



**Camila Vanessa Bender**

**ANÁLISE DA TEMPERABILIDADE DOS AÇOS SAE 1045 E SAE 4340 PELO  
MÉTODO JOMINY**

Horizontina - RS

2024

**Camila Vanessa Bender**

**ANÁLISE DA TEMPERABILIDADE DOS AÇOS SAE 1045 E SAE 4340 PELO  
MÉTODO JOMINY**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica na Faculdade Horizontina, sob a orientação do Prof. Dr. Rafael Luciano Dalcin

Horizontina - RS

2024

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso**

**“Análise da Temperabilidade dos Aços SAE 1045 e SAE 4340 pelo Método  
Jominy”**

**Elaborada por:  
Camila Vanessa Bender**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Mecânica

Aprovado em: 25/06/2024  
Pela Comissão Examinadora

---

Prof. Dr. Rafael Luciano Dalcin  
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador

---

Prof. Dr. Augusto Cesar Huppes da Silva  
FAHOR – Faculdade Horizontina

---

Profa. Dra. Janice Zulma Francesquett  
FAHOR – Faculdade Horizontina

**Horizontina - RS  
2024**

Dedico este trabalho à minha família, por sempre acreditarem em mim e me darem apoio e forças para continuar minha caminhada. Aos meus pais, Neusa e Inácio Bender, pela educação e valores ensinados, pelo apoio e paciência incondicionais em todos os momentos de minha trajetória. Ao meu irmão, Rodrigo Bender, pelo companheirismo e gestos de carinho. Vocês são meus alicerces e fontes de inspiração. Ao meu namorado, Douglas Grun, pelo apoio, paciência e compreensão durante a minha trajetória. Suas palavras de carinho e o amor foram essenciais para eu chegar até aqui. Obrigada por estarem do meu lado e comemorarem todas as minhas conquistas.

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação”.  
(Simone de Beauvoir)

## RESUMO

Este estudo analisa a temperabilidade dos aços SAE 1045 e SAE 4340 e seu potencial de endurecimento pós-tempera, destacando sua importância na indústria metal mecânica e na fabricação de peças de alta performance. A compreensão da temperabilidade é crucial para a escolha do aço para diferentes aplicações industriais com garantia de qualidade. No entanto, há lacunas no entendimento de como a composição química e o processo de fabricação afetam essa característica em ambos os aços, limitando a seleção adequada de materiais para diversas aplicações. O objetivo deste estudo é oferecer uma compreensão detalhada do comportamento dos materiais após a têmpera e comparar os resultados de ambos os aços, contribuindo para a otimização dos tratamentos térmicos e a seleção eficiente e segura do aço. Para isso, amostras são selecionadas e usinadas conforme medidas padrão para o ensaio de Jominy, seguido pelo aquecimento e têmpera conforme norma ABNT NBR 6339. Posteriormente, a dureza e microestrutura dos corpos de prova são medidas e analisadas, e os resultados são interpretados e correlacionados com a propriedade de dureza de ambos os aços. Os resultados revelam diferenças significativas entre as durezas dos aços SAE 1045 e SAE 4340, influenciadas pela microestrutura obtida durante a têmpera e pela composição química inicial dos aços. Esses achados facilitam a escolha do aço mais adequado para diferentes aplicações.

**Palavras-chave:** Aço SAE 1045, Aço SAE 4340, Ensaio Jominy, Microestrutura, Dureza.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Reações presentes em um diagrama de fases .....	16
Figura 2 - Diagrama ferro-carbeto de ferro .....	17
Figura 3 - Microestrutura de uma liga ferro-carbono com composição eutetoide .....	19
Figura 4 - Fotomicrografia de um aço eutetoide .....	19
Figura 5 - Microestrutura de uma liga ferro-carbono hipoeutetoide .....	20
Figura 6 - Micrografia de um aço hipereutetoide .....	21
Figura 7 - Microestruturas de uma liga ferro-carbono hipereutetoide .....	22
Figura 8 - Micrografia de um aço hipereutetoide .....	23
Figura 9 - Diagrama de transformação isotérmica aço carbono hipoeutetoide .....	24
Figura 10 - Diagrama de resfriamento contínuo .....	26
Figura 11 - Microestrutura de um aço-carbono hipoeutetoide com 0,35% C .....	28
Figura 12 - Intervalo de temperatura de austenitização para normalização .....	29
Figura 13 - Ciclo térmico da têmpera .....	30
Figura 14 - Comparação diagrama TTT para AISI 4340 e AISI 5140 .....	31
Figura 15 - Aumento da dureza da martensita com o aumento do teor de carbono ..	32
Figura 16 - Dispositivo utilizado para o ensaio de Jominy .....	33
Figura 17 - Curva de Jominy .....	34
Figura 18 - Curva de Jominy para diferentes aços de 0,40% C .....	35
Figura 19 - Esquema do procedimento de têmpera e revenido do aço-carbono .....	36
Figura 20 - Localização dos pontos de medição de dureza em corpo de prova retificado .....	39
Figura 21 - Fluxograma do trabalho .....	41
Figura 22 - Desenho do corpo de prova .....	43
Figura 23 - Corpo de prova durante o ensaio de Jominy .....	44
Figura 24 - Corpos de prova após lixamento de superfície .....	45
Figura 25 - Amostra de micrografia do aço SAE 1045: (a) antes e (b) após a têmpera .....	48
Figura 26 - Amostra de micrografia do aço SAE 4340: (a) antes e (b) após a têmpera .....	49
Figura 27 - Curva de temperabilidade aço SAE 1045 e SAE 4340 .....	50
Figura 28 - Curva de resfriamento para (a) Aço SAE 1045 (b) Aço SAE 4340 .....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Temperatura de austenitização do aço .....	34
Tabela 2 - Escala Rockwell regular .....	38
Tabela 3 - Composição química dos aços SAE 4340 e SAE 1045 .....	42
Tabela 4 - Parâmetros para aquecimento dos corpos de prova.....	44
Tabela 5 - Resultado medição área aço SAE 1045.....	49

## **LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS**

AISI – *American Iron and Steel Institute*

ASTM – *American Society for Testing Materials*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas Norma Brasileira

CCT – *Continuous Cooling Transformation*

SAE – *Society of Automotive Engineers*

TRC – Temperatura-Resfriamento-Contínente

TTT – Transformação Tempo-Temperatura

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1 TEMA .....	12
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	12
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA .....	12
1.4 JUSTIFICATIVA .....	13
1.5 OBJETIVOS .....	14
<b>1.5.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>14</b>
<b>1.5.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>14</b>
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>16</b>
2.1 DIAGRAMA DE FASES E MICROESTRUTURAS DO AÇO .....	16
<b>2.1.1 Aço eutetoide</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1.2 Aço hipoeutetoide</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1.3 Aço hipereutetoide</b> .....	<b>22</b>
2.2 DIAGRAMA DE TRANSFORMAÇÃO .....	23
<b>2.2.1 Diagrama de transformação isotérmica</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2.2 Diagrama de resfriamento contínuo</b> .....	<b>25</b>
2.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS .....	26
<b>2.3.1 Recozimento</b> .....	<b>27</b>
<b>2.3.2 Têmpera</b> .....	<b>29</b>
<b>2.3.3 Revenido</b> .....	<b>36</b>
2.4 ENSAIOS MECÂNICOS.....	37
<b>2.4.1 Finalidade e classificação dos ensaios dos materiais</b> .....	<b>37</b>
<b>2.4.2 Dureza de Rockwell</b> .....	<b>38</b>
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>41</b>
3.1 MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	42
3.2 ENSAIO JOMINY .....	43
3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	44
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>48</b>
4.1 TEMPERABILIDADE DOS AÇOS.....	48
<b>4.1.1 Microestrutura</b> .....	<b>48</b>
4.2 DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS .....	51
<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>56</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento industrial tem demandado uma melhor combinação entre materiais e processos de fabricação para alcançar as propriedades mecânicas e atender as demandas exigidas nas suas aplicações (Callister; Rethwisch, 2009). O aço SAE 4340, por exemplo, é amplamente utilizado em indústria de implementos agrícolas na fabricação de virabrequins e em eixos com grande demanda de esforço mecânico na fabricação de veículos em geral, outra aplicação, pode ser dada na indústria aeronáutica onde o SAE 4340 tem aplicações diversas, incluindo ferramentas utilizadas na fabricação de aeronaves (Torres, 2002).

O aço SAE 1045 é utilizado para aplicações em estruturas mecânicas, visto o seu baixo custo e ampla possibilidade de obtenção de propriedades mecânicas através da adição de liga, trabalhos mecânicos ou através de alterações na microestrutura (Bhadeshia, 2001). Dentre esses métodos, a têmpera concede uma estrutura complexa de austenita retida e estabilizada à temperatura ambiente (Cao *et al.*, 2021; Bubnoff; Carvalho, 2014). O tratamento consiste no aquecimento até o ponto de austenitização do material e, após, um rápido resfriamento para a temperatura específica para cada tipo de aço, onde localiza-se o início e o final da formação de martensita com o objetivo de criar quantidades mensuráveis da mesma (Wang; Li, 2020; Nunura, Santos; Spim, 2015). O desenvolvimento de uma estrutura martensítica em aço, aumenta a resistência à tração e a sua dureza, diminuindo, porém, sua ductilidade e não tendo grandes alterações quanto à resistência (Kalish, 1972; Lesyk *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2020).

O tratamento térmico possui efeitos significantes em aços SAE 1045 quanto a resistência à tração do aço, onde há uma redução de 2,29% após a têmpera quando comparado ao material não tratado. Isso ocorre devido ao alívio das tensões internas durante o tratamento térmico (Singh *et al.*, 2021). Já a aplicação de tratamentos térmicos ao aço SAE 4340 altera significativamente suas propriedades mecânicas e microestruturais. Os pesquisadores que estudaram essas alterações microestruturais descobriram que a transformação da estrutura do aço através da têmpera seguida por revenimento aumenta a dureza e a resistência do aço devido a transformação em martensita (Costa e Silva, 2015). O revenimento também torna o aço mais forte e o torna menos suscetível a fraturas, o que o torna essencial para aplicações que exigem resistência ao impacto (Silva *et al.*, 2017). Além disso, pesquisas demonstram que a

microestrutura do aço SAE 4340, incluindo a formação de bainita, martensita e perlita, pode ser alterada pelo tratamento térmico, dependendo das condições específicas de tratamento, que incluem tempo e temperatura (Medeiros e Carvalho, 2018). Além disso, a resistência ao desgaste do aço SAE 4340 também é aumentada pelo processo de têmpera, importante em componentes que operam em condição de atrito ou abrasão (Ferreira *et. al.*, 2019).

Existem dois modelos para calcular a dureza de um aço, o primeiro é conhecido como modelo de fração volumétrica de dureza, porém é um método tedioso e a precisão da simulação depende da microestrutura e sua relação com a dureza. O segundo modelo é conhecido como curva de dureza de Jominy, tendo a previsão da dureza baseado diretamente na curva de dureza e na curva de temperabilidade. Este método é útil para simular o processo de têmpera sem ter a necessidade de simular a transformação de fase heterogênea (Fluhrer, 2005; Nunura, Santos; Spim, 2015; Wenish, Prince; Maniraj, 2022). O ensaio é normatizado pela norma americana ASTM A-255 e pela norma brasileira ABNT NBR 6339 e consiste no aquecimento de um corpo de prova de 25,40 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento até a temperatura de austenitização e, em seguida, resfriada dentro de um dispositivo específico para o resfriamento com água na extremidade para a indução de formação de estrutura martensítica, após isso, a dureza do corpo de prova é medida ao longo do comprimento em intervalos de 1,5 mm, sendo sua maior dureza apresentada na extremidade em que ficou em contato direto com a água, diminuindo conforme se distancia da superfície resfriada (Hömborg, 1996; Kobasko, 2011).

O presente trabalho tem como tema a análise da temperabilidade dos aços SAE 1045 e SAE 4340 e o potencial de endurecimento após a têmpera. Delimitando-se na realização do ensaio de Jominy em corpo de prova padrão e a análise comparativa dos corpos de prova através de metalografia e ensaio de dureza Rockwell C. As perguntas que nortearam este trabalho foram: Qual é a diferença na temperabilidade entre os aços SAE 1045 e SAE 4340 quando submetidos ao método Jominy de resfriamento? Como essa diferença de temperatura pode influenciar as propriedades mecânicas e a microestrutura dos materiais? O objetivo é examinar e contrastar as propriedades microestruturais e de dureza desses aços por meio do ensaio de Jominy, visando auxiliar as indústrias na otimização dos processos de tratamento térmico para aprimorar o desempenho e a qualidade dos produtos finais. Além disso, essa

compreensão possibilita a seleção apropriada de materiais para diversas aplicações industriais.

### 1.1 TEMA

Analisar a temperabilidade (transformação de austenita em martensita) dos aços SAE 1045 e SAE 4340, e seu conseqüente potencial de endurecimento após têmpera (após aquecimento acima da temperatura de austenitização com rápido resfriamento).

### 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Avaliar a temperabilidade dos aços SAE 1045 e SAE 4340 por meio da realização do ensaio de Jominy em corpos de prova padrão de 25,5 mm de diâmetro e 98 mm de comprimento, através de análise microestrutural e ensaios de dureza em Rockwell C.

### 1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Dada a competitividade do atual mercado, as indústrias têm buscado cada vez mais materiais com alta resistência e baixo custo. Dentre os materiais com alta resistência, o SAE 4340 é amplamente utilizado no setor automobilístico e aeronáutico, visto suas características favoráveis para componentes expostos a esforços dinâmicos, como por exemplo, virabrequins, trens de pouso, tratores, e eixos com alta demanda mecânica em veículos em geral. Este aço possui grande resistência à fadiga e fácil temperabilidade devido a elementos de liga em sua composição (Soares, 2017). Quanto ao aço SAE 1045, sua aplicação vem aumentando nos últimos anos, por apresentar médio carbono, possuindo boa ductilidade, plasticidade e dureza, é comumente utilizado em indústria agrícola e automotiva para fabricação de virabrequins e outras peças que possuem rigorosos testes para validar a utilização (Souza, 2018).

Os tratamentos térmicos são aplicados em aços para melhorar as propriedades mecânicas, a usinabilidade, conformabilidade e restauração da ductilidade do material. A têmpera é uma das técnicas mais amplamente utilizadas em indústrias, onde o aço é aquecido à temperatura de austenitização e rapidamente resfriado, formando assim uma estrutura martensítica, para isso, a faixa de temperatura precisa

ser suficientemente alta para que a austenita seja homogeneizada e suficientemente baixa para que não ocorra crescimento excessivo de grãos, visto que um grão grosseiro pode promover trincas durante a têmpera, aumentando a fração de austenita retida, já um tamanho fino de grão de austenita, leva a formação de martensita fina, proporcionando maior resistência a tenacidade. Durante a têmpera, devido a um resfriamento não uniforme e as transformações, ocorrem tensões residuais e distorções, podendo aumentar o custo de produção em 20 a 40%, sendo necessário novo processo de usinagem (Nunes *et al.*, 2018).

Visto isso, pergunta-se: qual é a diferença na temperabilidade entre os aços SAE 1045 e SAE 4340 quando submetidos ao método Jominy de resfriamento? Como essa diferença de temperatura pode influenciar as propriedades mecânicas e a microestrutura dos materiais?

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

A escolha deste tema é justificada pela sua relevância contemporânea, uma vez que a compreensão da temperabilidade dos aços SAE 1045 e SAE 4340 é crucial na indústria. Ao comparar suas respostas a tratamentos térmicos, distribuição de dureza ao longo da peça e formação de microestrutura, é possível auxiliar as indústrias na otimização dos processos de tratamento térmico, melhorando assim o desempenho e a qualidade dos produtos finais. Além disso, essa compreensão permite a seleção adequada de materiais para diferentes aplicações industriais.

Dado os avanços na engenharia de materiais, os materiais têm melhorado questões técnicas, ambientais e sociais e a escolha dos materiais quando um produto é criado é de suma importância na indústria, onde os materiais de ferro e aço com alta tecnologia são valorizados pelas suas qualidades mecânicas extensas como dureza e resistência a tração (Wenish, Prince; Maniraj, 2022). A necessidade da obtenção de materiais com elevadas propriedades mecânicas e boa tenacidade para atendimento das demandas globais de mercado quanto a segurança e eficiência em projetos, tem feito pesquisadores buscarem, na última década, o desenvolvimento de materiais que unissem diferentes fases constituintes para obtenção de um material que atendesse ao maior número de qualidades possíveis (Oliveira, 2019).

Temperabilidade é a propriedade mais útil e importante para processo de tratamento térmico, ela determina a taxa em que o aço deve ser temperado, indicando também a máxima dureza alcançada na seção transversal da barra quando submetida

a um resfriamento rápido. Aços com alta temperabilidade são utilizados para componentes que necessitam de alta resistência como trens de pouso de aeronaves, devido a dureza mais uniforme ao longo de todo o comprimento, já aços com baixa temperabilidade são amplamente utilizados em componentes menores ou que necessitem de endurecimento superficial, como por exemplo engrenagens. Altas durezas ocorrem em desenvolvimento de martensita, já menores durezas são detectadas em microestruturas constituídas de bainita ou ferrita/perlita (Kandpal; Chutani; Sadanna, 2011).

