

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

VICTOR XAVIER DE OLIVEIRA

**EFEITO DOS PARÂMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO NA**  
**MICROESTRUTURA E NA DUREZA DE UM AÇO DE BAIXO TEOR DE**  
**CARBONO**

BELO HORIZONTE

2025

VICTOR XAVIER DE OLIVEIRA

EFEITO DOS PARÂMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO NA MICROESTRUTURA  
E NA DUREZA DE UM AÇO DE BAIXO 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: Profa. Dra. Elaine Carballo  
Siqueira Corrêa

BELO HORIZONTE

2025

VICTOR XAVIER DE OLIVEIRA

EFEITO DOS PARÂMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO NA MICROESTRUTURA E  
NA DUREZA DE UM AÇO DE BAIXO 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 \_\_/\_\_/2025

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Adriano Amâncio Trajano (CEFET - MG)

---

Profa. Dra. Aline Silva Magalhães (CEFET - MG)

---

Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa (CEFET - MG) (Orientadora)

---

Prof. Dr. Wellington Lopes (CEFET - MG)

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que me acompanharam e me apoiaram ao longo desta jornada acadêmica.

Primeiramente, agradeço imensamente à minha família, que foi meu alicerce em todos os momentos. À minha mãe, Roberta, ao meu pai, Eduardo, às minhas irmãs, Vitória e Wanessa, ao meu irmão, Abner, à minha avó, Maria Alice, à minha bisavó, Francisca, e aos meus tios, Fabrício e Renata. Todos vocês me deram força e suporte durante todo o meu percurso, sempre me proporcionando os recursos necessários para que eu chegasse até aqui.

Sou igualmente grato aos meus amigos do CEFET-MG: Ana Gabriela, Pollyanna, Vinicius, Mariana e Natália. Vocês foram companheiros incríveis que, além de me ajudarem a crescer pessoal e profissionalmente, tornaram minha trajetória mais leve e enriquecedora. Tenho a certeza de que nossa amizade perdurará por toda a vida.

Agradeço especialmente à minha amiga de longa data, Isabele, que esteve ao meu lado desde o primeiro dia, compartilhando comigo tanto os momentos de alegria quanto os de dificuldade. Sua presença foi essencial e sempre me apoiou, celebrando cada conquista ao meu lado.

Um agradecimento especial à minha orientadora, Elaine, pela inspiração e dedicação que sempre me ofereceu. Sua paciência e zelo no desenvolvimento deste trabalho foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico.

Ao técnico de laboratório, Jorge, que se mostrou sempre disposto a me ajudar em todas as atividades essenciais para o andamento deste trabalho. Sua colaboração foi imprescindível.

E, por fim, agradeço ao CEFET-MG, instituição onde vivi os anos mais incríveis da minha vida. Foi neste ambiente que encontrei minha verdadeira vocação profissional e tive a honra de conhecer pessoas incríveis, entre professores, técnicos e colegas, que tornaram essa experiência única e inesquecível. Levo comigo para sempre tudo o que aprendi e todas as vivências que vivi nesse lugar.

## RESUMO

Os aços de baixo teor de carbono são amplamente utilizados na fabricação de fios de soldagem, arames e vergalhões metálicos devido à sua versatilidade, boa trabalhabilidade e características únicas. Esses produtos são produzidos por meio da trefilação, um processo de conformação mecânica a frio que causa intensa deformação plástica. Para recuperar as características microestruturais e mecânicas desses materiais, tratamentos térmicos como normalização e recozimento são aplicados, reduzindo a dureza adquirida durante a deformação plástica devido ao encruamento. Esses tratamentos envolvem o aquecimento do material a uma temperatura pré-definida, manutenção dessa temperatura por um período determinado e resfriamento controlado. A correta compreensão e seleção dos parâmetros de tratamento térmico são cruciais para a otimização dos processos industriais, pois evitam defeitos como crescimento descontrolado de grãos ou ineficiência na recuperação da microestrutura. Este trabalho investiga o efeito dos parâmetros de tratamento térmico na microestrutura e dureza de um aço SAE 1020 trefilado. Análises de microscopia óptica e ensaios de dureza Vickers foram realizados para observar as transformações microestruturais e mecânicas resultantes de diferentes condições de tratamento térmico, variando parâmetros como tempo de encharque e taxa de resfriamento. Os resultados indicam que tanto o tempo de encharque quanto a taxa de resfriamento influenciam a microestrutura e a dureza do aço SAE 1020 trefilado. Observou-se uma tendência de redução da dureza com o aumento do tempo de encharque e a redução da taxa de resfriamento. No entanto, a taxa de resfriamento mostrou ter uma influência mais significativa, com uma redução de dureza mais intensa nas amostras resfriadas dentro do forno em comparação com as resfriadas ao ar.

**Palavras chave:** Aços de baixo teor de carbono. Trefilação. Normalização. Recozimento. Parâmetros de Tratamento Térmico.

## ABSTRACT

Low carbon steels are widely used in the manufacture of welding wires, metal wires, and rebar due to their versatility, good workability, and unique characteristics. These products are produced through drawing, a cold mechanical forming process that causes intense plastic deformation. To recover the microstructural and mechanical characteristics of these materials, heat treatments such as normalization and annealing are applied, reducing the hardness acquired during plastic deformation due to work hardening. These treatments involve heating the material to a predefined temperature, maintaining that temperature for a determined period, and controlled cooling. Correct understanding and selection of heat treatment parameters are crucial for optimizing industrial processes, as they prevent defects such as uncontrolled grain growth or inefficiency in recovering the microstructure. This work investigates the effect of heat treatment parameters on the microstructure and hardness of drawn 1020 steel. Optical microscopy analyses and hardness tests were performed to observe the microstructural and mechanical transformations resulting from different heat treatment conditions, varying parameters such as soaking time and cooling rate. The results indicate that both soaking time and cooling rate influence the microstructure and hardness of drawn 1020 steel. A trend of hardness reduction was observed with increased soaking time and reduced cooling rate. However, the cooling rate showed a more significant influence, with a more intense hardness reduction in samples cooled inside the furnace compared to those cooled in air.

**Keywords:** Low carbon steels. Drawing. Normalization. Annealing. Heat Treatment Parameters.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Comparação entre Escorregamento e Maclação.....	17
Figura 3.2 – Cristal submetido a tensão de cisalhamento.....	18
Figura 3.3 – Discordância Helicoidal.....	19
Figura 3.4 – Movimentação Discordância Cunha.....	20
Figura 3.5 – Movimentação Discordância Helicoidal.....	20
Figura 3.6 – Imagens de discordâncias por microscopia eletrônica.....	21
Figura 3.7 – Etapas processo de recuperação em metal deformado plasticamente.....	27
Figura 3.8 – Formação de subgrãos ou poligonização.....	28
Figura 4.1 – Fluxograma geral do projeto.....	26
Figura 4.2 – Gaiolas utilizadas para transporte de corpos de prova.....	37
Figura 5.1 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado (Estado Inicial) – Seção longitudinal.....	40
Figura 5.2 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado (Estado Inicial) – Seção Transversal.....	41
Figura 5.3 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido à normalização (1 minuto de encharque) – Seção Longitudinal.....	42
Figura 5.4 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido à normalização (5 minutos de encharque) – Seção Longitudinal.....	42
Figura 5.5 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido à normalização (10 minutos de encharque) – Seção Longitudinal.....	43
Figura 5.6 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido à normalização (15 minutos de encharque) – Seção Longitudinal.....	43
Figura 5.7 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido à normalização (1 minuto de encharque) – Seção Transversal.....	44
Figura 5.8 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido à normalização (5 minutos de encharque) – Seção Transversal.....	44
Figura 5.9 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido à normalização (10 minutos de encharque) – Seção Transversal.....	45
Figura 5.10 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido à normalização (15 minutos de encharque) – Seção Transversal.....	45

Figura 5.11 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido ao recozimento (1 minuto de encharque) – Seção Longitudinal.....	46
Figura 5.12 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido ao recozimento (5 minutos de encharque) – Seção Longitudinal.....	47
Figura 5.13 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido ao recozimento (10 minutos de encharque) – Seção Longitudinal.....	47
Figura 5.14 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido ao recozimento (15 minutos de encharque) – Seção Longitudinal.....	48
Figura 5.15 – Imagens da microestrutura das amostras aço SAE 1020 trefilado submetido ao Recozimento (1 minuto de encharque) – Seção Transversal.....	49
Figura 5.16 – Imagens da microestrutura das amostras aço SAE 1020 trefilado submetido ao Recozimento (5 minutos de encharque) – Seção Transversal.....	49
Figura 5.17 – Imagens da microestrutura das amostras aço SAE 1020 trefilado submetido ao Recozimento (10 minutos de encharque) – Seção Transversal.....	49
Figura 5.18 – Imagens da microestrutura das amostras aço SAE 1020 trefilado submetido ao Recozimento (15 minutos de encharque) – Seção Transversal.....	50
Figura 5.19 – Comportamento de microdureza Vickers das amostras de aço 1020 trefilado tratado termicamente seguido de resfriamento ao ar (Seção Longitudinal).....	52
Figura 5.20 – Comportamento de microdureza Vickers das amostras de aço 1020 trefilado tratado termicamente seguido de resfriamento ao ar (Seção Transversal).....	53
Figura 5.21 – Comportamento de microdureza Vickers das amostras de aço 1020 trefilado tratado termicamente seguido de resfriamento dentro do forno (Seção Longitudinal).....	54
Figura 5.22 – Comportamento de microdureza Vickers das amostras de aço 1020 trefilado tratado termicamente seguido de resfriamento dentro do forno (Seção Transversal).....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Composição química (%peso) do aço SAE 1020.....	37
Tabela 4.2 – Plano de procedimento de tratamentos térmicos.....	38
Tabela 5.1 – Microdureza Vickers das amostras de aço 1020 trefilado estado inicial.....	51
Tabela 5.2 – Microdureza Vickers das amostras de aço 1020 trefilado tratado termicamente seguido de resfriamento ao ar (Seção Longitudinal).....	51
Tabela 5.3 – Microdureza Vickers das amostras de aço 1020 trefilado tratado termicamente seguido de resfriamento ao ar (Seção Transversal).....	53
Tabela 5.4 – Microdureza Vickers das amostras de aço 1020 trefilado tratado termicamente seguido de resfriamento dentro do forno (Seção Longitudinal).....	54
Tabela 5.5 – Microdureza Vickers das amostras de aço 1020 trefilado tratado termicamente seguido de resfriamento dentro do forno (Seção Transversal).....	55

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>2 OBJETIVOS</b>	<b>14</b>
<b>2.1 OBJETIVO GERAL</b>	<b>14</b>
<b>2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>14</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>15</b>
<b>3.1 Conformação Mecânica, Deformação Plástica dos Metais e Estrutura Deformada a Frio</b>	<b>15</b>
<b>3.1.1 Conceito de Discordâncias</b>	<b>18</b>
<b>3.1.2 Movimentação de discordâncias</b>	<b>19</b>
<b>3.1.3 Mecanismos de endurecimento (movimentação restrita das discordâncias)</b>	<b>22</b>
<b>3.1.4 Encruamento em materiais metálicos</b>	<b>23</b>
<b>3.2 Processo de Trefilação e Aços para Trefilação de Arame</b>	<b>24</b>
<b>3.3 Fenômenos Termicamente Ativados Presentes nos Tratamentos Térmicos</b>	<b>25</b>
<b>3.3.1 Recuperação</b>	<b>26</b>
<b>3.3.2 Recristalização</b>	<b>28</b>
<b>3.3.3 Crescimento de grão</b>	<b>29</b>
<b>3.4 Tratamentos Térmicos de Reozimento de Recristalização, Reozimento Pleno e Normalização</b>	<b>29</b>
<b>3.4.1 Tratamento térmico de reozimento</b>	<b>29</b>
<b>3.4.2 Tratamento térmico de reozimento de recristalização</b>	<b>30</b>
<b>3.4.3 Tratamento térmico de reozimento pleno</b>	<b>31</b>
<b>3.4.4 Tratamento térmico de normalização</b>	<b>32</b>
<b>3.5 Importância Parâmetros de Tratamento Térmico na Minimização de Defeitos, Melhoria Produtividade e Redução de Custo</b>	<b>32</b>
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>36</b>
<b>4.1 Descrição geral do projeto</b>	<b>36</b>
<b>4.2 Materiais</b>	<b>37</b>
<b>4.3 Preparação das Amostras</b>	<b>37</b>

<b>4.3 Tratamento Térmico</b>	<b>37</b>
<b>4.3 Caracterização Microestrutural</b>	<b>39</b>
<b>4.3 Caracterização Mecânica</b>	<b>39</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>40</b>
<b>5.1 Caracterização Microestrutural</b>	<b>40</b>
<b>5.2 Caracterização Mecânica (Microdureza)</b>	<b>50</b>
<b>6 CONCLUSÃO</b>	<b>56</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As informações sobre a produção global de aço revelam um notável crescimento nos últimos 10 anos, passando de 1.563 milhões de toneladas em 2012 para 1.885 milhões de toneladas em 2022. Nesse último ano, o Brasil contribuiu com 34.1 milhões de toneladas, colocando o país na 9ª posição entre os principais importadores e exportadores de aço no mundo (WORLDSTEEL, 2023).

No entanto, de acordo com Instituto Aço Brasil (2023), no primeiro semestre de 2023 as vendas internas de produtos siderúrgicos reduziram 5,7%, as exportações reduziram 4,2% e as importações cresceram 43,2% em relação ao ano anterior. Além disso, é indicado a necessidade de avanços na agenda de competitividade do país, de forma a trazer a indústria do aço para um novo ciclo de crescimento.

Diante desse cenário de mercado, evidencia-se a necessidade de melhoria de produtividade e redução de custos dentro das empresas, tornando o processo mais eficiente, e permitindo que o Brasil se torne um melhor competidor na indústria do aço. Destaca-se ainda que, a otimização dos parâmetros do processo de tratamento térmico apresenta uma grande influência em termos de melhoria da produtividade em processos de produção de arames trefilados, devido a sua criticidade em termos de propriedades mecânicas do material.

Dentre os diversos processos de conformação mecânica a frio de materiais metálicos, a trefilação é uma das operações mais antigas e de grande relevância industrial, que permite a produção de produtos como barras e arames com extrema qualidade superficial e controle dimensional (CORRÊA, 2004).

A fonte principal ou matéria-prima para a produção de arames através do processo de trefilação costuma ser um material laminado ou extrudado conhecido como fio máquina, o qual passa por um processo prévio de limpeza com a finalidade de eliminar possíveis camadas de óxidos formados durante o seu processamento. Durante cada passe da máquina de trefilação, o fio-máquina tem sua área de seção transversal reduzida e seu comprimento aumentado à medida que atravessa uma matriz cônica conhecida como fieira. Além disso, também são observadas alterações em relação às propriedades mecânicas da barra, sendo este um fenômeno típico da deformação plástica intensa gerada no processo (CORRÊA, 2004).

A intensa deformação plástica gerada durante o processo de trefilação como resposta aos elevados esforços trativos e compressivos indiretos em que o material é submetido durante a operação, resulta no encruamento do material. Esse fenômeno ocorre devido à multiplicação, interação e subsequente restrição do movimento das discordâncias na

microestrutura do material, tornando-o progressivamente mais resistente e propenso a fraturas frágeis. Além disso, o encruamento também influencia diretamente na tensão necessária para que a deformação plástica de fato ocorra no material, sendo necessário, cada vez mais, maiores valores de tensão (ZAVDOVEEV *et al.*, 2020).

A deformação de um material cristalino durante a conformação mecânica a frio resulta no aumento da sua energia livre, devido à presença de defeitos como discordâncias e interfaces oriundos do encruamento, tornando o material termodinamicamente instável. Embora a teoria sugira que esses defeitos deveriam desaparecer espontaneamente, na prática, os mecanismos necessários são lentos em temperaturas mais baixas, resultando na retenção de estruturas com elevadas quantidade de imperfeições após a deformação. No entanto, ao realizar um tratamento térmico em um metal deformado a frio em temperaturas elevadas, a microestrutura e as propriedades podem ser parcialmente restauradas por meio dos fenômenos termicamente ativados como a recuperação, recristalização e crescimento de grãos (HUMPHREYS E HATHERLY, 2004).

A partir disso, para permitir a continuidade da deformação plástica em um material encruado ou atender a requisitos específicos de propriedades mecânicas para o produto trefilado, é essencial submetê-lo a um processo adicional de tratamento térmico com o objetivo de restaurar suas características microestruturais e mecânicas, que é alcançado por meio do aquecimento do material até uma temperatura pré-definida, manutenção dessa temperatura por um determinado intervalo de tempo seguido de resfriamento controlado. A escolha da temperatura de aquecimento e do intervalo de tempo de manutenção depende de vários fatores, como a composição química do material, o tamanho e a forma da peça metálica e as propriedades finais desejadas (RAJAN; SHARMA; SHARMA, 2011).

