLIVEIRA SOUZA

EFEITO DOS PARÂMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO NA
MICROESTRUTURA E NA DUREZA DE AÇOS DE ALTO TEOR DE CARBONO

BELO HORIZONTE

2024

OSÉIAS LUIZ DE OLIVEIRA SOUZA

**EFEITO DOS PARÂMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO NA
MICROESTRUTURA E NA DUREZA DE AÇOS DE ALTO TEOR DE CARBONO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
no Curso de Graduação em Engenharia de
Materiais do Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Materiais.

Orientadora: Dra Elaine Carballo Siqueira Corrêa

BELO HORIZONTE

2024

OSÉIAS LUIZ DE OLIVEIRA SOUZA

**EFEITO DOS PARÂMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO NA
MICROESTRUTURA E NA DUREZA DE AÇOS DE ALTO TEOR DE CARBONO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
no curso de Graduação em Engenharia de
Materiais do Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Materiais.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra Elaine Carballo Siqueira Corrêa (Orientadora)

Prof. Dra. Aline Silva Magalhães

Prof. Dr. Wellington Lopes

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Marilda, à minha irmã, Anna, e à minha querida e falecida avó, Maria Tereza, que me fortaleceram ao longo de todo o percurso, dando-me as ferramentas necessárias para que eu chegasse até aqui.

Ao Daniel, pelo apoio, carinho e inspiração, que foram essenciais ao longo dessa jornada.

Aos amigos da faculdade, Anderson, Isabela, e a todos os colegas que o CEFET me proporcionou conhecer, pela troca de experiências que tornaram minha jornada acadêmica mais prazerosa e enriquecedora.

À minha orientadora, Elaine, que, com tanta dedicação, compromisso, paciência e conhecimento, aceitou me orientar e foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho, contribuindo imensamente para o meu crescimento acadêmico.

Aos meus amigos de vida, Bianca e Gabriel, que estão sempre presentes e ao meu lado em todas as minhas conquistas.

Ao time técnico do DEMAT, que se colocou à disposição para me ajudar e auxiliar durante toda a execução do projeto.

RESUMO

Os tratamentos térmicos, como a têmpera e o revenimento, são amplamente aplicados em aços de alto teor de carbono para alterar suas propriedades mecânicas e microestruturais, proporcionando maior dureza e resistência. Esses processos consistem no aquecimento e resfriamento controlado dos materiais, promovendo transformações como a formação de martensita e sua posterior modificação para ajustar a tenacidade e reduzir a fragilidade. Este trabalho investiga o efeito desses tratamentos térmicos na microestrutura e na dureza dos aços DIN 100CrV2 e SAE 1095. Através de análises de microscopia óptica e eletrônica, bem como ensaios de difração de raios X e testes de dureza, foi possível observar as transformações microestruturais resultantes dos diferentes tratamentos. Os resultados indicam a predominância de martensita nos aços temperados e de martensita revenida nos aços revenidos, com variações de dureza influenciadas pela temperatura e pelos elementos de liga presentes, como o cromo e o vanádio.

Palavras chaves: Aço DIN 100CrV2, Aço SAE 1095, tratamento térmico, tempera, revenimento

ABSTRACT

Heat treatments such as quenching and tempering are widely applied to high-carbon steels to alter their mechanical and microstructural properties, providing greater hardness and strength. These processes involve the controlled heating and cooling of materials, promoting transformations like the formation of martensite and its subsequent modification to adjust toughness and reduce brittleness. This work investigates the effect of these heat treatments on the microstructure and hardness of DIN 100CrV2 and SAE 1095 steels. Through optical and scanning electron microscopy analyses, as well as X-ray diffraction tests and hardness measurements, the microstructural transformations resulting from the different treatments were observed. The results indicate the predominance of martensite in quenched steels and tempered martensite in tempered steels, with hardness variations influenced by temperature and alloying elements such as chromium and vanadium.

Keywords: DIN 100CrV2 steel, SAE 1095 steel, heat treatment, quenching, tempering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Estruturas cristalinas da ferrita, austenita e cementita.	16
Figura 3.2 – Microestruturas do ferro carbono.....	17
Figura 3.3 – Representação esquemática da estrutura TCC da martensita.....	19
Figura 3.4 – Microestruturas dos tipos de martensita.....	20
Figura 3.5 – Mola fabricada com aço de alto teor de carbono..	22
Figura 3.6 – Diagrama esquemático tratamento térmico.....	23
Figura 3.7 – Diagrama TTT.....	24
Figura 3.8 – Diagrama Fe-C.....	26
Figura 3.9 – Dureza em função da taxa de resfriamento de um aço microligado	28
Figura 3.10 – Diagrama esquemático do tratamento térmico de têmpera.	30
Figura 3.11 – Variação da dureza de um aço em função do aumento de temperatura de revenimento.	31
Figura 3.12 – ciclo de têmpera junto ao revenimento.	32
Figura 4.1 – Fluxograma geral do projeto.	33
Figura 4.2 – Gaiolas projetadas para experimento.	35
Figura 5.1 – Microestrutura (MO) do aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento à 980°C.....	38
Figura 5.2 – Microestrutura (MO) do aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento à 980°C e revenido em diferentes temperaturas – 200°C, 350°C, 500°C.....	39
Figura 5.3 – Microestrutura (MO) do aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento à 900°C.....	40
Figura 5.4 – Microestrutura (MO) do aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento à 900°C e revenido em diferentes temperaturas – 200°C, 350°C, 500°C.....	41
Figura 5.5 – Microestrutura (MO) do aço SAE 1095 temperado em água com aquecimento à 900°C.	42
Figura 5.6 – Microestrutura (MO) do aço SAE 1095 temperado em água com aquecimento à 900°C e revenido em diferentes temperaturas – 200°C, 350°C, 500°C.	43
Figura 5.7 – Microestrutura (MEV) do aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento à 980°C com e sem revenimento a 500°C.....	44
Figura 5.8 – Figura 5.8 – Microestrutura (MEV) do aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento à 900°C com e sem revenimento a 500°C.....	45

Figura 5.9 – Microestrutura (MEV) do aço SAE 1095 temperado em água com aquecimento à 900°C com e sem revenimento a 500°C.	45
Figura 5.10 – Difrátogramas das amostras do aço DIN 100CrV2 temperado em água e aquecido a 980°C com e sem revenimento a 200°C e 500°C	47
Figura 5.11 – Difrátogramas das amostras do aço DIN 100CrV2 temperado em água e aquecido a 900°C com e sem revenimento a 200°C e 500°C.	48
Figura 5.12 – Difrátogramas das amostras do aço SAE 1095 temperado em água e aquecido a 900°C com e sem revenimento a 200°C e 500°C.....	49
Figura 5.13 – Evolução de dureza do aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento à 980°C e revenido em diferentes temperaturas – 200°C, 350°C, 500°C.....	52
Figura 5.14 – Evolução de dureza do aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento à 900°C e revenido em diferentes temperaturas – 200°C, 350°C, 500°C.....	53
Figura 5.15 – Evolução de dureza do aço SAE 1095 temperado em água com aquecimento à 900°C e revenido em diferentes temperaturas – 200°C, 350°C, 500°C.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas variando com o teor de carbono	20
Tabela 4.1 – Composição química (% em peso) do aço DIN 100CrV2.....	34
Tabela 4.2 – Composição química (% em peso) do aço SAE 1095.....	34
Tabela 4.3 – Parâmetros do processo de tempera realizado	35
Tabela 4.4 – Parâmetros do processo de revenimento realizado	36
Tabela 5.1 – Dureza obtida do aço SAE 1095 aquecido a 900°C	50
Tabela 5.2 – Dureza obtida do aço DIN 100CrV2 aquecido a 900°C.....	50
Tabela 5.3 – Dureza obtida do aço DIN 100CrV2 aquecido a 980°C.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS

α	Ferrita
CFC	Cúbica de face centrada
CCC	Cúbica de corpo centrado
DRX	Difração de raios X
M	Martensita
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	Microscopia óptica
TCC	Tetragonal de corpo centrado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVO	12
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos Específicos	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	Aço alto teor de carbono	12
3.1.1	Características gerais dos aços de alto teor de carbono	13
3.1.2	Microestrutura Típicas de Aços com Alto Teor de Carbono	13
3.1.3	Propriedades do aço de alto teor de carbono	18
3.1.4	Aplicações dos aços de alto teor de carbono	19
3.2	Tratamentos térmicos	20
3.2.1	Princípios básicos dos tratamentos térmicos	20
3.2.2	Curvas TTT e TRC	21
3.2.3	Influência dos Elementos de Liga na Temperabilidade do Aço	22
3.2.4	Parâmetros de influência nos tratamentos térmicos	24
3.2.5	Têmpera	27
3.2.6	Revenimento	29
4	MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1	Descrição Geral do Trabalho	31
4.2	Materiais	32
4.3	Preparação das amostras	32
4.4	Tratamentos térmicos do experimento	32
4.4.1	Têmpera realizada no experimento	32
4.4.2	Revenimento realizado no experimento	34
4.5	Caracterização microestrutural	34
4.6	Caracterização Mecânica	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1	Caracterização microestrutural por microscopia óptica	38
5.2	Microscopia eletrônica por varredura	43
5.3	Difração de Raios X	45
5.4	Dureza	50
6	CONCLUSÃO	55

1 INTRODUÇÃO

Os tratamentos térmicos são importantes na metalurgia industrial, permitindo a modificação das propriedades físicas e mecânicas dos materiais metálicos. No caso dos aços de alto teor de carbono, os parâmetros de tratamento térmico de têmpera e revenimento possuem um impacto significativo nas propriedades finais desses materiais. Compreender os efeitos desses parâmetros é essencial para otimizar o desempenho e a aplicação dos aços de alto teor de carbono.

Os aços de alto teor de carbono são amplamente utilizados em diversas aplicações industriais, devido à sua excelente resistência mecânica e dureza (SILVA, 2010). Esses materiais são especialmente empregados em setores que demandam alta resistência ao desgaste, como na fabricação de ferramentas de corte, molas, engrenagens e rolamentos.

Os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, muitas vezes denominados em conjunto de beneficiamento, consistem em duas etapas principais. Primeiramente, ocorre a têmpera, na qual o aço é aquecido a uma temperatura na qual sua estrutura é austenítica, em seguida, resfriado rapidamente, resultando na formação de uma estrutura endurecida, como a martensita (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2018). Posteriormente, o aço é submetido ao processo de revenimento, no qual é aquecido a uma temperatura abaixo da temperatura crítica, cujo valor irá depender das propriedades finais desejadas e da própria composição química do material, e resfriado lentamente, ao ar, aliviando as tensões internas, muitas vezes alterando as características da martensita, e melhorando a tenacidade.

Os parâmetros de tratamento térmico de têmpera e revenimento incluem principalmente a temperatura e o meio de resfriamento da têmpera, a temperatura de revenimento e o tempo de permanência em cada etapa dos processos. Cada um desses parâmetros é essencial para determinar as propriedades finais do aço de alto carbono. A temperatura de têmpera influencia diretamente a formação da martensita, que confere alta dureza e resistência ao aço (KRAUSS, 2015). O meio de resfriamento, como água, óleo ou ar, também afeta a taxa de resfriamento e, conseqüentemente, a estrutura resultante. A temperatura de revenimento e o tempo de permanência no forno permitem o controle das propriedades mecânicas, como a resistência à fratura e a tenacidade.

Portanto, este trabalho de pesquisa tem como objetivo investigar os efeitos dos parâmetros de tratamento térmico de têmpera e revenimento em dois aços de alto teor de carbono, um com a presença de elementos de liga e outro apenas aço carbono. Serão realizados experimentos variando os parâmetros de temperatura de austenitização e temperatura de

revenimento, a fim de analisar as alterações na microestrutura e nas propriedades mecânicas do material

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi analisar os efeitos da presença de elementos de liga e de alterações nos parâmetros dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento na microestrutura e na dureza de dois aços de alto teor de carbono (cerca de 0,95%).

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar os efeitos da temperatura de aquecimento na têmpera e da temperatura de revenimento na microestrutura e na dureza de um aço com 0,95% de carbono contendo os elementos cromo e vanádio – aço DIN 100 CrV2.
- Avaliar a influência da temperatura de revenimento na microestrutura e na dureza do aço carbono com 0,95% de carbono.
- Observar os efeitos da presença dos elementos de liga cromo e vanádio nos resultados a partir da comparação entre os dois aços mencionados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aço alto teor de carbono

3.1.1 Características gerais dos aços de alto teor de carbono

O aço de alto teor de carbono é uma liga metálica que possui uma quantidade significativa de carbono em sua composição, geralmente entre 0,6% e 1,5%. Essa quantidade elevada de carbono proporciona ao aço características únicas, tais como maiores resistências mecânica, dureza e durabilidade ao desgaste mecânico (SOUZA, 2016).

De acordo com Chiaverini (2010), o aço de alto teor de carbono apresenta uma excelente resposta ao tratamento térmico, o que permite a obtenção de diversas microestruturas e propriedades mecânicas desejadas, conforme parágrafo anterior. Entre os tratamentos térmicos mais comuns para esse tipo de aço estão: o recozimento, a normalização, a têmpera e o revenimento.

Além disso, o aço de alto teor de carbono é amplamente utilizado na indústria automobilística, ferramentaria, construção civil, entre outras áreas. No entanto, é importante ressaltar que a alta quantidade de carbono presente na liga pode torná-la mais suscetível à corrosão e ao desgaste, o que exige cuidados especiais em relação à manutenção e proteção da superfície.

Conforme destacado por Dieter (2008), o processo de fabricação do aço de alto teor de carbono pode envolver diferentes etapas, tais como a fusão dos materiais, a solidificação, a laminação e o acabamento. Cada uma dessas etapas pode influenciar significativamente na qualidade final do aço, bem como nas suas propriedades físicas e químicas.

Portanto, o aço de alto teor de carbono é uma liga metálica com características distintas e propriedades mecânicas elevadas. A compreensão das características e propriedades desse material é essencial para a sua aplicação correta e eficiente em diversas áreas da indústria.

3.1.2 Microestrutura Típicas de Aços com Alto Teor de Carbono

O aço é uma liga metálica composta principalmente de ferro e carbono, e suas propriedades dependem das fases presentes na microestrutura. As fases mais comuns nos aços

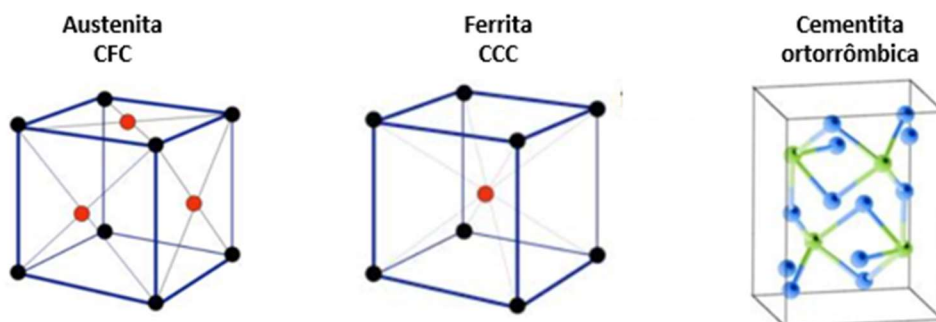
são a austenita, ferrita e cementita, que podem estar em equilíbrio em diferentes proporções, dependendo da composição química e do tratamento térmico a que o aço é submetido.

A austenita é a fase de alta temperatura dos aços, com estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC). Ela se forma durante o aquecimento da liga e é estável em temperaturas acima de 723 °C para um aço com 0,8% de carbono (REED-HILL, 1973). A austenita é uma fase não magnética e pode dissolver até 2,11% de carbono em solução sólida. A presença de austenita pode conferir alta tenacidade e ductilidade aos aços, mas também pode levar à fragilização por revenido em temperaturas elevadas (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2018).

Por outro lado, a ferrita é a fase estável em temperatura ambiente para aços com baixo teor de carbono. Ela tem estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) e é magnética. A ferrita pode dissolver até 0,022% de carbono em solução sólida, e sua presença pode conferir alta ductilidade e tenacidade aos aços (TOTTEN; BATES; CLINTON, 2011).

