



**Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Tecnologia e Geociências  
Departamento de Engenharia Mecânica**

**ALEFE GINYNTON DA SILVA SANTOS**

**ESTUDO E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS VERGALHÕES  
DESTINADOS AOS MERCADOS BRASILEIRO E PERUANO**

Recife - PE  
2025

ALEFE GINYNTON DA SILVA SANTOS

**ESTUDO E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS VERGALHÕES  
DESTINADOS AOS MERCADOS BRASILEIRO E PERUANO**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação  
em Engenharia Mecânica do Centro de  
Tecnologia e Geociências da Universidade  
Federal de Pernambuco como requisito para a  
obtenção do título de Engenheiro Mecânico.  
Orientador: Prof. Dr. Eng. Carlos Augusto do  
Nascimento Oliveira

RECIFE  
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Santos, Alefe ginynton da silva.

Estudo e análise do comportamento mecânico dos vergalhões destinados aos mercados brasileiro e peruano / Alefe ginynton da silva Santos. - Recife, 2025.  
64 : il., tab.

Orientador(a): Carlos Augusto do Nascimento Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2025.

1. Vergalhões de aço. 2. Têmpera Auto-Revenida. 3. Propriedades mecânicas. 4. Exigências sísmicas. 5. Mercado brasileiro e peruano. I. Oliveira, Carlos Augusto do Nascimento. (Orientação). II. Título.

670 CDD (22.ed.)

ALEFE GINYNTON DA SILVA SANTOS

**ESTUDO E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS VERGALHÕES  
DESTINADOS AOS MERCADOS BRASILEIRO E PERUANO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro Mecânico” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Mecânica.

Recife, 17 de dezembro de 2025.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Carlos Augusto do Nascimento Oliveira (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

---

Profº.Kleber Gonçalves Bezerra (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

---

Profº. José Carlos Albuquerque da silva (Examinador Externo)



## RESUMO

Este Trabalho tem como objetivo principal realizar uma análise comparativa entre as propriedades mecânicas de vergalhões de aço destinados aos mercados brasileiro (10mm, CA-50, ABNT NBR 7480:2020) e peruano (3/8 polegadas, NTP 341.031), com foco nas diferenças tecnológicas, processuais e normativas, sobretudo diante das elevadas demandas sísmicas do Peru. O estudo investiga a viabilidade de substituir o aço de exportação 1634A, que utiliza uma composição química de auto-liga (alto teor de Manganês e Vanádio) para conferir alta ductilidade e tenacidade sem tratamento térmico, pelo aço de baixo custo 1025A (base do CA-50). A metodologia envolve a caracterização e comparação do desempenho mecânico por meio de ensaios de microdureza Rockwell e testes de tração. Os resultados demonstram que, embora o aço 1025A atenda aos requisitos de resistência, a relação LR/LE média obtida (1,22) situou-se abaixo do mínimo normativo peruano (1,25), evidenciando que a substituição é tecnicamente sensível. Conclui-se que a viabilidade do uso do aço 1025A para exportação depende de um controle rigoroso na Têmpera Auto-Revenida para otimizar a ductilidade sem elevar excessivamente o limite de escoamento, sendo o aço microligado ainda a solução mais estável para exigências sísmicas.

Palavras-chave: Vergalhões de aço; Têmpera Auto-Revenida; Propriedades mecânicas; Exigências sísmicas; Mercado brasileiro e peruano.

## **ABSTRACT**

This work aims to perform a comparative analysis between the mechanical properties of steel reinforcing bars destined for the Brazilian (10mm, CA-50, ABNT NBR 7480:2020) and Peruvian (3/8 inch, NTP 341.031) markets, focusing on technological, procedural, and regulatory differences, especially regarding Peru's high seismic demands. The study investigates the feasibility of replacing export steel 1634A, which uses a self-alloying chemical composition (high Manganese and Vanadium content) to provide high ductility and toughness without heat treatment, with low-cost 1025A steel (CA-50 base). The methodology involves mechanical characterization through Rockwell microhardness and tensile tests. Results demonstrate that while 1025A steel meets strength requirements, the average TS/YS ratio obtained (1.22) was below the Peruvian regulatory minimum (1.25), showing that the replacement is technically sensitive. It is concluded that the feasibility of using 1025A steel for export depends on strict control of the Self-Tempering process to optimize ductility without excessively increasing the yield strength, while microalloyed steel remains the most stable solution for seismic requirements.

**Keywords:** Steel reinforcing bars; Self-tempering; Mechanical properties; Seismic requirements; Brazilian and Peruvian markets.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Fluxograma de produção do aço por Usina Integrada e Semi-Integrada

Figura 3.2 - Fluxograma do processo de Redução do minério de ferro

Figura 3.3 - Arranjo físico do processo de obtenção do ferro gusa via alto-forno

Figura 3.4 - Fluxograma de uma planta Midrex de redução direta

Figura 3.5 - Fluxograma esquemático da etapa do refino do aço

Figura 3.6 - Principais componentes de um conversor

Figura 3.7 - Principais componentes de um forno a arco elétrico

Figura 3.8 - Representação esquemática de um refino secundário

Figura 3.9 - Representação esquemática dos tipos de máquina de lingotamento contínuo

Figura 3.10 - Conformação exercida pelos cilindros da laminação para reduzirem a seção de um material

Figura 3.11 - Representação esquemática de um forno de reaquecimento de empurrar

Figura 3.12 - Diagramas de arrefecimento para vários tipos de tratamento térmico

Figura 3.13 - Ampliação de 500x de uma estrutura martensita de um aço temperado com 0,25%C

Figura 3.14 - Diagrama TTT de uma têmpera seguido de um revenido

Figura 3.15 - Variação aproximada de dureza e resistência ao impacto versus temperatura de revenido para aço 0,45% C.

Figura 3.16 - Curvas de variação de temperatura no vergalhão para diferentes raios durante o tratamento térmico superficial

Figura 3.17 - Perfil térmico de diferentes regiões de uma barra de aço submetida ao processo de têmpera e auto-revenimento

Figura 3.18 - Influência da temperatura de equalização na tensão de ruptura e na tensão escoamento

Figura 3.19 - Influência da temperatura de equalização no alongamento

Figura 3.20 - Tensão de Escoamento e Alongamento versus Tempo de Resfriamento

Figura 4.1 - Equipamentos empregados para realização do ensaio de tração: (A) Máquina de tração; (B) Escala métrica e Paquímetro digital; (C) Riscador Mecânico

Figura 4.2 - Equipamentos empregados nas análises das amostras: Microdurômetro

Figura 4.3 - Fluxograma da metodologia aplicada da retirada e análise das amostras.

Figura 5.1 - Gráfico do resultado do ensaio de dureza

Figura 5.2 - Resultado relação LR/LE de todas as amostras tomando como base a NTP 341.031

Figura 5.3 - Resultado do alongamento de todas as amostras tomando como base a NTP 341.031

Figura 5.4 - Resultado do limite de escoamento de todas as amostras tomando como base a NTP 341.031

Figura 5.5 - Resultado do limite de resistência de todas as amostras tomando como base a NTP 341.031

Figura 5.6 - Análise geral das propriedades mecânicas de todas as amostras tomando como base a NTP 341.031

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1 - Teores dos elementos químicos do Ferro Gusa

Tabela 3.2 - Teores dos elementos químicos da escória do Ferro Gusa

Tabela 3.3 - Principais tecnologias alternativas ao alto-forno para a produção do ferro primário

Tabela 3.4 - Especificações das propriedades mecânicas dos vergalhões

Tabela 5.1 - Tabela de Referência dos elementos químicos e seus máximos teores

Tabela 5.2 - Resultado da análise química realizada do vergalhão 10mm CA50

Tabela 5.3 - Resultado da análise química realizada do vergalhão 3/8 SIDERPERU

Tabela 5.4 - Resultado do ensaio de dureza

Tabela 5.5 - Ensaio de Tração - Conforme Norma NBR- 7480

Tabela 5.6 - Ensaio de Tração ASTM A615-Grado 60

Tabela 5.7 - Resultado das propriedades mecânicas das amostras 10mm CA50

Tabela 5.8 - Resultado das propriedades mecânicas das amostras 3/8 SIDERPERU.

Tabela 5.9 - Resultado das propriedades mecânicas das amostras CA50 para o mercado peruano

### **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CA – Concreto Armado

DEMEC (UFPE) – Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco

IISI - International Iron and Steel Institute

NBR – Norma Brasileira

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>8</b>
1.1 OBJETIVOS	9
<b>2 JUSTIFICATIVA</b>	<b>10</b>
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>11</b>
3.1 O PROCESSO SIDERÚRGICO	11
3.1.1 Redução do Minério De Ferro	12
3.1.2 Refino do Aço	18
3.1.3 Lingotamento Contínuo	23
3.2 PROCESSO DE LAMINAÇÃO	24
3.3 TRATAMENTO TÉRMICO	26
3.3.1 Têmpera	28
3.3.2 Revenimento	31
3.4 TRATAMENTO TÉRMICO NO VERGALHÃO	33
3.4.1 Transformações Metalúrgicas	35
3.4.2 Influência Do Tratamento Térmico E Propriedades Mecânicas	37
3.5 ESPECIFICAÇÃO DO VERGALHÃO	40
<b>4 METODOLOGIA</b>	<b>43</b>
4.1 MATERIAL	43
4.2 MÉTODOS	45
4.2.1 Composição Química	46
4.2.2 Ensaio De Dureza	46
4.2.3 Ensaio De Tração	47
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>48</b>
5.1 ANÁLISE QUÍMICA	48
5.2 MICRODUREZA	49
5.3 ENSAIO DE TRAÇÃO	52
<b>6 CONCLUSÃO</b>	<b>59</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As barras de aço destinadas ao concreto armado, comumente denominadas vergalhões, são elementos estruturais fundamentais em construções de engenharia civil. Esses materiais têm como função principal resistir aos esforços de tração, atuando em conjunto com o concreto, que, por sua vez, é eficiente na absorção de esforços de compressão. Essa sinergia resulta em sistemas estruturais robustos, largamente utilizados em edificações, pontes, barragens e outras obras de infraestrutura pesada. A qualidade dos vergalhões é determinada por um conjunto de propriedades mecânicas e estruturais, tais como ductilidade, resistência à tração, limite de escoamento, alongamento e capacidade de dobramento. Além disso, é crucial que os vergalhões estejam livres de defeitos internos e de superfície, pois tais imperfeições podem comprometer o desempenho e a segurança do material. As normas técnicas vigentes estabelecem critérios rigorosos para assegurar tais características (ABNT, 2020).

A produção de vergalhões é predominantemente realizada pelo processo de laminação a quente, no qual o aço é aquecido acima do ponto de recristalização (com temperaturas típicas entre 1000 °C e 1200 °C), e subsequentemente conformado por cilindros que reduzem a sua seção e aumentam o comprimento. Posteriormente, o material pode ser submetido a tratamentos térmicos controlados — por exemplo, resfriamento contínuo, têmpera e/ou revenido — cuja finalidade é ajustar a microestrutura (ferrita+perlita) para alcançar o equilíbrio ideal entre resistência e ductilidade (RIZZO, 2007).

Este trabalho tem por objetivo realizar uma análise comparativa entre vergalhões de aço com diâmetros de 10mm, produzidos para o mercado interno brasileiro, classificados na categoria CA-50 conforme a norma ABNT NBR 7480:2020, e o 3/8 destinados à exportação para o mercado peruano, em conformidade com os requisitos da norma NTP 341.031. A investigação enfoca a caracterização mecânica dos vergalhões, destacando as diferenças tecnológicas, processuais e normativas entre os dois mercados, especialmente considerando as elevadas demandas sísmicas específicas do território peruano.

A motivação do estudo fundamenta-se na necessidade de atender às condições sísmicas impostas pelas normas peruanas, que exigem estruturas com elevada capacidade de deformação plástica e tenacidade. Em virtude dessas exigências, os vergalhões de exportação 1634A não são submetidos a tratamentos térmicos convencionais, como têmpera e revenimento, com o intuito de evitar a fragilização do material que comprometeria a ductilidade necessária. Para compensar a ausência desse tratamento, o aço de exportação é produzido com uma composição química de auto-liga (notadamente com alto teor de Manganês e Vanádio), que confere naturalmente a resistência e tenacidade requeridas.

A inclusão desses elementos de liga, que são os principais responsáveis por conferir a temperabilidade superior, eleva significativamente o custo de produção em comparação com o aço 1025A de baixo custo, base do CA-50.