Dentro desse contexto, pode-se dizer que tanto a qualidade final do material quanto a eficácia do processo de trefilação estão relacionados com o emprego de um ciclo térmico correto. De acordo com a Sociedade Americana de Metais (1981), a não utilização e o desrespeito dos parâmetros críticos do processo podem gerar graves consequências e impactos produtivos, como por exemplo, o colamento de bobinas na utilização de temperaturas além do necessário para o processo. Além disso, outros defeitos oriundos da não utilização de parâmetros adequados de recozimento como trincas, grãos grosseiros e tensões internas podem gerar custos associados a refugos de produção e perda de eficiência do processo.

A seleção adequada dos parâmetros do ciclo térmico também é crucial para otimizar a eficiência energética nas empresas, contribuindo significativamente para a redução dos custos relacionados ao consumo de energia (MENDIKOA *et al.*, 2013).

O principal obstáculo enfrentado nos projetos de aprimoramento e otimização de processos é não apenas produzir um produto de qualidade que atenda às suas especificações técnicas, mas também garantir a eficiência do processo. Além disso, busca-se aumentar a produtividade, o que resulta na redução dos custos associados, permitindo que as organizações permaneçam competitivas no mercado.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral deste trabalho consistiu em examinar o efeito dos parâmetros de tratamento térmico na microestrutura e no comportamento final de um aço de baixo teor de carbono (aço SAE 1020) trefilado.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar a influência do tempo de encharque e o meio de resfriamento do tratamento térmico na microestrutura do aço SAE 1020 trefilado.
- Analisar os efeitos do tempo de encharque e o meio de resfriamento do tratamento térmico na dureza do aço SAE 1020 trefilado.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Conformação Mecânica, Deformação Plástica dos Metais e Estrutura Deformada a Frio

A conformação mecânica ou plástica de metais pode ser definida como uma operação onde se aplicam solicitações mecânicas nesses materiais, que respondem com uma mudança permanente (deformação plástica) em suas dimensões (HELMAN; CETLIN, 2010).

Os processos de conformação plástica dos metais possibilitam a obtenção de peças, no estado sólido, com características controladas, onde os objetivos se resumem basicamente na obtenção de produtos finais com especificações de dimensão e forma, propriedades mecânicas e condições superficiais. As tensões aplicadas durante esse processo são geralmente superiores ao limite de escoamento e inferiores ao limite de resistência à tração do material (BRESCIANI, 2011).

Para a maioria dos materiais metálicos, a deformação elástica ocorre até o material atingir um valor de deformação de aproximadamente 0,005. Após esse ponto, a deformação sofrida pelo material não é mais proporcional ao valor da tensão aplicada e a Lei de Hooke deixa de ser válida, marcando o início do processo de deformação plástica ou deformação permanente e não recuperável. Em escala atômica, a deformação plástica se caracteriza pela quebra de ligações interatômicas, seguida pela formação de novas ligações com novos átomos vizinhos, à medida que um grande número de átomos ou moléculas se movem uns em relação aos outros, onde a partir do momento em que a aplicação de tensão é cessada, eles não retornam às suas posições originais (CALLISTER; RETHWISCH, 2021; REED-HILL, 1982).

A transição da deformação elástica para a deformação plástica de materiais metálicos é mostrada na curva tensão-deformação obtida, em geral, por meio de um ensaio de tração, através de um ponto denominado limite de escoamento, onde a tensão correspondente a esse ponto é denominada tensão limite de escoamento. A magnitude da tensão limite de escoamento de um metal é a medida de sua resistência à deformação plástica. Esse valor pode variar desde 35MPa, para um alumínio de baixa resistência, até valores superiores a 1400 MPa para aços de elevada resistência (CALLISTER; RETHWISCH, 2021).

Quando, na solicitação mecânica de um corpo metálico, a tensão limite de escoamento é atingida, o corpo inicia o processo de deformação plástica. Dois mecanismos estruturais básicos podem estar presentes no cristal metálico durante o processo de deformação plástica, são eles o escorregamento de planos cristalinos e maclação mecânica (BRESCIANI, 2011)

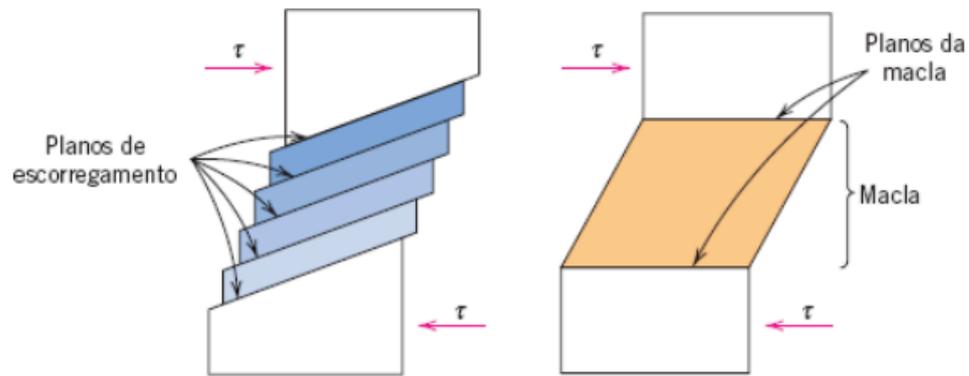
No escorregamento de planos cristalinos, ocorre o deslizamento de blocos adjacentes de um cristal ao longo de planos cristalográficos definidos, chamados de planos de deslizamento. Durante o deslizamento, cada átomo geralmente se movimenta com o mesmo número inteiro de distâncias atômicas ao longo do plano de deslizamento, produzindo um passo, sem alteração da orientação do cristal. Destaca-se também que, contornos de grão representam obstáculos para o movimento de deslizamento, pois a direção do deslizamento geralmente será alterada ao longo do contorno, o que implica em uma maior resistência à deformação em materiais policristalinos quando comparado a um único cristal do mesmo material (KARADENIZ; KUMAR, 2021).

Já na maclação mecânica, ocorre a inclinação de uma parte do cristal em relação a outra parte, a partir de um plano limite denominado plano de maclação. Admitindo esse plano como sendo um espelho, pode-se dizer que uma parte do cristal se torna uma imagem gêmea da outra parte. As chamadas maclas de deformação ocorrem em metais que possuem estruturas cristalinas CCC e HC, em condições de baixa temperatura e elevadas taxas de carregamento (cargas de impacto), as quais o processo de escorregamento de planos atômicos é restringido. Ao contrário do deslizamento, no mecanismo de maclação, vários planos se movimentam de maneira a manter uma certa regularidade, onde os átomos de um plano deslocam-se de uma mesma distância em relação aos átomos de outro plano (BRESCIANI, 2011; CALLISTER; RETHWISCH, 2021).

Esses dois mecanismos estruturais se diferem entre si em diversos aspectos como, por exemplo, a orientação cristalográfica acima e abaixo do plano de escorregamento, que para o fenômeno de escorregamento, é a mesma tanto antes quanto depois da deformação. Já na maclação mecânica, é possível observar uma reorientação por meio do plano da macla, assim como mostra a Figura 3.1. (CALLISTER; RETHWISCH, 2021).

Além disso, pode-se dizer que a movimentação atômica no fenômeno de escorregamento ocorre em múltiplos distintos do espaçamento atômico, quanto que no fenômeno de maclação, o deslocamento atômico é menor que a separação interatômica (CALLISTER; RETHWISCH, 2021).

**Figura 3.1 - Comparação entre Escorregamento e Maclação**



Fonte: CALLISTER; RETHWISCH, 2021.

No entanto, o principal mecanismo de deformação plástica nos metais é a movimentação de discordâncias por deslizamento de planos atômicos (BRESCIANI, 2011).

Considerando um cristal perfeito (isento de defeitos cristalinos), a deformação plástica ou permanente pode ocorrer pelo mecanismo de deslizamento de planos atômicos, por meio do movimento simultâneo e cooperativo de todos os átomos do plano, de uma posição atômica de equilíbrio para a posição vizinha. A tensão de cisalhamento necessária para que esse processo ocorresse foi calculada pela primeira vez por J. Frenkel, através de uma expressão matemática que leva à uma tensão teórica cisalhante máxima. Contudo, observou-se que, de modo geral, cristais reais começam a se deformar plasticamente em tensões entre 1/1000 e 1/10000 da tensão teórica calculada por Frenkel (PADILHA, 2000; PADILHA E SICILIANO, 2005).

A partir da comparação do valor de tensão calculado por Frenkel com valores medidos experimentalmente, é possível concluir que o modelo de deformação plástica considerado por Frenkel não reflete o comportamento dos cristais reais, pelo fato destes apresentarem defeitos que reduzem a sua resistência mecânica. Em 1934, E. Orowan, M. Polanyi e G. I. Taylor propuseram, em trabalhos independentes, a existência de um defeito cristalino linear denominado “discordância”. O conceito de discordância pode justificar a disparidade entre as tensões calculadas e medidas nos sólidos cristalinos (PADILHA, 2000).

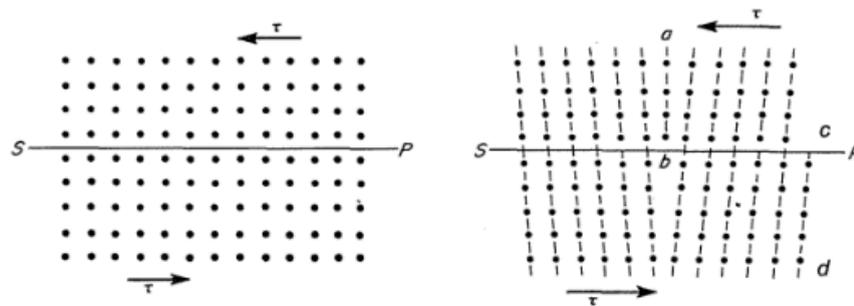
### 3.1.1 Conceito de Discordâncias

Assim como mencionado anteriormente, o principal mecanismo de deformação plástica nos metais é a movimentação de discordâncias por deslizamento de planos atômicos. Segundo Reed-Hill (1982), num cristal que sofreu deslizamento, os defeitos do reticulado tendem a se acumular nos planos de deslizamento presentes em sua estrutura. Esses defeitos, são denominados discordâncias.

Em geral, uma discordância é um defeito linear ou bidimensional em torno do qual alguns átomos do retículo cristalino estão desalinhados. Existem vários tipos de discordâncias como, por exemplo, as discordâncias em cunha, helicoidal e mista (CALLISTER; RETHWISCH, 2021).

Considerando um cristal simples submetido à uma tensão de cisalhamento, observa-se como resultado disso a movimentação dos átomos em torno do plano de deslizamento. Essa movimentação produz então, semiplanos verticais extras que por sua vez geram uma certa distorção do retículo cristalino do material, assim como mostra a Figura 3.2 (REED-HILL, 1982).

**Figura 3.2 - Cristal submetido a tensão de cisalhamento**



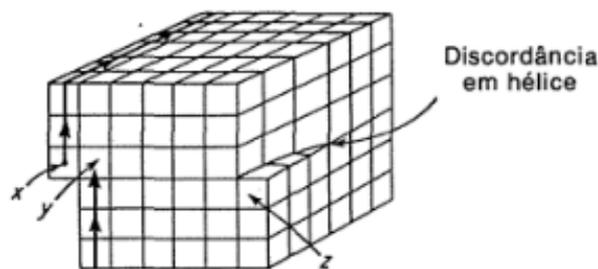
Fonte: REED-HILL, 1982.

A partir da análise do semiplano extra AB dentro do cristal, é possível observar uma clara distorção do cristal quando o semiplano atinge o plano de escorregamento. É possível observar também que essa distorção diminui em intensidade ao se afastar da aresta do semiplano, pois o rearranjo dos átomos ocorre de forma mais semelhante a um cristal perfeito em distâncias significativas dessa aresta. Portanto, a distorção do cristal está centrada na aresta do plano extra, e o limite ou contorno desse plano adicional é denominado discordância em cunha (REED-HILL, 1982).

A discordância em cunha pode ser caracterizada pela colocação de mais de uma fileira de átomos, que a partir de um determinado ponto no cristal, perde a sua continuidade. (BRESCIANI, 2011).

Uma distorção espacial do reticulado cristalino na forma helicoidal define a discordância em hélice ou helicoidal. A discordância helicoidal pode ser considerada como consequência da tensão de cisalhamento aplicada para produzir a distorção ilustrada na Figura 3.3. A distorção atômica causada pela discordância helicoidal é também linear e está localizada ao longo da linha de discordância e possui esse nome devido à trajetória ou inclinação helicoidal traçada ao redor da linha de discordância pelos planos atômicos presentes no retículo cristalino (BRESCIANI, 2011; CALLISTER; RETHWISCH, 2021).

**Figura 3.3 - Discordância Helicoidal**



Fonte: REED-HILL, 1982.

Finalmente, discordâncias que exibem componentes de ambos os tipos (em cunha e helicoidal) são denominadas discordâncias mistas, e representam a maioria das discordâncias encontradas nos materiais cristalinos (CALLISTER; RETHWISCH, 2021).

### 3.1.2 Movimentação de discordâncias

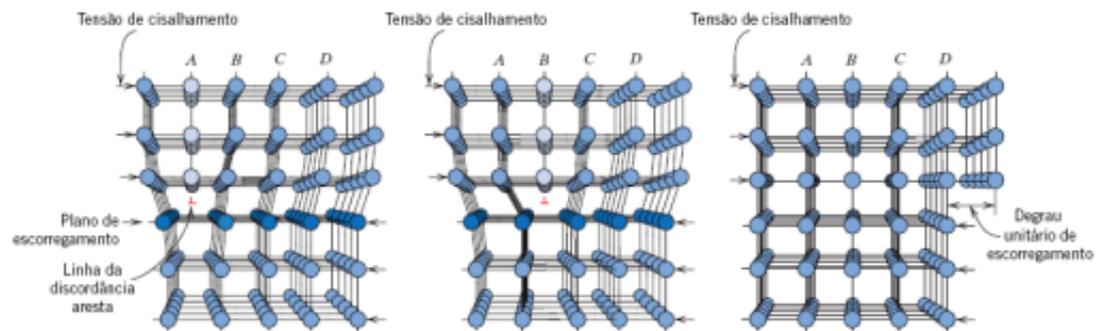
O vetor de Burgers é um parâmetro utilizado no estudo da teoria das discordâncias, que define a magnitude e a direção do deslocamento dos átomos de suas posições na discordância. O vetor de Burgers é perpendicular à linha de discordância em cunha e é paralelo à linha de discordância helicoidal, podendo assumir outras direções em discordâncias do tipo mista (BRESCIANI, 2011).

A discordância pode se movimentar através do reticulado cristalino, porém, de maneira limitada, pela necessidade de manter a continuidade da linha de discordância. É

possível observar dois tipos de movimentos de discordâncias, sendo eles o movimento por deslizamento e o movimento por escalagem. A escalagem da discordância corresponde a um movimento de passagem do plano de referência (plano de deslizamento, que contém o vetor Burgers e a linha de discordância) para um plano de átomos acima ou abaixo deste. O movimento de escalagem de discordância se aplica apenas para discordância em cunha, pois no caso da discordância helicoidal ou em hélice, o mecanismo de movimentação dessas discordâncias é mais complexo, uma vez que não é possível estabelecer somente um único plano de deslizamento (BRESCIANI, 2011; PADILHA E SICILIANO, 2005).

Uma discordância em cunha se move em resposta à aplicação de uma tensão de cisalhamento em uma direção perpendicular à sua linha, como mostra a Figura 3.4.

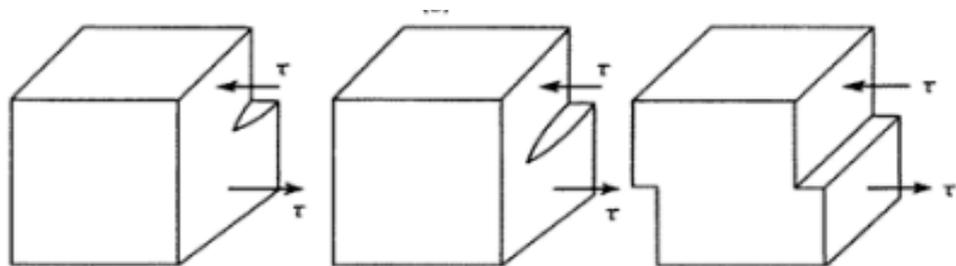
**Figura 3.4 - Movimentação Discordância Cunha**



Fonte: CALLISTER; RETHWISCH, 2021.

Já para a discordância helicoidal, o movimento associado à resposta à aplicação de uma tensão de cisalhamento está ilustrada na Figura 3.5.

**Figura 3.5 - Movimentação Discordância Helicoidal**



Fonte: REED-HILL, 1982.