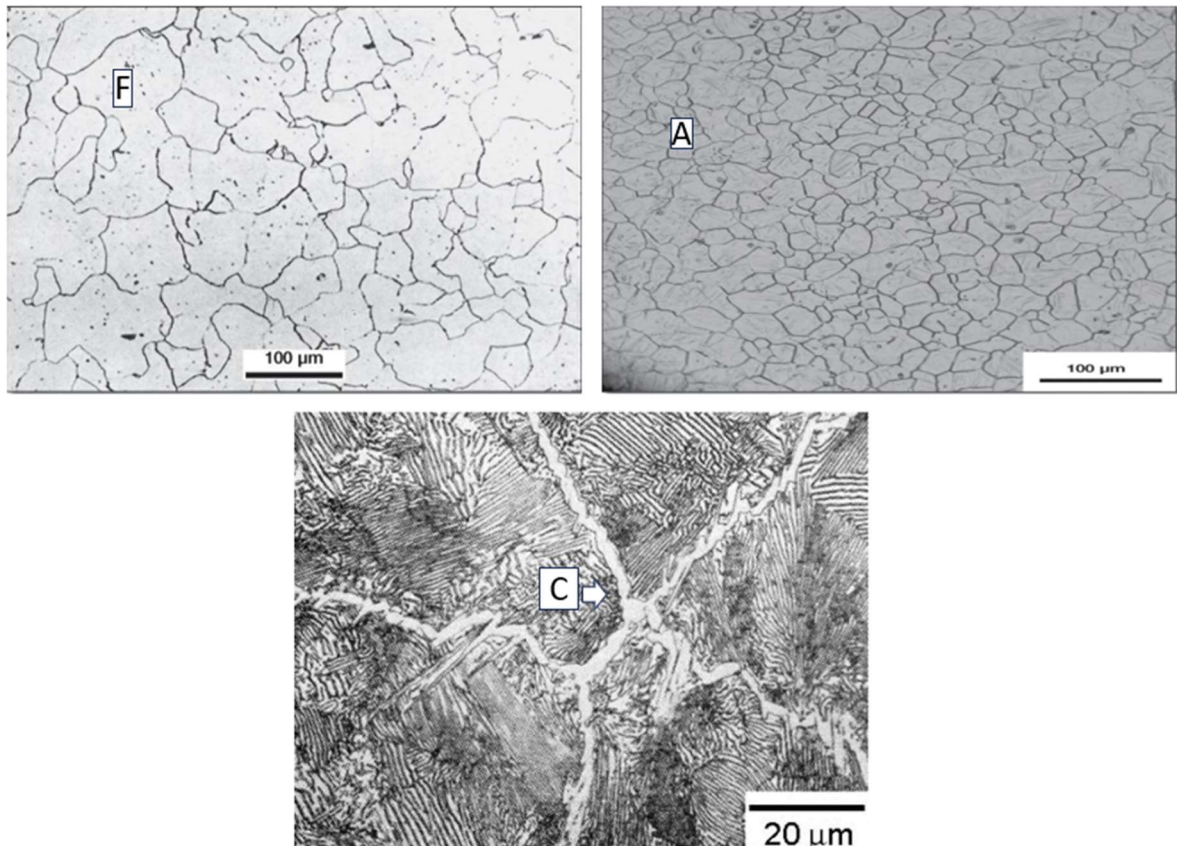
Já a cementita é uma fase intermetálica composta de ferro e carbono, com fórmula química Fe_3C . Ela é uma fase dura e frágil, com estrutura cristalina ortorrômbica, e pode estar presente em aços com alto teor de carbono ou em aços que foram tratados termicamente para promover a sua formação. A cementita pode contribuir para a alta resistência mecânica dos aços, mas também pode levar à fragilização e à redução da tenacidade (CALLISTER JR. & RETHWISCH, 2018). Portanto, a presença dessas fases no equilíbrio pode influenciar significativamente as propriedades mecânicas e o comportamento do aço em diferentes aplicações. Na Figura 3.1 e 3.2 é apresentado as estruturas cristalinas de cada fase e exemplos de microestrutura de ferrita, austenita e cementita, respectivamente.

Figura 3.1 – Estruturas cristalinas da ferrita, austenita e cementita



Fonte: YUEYUE, 2023 (adaptado).

Figura 3.2 – Microestruturas do ferro carbono



F – Ferrita, A – Austenita, C – Cementita.

Fonte: COLPAERT, 2008.

Ainda nesse contexto, existem os constituintes no equilíbrio que podem se formar durante o resfriamento lento do aço, como, a perlita, ferrita proeutetoide e cementita proeutetoide.

A perlita é um constituinte composto de lamelas alternadas de ferrita e cementita, que se forma durante o resfriamento lento da austenita. A proporção de ferrita e cementita na perlita varia de acordo com a temperatura de resfriamento e a composição do aço. A perlita é uma microestrutura comum em aços com teor de carbono intermediário e sua presença pode conferir alta resistência mecânica ao aço (HONEYCOMBE, 1995).

A ferrita proeutetoide é um constituinte importante na metalurgia dos aços, é formada durante as transformações de fase que ocorrem durante o resfriamento da austenita. De acordo com os fundamentos apresentados por Van Vlack (1984), essa fase emerge como produto da decomposição da austenita durante a etapa inicial da transformação perlítica. A sua presença ocorre em conjunto com a formação de outras fases, como a cementita, e a sua proporção e

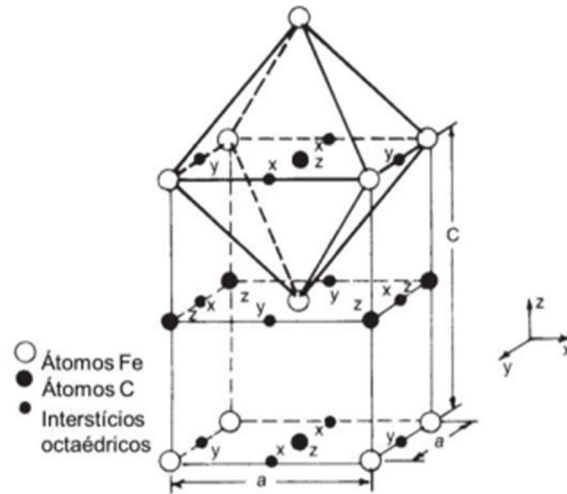
distribuição desempenham um papel crítico na determinação das propriedades mecânicas e da resistência do aço resultante. A compreensão profunda da formação, morfologia e comportamento da ferrita pró-eutetóide, conforme abordado por diversos pesquisadores como Bhadeshia (2001), é essencial para a manipulação precisa das propriedades do aço por meio do controle da sua microestrutura, o que tem implicações significativas no desenvolvimento de materiais com características específicas para aplicações industriais.

A cementita proeutetoide é um constituinte que se forma abaixo da temperatura de transformação da austenita e ao lado da temperatura de formação da ferrita proeutetoide. Ela tem a mesma estrutura cristalina da cementita e pode estar presente em aços com alto teor de carbono ou em aços que foram tratados termicamente para promover a sua formação. A presença de cementita proeutetoide pode contribuir para a alta resistência mecânica dos aços, mas também pode levar à fragilização e à redução da tenacidade (CALLISTER JR. & RETHWISCH, 2018).

Por fim o aço carbono também pode apresentar constituintes fora do equilíbrio termodinâmico, como a bainita e a martensita. A bainita é uma microestrutura composta de uma mistura de ferrita e cementita, que se forma durante o resfriamento moderado do aço (entre 200°C e 550 °C, dependendo da composição química) (REED-HILL, 1973). A bainita é um constituinte metaestável, ou seja, sua formação não é governada pelo equilíbrio termodinâmico e sua estabilidade depende da temperatura e do tempo de tratamento térmico a (BHADESHIA 2001).

Já a martensita é uma microestrutura que se forma durante o resfriamento rápido do aço, geralmente por meio de têmpera em água ou óleo. A martensita é composta de uma solução sólida supersaturada de carbono em ferro, com estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC). Devido à sua formação rápida, a martensita é uma microestrutura altamente metaestável e apresenta alta dureza e fragilidade. No entanto, ela também pode conferir alta resistência mecânica aos aços, sendo utilizada em aplicações que exigem essas características (KRAUSS, 2015). Na Figura 3.3 se observa um desenho esquemático que representa a estrutura TCC da martensita.

Figura 3.3 – Representação esquemática da estrutura TCC da martensita.

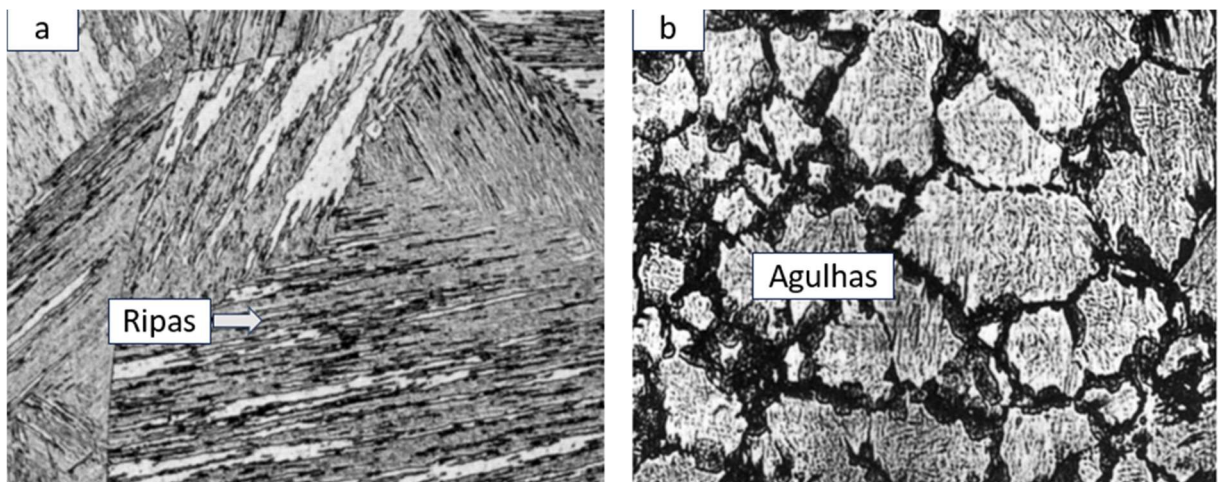


Fonte: COLPAERT, 2008.

Além disso no tocante à sua morfologia, a martensita tem a capacidade de adotar formatos em forma de agulhas ou ripas, variando conforme a quantidade de carbono presente. Essa diferenciação de morfologia se manifesta na forma de ripas quando o teor de carbono contido na martensita é inferior a 0,6%, e na configuração de agulhas ou placas quando o teor de carbono excede 1,0% (CALLISTER JR. & RETHWISCH, 2018).

Notavelmente, em situações em que o teor de carbono se situa entre 0,6% e 1,0%, torna-se possível a coexistência de ambas as morfologias (ASM HANDBOOK, 2009). Na Figura 3.4 é observado a microestrutura dos dois tipos de martensita citados.

Figura 3.4 – Microestruturas dos tipos de martensita



(a) Martensita tipo ripas em aço baixo carbono, (b) Martensita tipo agulhas em um aço eutetoide.

Fonte: ASM HANDBOOK, 2009.

3.1.3 Propriedades do aço de alto teor de carbono

O aço de alto teor de carbono, por possuir em sua composição um percentual considerável de carbono, isso confere a ele uma série de propriedades mecânicas e físicas únicas, como alta dureza, resistência, tenacidade e temperabilidade (CALLISTER JR. & RETHWISCH, 2018).

De acordo com Chiaverini (2010), a alta dureza é uma das propriedades mais relevantes do aço de alto teor de carbono. Isso se deve ao teor de carbono e pelo tratamento térmico aplicado. Aumentos no teor de carbono estão relacionados a uma maior dureza e resistência, mas também tornam o material mais frágil.

Outra propriedade importante desse material é a sua alta resistência mecânica. Segundo Callister e Rethwisch (2018), a presença de carbono na liga metálica aumenta a resistência à tração e à compressão do material. Isso faz com que o aço de alto teor de carbono seja utilizado em aplicações que requerem alta resistência, como na fabricação de ferramentas, peças automotivas e estruturas metálicas. Na Tabela 3.1 é possível observar algumas propriedades mecânicas e como os valores delas se modificam com o teor de carbono

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas variando com o teor de carbono

Carbono %	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência a tração (MPa)	Dureza Brinell (HB)
0,1	125	275	90
0,2	250	405	115
0,4	300	515	145
0,6	340	660	190
0,8	355	785	220
1	355	745	195
1,2	350	705	200
1,4	340	685	215

Fonte: GERDAU, 2015 (adaptado).

Além disso, o aço de alto teor de carbono apresenta excelente resposta ao tratamento térmico, o que permite a obtenção de diferentes microestruturas e propriedades mecânicas desejadas. O tratamento térmico é um processo fundamental para a modificação da microestrutura do material, podendo ser utilizado para aumentar a dureza, resistência mecânica e tenacidade do aço, como explica Chiaverini (2010).

Do mesmo modo, a temperabilidade é uma propriedade importante do aço de alto teor de carbono. Segundo Chiaverini (2015), a temperabilidade é a capacidade do material de ser temperado para obter uma dureza uniforme em toda a seção transversal. Essa propriedade é influenciada pelo teor de carbono do aço, bem como por outros elementos de liga presentes na composição, como cromo, molibdênio e vanádio. Além disso, a temperabilidade pode ser afetada pela velocidade de resfriamento, pelo tamanho e formato da peça e pela temperatura de têmpera utilizada (KRAUSS, 2015). Esses fatores afetam a formação de martensita, uma fase de alta dureza e resistência que é desejada em muitas aplicações de aços de alto teor de carbono.

No entanto, é importante ressaltar que o alto teor de carbono também pode tornar o aço mais suscetível à corrosão e ao desgaste, o que exige cuidados especiais em relação à manutenção e proteção da superfície. Além disso, a presença de carbono em excesso pode aumentar a fragilidade do material, reduzindo sua tenacidade, como destaca Do Vale (2010).

Dito isto, o aço de alto teor de carbono é um material com propriedades mecânicas e físicas características, que podem ser modificadas por meio do tratamento térmico para atender às necessidades específicas de diversas aplicações industriais.

3.1.4 Aplicações dos aços de alto teor de carbono

O aço de alto teor de carbono possui diversas aplicações na indústria devido às suas propriedades mecânicas. Esse tipo de aço é utilizado principalmente na fabricação de ferramentas de corte, como brocas, fresas, serras e lâminas, devido à sua capacidade de manter o fio de corte afiado por longos períodos (PANNONI, 2005).

Para além, o aço de alto teor de carbono também é utilizado na fabricação de peças que requerem alta resistência ao desgaste e fadiga (SILVA, 2010). Conforme abordado por Lampman (1997), o emprego desse tipo específico de aço se destaca na fabricação de componentes de máquinas, os quais demandam a capacidade de suportar impactos intensos.

Tal destaque é atribuído à concentração estratégica dos elementos presentes no aço, resultando em um aprimoramento significativo da dureza e resistência do material. Pannoni (2005) descreve que outra aplicação importante do aço de alto teor de carbono é na fabricação de molas para veículos, assim como equipamentos agrícolas e maquinários industriais devido à sua alta resistência e capacidade de suportar grandes deformações sem perder sua capacidade de retornar à forma original. A Figura 3.5 exemplifica uma das peças fabricadas com aço alto teor de carbono.

Figura 3.5 – Mola fabricada com aço de alto teor de carbono.



Fonte: CIAMOL, 2012.

3.2 Tratamentos térmicos

3.2.1 Princípios básicos dos tratamentos térmicos

O tratamento térmico é um processo de aquecimento e resfriamento controlado de materiais com o objetivo de alterar suas propriedades físicas e mecânicas. Esse processo é largamente utilizado na indústria metalúrgica para ajustar as propriedades de diversos tipos de materiais, incluindo os aços (REED-HILL, 1973).

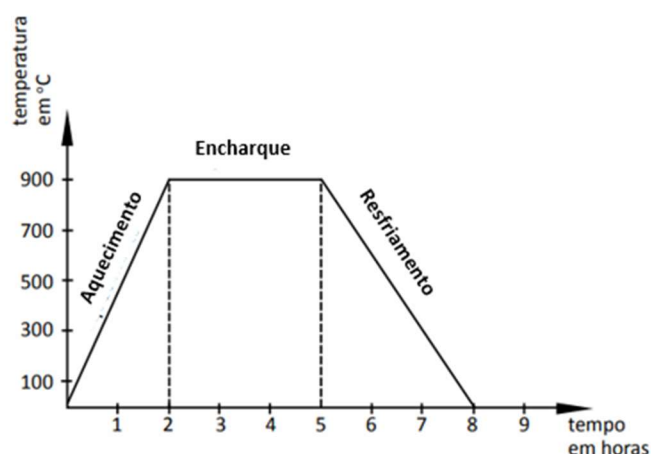
Segundo Callister e Rethwisch (2018), os tratamentos térmicos são divididos em quatro categorias principais: recozimento, normalização, têmpera e revenimento. O recozimento é utilizado para amaciar o material, diminuir sua dureza e aumentar sua ductilidade, enquanto a normalização é utilizada para uniformizar a microestrutura do material. Já a têmpera é utilizada para aumentar a dureza e a resistência do material, enquanto o revenimento é utilizado para reduzir a fragilidade do material e aumentar sua tenacidade.