O presente estudo se aprofunda nesse conflito econômico e técnico ao investigar a viabilidade da substituição. O foco central da pesquisa reside em avaliar se a otimização do processo de Têmpera Auto-Revenida (um tratamento térmico que visa aumentar a Resistência e a Dureza do material de baixo custo 1025A a partir de uma camada martensítica superficial) consegue suprir a lacuna de temperabilidade e replicar as propriedades de elevada ductilidade e tenacidade do 1634A.

A metodologia envolve ensaios de microdureza Rockwell e testes de tração, com o objetivo de caracterizar e comparar o desempenho mecânico dos vergalhões. A pesquisa busca compreender como as diferenças nas normas técnicas e nos processos de fabricação influenciam as propriedades finais do material.

## **1.1 OBJETIVOS**

Analisar comparativamente as propriedades mecânicas de vergalhões de aço de 10 mm (Brasil) e 3/8" (Peru), avaliando a viabilidade de substituição do aço de exportação 1634A (alto teor de ligas) pelo aço de custo reduzido 1025A (base do CA-50), considerando as rotas de fabricação, requisitos normativos e a aplicação sísmica no Peru.

- A. Avaliar o perfil de dureza dos materiais (Dureza Rockwell C) a partir do ensaio de microdureza;
- B. Determinar as propriedades mecânicas (limite de escoamento, resistência à tração e alongamento) a partir de ensaio de tração;
- C. Analisar o impacto das exigências normativas;
- D. Correlacionar composição química, processo produtivo e comportamento mecânico;
- E. Contribuir com subsídios técnicos para melhoria dos processos de produção e adequação de vergalhões a diferentes mercados e exigências estruturais;



## 2 JUSTIFICATIVA

A ocorrência de eventos sísmicos em diversas regiões do mundo, especialmente na zona geográfica do Peru, impõe desafios significativos para a engenharia estrutural, demandando materiais com características específicas que garantam segurança e durabilidade das construções. Nesse contexto, a adequação dos vergalhões empregados em estruturas de concreto armado torna-se fundamental para a capacidade das edificações suportarem esforços dinâmicos decorrentes de tremores.

Enquanto o mercado brasileiro segue normas para o CA-50 com rotas que se baseiam no Tratamento Termomecânico (Têmpera Auto-Revenida) para obter as propriedades mecânicas, o mercado peruano, devido às elevadas exigências sísmicas, adota estratégias distintas: a otimização da composição química, com alto teor de ligas como o Manganês e Vanádio, dispensando o tratamento térmico. Esta diferença reside em um conflito fundamental entre custo e metalurgia: o 1634A (Exportação) utiliza ligas caras que conferem naturalmente alta temperabilidade e ductilidade, enquanto o 1025A (CA-50) busca obter a resistência de forma mais econômica através do processo de Têmpera Auto-Revenida.

Assim, o presente estudo justifica-se pela necessidade de compreender e quantificar as limitações técnicas e econômicas dessa abordagem. Especificamente, busca-se avaliar até que ponto a Têmpera Auto-Revenida—um método de baixo custo para aumentar a resistência em aços de baixa liga—pode ser forçada para replicar as propriedades de alta resistência (LR) e alta tenacidade (LR/LE e %A) exigidas pelas normas de exportação. A análise comparativa das influências dessas diferentes abordagens produtivas e normativas é crucial para promover melhorias no controle de qualidade e no desempenho dos vergalhões, maximizando a competitividade sem comprometer a segurança.

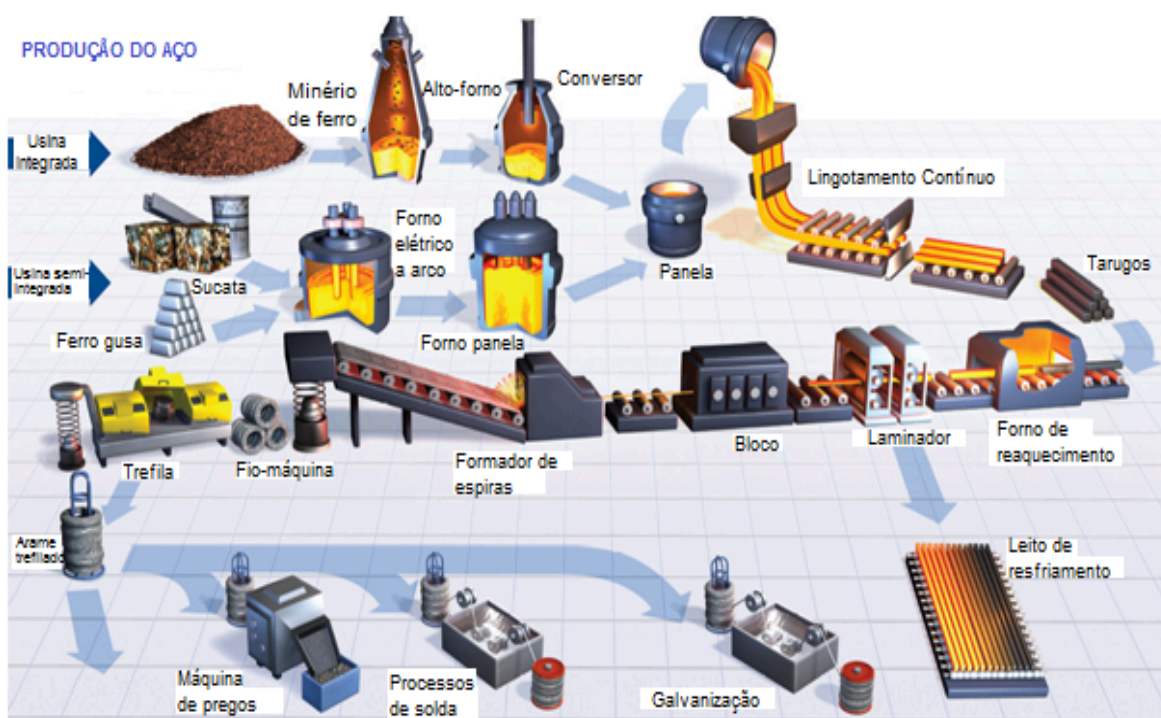
### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, será apresentada a Fundamentação Teórica que sustentará o desenvolvimento deste trabalho. Serão explorados conceitos e teorias relevantes relacionados ao tema da pesquisa, estabelecendo a base de conhecimento necessária para a análise e discussão dos resultados.

#### 3.1 O PROCESSO SIDERÚRGICO

As usinas siderúrgicas modernas se dividem, em geral, em integradas e semi-integradas, sendo a principal diferença a origem da matéria-prima e as etapas do processo de produção. As usinas integradas utilizam ferro primário, proveniente do minério de ferro, que é reduzido em altos-fornos, gerando ferro-gusa. Este, por sua vez, é convertido em aço líquido na aciaria e depois conformado em produtos siderúrgicos, em um ciclo completo realizado dentro da própria usina. Já as usinas semi-integradas produzem aço a partir de ferro secundário, principalmente sucata metálica, eliminando a etapa de redução do minério. O material é fundido em fornos a arco elétrico (FAE), sendo esse modelo mais sustentável, pois valoriza a reciclagem e reduz o uso de recursos naturais. A Figura 3.1 apresenta um fluxograma comparativo entre os dois modelos, destacando suas diferenças operacionais (MACHADO, 2003).

Figura 3.1– Fluxograma de produção do aço por Usina Integrada e Semi-Integrada



Fonte:Gomes(2016).

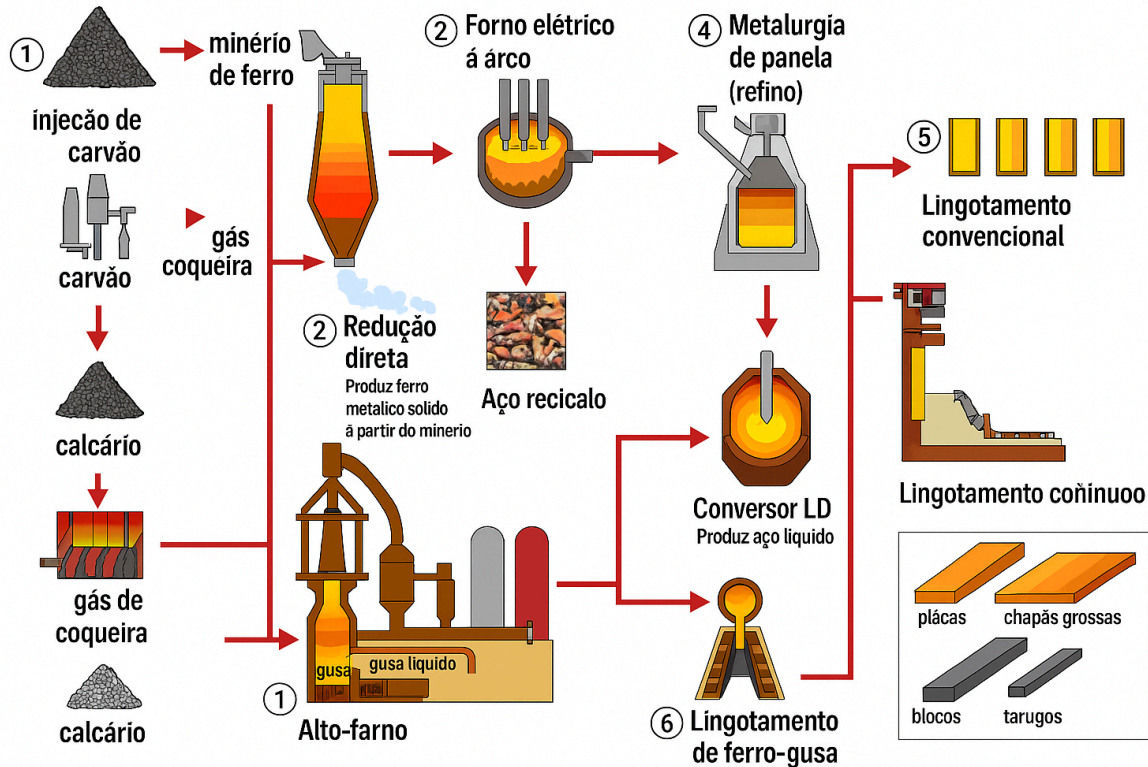
As usinas siderúrgicas integradas realizam três etapas principais: redução, refino e conformação mecânica. Na redução, o minério de ferro é transformado em ferro metálico por meio do alto-forno (ferro-gusa líquido) ou da redução direta (ferro-esponja sólido). O refino se divide em primário, que converte o ferro-gusa em aço líquido, e secundário, onde se ajustam a composição e propriedades do aço. Por fim, ocorre a conformação mecânica, como a laminação. Já nas usinas semi-integradas, que utilizam sucata metálica como matéria-prima, o processo é simplificado: fusão em fornos elétricos, refino e conformação, sendo uma alternativa mais sustentável e eficiente energeticamente (MOURÃO, 2013).

### **3.1.1 Redução do Minério De Ferro**

A redução do minério de ferro constitui uma das etapas fundamentais no processo siderúrgico, sendo responsável por converter o óxido de ferro em ferro metálico, matéria-prima essencial para a fabricação do aço. Essa transformação ocorre por meio de agentes redutores, como o coque ou o carvão vegetal, que removem o oxigênio ligado ao ferro, resultando na produção de ferro-gusa, um material com elevado teor de carbono e estado líquido, também conhecido como ferro de primeira fusão ( RIZZO, 2005).

O processo demanda elevadas temperaturas e grande aporte energético, sendo normalmente realizado em altos-fornos com a adição de fundentes para facilitar a formação de escória e a remoção de impurezas como silício, fósforo, enxofre e manganês. A etapa de redução é precedida por operações de mineração e preparação dos minérios, que incluem a extração, britagem, moagem, classificação e aglomeração dos materiais necessários, como o minério de ferro e o calcário. Com a evolução tecnológica, surgiram ainda alternativas como a redução direta, que emprega gás natural como agente redutor para transformar o minério em ferro esponja (DRI), possibilitando a produção de aços mais nobres com menor teor de impurezas. A escolha do processo de redução impacta diretamente na qualidade do aço produzido e na eficiência energética da planta siderúrgica. A figura 3.2 ilustra as etapas do processo de redução do minério de ferro (RIZZO, 2005).