As propriedades mecânicas de um aço estão diretamente relacionadas à microestrutura, essa por sua vez, influencia na dureza, ductilidade, resistência mecânica e na tenacidade. Cada uma das diversas aplicações possíveis para o aço requer diferentes tipos de combinações de características, e para a obtenção dessas, é necessária a aplicação de tratamentos térmicos que alterem as propriedades do aço, onde a têmpera é o método mais utilizado (Silva Junior *et al.*, 2016).

## 1.5 OBJETIVOS

### 1.5.1 Objetivo Geral

Analisar e comparar as propriedades microestruturais e de dureza dos aços SAE 1045 e SAE 4340 através do ensaio de Jominy.

### 1.5.2 Objetivos Específicos

- Selecionar uma amostra de cada dos aços SAE 1045 e SAE 4340.
- Usinar amostras de acordo com medida padrão do corpo de prova para o ensaio Jominy.
- Realizar aquecimento do corpo de prova até a temperatura de austenitização dos aços conforme norma ABNT NBR 6339.
- Realizar ensaio de tempera pelo método Jominy conforme procedimento padrão.
- Medir e analisar a dureza dos corpos de prova após a realização do método Jominy.
- Realizar metalografia antes e posteriormente à realização do ensaio Jominy.
- Interpretar os resultados obtidos, correlacionando as variações nas microestruturas com as propriedades mecânicas dos aços.
- Apresentar as conclusões relevantes para aprofundamento do entendimento sobre a temperabilidade desses materiais.



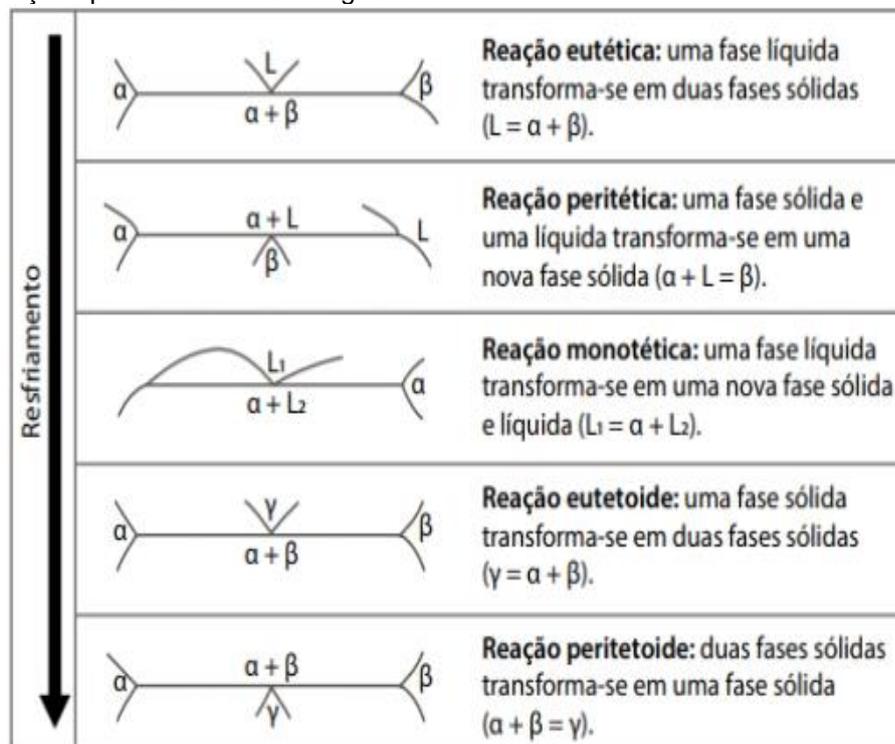
## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, são apresentadas as bibliografias utilizadas como base para o desenvolvimento deste trabalho. Foram pesquisados diversos temas na literatura, incluindo diagramas de fases, microestruturas presentes nos aços, diagramas de transformação isotérmica e de resfriamento contínuo, tratamentos térmicos como recozimento, têmpera e revenido, além de ensaios mecânicos, destacando o ensaio de dureza Rockwell. Essas fontes forneceram fundamentos teóricos e dados fundamentais para a realização e análises presentes neste estudo.

### 2.1 DIAGRAMA DE FASES E MICROESTRUTURAS DO AÇO

As microestruturas em ligas metálicas são caracterizadas pelo número de fases presentes nela, suas proporções e como são distribuídas ou arranjadas (Viana, 2015). Por outro lado, a compreensão das macroestruturas é fundamental para interpretar as reações ocorridas em um diagrama de fases, incluindo as reações eutética, peritética e monotética exemplificadas na Figura 1, que variam conforme ocorre o resfriamento.

Figura 1 - Reações presentes em um diagrama de fases

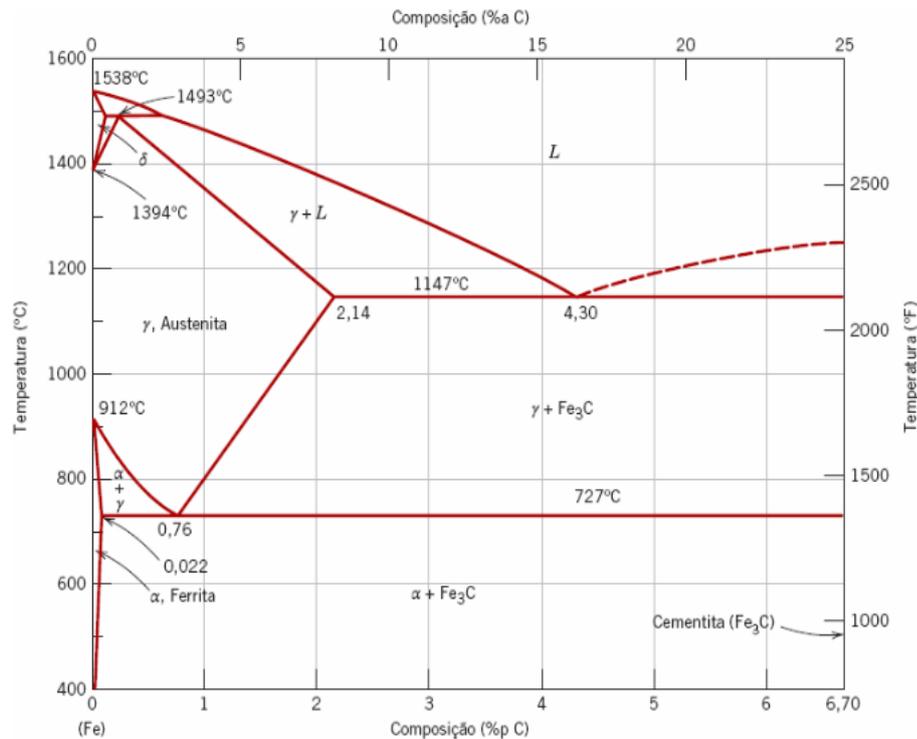


Fonte: Adaptada de Callister, 2019

As fases descritas acima são apresentadas no diagrama de fase ferro-carbono descrita na Figura 2 onde as reações eutetoide, peritética podem ser observadas na

região do diagrama correspondente aos aços e a reação eutética, que ocorre na região dos ferros fundidos, todas essas reações são invariáveis (Stein, 2018). No diagrama é possível observar cinco pontos: Ponto A representa onde ocorre o ponto de fusão do ferro puro; Ponto D onde ocorre a fusão de  $\text{Fe}_3\text{C}$ ; Ponto C que indica a presença do início do aço eutético; Ponto S indica o ponto eutetoide e ponto E indica a separação do aço dos ferros fundidos, onde o teor de carbono é de 2,11%, essa reação é chamada de eutetoide (Chiaverini, 1977).

Figura 2 - Diagrama ferro-carbeto de ferro



Fonte: Callister, 2019

À temperatura ambiente, a forma estável conhecida como ferrita, ou ferro  $\alpha$ , apresenta uma estrutura cristalina CCC, nesta fase a solubilidade máxima de carbono é de 0,022% a 727°C. A limitada solubilidade é dada pela forma e tamanho das posições CCC que torna difícil a acomodação do átomo de carbono, que mesmo em concentrações relativamente baixas, influencia significativamente as propriedades mecânicas da ferrita, essa fase é relativamente macia podendo tornar-se magnética em temperaturas abaixo de 768°C. Quando atinge 912°C, a ferrita sofre uma transformação polimórfica para austenita CFC, ou ferro  $\gamma$ , esta, ligada somente com o carbono e abaixo de 727°C não é estável, nesta fase a solubilidade máxima de carbono é de 2,14% e ocorre somente quando a 1147°C, sendo essa solubilidade

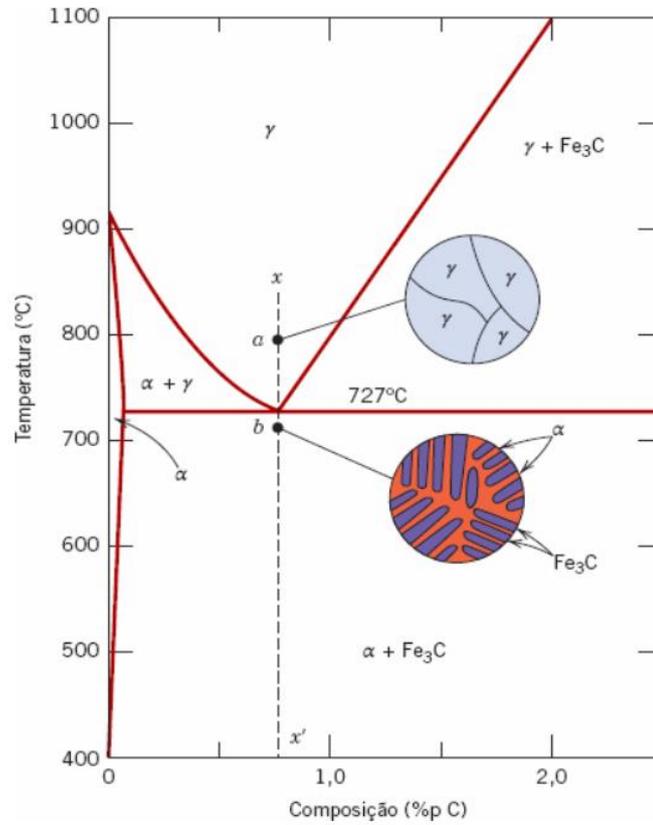
aproximadamente 100 vezes maior que o valor máximo para a ferrita CCC sendo assim as deformações sobre os átomos de ferro circunvizinhos são menores. Para os tratamentos térmicos dos aços a transformação de fases que envolva a austenita são extremamente importantes (Callister, 2019).

A austenita CFC reverte-se novamente para uma fase CCC, conhecida como ferrita  $\delta$ , que, quando a 1538°C eventualmente funde. Esta fase é virtualmente a mesma da ferrita  $\alpha$  alterando apenas a faixa de temperatura ao longo da qual cada uma existe, sendo a ferrita  $\delta$  estável em temperaturas relativamente elevadas (Callister, 2019). Segundo Santos (2006), quando o limite de solubilidade de carbono está menor que 0,73% a 727°C na ferrita alfa, é formada a cementita, podendo esta também coexistir na fase gama entre 727°C e 1147°C, essa estrutura possui alta dureza e resistência mecânica e sua solubilidade de carbono é desprezível, sendo assim ela não depende das estruturas alotrópicas do ferro. Callister (2019), também observam que, na temperatura de 727° C, quando a concentração de carbono alcança 0,76% ocorre a reação eutetoide, e a partir deste é possível verificar se uma liga é hipoeutetoide, ou hipereutetoide. No aço SAE 1045 a composição média de carbono é de 0,45% C, assim como, no aço SAE 4340 a composição média é de 0,40% C, sendo assim, ambos se caracterizam como um aço hipoeutetoide.

### **2.1.1 Aço eutetoide**

Segundo Verhoeven (2007), o ponto eutetoide, também conhecido como o ponto de perlita representa a temperatura no diagrama de fase em que ocorre uma reação eutetoide, ou seja, um sólido se transforma em dois sólidos. O aço eutetoide possui uma composição de 0,77% C. Nesta fase, há a formação de ferrita e cementita, onde qualquer austenita que coexista com ferrita na temperatura  $A_1$  se transformará em perlita no resfriamento, produzindo microestruturas como a descrita na Figura 3 e Figura 4 que mostra a microestrutura da perlita, a qual consiste em camadas alternadas de ferrita  $\alpha$  (fase clara) e Fe<sub>3</sub>C (camadas finas, a maioria das quais aparece escura). Ampliação de 470 vezes (Krauss, 2005).

Figura 3 - Microestrutura de uma liga ferro-carbono com composição eutetoide



Fonte: Callister, 2020

Figura 4 - Fotomicrografia de um aço eutetoide

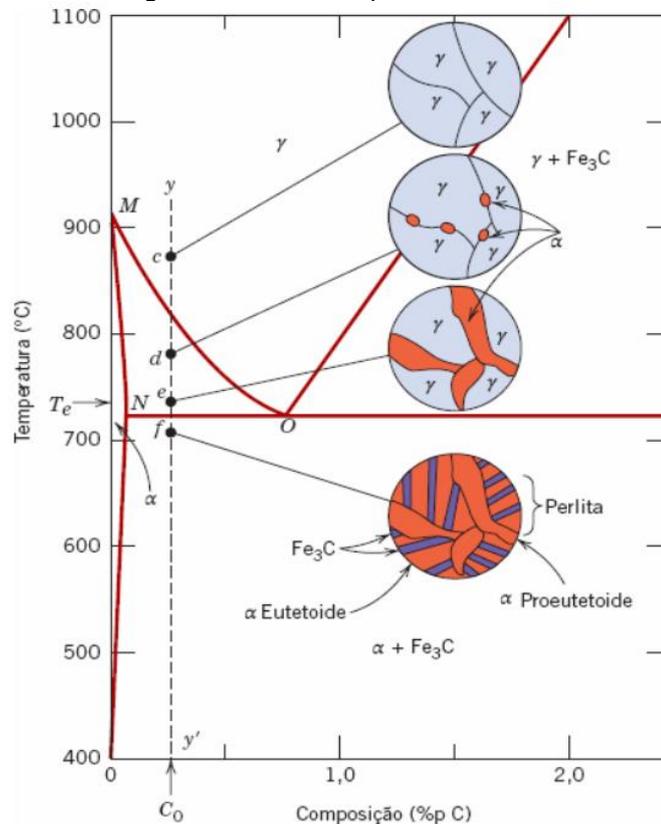


Fonte: ASM International, 1998 *apud* Callister, 2020

### 2.1.2 Aço hipoeutetoide

Segundo Callister (2020), uma composição  $C_0$  que possui entre 0,022% C e 0,76% C à esquerda do eutetoide, é considerada uma liga hipoeutetoide. O resfriamento de uma liga que possui essa composição é representado verticalmente para baixo ao longo da linha  $yy'$  e a aproximadamente 875°C, a mesma está representada na Figura 5 que representa a microestrutura para aço hipoeutetoide (contendo menos que 0,76% C) conforme ela é resfriada desde a região da fase austenita até abaixo da temperatura eutetoide.

Figura 5 - Microestrutura de uma liga ferro-carbono hipoeutetoide



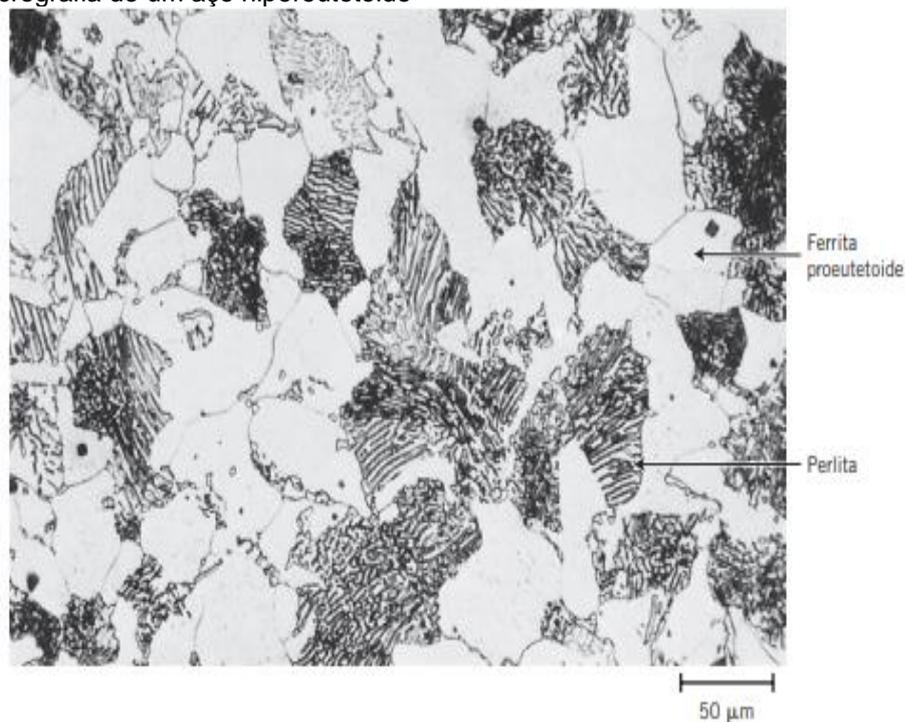
Fonte: Callister, 2020

No ponto “c” a microestrutura consiste inteiramente em grãos da fase  $\gamma$ , com o resfriamento até o ponto d a 775°C, e encontrado entre as fases  $\alpha + \gamma$ , a grande parte das pequenas partículas de  $\alpha$  se formarão ao longo dos contornos existentes dos grãos  $\gamma$ . Essas formações correspondem a aproximadamente 0,020% C e 0,40% C. À medida que uma liga resfria na região das fases  $\alpha$  e  $\gamma$ , a composição da fase ferrita muda com a temperatura entre as fases  $\alpha - (\alpha + \gamma)$  representada na linha MN, tornando-se mais rica em carbono. Já a mudança na composição da austenita é mais

drástica, ocorrendo ao longo de  $(\alpha + \gamma) - \gamma$ . o resfriamento do ponto d até e produzirá maior proporção da fase  $\alpha$ . Neste ponto a composição da fase  $\alpha$  conterá 0,022% C enquanto a fase  $\gamma$  composição eutetoide 0,76% C.