O sucesso do tratamento térmico depende de diversos fatores, como a composição química do material, a taxa de aquecimento e resfriamento, o tempo de encharque, a temperatura de austenitização e as características da atmosfera utilizada durante o processo (BHADESHIA, 2001). Além disso, o tempo de tratamento térmico também pode influenciar significativamente o resultado.

Para a realização do tratamento térmico, é necessário utilizar equipamentos específicos, como fornos, banhos de sal e câmaras de resfriamento. Também é importante que o material seja adequadamente preparado, com uma limpeza adequada e com as dimensões adequadas para evitar deformações indesejadas (CZERWINSKI, 2012).

Nesse sentido, o tratamento térmico é um processo desejado para o ajuste das propriedades dos materiais, incluindo os aços. A correta seleção dos parâmetros e do tipo de tratamento térmico pode resultar em materiais com propriedades específicas, adequadas para diversas aplicações industriais. Abaixo na Figura 3.6 é possível observar um esquema de como acontece o tratamento térmico.

Figura 3.6 – Diagrama esquemático tratamento térmico



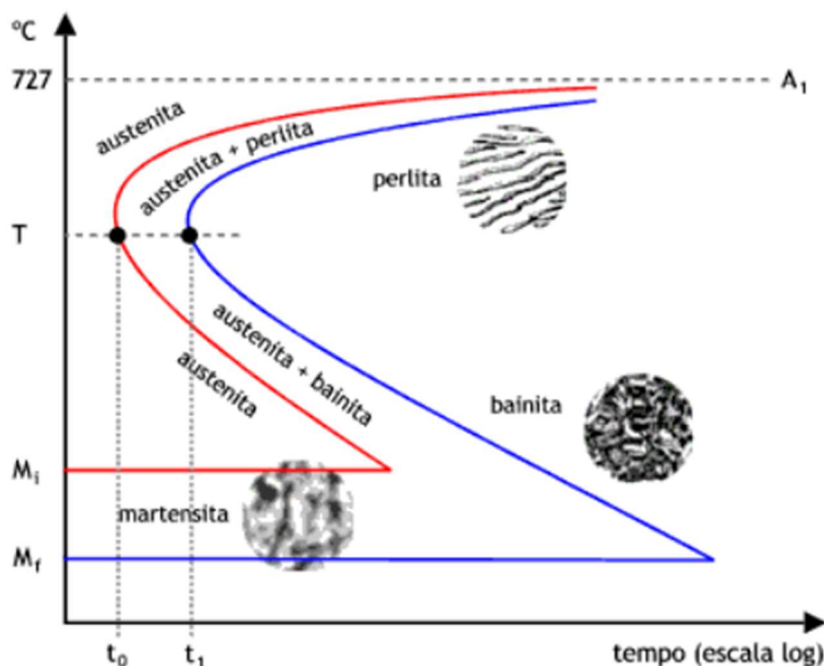
Fonte: GERDAU, 2010 (adaptado)

3.2.2 Curvas TTT e TRC

Para Chiaverini (2010), a evolução das transformações de fase no aço é descrita com o auxílio das curvas de transformação TTT (tempo, temperatura, transformação) e TRC (transformação por resfriamento contínuo), que são obtidas utilizando-se o dilatômetro, um equipamento que mede as variações de comprimento nas amostras devido às transformações de fase ou mudanças de temperatura. Essas curvas são fundamentais, pois o diagrama de fases ferro-carbono não fornece informações sobre as transformações austeníticas fora das condições de equilíbrio, ou seja, fora do resfriamento lento. Através dessas curvas, foi possível estudar a transformação isotérmica da austenita em perlita (ferrita e cementita) e prever a presença de novos constituintes, como bainita e martensita, a diferentes velocidades

de resfriamento abaixo de 727°C . As variações volumétricas resultantes dessas transformações são detectadas pelo dilatômetro, evidenciando as diferentes microestruturas entre a fase original e a fase formada (COLPAERT, 2008). Na Figura 3.7 é apresentado um exemplo de diagrama TTT.

Figura 3.7 – Diagrama TTT



Fonte: MSPC INFORMAÇÕES TÉCNICAS, 2015.

3.2.3 Influência dos Elementos de Liga na Temperabilidade do Aço

A incorporação de elementos de liga tem como objetivo melhorar as propriedades do aço conforme sua aplicação. A temperabilidade é uma propriedade frequentemente usada como referência para a estabilização dos processos de tratamento térmico. De acordo com Lopes (2012), o carbono é um dos elementos mais importantes no ensaio de temperabilidade, pois retarda a formação de ferrita e perlita, favorecendo a formação de martensita. Teores mais elevados de carbono reduzem a temperatura M_i (temperatura de início da formação da martensita), resultando em uma transformação incompleta da austenita em martensita. A austenita não transformada, conhecida como austenita retida, tem dureza inferior à da martensita.

A adição de outros elementos de liga visa aumentar a temperabilidade, permitindo a têmpera de peças com seções maiores, com menos distorção e trincas, pois deslocam as curvas TRC para a direita. Isso desloca a transformação da austenita para ferrita, perlita e/ou

bainita para temperaturas mais altas, possibilitando a formação de mais martensita para uma determinada taxa de resfriamento. Em geral, os efeitos dos elementos de liga na temperabilidade podem ser agrupados da seguinte maneira (CRUZ, 2005):

- Mn, Si, Cr, Ni, Mo e V: Estes elementos atrasam as curvas CCT, pois precisam se redistribuir por difusão durante a transformação de fase da austenita para ferrita e perlita. As complexas interações entre esses elementos podem afetar as temperaturas de transformação de fases e a microestrutura resultante;
- Mn e Ni são estabilizantes da austenita, retardando a formação da perlita (deslocam o "nariz" da curva para a direita, mas não alteram a curva);
- Cr, Mo e V são estabilizantes da ferrita. Em solução sólida, causam distorções na rede cristalina que interagem com as distorções provocadas pelos átomos de C, impedindo a precipitação deste. Quando o resfriamento ocorre em condições desfavoráveis para a difusão do C, evitando a formação de carbonetos, aumenta-se o tempo necessário para a formação da perlita;
- O V aumenta a temperabilidade e é tão eficaz quanto o Mn ou Mo quando em solução na austenita. No entanto, valores acima de 0,05% de V diminuem a temperabilidade devido à sua capacidade de refinar o grão austenítico;
- Si, Ni e Cu: Têm pouca influência no aumento da temperabilidade;
- P e S: O P aumenta a temperabilidade enquanto o S a diminui;
- Co: Diminui a temperabilidade. A presença de cobalto no aço acelera tanto a nucleação quanto o crescimento da perlita.

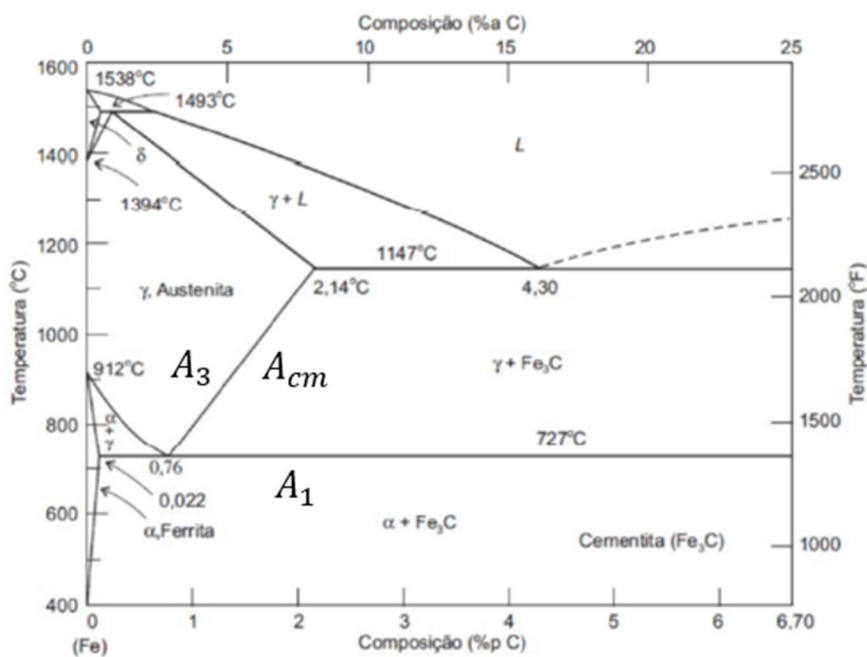
3.2.4 Parâmetros de influência nos tratamentos térmicos

De acordo com Do Vale (2010), o processo de tratamento térmico é influenciado por diversos parâmetros, tais como temperatura, tempo de aquecimento, tempo de resfriamento, velocidade de resfriamento e atmosfera do ambiente, como será apresentado a seguir:

O parâmetro de temperatura é um dos mais importantes durante os tratamentos térmicos dos materiais metálicos. A temperatura de aquecimento é capaz de influenciar significativamente a estrutura e as propriedades do material final, sendo necessário o estabelecimento de uma temperatura adequada para cada tipo de aço e para cada objetivo do tratamento térmico.

De acordo com Chiaverini (2010), a temperatura de aquecimento deve ser estabelecida em acordo com a característica do aço que está sendo tratado, a fim de se obter a estrutura e as propriedades desejadas. Segundo Krauss (2015), em relação aos aços hipoeutetóides, a temperatura de austenitização deve ser cerca de 50 °C acima da linha superior A3, a fim de permitir a dissolução completa das fases no ferro gama. Porém, em aços hipereutetóides, a temperatura recomendada é inferior à da linha Acm, devido ao fato de que essa linha se torna mais elevada com o aumento do teor de carbono. A completa dissolução do carboneto no ferro gama implicaria em temperaturas muito elevadas e com crescimento excessivo de grão da austenita, o que seria mais prejudicial do que a presença de carboneto não dissolvido. Na Figura 3.8 está o diagrama Fe-C que representa as condições percorridas.

Figura 3.8 – Diagrama Fe-C



Fonte: VAN VLACK, 1984 (adaptado)

É importante ressaltar que a temperatura máxima de aquecimento é dependente da natureza do processo, das estruturas e propriedades finais desejadas e da composição química do aço. Conforme Dieter (2008), o aquecimento excessivo além da temperatura crítica pode causar o crescimento de grãos grosseiros e o surgimento de trincas ou fissuras no material, o que compromete sua resistência mecânica e sua durabilidade. Portanto, é necessário um controle rigoroso da temperatura durante o processo de aquecimento e um resfriamento adequado para se obter a estrutura e as propriedades desejadas no material final.

Ao que se refere ao tempo de aquecimento, este é um parâmetro importante nos tratamentos térmicos, sendo considerado um dos fatores que mais influenciam nas propriedades finais dos materiais. Esse parâmetro está relacionado à velocidade de transformação da microestrutura do material, uma vez que está diretamente ligado à difusão dos átomos na rede cristalina durante a fase de aquecimento.

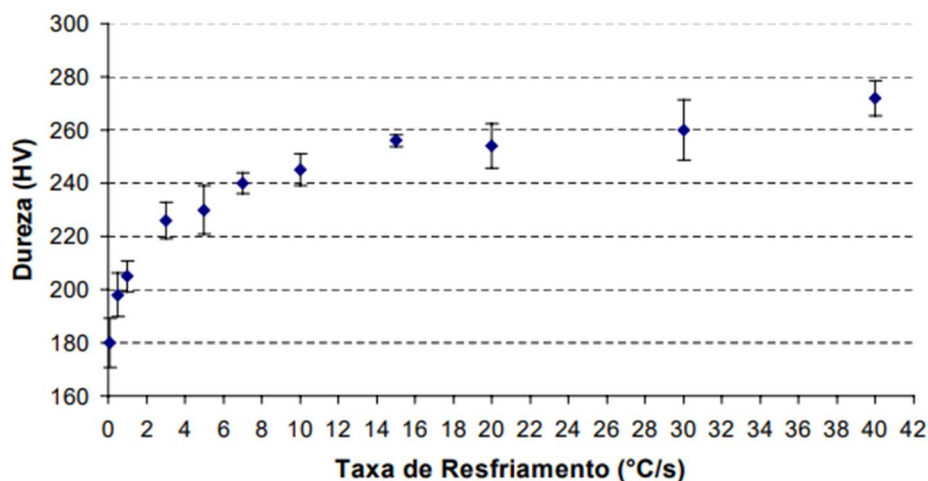
Para Chiaverini (2010), o tempo de aquecimento deve ser suficiente para que ocorra a dissolução completa dos elementos de liga e dos compostos intermetálicos presentes na microestrutura do aço. O autor ressalta que o tempo de austenitização pode variar de alguns minutos a algumas horas, dependendo da composição química e da espessura da peça. Segundo Totten, Bates e Ckinton (2011), um tempo de aquecimento excessivo pode levar ao crescimento anormal dos grãos, enquanto um tempo insuficiente pode não permitir a dissolução completa dos compostos intermetálicos e elementos de liga, resultando em uma microestrutura não uniforme.

Portanto, é importante que o tempo de aquecimento seja corretamente estabelecido e controlado, para que se obtenha a microestrutura desejada e as propriedades mecânicas adequadas para a aplicação do material.

Dando continuidade à descrição dos parâmetros, o resfriamento é um parâmetro crítico nos tratamentos térmicos e podem influenciar significativamente as propriedades finais dos materiais. O processo de resfriamento é responsável por transformar a fase austenítica em outras fases metaestáveis ou estáveis, como ferrita, perlita, martensita, bainita e outros constituintes. O tipo de resfriamento utilizado depende da composição química do material e das propriedades finais desejadas.

Conforme Krauss (2015) a velocidade de resfriamento é um parâmetro importante a ser controlado durante o processo de resfriamento tendo em vista que o não cumprimento a este parâmetro pode gerar consequências indesejadas. A taxa de resfriamento é medida em graus Celsius por segundo ($^{\circ}\text{C/s}$) ou em graus Celsius por minuto ($^{\circ}\text{C/min}$) e deve ser cuidadosamente selecionada para atingir as propriedades desejadas. Uma taxa de resfriamento rápida produz uma estrutura mais dura, mas menos tenaz, enquanto uma taxa de resfriamento lenta produz uma estrutura mais tenaz, mas menos dura. Na Figura 3.9 é observado como a taxa de resfriamento influencia a dureza de um aço microligado.

Figura 3.9 – Dureza em função da taxa de resfriamento de um aço microligado



Fonte: RAMÍREZ, 2008

O resfriamento pode ser realizado por diversos meios, como ar, água, óleo e outros líquidos, dependendo das propriedades finais desejadas. O meio de resfriamento utilizado tem um grande impacto na taxa de resfriamento e na formação da estrutura final. O resfriamento em ar é geralmente utilizado para aços com baixo teor de carbono, enquanto o resfriamento em óleo ou água é utilizado para aços com alto teor de carbono.

Alguns autores brasileiros da área de ciência dos materiais abordam a influência do resfriamento nos tratamentos térmicos, a exemplo de CHIAVERINI (2010) quando destaca que a taxa de resfriamento é um dos principais fatores que determinam a formação da microestrutura e das propriedades mecânicas dos aços. De acordo com ele, uma taxa de resfriamento mais lenta resulta em uma microestrutura mais grosseira, enquanto uma taxa de resfriamento mais rápida resulta em uma microestrutura mais fina. Ele também ressalta que o meio de resfriamento utilizado pode afetar a taxa de resfriamento e, portanto, a formação da microestrutura.

Já Totten, Bates e Clinton (2011) enfatizam que a taxa de resfriamento pode influenciar significativamente a formação da martensita e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas dos materiais. Eles destacam que a formação da martensita é muito sensível à taxa de resfriamento, e que uma taxa de resfriamento mais alta geralmente resulta em uma maior quantidade de martensita, tornando o material mais duro e menos tenaz.

Em suma, o parâmetro de resfriamento nos tratamentos térmicos é crítico para a formação da microestrutura e das propriedades finais dos materiais. A taxa de resfriamento, o

meio de resfriamento utilizado e a sensibilidade à formação da martensita são alguns dos principais fatores que devem ser cuidadosamente considerados durante o processo de resfriamento.