Figura 3.2 - Fluxograma do processo de Redução do minério de ferro



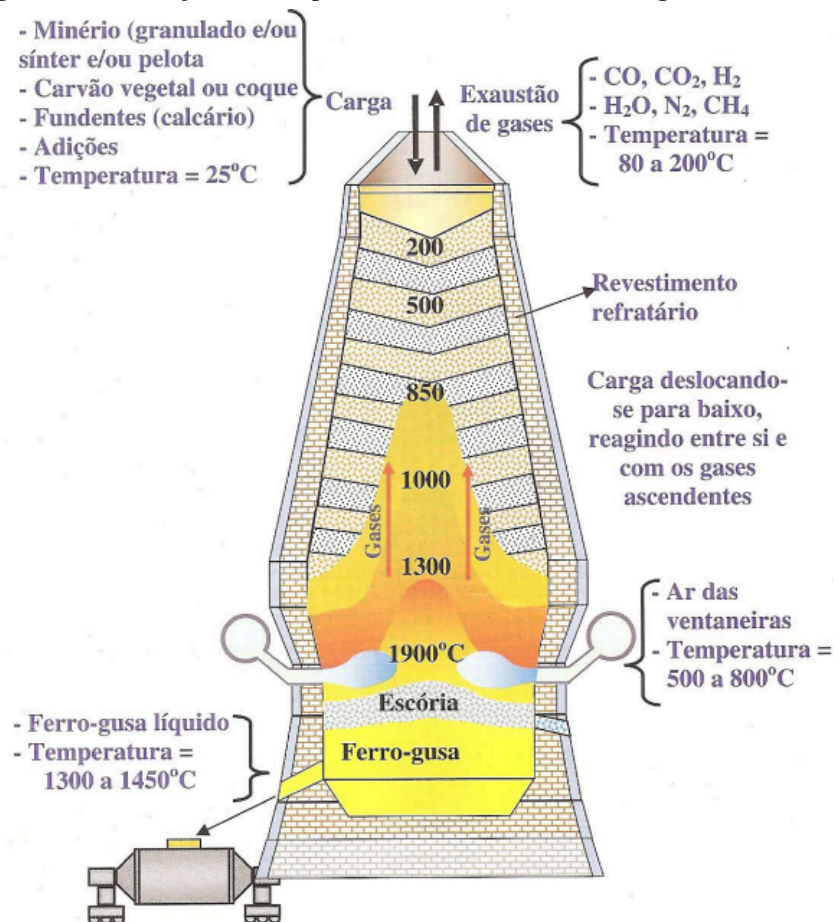
Fonte: (Adaptado de ALTO-FORNO, 2025)

### 3.1.1.1 Processo de Redução Em Alto-Forno

A etapa de redução do minério de ferro em alto-forno é o principal método para a obtenção do ferro-gusa, matéria-prima essencial na produção de aço. Nesse processo, os óxidos de ferro, como a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), são reduzidos a ferro metálico por meio de gases redutores, principalmente monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) e hidrogênio ( $\text{H}_2$ ). As reações ocorrem em contracorrente: os gases sobem no forno, enquanto os sólidos descem, atravessando zonas térmicas sucessivas, com temperaturas que variam de cerca de  $200^\circ\text{C}$  na zona de secagem até mais de  $1.500^\circ\text{C}$  na zona de fusão. Durante esse percurso, o minério se aquece, é reduzido e, ao final, fundido, separando-se em ferro-gusa líquido e escória. O ferro fundido se acumula na parte inferior do forno, sendo periodicamente drenado, enquanto a escória, formada pela reação das impurezas com os fundentes, é retirada por uma abertura lateral ( RIZZO, 2005).

Para realizar esse processo, o alto-forno é carregado continuamente pelo topo com camadas alternadas de minério de ferro (na forma de sinter, pelotas e granulado), fundentes (como calcário e dolomita) e um combustível redutor, como coque ou carvão vegetal. Simultaneamente, ar quente comprimido, frequentemente enriquecido com oxigênio e carvão pulverizado, é insuflado na base do forno por ventaneiras. A queima do coque gera os gases redutores que reagem com os minérios ao longo de sua descida. A eficiência do processo depende de fatores como a granulometria adequada da carga sólida, a sua resistência mecânica e a permeabilidade do leito, que permitem o bom escoamento dos gases. O tipo de combustível também influencia o comportamento térmico do forno: o coque proporciona maior estabilidade operacional, enquanto o carvão vegetal, embora mais sustentável, exige maior controle devido à sua variabilidade físico-química. A Figura 3.3 ilustra o arranjo físico do processo de produção de aço por meio da rota alto-forno ( RIZZO, 2005).

Figura 3.3 - Arranjo físico do processo de obtenção do ferro gusa via alto-forno



Fonte: ( RIZZO, 2005)



O principal produto gerado no alto-forno é o ferro-gusa, cuja faixa de composição está representada no Tabela 3.1. Trata-se de uma liga metálica com alto teor de carbono, que também contém quantidades variáveis de elementos como silício, manganês, fósforo e enxofre. Essas variações decorrem da composição das matérias-primas utilizadas (minério de ferro, carvão vegetal ou coque, e fundentes), bem como das condições operacionais do processo. Obtido em estado líquido, a temperaturas que podem variar entre 1300 °C e 1450 °C, o ferro-gusa é drenado na base do forno e geralmente direcionado às aciarias, onde passará por processos de refino para a produção de aço. Nessas etapas subsequentes, as impurezas indesejadas são removidas e a composição química é ajustada conforme as exigências do produto final. Alternativamente, o ferro-gusa também pode ser solidificado em lingotes, para fins de comercialização e posterior utilização industrial (SILVA,1988).

**Tabela 3.1 - Teores dos elementos químicos do Ferro Gusa**

Elemento Químico	Composição
Carbono	3,5 a 4,5%
Silício	0,3 a 2,0%
Enxofre	0,01 a 0,1%
Fósforo	0,05 a 2%
Manganês	0,5 a 2%

Fonte: (SILVA,1988).

Segundo Mourão (2013), a escória é um subproduto líquido oxidado, composto pelos minerais de ganga do minério de ferro, que se forma tanto no alto-forno quanto na aciaria (conversores a oxigênio e fornos elétricos a arco). Sua formação permite a eliminação de impurezas presentes nas matérias-primas siderúrgicas. A composição da escória é cuidadosamente controlada no refino secundário para otimizar a purificação do aço. A formação da escória no processo de fusão é resultado da oxidação do aço e seus elementos de liga, oxidação é causada pelo contato com oxigênio injetado ou presente no ar, sua composição é formada por:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$  e S.

No processo siderúrgico, a escória atua como um agente purificador, cuja finalidade é absorver compostos e elementos químicos prejudiciais à qualidade do aço. A permanência desses elementos em teores elevados na composição final do tarugo compromete sua microestrutura e, conseqüentemente, causa a degradação de suas propriedades mecânicas (CHIAVERINI, 2005). As faixas de composição características da escória são detalhadas no Tabela 3.2.

Tabela 3. 2 - Teores dos elementos químicos da escória do Ferro Gusa

Elemento Químico	Composição
Dióxido de Silício - $\text{SiO}_2$	29 a 38%
Óxido de Alumínio - $\text{Al}_2\text{O}_3$	10 a 22%
$\text{CaO} + \text{MgO}$	44 a 48%
$\text{FeO} + \text{MnO}$	1 a 3%
Cas	3 a 4%.

Fonte: (CHIAVERINI, 2005).

### 3.1.1.2 Processo de redução Direta

Segundo Colpaert (2008), o produto da redução direta é uma massa porosa chamada ferro-esponja, que possui formato similar ao da matéria-prima. Os processos de redução direta têm sido aprimorados pela carbonatação do ferro produzido, resultando na formação de uma fração de carbeto de ferro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Este composto é vantajoso por possuir um ponto de fusão inferior ao do ferro metálico, o que agrega carbono à carga e melhora o desempenho do ferro-esponja nos fornos elétricos. No entanto, deve-se ressaltar que, como o produto é sólido, uma parte significativa das impurezas do minério é geralmente retida no material final.

A qualidade e a aplicação do ferro-esponja são determinadas por um conjunto de características intrínsecas ao seu processo de produção. As mais importantes são: o grau de metalização, que quantifica a eficiência da redução do minério em ferro metálico; o teor de carbono, que é absorvido durante o processo e controlado em níveis geralmente baixos; e, crucialmente, a quantidade e composição da ganga. Como a redução direta ocorre em estado sólido e sem fusão, os óxidos e impurezas do minério são transferidos diretamente para o produto final, constituindo essa ganga. São precisamente essas propriedades que consolidam o ferro-esponja como

uma carga metálica de excelência para fornos elétricos a arco (FEA), superando em muitos aspectos a sucata convencional. Suas vantagens incluem uma composição química uniforme e previamente conhecida, teores muito baixos de elementos residuais contaminantes e uma notável facilidade de manuseio, estocagem e alimentação contínua dos fornos, fatores que garantem maior controle sobre o processo de aciaria e a produção de aços de maior pureza (SILVA, 1988).

**Tabela 3. 3 - Principais tecnologias alternativas ao alto-forno para a produção do ferro primário**

Fonte de Ferro	Redutor	Processos	Produto	Notas
Pelotas/Minério de Ferro Graúdo	Carvão	SL/RN#, DRC, ACCAR, FASTMET, MAUMEE, IDI, INMETCO, REDSMELT	Ferro-esponja	# Aplicados comercialmente em larga escala até 2002.
Aglomerado Auto-Redutor	Carvão	-	Ferro-esponja	-
Finos	Carvão	CIRCOFER, PRIMUS	Ferro-esponja	-
Pelotas/Minério de Ferro Graúdo	Gás Natural	HYL *, MIDREX#, AREX, DANAREX	Ferro-esponja	* Inclui processos com estágio de carbonetação (IC(Fe <sub>3</sub> C)).
Aglomerado Auto-Redutor	Gás Natural	-	Ferro-esponja	-
Finos	Gás Natural	CIRCORED, FIOR#, IC(Fe <sub>3</sub> C), FINMET	Ferro-esponja	# Aplicados comercialmente em larga escala até 2002.
Pelotas/Minério de Ferro Graúdo	Carvão	AISI, COREX#	Metal Líquido	# Aplicados comercialmente em larga escala até 2002.
Aglomerado Auto-Redutor	Carvão	TECNORED, OXICUP, ITMK3 (sólido), HISMELT, DIOS, ROLMET, AUSRION, FINEX	Metal Líquido	-
Finos	Carvão	-	Metal Líquido	-

Fonte: (RIZZO, 2005)

O processo MIDREX é o método de redução direta de minério de ferro mais utilizado globalmente, responsável por mais de 65% da produção de ferro-esponja (DRI), que serve como substituto para gusa sólido ou sucata na fabricação de aços, sem que haja fusão da carga metálica. Neste processo, minério ou pelotas são alimentados em um forno de cuba com zonas de pré aquecimento, redução e resfriamento. Um gás redutor (95% H<sub>2</sub> e CO), aquecido entre 760°C e 930°C, é injetado na parte inferior da zona de redução, subindo em contracorrente e removendo o oxigênio do minério através de reações de redução. O gás exaurido é então reciclado após ser misturado com gás natural e reformado em CO e H<sub>2</sub> em uma unidade de reformador com catalisador, e o excesso de gás de goela é queimado para aquecer o reformador e pré-aquecer outros gases, otimizando o consumo de energia. O produto final é ferro-esponja com 92% de metalização, e as vantagens do MIDREX sobre o alto-forno incluem menor número de operações unitárias, menor investimento, flexibilidade operacional, sistema de gases mais simples, menos rejeitos sólidos, maior flexibilidade no uso de sucata e menor tempo de implantação, embora sua dependência de gás natural limite sua aplicação a regiões com oferta abundante (BRASIL, 2025).





O refino do aço é uma etapa crucial na siderurgia moderna, cujo objetivo abrange tanto aspectos químicos quanto físicos para garantir que o produto final atenda a rigorosas especificações de desempenho. Do ponto de vista químico, o processo visa à purificação do metal através da eliminação de impurezas herdadas do ferro-gusa, como o excesso de carbono (C), silício (Si), fósforo (P) e enxofre (S). Além disso, busca-se a remoção de gases dissolvidos prejudiciais, como hidrogênio ( $H_2$ ), nitrogênio ( $N_2$ ) e oxigênio ( $O_2$ ), e a eliminação de inclusões não-metálicas que poderiam comprometer as propriedades do material. Em seu sentido físico, o refino foca na otimização da microestrutura do aço, promovendo a homogeneização para eliminar segregações de elementos de liga e, em muitos casos, aplicando técnicas para se obter um refino de grão, o que impacta diretamente as propriedades mecânicas do aço, como resistência e tenacidade (A RIZZO, 2005).