Com a redução de temperatura até abaixo do eutetoide toda a fase  $\gamma$  se transformará em perlita já na fase  $\alpha$  não haverá mudanças, sendo normalmente presente como matriz contínua envolvendo as colônias isoladas de perlita. Assim sendo, a fase ferrita se fará presente tanto na perlita quanto na fase formada enquanto se resfriava na fase  $\alpha + \gamma$ , essa ferrita presente na perlita é conhecida como ferrita eutetoide e a formada acima da temperatura de transformação é chamada de ferrita proeutetoide (Callister, 2020). A Figura 6 demonstra uma micrografia de um aço de 0,38% C composto por perlita e ferrita proeutetoide, onde uma parte da perlita aparece escura.

Figura 6 - Micrografia de um aço hipereutetoide



**Fonte:** Callister, 2020

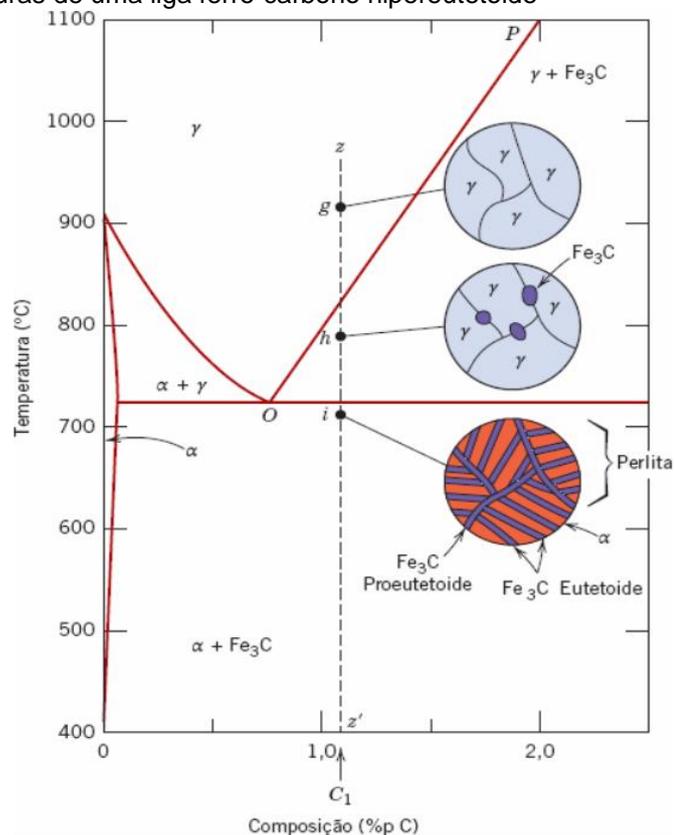
Os aços hipoeutetoides são projetados para oferecer propriedades superficiais melhores quando expostos a processos de resfriamento controlados e atender as propriedades mecânicas específicas sem necessidade de adição de elementos de liga, sendo normalmente comercializados como barras laminadas a quente. Algumas das suas aplicações são em vergalhões, barras e perfis, esses materiais possuem o

aumento da dureza superficial quando expostos à tratamento térmico, podendo ser utilizado em obras civis (ASM, 1991).

### 2.1.3 Aço hipereutetoide

Quando uma liga que contém entre 0,76% C e 2,14% C, é resfriada a partir de temperaturas no campo da fase  $\gamma$ , ela resulta em uma liga hipereutetoide, a qual no resfriamento tem seu movimento verticalmente para baixo ao longo da linha  $Z'$ , esquema de uma liga ferro-carbono com composição hipereutetoide  $C_1$  contendo entre 0,76% C e 2,14% C conforme ela é resfriada da região da fase austenita até abaixo da temperatura eutetoide é demonstrado na Figura 7. Com uma composição  $C_1$ , apenas a fase  $\gamma$  está presente no ponto  $g$ , com microestrutura apresentando apenas grãos da fase  $\gamma$ . A fase cementita iniciará ao longo dos contornos dos grãos da fase  $\gamma$  a partir do resfriamento para fase  $\gamma + Fe_3C$  até o ponto  $h$ , essa cementita é chamada de cementita proeutetoide, com composição constante de 6,70% C conforme varia a temperatura.

Figura 7 - Microestruturas de uma liga ferro-carbono hipereutetoide

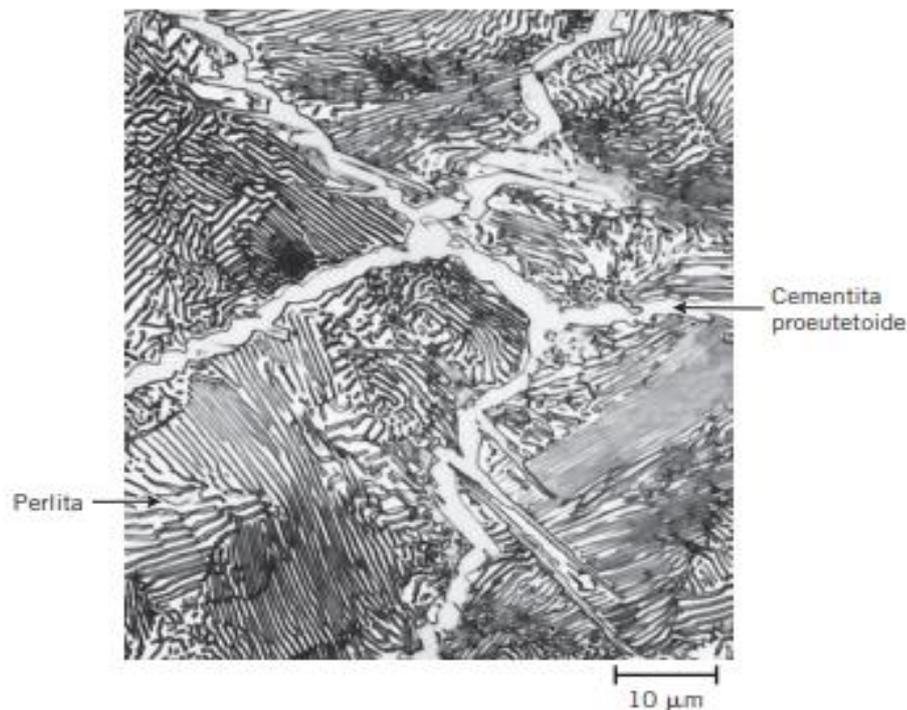


Fonte: Callister, 2020

A composição da fase austenita, porém, ocorre ao longo da linha PO indo em encontro à composição eutetoide, sendo toda a austenita restante com composição eutetoide convertida em perlita, conforme a temperatura é reduzida via eutetoide até o ponto i, onde sua microestrutura final será constituída de perlita e cementita proeutetoide como microconstituintes (Callister, 2019).

Segundo Callister (2019), existe dificuldade em distinguir as microestruturas dos aços hipoeutetoides e hipereutetoides, visto que a mesma tem aparência semelhante à da ferrita proeutetoide. Segundo Cesar (2015), os aços hipereutetoides possuem uma dureza maior do que a de um aço hipoeutetoide, devido a pouca porcentagem de ferrita, já o aço hipoeutetoide possui maior porcentagem de ferrita sendo, então, mais dúctil. A Figura 8 apresenta a micrografia de um aço composto por uma rede de cementita proeutetoide de 1,4% C.

Figura 8 - Micrografia de um aço hipereutetoide



Fonte: Callister, 2020

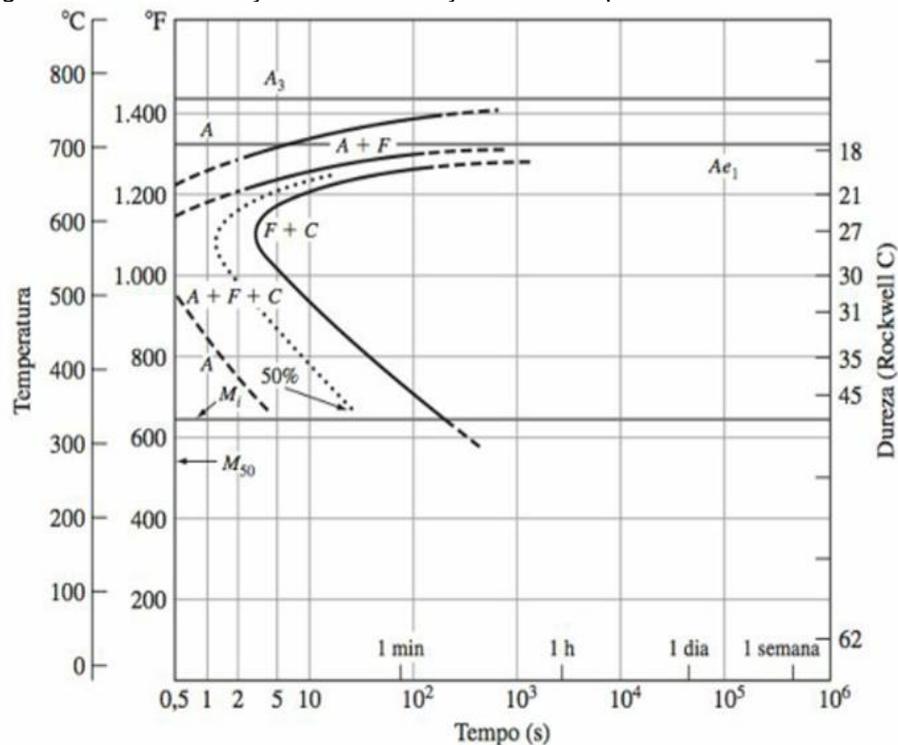
## 2.2 DIAGRAMA DE TRANSFORMAÇÃO

### 2.2.1 Diagrama de transformação isotérmica

Quando é reduzida bruscamente a temperatura, a taxa de nucleação e crescimento dos produtos de decomposição da austenita mudam. Em transformação

em menores temperaturas ocorre um atraso, começando e terminando em tempos maiores, quando ocorre a transformação da austenita em ferrita, ocorre, também, a redistribuição de carbono entre as fases, visto que a solubilidade em ambas é diferente. Ao reduzir a temperatura de transformação em relação à temperatura de equilíbrio da austenita, a difusividade do carbono é diminuída, alterando as condições cinéticas de decomposição. Como resultado, a transformação da austenita fora de equilíbrio forma agregados de ferrita e carbonetos, com morfologia e mecanismos de transformação que variam conforme a temperatura e o tempo de transformação. Em temperaturas mais altas, entre 600 e 700°C, ocorre a formação de perlita com morfologia lamelar menor do que a da perlita em equilíbrio. Em temperaturas próximas a 500°C ou inferiores, forma-se a fase bainita, composta por agregados de ferrita e cementita com morfologia acicular. A transformação em perlita é caracterizada pela difusão, enquanto a transformação em bainita envolve tanto difusão quanto cisalhamento. Em caso de resfriamento muito rápido, a formação de perlita e bainita é suprimida. Em temperaturas muito baixas, a difusão do carbono não ocorre, resultando na transformação da austenita sem difusão e formando a fase martensita, que se dá por um complexo mecanismo de cisalhamento (Pinedo, 2021).

Figura 9 - Diagrama de transformação isotérmica aço carbono hipoeutetoide



Fonte: Hashemi; Smith, 2016

Quando ocorre o resfriamento da austenita de modo rápido para a temperatura de 700 °C, a austenita permanece metaestável por algum tempo, sem que alguma modificação ocorra, sendo denominado de tempo de incubação. Após esse tempo, a austenita inicia a mudança de forma progressiva, fazendo com que o produto de transformação tenha sua fração elevada de 0 a 100% e a austenita em mudança tenha sua fração reduzida de 100 a 0%, gerando assim uma curva em “S” a qual é possível determinar os tempos para início, meio e final de transformação da austenita. Um conjunto de curvas em “S” para determinar uma ampla faixa de temperatura possibilita obter as curvas de transformação em “c” denominadas “curvas TTT” (temperatura, tempo e transformação) em resfriamento isotérmico. A Figura 9 mostra um diagrama TI para aço carbono hipoeutetoide (Pinedo, 2021).

Em um diagrama de transformação isotérmica para um aço carbono hipoeutetoide com 0,47% C e um diagrama de transformação de um aço-carbono eutetoide são evidentes as diferenças. Uma diferença fundamental é que as curvas em “s” no aço hipoeutetoide estão desviadas para a esquerda, de modo em que não é possível temperar o aço a partir de uma região austenítica para obter uma estrutura exclusivamente martensita (Hashemi; Smith, 2016).

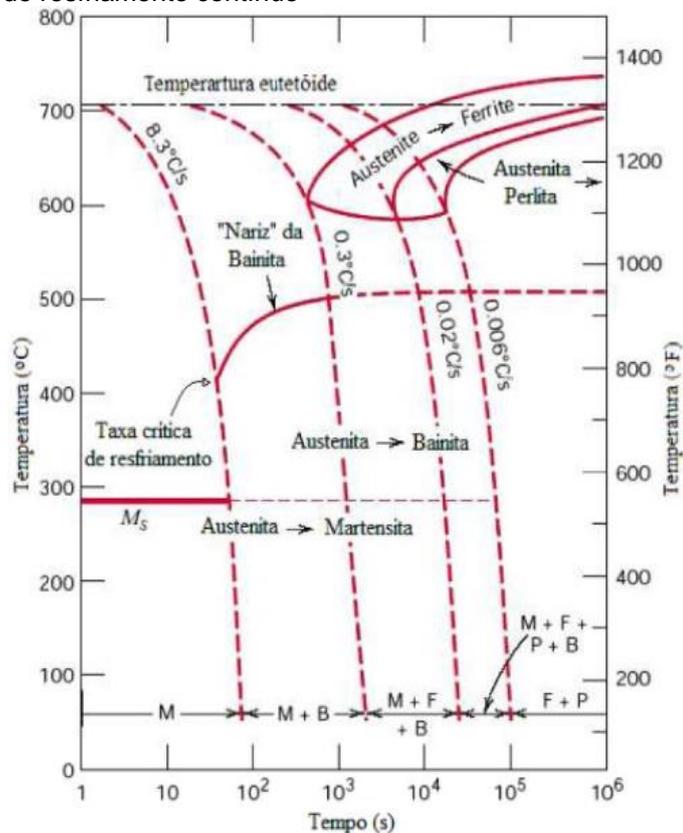
### **2.2.2 Diagrama de resfriamento contínuo**

Na maioria dos tratamentos térmicos industriais, o aço não é isotermicamente transformado a temperaturas acima da temperatura de início de transformação martensítica, sendo resfriado continuamente desde a temperatura austenítica até a temperatura ambiente. Durante o resfriamento contínuo de um aço-carbono, a transformação da austenita em perlita acontece durante um intervalo de temperatura em vez de a uma única temperatura, sendo assim, a microestrutura após o resfriamento contínuo, mostrada na Figura 10, é complexa, visto que, a cinética de reação vai variando no intervalo de temperaturas onde a transformação ocorre (Smith; Hashemi; Smith, 2016).

Quando o resfriamento ocorre de maneira muito lenta, como o obtido quando é desligada a alimentação de um forno elétrico e deixado o aço esfriando à medida que o forno resfria, a microestrutura final obtida seria a perlita grossa. No resfriamento feito rapidamente, como se fosse removido o aço austenitizado do forno, deixando que o mesmo resfrie à temperatura ambiente, sua microestrutura final será constituída por perlita fina. Quando o resfriamento começa com a formação de perlita, não havendo

tempo suficiente para a completa transformação da austenita em perlita, a austenita restante se transformará em martensita a temperaturas mais baixas, com início em 220° C, sendo esta transformação dada em duas etapas, a microestrutura deste aço consistirá em uma mistura de perlita e martensita. Já o resfriamento em velocidades superiores a velocidade crítica de resfriamento, ocorre a produção de uma estrutura martensítica completamente endurecida. Em aços hipoeutetóides o diagrama de resfriamento contínuo é mais complicado, porque, durante o resfriamento contínuo, forma-se alguma bainita a baixas temperaturas (Smith; Hashemi, 2012).

Figura 10 - Diagrama de resfriamento contínuo



Fonte: Smith; Hashemi, 2012

### 2.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Os procedimentos de tratamento térmico convencionais para produção de aço martensítico envolve, normalmente, o resfriamento rápido e contínuo de amostra austenitizada em resfriamento, podendo este ser feito em água, óleo ou ar. As melhores propriedades de um aço temperado e posteriormente revenido, podem ser obtidas se, durante o tratamento por têmpera o aço tiver sido transformada em alto teor de martensita, o resultado diferente daquela com melhor combinações de

propriedades mecânicas, será aquela que terá a formação de qualquer fração de perlita e/ou bainita. Durante a têmpera, é impossível o resfriamento completo e uniforme da amostra, a superfície sempre esfria mais rapidamente do que a parte interna, sendo assim, a austenita se transformará durante uma faixa de temperatura, produzindo variações nas microestruturas e nas propriedades em função da posição no interior da amostra. Três fatores influenciam o sucesso de um tratamento térmico com a produção de uma microestrutura predominantemente martensítica ao longo da seção transversal: a composição do aço, natureza e meio de resfriamento e o tamanho e forma da amostra utilizada (Callister, 2019).