Por fim a atmosfera no ambiente é mais um dos parâmetros importantes que devem ser considerados nos tratamentos térmicos. A atmosfera pode influenciar diretamente nas propriedades dos materiais e em como as reações químicas ocorrem durante o processo de tratamento térmico. A atmosfera pode ser dividida em três categorias: atmosfera oxidante, atmosfera redutora e atmosfera neutra.

Segundo Do Vale (2010), a escolha da atmosfera adequada para o tratamento térmico depende da composição química do material, da temperatura de tratamento e do objetivo do tratamento. Além disso, o controle da atmosfera durante o tratamento térmico é fundamental para garantir a qualidade do tratamento e das propriedades do material. O autor ainda destaca que, em alguns casos, pode ser necessário utilizar uma atmosfera específica para garantir a obtenção das propriedades desejadas no material. Por exemplo, em tratamentos térmicos de recozimento de aços inoxidáveis, a utilização de atmosfera com alta concentração de nitrogênio pode favorecer a formação de cromo nitretos, melhorando a resistência à corrosão do material.

Neste sentido, a escolha da atmosfera deve ser baseada na composição química do material, temperatura de tratamento e objetivo do tratamento. Além disso, o controle da atmosfera durante o tratamento térmico é fundamental para garantir a qualidade do tratamento e das propriedades do material.

3.2.5 Têmpera

A têmpera é um dos tratamentos térmicos mais utilizados na indústria devido à sua capacidade de conferir alta resistência mecânica e dureza aos materiais metálicos. Esse processo consiste em aquecer o material a uma temperatura acima da linha crítica (temperatura na qual ocorre a transformação de fase), seguido de um resfriamento rápido em um meio de resfriamento, como água, óleo ou salmora, com o objetivo de obter uma estrutura martensítica.

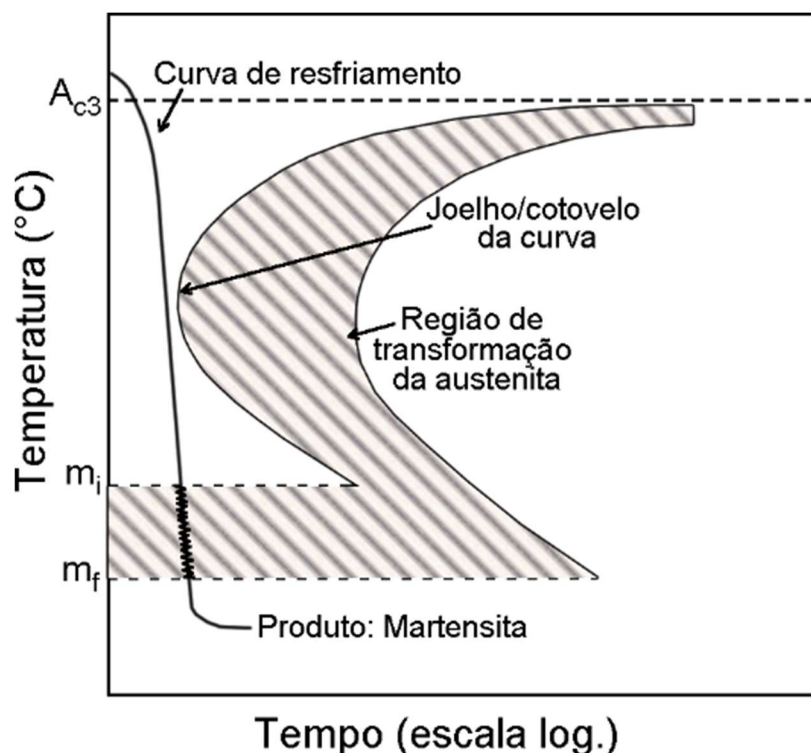
Vale ressaltar que o processo de têmpera pode gerar tensões internas na peça, podendo ocasionar trincas e deformações. De acordo com o Krauss (2015), a temperatura de austenitização e a taxa de resfriamento influenciam na magnitude das tensões internas geradas. É necessário um cuidado especial no processo de resfriamento, evitando variações

bruscas na velocidade e na temperatura do meio de resfriamento, a fim de minimizar as tensões internas.

A têmpera pode ser aplicada em diversos tipos de aço, desde baixo carbono até alto carbono, e em ligas de aço, como aços inoxidáveis e aços ferramenta. Conforme Callister (2018), a dureza final obtida pelo processo de têmpera depende do teor de carbono do aço e do tamanho dos grãos. Aços com teor de carbono mais elevado tendem a apresentar maior dureza após a têmpera.

Portanto, pode-se concluir que o processo de têmpera é uma técnica muito importante para a obtenção de peças com alta resistência mecânica e dureza, porém deve-se tomar cuidado com as tensões internas geradas durante o processo de resfriamento. A escolha correta dos parâmetros de temperatura e taxa de resfriamento é fundamental para garantir a qualidade final da peça. Na Figura 3.10 é possível observar o diagrama esquemático do tratamento térmico de têmpera

Figura 3.10 – Diagrama esquemático do tratamento térmico de têmpera



Fonte: COLPAERT, 2008.

3.2.6 Revenimento

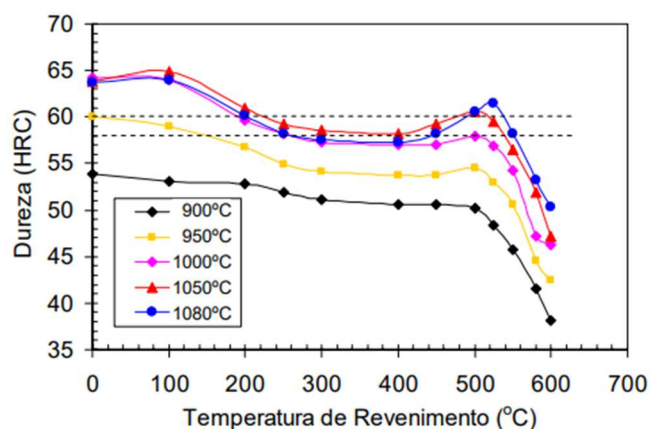
O revenimento é um tratamento térmico de recozimento aplicado em aços temperados para reduzir a fragilidade e melhorar a tenacidade do material. O objetivo principal deste

tratamento é aliviar as tensões residuais geradas durante o processo de têmpera, além de reduzir a dureza e melhorar a ductilidade. De acordo com Callister (2018), o revenimento consiste em aquecer o aço temperado a uma temperatura abaixo da temperatura de austenitização, que pode variar conforme o tipo de aço e a dureza desejada. O autor menciona ainda que a temperatura ideal de revenimento varia entre 150°C e 650°C.

Segundo Krauss (2015), o revenimento é um tratamento térmico que pode ser dividido em três estágios: a etapa inicial, a etapa intermediária e a etapa final. Na primeira etapa, que ocorre a temperaturas mais baixas, as tensões residuais são aliviadas e a dureza do material é reduzida. Na segunda etapa, a dureza continua a diminuir e a ductilidade aumenta. Na terceira e última etapa, a dureza atinge um valor mínimo e a ductilidade é maximizada.

De acordo com Souza e Silva (2016) a temperatura de revenimento também afeta a microestrutura do material. A estrutura martensítica resultante da têmpera é composta de martensita e austenita retida. Durante o revenimento, a austenita retida é transformada em ferrita e perlita, o que melhora a tenacidade do material. Além da temperatura, Do Vale (2010), diz que o tempo de revenimento também é um fator importante no tratamento. Tempos mais longos podem reduzir ainda mais a dureza do material e melhorar a tenacidade, enquanto tempos mais curtos podem não ser suficientes para eliminar as tensões residuais e melhorar a ductilidade. Na Figura 3.11 é demonstrado a variação da dureza em função do aumento da temperatura de revenimento.

Figura 3.11 -Variação da dureza em função do aumento da temperatura de revenimento.

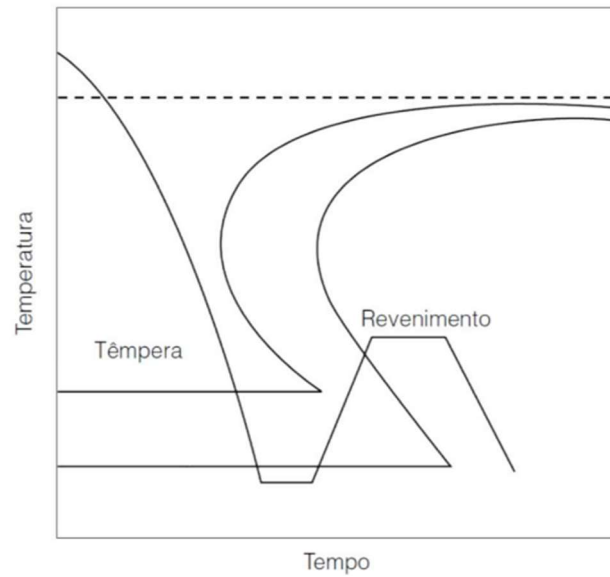


Fonte: MEDANHA, 2008.

Deste modo, o revenimento é um tratamento térmico importante para reduzir a fragilidade e melhorar a tenacidade de aços temperados. A temperatura e o tempo de revenimento devem ser cuidadosamente selecionados para atender aos requisitos específicos

de cada aplicação e atingir as características específicas desejadas. Na Figura 3.12 é representado o ciclo de têmpera junto ao revenimento.

Figura 3.12 -ciclo de têmpera junto ao revenimento.



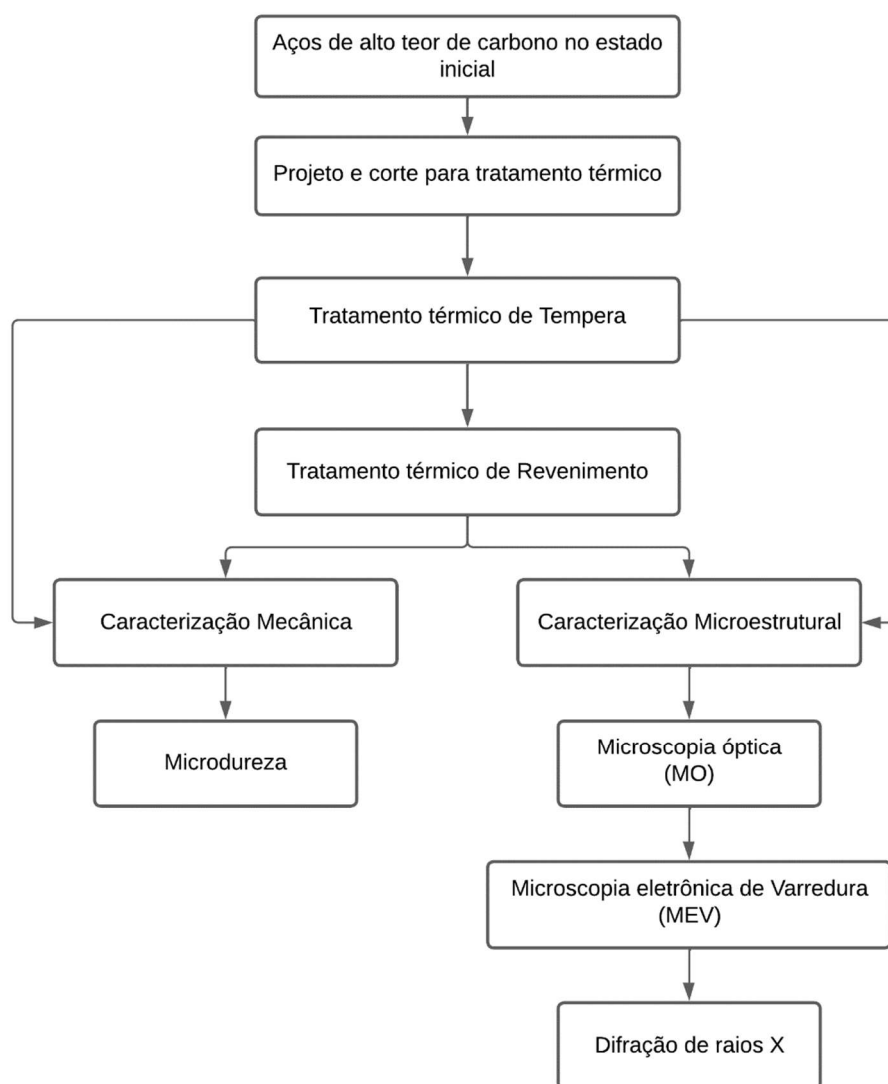
Fonte: COSTA E SILVA, 2010

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Descrição Geral do Trabalho

Neste estudo, o foco foi investigar como as variações nos parâmetros de tratamento térmico influenciam tanto a microestrutura quanto a dureza de dois aços de alto teor de carbono, um deles com a presença dos elementos de liga cromo e vanádio, submetidos aos processos de tempera e revenimento. Na Figura 4.1 podem ser observadas as etapas e testes conduzidos neste trabalho, proporcionando uma compreensão detalhada de todo o procedimento.

Figura 4.1 -Fluxograma geral do projeto.



4.2 Materiais

Como objeto de pesquisa foram empregadas chapas de aço DIN 100CrV2, chapas estas doadas pela empresa Aperam, e chapas de aço SAE 1095 compradas pelo autor. As composições químicas (% peso) estão apresentadas nas Tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente.

Tabela 4.1 – Composição química (% em peso) do aço DIN 100CrV2 utilizado no trabalho

Elemento	C	Mn	P	S	Si	Cr	V
peso	0,95%	0,50/0,80%	0,03%	0,035	0,45	0,70/1,005	0,255

Fonte: Aperam, 2008.

Tabela 4.2 – Composição química (% em peso) do aço SAE 1095 utilizado no trabalho

Elemento	C	Mn	P	S
peso	0,95%	0,60/0,90%	$\leq 0,04\%$	$\leq 0,05\%$

Fonte: Aperam, 2008.

4.3 Preparação das amostras

Inicialmente, as chapas foram cortadas em tiras, que, por sua vez, foram transformadas em peças retangulares utilizando uma máquina de corte metalográfico.

As amostras resultantes foram preparadas para a realização dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento. Após os tratamentos, as amostras foram selecionadas para análises da microestrutura por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, testes de dureza e ensaios de difração de raios X.

4.4 Tratamentos térmicos

4.4.1 Têmpera realizada no experimento

O primeiro tratamento térmico realizado foi o de têmpera, com aquecimento a 900°C, utilizando as amostras de aço SAE 1095 e DIN 100CrV2. Para esse tratamento, foram construídas quatro gaiolas de arame, cada uma contendo três amostras de aço entrelaçadas,

permitindo o manuseio simultâneo das amostras, as gaiolas projetadas podem ser observadas na Figura 4.2. O forno da marca Brasimet foi aquecido a 900°C e as gaiolas foram colocadas dentro do forno. As amostras permaneceram no forno por um tempo de encharque de 45 minutos, o tempo de encharque foi escolhido de acordo com a pesquisa do Costa (2015). Após esse período, as amostras foram rapidamente retiradas e resfriadas em um recipiente com água, concluindo o tratamento de têmpera.

Figura 4.2 – Gaiolas projetadas para experimento



Fonte: Própria do autor, 2024

No segundo tratamento térmico de têmpera, os mesmos parâmetros foram mantidos, porém, a temperatura de aquecimento foi de 980°C, sendo utilizadas apenas amostras de aço DIN 100CrV2. Na Tabela 4.3 é possível observar o resumo do processo de têmpera realizado.

Tabela 4.3 – Parâmetros do processo de tempera realizado

Tratamento térmico	Temperaturas	Tempo de encharque	Meio de resfriamento	Aço utilizado
Tempera	900°C	45 min	água	DIN100 CrV2 e SAE 1095
	980°C			DIN100 CrV2

Fonte: Produzido pelo autor, 2024.

4.4.2 Revenimento realizado no experimento

Após a têmpera, foi realizado o tratamento de revenimento. Para cada processo de têmpera citado anteriormente, foram feitos três revenimentos com diferentes temperaturas. O forno utilizado foi o mesmo empregado na têmpera dos materiais.

Utilizando amostras de aço SAE 1095 e DIN 100CrV2, os parâmetros de preparação das amostras foram os mesmos que na têmpera. No primeiro revenimento, as amostras foram aquecidas a 200°C, mantidas nessa temperatura por um tempo de 60 min e, em seguida, resfriadas à temperatura ambiente.

O segundo revenimento foi realizado da mesma forma, com aquecimento a 350°C. O terceiro revenimento seguiu o mesmo processo, com aquecimento a 500°C. Assim, foi finalizada a etapa de tratamentos térmicos. Na Tabela 4.4 é possível observar o resumo do processo de revenimento realizado.