O princípio fundamental por trás do refino químico baseia-se em reações de oxidação seletiva. As impurezas a serem removidas do banho metálico são oxidadas em uma sequência determinada pela afinidade termodinâmica de cada elemento pelo oxigênio. Para que este processo seja eficaz, é necessária a adição de ingredientes fundentes (como a cal) que, ao reagirem com os óxidos formados, criam uma fase líquida imiscível ao aço, conhecida como escória. Esta escória atua como um meio receptor para as impurezas oxidadas, fixando-as e permitindo sua fácil separação e remoção do metal líquido, garantindo assim a purificação desejada do aço ( RIZZO, 2005).

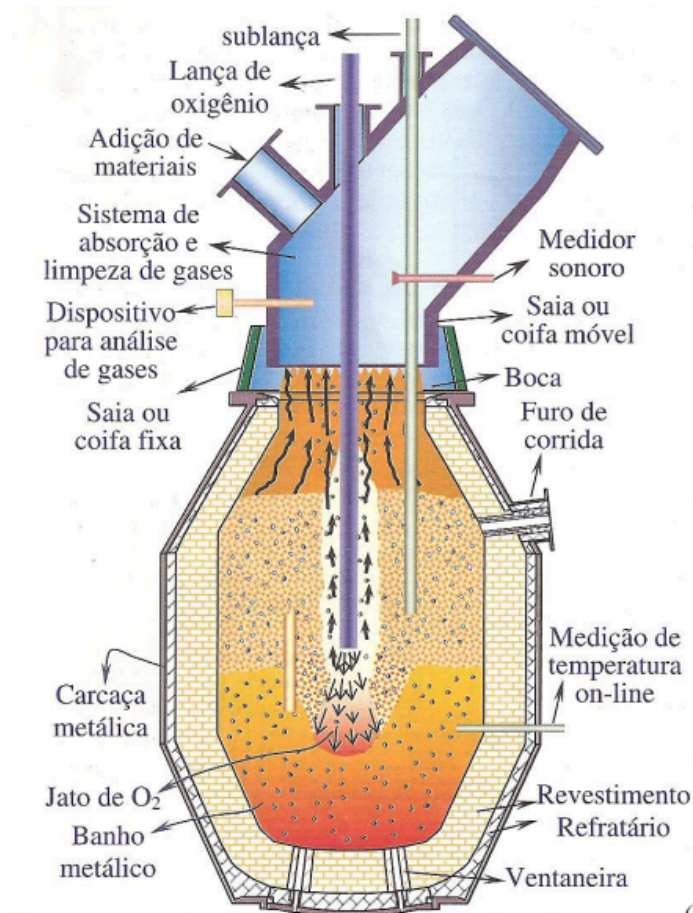
### **3.1.2.1 Refino Primário**

O refino primário constitui a fase inicial e de grande volume na transformação do ferro-gusa em aço, tendo como objetivos principais a drástica redução do teor de carbono (descarbonetação) e a remoção de impurezas como silício, manganês e fósforo. Este processo é conduzido predominantemente por duas tecnologias distintas, que se diferenciam pela matéria-prima utilizada: os convertedores a oxigênio, como o LD (Linz-Donawitz), e os fornos elétricos a arco (FEA). No convertedor LD, que opera com ferro-gusa em estado líquido, oxigênio puro é injetado em alta pressão para promover a oxidação das impurezas, que são então incorporadas pela escória. Em contrapartida, os fornos elétricos a arco são projetados para processar cargas metálicas predominantemente sólidas, como sucata de aço e/ou ferro-gusa sólido ( RIZZO, 2005).

Durante o processo LD, a formação e evolução da escória são aspectos cruciais. A escória é um subproduto oxidado líquido que atua na remoção das impurezas e na proteção do metal. O ajuste da composição e da basicidade da escória é fundamental para otimizar a remoção de elementos indesejáveis. Além disso, antes mesmo do gusa entrar no conversor LD, pré-tratamentos específicos como a dessiliciação, desfosforação e dessulfuração podem ser realizados. Esses pré-tratamentos visam reduzir a carga de impurezas no gusa, facilitando o subsequente refino no conversor e contribuindo para a obtenção de aços com maior

nível de qualidade (MOURÃO, 2013). A Figura 3.6 mostra os principais componentes de um conversor.

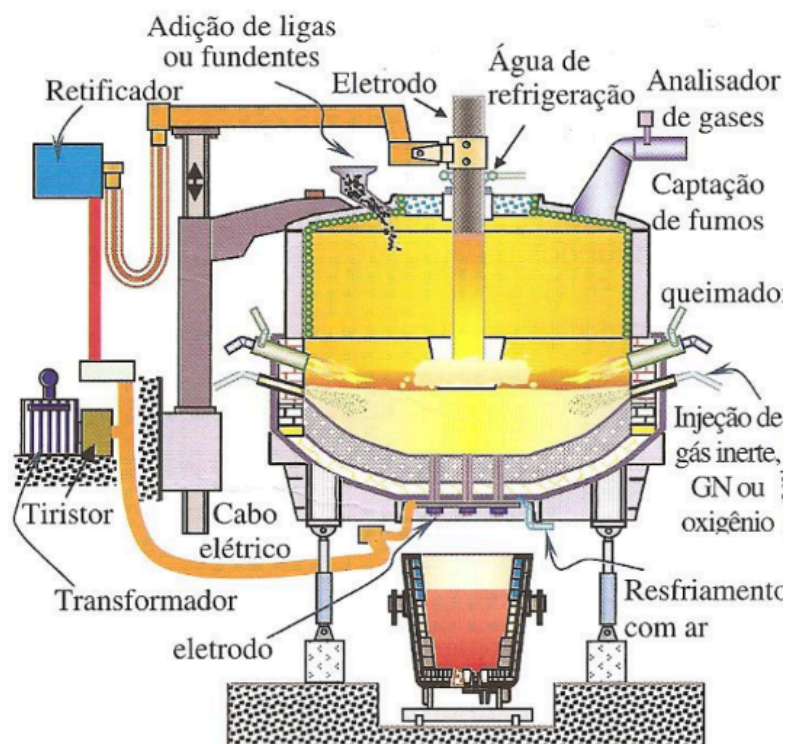
**Figura 3.6 - Principais componentes de um conversor**



Fonte: ( RIZZO, 2005).

Os fornos elétricos a arco (FEA), esquematizado na Figura 3.7, desempenham um papel crucial na siderurgia moderna, especialmente na rota de reciclagem. O processo no FEA ocorre em duas etapas distintas. Primeiramente, a fusão, onde a carga metálica é liquefeita por meio de arcos elétricos de alta potência gerados entre eletrodos de grafite e o próprio metal. Após a fusão completa, inicia-se a etapa de refino, na qual oxigênio é injetado no banho metálico para promover a oxidação seletiva das impurezas. Esses óxidos formados reagem com fundentes adicionados, como a cal, para constituir a escória, que sobrenada o aço e permite a remoção dos elementos indesejáveis. A principal vantagem do FEA reside em sua notável flexibilidade quanto à matéria-prima, viabilizando a reciclagem de grandes volumes de sucata e conferindo-lhe um papel central na economia circular do aço, em contraste com a dependência do ferro-gusa líquido que caracteriza os convertedores LD ( RIZZO, 2005).

**Figura 3.7 - Principais componentes de um forno a arco elétrico**



Fonte: ( RIZZO, 2005).

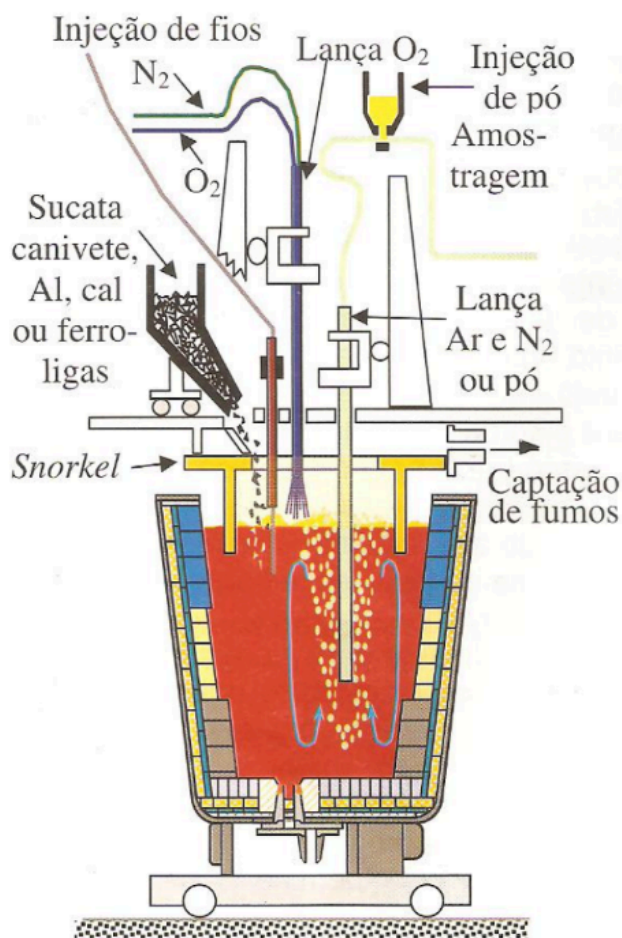
O objetivo primordial do refino primário é alcançar uma composição básica do aço, com teores controlados de carbono e remoção de elementos prejudiciais, preparando o metal líquido para as etapas subsequentes. A eficiência da remoção de impurezas e o controle preciso da temperatura são cruciais para a qualidade final do aço. A seleção da tecnologia de refino primário impacta diretamente os custos de produção, a flexibilidade da operação e o perfil dos produtos que podem ser fabricados, delineando as características iniciais do aço bruto antes de qualquer refinamento posterior. Refino Secundário do Aço ( RIZZO, 2005).

### 3.1.2.2 Refino Secundário

O refino secundário, também conhecido como metalurgia de panela, esquematizado na Figura 3.8 é uma etapa posterior ao refino primário, realizada na aciaria com o objetivo de aprimorar a qualidade do aço líquido. Diferente do processo primário focado na conversão do gusa, o refino secundário concentra-se em operações de ajuste fino da composição química, homogeneização da temperatura, e principalmente, na remoção de impurezas residuais e no controle da morfologia das inclusões não metálicas. As tecnologias de metalurgia de panela buscam conseguir o aço com alto nível de limpeza (MOURÃO, 2013).



Figura 3.8 - Representação esquemática de um refino secundário



Fonte: ( RIZZO, 2005)

Entre as principais operações de refino secundário, destacam-se a desgaseificação a vácuo, que remove gases dissolvidos como hidrogênio e nitrogênio, prevenindo defeitos indesejáveis no produto final. A dessulfuração, por exemplo, é crucial para a remoção do enxofre, um elemento que, mesmo em pequenas quantidades, pode comprometer a tenacidade e a ductilidade do aço, como historicamente observado no caso do navio Titanic. Adicionalmente, o refino secundário permite a adição precisa de ferroligas para ajustar a composição química, conferindo ao aço propriedades específicas, como maior resistência mecânica, resistência à corrosão ou outras características desejadas (RIZZO, 2005).

A metalurgia de panela, ou refino secundário, representa a fronteira final da engenharia do aço em estado líquido, sendo a etapa indispensável que eleva o metal de uma commodity para um material de alta performance. É nesta fase que o controle de precisão se torna máximo, permitindo não apenas o ajuste fino dos elementos de liga, mas também a drástica minimização de impurezas e inclusões não-metálicas, garantindo um aço de pureza e homogeneidade excepcionais. Essa capacidade de customização é vital, pois resulta em propriedades mecânicas aprimoradas, como maior durabilidade, tenacidade e conformabilidade, que seriam

impossíveis de alcançar apenas no refino primário. Consequentemente, a flexibilidade e o controle proporcionados por esta etapa são essenciais para atender às rigorosas demandas de aplicações de ponta, viabilizando a fabricação de componentes mais leves e eficientes — desde carrocerias automotivas seguras até tubulações de alta resistência para o setor de óleo e gás. Assim, o refino secundário não é apenas um processo de purificação, mas um pilar estratégico que agrega valor, reduz defeitos e impulsiona a inovação na cadeia siderúrgica moderna (RIZZO, 2005).