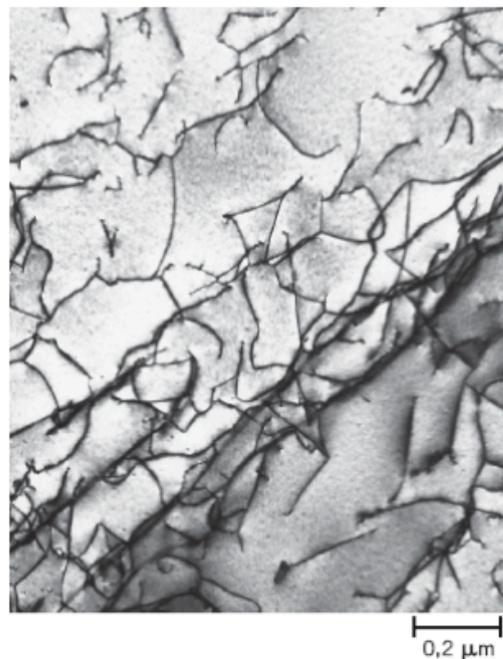
O resultado da movimentação de uma discordância através de um cristal corresponde ao processo de deformação plástica desse cristal, em uma magnitude igual a uma distância

interatômica. Com isso, pode-se dizer que a deformação plástica de um material cristalino está diretamente associada à presença de discordâncias e à possibilidade de suas movimentações ao longo do retículo cristalino. A quantidade ou densidade de discordâncias presentes em um cristal metálico é expresso como o comprimento total de discordâncias por unidade de volume ou como o número de discordâncias que intercepta uma área unitária de uma seção aleatória (assumindo as unidades milímetros de discordância por milímetro cúbico e milímetro quadrado, respectivamente) (BRESCIANI, 2011; CALLISTER; RETHWISCH, 2021).

Uma vez que os cristais podem não conter inicialmente um número elevado e discordâncias para permitir grandes magnitudes de deformação plástica do cristal, pode-se dizer que, a partir de solicitações mecânicas, ocorre a geração ou a multiplicação, de mais discordâncias a medida que o cristal é deformado (BRESCIANI, 2011).

As discordâncias podem ser observadas em materiais cristalinos através de técnicas de microscopia eletrônica, assim como mostra a Figura 3.6. No geral, todos os materiais cristalinos possuem em sua estrutura algumas discordâncias provenientes de processos como a solidificação, deformação plástica e como consequência de tensões térmicas induzidas (CALLISTER; RETHWISCH, 2021).

**Figura 3.6 - Imagens de discordâncias por microscopia de transmissão**



Fonte: CALLISTER; RETHWISCH, 2021.

### 3.1.3 Mecanismos de endurecimento (movimentação restrita das discordâncias)

A resposta de um material, como sua capacidade de resistência à deformação frente à aplicação de tensões, está diretamente relacionada com a sua microestrutura. O trabalho a frio pode ser definido como o processo pelo qual um material metálico, como o aço, é deformado plasticamente a temperaturas baixas em relação ao seu ponto de fusão. Os processos que utilizam o trabalho a frio para conformação mecânica de materiais metálicos incluem por exemplo, a laminação a frio e a trefilação a frio (ZHANG, 2011).

À temperatura ambiente, após ultrapassado o valor de tensão limite de escoamento de um material metálico, a sua resistência à deformação plástica e sua rigidez tendem a aumentar em detrimento da diminuição de propriedades como plasticidade e tenacidade (ZHANG, 2011).

O movimento de discordâncias e o comportamento mecânico dos metais possuem forte relação, que são importantes para a compreensão dos mecanismos de aumento da resistência destes materiais. Assim como mencionado anteriormente, um dos principais mecanismos microscópicos envolvidos no processo de deformação plástica de metais é o deslizamento de planos atômicos através da movimentação de discordâncias. Uma vez que a deformação plástica macroscópica corresponde ao movimento dessas discordâncias, pode-se afirmar que a habilidade de deformação plástica de um metal depende da habilidade de movimentação de das discordâncias presentes em sua microestrutura (CALLISTER; RETHWISCH, 2021)

Se as propriedades de resistência mecânica como a dureza e a resistência ao limite de escoamento estão relacionados de maneira direta com a facilidade pela qual a deformação plástica pode ser induzida no material, a resistência mecânica de um metal pode ser aumentada a partir da redução na mobilidade ou dificuldade de movimentação das discordâncias. A partir disso, maiores forças mecânicas serão necessárias para iniciar a deformação plástica (CALLISTER; RETHWISCH, 2021; PADILHA E SICILIANO, 2005).

Por outro lado, quanto maior a facilidade da movimentação das discordâncias presentes da microestrutura do material metálico, maior a facilidade de deformação plástica desse material (CALLISTER; RETHWISCH, 2021).

A maioria dos materiais metálicos são policristalinos, ou seja, apresentam em sua estrutura um conjunto de monocristais, que por sua vez, se deformam de maneira mais complexa quando comparado com um monocristal. Os monocristais presentes na estrutura de um material policristalino são denominados grãos, que por possuírem orientações cristalográficas diferentes, geram um contorno de grão comum, caracterizado por ser uma

região de elevada imperfeição cristalina, com átomos fora de suas posições regulares e de equilíbrio no reticulado cristalino (BRESCIANI, 2011; CALLISTER; RETHWISCH, 2021).

Durante a deformação plástica, o mecanismo de escorregamento por movimentação das discordâncias deve ocorrer por meio desse contorno comum, denominado de contorno de grão. Uma vez que dois grãos adjacentes possuem normalmente, orientações cristalográficas distintas, para que uma discordância passe de um grão para o outro, ela terá que mudar a direção do seu movimento. Dessa forma, pode-se afirmar que o contorno de grão atua como uma barreira à movimentação das discordâncias, o que exige um maior nível de sollicitação mecânica para que seja possível a continuidade da deformação plástica do material (BRESCIANI, 2011; CALLISTER; RETHWISCH, 2021; ZAVDOVEEV *et al.*, 2020).

Portanto, conclui-se que um material metálico policristalino com granulação maior (menor área de contorno de grão) apresenta maior facilidade para se deformar plasticamente e, conseqüentemente, menor resistência mecânica. Além disso, é importante considerar a temperatura em que o processamento do material é realizado, pois ela pode influenciar significativamente essas propriedades (BRESCIANI, 2011; PADILHA E SICILIANO, 2005).

### **3.1.4 Encruamento em materiais metálicos**

Assim como mencionado, a dificuldade ou facilidade de movimentação das discordâncias possui uma influência significativa na capacidade de deformação plástica do material. Os contornos de grão, assim como precipitados e segundas fases presentes na estrutura do material, atuam como agentes que impedem a movimentação das discordâncias, demandando valores maiores de tensão para a continuação da deformação plástica (BRESCIANI, 2011).

Outro tipo de mecanismo de endurecimento comum é o encruamento ou endurecimento por deformação plástica (devido ao fato de que a deformação ocorre a uma temperatura bem inferior à temperatura de fusão do metal), que pode ser definido como sendo um fenômeno pelo qual um metal dúctil se torna mais duro e resistente à medida que é deformado plasticamente. O fenômeno de encruamento pode ser explicado com base nas interações entre as discordâncias, que se multiplicam à medida que o material é deformado plasticamente. A formação de novas discordâncias gera um aumento significativo na densidade de discordâncias presente na microestrutura do material, conseqüentemente, a

distância média de separação entre essas discordâncias diminui, de maneira a assumirem posições mais próximas umas das outras. A partir disso, observa-se que o movimento de uma discordância é dificultado em detrimento da presença das outras, sendo esta restrição cada vez mais pronunciada à medida que a quantidade dessas discordâncias aumenta (CALLISTER; RETHWISCH, 2021).

No geral, observa-se que a tensão imposta, necessária para deformar o metal, aumenta com o aumento do trabalho a frio. Um metal encruado, por exemplo, apresenta valores superiores de tensão limite de escoamento e de resistência à tração, bem como menor dureza e menor alongamento (BRESCIANI, 2011; REED-HILL, 1982).

Assim como observado anteriormente, um agregado policristalino apresenta uma taxa de encruamento mais elevada quando comparado com um monocristal do mesmo metal. Isso se dá pelo fato de que, em um monocristal, as discordâncias possuem maior liberdade de movimentação, o que não acontece em policristais devido a presença de contornos de grão (BRESCIANI, 2011).

### **3.2 Processo de Trefilação e Aços para Trefilação de Arame**

Fios de soldagem, arames e vergalhões metálicos são exemplos de produtos largamente utilizados em muitos processos de construção e produção. Esses produtos, por sua vez, são produzidos através de um processo de conformação mecânica chamado de trefilação, um dos métodos mais difundidos de conformação de materiais metálicos (ZAVDOVEEV et. al., 2020).

O processo de trefilação consiste, basicamente, na passagem forçada de uma barra através de uma ferramenta (fieira) que contém um furo de diâmetro crescente, a partir da aplicação de uma tensão de tração à saída desta matriz. O material por sua vez tem a área de sua seção transversal reduzida à medida que o mesmo se deforma. Como resultado desse processo, obtém-se um produto de seção menor e comprimento maior, com boa qualidade superficial e excelente controle dimensional (HELMAN; CETLIN, 2010).

As características metalúrgicas, correlacionadas com as exigências de operação do produto final, são fatores importantes para a seleção de um determinado aço (SILVA; MEI 1988).

Os aços utilizados para fabricação de arames ou fios em processos de trefilação, variam em termos de composição química, desde os aços-carbono de baixo carbono, passando pelos de médio e carbono e até aços-liga com teores variáveis de elementos de liga. No entanto, os aços de baixo carbono com porcentagem de carbono entre 0,008% e 0,30%pC, são usualmente utilizados em aplicações mais comuns, como por exemplo na produção de arames para construção civil de menor responsabilidade, por possuírem alta trabalhabilidade e ductilidade, fazendo com que sua utilização como matéria prima seja facilitada (CHIAVERINI, 2015).

Durante o processo de trefilação, o fio máquina (matéria prima obtida por laminação a quente de barras de aço) é puxado através das fieiras de metal duro, se deformando plasticamente de maneira intensa, experimentando reduções de área que podem variar, mais comumente, de 20 a 30% (CHIAVERINI, 2015).

A deformação plástica intensa gerada no processo de trefilação promove o encruamento do material a partir da multiplicação, interação e consequente restrição do movimento das discordâncias presentes em sua microestrutura, o tornando cada vez mais duro e propenso a fraturas frágeis. Com isso, para que seja possível a continuidade do processo de deformação plástica do material encruado, ou o atendimento de requisitos finais de propriedades mecânicas específicas para o uso do produto trefilado, é necessário que o mesmo seja submetido a um processo de amaciamento adicional comumente realizado a partir de tratamento térmico (ZAVDOVEEV *et al.*, 2020).

### **3.3 Fenômenos Termicamente Ativados Presentes nos Tratamentos Térmicos**

Assim como mencionado anteriormente, o trabalho a frio pode ser definido como o processo pelo qual um material metálico, como o aço, é deformado plasticamente a temperaturas baixas em relação ao seu ponto de fusão. Parte da energia desprendida nos processos de conformação mecânica que utilizam o trabalho a frio é dissipada em forma de calor, o que pode gerar um aumento na temperatura do material se a taxa de geração de calor for maior do que a taxa de dissipação do calor. Porém, uma fração fixa dessa energia é armazenada nos metais como energia de deformação associada com uma variedade de defeitos na rede cristalina gerado pelo processo de deformação, que causam o encruamento do material (AWAN; KHAN, 2019 ; PADILHA E SICILIANO, 2005).

A partir disso, pode-se dizer que um material metálico ao sofrer deformação plástica e encruar, possuirá uma elevada energia armazenada quando comparado ao mesmo antes de

passar pelo processo. No entanto, devido a condições termodinâmica não favoráveis, o material tende a voltar para sua configuração microestrutural de menor energia interna naturalmente, porém, as reações envolvidas nesse processo são de natureza complexa e sensíveis ao nível da temperatura, pois envolvem a movimentação de átomos e vacâncias. Dessa forma, para que o processo de retorno às condições microestruturais de menor energia seja acelerado, é necessário que o metal seja aquecido, através de um processo chamado de tratamento térmico (BRESCIANI, 2011).

O processo de tratamento térmico que atua no sentido de reduzir a energia interna do metal encruado através da regeneração da sua microestrutura é chamado de recozimento. O recozimento é um processo de tratamento que pode incluir qualquer ciclo de aquecimento e resfriamento de materiais metálicos, sendo os parâmetros de operação como taxa de aquecimento, temperatura e tempo de encharque e taxa de resfriamento a depender do material a ser tratado. Os fenômenos microestruturais envolvidos no processo de recozimento são a recuperação, a recristalização e o crescimento de grãos, relacionados a mecanismos de redução e rearranjo dos defeitos cristalinos, que por sua vez atuam no sentido de reduzir a resistência mecânica do metal e aumentar a sua ductilidade (BRESCIANI, 2011; AWAN; KHAN, 2019; RUY, 2013).

### **3.3.1 Recuperação**

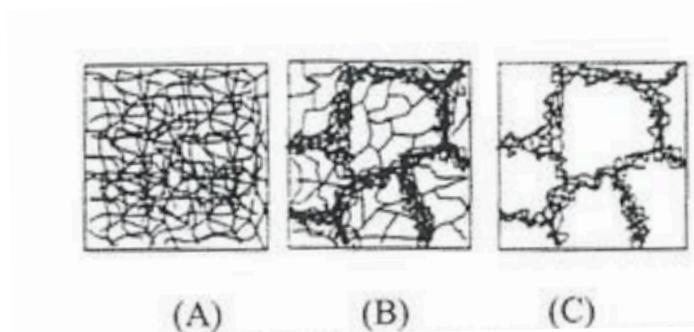
A recuperação, o estágio inicial do processo de recozimento, é um fenômeno termicamente ativado que desempenha um papel essencial na restauração das propriedades mecânicas do material após a deformação a frio. Durante essa fase, as propriedades mecânicas adquiridas durante o trabalho a frio do material começam a retornar aos seus valores iniciais, embora a microestrutura, caracterizada por grãos deformados e alongados, permaneça aparentemente inalterada (BRESCIANI, 2011)

Os fenômenos que acompanham a recuperação, nomeadamente a movimentação de discordâncias por mecanismos de escorregamento e de salto, desempenham um papel essencial na modificação da microestrutura do material. Esses mecanismos podem levar à eliminação parcial das discordâncias, quando discordâncias de sinais opostos se encontram e se anulam mutuamente. Além disso, um fenômeno adicional, conhecido como poligonização, pode ocorrer durante esse estágio, resultando na formação de subgrãos ou contornos de pequeno ângulo. O processo de recuperação é marcado por uma redução inicial e gradual da energia interna acumulada no material, ao mesmo tempo em que as tensões mecânicas

internas são aliviadas de maneira substancial. Essa redução da energia e relaxamento das tensões estabelecem as bases para a etapa subsequente de recristalização, na qual ocorrerão mudanças mais significativas na microestrutura e nas propriedades do material. Portanto, o entendimento detalhado desses fenômenos associados à recuperação é essencial para a compreensão global do processo de recozimento e sua influência na melhoria das propriedades dos materiais (BRESCIANI, 2011).

O mecanismo de recuperação apresenta vários estágios. A figura 3.7 mostra esquematicamente essas etapas a partir de um emaranhado de discordâncias (após deformação plástica intensa, por exemplo), chegando até uma estrutura de subgrãos. Essas etapas envolvem a formação de células (A), aniquilação de discordâncias nas paredes das células (B) e formação de subgrãos (C) (PADILHA E SICILIANO, 2005).

**Figura 3.7 - Etapas processo de recuperação em metal deformado plasticamente**

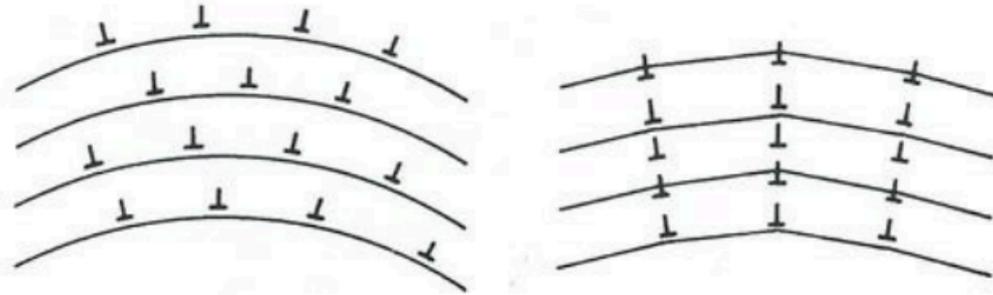


(a) formação células (b) aniquilação de discordância (c) subgrão

Fonte: PADILHA E SICILIANO, 2005.

De todos os processos envolvidos no mecanismo de recuperação, a formação de subgrãos ou a poligonização é o processo que ocorre em temperaturas mais elevadas. Durante o aquecimento de um material metálico altamente encruado, as discordâncias, distribuídas de forma homogênea no material, tendem a se reagrupar como uma forma de aliviar o excesso de energia contido no material assim que sejam estabelecidas condições cinéticas ideais. Dessa forma, as discordâncias são reagrupadas, havendo aniquilação de discordâncias de sinais opostos. Discordâncias de mesmo sinal se movimentam nos planos de escorregamento e sofrem escalada ou salto, agrupando-se em forma de subcontornos, minimizando seus campos de tensão elástica, assim como mostra a Figura 3.8 (PADILHA E SICILIANO, 2005).