Tabela 4.4 – Parâmetros do processo de tempera realizado

Tratamento térmico	Temperaturas	Tempo de encharque	Meio de resfriamento	Aço utilizado
Revenimento	200°C	60 min	ar	Todas as amostras temperadas
	350°C			
	500°C			

Fonte: Produzido pelo autor, 2024.

4.5 Caracterização Microestrutural

Para a obtenção das análises microestruturais por microscopia ótica (MO), as amostras passaram por um processo detalhado de preparação após cada etapa de tratamento térmico. As amostras foram embutidas a frio utilizando formas de silicone e a resina empregada foi o polímero PMMA (Polimetilmetacrilato). Após o embutimento, as amostras foram faceadas na base para garantir melhor estabilidade durante o processo de análise. Em seguida, as amostras foram lixadas em lixadeiras das marcas Struers, Teclago e Arotec, na seguinte sequência: #120, #240, #320, #420 e #600. Posteriormente, as peças foram polidas em politrizes das marcas Arotec e Struers utilizando pasta de diamante com partículas de 9 µm e, em seguida, com partículas de 3 µm, tendo o álcool como fluido refrigerante e lubrificante. Após a

preparação, as amostras foram submetidas a ataque químico em uma capela de exaustão de gases da marca Buzattos, com o reativo Nital a 3% para revelar as microestruturas.

Ao término na preparação metalográfica, as amostras foram analisadas em um microscópio óptico (MO) da marca Fortel com sistema de digitalização da marca Kontrol, considerando duas ampliações em cada situação. Nesse caso, todas as condições foram analisadas. Também foram realizadas análises por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), com detector de elétrons secundários, em um microscópio da marca Shimadzu, com foco nas amostras que passaram por tratamentos térmicos específicos, incluindo aquelas apenas temperadas e as temperadas e revenidas a 500°C.

A difração de raios X foi empregada para identificar a eventual presença de austenita retida e ainda de carbonetos nos aços submetidos aos tratamentos térmicos. Para essa análise, foram escolhidos os aços apenas temperados, bem como aqueles revenidos a 200°C e 500°C. O equipamento empregado foi um difratômetro da marca Shimadzu, com radiação Cu K α , e o experimento foi conduzido com ângulo de varredura de 40° a 120°, passo de 0,02 s e tempo de 2 s por passo. A preparação das amostras consistiu em corte e realização de uma decapagem química na capela de exaustão de gases com ácido clorídrico por cerca de 240 min. Essa operação foi conduzida com o objetivo de retirar os eventuais efeitos do corte nos resultados, ou seja, retirar uma camada superficial do material onde a austenita poderia ter transformado em martensita por deformação durante a preparação.

4.6 Caracterização Mecânica

Para a caracterização mecânica das amostras, foi utilizado o ensaio de microdureza Vickers em um equipamento da marca Shimadzu. As amostras, após os tratamentos térmicos, passaram pela mesma preparação descrita na etapa anterior, incluindo embutimento, lixamento e polimento.

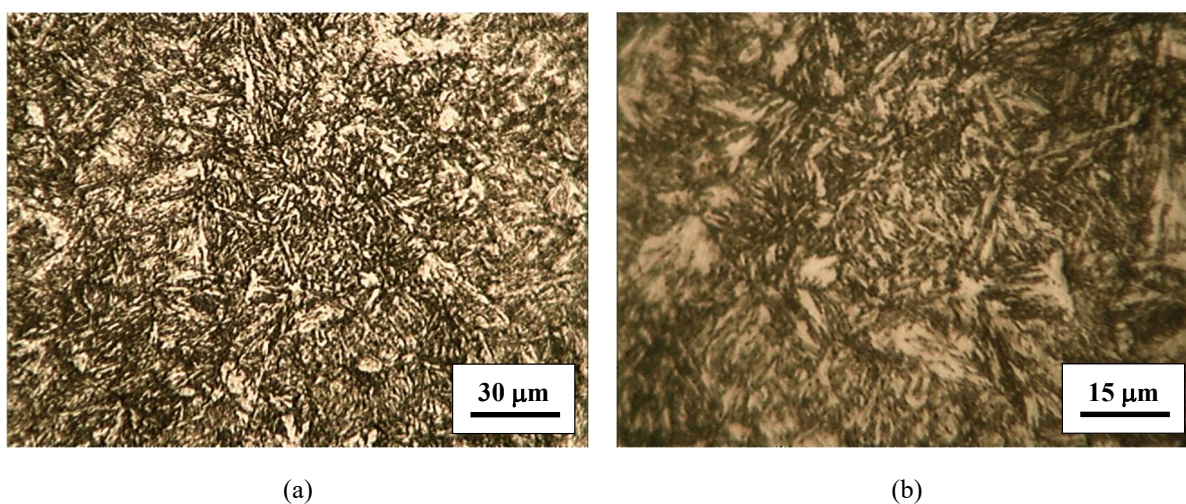
Foram realizados 10 testes em cada amostra, utilizando uma carga de 2 kgf e tempo de aplicação de 15 s, para avaliar de maneira geral a estrutura. Após a realização dos testes, os dados foram agrupados e organizados em uma tabela, permitindo a avaliação do comportamento da dureza em função dos tratamentos térmicos aplicados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização microestrutural por microscopia óptica

Na Figura 5.1 é apresentada a microestrutura obtida por microscopia óptica (MO) do aço DIN 100CrV2, temperado em água após aquecimento a 980°C. De modo geral, esse aço exibe uma microestrutura composta predominantemente por fase e constituinte martensita. Na imagem, é possível observar claramente a morfologia acicular da martensita, com seu formato de ripas e plaquetas.

Figura 5.1 – Microestrutura (MO) do aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento à 980°C

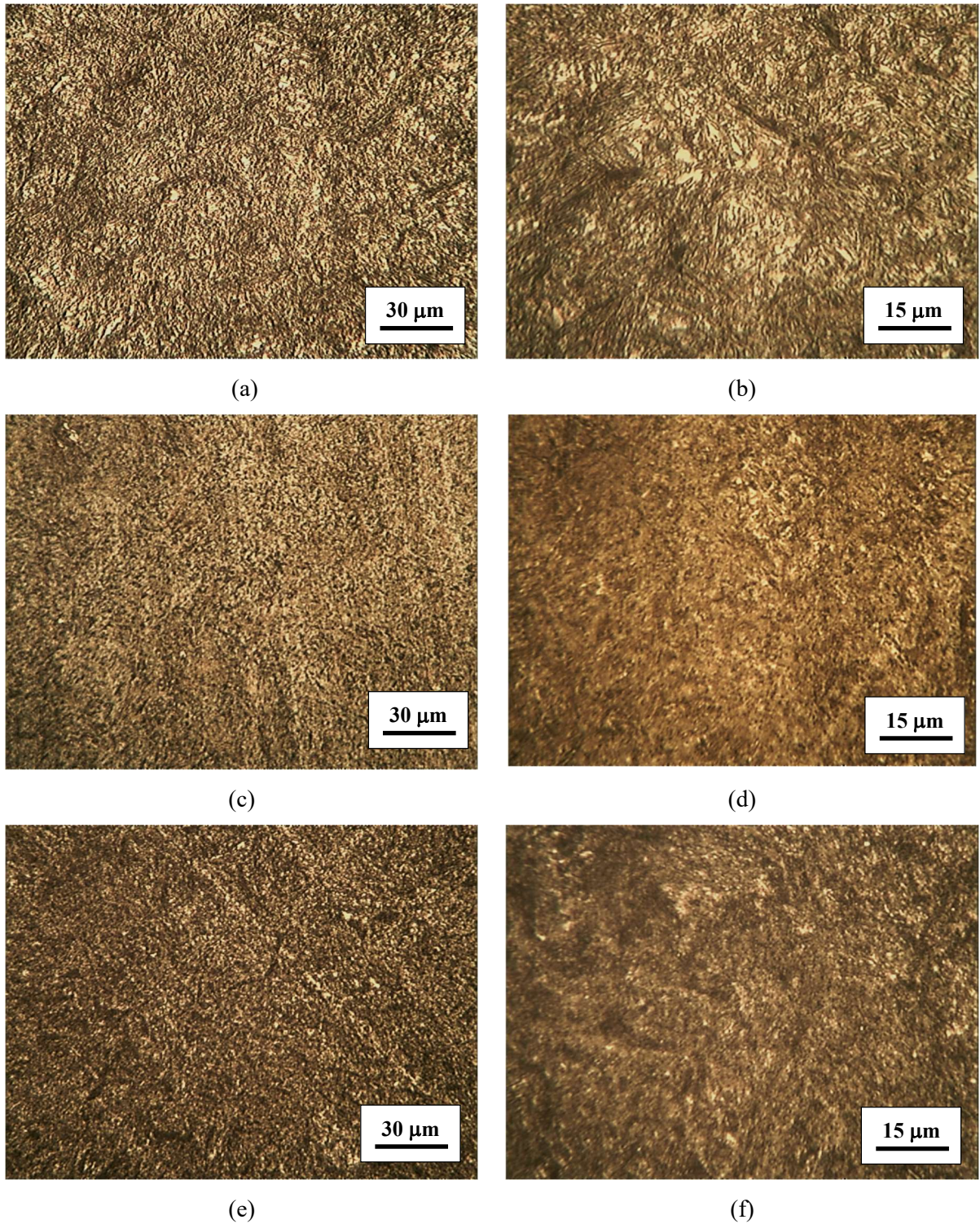


(a) e (b) ampliações distintas

Fonte: Próprio autor

Na Figura 5.2 podem ser observadas as micrografias do aço DIN 100CrV2 submetido à têmpera a 980°C seguida de tratamento térmico de revenimento nas temperaturas de 200°C, 350°C e 500°C. O revenimento é realizado com o objetivo de reduzir a fragilidade resultante da têmpera, além de aumentar a tenacidade do aço. As micrografias obtidas para cada temperatura confirmam esse efeito, mostrando que, à medida que a temperatura de revenimento aumenta, a martensita se dissolve progressivamente na microestrutura, dificultando a identificação clara da morfologia acicular do constituinte.

Figura 5.2 – Microestrutura (MO) do aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento à 980°C e revenido em diferentes temperaturas – 200°C, 350°C, 500°C

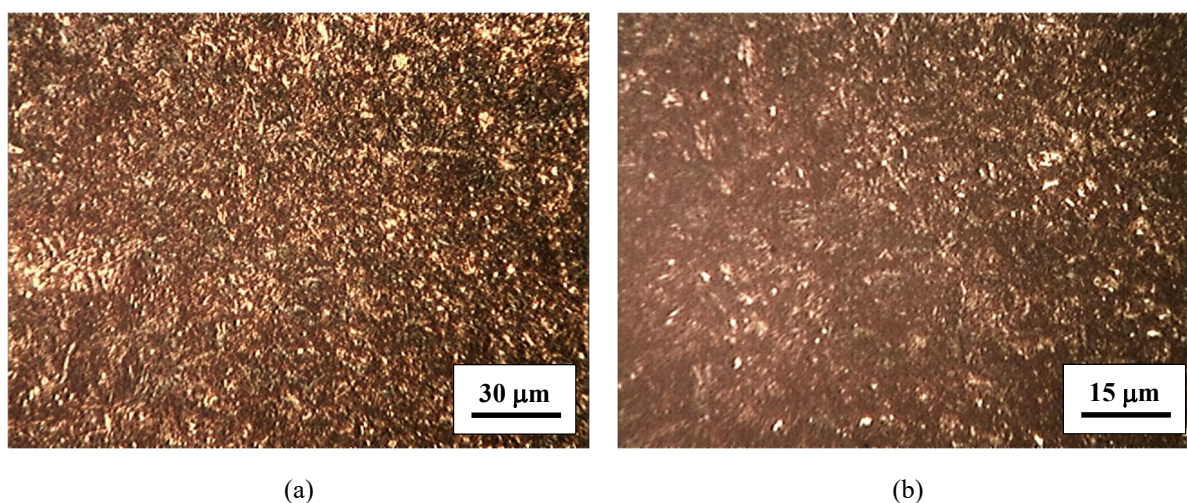


revenimento – ampliações distintas: (a) e (b) 200°C, (c) e (d) 350°C, (e) e (f) 500°C

Fonte: Próprio autor, 2024.

Na Figura 5.3 podem ser verificadas as micrografias do aço DIN 100CrV2, que foi aquecido a 900°C e submetido a resfriamento em água durante o processo de têmpera. Assim como no caso anterior, ocorreu a formação de martensita. No entanto, neste caso, as agulhas de martensita parecem ser mais finas. Essa formação de agulhas mais finas pode estar relacionada a uma dissolução apenas parcial de carbonetos dos elementos de liga cromo e vanádio que poderiam estar presentes no material em seu estado inicial. Com a dissolução apenas parcial, menos carbono estaria disponível na austenita antes do resfriamento na têmpera, o que geraria um constituinte com características mais próximas da martensita fina. Por outro lado, para o caso do aquecimento a 980°C na têmpera, Figura 5.1, a temperatura mais elevada promoveria a solubilização mais completa do material, resultando em austenita e, portanto, martensita de maior teor de carbono, com morfologia tendendo mais para grosseira.

Figura 5.3 – Microestrutura (MO) do aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento à 900°C.



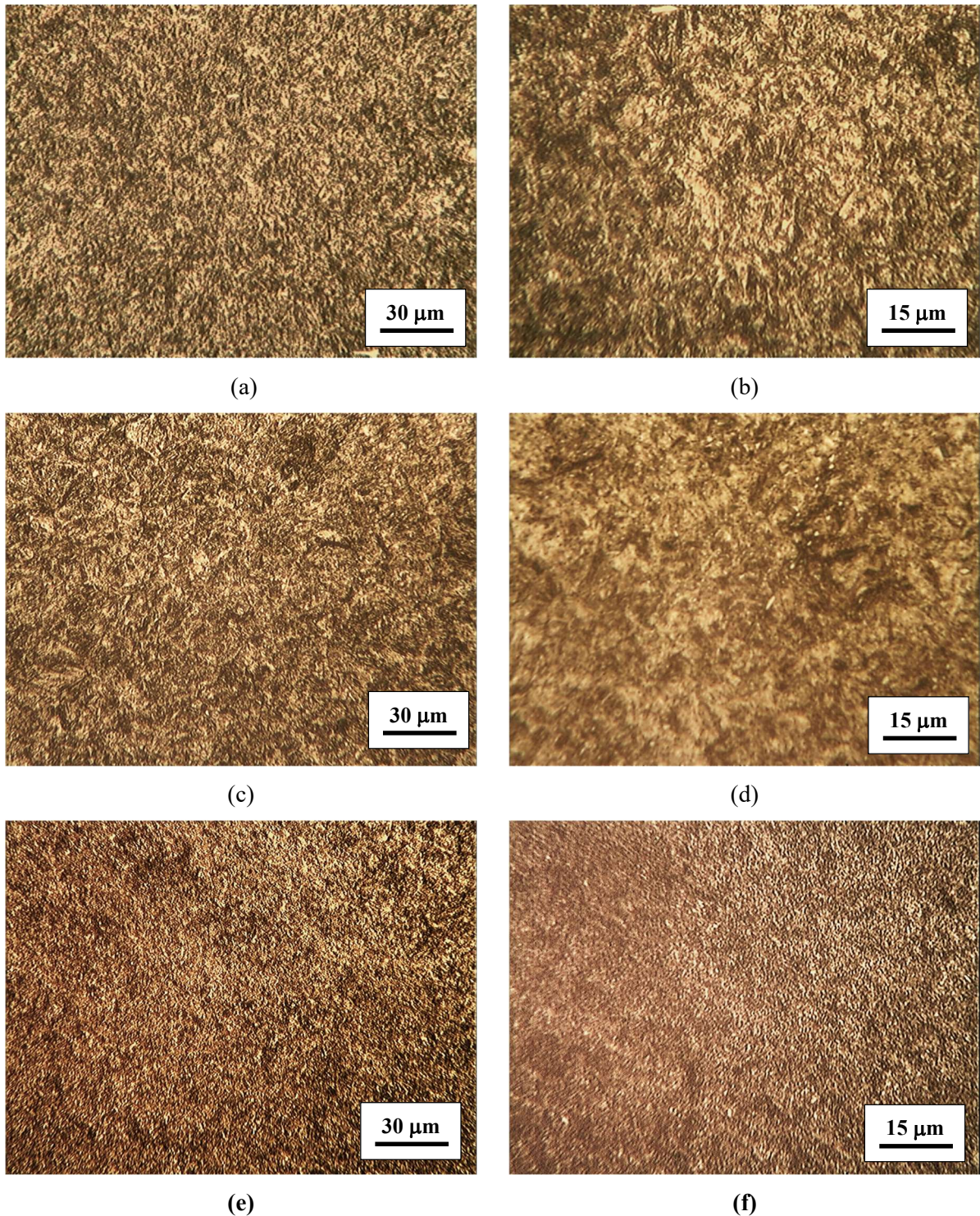
(a) e (b) ampliações distintas

Fonte: Próprio autor, 2024.