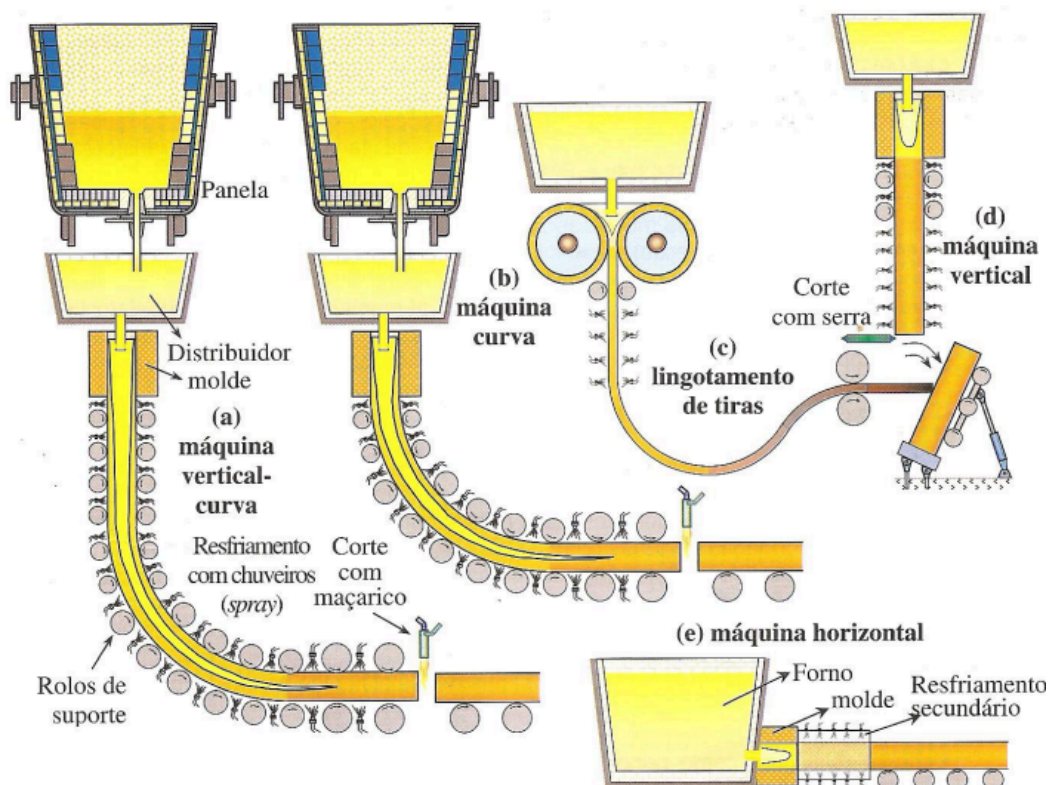
### **3.1.3 Lingotamento Contínuo**

O lingotamento contínuo (LC) representa uma das maiores revoluções tecnológicas da siderurgia, substituindo o método tradicional de solidificação em lingoteiras. Historicamente, o aço era vazado em grandes moldes para formar lingotes que exigiam um reaquecimento oneroso e uma etapa de laminação de desbaste. Em contraste, o processo de LC consiste no vazamento do aço líquido, previamente refinado, de uma panela para um distribuidor (tundish), que por sua vez alimenta um molde de cobre oscilatório e intensamente refrigerado, chamado de coquilha. É nesta coquilha que uma casca sólida inicial se forma, permitindo que o veio semi-sólido (placa, tarugo ou bloco) seja continuamente extraído para baixo. O núcleo líquido prossegue em sua solidificação ao passar por uma zona de resfriamento secundário, até que o produto seja completamente solidificado, desempenado e cortado em comprimentos pré-determinados, pronto para a laminação subsequente (MOURÃO, 2013).

A adoção massiva do lingotamento contínuo, que no início dos anos 2000 já respondia por mais de 90% da produção de aço no Brasil, é justificada por um conjunto de vantagens operacionais e de qualidade que o tornam um pilar da competitividade moderna. Primeiramente, ao eliminar a necessidade de reaquecimento e laminação de desbaste, o processo gera substanciais economias de energia e um significativo aumento no rendimento metálico. Em segundo lugar, o controle rigoroso da solidificação resulta em semi-acabados com maior homogeneidade interna, menor incidência de defeitos e qualidade superficial superior, impactando diretamente o produto final. Ademais, a evolução tecnológica do LC continua com inovações como o lingotamento de placas e tiras finas (thin-slab e strip-casting), que visam aproximar ainda mais o produto solidificado das dimensões finais, prometendo maior eficiência energética e produtiva. Dessa forma, o lingotamento contínuo se consolida não apenas como um processo, mas como um elemento estratégico essencial para a produção em massa de aços de alta qualidade de forma eficiente e sustentável (RIZZO, 2005).

A Figura 3.9 Representação esquemática dos tipos de máquina de lingotamento contínuo.

Figura 3.9 - Representação esquemática dos tipos de máquina de lingotamento contínuo

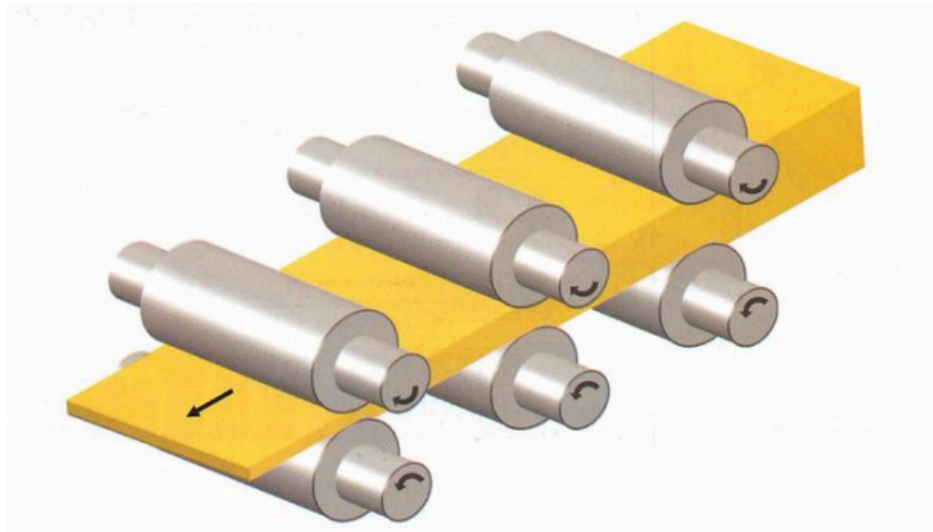


Fonte: ( RIZZO, 2005)

### 3.2 PROCESSO DE LAMINAÇÃO

A laminação é o processo de conformação mecânica mais crucial da indústria metalúrgica, representando mais de 90% da produção de ligas metálicas como aços e alumínio. Este processo consiste na passagem do material entre cilindros que giram em sentidos opostos para reduzir sua espessura e aumentar seu comprimento, como mostra a Figura 3.10. A variável fundamental que rege o processo é a temperatura de trabalho, que o divide em distintas modalidades: a laminação a quente, realizada em temperaturas elevadas para permitir grandes deformações e desbaste; e a laminação a frio, executada em temperaturas mais baixas para promover o endurecimento do material por encruamento, garantir um acabamento superficial de qualidade e obter tolerâncias dimensionais mais estreitas. Independentemente da modalidade, a laminação oferece vantagens como alta produtividade, controle dimensional e melhoria das propriedades mecânicas, sendo, apesar do alto custo de instalação, a rota mais economicamente viável para a produção em massa ( RIZZO, 2005).

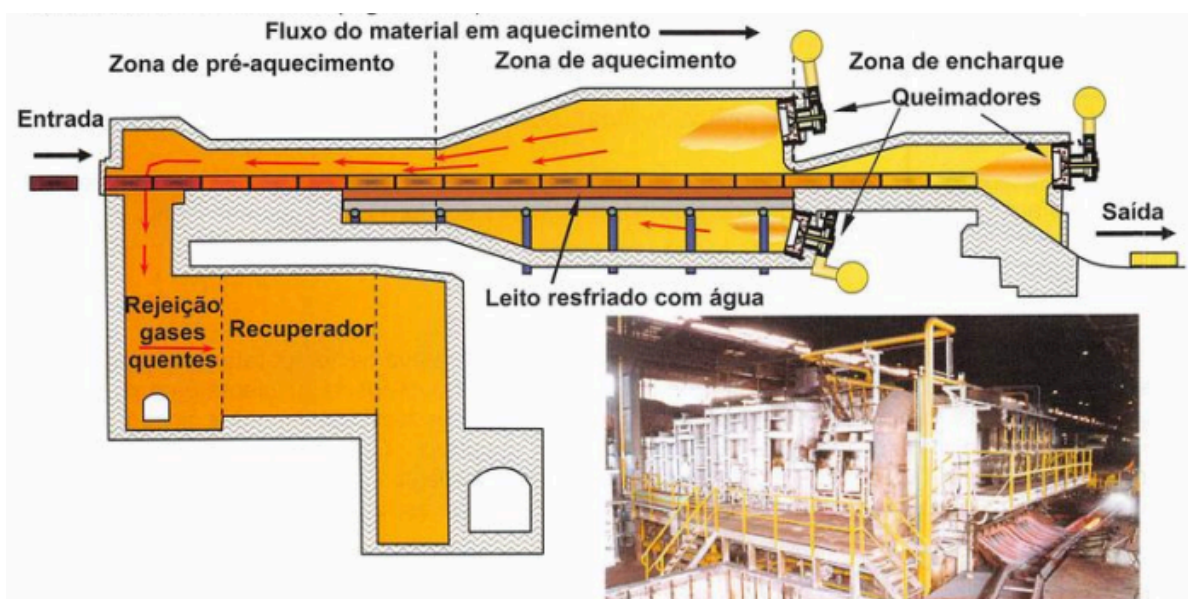
**Figura 3.10 -Conformação exercida pelos cilindros da laminação para reduzir a seção de um material**



Fonte:(SILVEIRA RIZZO, 2007).

A laminação a quente é um processo fundamental na siderurgia, que se inicia com o aquecimento dos semi-acabados (placas, blocos e tarugos) em fornos de reaquecimento, como mostra a Figura 3.11. Esses fornos elevam a temperatura do material a um estado onde a deformação plástica é facilitada e a resistência do aço à deformação é reduzida. Embora a temperatura exata varie de acordo com o tipo de aço e o produto final desejado, geralmente o aquecimento ocorre em temperaturas elevadas, na faixa da austenita (acima de  $910^{\circ}\text{C}$ , conforme o diagrama Fe-C), muitas vezes em torno de  $1200^{\circ}\text{C}$  a  $1300^{\circ}\text{C}$ , o que permite uma conformação eficiente e um refinamento da microestrutura (SILVEIRA RIZZO, 2007).

**Figura 3.11 - Representação esquemática de um forno de reaquecimento de empurrar**



Fonte:(SILVEIRA RIZZO, 2007).



Uma vez aquecidos, os semi-acabados são introduzidos nos laminadores, que consistem em conjuntos de cilindros. O aço é passado repetidamente entre esses cilindros, que aplicam forças de compressão para reduzir progressivamente a espessura do material e aumentar seu comprimento. Essa deformação plástica, realizada a quente, não só altera a forma, mas também promove a recristalização do material, refinando sua microestrutura e melhorando suas propriedades mecânicas, como resistência e ductilidade, enquanto a temperatura é mantida em níveis adequados para a deformação (SILVEIRA RIZZO, 2007).

Ao longo do processo de laminação a quente, o controle rigoroso da temperatura é crucial para garantir a conformação adequada e a obtenção das propriedades finais desejadas. A sequência de passagens pelos diferentes conjuntos de cilindros é cuidadosamente planejada para atingir as dimensões finais específicas do produto, seja uma chapa fina, uma bobina, um vergalhão ou um perfil. Ao final do processo, o material é resfriado de forma controlada e pode ser bobinado ou cortado no comprimento final, pronto para as etapas subsequentes de beneficiamento ou para o mercado (SILVEIRA RIZZO, 2007).

A laminação de vergalhões, classificada como um tipo de barra, insere-se na categoria de conformação de produtos longos e é um processo predominantemente realizado a quente. Este processo é executado em laminadores de barras e perfis, cuja disposição física, como trens abertos, em ziguezague ou múltiplos, é projetada para otimizar a produtividade, permitindo em alguns casos a laminação simultânea de várias barras. O último passe de laminação possui canais usinados e ranhuras para marcação de nervuras que auxiliarão a aderência do produto ao concreto. (SILVEIRA RIZZO, 2007).

### **3.3 TRATAMENTO TÉRMICO**

Concluída a conformação da barra nos múltiplos passes de laminação a quente, o produto resultante, conhecido como vergalhão, é submetido a um tratamento térmico. Este processo tem como finalidade o desenvolvimento de estruturas metalográficas e propriedades mecânicas desejadas (Silva, 1988).

O tratamento térmico consiste em um ciclo de operações de aquecimento e resfriamento aplicado aos aços sob condições rigorosamente controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade. Visto que as propriedades de um aço são, em princípio, uma função de sua estrutura, o objetivo fundamental desse processo é modificar a microestrutura do material para, conseqüentemente, alterar suas características e conferir-lhe um desempenho específico (CHIAVERINI, 2003).