**Figura 3.8 - Formação de subgrãos ou poligonização**



Fonte: PADILHA E SICILIANO, 2005.

A formação de subgrãos durante o processo de recuperação de materiais metálicos desempenha um papel crucial no amaciamento do material. Durante a deformação a frio prévia ou trabalhos mecânicos anteriores, o acúmulo de discordâncias cria tensões internas substanciais e torna o material rígido. No entanto, a formação de subgrãos durante a recuperação resulta na eliminação parcial dessas discordâncias, aliviando assim as tensões internas. Além disso, a criação de contornos de grão de menor ângulo aumenta a mobilidade dos limites de grão, tornando o material mais suscetível à deformação plástica a partir da criação de espaços livres para a movimentação de discordâncias (PADILHA E SICILIANO, 2005).

### 3.3.2 Recristalização

A recristalização é um fenômeno termicamente ativado que ocorre mesmo após a conclusão da fase de recuperação dos metais, pois neste estágio, os grãos ainda retêm uma quantidade significativa de energia de deformação. A recristalização é caracterizada pela formação de um novo conjunto de grãos que são livres de deformação e assumem uma forma equiaxial, ou seja, suas dimensões são aproximadamente iguais em todas as direções. Esses novos grãos exibem densidade de discordâncias significativamente reduzida em comparação com a microestrutura deformada anteriormente. A força motriz subjacente à formação dessa nova estrutura de grãos reside na diferença de energia interna entre o material deformado e o material não deformado. Durante o processo de recristalização, os novos grãos começam a se reorganizar como núcleos extremamente pequenos e, posteriormente, crescem até absorver completamente o material de origem. Esse fenômeno envolve mecanismos de difusão de curto alcance e é fundamental na restauração das propriedades mecânicas e estruturais do material,

garantindo a regeneração da sua estrutura após o trabalho a frio e permitindo que ele mantenha sua capacidade de deformação plástica e resistência mecânica desejáveis (CALLISTER; RETHWISCH, 2021).

### **3.3.3 Crescimento de grão**

O crescimento de grão, um fenômeno que ocorre após à recristalização, é uma etapa importante em quaisquer processos de tratamento térmico de materiais metálicos. Após a conclusão da recristalização, quando os grãos estão livres de deformações, o metal pode continuar a se transformar se submetido a altas temperaturas. Esse fenômeno, conhecido como crescimento de grão, não requer necessariamente a recuperação e recristalização prévias, sendo observado em materiais policristalinos, tanto em metais quanto em cerâmicas. A energia associada aos contornos de grão desempenha um papel fundamental no processo, uma vez que à medida que os grãos crescem, a área total dos contornos diminui, resultando em uma redução na energia total do sistema. O crescimento de grão ocorre através da migração dos contornos de grão, e, embora nem todos os grãos aumentem de tamanho, os maiores crescem à custa dos menores, que diminuem. Como resultado, o tamanho médio dos grãos aumenta ao longo do tempo, criando uma distribuição variada de tamanho de grãos em qualquer ponto específico. O movimento dos contornos de grão é conduzido pela difusão de curto alcance dos átomos ao longo do contorno, com direções opostas entre o movimento do contorno e o movimento dos átomos, o que contribui para a compreensão desse complexo fenômeno de crescimento de grão em metais (CALLISTER; RETHWISCH, 2021).

## **3.4 Tratamentos Térmicos de Reozimento de Recristalização, Reozimento Pleno e Normalização**

### **3.4.1 Tratamento térmico de reozimento**

O conceito fundamental dos tratamentos térmicos reside na aplicação de processos controlados de aquecimento e resfriamento em materiais metálicos, particularmente em aços, com o propósito de modificar suas propriedades ou conferir-lhes características específicas. A estrutura dos aços desempenha um papel central na determinação de suas propriedades, e os tratamentos térmicos têm a capacidade de modificar essa estrutura de várias maneiras, dependendo das condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de

resfriamento. Como resultado dessas transformações estruturais, as propriedades do aço podem sofrer alterações mais ou menos pronunciadas, tornando possível ajustar suas características de acordo com as necessidades específicas de uma aplicação. Isso envolve a compreensão das transformações na austenita, que ocorrem com base no tipo de tratamento térmico, na velocidade de resfriamento e nas condições adotadas. Cada estrutura resultante possui suas próprias características distintivas, que são então transferidas para o material, dependendo da estrutura ou combinação de estruturas presentes. Portanto, os tratamentos térmicos desempenham um papel fundamental na engenharia de materiais, permitindo a personalização das propriedades dos aços para atender a uma ampla gama de aplicações industriais e comerciais (CHIAVERINI, 2015).

O recozimento, em geral, é um processo térmico que envolve etapas como o aquecimento de um material metálico a uma temperatura pré definida, a manutenção dessa temperatura por um período determinado e, finalmente, o resfriamento a uma taxa muito lenta. A escolha da temperatura de aquecimento e do tempo de manutenção depende de vários fatores, como a composição química do material, o tamanho e a forma da peça metálica e as propriedades finais desejadas. O recozimento pode servir como um tratamento final ou como uma etapa preparatória para tratamentos subsequentes, como por exemplo a confecção de arames farpados após a trefilação (RAJAN; SHARMA; SHARMA, 2011).

Os objetivos desse processo variam e podem incluir a redução de tensões internas geradas durante a solidificação, usinagem, processos de conformação mecânica a frio como trefilação e laminação, e soldagem, restauração da ductilidade e tenacidade, aumento da usinabilidade, eliminação de não uniformidades químicas, refinamento do tamanho de grão e redução de conteúdo gasoso no material. O recozimento pode ser classificado em grupos com base na temperatura de tratamento, nas transformações de fase ocorridas durante o tratamento e no propósito do tratamento, sendo essas categorias inter-relacionadas (RAJAN; SHARMA; SHARMA, 2011).

### **3.4.2 Tratamento térmico de recozimento de recristalização**

O recozimento de recristalização é aplicado a praticamente todos os aços que passaram por trabalhos a frio intensos, e que apresentam níveis de encruamento elevados. Este método envolve o aquecimento do material acima de sua temperatura crítica de recristalização, mantendo-o nessa temperatura por um período determinado e, em seguida, resfriando-o. O resultado desse tratamento é uma redução na dureza e resistência do material, acompanhada

por um aumento significativo na ductilidade, a partir de alterações microestruturais promovidas pelos fenômenos termicamente ativados de recuperação e recristalização. Esse processo é altamente versátil, permitindo ajustar o nível de redução da área transversal adquirida na etapa de conformação mecânica com base na seleção de ciclos de recozimento de recristalização. É empregado tanto como uma etapa intermediária durante a fabricação quanto como um tratamento final. Em setores industriais que produzem fios de aço, chapas e tiras, o recozimento de recristalização desempenha um papel crucial. A microestrutura resultante desse processo é composta por grãos livres de defeitos microestruturais gerados durante o processo de deformação, criados à custa da estrutura deformada original (antes de passar pelo processo de deformação plástica a frio). É importante observar que a temperatura de recristalização não é fixa, variando de acordo com a composição química, quantidade de deformação prévia, tempo de manutenção e tamanho inicial dos grãos. Um nível mínimo de deformação é necessário para iniciar o processo de recristalização, e quanto maior a deformação, menor a temperatura de recristalização. O tempo de manutenção também influencia o processo, mas a temperatura tem uma influência predominante nesse processo. Portanto, é preferível aumentar a temperatura de recristalização em vez de prolongar o tempo de manutenção. Uma estrutura refinada pode ser obtida em aços quando são submetidos a uma deformação significativa e aquecidos a uma temperatura ligeiramente superior à temperatura crítica de recristalização (RAJAN; SHARMA; SHARMA, 2011; PADILHA E SICILIANO, 2005).

### **3.4.3 Tratamento térmico de recozimento pleno**

Durante o processo de tratamento térmico de recozimento pleno, diferente do recozimento de recristalização, o aço é aquecido à região austenítica, geralmente a uma temperatura de 30 a 50°C acima da temperatura crítica superior (A3) para aços hipoeutetóides. O material é mantido nessa temperatura por um período determinado e, em seguida, resfriado lentamente, muitas vezes dentro do próprio forno ou em um recipiente com isolamento térmico. Esse resfriamento lento permite a obtenção de estruturas de equilíbrio ou mudança de fase, conforme previsto pelo diagrama de equilíbrio, no aço (RAJAN; SHARMA; SHARMA, 2011).

A temperatura máxima de manutenção é geralmente restrita a  $A_{c3} + 50^{\circ}\text{C}$  para evitar o crescimento excessivo de grãos. Como resultado do recozimento pleno, o aço se torna muito macio. No caso de aços eutetóides e hipoeutetóides, o tratamento é realizado aquecendo o

material cerca de 30-50°C acima da temperatura crítica inferior ( $A_1$ ) e resulta em uma estrutura de perlita lamelar. O espaçamento interlamelar depende principalmente da temperatura de recozimento e da taxa de resfriamento, onde maiores temperaturas e menores taxas de resfriamento geram maiores espaçamentos interlamelares, dando origem à perlita grossa. No geral, a perlita grossa permite maior movimentação de discordâncias configurando uma estrutura de maior ductilidade (RAJAN; SHARMA; SHARMA, 2011).

No entanto, esse processo geralmente não é aplicado a aços hipereutetoides, pois o aquecimento acima da temperatura crítica superior  $A_{cm}$ , seguido de resfriamento lento, resulta em um crescimento significativo dos grãos austeníticos, formação de perlita grosseira lamelar e rede de cementita nas fronteiras de grão, que conferem ao material uma resistência mecânica reduzida. O objetivo do recozimento pleno é melhorar a ductilidade, eliminar completamente as tensões internas, obter propriedades magnéticas e elétricas aprimoradas e refinar a estrutura do grão (RAJAN; SHARMA; SHARMA, 2011).

#### **3.4.4 Tratamento térmico de normalização**

O tratamento térmico de normalização também é um processo largamente utilizado na indústria metalúrgica com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas e a microestrutura dos aços após intensos processos de deformação plástica. Este tratamento envolve o aquecimento do material a uma temperatura acima da sua temperatura crítica, seguido por um resfriamento controlado ao ar ambiente. A normalização resulta em uma microestrutura mais uniforme e refinada, com tamanhos de grãos homogêneos. Além disso, a normalização ajuda a aliviar tensões residuais, melhorar a usinabilidade e preparar o material para tratamentos térmicos subsequentes, como a têmpera. A normalização é especialmente eficaz para ajustar o tamanho do grão e reduzir a dureza, tornando os materiais mais adequados para aplicações que exigem alta resistência mecânica (SOARES; TERRONES; PARANHOS, 2017).

### **3.5 Importância Parâmetros de Tratamento Térmico na Minimização de Defeitos, Melhoria Produtividade e Redução de Custo**

A eficácia de processos de tratamento térmico que buscam regenerar a microestrutura de aços, como por exemplo, o de recozimento, é intrinsecamente ligada à sua meticulosa coordenação de três estágios distintos abordados anteriormente. O primeiro estágio envolve o

aquecimento da peça até a temperatura desejada, seguido pelo segundo estágio, que exige a manutenção ou 'encharque' naquela temperatura por um período determinado. Finalmente, o terceiro estágio implica o resfriamento da peça, geralmente até a temperatura ambiente (CALLISTER; RETHWISCH, 2021).

Durante o aquecimento e o resfriamento, surgem gradientes de temperatura entre as regiões externas e internas da peça, cujas magnitudes são fortemente influenciadas pelo tamanho e geometria da mesma. Taxas de variação de temperatura excessivamente elevadas durante o aquecimento e resfriamento podem induzir gradientes de temperatura e, conseqüentemente, tensões internas que podem resultar em deformações indesejadas na peça, como empenamento ou até mesmo trincamento. Além disso, o tempo de tratamento térmico efetivo deve ser suficientemente longo para permitir a ocorrência de quaisquer reações de transformação necessárias, como por exemplo, a movimentação de discordâncias associada ao processo de recuperação, característicos nos processos de recozimento e normalização. A temperatura é também uma consideração crucial; um aumento na temperatura pode acelerar o processo de tratamento térmico, uma vez que frequentemente envolve processos de difusão que ocorrem de forma mais rápida em temperaturas mais elevadas (CALLISTER; RETHWISCH, 2021).

Ao ajustar cuidadosamente os parâmetros de tratamento térmico, como a temperatura, a taxa de aquecimento e resfriamento, o tempo de permanência e a atmosfera de recozimento, é possível controlar a morfologia, o tamanho de grão e a distribuição de fases no material, resultando em propriedades sob medida, como dureza, ductilidade e tenacidade.

Para ilustrar a importância de parâmetros de tratamento térmico na microestrutura de materiais metálicos, estudos anteriores destacaram a relevância do tempo de permanência na temperatura de encharque durante o recozimento de esferoidização, demonstrando que esse parâmetro possui a maior influência na porcentagem de esferoiditas obtidas durante o processo. Portanto, a escolha cuidadosa e ideal desses parâmetros de recozimento é um componente crucial na busca por materiais com microestrutura e propriedades mecânicas desejáveis, incluindo uma maior plasticidade, em aços de baixo carbono (ZHAO; CHEN, 2013).

A otimização dos parâmetros de tratamento térmico emerge como um aspecto crítico na busca pela melhoria da qualidade dos materiais metálicos. A habilidade de manipular com precisão a temperatura e o tempo de encharque nesse processo é um fator-chave não só na conquista das propriedades desejáveis do material através do controle da sua microestrutura, mas também na minimização de defeitos das peças. A temperatura de recozimento, por

exemplo, exige uma seleção cuidadosa, evitando tanto o superaquecimento, que pode resultar em crescimento descontrolado de grãos e uma redução excessiva da resistência mecânica do material, quanto o subaquecimento, que limita a eficácia do recozimento na redução de tensões e refinamento da microestrutura. Da mesma forma, o tempo de encharque deve ser considerado com atenção, uma vez que sua insuficiência pode deixar tensões internas não resolvidas e sua excessividade pode levar a um tratamento térmico prolongado, afetando de maneira negativa as propriedades do material. Portanto, encontrar o equilíbrio ideal entre temperatura e tempo de encharque é essencial, levando em consideração a natureza do material, sua composição e as características específicas desejadas (RAJAN; SHARMA; SHARMA, 2011).

Além disso, é relevante destacar que outros fatores, como a taxa de aquecimento e resfriamento após o encharque e a atmosfera do forno, também podem influenciar a qualidade do recozimento, tornando o cumprimento de procedimentos de tratamento térmico adequados e a realização de testes de qualidade imperativos para garantir que o material alcance as propriedades desejadas e seja livre de defeitos, tais como crescimento descontrolado de grão ou redução ineficiente de dureza.

O ajuste cuidadoso dos parâmetros de tratamento térmico de recozimento também desempenha um papel fundamental na otimização da produtividade das empresas. Ao reduzir defeitos como trincas, grãos grosseiros e tensões internas durante o processo de tratamento térmico, as organizações podem experimentar uma série de benefícios tangíveis. Isso inclui uma significativa redução nos refugos de produção, economia de recursos, maior eficiência de produção e, conseqüentemente, uma melhoria na qualidade do produto final. Além disso, minimizar defeitos contribui para a conformidade com padrões e normas de qualidade específicos da indústria, promove a satisfação do cliente e pode resultar em economias substanciais de custos ao reduzir retrabalhos. Em resumo, a otimização dos parâmetros de tratamento térmico não apenas eleva a qualidade dos produtos, mas também desempenha um papel crítico na prosperidade e competitividade das empresas.