### 2.3.1 Reozimento

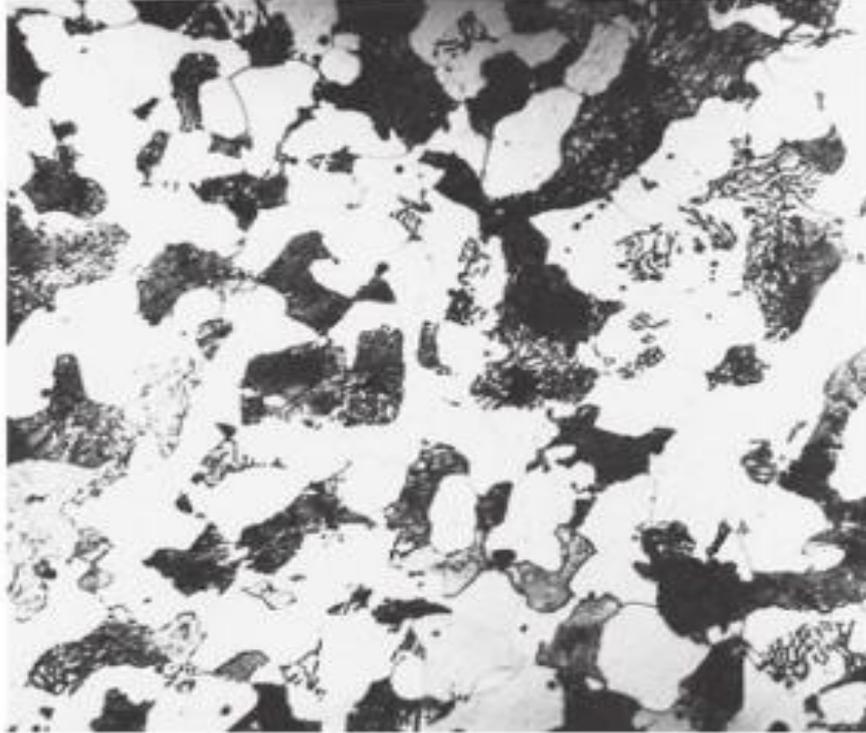
No recozimento total ou pleno, os aços hipoeutetoides e eutetoides, depois de serem mantidos por um tempo em uma temperatura de cerca de 40° C acima da linha de fronteira austenita-ferrita, são arrefecidos lentamente até a temperatura ambiente, a sua microestrutura após o recozimento completo consiste basicamente em ferrita proeutetoide e perlita, descritos na Figura 11 para aço hipoeutetoide resfriado lentamente desde o estado austenítico com ampliação de 400x. O constituinte branco é a ferrita proeutetoide; o constituinte escuro é a perlita. (Reagente de ataque: nital 2%; ampliação 500 vezes.). Em aços hipereutetoides é mais comumente utilizada a austenitização na região bifásica austenita + cementita, também a cerca de 40° C acima da temperatura eutetoide (Hashemi; Smith, 2016).

Em um aquecimento de um material metálico deformado a frio em temperatura suficientemente elevada, novos grãos na estrutura metálica recuperada são nucleados, que começam a crescer, o que dá origem a uma estrutura recristalizada. Quando exposto à temperatura em que ocorre a recristalização, durante um tempo suficientemente longo, a estrutura deformada a frio é substituída por uma estrutura de grãos recristalizada.

A recristalização primária pode ocorrer por dois mecanismos principais: um núcleo isolado se expande para o interior de um grão deformado ou um contorno de grão com alto ângulo original pode migrar para interior de uma área extremamente deformada do metal. Mas em ambos os casos não há deformação na estrutura do lado côncavo do contorno do grão em movimento e a energia interna está relativamente baixa, enquanto no lado convexo da interface móvel possui uma grande

deformação e apresenta alta densidade de discordâncias em elevada energia interna (Smith; Hashemi, 2012).

Figura 11 - Microestrutura de um aço-carbono hipoeutetoide com 0,35% C



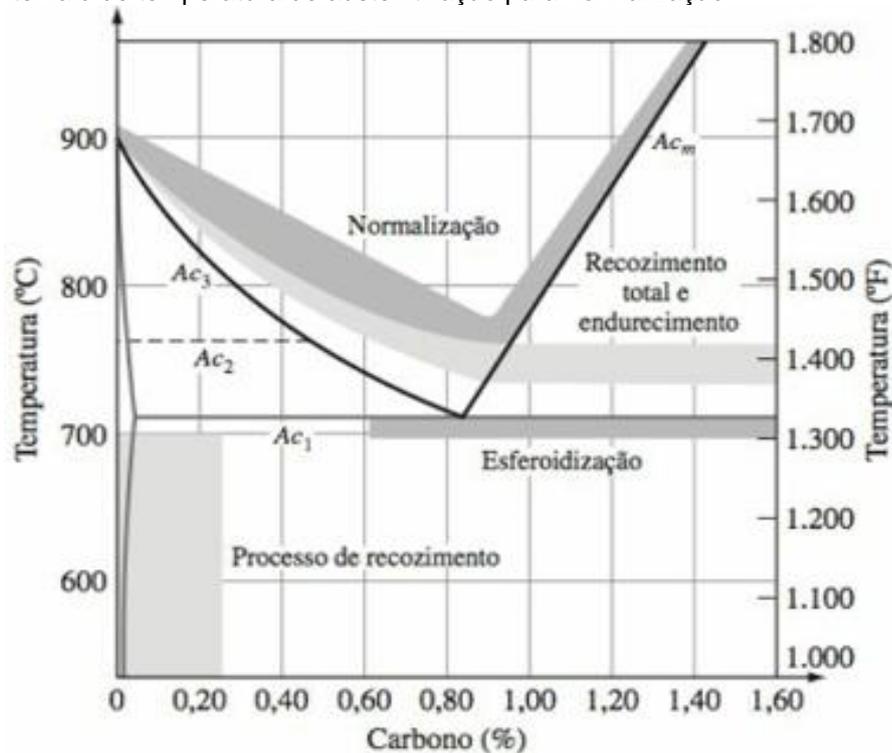
**Fonte:** Hashemi e Smith, 2016

Para Smith e Hashemi (2016), durante a recristalização primária, ocorre uma diminuição de energia interna do material metálico por causa do crescimento de um novo grão em expansão, sendo a região deformada substituída por regiões não deformadas. Um tratamento de recozimento de um material deformado a frio, por causar a recristalização, reduz o limite de resistência à tração, aumentando a ductilidade, sendo os principais fatores afetantes do processo de recristalização. O recozimento tem como objetivo a remoção de tensões de trabalho a frio, diminuição da dureza para posteriores processos de fabricação, alteração de propriedades mecânicas e eliminação de tratamentos térmicos aos quais os aços possam ter sido submetidos (Chiaverini, 1979).

A normalização é um processo considerado mais barato do que o recozimento completo, visto que não é necessário um forno para controle da velocidade de resfriamento do aço e consiste em um tratamento térmico com o objetivo de refinar o tamanho do grão, aumentar a resistência mecânica do aço ou reduzir segregações resultadas de aquecimento ou forjamento, para obtenção de uma superfície mais

uniforme (Chiaverini, 1979). O tratamento consiste em um aquecimento do aço na região austenítica e após um resfriamento ao ar, a microestrutura final do aço carbono hipoeutetoide é constituída por ferrita proeutetoide e perlita fina. A Figura 12 demonstra o intervalo de temperatura de austenitização utilizada na normalização. Em aços hipoeutetoides ocorre menores quantidades de ferrita proeutetoide e perlita com menor espaço entre lamelas, em baixos teores de carbono não é observado diferenças significativas, ocorrendo o aumento de carbono há um aumento da dureza e resistência mecânica, já a ductilidade diminui, embora não ocorram grandes alterações quanto a resistência (Silva, 2021).

Figura 12 - Intervalo de temperatura de austenitização para normalização



Fonte: Chiaverini, 1979

A normalização pode ser utilizada para algumas aplicações, como por exemplo, para refino de grão e homogeneização da estrutura para obtenção de melhor resposta à têmpera ou revenimento, melhora na usinabilidade, refino de estruturas brutas de fusão, e obtenção das propriedades mecânicas desejadas (Silva, 2021).

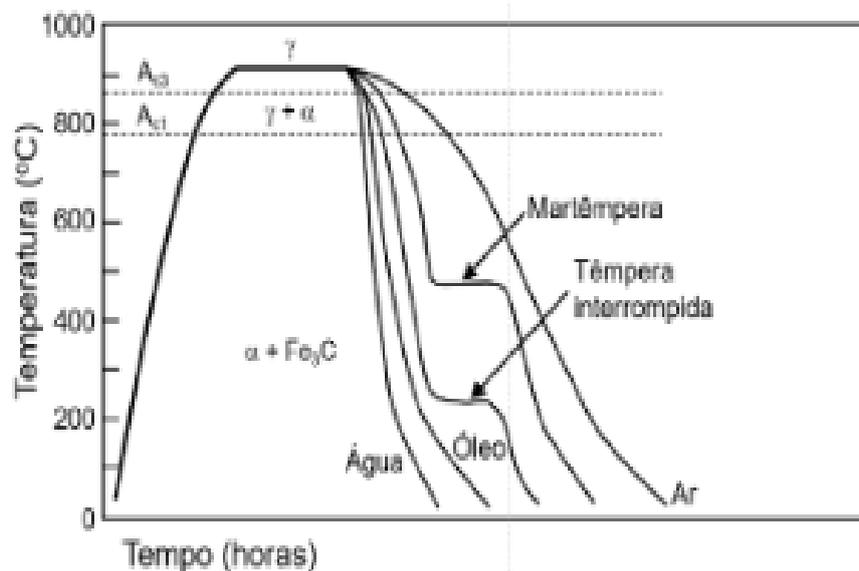
### 2.3.2 Têmpera

A temperabilidade é definida como a capacidade de um aço de atingir a dureza máxima na transformação martensítica e a capacidade de manter essa dureza através

de sua seção transversal (Pinedo, 2021). Quando há necessidade de endurecimento, esse deve ser o mais homogêneo possível em todo o comprimento do componente e para que esse endurecimento aconteça em sua capacidade máxima e com o máximo de penetração através de sua seção transversal, é necessário que a superfície e núcleo da peça sejam resfriados de forma que não permita as transformações por difusão e garantindo assim uma transformação martensítica ocorrendo em toda a peça. Para Colpaert (2008), a temperabilidade é definida como a variação de dureza da superfície até o núcleo da peça quando essa é temperada, ela é associada à capacidade de um aço de formar martensita à velocidade crítica de têmpera, sendo que o tamanho de grão austenítico e a homogeneidade da microestrutura inicial austenítica têm efeito sobre a temperabilidade do aço.

A têmpera consiste em um rápido resfriamento da austenita, a taxa de resfriamento depende do meio de têmpera utilizado e da taxa de transferência de calor do aço, este pode se dar em salmoura, água, óleo e ar (Groover, 2014). Esse tratamento térmico está relacionado ao meio de resfriamento e à composição química do aço, o esquema do ciclo térmico de têmpera está descrito na Figura 13

Figura 13 - Ciclo térmico da têmpera



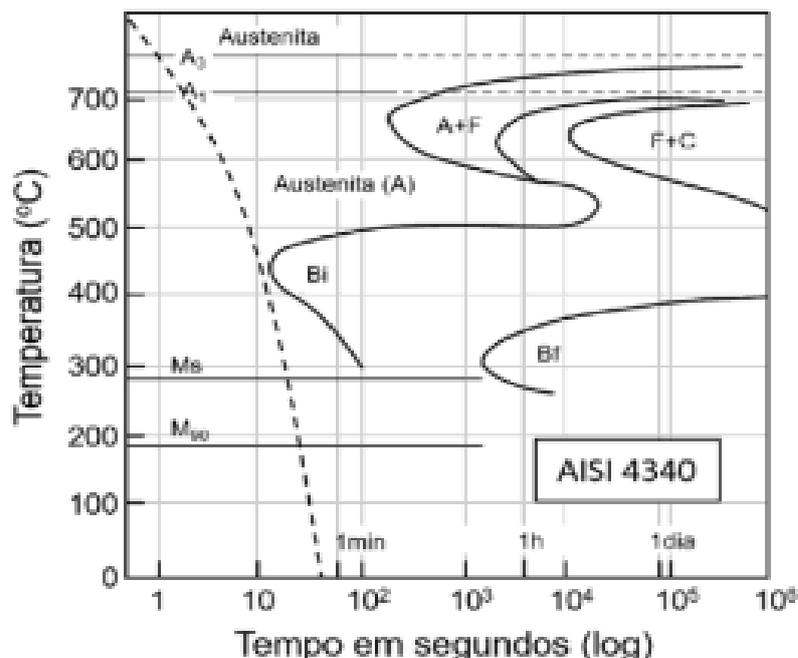
Fonte: Pinedo, 2021

. Diferentes meios e métodos podem ser utilizados no resfriamento da têmpera quando o aço está austenitizado, cada um com uma característica e velocidade de resfriamento, sendo o resfriamento por meio da água o mais rápido, existe também o resfriamento por martêmpera e têmpera interrompida, métodos utilizados para

controle da transformação martensítica em aços de alta liga, para obtenção de microestrutura homogênea na seção transversal, evitando a geração de tensões de origem térmicas do resfriamento, e associadas à expansão da transformação martensítica, buscando, assim, uma máxima estabilidade dimensional com baixa possibilidade de geração de trincas (Pinedo, 2021).

Para a verificação da condição de resfriamento necessário para que não ocorra as transformações por difusão, são utilizados os diagramas de transformação TTT e TRC, tendo em vista que as condições de resfriamento são diferentes para cada aço, e cada composição química de um aço representa uma curva de transformação posicionada em tempos diferentes. A Figura 14 representa as curvas TTT para os aços AISI 4340 e AISI 5140, onde é possível observar que as curvas de transformação do AISI 4340 estão posicionadas em tempos mais longos em comparação com as curvas de transformação do AISI 5140, com isso, verifica-se que a velocidade de resfriamento para evitar as transformações por difusão, definidas pelas linhas tracejadas, exigem resfriamentos mais severos para o aço AISI 5140 do que para o aço AISI 4340. A condição de resfriamento de linha tracejada é definida como “velocidade crítica de têmpera”, de forma que qualquer resfriamento em velocidade acima da velocidade crítica garante uma transformação martensítica (Pinedo, 2021).

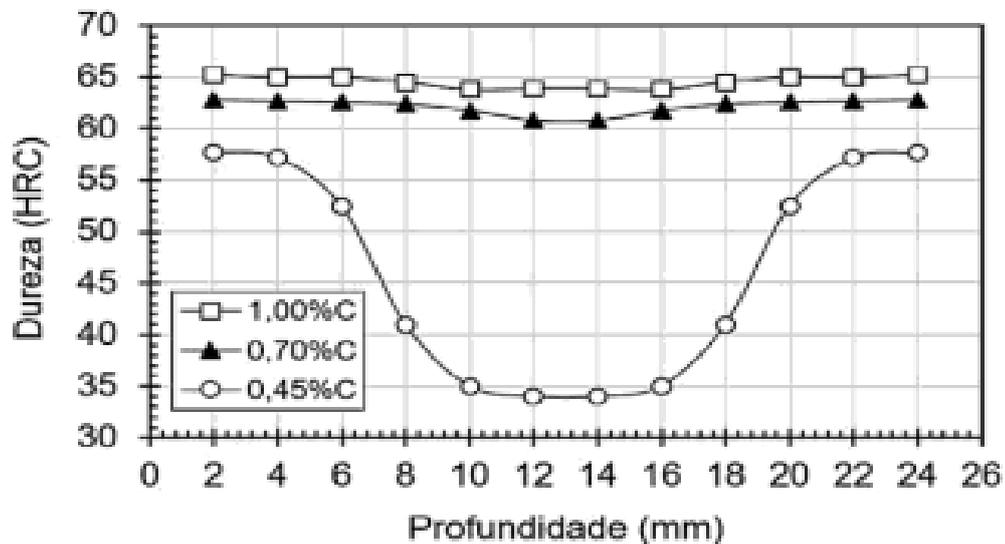
Figura 14 - Comparação diagrama TTT para AISI 4340 e AISI 5140



Fonte: Pinedo, 2021

Segundo Silva (2021), ao aumentar o teor de carbono, a temperatura de início e fim da formação da martensita diminui, enquanto a dureza da martensita aumenta. Por isso, são usados aços com teor de carbono superior a 0,30% para têmpera, pois abaixo desse valor, o efeito endurecedor provocado pelo processo seria insignificante. A morfologia da martensita irá depender do teor de carbono do aço, em aços de baixo teor de carbono, ocorre a formação de martensita escorregada com característica de “ripas”, por possuir uma subestrutura interna predominante de discordâncias. Em altos teores de carbono a martensita ocorre em morfologia de agulhas individuais aciculares, que crescem compartimentando os grãos originais de austenita, essa morfologia é chamada de martensita maclada. A dureza da martensita aumenta continuamente com o aumento do teor de carbono, como demonstrada na Figura 15, onde é possível observar que o aço com teor de carbono de 0,45% apresenta significativa queda de dureza em direção ao núcleo da barra, enquanto em amostras com teor de carbono de 0,70% e 1,00% apresenta um perfil de dureza mais homogêneo ao longo da seção transversal (Pinedo, 2021).