Chiaverini (2003) elenca as principais finalidades e benefícios dos tratamentos térmicos, que incluem:

- Remoção de tensões internas, geradas por processos como resfriamento não uniforme ou trabalho mecânico;
- Ajuste da dureza (aumento ou diminuição);
- Elevação da resistência mecânica;
- Melhora na ductilidade;
- Otimização da usinabilidade;
- Aumento da resistência ao desgaste;
- Melhora da resistência à corrosão;
- Modificação de propriedades elétricas e magnéticas.

A representação de um tratamento térmico é comumente feita por meio de um ciclo gráfico de tempo por temperatura. Nesse contexto, o controle das variáveis do processo é fundamental para o sucesso da operação, sendo as principais, de acordo com Chiaverini (2003):

- **1.1 Aquecimento**

A etapa de aquecimento é controlada por duas variáveis principais: a velocidade com que a temperatura aumenta e a temperatura máxima atingida.

A velocidade de aquecimento é um fator crítico. Se for excessivamente alta em um material com elevadas tensões internas, pode ocorrer empenamento ou até mesmo o surgimento de fissuras. Por outro lado, um aquecimento muito lento pode levar a um crescimento de grão indesejado, o que prejudica certas propriedades mecânicas.

A temperatura máxima de aquecimento, por sua vez, é definida em função da composição química do material e, principalmente, das propriedades e da microestrutura final que se deseja obter.

- **Tempo de Permanência (Encharque)**

Após o material atingir a temperatura de aquecimento definida, o tempo de permanência nessa condição é outra variável determinante para o resultado. Este período deve ser suficiente para garantir o encharque completo da peça, ou seja, o tempo necessário para que o calor se distribua uniformemente e todo o volume do material atinja a temperatura de tratamento. Assim como a temperatura, o tempo de permanência é ajustado para se obter a microestrutura e as propriedades finais desejadas.

- **Resfriamento**

O resfriamento é frequentemente considerado a etapa mais crítica do tratamento térmico, pois a velocidade com que o material é resfriado determina de forma efetiva sua microestrutura final e, conseqüentemente, suas propriedades mecânicas. Um exemplo clássico ocorre nos aços: partindo de uma mesma composição química e temperatura de aquecimento, diferentes velocidades de resfriamento podem gerar microestruturas distintas, como perlita (resfriamento lento) ou martensita (resfriamento rápido).

Dessa forma, a escolha do meio de resfriamento é guiada pela estrutura final pretendida. Os meios usuais, em ordem crescente de severidade, são:

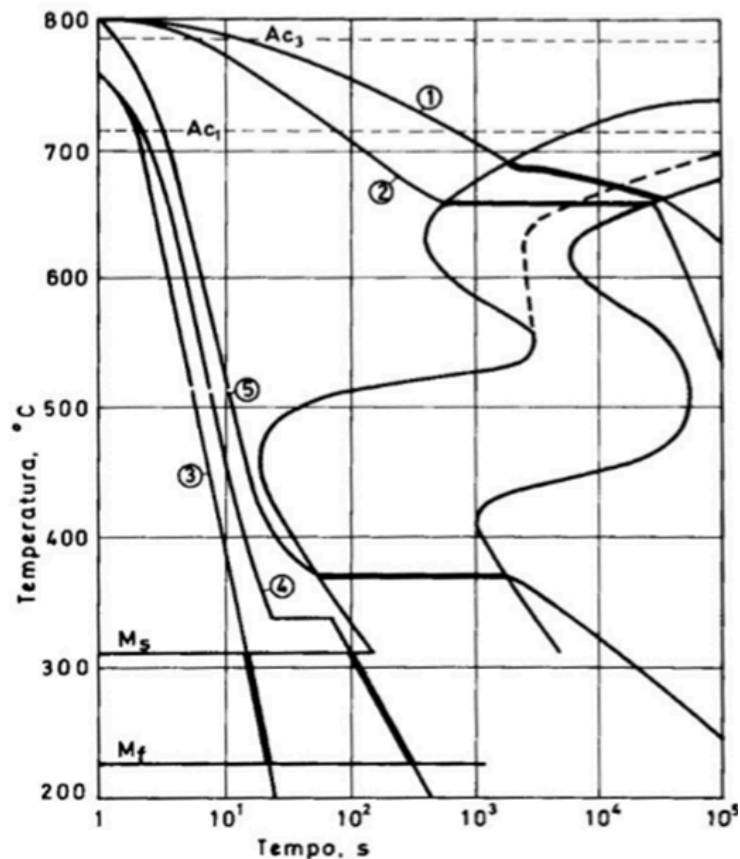
- a) Ambiente do forno: proporciona o resfriamento mais lento e brando.
- b) Ar parado ou forçado: oferece uma velocidade de resfriamento intermediária.
- c) Meios líquidos (óleo, água, salmoura): promovem o resfriamento mais severo e rápido.

### **3.3.1 Têmpera**

A têmpera é um tratamento térmico essencial aplicado às ligas de ferro-carbono, cujo objetivo primordial é a obtenção de uma microestrutura martensítica, conferindo ao material uma elevada dureza. O processo consiste no aquecimento do aço a uma temperatura superior à sua zona crítica, geralmente entre 727°C e 900°C, para transformar sua estrutura em austenita. Esta fase de aquecimento, denominada austenitização, deve ser mantida por tempo suficiente para garantir a completa homogeneização da austenita. A etapa subsequente e mais crítica é o resfriamento rápido e controlado da peça em um meio apropriado, como água, óleo ou salmoura (COLPAERT, 2008).

Conforme destacado por Chiaverini (2003), esse resfriamento brusco impede a decomposição da austenita em microestruturas mais estáveis e menos duras, como ferrita e perlita, forçando a transformação em martensita. A velocidade com que a temperatura decai é, portanto, um fator determinante, distinguindo a têmpera de outros tratamentos como o recozimento, que envolve um resfriamento lento e resulta em propriedades mecânicas distintas. A Figura 3.12 mostra o diagrama de arrefecimento para diversos tipos de tratamento térmico.

Figura 3.12 - Diagramas de arrefecimento para vários tipos de tratamento térmico



Fonte: (SEABRA, 2012)

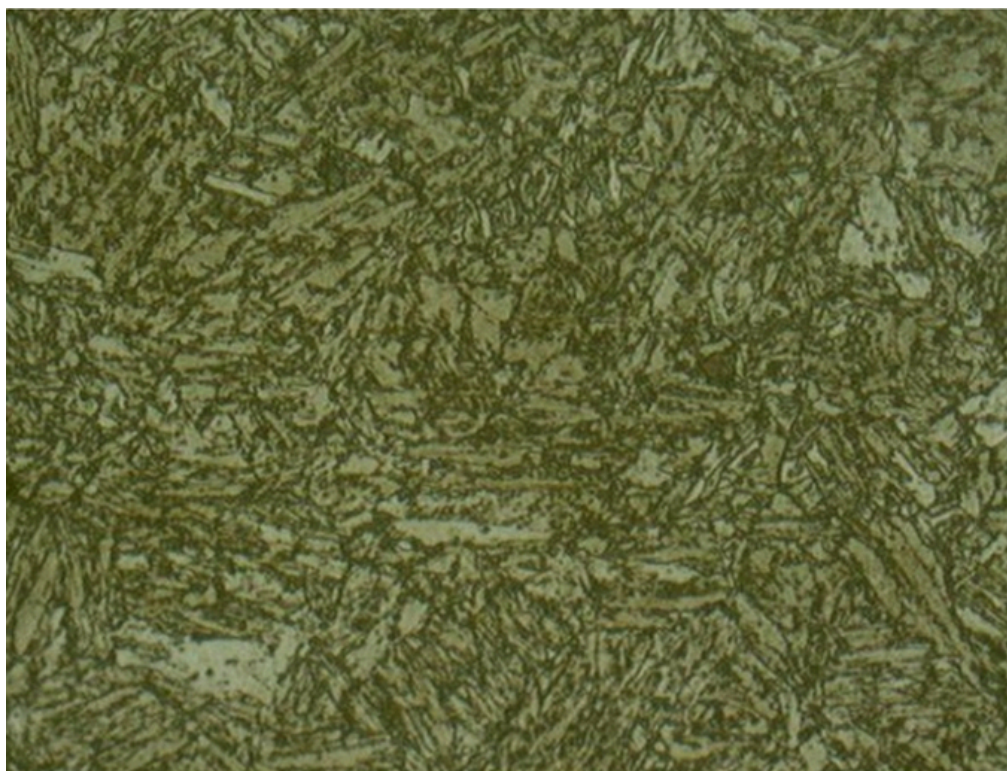
Legenda:

- 1 - Recozimento anisotérmico
- 2 - Recozimento isotérmico
- 3 - Têmpera martensítica
- 4 - Têmpera por etapas
- 5 - Têmpera isotérmica bainítica

O sucesso da têmpera e a profundidade do endurecimento alcançado na peça são governados por uma interação complexa de fatores. A "temperabilidade", uma propriedade intrínseca do aço relacionada à sua composição química, define a capacidade de formar martensita em profundidade. Além disso, a geometria e o tamanho da peça influenciam diretamente as taxas de resfriamento em diferentes pontos, afetando a uniformidade da dureza final. A temperatura de austenitização também é vital; se inadequada, pode resultar em uma transformação incompleta ou na presença de fases indesejadas que comprometem o resultado (COLPAERT, 2008).

Por fim, a escolha do meio de têmpera, que determina a severidade do resfriamento, é crucial. Segundo Lourenço (2012), a taxa de arrefecimento depende da transmissão de calor no sólido, na interface e no fluido. Meios mais drásticos, como a água, promovem um resfriamento mais rápido e maior dureza, mas, em contrapartida, elevam o risco de distorções e o surgimento de trincas na peça. A microestrutura resultante do processo de têmpera, a martensita, é formada por uma transformação não difusional da austenita, como descrito por Chiaverine (2003). Essa transformação gera uma estrutura de alta dureza devido ao seu arranjo atômico tetragonal de corpo centrado, que impede o movimento de discordâncias. No entanto, a mesma transformação que confere dureza excepcional também induz tensões internas significativas, resultantes das diferentes velocidades de resfriamento entre a superfície e o núcleo da peça, bem como das mudanças volumétricas associadas à transformação de fase. Essas tensões tornam o material extremamente frágil e suscetível a trincas e deformações. Portanto, embora a têmpera seja eficaz para alcançar alta dureza, geralmente é seguida por um tratamento de revenimento para aliviar as tensões internas e ajustar a tenacidade do material a um nível adequado para a aplicação final. A figura 3.13 apresenta uma estrutura martensítica de um aço com 0,25% C.

**Figura 3.13 - Ampliação de 500x de uma estrutura martensita de um aço temperado com 0,25%C**



Fonte: (TORQUATO, 2010)

### 3.3.2 Revenimento

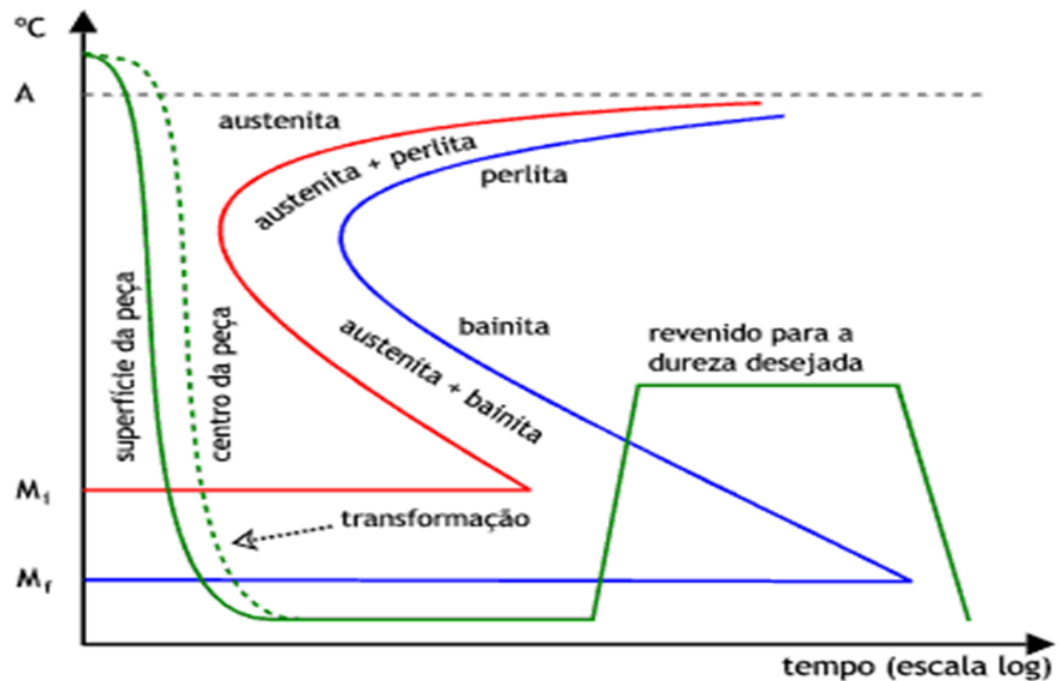
Após a têmpera, a microestrutura predominantemente martensítica confere ao aço elevada dureza, porém, simultaneamente, introduz um nível crítico de tensões residuais. Conforme aponta Colpaert (2008), essas tensões, somadas à baixa ductilidade e tenacidade intrínsecas da martensita recém-formada, tornam o material inadequado para a maioria das aplicações de engenharia. A distorção severa do reticulado cristalino e o estado de alta tensão interna geram uma fragilidade acentuada, criando o risco de falha prematura ou de trincas durante o manuseio ou serviço. Para mitigar tais inconvenientes, é indispensável a aplicação de um tratamento térmico subsequente conhecido como revenimento.