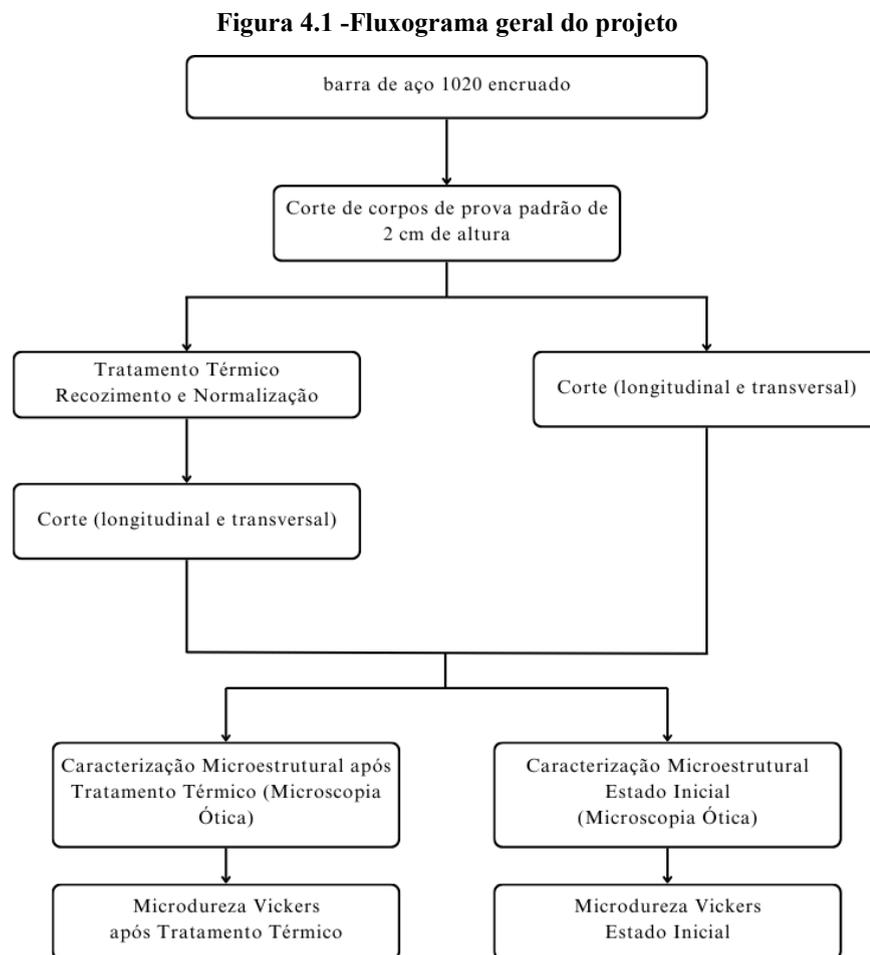
A escolha ideal dos parâmetros de tratamento térmico também desempenha um papel de destaque no contexto da eficiência energética nas empresas, com um impacto significativo na redução dos custos associados ao consumo de energia. Considerando que o tratamento térmico de peças em aço representa uma parcela considerável do consumo de gás em uma empresa (cerca de 33% do total de gás consumido), abordar especificamente a otimização desse subprocesso é uma estratégia sólida para reduzir custos energéticos. É notável que o projeto de processo de tratamento térmico começa com a seleção da curva temperatura-tempo

apropriada, geralmente com base na experiência dos especialistas da empresa. No entanto, reconhecer a oportunidade de otimizar esses parâmetros em termos de eficiência energética é crucial. Ao fazê-lo, não apenas é possível minimizar o consumo de energia, mas também os custos de manutenção, garantindo que o processo otimizado permaneça economicamente viável (MENDIKOA *et al.*, 2013).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Descrição geral do projeto

Este trabalho teve como objetivo investigar a influência dos parâmetros do tratamento térmico de recozimento pleno e normalização na microestrutura e na dureza de um aço de baixo carbono encruado. A Figura 4.1 apresenta as etapas e os ensaios realizados, fornecendo uma visão abrangente e detalhada de todo o processo



Fonte: Próprio Autor, 2025.

## 4.2 Materiais

O material utilizado neste estudo foi uma barra de aço SAE 1020, trefilada e, conseqüentemente, encruada, com diâmetro de 12,70 mm, adquirida da empresa Açoliver. A composição química (%peso) está presente na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 - Composição química (%peso) do aço SAE 1020**

Elemento	C	Mn	Si
% Peso	0,18 - 0,23 %	0,30 - 0,60%	0,05%

Fonte: AÇOLIVER, 2025.

## 4.3 Preparação das Amostras

Após a aquisição do material trefilado e encruado, foram cortados **nove corpos de prova** utilizando uma máquina de corte a disco, com alturas padronizadas de **20 mm**. Para possibilitar a caracterização inicial do material nas direções longitudinal e transversal, foi realizado um corte adicional na direção longitudinal em um dos corpos de prova. A amostra selecionada foi preparada para análises metalográficas e ensaio de dureza.

Os outros **oito corpos de prova** foram preparados para a realização dos processos de tratamento térmico. Após a realização dos tratamentos térmicos, as amostras foram submetidas a uma segunda etapa de corte longitudinal, permitindo a análise do material nas direções longitudinal e transversal. Em seguida, foram devidamente preparadas para a caracterização microestrutural e mecânica.

## 4.3 Tratamento Térmico

Em seguida, um plano de procedimento de tratamentos térmicos foi feito em todos os **oito corpos de prova**. A fim de analisar a influência de 2 parâmetros tratamento térmico (tempo de encharque e taxa de resfriamento) a temperatura foi adotada como fixa, sendo esta temperatura situada entre 30°C acima da temperatura crítica superior (A3) para aços hipoeutetoides, no caso, 880°C.

O plano de procedimento de tratamentos térmicos está ilustrado na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2 - Plano de procedimento de tratamentos térmicos**

Qtde total de Amostras	Temperatura (°C)	Tempo de encharque (min)	meios de resfriamento
2	880°	1	1 no forno/ 1 ao ar
2	880°	5	1 no forno/ 1 ao ar
2	880°	10	1 no forno/ 1 ao ar
2	880°	15	1 no forno/ 1 ao ar

Fonte: Próprio Autor, 2025

Para a realização dos tratamentos térmicos, as amostras foram envoltas por um arame de aço SAE 1045 para maior facilidade de manuseio no forno, como mostra a Figura 4.2.

**Figura 4.2 - Gaiolas utilizadas para transporte de corpos de prova**

Fonte: Próprio Autor, 2025.

Inicialmente, foram realizados os tratamentos térmicos seguidos de resfriamento ao ar. Para isso, utilizou-se um forno da marca Brasimet, aquecido a 880°C. As gaiolas contendo as amostras foram inseridas no forno individualmente, com tempos de encharque progressivos de 1, 5, 10 e 15 minutos. Após o término do tempo de encharque de cada amostra, elas foram retiradas do forno e submetidas ao resfriamento ao ar.

Em seguida, foram realizados os tratamentos térmicos seguidos de resfriamento dentro do forno. O mesmo forno foi aquecido a 880°C, e as gaiolas contendo as amostras foram inseridas individualmente, também com tempos de encharque crescentes de 1, 5, 10 e 15 minutos. Após cada amostra completar o tempo de encharque, o forno foi desligado, e as amostras foram deixadas para resfriar lentamente dentro do equipamento.

### **4.3 Caracterização Microestrutural**

Após o processamento das demais **oito amostras** conforme o plano de procedimentos de tratamentos térmicos, estas foram cortadas na direção longitudinal e preparadas para análise metalográfica. O preparo incluiu o embutimento em resina polimérica, lixamento com lixas d'água em lixadeiras das marcas Struers, Teclago e Arotec, com granulometrias progressivas (#120, #240, #320, #420 e #600) e polimento com pasta de diamante em politrizes das marcas Arotec e Struers com partículas de 9 e 3 µm, tendo o álcool como fluido refrigerante e lubrificante. Após essa preparação, os corpos de prova foram submetidos a ataque químico em uma capela de exaustão de gases da marca Buzattos, com o reativo Nital a 3% para revelar as microestruturas.

Após a conclusão da preparação metalográfica, foram realizadas análises da microestrutura de cada amostra (nas direções longitudinal e transversal) no microscópio óptico (MO) da marca Fortel, equipado com um sistema de digitalização da marca Kontrol, utilizando duas diferentes ampliações (400x e 800x) para cada condição adotada no plano de procedimentos de tratamentos térmicos, de forma a avaliar a influência de cada parâmetro no resultado deste ensaio.

### **4.3 Caracterização Mecânica**

Para a análise mecânica das amostras, foi realizado o ensaio de microdureza Vickers utilizando um equipamento da marca Shimadzu. As amostras utilizadas nesta etapa foram as mesmas utilizadas na etapa de caracterização metalográfica.

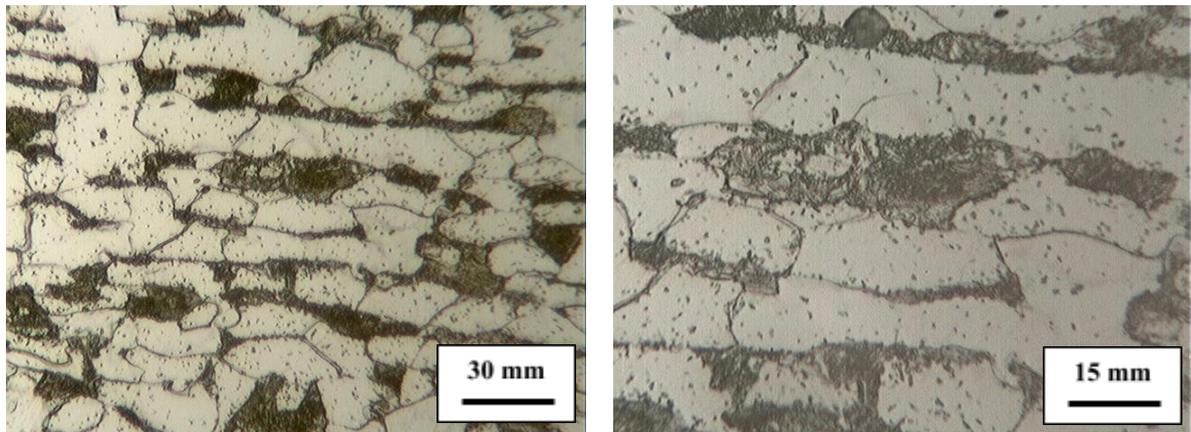
Em cada amostra, foram efetuados 20 ensaios (10 na seção longitudinal e 10 na seção transversal), aplicando uma carga de 2 kgf por 15 segundos, com o objetivo de obter uma visão geral da distribuição de dureza na microestrutura do material de forma a avaliar a influência de cada parâmetro no resultado deste ensaio.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização Microestrutural

As Figuras 5.1 e 5.2 revelam que a microestrutura da amostra de aço 1020 trefilado é composta predominantemente por grãos de ferrita, com a presença do constituinte perlita em menor proporção, característica típica de aços de baixo teor de carbono. A Figura 5.1, que mostra o corte longitudinal, evidencia uma microestrutura resultante de uma deformação plástica intensa, com grãos alongados na direção da deformação. Esta característica é indicativa do processo de trefilação pelo qual o material passou. Além disso, a Figura 5.2, que apresenta o corte transversal, confirma a presença de grãos alongados em outra direção, reforçando a observação de que o material sofreu uma deformação significativa.

**Figura 5.1 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado (Estado Inicial) – Seção longitudinal**



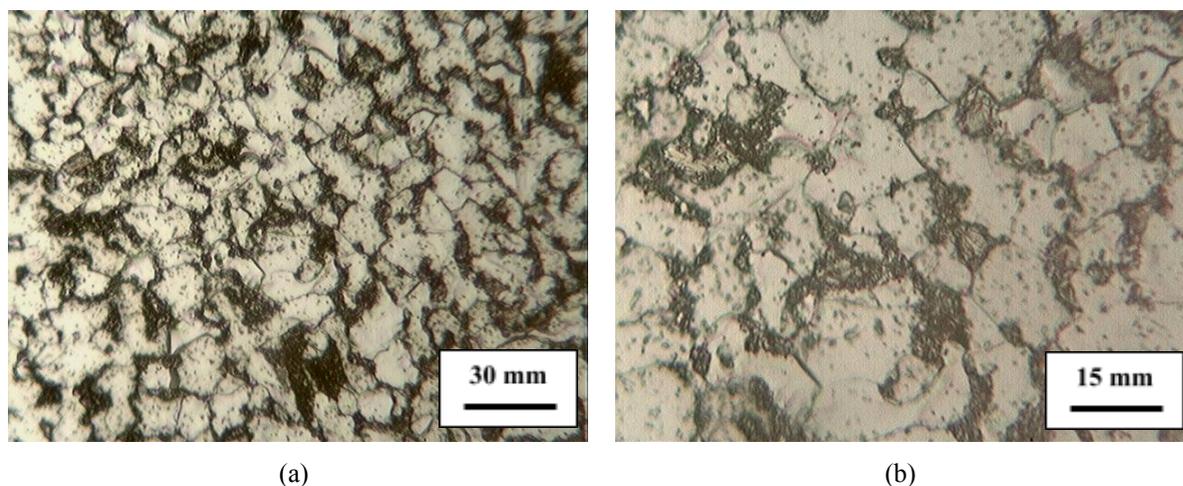
(a)

(b)

(a) e (b) ampliações distintas

Fonte: Próprio Autor, 2025.

**Figura 5.2 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado (Estado Inicial) – Seção Transversal**



(a) e (b) ampliações distintas

Fonte: Próprio Autor, 2025.

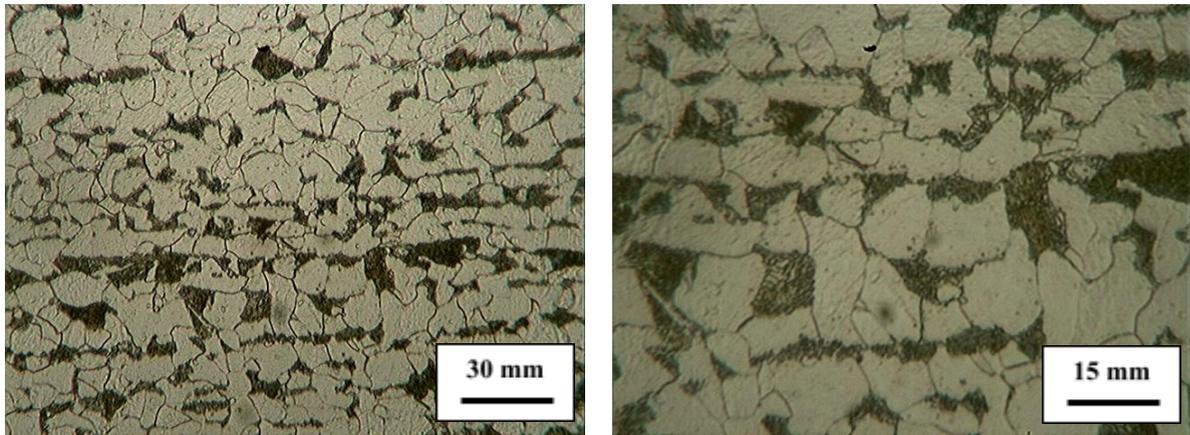
As Figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam, respectivamente, a micrografia em corte longitudinal do aço 1020 trefilado após ser submetido ao tratamento térmico seguido de resfriamento ao ar, com diferentes tempos de encharque de 1, 5, 10 e 15 minutos a uma temperatura fixa de 880°C (normalização). As micrografias para cada tempo de encharque adotado confirmam esse efeito. Observa-se que, ao aumentar o tempo de encharque, o tamanho médio dos grãos na microestrutura do material aumenta.

Embora a diferença de tamanho de grão entre os tempos de encharque seja sutil, mesmo adotando intervalos de tempos não tão distantes, ainda é possível observar alguma diferença. Essa diferença torna-se ainda mais evidente ao comparar as microestruturas do aço 1020 trefilado submetido à normalização com tempos de encharque de 1 e 15 minutos.

A amostra submetida a normalização com tempo de encharque de 1 minuto apresenta uma diversidade maior de tamanho de grão quando comparado com a amostra submetida a normalização com tempo de encharque de 15 minutos que possui uma microestrutura mais homogênea. Isso acontece pois a amostra submetida a um tempo de encharque de 1 minuto teve menos tempo hábil para promover a recristalização e crescimento de grão, resultando em uma microestrutura menos homogênea com grãos pequenos nucleados que não cresceram.

Isso ocorre porque, quanto mais tempo o material permanece em altas temperaturas, mais suscetível ele se torna à ocorrência dos fenômenos termicamente ativados, resultando em uma microestrutura com grãos maiores e mais homogêneos.

**Figura 5.3 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido à normalização (1 minuto de encharque) – Seção Longitudinal**



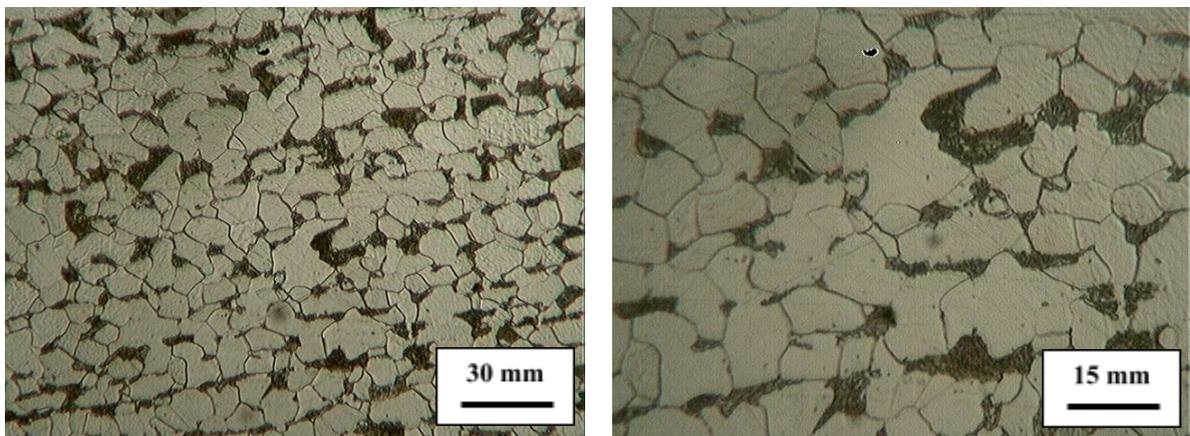
(1A)

(1B)

normalização - ampliações distintas (1A) e (1B) - 1 minuto de encharque

Fonte: Próprio Autor, 2025.