Figura 15 - Aumento da dureza da martensita com o aumento do teor de carbono

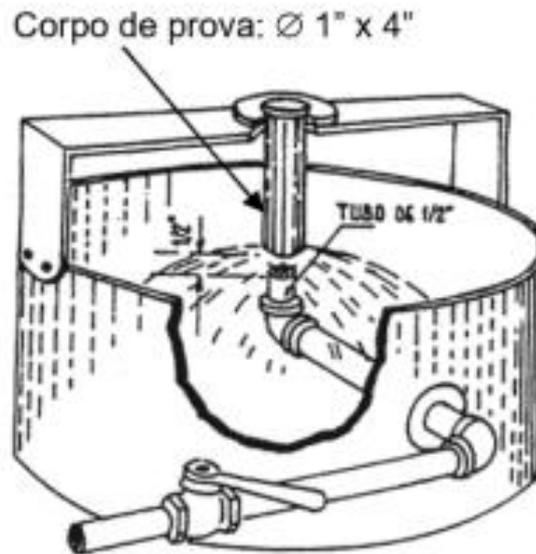


Fonte: Pinedo, 2021

Segundo Colpaert (2008), dois métodos importantes foram estabelecidos para medir e quantificar a temperabilidade dos aços: o método do diâmetro crítico de Grossmann e o método Jominy. Desses, o método Jominy é o mais utilizado devido à simplicidade do teste, permitindo selecionar o melhor aço para o tratamento térmico desejado, considerando as dimensões e o formato da peça a ser endurecida na têmpera para a transformação martensítica. O teste simula as transformações de

decomposição da austenita durante o resfriamento contínuo em diferentes taxas em um único corpo de prova (Pinedo, 2021).

Figura 16 - Dispositivo utilizado para o ensaio de Jominy



Fonte: Pinedo, 2021

Segundo a norma brasileira ABNT NBR 6339, o corpo de prova deve ser cilíndrico com diâmetro de 25,5 mm, comprimento de 98mm, possuir flange de diâmetro 32 mm e com espessura de 3 a 2,5mm com comprimento total de 101 mm. O corpo de prova deve passar pelo aquecimento até a austenitização, com a temperatura e tempo variando conforme material e espessura. A temperatura de austenitização encontra-se na Tabela 1. O tempo até a temperatura de austenitização para têmpera de um corpo de prova de diâmetro de 25,5 mm é de 1 h, sendo o período de tempo máximo entre a retirada do forno e o início da têmpera pela água de no máximo 5 s. A água deve ser aplicada à superfície de têmpera durante no mínimo 10 m, após o período é dado como terminada a têmpera e o corpo de prova pode ser mergulhado em água ou resfriado no ar até atingir temperatura ambiente. Segundo Pinedo (2021), após completo resfriamento do corpo de prova, é retificada uma plana pista ao longo do comprimento, em lados opostos, permitindo posterior medida de dureza e eliminação de possíveis oxidações e descarbonetação ocorridas na austenitização.

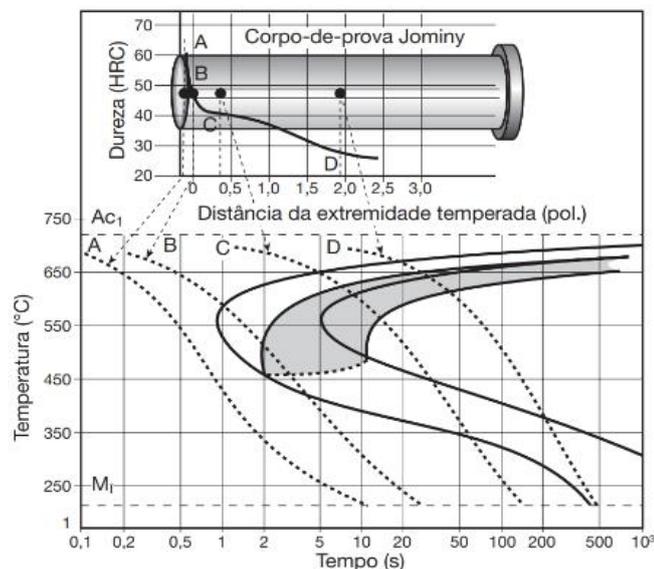
Tabela 1 - Temperatura de austenitização do aço

Série H	Carbono - C %	Temperatura de austenitização para normalização °C	Temperatura de austenitização para têmpera °C
10 XX- 13 XX - 15 XX	C < 0,25	925	925
32XX - 41XX - 43 XX	0,25 < C < 0,36	900	870
51XX-61XX-86XX-87XX	C > 0,36	870	845
	C < 0,25	925	845
48XX 92XX	0,25 < C < 0,36	900	815
	0,36 < C < 0,50	870	800
	C > 0,50	900	870

Fonte: ABNT NBR 6339, 2016

As medidas de Rockwell “C” são realizadas de uma extremidade a outra em intervalo de 1,5 mm, sendo a máxima dureza normalmente localizada na extremidade que recebeu o jato de água, diminuindo gradativamente até a extremidade oposta. O ensaio permite a obtenção de uma ampla gama de velocidades de resfriamento do aço, como demonstrada na Figura 17, na parte inferior são apresentadas as velocidades de resfriamento de diferentes pontos do corpo de prova, superpostas a um diagrama TTT e CCT (zona cinzenta), enquanto na parte superior é demonstrada uma curva dureza versus distância, chamada de curva Jominy (Colpaert, 2008).

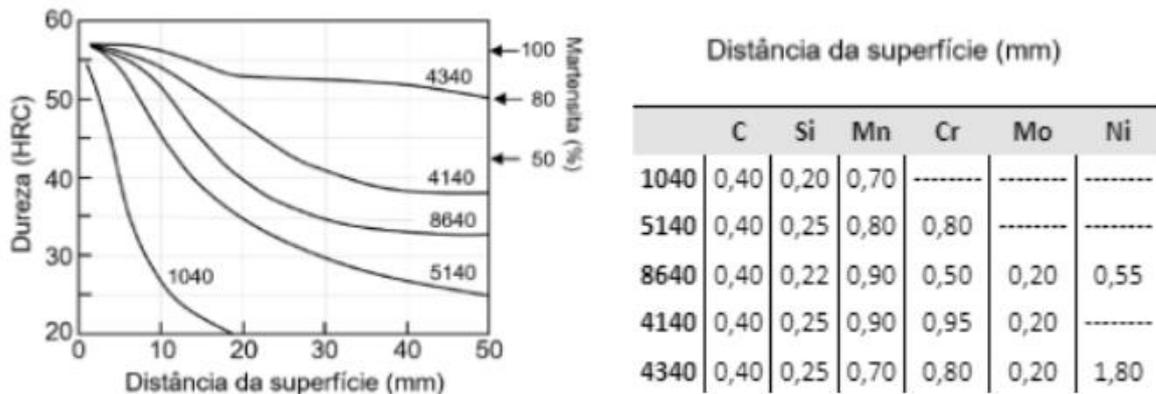
Figura 17 - Curva de Jominy



Fonte: Colpaert, 2008

A alta dureza está relacionada à região que possui predominância martensítica e a baixa dureza correspondente à região em que ocorre formação de ferrita, perlita e bainita. Já na Figura 18 são apresentadas as curvas de Jominy para aços amplamente utilizados na indústria metalmeccânica na fabricação de peças que exigem alta resistência ao carregamento mecânico, obtida através de tratamento de têmpera e revenimento. Esses aços possuem teor de carbono em torno de 0,40% C, permitindo alcançar dureza próxima a 55 HRC após a têmpera, tendo como a principal diferença entre esses eles os diferentes elementos de liga e seus teores. O aço 1040 é o que possui menor temperabilidade, visto que a dureza máxima não é atingida e a queda de dureza ocorre de modo abrupto ao longo do comprimento, portanto, o uso deste aço em itens com tratamento é muito restrito (Pinedo, 2021).

Figura 18 - Curva de Jominy para diferentes aços de 0,40% C



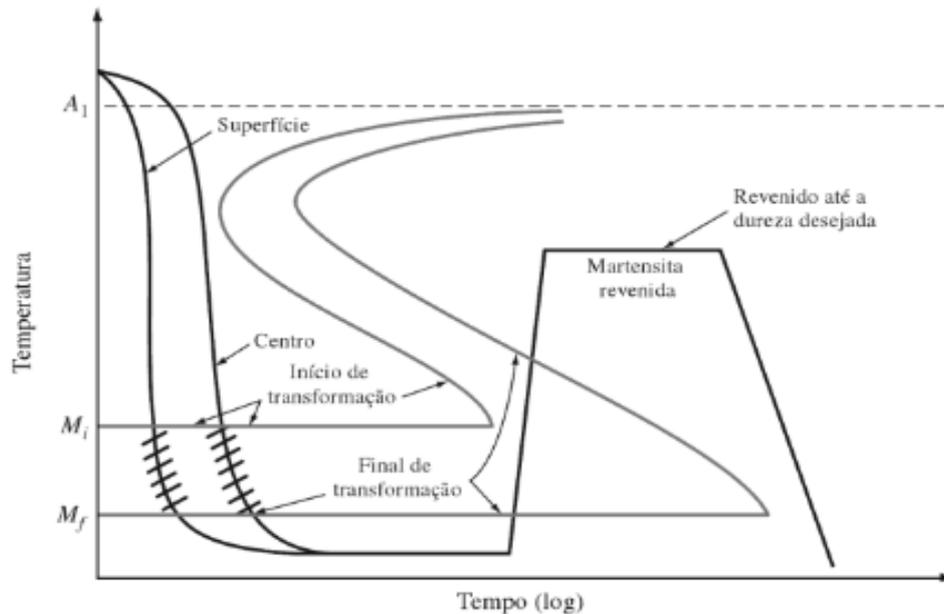
Fonte: Pinedo, 2021

Os aços, majoritariamente, se transformam em martensita na extremidade temperada, sendo assim a dureza na distância Jominy igual a zero é determinada pelo teor de carbono do aço. Já em distâncias Jominy maiores, ao invés da formação de martensita, há a possibilidade de formação de bainita ou perlita. Em um aço-liga com alta temperabilidade, como o 4340, a curva de temperabilidade mantém-se mais horizontal, enquanto em um aço-carbono não ligado como o 1050, a curva de temperabilidade cai intensamente com a distância. Portanto, conclui-se que a temperabilidade é determinada pelo teor de elementos de liga de aço (Askeland; Wright, 2019).

### 2.3.3 Revenido

Revenido consiste em um tratamento de aquecimento de um aço martensítico para uma temperatura abaixo da temperatura de transformação eutetoide, feito para tornar o aço mais macio e dúctil. No processo, o aço é inicialmente austenitizado e temperado em velocidade elevada de resfriamento, a fim de obter martensita e evitar a transformação da austenita em ferrita e cementita. Após esse processo, o aço é aquecido abaixo da temperatura eutetoide para aliviar as tensões internas da martensita. Se o tempo de manutenção de temperatura for grande, ocorre a transformação da martensita em uma estrutura de partículas de carboneto de ferro em matriz de ferrita. O esquema é apresentado na Figura 19.

Figura 19 - Esquema do procedimento de têmpera e revenido do aço-carbono



**Fonte:** Hashemi; Smith, 2016

Após o revenido da martensita, uma estrutura metaestável se decompõe com o reaquecimento, formando martensita em agulhas de aço carbono com baixo teor de carbono. Essa martensita possui uma densidade de deslocamento elevada, criando locais de menor energia para os átomos de carbono em comparação com as posições intersticiais regulares. Como resultado, quando os aços martensíticos de baixo teor de carbono são inicialmente temperados em temperaturas entre 20 e 200°C, os átomos de carbono segregam para essas posições de menor energia. Em aços carbono martensíticos com teores superiores a 0,2% C, o carbono é redistribuído a temperaturas de revenido abaixo de 200°C, formando precipitados muito pequenos

de carboneto épsilon, sendo este carboneto revenidos entre 200 e 700° C chamado de cementita. Quando a temperatura se situa entre 200 e 300°C, os precipitados formam hastes e quando a temperatura de revenimento atinge entre 400 a 700° C, os carbonetos formam partículas esféricas.

A dureza de diversos tipos de aço carbono é gradualmente diminuída durante o aumento gradual da temperatura de revenido a partir de 200 até 700°C. Essa diminuição se dá basicamente pela difusão dos átomos de carbono dos seus locais intersticiais para formação de precipitados de uma segunda fase - carboneto de ferro (Hashemi, 2012).

## 2.4 ENSAIOS MECÂNICOS

Geralmente, esses ensaios mecânicos são destrutivos, promovendo a inutilização e ou a ruptura do material, a escolha do ensaio depende da finalidade do material, dos tipos de esforços que o material sofrerá e das suas propriedades mecânicas das quais deseja-se medir. No geral existem especificações para todos os tipos de materiais metálicos fabricados, constando nelas os ensaios mecânicos que devem ser realizados para garantir a qualidade do material e se o mesmo está em conformidade com a finalidade do mesmo. Há dois fatores determinantes para a realização dos ensaios, sendo eles a quantidade e o tamanho das amostras, este tendo que contar nas especificações do produto, assim como a maneira de retirar as amostras para ensaio (Garcia, 2012).

### 2.4.1 Finalidade e classificação dos ensaios dos materiais

Segundo Garcia (2012), todo e qualquer projeto de engenharia requer vasto conhecimento de características, propriedades e comportamento dos materiais utilizados para sua viabilização. Para levantar as propriedades mecânicas e suas respostas quando expostas à determinadas condições de esforço, há a necessidade de métodos normalizados, sendo esse fundamental para estabelecimento de uma linguagem comum entre fornecedores e usuários finais.

Os dois principais objetivos da realização dos ensaios são fornecer informações rotineiras sobre o produto, através de ensaios de controle aplicados tanto na recepção de materiais provenientes de fornecedores quanto no controle final do produto acabado, e obter novas informações sobre os materiais, o que é essencial para o

desenvolvimento de novos materiais, processos de fabricação e tratamentos (Garcia, 2012, p. 4). Os ensaios dos materiais podem ser classificados quanto à integridade geométrica e dimensional da peça os componentes, sendo estes, destrutivos, ou seja, provocando inutilização completa ou parcial da peça, como por exemplo, tração, dureza e fadiga, ou não destrutivos, não comprometendo a capacidade da peça, por exemplo, raio x e partículas magnéticas (Garcia, 2012).

#### 2.4.2 Dureza de Rockwell

Segundo Newell (2010), dureza é descrita como a resistência da superfície de um material à penetração por um objeto duro, sendo relacionado também à resistência à abrasão dos materiais. A dureza pode ser medida com diversas máquinas, procedimentos e penetradores, atualmente, Brinell e Rockwell são os mais utilizados em elementos de máquina.

O durômetro de Rockwell utiliza uma esfera de aço endurecido de 1/16 polegadas de diâmetro com uma carga de 100 kg de força para metais mais fracos e o resultado obtido é indicado com Rockwell B, RB e HRB. Em metais mais duros como os aços que sofreram tratamentos térmicos, utiliza-se a escala Rockwell C, exercendo uma carga de 150 kg força sobre um penetrador de diamante de forma cônica-esférica, sendo indicada como RC ou HRC (Mott, 2006).

Conforme ABNT NBR 6508-1, o princípio é a aplicação de força sobre um penetrador com forma, tamanho e material especificados na superfície de um corpo de prova em dois níveis de força em escala determinada na Tabela 2.

Tabela 2 - Escala Rockwell regular

<b>Escala de dureza Rockwell regular</b>	<b>Símbolo de dureza Unidade</b>	<b>Tipo de penetrador</b>	<b>Força preliminar F<sub>0</sub></b>	<b>Força total F</b>
A	HRA	Cone de diamante	98,07 N	588,4 N
B	HRBW	Esfera de 1,587 5 mm	98,07 N	980,7 N
C	HRC	Cone de diamante	98,07 N	1,471 kN
D	HRD	Cone de diamante	98,07 N	980,7 N
E	HREW	Esfera de 3,175 mm	98,07 N	980,7 N
F	HRFW	Esfera de 1,587 5	98,07 N	588,4 N

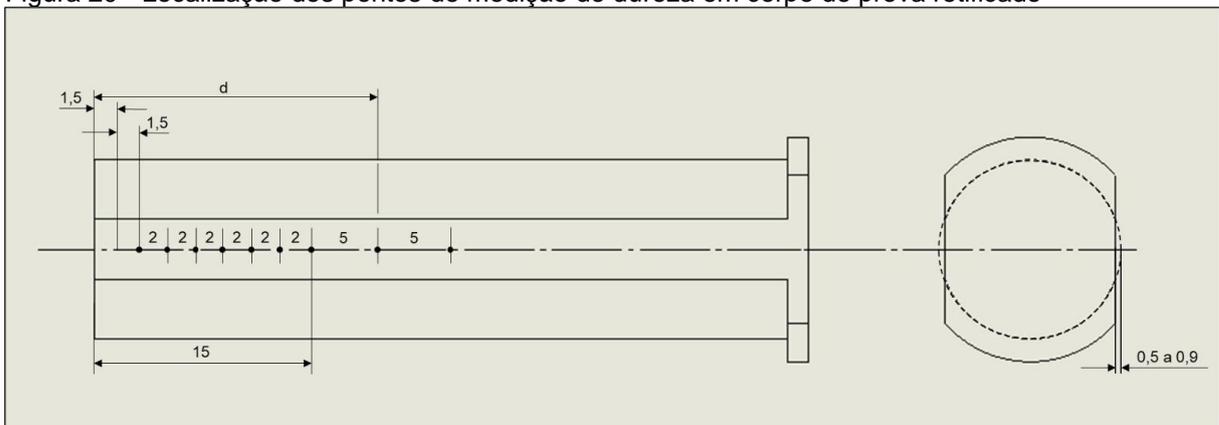
mm				
G	HRGW	Esfera de 1,587 5 mm	98,07 N	1,471 N
H	HRHW	Esfera de 3,175 mm	98,07 N	588,4 N
K	HRKW	Esfera de 3,175 mm	98,07 N	1,471 N

**Fonte:** ABNT NBR 6508-1, 2019

Para a determinação da dureza pelo ensaio de Jominy, segundo a norma ABNT NBR 6339, é necessário retificar todo o comprimento do corpo de prova temperado, segundo duas superfícies paralelas com uma profundidade entre 0,5 mm e 0,9 mm na linha de medição de dureza descrita na Figura 20, podendo ser qualquer posição da superfície retificada para barras menores de 64 mm, sendo necessário a refrigeração durante o processo de retifica, evitando qualquer aquecimento da superfície.