Na Figura 5.4 são mostradas imagens da microestrutura (MO) do mesmo aço após o tratamento térmico de revenimento, realizado em diferentes valores de temperaturas e crescentes. Os resultados estão em acordo com o que a literatura já indica: a decomposição progressiva da martensita, que vai tornando-se mais difusa com a elevação do tempo de tratamento. Inicialmente, observam-se carbonetos finos e dispersos, seguidos pela formação

de precipitados maiores. Por fim, a martensita é substancialmente revertida, tornando sua identificação na MO ainda mais difícil (KRAUSS, 2015).

Figura 5.4 – Microestrutura (MO) do aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento à 900°C e revenido em diferentes temperaturas – 200°C, 350°C, 500°C

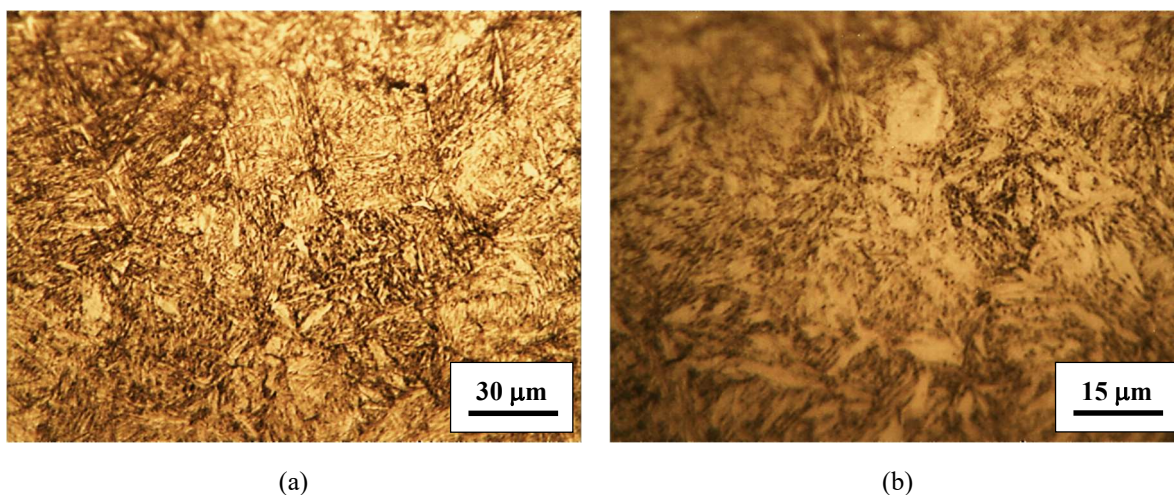


revenimento – ampliações distintas: (a) e (b) 200°C, (c) e (d) 350°C, (e) e (f) 500°C

Fonte: Próprio autor, 2024

Em última análise, a microscopia óptica revelou, nas Figuras 5.5 e 5.6, a microestrutura do aço SAE 1095, que foi temperado com aquecimento a 900°C e, posteriormente, submetido a revenimento com as temperaturas de 200°C, 350°C e 500°C. Nesta análise, observou-se que a morfologia e presença das fases seguiu um padrão similar ao que foi verificado para o aço DIN 100CrV2. O aço SAE 1095, quando apenas temperado, apresenta uma morfologia de martensita bem visível, com formato de agulhas. Com o aumento da temperatura durante o revenimento, ocorre a decomposição progressiva da martensita, tornando cada vez mais difícil identificar o formato de agulhas. Além disso, as partes mais claras na microscopia óptica (MO) podem indicar a presença de austenita retida. No entanto, a identificação precisa dessas fases requer análises adicionais, como microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios X (DRX).

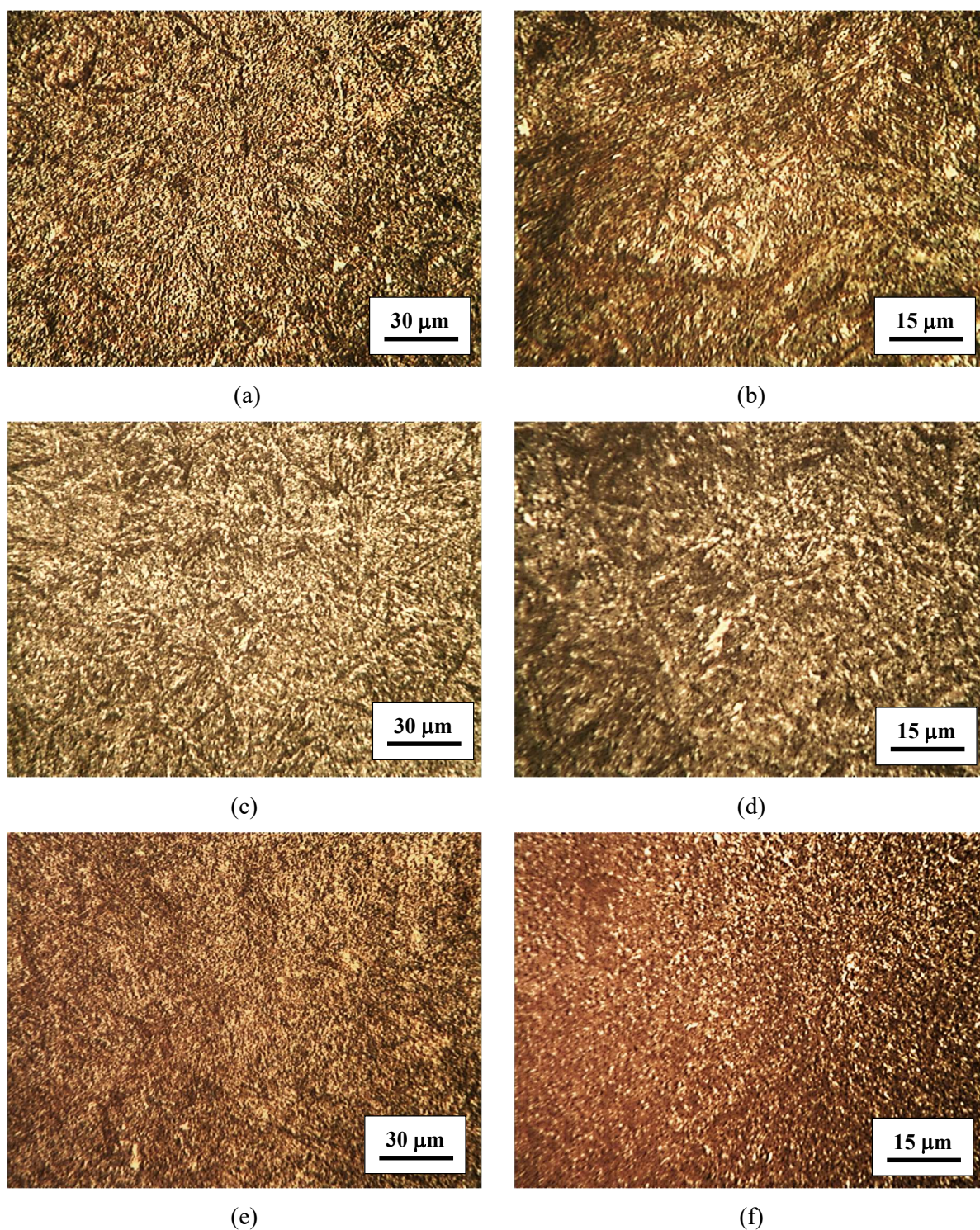
Figura 5.5 – Microestrutura (MO) do aço SAE 1095 temperado em água com aquecimento à 900°C



(a) e (b) ampliações distintas

Fonte: Próprio autor, 2024.

Figura 5.6 – Microestrutura (MO) do aço SAE 1095 temperado em água com aquecimento à 900°C e revenido em diferentes temperaturas – 200°C, 350°C, 500°C



revenimento – ampliações distintas: (a) e (b) 200°C, (c) e (d) 350°C, (e) e (f) 500°C

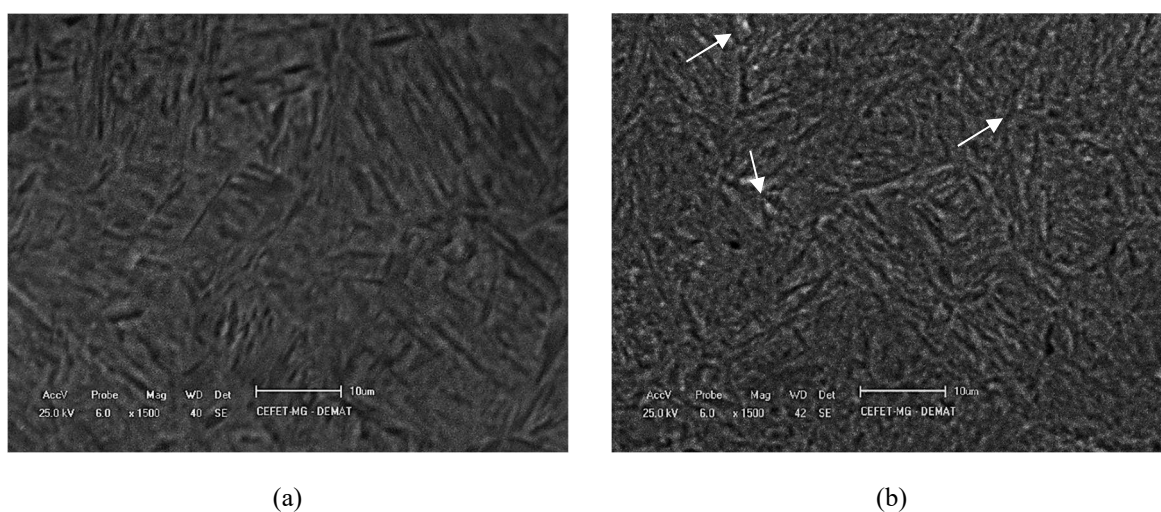
Fonte: Próprio autor, 2024

5.2 Microscopia eletrônica de varredura

Na Figura 5.7 são observadas as imagens obtidas por MEV do aço DIN 100CrV2, temperado em água após aquecimento a 980°C, e do mesmo aço revenido a 500°C. Nas Figuras 5.8 e 5.9 são reveladas as imagens de MEV dos aços DIN 100CrV2 e SAE 1095, respectivamente, ambos temperados em água após aquecimento a 900°C e posteriormente revenidos a 500°C. Foi avaliado o comportamento microestrutural no início do processo de têmpera e na última temperatura utilizada no revenimento, para a qual espera-se uma alteração mais acentuada.

Em todos os casos analisados, observou-se um processo semelhante ao que foi verificado por microscopia óptica nas imagens de microscopia eletrônica. Inicialmente, as imagens dos aços apenas temperados revelam a morfologia da martensita. Após o revenimento, essa martensita teve sua morfologia alterada, mostrando-se mais dissolvida na estrutura, resultando na formação de martensita revenida. Nesse caso, para as amostras revenidas, parece ter ocorrido a formação de carbonetos (indicados por setas), tanto para o aço DIN 100CrV2, considerando as duas temperaturas, como para o aço SAE 1095, identificadas como partículas relativamente circulares de dimensões reduzidas. Para o aço DIN 100CrV2, esses carbonetos podem ser de ferro, mas também de cromo e vanádio.

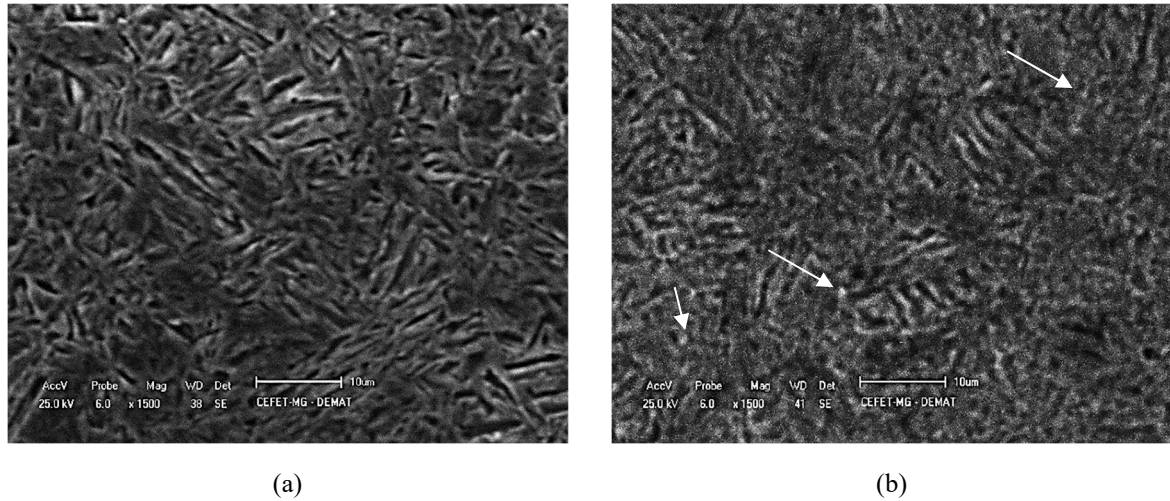
Figura 5.7 – Microestrutura (MEV) do aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento à 980°C com e sem revenimento a 500°C



(a) aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento a 980°C e (b) Aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento a 980 e revenido a 500°C.

Fonte: Próprio autor

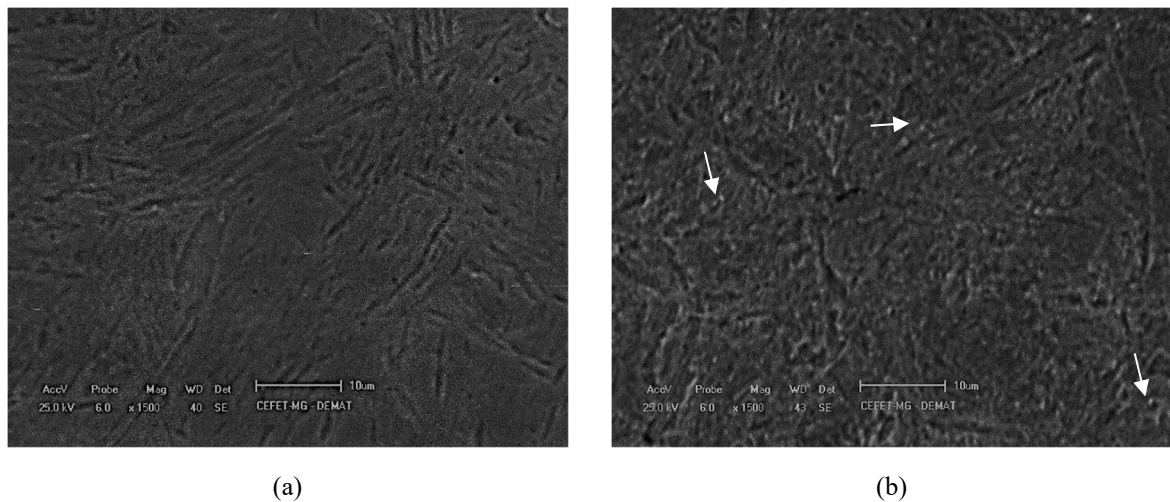
Figura 5.8 – Microestrutura (MEV) do aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento à 900°C com e sem revenimento a 500°C



(a) aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento a 900°C e (b) Aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento a 900 e revenido a 500°C.

Fonte: Próprio autor

Figura 5.9 – Microestrutura (MEV) do aço SAE 1095 temperado em água com aquecimento à 900°C com e sem revenimento a 500°C



(a) aço SAE 1095 temperado em água com aquecimento a 900°C e (b) Aço SAE 1095 temperado em água com aquecimento a 900 e revenido a 500°C.