**Figura 5.4 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido à normalização (5 minutos de encharque) – Seção Longitudinal**



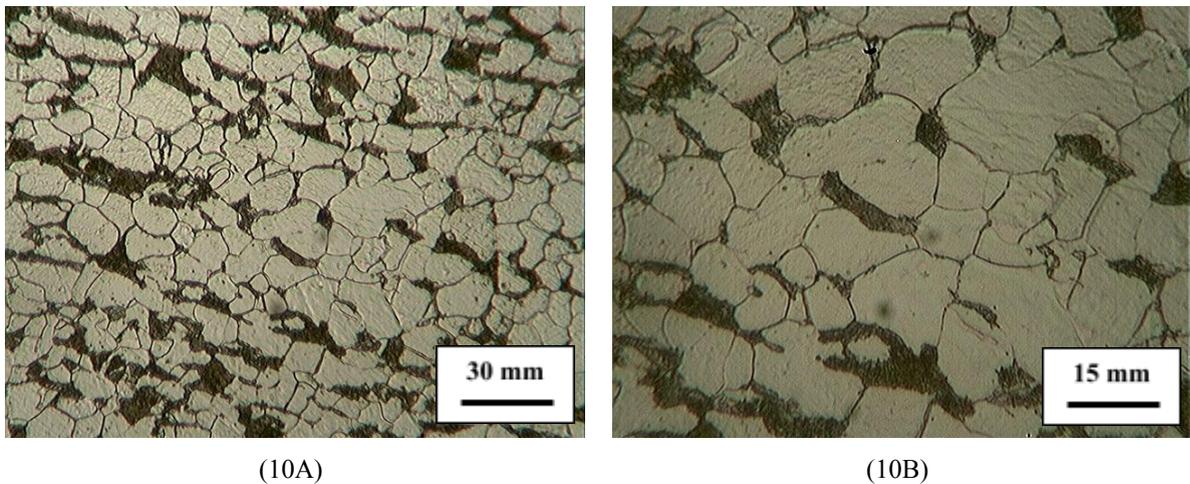
(5A)

(5B)

normalização - ampliações distintas (5A) e (5B) - 5 minutos de encharque

Fonte: Próprio Autor, 2025.

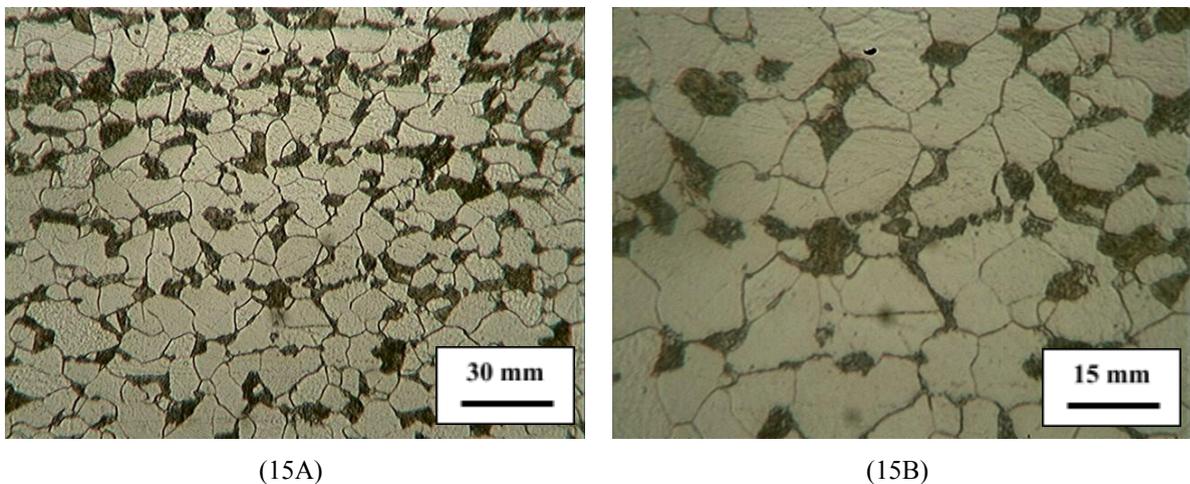
**Figura 5.5 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido à normalização (10 minutos de encharque) – Seção Longitudinal**



normalização - ampliações distintas (10A) e (10B) - 10 minutos de encharque

Fonte: Próprio Autor, 2025.

**Figura 5.6 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido à normalização (15 minutos de encharque) – Seção Longitudinal**



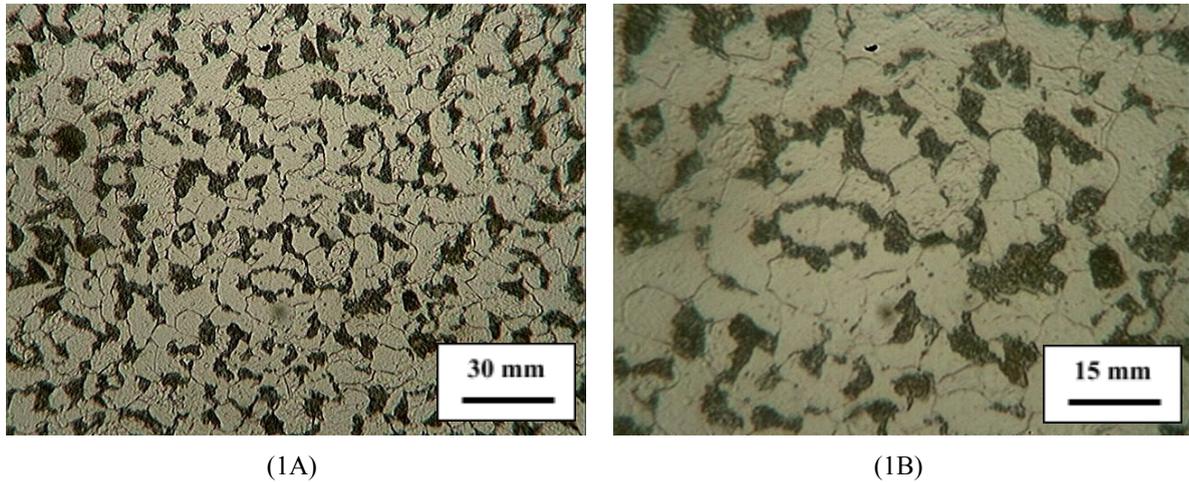
normalização - ampliações distintas (15A) e (15B) - 15 minutos de encharque

Fonte: Próprio Autor, 2025.

As Figuras 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 apresentam, respectivamente, a micrografia em corte transversal das mesmas amostras de aço 1020 trefilado submetidas ao tratamento térmico de seguido de resfriamento ao ar, com diferentes tempos de encharque de 1, 5, 10 e 15 minutos a uma temperatura fixa de 880°C (normalização). Observa-se a mesma tendência de crescimento do tamanho médio dos grãos à medida que o tempo de encharque aumenta. Essa observação reforça os resultados previamente discutidos (corte longitudinal), indicando que o

aumento do tempo de exposição a altas temperaturas promove a ocorrência de fenômenos termicamente ativados de forma mais intensa.

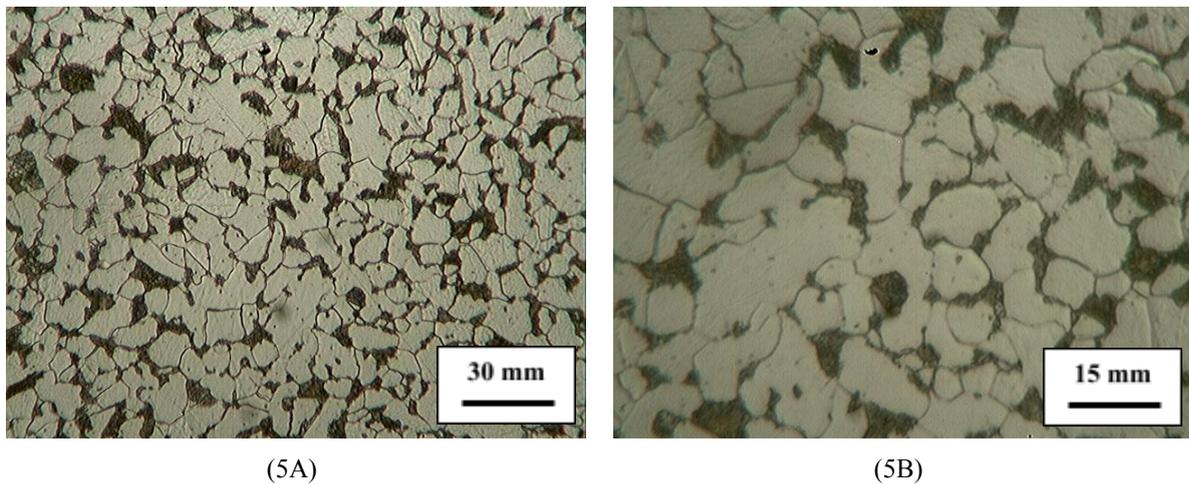
**Figura 5.7 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido à normalização (1 minuto de encharque) – Seção Transversal**



normalização - ampliações distintas (1A) e (1B) - 1 minutos de encharque

Fonte: Próprio Autor, 2025.

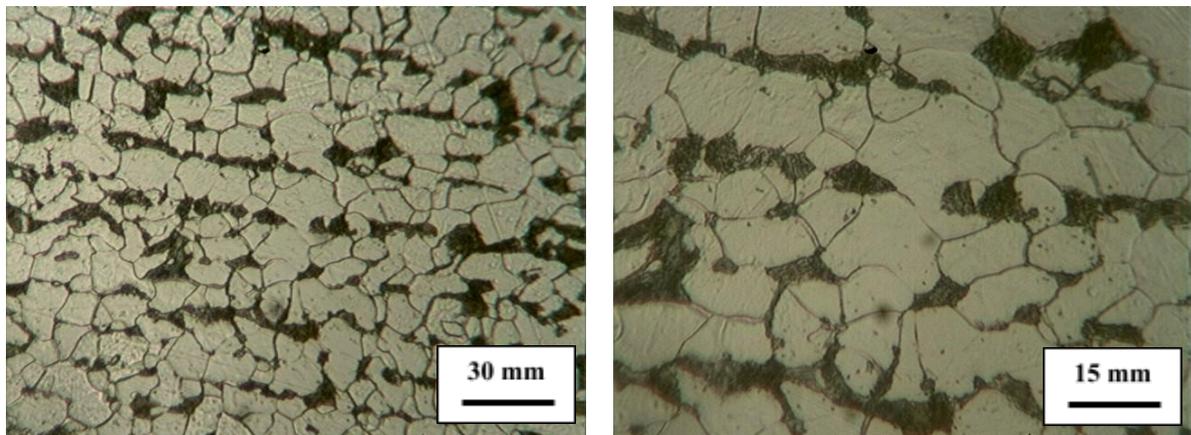
**Figura 5.8 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido à normalização (5 minutos de encharque) – Seção Transversal**



normalização - ampliações distintas (5A) e (5B) - 5 minutos de encharque

Fonte: Próprio Autor, 2025.

**Figura 5.9 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido à normalização (10 minutos de encharque) – Seção Transversal**



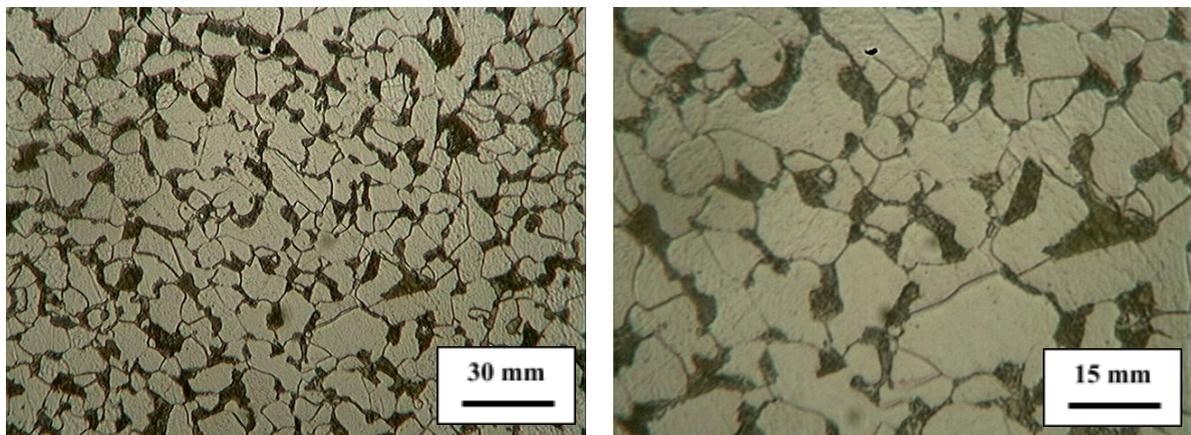
(10A)

(10B)

normalização - ampliações distintas (10A) e (10B) - 10 minutos de encharque

Fonte: Próprio Autor, 2025.

**Figura 5.10 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido à normalização (15 minutos de encharque) – Seção Transversal**



(15A)

(15B)

normalização - ampliações distintas (15A) e (15B) - 15 minutos de encharque

Fonte: Próprio Autor, 2025.

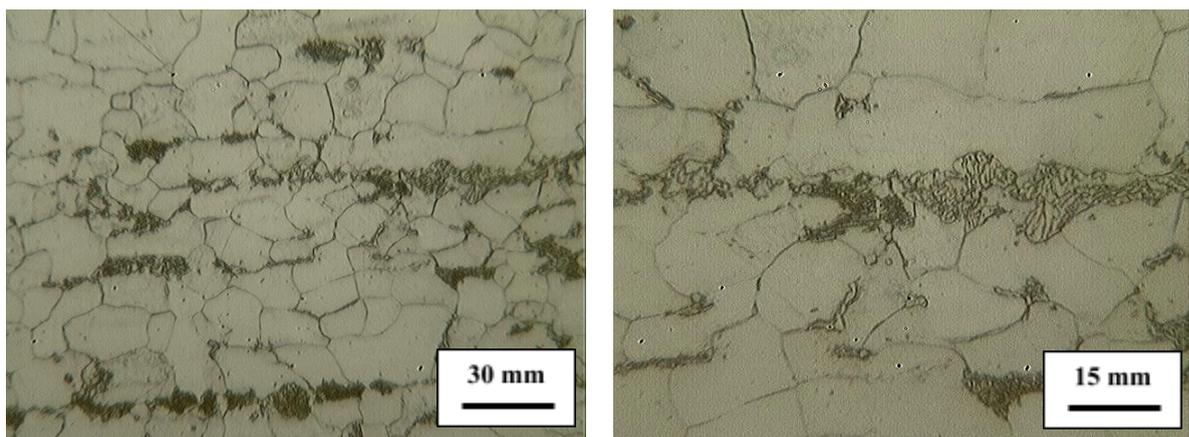
As Figuras 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14 apresentam os resultados da micrografia em corte longitudinal do aço 1020 trefilado após ser submetido ao tratamento térmico seguido de resfriamento dentro do forno, com diferentes tempos de encharque de 1, 5, 10 e 15 minutos a uma temperatura fixa de 880°C (recozimento). O objetivo do tratamento térmico de recozimento é restaurar as características mecânicas e microestruturais de um material encruado, homogeneizando sua microestrutura e reduzindo sua dureza através da ocorrência

de fenômenos termicamente ativados, como recristalização e crescimento de grão. Este processo ocorre de forma mais intensa quando comparado ao tratamento térmico de normalização, devido ao maior tempo de exposição a elevadas temperaturas promovido pelo resfriamento lento dentro do forno.

As micrografias para cada tempo de encharque adotado confirmam esse efeito. Observa-se que, ao aumentar o tempo de encharque, o tamanho médio dos grãos na microestrutura do material aumenta. No entanto, quando comparado com as amostras submetidas ao tratamento térmico de normalização (taxa de resfriamento maior), é possível observar que o tamanho médio dos grãos das amostras submetidas ao tratamento térmico de recozimento (taxa de resfriamento menor) é maior. Isso se deve ao fato de que o resfriamento lento dentro do forno proporciona mais tempo para a ocorrência dos fenômenos termicamente ativados, resultando em uma microestrutura com grãos significativamente maiores.

Também é possível perceber que, assim como nas amostras submetidas ao tratamento térmico de normalização, a diferença de tamanho médio de grão entre os tempos de encharque não é tão significativa. No entanto, mesmo que sutil, ainda há uma diferença, com a tendência de que, ao aumentar o tempo de encharque, o tamanho médio de grão aumenta proporcionalmente.