De acordo com a ABNT NBR 6339, pode-se realizar um ataque por reativo na superfície retificada para certificação de que o corpo de prova não sofreu revenimento por calor da retifica, seguindo 5% ácido nítrico (95% água, por volume) ou 50% HCl concentrado (50% água, por volume), é necessário mergulhar o corpo de prova em água quente, atacar com a solução escolhida durante 2 a 3 segundos, lavar em água quente e secar em jato de ar quente, a coloração após o ataque deve ser uniforme.

Figura 20 - Localização dos pontos de medição de dureza em corpo de prova retificado



**Fonte:** Adaptado de ABNT NBR 6339, 2016

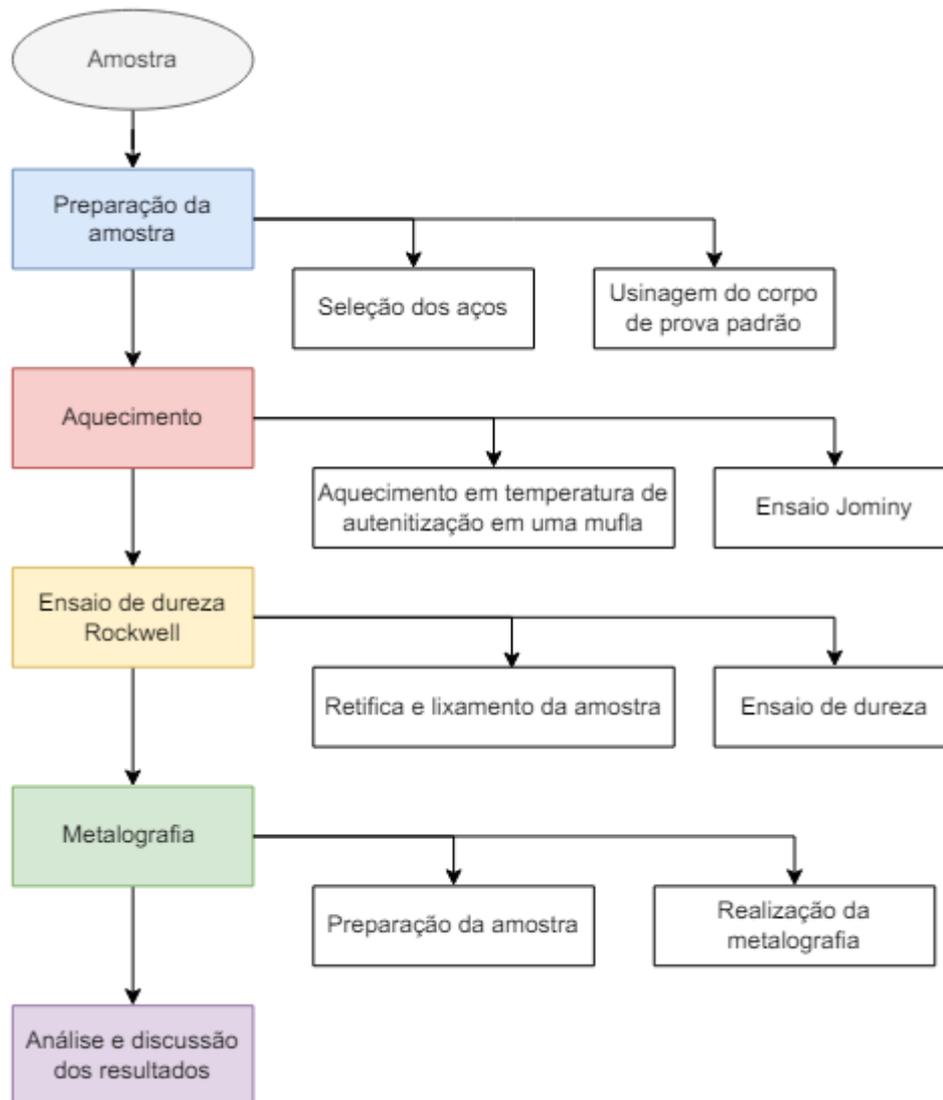
Para medição de dureza deve-se utilizar o durômetro de Rockwell escala C, com dispositivo de apoio e sujeição do corpo de prova facilitando a localização dos pontos em que deve ser realizada a medição da dureza conforme ABNT ISO 6508-1. Em caso de aço de baixa temperabilidade é recomendado a utilização de dispositivo de sujeição que permita a medição da dureza em duas séries de impressões paralelas e escalonadas com distância de 3 mm entre si. A média dos resultados de dureza

deve ser calculada para cada ponto com arredondamento de número inteiro seguinte da escala, caso a diferença seja superior a quatro unidades Rockwell C entre os resultados para cada ponto, o ensaio deverá ser repetido em novas superfícies retificadas em mesmo ou outro corpo de prova, sendo os resultados das médias relacionados em tabela e/ou gráfico. para a determinação da dureza pelo ensaio de Jominy.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia presente neste trabalho baseou-se nas normas ABNT NBR 6339 e ABNT 6508-1. Através dessas normas foi possível o desenvolvimento e orientação para a construção das amostras a serem tratadas termicamente, características do forno de aquecimento, da máquina de resfriamento e para o ensaio de dureza Hardness Rockwell C. A Figura 21 apresenta o fluxograma do trabalho.

Figura 21 - Fluxograma do trabalho



Fonte: Autor, 2024

### 3.1 MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS

A escolha dos materiais para este estudo baseou-se no critério de temperabilidade e nas distintas características de composição química, abrangendo um aço carbono e um aço com adição liga. Estes elementos de liga influenciam diretamente na capacidade do material de alcançar elevadas durezas durante o processo térmico. Inicialmente, foi selecionado o aço SAE 8620 devido ao seu conhecimento prévio de alta temperabilidade. No entanto, a dificuldade em encontrar fornecedores deste aço na região levou à sua substituição pelo aço SAE 4340, que possui temperabilidade média e elementos de liga que proporcionam características distintas em comparação ao aço SAE 1045.

Portanto, os materiais selecionados para o estudo e desenvolvimento deste trabalho foram os aços SAE 1045 e SAE 4340, fornecidos na forma de lingotes e com composições conforme detalhado na Tabela 1, de acordo com as especificações da norma ABNT NM 87. Estes materiais permitirão uma análise comparativa robusta, contribuindo para o entendimento das diferentes respostas à temperabilidade entre um aço carbono e um aço liga.

Tabela 3 - Composição química dos aços SAE 4340 e SAE 1045

Aço	Carbono (C)	Manganês (Mn)	Fósforo (P)	Enxofre (S)	Silício (Si)	Níquel (Ni)	Cromo (Cr)	Molibdênio (Mo)
SAE 4340	0,38 - 0,43	0,60 - 0,80	-	-	0,15 - 0,35	1,65 - 2,00	0,60 - 0,90	0,20 - 0,30
SAE 1045	0,43 - 0,50	0,60 - 0,90	0,04	0,05	-	-	-	-

Fonte: ABNT NM 87, 2000

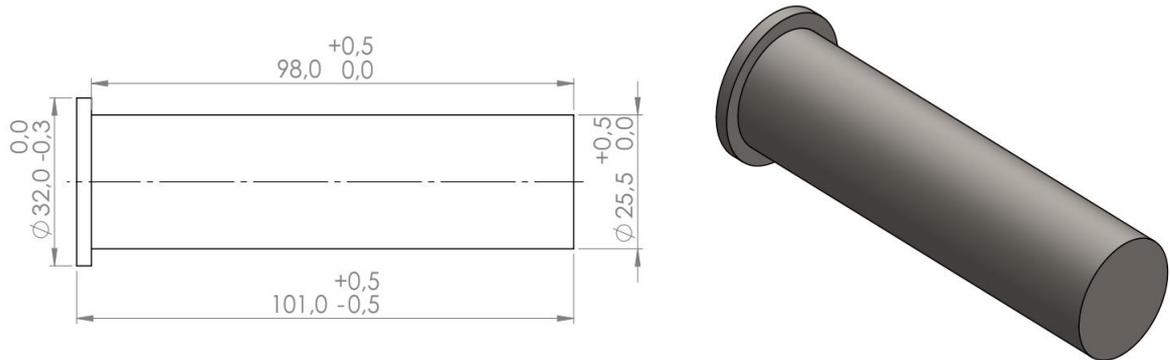
Os corpos de prova foram fabricados por meio de usinagem utilizando um torno CNC GT 250, programado com o programação Fanuc com rotação de 1000 RPM, conforme as medidas estabelecidas na norma ABNT NBR 6339 para o ensaio de temperabilidade Jominy, onde o diâmetro maior de 32 mm é utilizada para apoio do corpo de prova no dispositivo, e o comprimento é da exata distância entre a superfície superior do dispositivo e o início do fluxo de água, permitindo que o contato do corpo de prova com a água ocorra apenas na extremidade inferior. Através deste processo foi possível garantir a precisão dimensional necessária para a realização dos testes.

Na Figura 22, são apresentadas as medidas padrão das amostras, conforme descrito na norma, incluindo as tolerâncias especificadas. Além disso, a figura contém

uma representação visual das peças fabricadas. Para a realização dos ensaios, foram preparadas duas amostras, uma de cada material selecionado, sendo estes os aços SAE 1045 e SAE 4340.

A utilização do torno CNC GT 250 permitiu a obtenção de superfícies de alta qualidade e a manutenção das tolerâncias exigidas, assegurando que os corpos de prova estivessem em conformidade com os requisitos normativos. Este cuidado na fabricação é crucial para a precisão dos resultados obtidos nos ensaios de temperabilidade, garantindo que as variações nas propriedades dos materiais sejam atribuíveis às suas composições químicas e processos de tratamento térmico, e não a diferenças na fabricação das amostras.

Figura 22 - Desenho do corpo de prova



**Fonte:** Adaptado ABNT NBR 6339, 2000

### 3.2 ENSAIO JOMINY

Ao término do processo de usinagem, foi iniciado o processo de aquecimento dos corpos de prova individualmente até o ponto de austenitização. Esse aquecimento foi realizado em uma mufla Quimi, equipada com controle de temperatura digital, que permitiu um controle preciso e uniforme da temperatura.

Após atingir a temperatura de austenitização, conforme os parâmetros detalhados na Tabela 4, os corpos de prova foram retirados da mufla e imediatamente após a retirada, cada corpo de prova foi colocado no dispositivo de Jominy para iniciar o processo de resfriamento controlado por um período de 10 min, tempo necessário para o resfriamento completo do corpo de prova. Este procedimento é fundamental para avaliar a temperabilidade dos materiais, pois simula o resfriamento que ocorre em diferentes condições de tratamento térmico.

Este processo é ilustrado na Figura 23, que mostra o posicionamento do corpo de prova no dispositivo e a metodologia de resfriamento aplicada. A rápida transferência dos corpos de prova da mufla para o dispositivo de Jominy foi crucial para assegurar a precisão dos resultados, evitando qualquer perda significativa de calor que pudesse influenciar os resultados do ensaio.

Este procedimento garantiu que os corpos de prova fossem tratados de maneira consistente, permitindo uma análise precisa da temperabilidade dos aços SAE 1045 e SAE 4340. A realização meticulosa de cada etapa do processo assegurou a obtenção de dados confiáveis, essenciais para o desenvolvimento das conclusões deste estudo.

Tabela 4 - Parâmetros para aquecimento dos corpos de prova

Aço	SAE 1045	SAE 4340
Temperatura (°C)	925	870
Tempo (minutos)	60	60

Fonte: Autor, 2024

Figura 23 - Corpo de prova durante o ensaio de Jominy



Fonte: Autor, 2024

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Após o processo de têmpera, foi necessário realizar um procedimento de retífica nos corpos de prova, removendo entre 0,5 e 0,9 mm de material em ambos os lados dos corpos de prova, com cuidado para evitar possíveis danos térmicos ou

mecânicos que pudessem alterar as propriedades de microestrutura ou dureza do aço, este processo foi realizado a fim de obter uma superfície plana, essencial para a execução precisa dos ensaios de dureza, pois garante uma superfície uniforme e adequada para a medição.

Este processo garante que as superfícies dos corpos de prova estejam em condições ideais para a realização da avaliação das variações de dureza ao longo do comprimento, conforme exigido pelos ensaios de temperabilidade de Jominy. O resultado do processo de retífica nos corpos de prova é mostrado na Figura 4. A imagem mostra as faixas planas geradas após a retífica, demonstrando a uniformidade alcançada no preparo das amostras.

Figura 24 - Corpos de prova após lixamento de superfície



Fonte: Autor, 2024

Após a preparação superficial das amostras, foi realizado o ensaio de dureza HRC com cone de diamante como descrita na norma NBR 6508-1 nas duas faces do corpo de prova, fazendo a primeira referência a 1,5 mm da face resfriada conforme a norma ABNT NBR 6339.

Para garantir consistência e precisão, a medição da dureza na escala Rockwell C foi realizada usando um durômetro e seguindo a norma NBR 6508-1 tendo como penetrador um cone de diamante com um ângulo de 120 graus e uma ponta arredondada de 0,2 mm de raio. Após isso, a amostra foi colocada na mesa do durômetro com a superfície a ser testada perpendicular ao penetrador e a amostra foi fixada utilizando uma pré-carga de 10 kgf aplicada ao penetrador. Após a aplicação da pré-carga, o ponto foi medido para garantir a distância entre um ponto e outro e o

indicador de medição do durômetro é ajustado para zero para garantir que a medição comece no ponto certo.

Posteriormente, uma carga adicional de 140 kgf foi aplicada, aumentando a carga total sobre o penetrador para 150 kgf para permitir a penetração completa do penetrador, essa carga foi mantida por um tempo específico, entre 2 e 6 segundos. Após esse período, a carga principal foi removida e o indicador do durômetro foi usado para ler diretamente o valor da dureza, visto que, o durômetro converte automaticamente o valor de dureza Rockwell C (HRC) na escala Rockwell C e mostra o valor no indicador, este valor de dureza é determinado pela diferença na profundidade de penetração causada pelas cargas menor e maior.

O processo de medição foi repetido a cada 1,5 mm entre um ponto medido e outro e a medição foi dada como concluída quando os valores de dureza estabilizaram ao longo da peça. As medições de dureza foram realizadas utilizando o equipamento Panambra modelo Pantec RASN-T.

Após o ensaio de dureza foi realizada a preparação para a metalografia, realizada no Laboratório de Metalografia e Ensaio Mecânicos. Inicialmente, foi realizado o corte das amostras em diâmetro de 20 mm e 10 mm de altura com a máquina de Policorte Metalográfico AROTEC COR-40 para manter o padrão e precisão no embutimento das amostras, garantindo que não haveria nenhum aquecimento excessivo nas amostras, fazendo com que ocorra um possível revenimento ou têmpera localizada. Após o corte, foi realizado o embutimento das duas amostras com baquelite vermelho, na embutidora AROTEC PRE-30 S, após finalização do processo de embutimento, as peças foram encaminhadas para o lixamento manual, realizado com as lixas de numeração mesh #100, 220, 320, 400, 600 e 1200. Após o último lixamento, as amostras foram lavadas com álcool etílico e secadas com um secador a ar quente. Finalizada a lavagem, foi realizado o polimento na politriz metalográfica, com pano de tecido de polimento e pasta de diamante de 9 µm, seguido de uma lavagem em água, álcool etílico e secagem.

Para revelar a superfície das amostras e sua microestrutura, foi realizado um ataque químico no material com o reagente Nital 1% para revelar a microestrutura, com posterior lavagem em água, álcool e secagem. Foram captadas fotos das amostras no microscópio óptico OPTON TNM-07T-PL e com a câmera Sony e modelo Alpha A7 III. Nas imagens foram inseridas escala de dimensão para demonstrar as

dimensões microestruturais de cada amostra. Todas essas preparações foram realizadas através do serviço prestado pelo laboratório da Faculdade Horizontina.