Fonte: Próprio autor

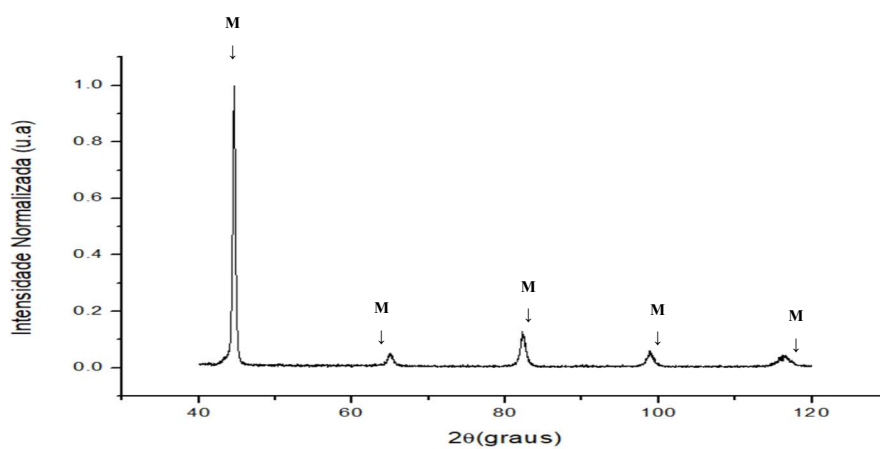
5.2 Difração de Raios X

Na Figura 5.10 são observados os difratogramas obtidos para o aço DIN 100CrV2 aquecido a 980°C, temperado em água, com e sem revenimento a 200°C e 500°C. Já nas Figuras 5.11 e 5.12 são mostrados os difratogramas dos aços DIN 100CrV2 e SAE 1095, aquecidos a 900°C, temperados em água, com e sem revenimento a 200°C e 500°C, respectivamente.

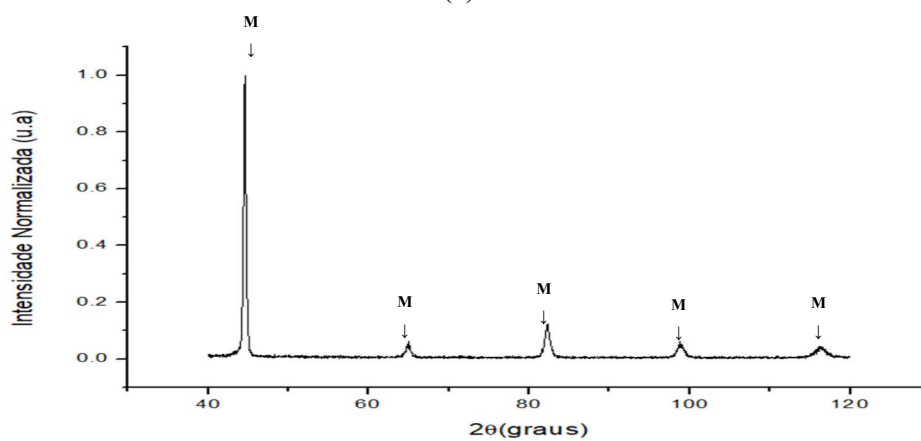
Em todos os difratogramas apresentados aparecem apenas os picos relativos à fase martensita (M). Essa predominância pode ser explicada por alguns fatores, como o ciclo térmico aplicado e o processo de formação da martensita. A martensita é formada a partir da austenita durante o resfriamento rápido (têmpera), especialmente em aços com alta capacidade de endurecimento, como o DIN 100CrV2 e o SAE 1095. Após o aquecimento na faixa de austenitização desses aços, o resfriamento brusco em água promove a formação quase completa de martensita. Acredita-se que alguma austenita retida está presente nas amostras temperadas. No entanto, a quantidade deve ser reduzida, não permitindo a detecção pela técnica empregada.

Nos difratogramas referentes aos tratamentos térmicos de revenimento, observa-se que a 200°C é comum a microestrutura permanecer predominantemente martensítica, já que essa temperatura é baixa e não há uma transformação significativa em outras fases, normalmente apenas o início de precipitação de carbonetos, como os carbonetos épsilon, e como consequência a presença de martensita de menor teor de carbono (BHADESHIA, 2001). No caso do revenimento a 500°C, transformações mais acentuadas podem ocorrer, com a formação de carbonetos diversos, sendo inclusive mais intensa, e a decomposição da martensita, transformando-se em ferrita. Nos difratogramas não é possível identificar picos referentes a carbonetos e os picos apontados anteriormente como típicos de martensita, para os materiais temperados e revenidos a 200°C, podem ser identificados como aqueles referentes à ferrita (α) para os aços revenidos a 500°C, uma vez que esses “coincidem” em termos de ângulo de varredura.

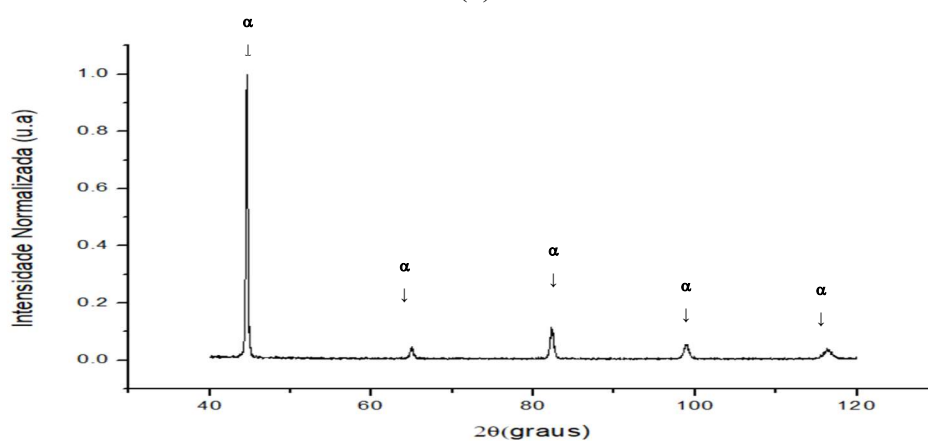
Figura 5.10 – Difratomogramas das amostras do aço DIN 100CrV2 temperado em água e aquecido a 980°C com e sem revenimento a 200°C e 500°C



(a)



(b)

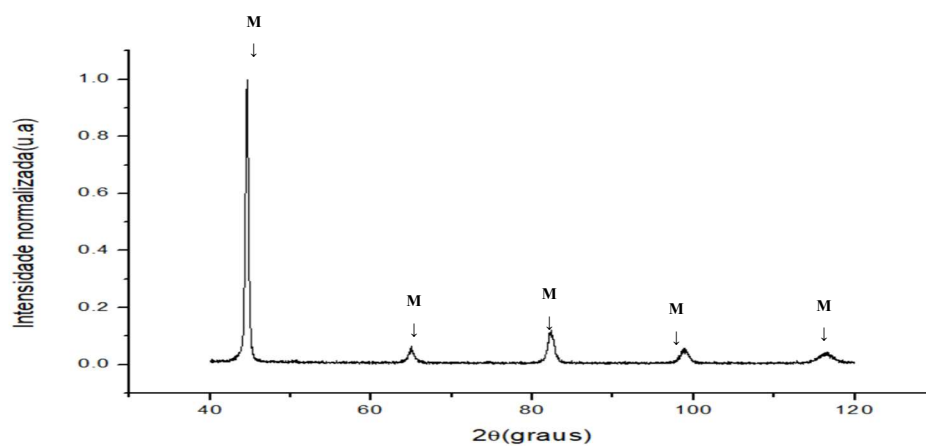


(c)

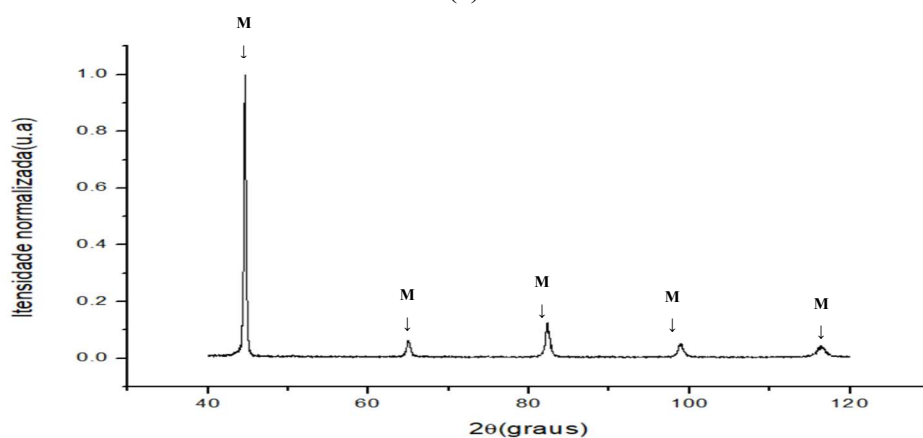
(a) aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento a 980°C, (b) Aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento a 980 e revenido a 200°C. e (c) Aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento a 980 e revenido a 500°C.

Fonte: Próprio autor

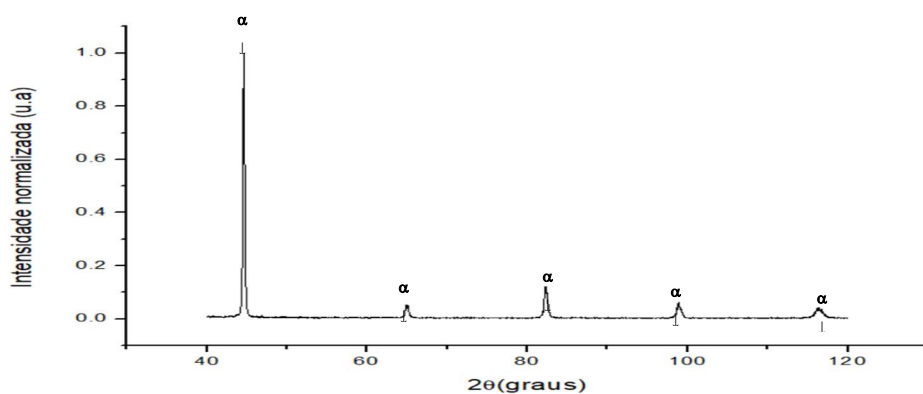
Figura 5.11 – Difratogramas das amostras do aço DIN 100CrV2 temperado em água e aquecido a 900°C com e sem revenimento a 200°C e 500°C



(a)



(b)

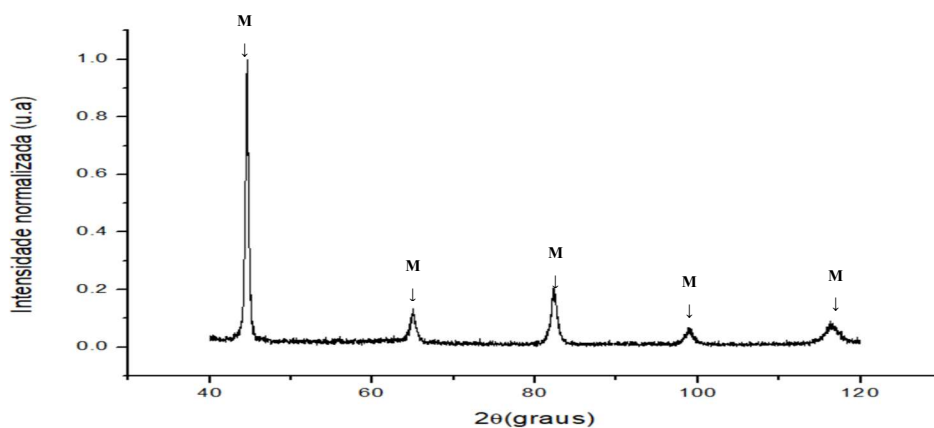


(c)

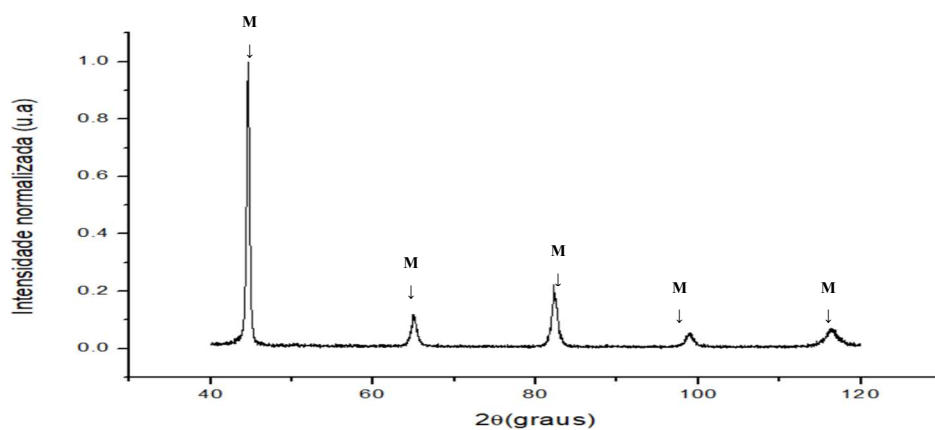
(a) aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento a 900°C, (b) Aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento a 900 e revenido a 200°C. e (c) Aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento a 900 e revenido a 500°C.

Fonte: Próprio autor

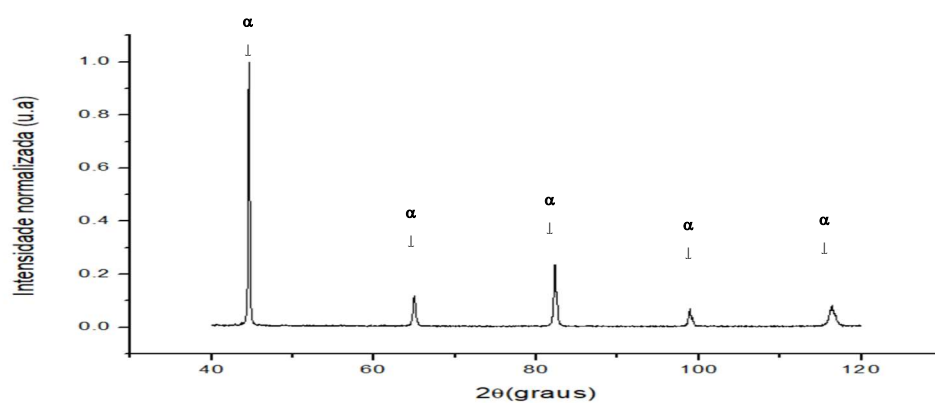
Figura 5.12 – Difratomogramas das amostras do aço SAE 1095 temperado em água e aquecido a 900°C com e sem revenimento a 200°C e 500°C



(a)



(b)



(c)

(a) aço SAE 1095 temperado em água com aquecimento a 900°C, (b) Aço SAE 1095 temperado em água com aquecimento a 900 e revenido a 200°C. e (c) Aço DIN SAE 1095 temperado em água com aquecimento a 900 e revenido a 500°C.

Fonte: Próprio autor

5.3 Dureza

Nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 são apresentados os dados coletados durante os ensaios de microdureza após os tratamentos térmicos. A Tabela 5.1 refere-se ao aço DIN 100CrV2 aquecido a 980°C, enquanto as Tabelas 5.2 e 5.3 referem-se aos aços DIN 100 CrV2 e SAE 1095, respectivamente, aquecidos a 900°C.

Tabela 5.1 – Dureza obtida do aço DIN 100 CrV2 temperado em água com aquecimento a 980°C e revenido em diferentes temperaturas – 200°C, 350°C, 500°C

Tratamento térmico	Somente temperado	Temperado e revenido a 200°C	Temperado e revenido a 350°C	Temperado e revenido a 500°C
Dureza Média	828,5 HV	750,1 HV	639,8 HV	498,1 HV
Desvio padrão	11,9	9,7	5,7	4,0

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 5.2 – Dureza obtida do aço DIN 100 CrV2 temperado em água com aquecimento a 900°C e revenido em diferentes temperaturas – 200°C, 350°C, 500°C

Tratamento térmico	Somente temperado	Temperado e revenido a 200°C	Temperado e revenido a 350°C	Temperado e revenido a 500°C
Dureza Média	846,8 HV	774,4 HV	656,7 HV	470,5 HV
Desvio padrão	11,13	11,2	7,3	4,4

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 5.3 – Dureza obtida do aço SAE 1095 temperado em água com aquecimento a 900°C e revenido em diferentes temperaturas – 200°C, 350°C, 500°C

Tratamento térmico	Somente temperado	Temperado e revenido a 200°C	Temperado e revenido a 350°C	Temperado e revenido a 500°C
Dureza Média	867 HV	752,7 HV	565,5 HV	391,8 HV
Desvio padrão	7,4	8,6	7,8	2,7

Fonte: Produzido pelo autor.

De acordo com a Aperam (2008), o aço DIN 100CrV2, sem tratamento térmico, apresenta dureza entre 294 HV e 412 HV. Nesta análise, considerando o aço temperado com aquecimento a 980°C, fica evidente que o tratamento térmico de têmpera foi eficaz para todas

as condições, resultando em um aumento de dureza superior a 200%, como era esperado, dado que o objetivo da têmpera é justamente elevar a dureza do aço.