**Figura 5.11 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido ao recozimento (1 minuto de encharque) – Seção Longitudinal**



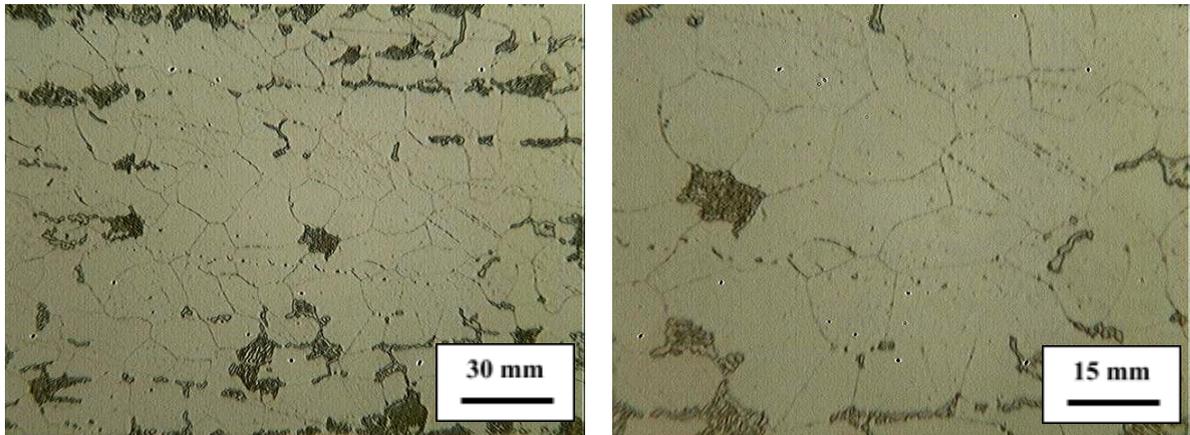
(1A)

(1B)

recozimento - ampliações distintas (1A) e (1B) - 1 minuto de encharque

Fonte: Próprio Autor, 2025.

**Figura 5.12 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido ao recozimento (5 minutos de encharque) – Seção Longitudinal**



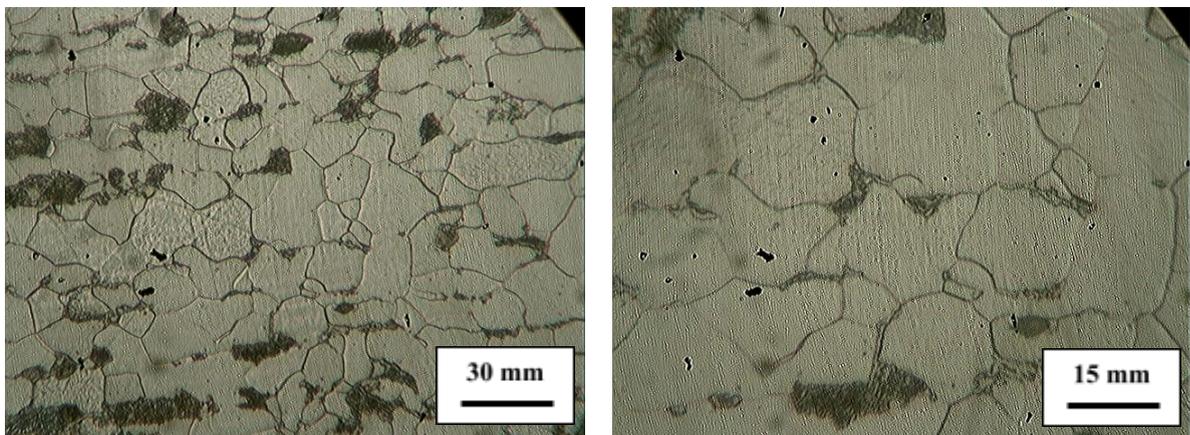
(5A)

(5B)

recozimento - ampliações distintas (5A) e (5B) - 5 minutos de encharque

Fonte: Próprio Autor, 2025.

**Figura 5.13 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido ao recozimento (10 minutos de encharque) – Seção Longitudinal**



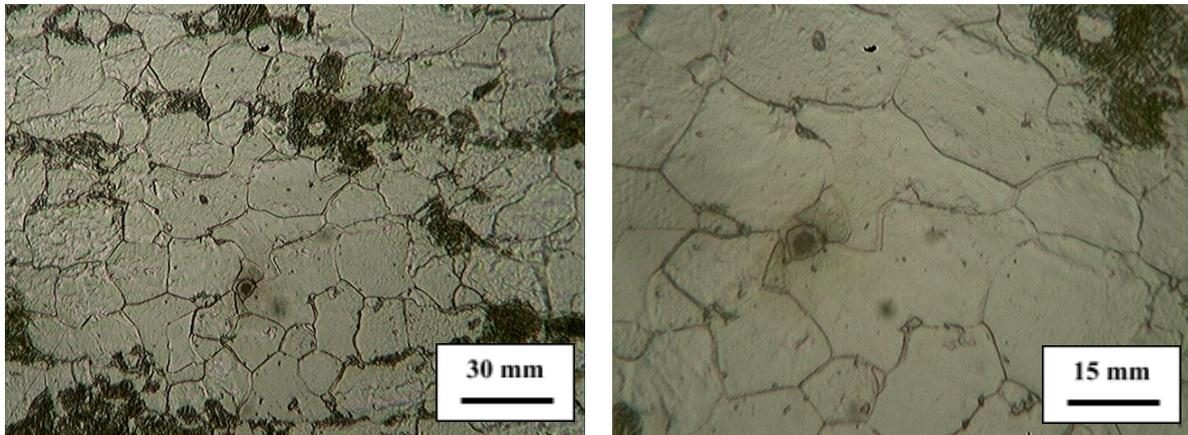
(10A)

(10B)

recozimento - ampliações distintas (10A) e (10B) - 10 minutos de encharque

Fonte: Próprio Autor, 2025.

**Figura 5.14 – Imagens da microestrutura da amostra de aço SAE 1020 trefilado submetido ao recozimento (15 minutos de encharque) – Seção Longitudinal**



(15A)

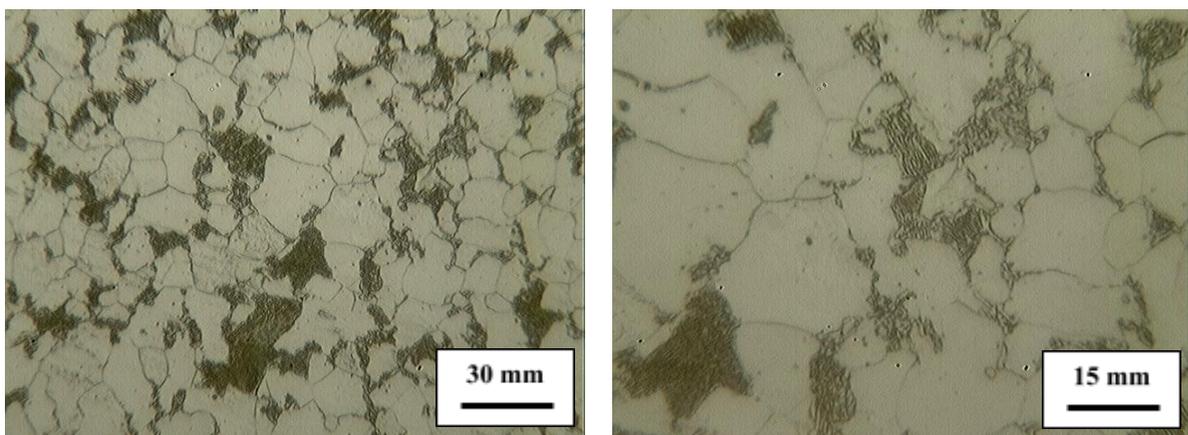
(15B)

recozimento - ampliações distintas (15A) e (15B) - 15 minutos de encharque

Fonte: Próprio Autor, 2025.

As Figuras 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18 apresentam a micrografia em corte transversal das mesmas amostras de aço 1020 trefilado submetidas ao tratamento térmico de recozimento (resfriamento dentro do forno). Também é possível observar, a mesma tendência sutil de crescimento do tamanho médio dos grãos à medida que o tempo de encharque aumenta. Essa observação reforça os resultados previamente discutidos no corte longitudinal.

**Figura 5.15 – Imagens da microestrutura das amostras aço SAE 1020 trefilado submetido ao Recozimento (1 minuto de encharque) – Seção Transversal**



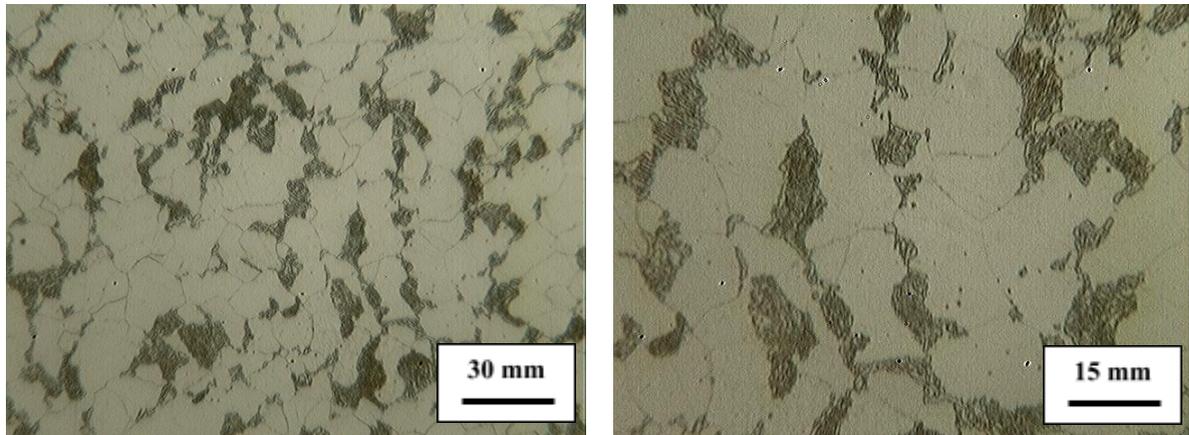
(1A)

(1B)

recozimento - ampliações distintas (1A) e (1B) - 1 minuto de encharque

Fonte: Próprio Autor, 2025.

**Figura 5.16 – Imagens da microestrutura das amostras aço SAE 1020 trefilado submetido ao Recozimento (5 minutos de encharque) – Seção Transversal**



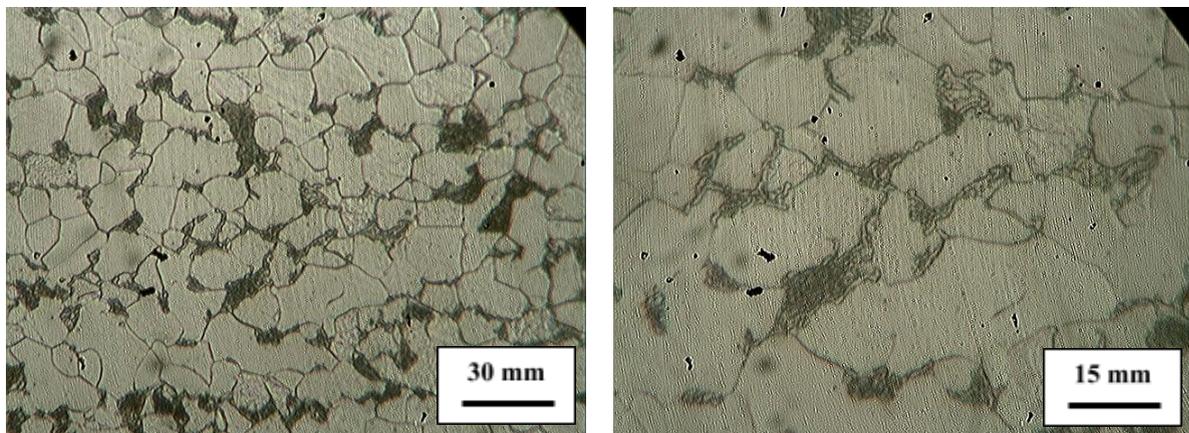
(5A)

(5B)

normalização - ampliações distintas (5A) e (5B) - 5 minutos de encharque

Fonte: Próprio Autor, 2025.

**Figura 5.17 – Imagens da microestrutura das amostras aço SAE 1020 trefilado submetido ao Recozimento (10 minutos de encharque) – Seção Transversal**



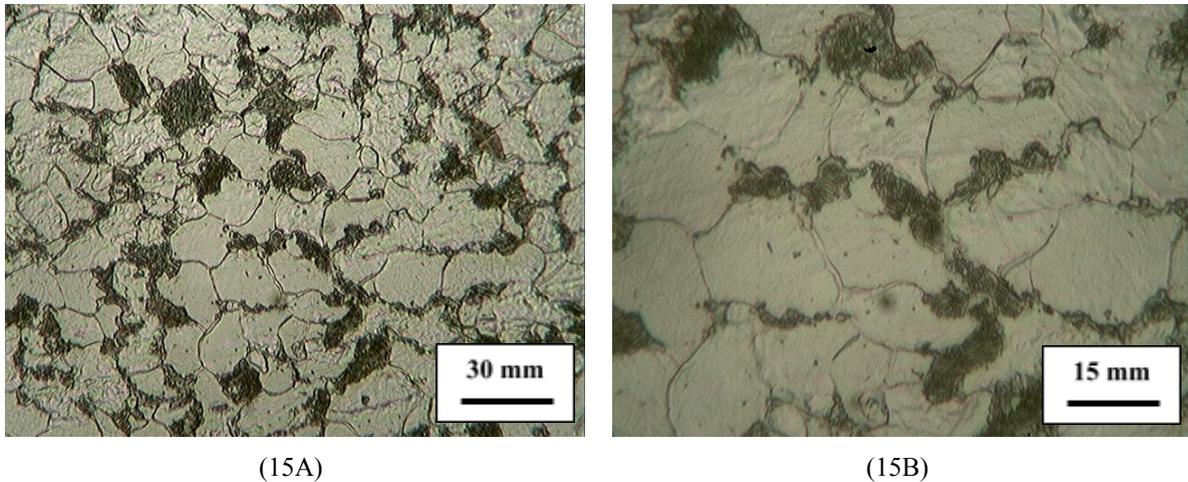
(10A)

(10B)

recozimento - ampliações distintas (10A) e (10B) - 10 minutos de encharque

Fonte: Próprio Autor, 2025.

**Figura 5.18 – Imagens da microestrutura das amostras aço SAE 1020 trefilado submetido ao Recozimento (15 minutos de encharque) – Seção Transversal**



recozimento - ampliações distintas (15A) e (15B) - 15 minutos de encharque

Fonte: Próprio Autor, 2025.

## 5.2 Caracterização Mecânica (Microdureza)

A Tabela 5.7 apresenta o resultado de microdureza (Vickers) do aço 1020 trefilado em seu estado inicial. Observa-se que a dureza do aço SAE 1020 sem tratamento térmico é de 115 HV (DIGIMETA, [s.d.]). Os resultados obtidos indicam uma diferença significativa nos valores de dureza em comparação com o esperado para um aço SAE 1020, corroborando o fenômeno de encruamento sofrido pelo material durante o processo de trefilação. Esse aumento na dureza é atribuído à deformação plástica intensa, que resulta na elevação nos valores dos parâmetros de resistência mecânica do material, como a dureza.

A diferença dos valores médios de dureza do aço SAE 1020 trefilado no estado inicial nas regiões longitudinal e transversal se dá devido à clara diferença do tamanho de grão presente na microestrutura da amostra nessas duas regiões, onde é possível perceber que a região transversal reflete os grãos alongados em uma visão transversal, fazendo com que a microestrutura resultante se apresente com grãos significativamente menores quando comparados com a microestrutura do material na região longitudinal. Além disso, mesmo que a diferença seja sutil, acredita-se que pode estar sendo observado algum efeito do chamado “caminho de deformação”, uma vez que o ensaio de microdureza aplicado na seção longitudinal representa uma alteração na trajetória de deformação diferente daquela que estaria associada à aplicação da deformação da microdureza na seção transversal (CORRÊA, 2004).

**Tabela 5.1 - Microdureza Vickers das amostras de aço 1020 trefilado estado inicial**

	Estado Inicial Seção Longitudinal	Estado Inicial Seção Transversal
Dureza Média (HV)	197,40	201,20
Desvio Padrão (HV)	6,02	4,13

Fonte: Próprio Autor, 2025

A Tabela 5.2 apresenta os valores médios de microdureza (Vickers) da seção longitudinal das amostras submetidas ao tratamento térmico seguido de resfriamento ao ar (normalização), com diferentes tempos de encharque de 1, 5, 10 e 15 minutos a uma temperatura de 880°C. Os resultados mostram uma redução significativa de dureza do material em todas as condições adotadas de tempo de encharque. No entanto, é possível perceber que, mesmo que sutil, ainda há uma diferença de dureza do material a depender do tempo de encharque. Essa diferença se dá principalmente devido à microestrutura gerada em cada uma dessas condições de encharque.