O revenimento tem como objetivo fundamental ajustar as propriedades mecânicas do aço temperado, promovendo o alívio das tensões e corrigindo a dureza excessiva. Chiaverini (2003) reforça que este processo é essencial para reduzir a fragilidade inerente à estrutura martensítica, resultando em um significativo aumento da ductilidade e da tenacidade, ou seja, da resistência ao impacto. O procedimento consiste no reaquecimento controlado da peça, após esta ter atingido a temperatura ambiente ao final da têmpera, a uma temperatura inferior à da zona crítica ( $A_{c1}$ ). O material é então mantido nessa temperatura por um período de tempo determinado, permitindo a ocorrência de transformações microestruturais, como a precipitação de carbonetos e a recuperação da matriz ferrítica.

Os parâmetros do revenimento, nomeadamente a temperatura e o tempo de patamar, são cruciais para o resultado final e devem ser rigorosamente controlados em função das propriedades desejadas para a aplicação. As temperaturas de revenimento usualmente situam-se na faixa de 150 °C a 680 °C, com durações que podem variar tipicamente de uma a três horas. É importante notar que existe uma relação inversa entre a temperatura de revenimento e a dureza final da peça: quanto mais elevada a temperatura e maior o tempo de tratamento, mais pronunciada será a redução da dureza e da resistência mecânica obtidas na têmpera. Em contrapartida, haverá um ganho proporcional na ductilidade e na tenacidade do material, tornando-o mais resiliente e funcional para seu propósito final (MSPC,2025).

A figura 3.14 apresenta um diagrama de tempo, temperatura e transformação no qual o aço sofre um resfriamento brusco ao ponto de obter estrutura martensita. Seguidamente após o material está à temperatura ambiente, ele será reaquecido e mantido a uma temperatura considerável que venha ocorrer o revenimento.

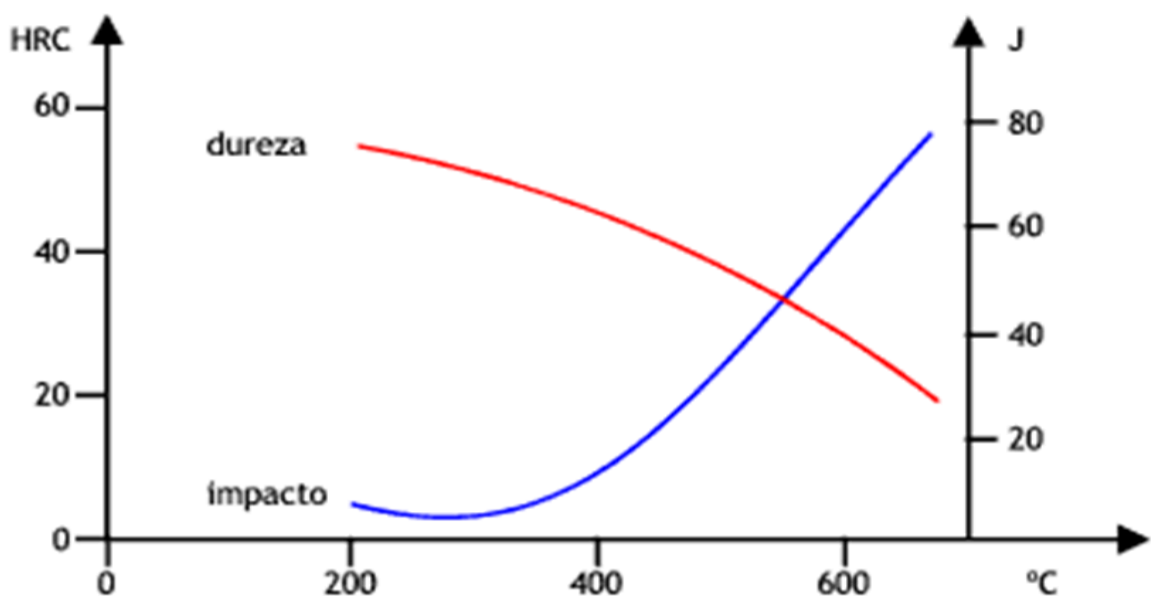
Figura 3.14 - Diagrama TTT de uma têmpera seguido de um revenido



Fonte:(MSPC,2025)

A figura 3.15 apresenta o resultado de um revenimento pós têmpera, com alívio das tensões internas, a fragilidade tende a diminuir e sua resistência ao impacto (tenacidade) elevar.

Figura 3.15 - Variação aproximada de dureza e resistência ao impacto versus temperatura de revenido para aço 0,45% C.



Fonte:(MSPC,2025)

### 3.4 TRATAMENTO TÉRMICO NO VERGALHÃO

O vergalhão passa por um processo de têmpera e revenimento parcial, ambos com resfriamento controlado, visando atingir características específicas. Esse conjunto de tratamento térmico pós-laminação constitui um dos métodos mais eficazes para a produção de vergalhões com propriedades que atendam aos requisitos da norma 7480 – Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado.

Os procedimentos convencionais de tratamento térmico para aços martensíticos geralmente envolvem o resfriamento rápido e contínuo de uma amostra austenitizada em um meio de resfriamento, como água, óleo ou ar. As propriedades ideais de um aço submetido a têmpera e revenimento são obtidas somente se, durante o tratamento de têmpera, a amostra contiver um alto teor de martensita. Durante a têmpera, é inviável resfriar as regiões internas mais rapidamente do que as externas. Consequentemente, a austenita se transformará ao longo de uma faixa de temperatura, resultando em uma possível variação nas microestruturas e propriedades em função da posição no interior da amostra (CALLISTER 2002).

O sistema de resfriamento controlado de vergalhões consiste, em sua essência, no tratamento térmico de barras de aço realizado após o último passe de laminação. A barra atravessa um sistema de resfriamento brusco, sofrendo uma transformação em sua região externa, enquanto seu centro permanece austenítico, equalizando posteriormente seu gradiente térmico até a temperatura ambiente. As transformações metalúrgicas associadas ao fenômeno de transferência de calor resultam em propriedades mecânicas que podem variar em função dos parâmetros de processo utilizados. Estes englobam diversos fatores, desde a especificação do tipo de aço a ser empregado até a temperatura de chegada da barra no leito de resfriamento (FILHO, 2004).

Segundo Lourenço (2012), esse processo de tratamento térmico compreende três estágios: têmpera superficial, autorrevenimento da martensita e transformação do centro da barra.

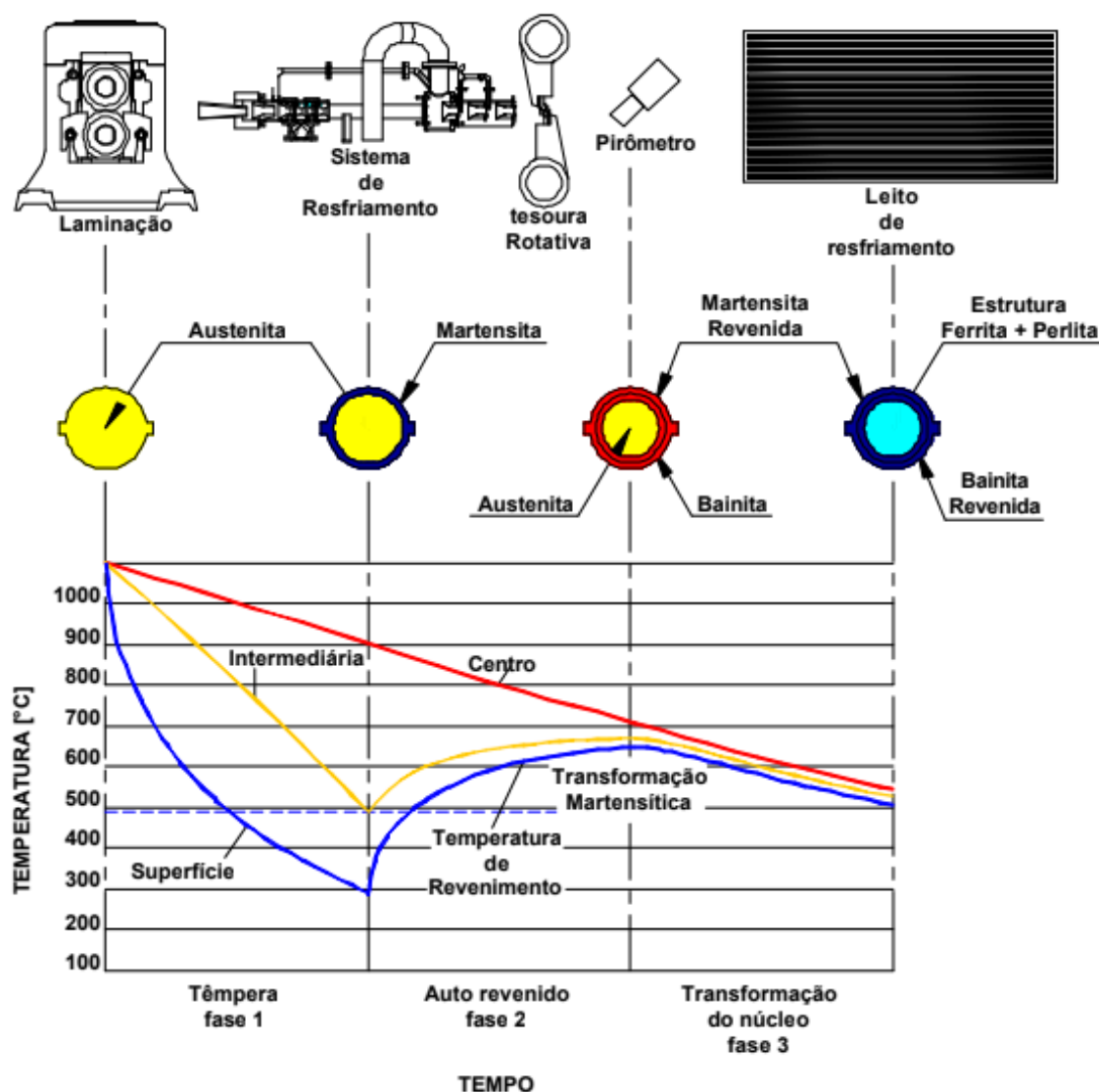
Com o sistema de tratamento térmico superficial com resfriamento controlado instalado imediatamente após a última gaiola acabadora, a barra laminada passa pelo interior dos tubos do sistema, em contato com a água, experimentando um resfriamento rápido e intensivo de sua superfície. Nessas condições, a estrutura de uma camada superficial da barra sofre transformação de austenita para martensita. Simultaneamente ao resfriamento dessa camada superficial, o núcleo da barra apresenta um resfriamento mais lento, mantendo, contudo, sua estrutura austenítica durante o período em que a região superficial é rapidamente resfriada nos tubos com água, ou seja, até o final da fase 1 do tratamento, conforme ilustrado na figura 3.16 (FILHO, 2004).



Quando o material deixa de ser resfriado nos tubos com água, a curva de resfriamento superficial é interrompida, e essa camada da barra passa a ser reaquecida pelo calor ainda armazenado no núcleo. Essa etapa corresponde à fase 2 do tratamento, até o ponto em que toda a seção atinge praticamente a mesma temperatura. A partir desse ponto, toda a seção da barra continua a se resfriar ao ar, mantendo a mesma taxa de resfriamento, seguindo a curva de variação de temperatura que corresponde à terceira e última fase do tratamento (FILHO, 2004).