Após estes processos, através das imagens obtidas das microestruturas do aço SAE 1045, foi utilizado o *software* ImageJ para calcular a área da imagem para obter a diferença do aumento dos grãos de perlita obtidos depois do processo de têmpera, para isso, inicialmente foi realizada a calibração do *software*, selecionando toda a imagem com a ferramenta de linha, após foi selecionada a opção selecionar escala, e calibrado para 50  $\mu\text{m}$ , conforme a escala utilizada na metalografia, após esse processo, foi realizado o desenho do grão pela ferramenta de desenho a mão livre, e utilizado a ferramenta de medir área, esse processo foi realizado 5 vezes para cada imagem. Quando finalizada a medição, foi calculado a média da medida de área de perlita antes e após a têmpera, e dividido o resultado para obter em quantas vezes foi aumentado o grão. O processo não foi realizado no SAE 4340 visto que a microestrutura mudou de perlita e ferrita para martensita.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

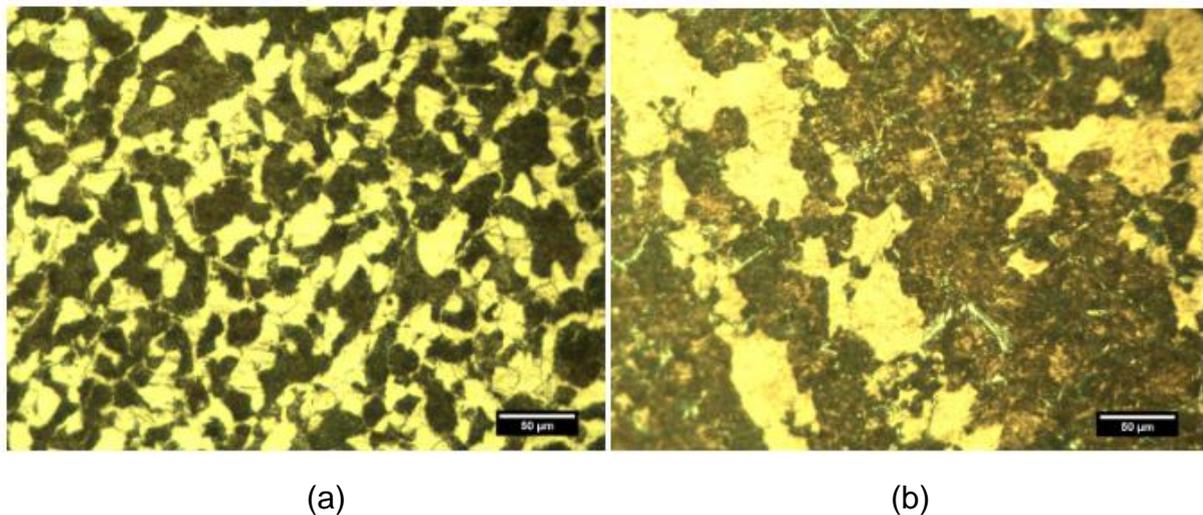
Neste capítulo, são apresentados os resultados e análises obtidos por meio da metodologia descrita anteriormente, com foco nas análises metalográficas e nos ensaios de dureza. Os resultados são comparados com os obtidos por outros autores que também realizaram o ensaio de Jominy com o mesmo tipo de aço. Esta comparação permite uma avaliação mais abrangente e uma validação dos resultados obtidos, contribuindo para uma interpretação mais precisa dos dados.

### 4.1 TEMPERABILIDADE DOS AÇOS

#### 4.1.1 Microestrutura

Quanto às micrografias, é possível analisar na Figura 25, que na amostra antes da realização da têmpera, no aço SAE 1045 observa-se uma estrutura constituída de ferrita (grãos claros) e perlita (grãos escuros). Já na amostra que sofreu o processo de têmpera é possível observar formação de colônias isoladas de perlita (grãos escuros) envolta em matriz contínua de ferrita (grãos claros).

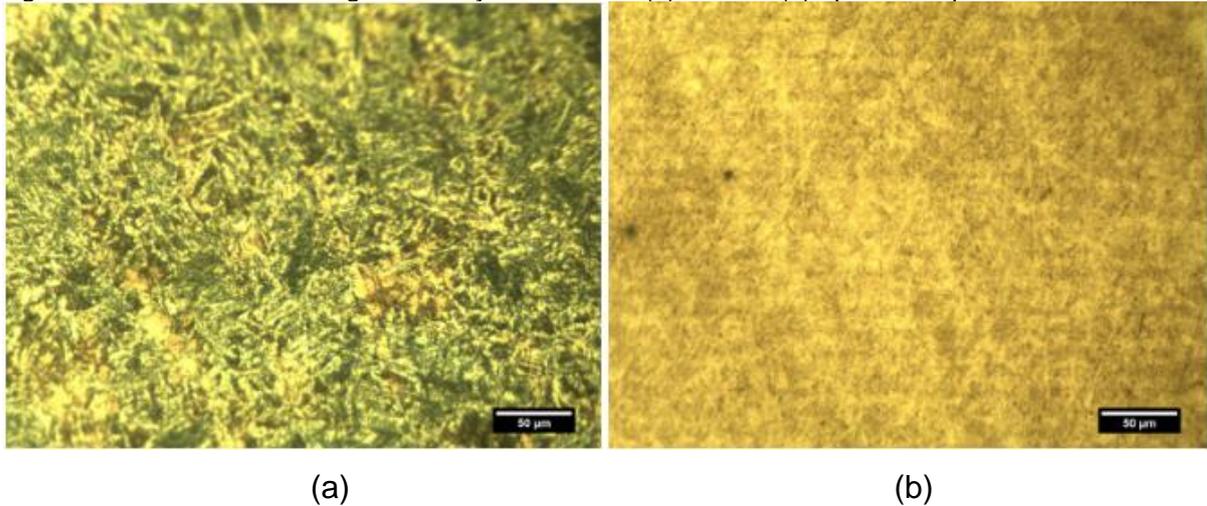
Figura 25 - Amostra de micrografia do aço SAE 1045: (a) antes e (b) após a têmpera



Fonte: Autor, 2024

A estrutura obtida no presente trabalho difere da estrutura martensítica como a obtida por Marques *et al.* (2017), onde o aço foi inicialmente normalizado a 915°C durante uma hora e após austenitizada a 925°C durante trinta minutos. Isso pode ter ocorrido devido à preparação da superfície realizada antes da austenitização.

Figura 26 - Amostra de micrografia do aço SAE 4340: (a) antes e (b) após a têmpera



Fonte: Autor, 2024

Referente à micrografia obtida do aço SAE 4340, como demonstrado na Figura 26, antes do processo de têmpera, a estrutura do aço encruado, assim como do aço SAE 1045, é composta por ferrita (grãos claros) e perlita (grãos escuros). Após o tratamento, é quase imperceptível a microestrutura do aço, mesmo com grandes ampliações, porém é possível observar a formação de martensita apresentada em formato de agulhas.

A Tabela 5 apresenta os valores obtidos medindo a área de perlita no aço SAE 1045, através da metalografia do aço, antes e depois da têmpera usando o *software* ImageJ. Através da literatura, sabe-se que o processo de resfriamento rápido conhecido como têmpera tem um efeito significativo na distribuição das fases dentro da matriz de aço. A microestrutura do aço SAE 1045 antes da têmpera é principalmente composta por perlita e ferrita. O resfriamento relativamente lento do estado austenítico forma a perlita, que é formada por camadas alternadas de ferrita e cementita. Embora a microestrutura seja relativamente resistente, ela não alcança a dureza máxima do aço.

Tabela 5 - Resultado medição área aço SAE 1045

Sem tratamento	Pós têmpera
22,43	61,44
19,7	83,45
49,63	68,87
16,48	86,63
20,33	142,8

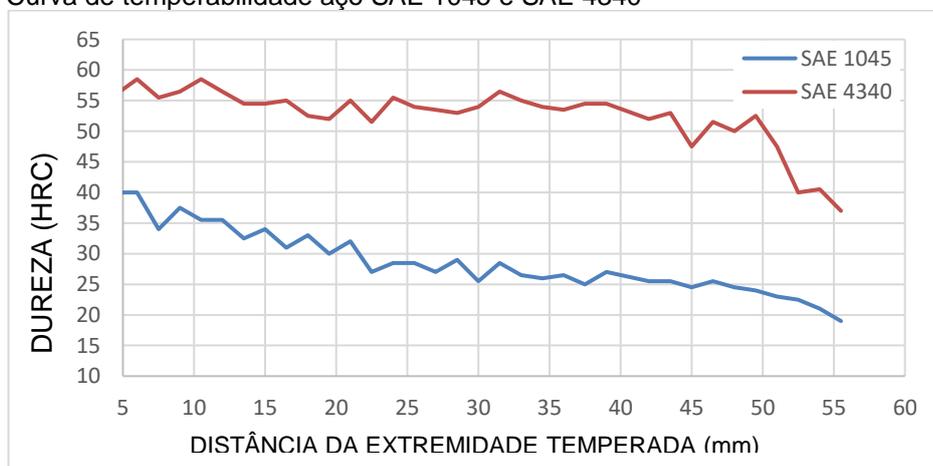
Fonte: Autor, 2024

Após a têmpera, a área de perlita aumentou, o que indica a inexistência de uma mudança parcial ou total da austenita em martensita, conforme demonstrado na Tabela 5. O objetivo da têmpera é reduzir a área de perlita, pois a presença desta microestrutura reduz a dureza final do aço. A formação de perlita após a têmpera indica que o resfriamento não foi suficientemente rápido para levar a austenita a se transformar completamente em martensita. A dureza final do aço SAE 1045 temperado é diretamente proporcional à quantidade de martensita produzida. Como resultado, qualquer aumento na área de perlita após a têmpera resulta em uma dureza menor do que o esperado. É fundamental que o processo de têmpera seja rigorosamente controlado para maximizar a dureza, garantindo um resfriamento rápido e eficaz para aumentar a formação de martensita e reduzir a presença de perlita.

Por fim, a Tabela 5 mostra quanto é importante manter o processo de têmpera adequado para o aço SAE 1045. Ao usar o *software* ImageJ, uma análise quantitativa da área de perlita antes e após a têmpera mostra que aumentar a área de perlita pode aumentar a dureza final do aço, porém não atinge a dureza máxima desse aço, além de obter uma microestrutura com menor dureza comparada a martensita. Isso mostra que o resfriamento rápido é necessário para criar uma microestrutura predominantemente martensítica, que resulta em maior dureza.

No que se refere a dureza, através do gráfico apresentado na Figura 27, é possível observar que a dureza apresentada na extremidade em contato com a água, no aço SAE 1045, foi de 43 HRC enquanto que, no aço SAE 4340 foi obtida a dureza de 57 HRC.

Figura 27 - Curva de temperabilidade aço SAE 1045 e SAE 4340



## 4.2 DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS

Com base nas análises de dureza de ambos os aços, foi possível observar que o aço SAE 1045 teve dureza de 43 HRC e o aço SAE 4340 teve dureza de 57 HRC na extremidade em contato com a água, conforme mostrado na Figura 27. Esses valores mostram que os dois materiais não têm a mesma capacidade de endurecimento. O aço SAE 4340, que tem dureza mais alta, responde melhor ao processo de têmpera do que o SAE 1045, que tem dureza mais baixa na mesma situação. Essa característica é essencial para determinar as propriedades mecânicas finais do aço, pois impacta a resistência e a tenacidade do aço em aplicações rotineiras.

Além disso, é possível deduzir suas possíveis aplicações industriais comparando esses resultados com as características esperadas para cada tipo de aço. O SAE 1045 pode ser melhor para usinabilidade e conformabilidade, mas o SAE 4340 pode ser melhor para componentes que exigem alta resistência e tenacidade. Na Tabela 6 estão descritas as durezas finais e as microestruturas obtidas.

Tabela 6 - Resultados obtidos no ensaio de Jominy

<b>Aço</b>	<b>Microestrutura final</b>	<b>Dureza ponta temperada em água</b>	<b>Dureza ponta temperada em ar</b>
SAE 1045	perlita e ferrita	45 HRC	19 HRC
SAE 4340	Martensita uniforme	58 HRC	37 HRC

**Fonte:** Autor, 2024

Marques *et al.* (2017), conclui que, a maior dureza obtida no aço SAE 1045 após a realização do ensaio de Jominy foi de 55 HRC, muito superior ao resultado obtido neste trabalho, o aço foi exposto à um processo de normalização antes do processo de têmpera, o que pode ter afetado o resultado final. Lourenço *et al.* (2018), realizou o ensaio de Jominy para os mesmos aços utilizados, onde o maior valor do aço SAE 1045, após aquecimento a 900°C e têmpera, foi de 43 HRC e para o aço SAE 4340 foi de 54 HRC, valores próximos aos resultados obtidos no presente trabalho.

A partir da comparação com o resultado apresentado por Marques (2017), conclui-se que, devido a estrutura martensítica obtida pelo mesmo, a dureza do material foi notoriamente superior à do presente experimento, onde a estrutura foi de perlita e ferrita, portanto, é possível afirmar que a microestrutura afeta diretamente a

dureza final do material e é essencial garantir a têmpera correta do aço, para que a estrutura martensítica, responsável pelo aumento da resistência à tração e dureza, seja formada uniformemente por todo o material.

Com base nos resultados do ensaio de Jominy, pode-se observar que o aço SAE 1045 teve uma curva decrescente acentuada, diferente da curva do aço SAE 4340, onde a curva na parte mais próxima da ponta em contato com a água teve leve diferença na dureza e decrescendo somente da metade para a ponta resfriada ao ar. Sendo assim, o aço com maior temperabilidade é o aço SAE 4340.

Em relação às características metalográficas, observou-se que a austenita formada durante o aquecimento do SAE 1045 a 925°C, ao ser resfriada, transformou-se em uma estrutura de colônias de perlita, composta por placas alternadas de ferrita e cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), em uma matriz ferrítica. Isso pode ser explicado pelo diagrama de resfriamento contínuo, que mostra que a microestrutura obtida é típica de um aço que passou por um resfriamento lento. Esse resfriamento lento não foi suficientemente rápido para atingir a temperatura crítica de martensita ( $M_s$ ). Através do resultado obtido pelo cálculo de área de perlita, foi possível observar que a área de um grão de perlita aumento 3,44 vezes após o processo de têmpera este aumento da área de perlita significa que há menos martensita na microestrutura final e visto que a dureza final do aço está diretamente ligado à quantidade de martensita, um maior aumento da área de perlita significa que não há formação de martensita, o que diminui a dureza final do aço se comparado com um aço de microestrutura final martensítica.

A têmpera é um processo crucial no tratamento térmico de aços, é projetado para aumentar a dureza do aço por meio da transformação de fases microestruturais. A quantidade de martensita, uma fase frágil e dura formada pelo resfriamento rápido da austenita, determina a dureza final do aço temperado. No entanto, a formação de microestruturas mais macias do que a martensita, conhecidas como perlita ou bainita, pode ocorrer se a têmpera não for realizada corretamente.

Quando o aço é resfriado lentamente a partir do estado austenítico, a perlita é formada por camadas alternadas de ferrita e cementita. A área de perlita que aumenta após a têmpera indica que a transformação completa para martensita não ocorreu, o que reduz a dureza final do aço. Devido ao fato de que essas microestruturas são inerentemente menos duras do que a martensita, a formação de bainita ou perlita diminui a dureza.

Uma parte importante da têmpera é a velocidade de resfriamento. A formação de martensita é facilitada por resfriamentos rápidos, enquanto a formação de perlita ou bainita é facilitada por resfriamentos insuficientes. Além disso, as transformações de fase são afetadas pela composição do aço, principalmente pelo teor de carbono e outros elementos de liga. A temperatura de têmpera também é importante: temperaturas altas podem levar à formação de austenita, mas o resfriamento posterior deve ser rápido o suficiente para evitar a formação de perlita.

Por fim, a área de perlita aumentada após a têmpera indica uma transformação incompleta da martensita. Isso leva a um aço com dureza final menor. É fundamental que o processo de têmpera seja cuidadosamente controlado para maximizar a dureza, garantindo um resfriamento rápido suficiente para aumentar a formação de martensita e reduzir a presença de microestruturas mais macias como a perlita.