Um tempo menor de encharque (amostra com tempo de encharque de 1 minuto) impossibilita a ocorrência eficaz dos fenômenos termicamente ativados, como a recristalização e o crescimento de grão, gerando uma microestrutura com uma maior variedade de tamanho de grão, assim como mostrado previamente nas imagens de microscopia óptica, resultando em valores de dureza um pouco mais próximos do valor de dureza do estado inicial, ainda que menor. Já quando se observa a amostra com tempo de encharque de 15 minutos, a microestrutura gerada reflete o maior tempo hábil para a ocorrência dos fenômenos termicamente ativados decorrente do resfriamento lento, com grãos maiores e mais homogêneos, resultando em uma redução ainda maior nos valores de dureza.

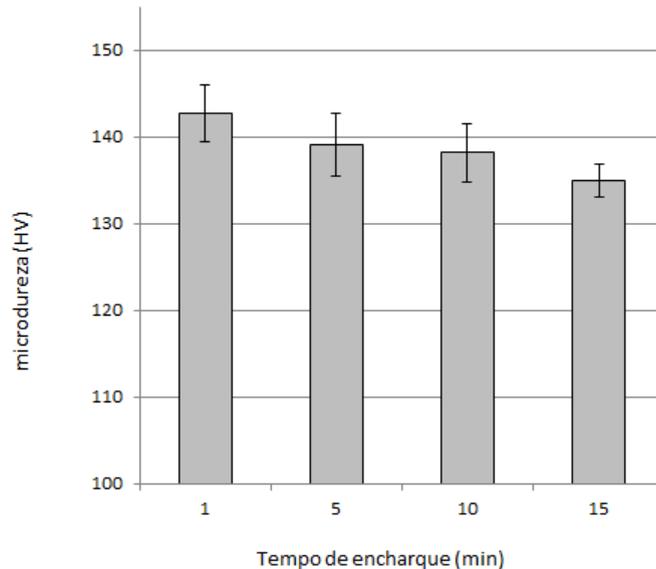
**Tabela 5.2 - Microdureza Vickers das amostras de aço 1020 trefilado tratado termicamente seguido de resfriamento ao ar (Seção Longitudinal)**

	1 minuto	5 minutos	10 minutos	15 minutos
Dureza Média (HV)	142,72	139,10	138,20	134,90
Desvio Padrão	3,35	3,57	3,32	1,91

Fonte: Próprio Autor, 2025.

A Figura 5.19 mostra a tendência do comportamento de microdureza (Vickers) das amostras de aço 1020 trefilado tratado termicamente seguido de resfriamento ao ar, na seção longitudinal.

**Figura 5.19 - Comportamento de microdureza Vickers das amostras de aço 1020 trefilado tratado termicamente seguido de resfriamento ao ar (Seção Longitudinal)**



Fonte: Próprio Autor, 2025

O mesmo comportamento se repete na seção transversal das mesmas amostras, conforme mostrado na Tabela 5.3. Embora não haja uma diferença significativa nos valores de microdureza entre os diferentes tempos de encharque adotados, ainda é possível perceber a mesma tendência observada nos resultados de microdureza realizados no corte longitudinal da amostra, discutidos previamente. Isso indica que a microestrutura resultante dos processos de tratamento térmico seguido de resfriamento ao ar, com diferentes tempos de encharque de 1, 5, 10 e 15 minutos a uma temperatura de 880°C, mantém características consistentes em ambas as direções.

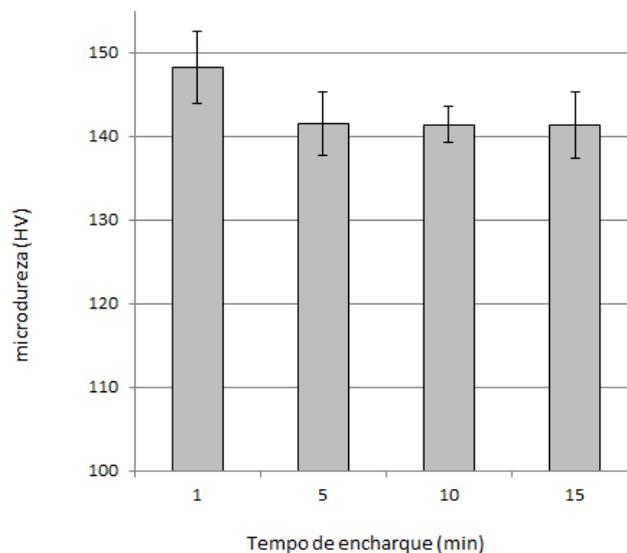
**Tabela 5.3 - Microdureza Vickers das amostras de aço 1020 trefilado tratado termicamente seguido de resfriamento ao ar (Seção Transversal)**

	1 minuto	5 minutos	10 minutos	15 minutos
Dureza Média (HV)	148,20	141,50	141,40	141,40
Desvio Padrão	4,29	3,78	2,17	3,95

Fonte: Próprio Autor, 2025

A Figura 5.20 mostra a tendência do comportamento de microdureza (Vickers) das amostras de aço 1020 trefilado tratado termicamente seguido de resfriamento ao ar, na seção transversal.

**Figura 5.20 - Comportamento de microdureza Vickers das amostras de aço 1020 trefilado tratado termicamente seguido de resfriamento ao ar (Seção Transversal)**



Fonte: Próprio Autor, 2025

A Tabela 5.4 apresenta os valores médios de microdureza (Vickers) da seção longitudinal das amostras submetidas ao tratamento térmico seguido de resfriamento dentro do forno (recozimento), com diferentes tempos de encharque de 1, 5, 10 e 15 minutos a uma temperatura de 880°C. Em comparação com os dados discutidos anteriormente, é possível observar que os valores de dureza das amostras submetidas ao tratamento térmico seguido de resfriamento dentro do forno reduziram de maneira mais drástica para todos os tempos de encharque adotados. Isso pode ser explicado principalmente pela microestrutura resultante

dessas amostras após o tratamento térmico, que apresentam grãos maiores e mais homogêneos provenientes do resfriamento lento, que possibilitou a ocorrência dos fenômenos termicamente ativados de forma mais intensa e sem interrupções, ou seja, o mecanismo difusional responsável pelo desenvolvimento dos constituintes ocorreu de maneira mais intensa porque as amostras permaneceram mais tempo a elevadas temperaturas durante o resfriamento (REED-HILL, 1982).

Novamente, mesmo que não haja uma grande diferença de valores de microdureza entre os tempos de encharque, ainda é possível observar a tendência de que, ao aumentar o tempo de encharque, a dureza do material diminui de forma proporcional.

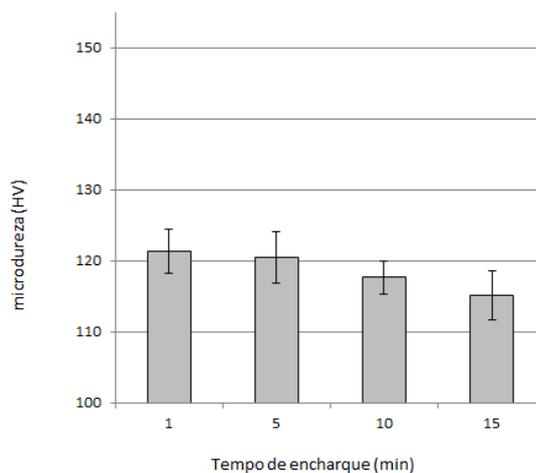
**Tabela 5.4 - Microdureza Vickers das amostras de aço 1020 trefilado tratado termicamente seguido de resfriamento dentro do forno (Seção Longitudinal)**

	1 minuto	5 minutos	10 minutos	15 minutos
Dureza Média (HV)	121,4	120,5	117,7	115,1
Desvio Padrão	3,14	3,63	2,30	3,41

Fonte: Próprio Autor, 2025

A Figura 5.21 mostra a tendência do comportamento de dureza das amostras de aço 1020 trefilado tratado termicamente seguido de resfriamento dentro do forno, na seção longitudinal.

**Figura 5.21 - Comportamento de microdureza Vickers das amostras de aço 1020 trefilado tratado termicamente seguido de resfriamento dentro do forno (Seção Longitudinal)**



Fonte: Próprio Autor, 2025

A Tabela 5.5 mostra os resultados de dureza na seção transversal das mesmas amostras. Novamente, embora não haja uma diferença significativa nos valores de microdureza entre os diferentes tempos de encharque adotados, ainda é possível perceber a mesma tendência observada nos resultados de microdureza realizados no corte longitudinal da amostra, discutidos previamente.

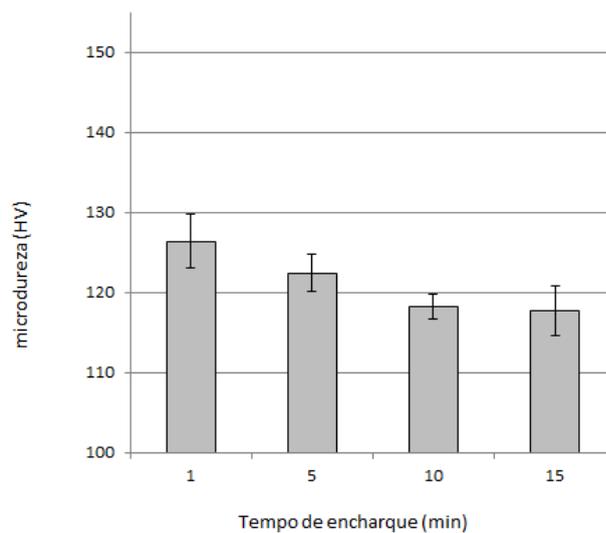
**Tabela 5.5 - Microdureza Vickers das amostras de aço 1020 trefilado tratado termicamente seguido de resfriamento dentro do forno (Seção Transversal)**

	1 minuto	5 minutos	10 minutos	15 minutos
Dureza Média (HV)	126,40	122,40	118,30	117,70
Desvio Padrão	3,37	2,32	1,57	3,12

Fonte: Próprio Autor, 2025.

A Figura 5.22 mostra a tendência do comportamento de dureza das amostras de aço 1020 trefilado tratado termicamente seguido de resfriamento dentro do forno, na seção transversal.

**Figura 5.22 - Comportamento de microdureza Vickers das amostras de aço 1020 trefilado tratado termicamente seguido de resfriamento dentro do forno (Seção Transversal)**



Fonte: Próprio Autor, 2025

## 6 CONCLUSÃO

Observando os resultados, é possível afirmar a clara influência dos parâmetros de tratamento térmico na microestrutura do material estudado (aço 1020 trefilado), como o tempo de encharque e a taxa de resfriamento. No entanto, os resultados de micrografia e microdureza discutidos previamente revelam que, de forma geral, a taxa de resfriamento apresentou uma influência mais significativa, ao menos para o intervalo de tempo de encharque considerado no trabalho, uma vez que é possível perceber que a redução de dureza das amostras submetidas ao tratamento térmico seguido de resfriamento dentro do forno é muito mais intensa quando comparada com a redução de dureza das amostras submetidas ao tratamento térmico seguido de resfriamento ao ar.

No entanto, também é possível afirmar que o tempo de encharque é um fator determinante na redução de dureza de materiais submetidos a tratamentos térmicos que visam recuperar a microestrutura e o comportamento mecânico original dos materiais, uma vez que foi possível observar uma tendência de redução de dureza à medida que se aumenta o tempo de encharque para todas as condições de taxa de resfriamento adotadas, mesmo que de forma menos intensa.

Os resultados também reforçam a importância da seleção adequada dos parâmetros de tratamento térmico na obtenção de resultados satisfatórios em termos de microestrutura e resistência mecânica. A escolha correta de parâmetros de tratamento térmico como tempo de encharque e taxa de resfriamento pode otimizar as propriedades do material, garantindo um desempenho superior em aplicações práticas. Além disso, a compreensão detalhada dos efeitos desses parâmetros permite um controle mais preciso do processo de fabricação, resultando em produtos finais de maior qualidade e confiabilidade.

A compreensão e seleção correta dos parâmetros de tratamento térmico são cruciais para a otimização de processos industriais, uma vez que a compreensão dos efeitos de cada parâmetro na microestrutura e dureza dos materiais pode evitar a geração de defeitos, como crescimento de grão descontrolado ou ineficiência na recuperação da microestrutura do material encruado. Esses defeitos podem colaborar para o aumento de refugos de produção e perda de eficiência em empresas. Portanto, a análise criteriosa e a aplicação adequada dos tratamentos térmicos são essenciais para o desenvolvimento de materiais com características mecânicas e microestruturais desejadas.

## REFERÊNCIAS

- Aço Brasil prevê queda de produção, vendas e consumo aparente em 2023. **Assessoria de Imprensa Instituto Aço Brasil**, 19 de julho de 2023. Disponível em: <<https://acobrasil.org.br/site/noticia/aco-brasil-preve-queda-de-producao-vendas-e-consumo-a-parente-em-2023/>>. Acesso em: 15/11/2023.
- ASM (American Society of Metals). **Heat Treating. Metals Handbook**. Vol. 4, 9ª Edição, 1981.
- AWAN, I. Z.; KHAN, A. Q. **Recovery, Recrystallization, and Grain-Growth**. Journal of the Chemical Society of Pakistan, v. 41, n. 01, p. 1-42, mar. 2019. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/Recovery\\_Recrystallization\\_and\\_Grain-Growth](https://www.researchgate.net/publication/Recovery_Recrystallization_and_Grain-Growth). Acesso em: 24 set. 2023.
- BRESCIANI Filho, Ettore ; ZAVAGLIA, Cecília Amélia Carvalho; BUTTON, Sérgio Tonini; GOMES, Edson; NERY, Fernando Antonio da Costa. **Conformação Plástica dos Metais**. 5. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2011. 383 p.
- CALLISTER, Jr., William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021. 864 p. ISBN 9788521637288.
- CORRÊA, Elaine Carballo Siqueira. **Aspectos do encruamento de metais previamente deformados a frio**. 2004. 262 p. Tese – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7 ed. São Paulo: Blucher, 2015. 1 v. 599p.
- DIGIMETA.COM.BR, D. I. M. -. **Aço 1020: Propriedades e Preço!**» Aços Nobre em Sorocaba. Disponível em: <<https://acosnobre.com.br/blog/aco-1020-propriedades-dureza-preco/>>.
- HELMAN, H.; CETLIN P. R. **Fundamentos de conformação mecânica dos metais**. Segunda edição, São Paulo, Editora Artliber, 2010. 260 p.

HUMPHREYS, F.; HATHERLY, M. **Recrystallization and related annealing phenomena**. 2ed. 2004. 658p.

KUMAR, S. **Plastic deformation behavior in steels during metal forming processes: a review**. USA, Interchopen, 2021. 23p.

MENDIKOA, I. et. al. **Heat Treatment Process Energy Efficient Design and Optimisation**. Procedia Engineering, vol 63, p. 303-309, Março 2013. Disponível em: Heat Treatment Process Energy Efficient Design and Optimisation - ScienceDirect Acesso em: 24/09/2023. (2013)

PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia**. 1 ed. Curitiba, MCT Produções Gráficas, 2000. 343p

PADILHA, A. F.; SICILIANO, Jr. F. **Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura**. 3 ed. São Paulo, ABM, 2005. 232p

RAJAN, T.V.; SHARMA, C.P.; SHARMA, ASHKOK. **Heat Treatment, Principles and Techniques**. 2 ed. New Delhi ,PHI Learning Private Limited, 2011. 390p.

REED-HILL, R. E. **Princípios de metalurgia física**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982. 776p.

RUY, Renan Tavares. **Estudo da variação do limite de resistência à tração ao longo da bobina de vergalhão de alumínio 1350 AA**. 2013. 102 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2013.

SILVA, André Luiz C.; MEI, Paulo R. **Aços e Ligas Especiais**. 2ª ed. SP, Brasil: Eletrometal S.A Metais Especiais, 1988.

SOARES, J.; TERRONES, L.; PARANHOS, R. **Efeito dos Tratamentos Térmicos de Normalização e de Solubilização na Microestrutura de uma Junta Dissimilar Soldada**

**entre um Tubo de Aço API 5L X-52 e o Inconel 625.** Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, 2017.

WORLDSTEEL.; World Steel in Figures 2023. Brussels, 2023

ZAVDOVEEV, Anatolyi et. al. **Continuous severe plastic deformation of low-carbon steel: physical-mechanical properties and multi-scale structure analysis.** Steel Research International, p. 2- 28. Janeiro de 2020. Disponível em: (PDF) Continuous Severe Plastic Deformation of Low-Carbon Steel: Physical-Mechanical Properties and Multi-Scale Structure Analysis (researchgate.net). Acesso em: 24/09/2023. (2020)

ZHAO,M. ; Chen, K. **Parameters Optimization of Low Carbon Low Alloy Steel Annealing Process.** Acta Metal. Sin. (Eng. Lett.), vol 26, p. 122-130, Abril 2013. Disponível em: Parameters optimization of low carbon low alloy steel annealing process | SpringerLink Acesso em: 24/09/2023. (2013)

ZHANG, H. **Building Materials in Civil Engineering.** 1 ed. USA, Woodhead Publishing, 2011. 343p