Com a aplicação do tratamento térmico de revenimento a 200°C, 350°C e 500°C, observa-se uma redução na dureza em comparação à têmpera. Essa redução está associada ao objetivo do revenimento, que é restaurar a tenacidade do material, impactando, no entanto, na estrutura martensítica previamente gerada e, portanto, na dureza dos aços. Durante o revenimento, caso haja austenita retida na microestrutura, ela pode passar por um processo de decomposição, transformando-se em fases mais estáveis e menos duras. Em temperaturas de revenimento mais baixas, a austenita retida pode se transformar em martensita, mas com menor dureza e maior tenacidade. Em temperaturas mais elevadas, pode ocorrer a formação de bainita ou até mesmo ferrita com partículas de cementita, usualmente mencionada como sorbita ou martensita revenida de elevada temperatura, microestruturas mais estáveis que resultam em uma redução na dureza e um aumento na tenacidade.

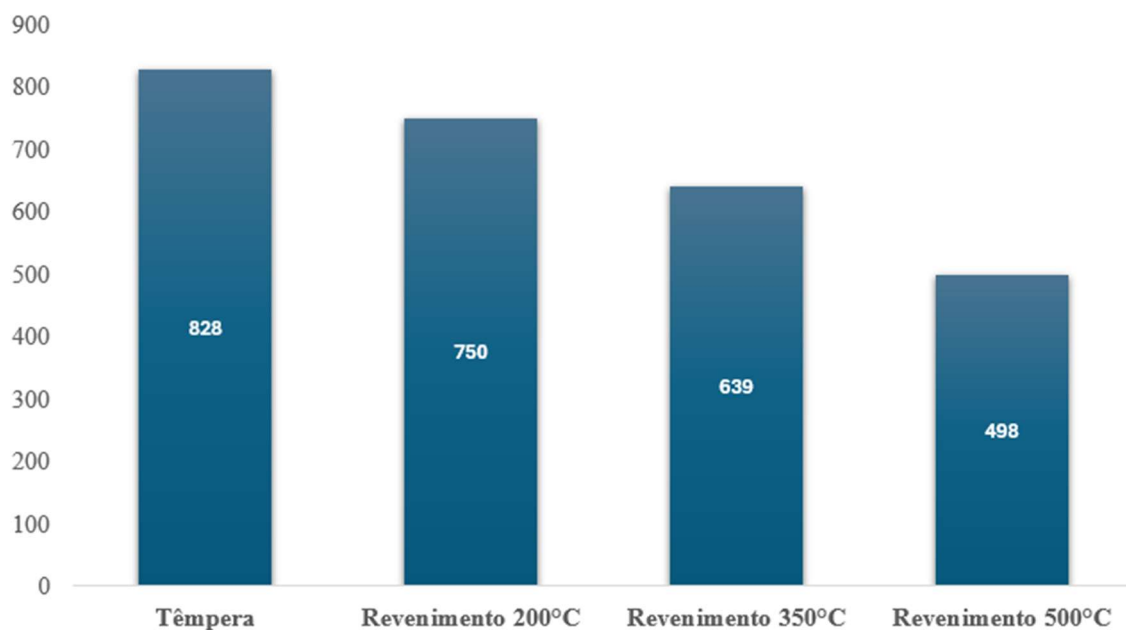
Para os aços DIN 100CrV2 e SAE 1095, que foram aquecidos a 900°C, resfriados em água e submetidos ao revenimento a 200°C, 350°C e 500°C os dados indicam o mesmo comportamento observado anteriormente: inicialmente, há um aumento de dureza devido à têmpera, seguido de uma redução gradual na dureza com a aplicação do revenimento em temperaturas progressivamente mais altas.

Nas Figuras 5.13, 5.14 e 5.15 são demonstrados graficamente os resultados de dureza dos aços estudados em cada parâmetro estabelecido. Comparando os casos, observa-se que, após o tratamento térmico de têmpera, o aço SAE 1095 aquecido a 900°C apresenta uma dureza maior do que o aço DIN 100CrV2, independentemente da temperatura de aquecimento. Essa diferença pode ser explicada pela composição das ligas. O aço DIN 100CrV2 contém elementos de liga adicionais, como cromo e vanádio, que formam carbonetos. Esses carbonetos, embora duros, são menos abundantes que a martensita e podem influenciar na dureza final do material, além de afetar a temperabilidade do aço. De acordo com Bryson (2009), o cromo, por exemplo, pode reduzir a dureza da martensita ao formar carbeto de cromo. Nesse caso, apesar do teor de carbono do aço ser 0,95%, caso o material tenha mantido carbonetos não dissolvidos antes do resfriamento da têmpera, mesmo com o aquecimento a uma temperatura mais elevada, a austenita estava com menor proporção de carbono, gerando similarmente martensita de menor teor de carbono. Sabe-se que a dureza da martensita é altamente influenciada pela presença e quantidade de carbono (KRAUSS, 2015).

Ao analisar a dureza das amostras após o revenimento a 500°C, observa-se que o aço DIN 100CrV2 apresentou maior dureza que o aço SAE 1095. Esse comportamento pode ser

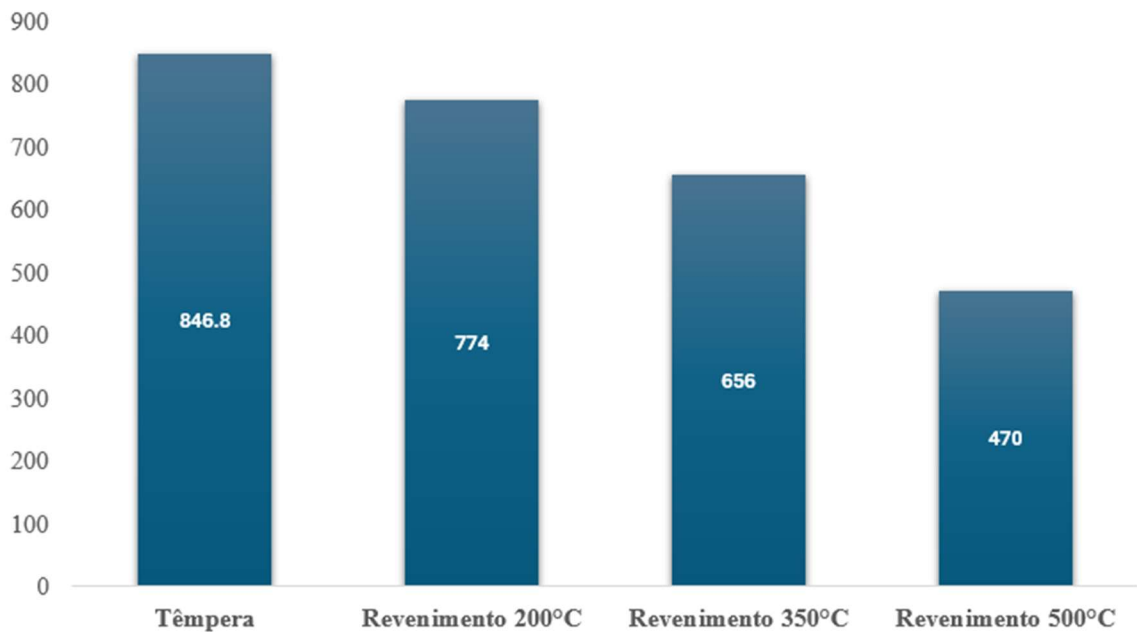
explicado pela maior estabilidade térmica e resistência ao amaciamento do aço DIN 100CrV2 (CANAAN, 2018). Elementos como cromo e vanádio contribuem para a estabilidade térmica da martensita e dos carbonetos, retardando a decomposição da martensita. Além disso, os carbonetos formados durante o revenimento crescem e impedem que a dureza diminua drasticamente, como ocorre no aço SAE 1095, que depende exclusivamente da martensita para sua dureza (CANAAN, 2018).

Figura 5.13 – Evolução de dureza do aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento à 980°C e revenido em diferentes temperaturas – 200°C, 350°C, 500°C



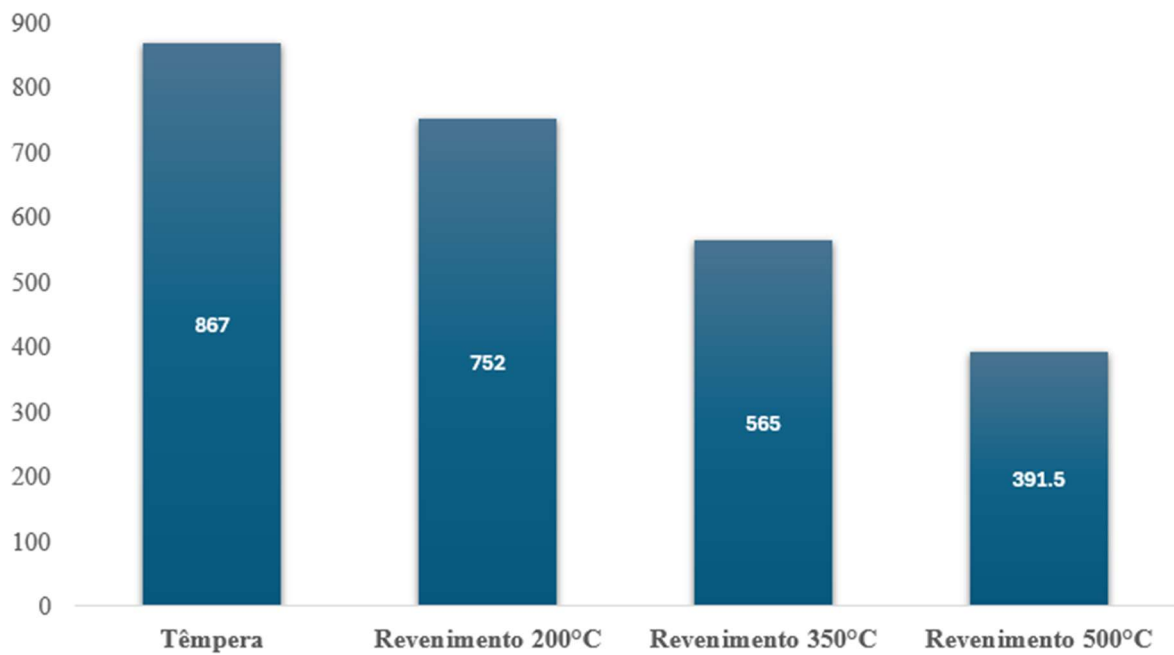
Fonte: Própria do autor, 2024

Figura 5.14 - Evolução de dureza do aço DIN 100CrV2 temperado em água com aquecimento à 900°C e revenido em diferentes temperaturas – 200°C, 350°C, 500°C



Fonte: Própria do autor, 2024

Figura 5.15 - Evolução de dureza do aço SAE 1095 temperado em água com aquecimento à 900°C e revenido em diferentes temperaturas – 200°C, 350°C, 500°C



Fonte: Própria do autor, 2024

6 CONCLUSÃO

A partir dos ensaios realizados nas amostras dos aços DIN 100CrV2 e SAE 1095 após tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, verificou-se que:

- a) As microscopias óptica e eletrônica de varredura revelaram a presença de uma microestrutura composta por martensita nos aços apenas temperados, enquanto os aços que passaram pelo tratamento térmico de têmpera e revenimento apresentaram uma martensita mais dissolvida, conhecida como martensita revenida.
- b) No ensaio de difração de raios X, não foi observada a presença significativa de austenita retida, com a detecção predominante de picos de martensita. Nos aços revenidos a 500°C, também foram identificados picos de ferrita.
- c) O aço SAE 1095, aquecido a 900°C e resfriado em água, apresentou o maior valor de dureza após o tratamento térmico de têmpera. O aço DIN 100CrV2, aquecido a 980°C e 900°C e posteriormente resfriado em água, apresentou maiores valores de dureza no revenimento a 500°C em comparação ao SAE 1095, possivelmente devido à influência dos elementos de liga, como o cromo e o vanádio.

REFERÊNCIAS

- AÇOS Carbono Especificações, características e aplicações.** [S. l.], 2015. Disponível em: <https://brasil.aperam.com/wp-content/uploads/biblioteca/Aperam%20-%20Cat%C3%A1logo%20A%C3%A7os%20Carbono.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2024.
- APERAM. **Aços Carbono: Especificações, características e aplicações.** São Paulo: Aperam, 2008.
- ASM Handbook. **Metallography and Microstructures.** Volume 9, 2004.
- BHADESHIA, H.K.D.H. **Bainite in Steels.** 2 ed. Londres, 2001.
- BRYSON, William. **Heat Treatment, Selection, and Application of Tool Steels.** [S. l.: s. n.], 2009.
- CALLISTER JR., William D.; RETHWISCH, David G. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais.** 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2018.
- CANAAN, Gustavo Levy. **Influência da adição de vanádio nas propriedades mecânicas de aços médio teor de carbono para beneficiamento.** 2007. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.], 2007.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Materiais, Processos e Tratamento.** São Paulo: McGraw-Hill, 2010.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica.** 13. ed. São Paulo: Makron Books, 2015.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns.** 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008.
- COSTA. Avaliação da microestrutura dos aços SAE J403 1045, SAE J403 1075 e DIN100CrV2 após tratamentos térmicos. In: **Anais da ABM WEEK**, [S. l.], p. 2-2, 16 jun. 2015.
- CRUZ, L. C. Da. **Avaliação da capacidade do processo de fabricação em atender especificação de temperabilidade para o aço SAE 1548M.** 2005. 93f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2005.
- CZERWINSKI, Frank. **Heat Treatment: Conventional and Novel Applications.** [S. l.: s. n.], 2012.
- DIETER, George E. **Metalurgia Mecânica.** 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.
- HONEYCOMBE, R.W.K.; BHADESHIA, H. K. D. H. **Steels - Microstructure and Properties.** 2. ed. Butterworth-Heinemann, 1995.

KRAUSS, G. **Steels: Processing, Structure, and Performance**. 2. ed. Ohio: ASM International, 2015.

LAMPMAN, S. **Materials Selection and Design**. ASM International, v.20, 1997.

LOPES, Maximiano. **Efeito da fração de martensita na cinética de formação da austenita em um aço de baixo carbono**. 2012. Dissertação (Mestrado em engenharia de materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.], 2012.

MEDANHA, Adriano. Principais parâmetros metalúrgicos e suas influências na qualidade e desempenho do aço para trabalho a frio AISI D2. In: **Anais do ABM Proceedings**, [S. l.], p. 13-13, 22 ago. 2008.

MOLA EXTRA PESADA EM AÇO ALTO CARBONO. [S. l.], 2012. Disponível em: <https://ciamol.com.br/mola-extra-pesada-em-aco-alto-carbono/>. Acesso em: 9 jan. 2024.

MSPC – Informações Técnicas. **Ferros & Aços I-30: Tratamentos térmicos**. 2009. Disponível em: [S. l.]. Acesso em: 20 ago. 2024.

PANNONI, Fabio Domingos. **Aços Estruturais**. 2005.

RAMÍREZ, Mario. **Estudo da transformação durante o resfriamento contínuo e da microestrutura do aço microligado X80 utilizado na construção de tubos para transporte de gás natural e petróleo**. 2008. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [S. l.], 2008.

REED-HILL, Robert E. (ed.). **Physical Metallurgy Principles**. 2. ed. New York City: Litton Educational Publishing, Inc., 1973.

SANTOS, Fellipe Cros. **Avaliação da influência do teor de cromo e do tratamento térmico de desestabilização da austenita na dureza e resistência ao desgaste abrasivo de ferros fundidos brancos**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [S. l.], 2017.

SILVA, A.V. **Aços e Ligas Especiais**. São Paulo: Editora Blucher, 2010.

SOUZA, D. N.; SILVA, R. A. M. Propriedades mecânicas do aço AISI 1070 temperado e revenido. In: **Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia de Materiais e Metalurgia**, 2016, Gramado, RS. **Anais...** São Paulo: ABM, 2016.

TOTTEN, G. E.; BATES, C. E.; CLINTON, N. A. **Steel Heat Treatment Handbook**. 2. ed. CRC Press, 2011.

VALE, Alan. **Tratamento térmico**. [S. l.: s. n.], 2010.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais**. 4. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1984.

YUEYUE, Jiang. Effect of Ce addition on the nucleation and growth of austenite in ultra-high-strength steel. **Journal of Materials Research and Technology**, [S. l.], p. 1-2, 8 mar. 2023.