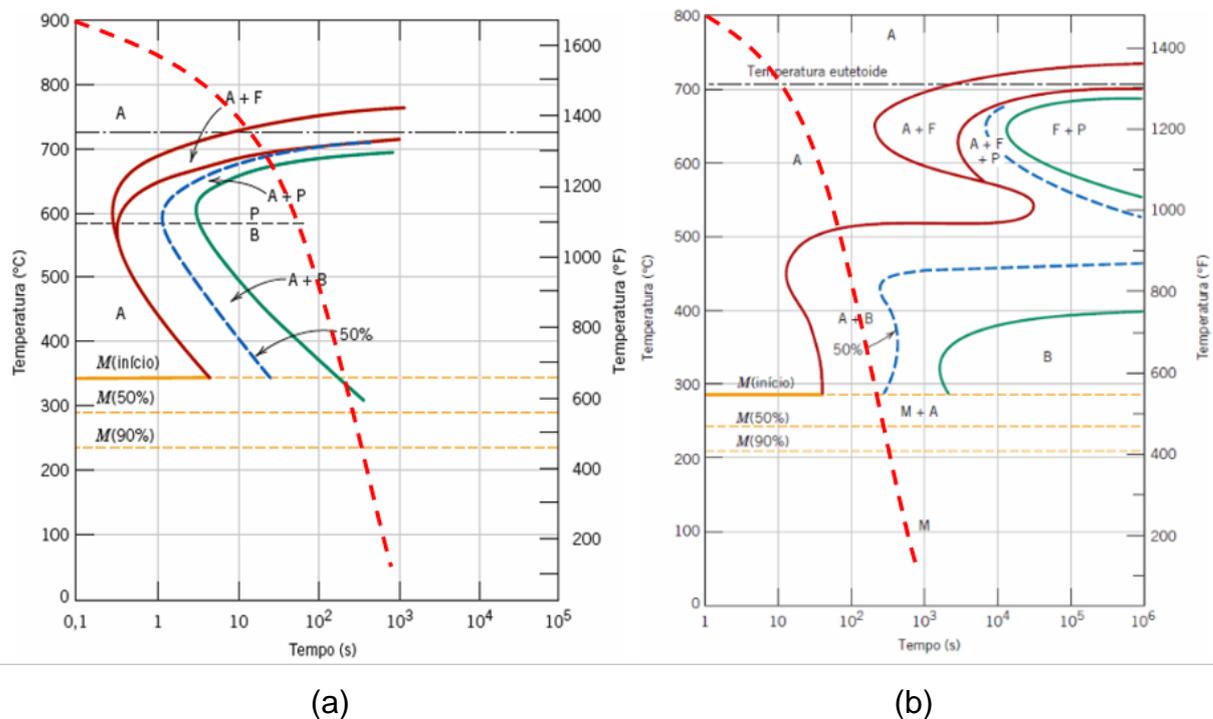
O aço SAE 4340 produz uma microestrutura de martensita uniformemente transformada. A Figura 14 mostra o diagrama TTT, que mostra que os aços ligados, como o SAE 4340, têm uma janela de tempo maior durante o resfriamento em que a austenita permanece estável. Essa estabilidade prolongada da austenita permite que a martensita se transforme mais completamente, criando uma microestrutura mais forte e resistente. Por outro lado, o aço SAE 1045 tem menor estabilidade da austenita durante o resfriamento mais lento, conforme mostrado pelo diagrama deslocado para a esquerda na Figura 14.

A Figura 28, que compara a microestrutura de aço carbono contendo 0,45% de carbono com aço liga SAE 4340, é essencial para complementar essa análise. Esta figura mostra claramente como os dois tipos de aço diferem em sua microestrutura final. Ela destaca principalmente como o teor de ligas do SAE 4340 afeta as fases de transformação durante o resfriamento controlado. Por outro lado, a microestrutura do aço liga SAE 4340, com uma matriz predominantemente martensítica, é mostrada no lado direito na Figura 29 que apresenta as curvas de resfriamento para ambos os aços durante a têmpera onde foi obtido o resultado final de perlita e ferrita para o aço SAE 1045 e de martensita para o aço SAE 4340. O teor de ligas como cromo, molibdênio e níquel nesse tipo de aço ajuda a demonstrar uma transformação mais completa da austenita durante o resfriamento. A microestrutura criada pela martensita é mais forte e resistente.

Além de confirmar a influência significativa dos elementos de liga na cinética de transformação das fases, esta comparação visual é importante para entender como

as diferenças na microestrutura impactam diretamente as propriedades mecânicas e o desempenho dos aços em várias aplicações industriais.

Figura 28 - Curva de resfriamento para (a) Aço SAE 1045 (b) Aço SAE 4340



**Fonte:** Adaptado Callister, 2020

A partir das análises das respostas dos aços após o ensaio de Jominy e da comparação com o diagrama de transformação isotérmica de ambos, constatou-se que o aço SAE 4340 apresenta melhor temperabilidade. Isso se deve aos seus elementos de liga, que estabilizam a austenita por um período mais prolongado, facilitando a formação da estrutura martensítica durante a austenitização. Essa característica proporciona um maior controle metalúrgico sobre toda a peça. Por outro lado, o SAE 1045 revelou-se mais desafiador no processo de têmpera. Ele requer cuidados adicionais com a velocidade de resfriamento e, muitas vezes, demanda a realização de múltiplos processos para obter uma estrutura uniforme em toda a peça. De acordo com Marques et al. (2017), é necessário conduzir um processo de normalização antes da têmpera para facilitar a formação da martensita e alcançar uma dureza superior.

Portanto, após relacionadas as durezas, microestruturas e respostas dos aços ao processo de têmpera, conclui-se que o aço SAE 4340 é superior ao aço SAE 1045 no que diz respeito a temperabilidade e facilidade na realização do processo de têmpera, visto que, o mesmo, por possuir elementos de liga, mantém fase austenítica

por mais tempo, permitindo que a transformação ocorra por toda a peça formando uma estrutura martensítica uniforme e garantindo maior dureza em toda a peças.

Os resultados obtidos neste trabalho são extremamente importantes para o mundo acadêmico, pois detalha a metodologia para a realização do ensaio de Jominy, microestrutural e ensaio de dureza, o que serve de manual para futuros trabalhos acadêmicos, o mesmo também integra o conhecimento de engenharia de materiais com a área metalmeccânica, o que exemplifica como a aplicação de conhecimentos de obtidos durante a graduação pode resolver problemas complexos. Quanto às contribuições nas indústrias, pode-se afirmar que os resultados obtidos, auxiliam na otimização dos processos de tratamentos térmicos, o que resulta em produtos com melhores propriedades mecânicas e desempenho, item crítico para componentes que exigem boa dureza.

O presente trabalho também facilita a escolha do aço mais adequado para diferentes aplicações, o que permite a seleção de materiais baseados em dados científicos, como a composição da microestrutura e a dureza após a têmpera, melhorando a confiabilidade, segurança e eficiência do produto. Ao entender melhor as propriedades mecânicas dos materiais e como cada um responde ao processo de têmpera, é possível reduzir custo de operação, assim como retrabalhos e falhas por eventuais trincas ou microestrutura incorreta, o que promove uma fabricação mais econômica e rentável para a empresa.

## CONCLUSÃO

Este trabalho possibilitou analisar a temperabilidade dos aços SAE 1045 e SAE 4340, e seu conseqüente potencial de endurecimento após têmpera, característica importante na indústria, pois, através da comparação de ambos os aços quanto a distribuição de dureza ao longo do corpo de prova a microestrutura final, é possível auxiliar a otimização dos processos de tratamento térmico, e obter melhor desempenho qualidade nos produtos finais, além de facilitar a seleção adequada de materiais para diferentes aplicações industriais.

O trabalho também cumpriu com todos os objetivos específicos propostos, possibilitando uma melhor compreensão da temperabilidade dos aços SAE 1045 e SAE 4340. Foram selecionadas amostras representativas desses aços, que foram posteriormente usinadas conforme as medidas conforme as especificações da norma ABNT NBR 6339 para o corpo de prova do ensaio Jominy, assegurando a precisão e a uniformidade necessárias. Os corpos de prova foram então aquecidos até a temperatura de austenitização. O ensaio de têmpera pelo método Jominy foi realizado seguindo o procedimento padrão, durante o período de 10 min, tempo necessário para resfriamento completo do corpo de prova, que foram posteriormente retificados para obtenção de uma superfície plana, permitindo a medição e análise da dureza dos corpos de prova após o ensaio. Além disso, a metalografia sendo realizada antes e depois do ensaio Jominy, proporcionou uma visão detalhada das alterações na microestrutura. A interpretação dos resultados obtidos revelou uma influência significativa da microestrutura obtida no processo de têmpera na dureza final do aço. Os resultados apresentados neste trabalho contribuíram para o aprofundamento do entendimento sobre a temperabilidade desses materiais, fornecendo, também, informações que facilitam a escolha do aço para diferentes aplicações industriais e conhecimento acadêmico.

Ao que se refere ao objetivo de analisar e comparar as propriedades microestruturais e dureza dos aços SAE 1045 e SAE 4340, pode-se concluir que foram atingidos, pois através do ensaio de Jominy, pode-se observar que ambos os aços obtiveram transformações em sua microestrutura e dureza após têmpera, onde se destaca a transformação do aço SAE 4340, que, por obter elementos de liga em sua composição foi possível a obtenção de uma estrutura martensítica completa e uma dureza superior de 58 HRC já no aço SAE 1045, houve pouca mudança em sua

microestrutura e dureza inferior, por ser um aço carbono, sua transformação em martensítica é mais demorada e necessita de cuidados no momento de aquecimento, necessitando de uma normalização antes da austenitização, o que em uma indústria seria menos interessante, devido ao gasto a mais de tempo para uma obtenção da martensita e maior dureza.

Em resumo, o estudo confirmou que o SAE 4340 possui melhor temperabilidade e é mais eficiente para processos industriais que exigem uma alta dureza e uma estrutura martensítica completa, enquanto o SAE 1045 demanda mais etapas e cuidados para alcançar resultados semelhantes.

## REFERÊNCIAS

- ASKELAND, Donald R.; WRIGHT, Wendelin J. **Ciência e engenharia dos materiais** – Tradução da 4a edição norte-americana. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2019.
- ASM. **Metals Handbook, Heating Treating**, Vol. 4, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6339: Determinação da temperabilidade (Ensaio Jominy)**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508-1: Materiais metálicos — Ensaio de dureza Rockwell — Parte 1: Método de ensaio (escala A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 87: Aço Carbono e ligados para construção mecânica – Designação e composição**. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.
- BHADESHIA, H. K. D. H. **Bainite in steel**, v. 2.1. Carlton House Terrace London: 10M Communications Ltda, 2001.
- BILAL, M. M.; YAQOUB, K.; ZHID, M. H.; HAQ, E. U.; TANVEER, W. H.; WADOOD, A.; AHMED, B. **Effect of austempering conditions on the microstructure and mechanical properties of AISI 4340 and AISI 4140 steels**. Journal of Materials Research and Technology 8(6) 5194-5200, 2019.
- BUBNOFF, D. V.; CARVALHO, M. M. O. **Kinetic study on martensite formation in Steels 1045 and 4340 under variable cooling rates**. Revista de la Facultad de Ingenieria 30 10-20, 2014.
- CALLISTER, William D J. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Abordagem Integrada**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2019.
- CALLISTER, William. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9 ed. Rio de Janeiro: Grupo Gen-LTC, 2020.
- CAO, J.; GRAJCAR, K.; SHAN, X.; ZHAO, Y.; ZOU, J.; CHEN, L.; SARRIGIANNIS, P. G. *Using interictal seizure-free EEG data to recognise patients with epilepsy based on machine learning of brain functional connectivity*. **Biomedical Signal Processing and Control**, v. 67, p. 102554, 2021.
- CESAR T. **Diagrama de Fases Ferro- Carbono**. [s.l.; s. n.], 2015.
- CHEN, C.; ZENG, X.; WANG, Q.; LIAN, G.; HUANG, X.; WANG, Y. *Statistical modelling and optimization of microhardness transition through depth of laser surface hardened AISI 1045 carbon steel*. **Optics and Laser Technology**, v. 14, n. 105976, 2020.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 4. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1979.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. São Paulo: Associação brasileira de materiais, 1977.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Blucher, 2008.

COSTA E SILVA, L. *Effects of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of 4340 Steel*. **Journal of Materials Science**, 2015.

FLUHRER, J. **DEFORM 2D-V9.0 and 3D-V6.0 Users Manual**, Scientific Forming Technology Co. Columbus, 2005.

FERREIRA, A. *AISI 4340 Alloy Steel (UNS G43400)*. **Materials Science Forum**, 2019.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime A.; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. Disponível em: <http://fahor.com.br/totvs/?biblioteca&isbn=978-85-216-2114-0>. Acesso em: 10 set. 2023.

GROOVER, Mikell P. **Introdução aos Processos de Fabricação**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2014.

HASHEMI, Javad. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Brasil: McGraw Hill Brasil, 2012.

HÖMBERG, Dietmar. *A numerical simulation of the Jominy end-quench test*. **Acta Materialia**, v. 44, n. 11, p. 4375-4385, 1996.

KALISH, D. *Discussion of structure and mechanical properties of tempered martensite and lower bainite in Fe-Ni-Mn-C steels*. **Metall Master Trans B**, 1972.

KANDPAL, B. C., CHUTANI, A., G. A.; SADANNA, C. **A review on Jominy test and determination of effect of alloying elements on hardenability of steel using Jominy end quench test**. International Journal of Advances in Engineering & Technology, v. 1, n. 3, p. 65, 2011.

KOBASKO, N. I. *Correlation between chemical composition of steel, optimal hardened layer, and optimal residual stress distribution*. **Journal of ASTM International**, DOI: 10.1520/JAI102788, 2011.

KRAUSS, George. **Steels: Processing, Structure, and Performance**. United States: ASM International, 2005.

KUMAR, A.; JAYAJUMAR, P.; SHARMA, V. K. **Microstructure and properties of thermomechanically treated and bake hardened AISI 4340 Steel**. Materias Today: Proceedings 18 848-860, 2019.

LESYK, D. A.; MARTINEZ, S.; MORDYUK, B. N.; DZHEMELINSKYI, V. V.; LAMIKIZ, A.; PROKOPENKO, G. I. *Effects of laser heat treatment combined with ultrasonic impact treatment on the surface topography and hardness of carbon steel AISI 1045*. **Optics and Laser Technology**, v. 111, p. 424-438, 2019.

LOURENÇO, Rodrigo Francisco Borges et al. **Diferença de temperabilidade entre aço liga e aço carbono através do ensaio de Jominy**. GTS - Gestão, Tecnologia e Sustentabilidade, [S.l.], v. 1 n. 1, maio 2018.

MARQUES, Davi Alves et al. **Análise de temperabilidade e correlação de microestrutura dos aços ABNT 1045 e ABNT 4140**. 72º Congresso Anual da ABM, v. 1 n.1, 2017.

MEDEIROS, P. e CARVALHO, J. **Heat Treating of AISI 4340 Steel**. ASM Handbook, 2018.

MOTT, Robert L; **Machine Elements in Mechanical Design**. México: Pearson Educacion de México S.A, 2006.

MUKHERJEE, J.K. **Thermomechanical ausforming technique for producing substitute ultra-high strength steels**. Disponível em: <http://eprints.nmlindia.org/3137/1/156-161.PDF>. Acesso em 27 abr. 2024.

NEWELL, James. **Fundamentos da Moderna Engenharia e Ciência dos Materiais**. São Paulo: Grupo GEN, 2010.

NUNES, M. M.; DA SILVA, E. M.; RENZETTI, R. A.; BRITO, T. G. **Analysis of quenching parameters in AISI 4340 steel by using design of experiments**. *Materials research*, 2018.

NUNURA, C. R. N.; SANTOS, C. A.; SPIM, J. A. **Numerical - experimental correlation of microstructures, cooling rates and mechanical properties of AISI 1045 steel during the Jominy end-quench test**. *Materials and Desing*, v. 76, p. 230-243, 2015.

OLIVEIRA, R. C. L. M; BIEHL, L. V.; MEDEIROS, J. L. B.; FILHO, D. F.; DE SOUZA, J. **Análise comparativa entre têmpera e partição versus a têmpera e revenimento para o aço SAE 4340**. *Revista matéria*, v. 24, n. 03, 2019.

PEREIRA, A. S., SILVA, D. T. da; BOVÉRIO, M. A.; MALUF, O., VENTURA JUNIOR, A. C. M. **Ensaio de temperabilidade dos aços 8640, 4140 e 4340**. *SITEFA*, v. 3, n. 1, p. 79–95, 2020.

PINEDO, Carlos Eduardo. **Tratamentos Térmicos e Superficiais dos Aços**. São Paulo: Editora Blucher, 2021.

SILVA JUNIOR, R. P.; BIAZOTTO, G. C.; VATAVUK, J.; CALICCHIO, L. **Têmpera de aço SAE 1045 utilizando diferentes meios de resfriamento**. 71º CONGRESSO ANUAL DA ABM-INTERNACIONAL, 71; ENEMET-ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA METALÚRGICA, DE MATERIAIS E DE MINAS, 16. Rio de Janeiro, 2016.

SILVA, André Luiz V. da Costa E.; MEI, Paulo R. **Aços e ligas especiais**. São Paulo: Editora Blucher, 2021.

Silva, R. **Optimization of Heat Treatment of 4340 Steel**. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017.

SINGH, S.; SAMIR, S.; KUMAR, K. THAPA, S. *Effect of heat treatment processes on the mechanical properties of AISI 1045 steel. **Materias Today: Proceedings***, v. 45, p. 5097-5101, 2021.

SMITH, William F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Porto Alegre: Grupo A, 2012.

SOARES, Larissa Ribas de Lima. **Fresamento do aço SAE 4340 temperado e revenido utilizando ferramentas de metal duro recobertas**. 2017.

SOUZA, D. D. A.; SILVA, G. B. S. Análise da microestrutura e propriedades mecânicas do aço SAE 1045 termicamente tratado. **Exatas & Engenharias**, v. 8, n. 22, 2018.

STEIN, Ronei T. **Materiais de construção mecânica**. Grupo A, 2018.

TORRES, M. A. S.; VOORWAL, H. J. C. *An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel. **International Journal of Fatigue***, 2002.

VERHOEVER, John. D. **Steel Metallurgy for the Non-metallurgist**. United States: ASM International, 2007

WANG, X.; LI, B. *A carburizing-quenching Jominy curve hardness model. **Materials Letters***, v. 265, n. 127422, 2020.

WENISH, G. D.; PRINCE, M.; MANIRAJ, J. **Characterization of induction hardened and tempered AISI 1045 steel**. Revista matéria, v. 27, n. 04, 2022.

VIANA, Luiz Augusto Ferreira de Campos. **Influência de diversos ciclos de aquecimento subcrítico sobre a microestrutura e propriedades mecânicas básicas de um aço de alta resistência e baixa liga temperado e revenido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – REDEMAT, Ouro Preto, 2015.