A figura 3.16 apresenta as microestruturas obtidas no aço em relação à variação de temperatura.

**Figura 3.16 - Curvas de variação de temperatura no vergalhão para diferentes raios durante o tratamento térmico superficial**



Fonte: ( FILHO, 2004).

O desenvolvimento de um conjunto de características mecânicas desejáveis para um material frequentemente resulta de transformações de fases, as quais são forjadas a partir de um tratamento térmico. As dependências temporais e térmicas de algumas transformações de fases são convenientemente representadas por meio de diagramas de fases modificados. Torna-se imperativo compreender a utilização desses diagramas para que seja possível (CALLISTER 2002).

### **3.4.1 Transformações Metalúrgicas**

Os diagramas de transformação Tempo, Temperatura e Transformação (TTT) são utilizados para determinar as curvas de resfriamento de um material, permitindo identificar as transformações metalúrgicas que os aços experimentam ao serem resfriados a partir de uma temperatura inicial na qual o material se encontra completamente austenitizado (FILHO, 2004).

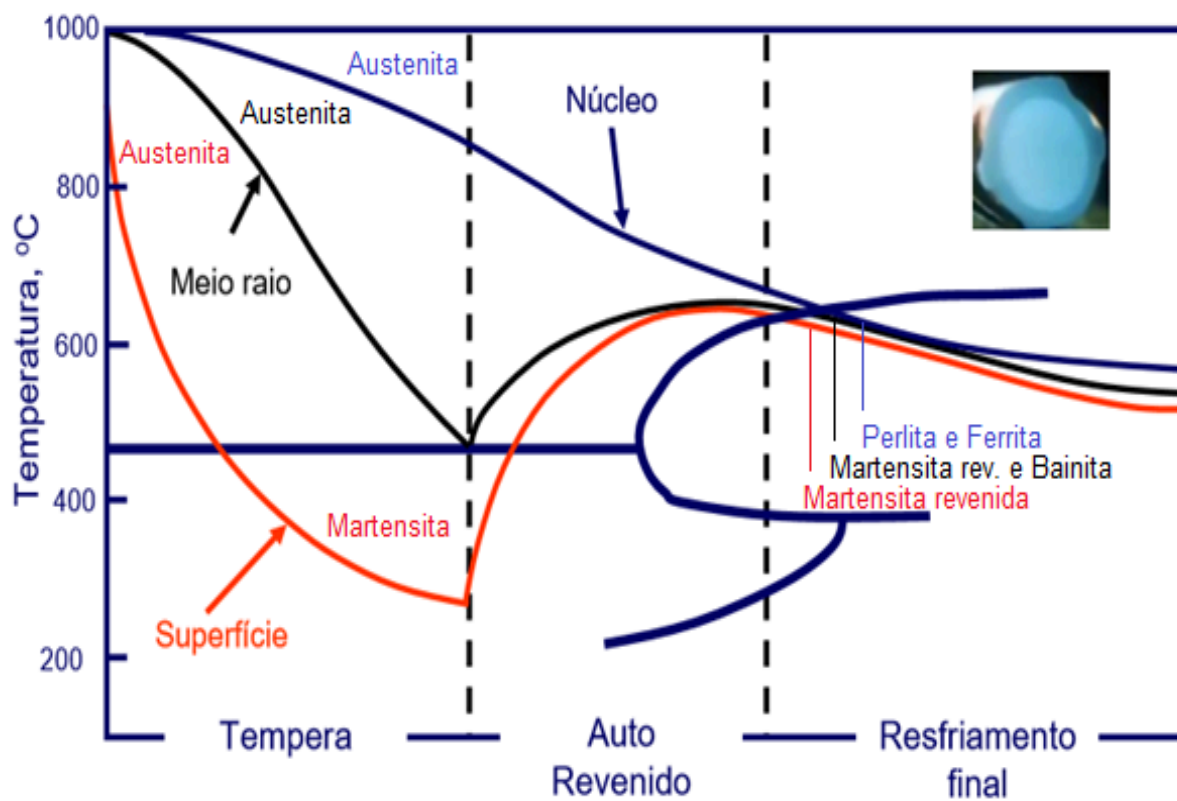
A figura 3.16 ilustra, durante a fase 1, um tratamento térmico de têmpera na camada superficial da barra, resultando na formação de martensita, enquanto o núcleo, apesar do resfriamento, mantém sua estrutura austenítica (FILHO, 2004).

Ao término desta fase, a formação de martensita na superfície é interrompida e inicia-se a fase 2, na qual a camada temperada é reaquecida por meio da transferência de calor entre o núcleo e a superfície, que ainda apresentam temperaturas relativamente elevadas. Consequentemente, a camada temperada da barra passa por um tratamento de autorrevenimento, transformando toda a martensita formada em um constituinte conhecido como martensita revenida ou sorbita. Este novo constituinte da camada superficial, embora não apresente a fragilidade da martensita, alcança elevados limites de alongamento e resistência (FILHO, 2004).

A fase 3 tem início quando a temperatura da superfície se iguala praticamente à do núcleo, prosseguindo até que a temperatura da barra atinja aproximadamente 100°C ou menos, momento em que o resfriamento do vergalhão é completado. Nesta fase, conclui-se o revenido da camada superficial temperada e o núcleo da barra finaliza sua transformação, passando a ser constituído por uma estrutura de perlita mais ferrita, de granulação fina (FILHO, 2004).

As estruturas formadas no vergalhão após a conclusão do processo de tratamento térmico de têmpera e auto revenimento são apresentadas na figura 3.17, no diagrama de tempo, temperatura e transformação.

Figura 3.17 - Perfil térmico de diferentes regiões de uma barra de aço submetida ao processo de têmpera e auto-revenimento



Fonte: (Adaptado de FILHO, 2004)

A austenita constitui uma solução sólida de carbono em ferro gama, apresentando estabilidade apenas em temperaturas superiores a 723°C. Abaixo dessa temperatura, ela se desdobra em ferrita e cementita por meio de uma reação eutetóide. A austenita pode ser encontrada em aços austeníticos à temperatura ambiente, onde se mantém estável. Suas características incluem deformabilidade semelhante à do ferro gama, baixa dureza, elevada resistência ao desgaste, propriedades magnéticas e é o constituinte mais denso dos aços, não sendo suscetível ao ataque por reagentes (SCHEID, 2010).

A ferrita é um constituinte resultante de uma solução sólida de inserção de carbono em ferro alfa. Destaca-se como o elemento mais dúctil e tenaz dos aços, com resistência à tração de 28 da N/mm<sup>2</sup> e alongamento de 35%. Sua solubilidade máxima é de 0,008%. Em aços com baixo teor de carbono, a estrutura é predominantemente formada por grãos de ferrita, cujos limites são facilmente revelados microscopicamente após ataque químico (SCHEID, 2010).

A perlita é uma mistura eutetóide de duas fases, ferrita e cementita, formada a 723 °C. Sua estrutura consiste em lâminas alternadas de ferrita e cementita, sendo as lâminas de ferrita mais espessas. Após ataque com ácido nítrico, as lâminas de cementita ficam em relevo. A perlita demonstra maior dureza e resistência que a ferrita, mas é mais branda e maleável que a cementita (SCHEID, 2010).

A bainita é um constituinte obtido na transformação isotérmica da austenita, quando a temperatura do banho de resfriamento varia entre 250 e 500 °C. Possui uma aparência similar à martensita, sendo composta por agulhas alongadas de ferrita que contêm placas finas de carboneto. A dureza da bainita situa-se na faixa de 40 a 60 HRC (SCHEID, 2010).

A martensita é uma solução sólida intersticial supersaturada de carbono em ferro alfa. É o principal constituinte estrutural da têmpera dos aços, com uma microestrutura caracterizada por agulhas cruzadas. Os átomos de ferro estão dispostos nos vértices, como na ferrita, enquanto os átomos de carbono ocupam as faces e arestas, resultando em uma rede distorcida. Esta distorção é responsável pela elevada dureza da martensita. Suas propriedades mecânicas incluem resistência à tração entre 170 e 250 kg/mm<sup>2</sup>, dureza HRC entre 50 e 60, alongamento de 0,5% e é magnética (SCHEID, 2010).

### **3.4.2 Influência Do Tratamento Térmico E Propriedades Mecânicas**

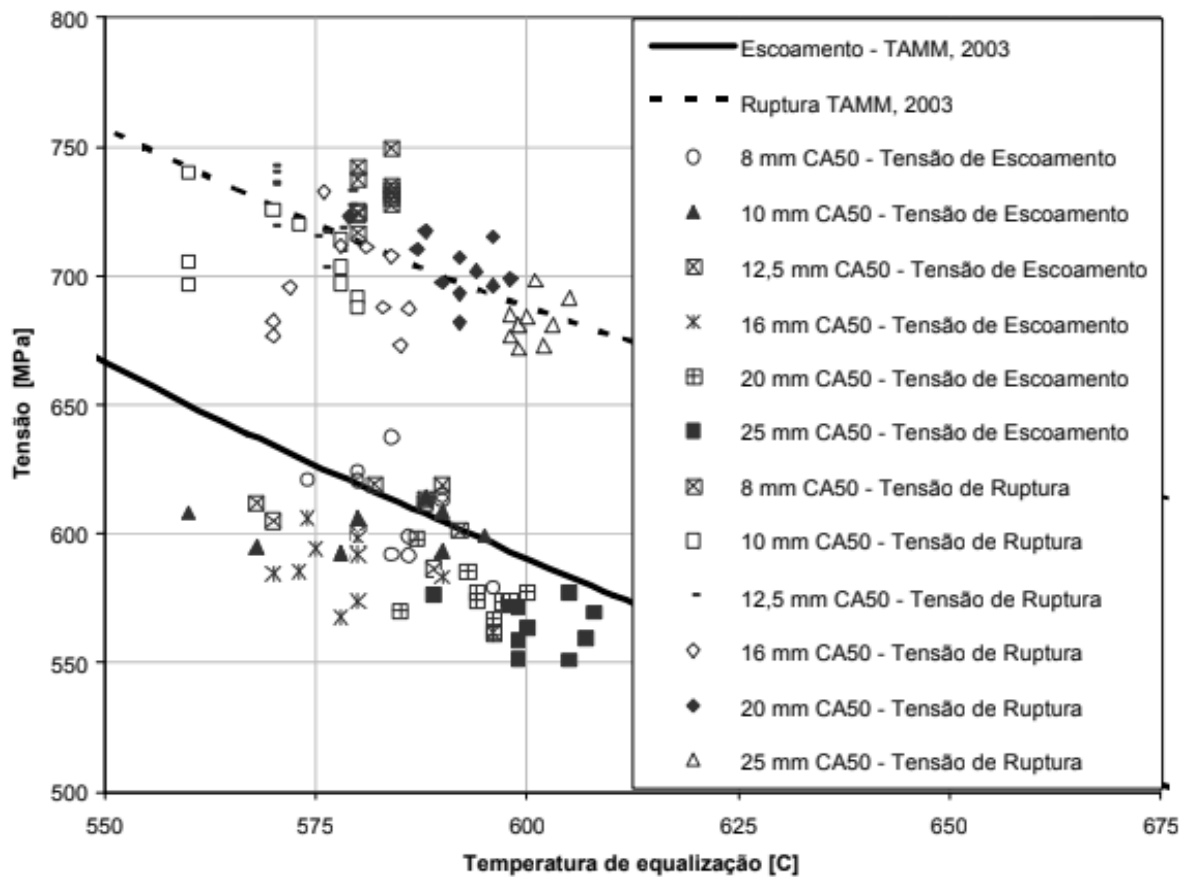
Além da composição química, as propriedades mecânicas estão diretamente relacionadas aos parâmetros de controle da laminação ou do tratamento térmico em si. Propriedades mecânicas, como limite de escoamento, limite de resistência e alongamento, apresentarão sempre valores crescentes ou decrescentes de acordo com as variações dos parâmetros de processo. A seguir, são apresentadas as principais influências do tratamento térmico:

- Temperatura da barra no processo de laminação;
- Velocidade de laminação;
- Temperatura de equalização;
- Pressão da água da linha de recalque do sistema;
- Temperatura da água de entrada no processo de tratamento térmico.

Segundo Filho (2004), observa-se uma diminuição dos resultados de tensão de escoamento e de ruptura, com as barras exibindo uma tendência decrescente de seus valores em função do diâmetro nominal produzido. Devido ao tratamento térmico superficial realizado, este atua diretamente no aumento da resistência mecânica, reduzindo os valores de alongamento.

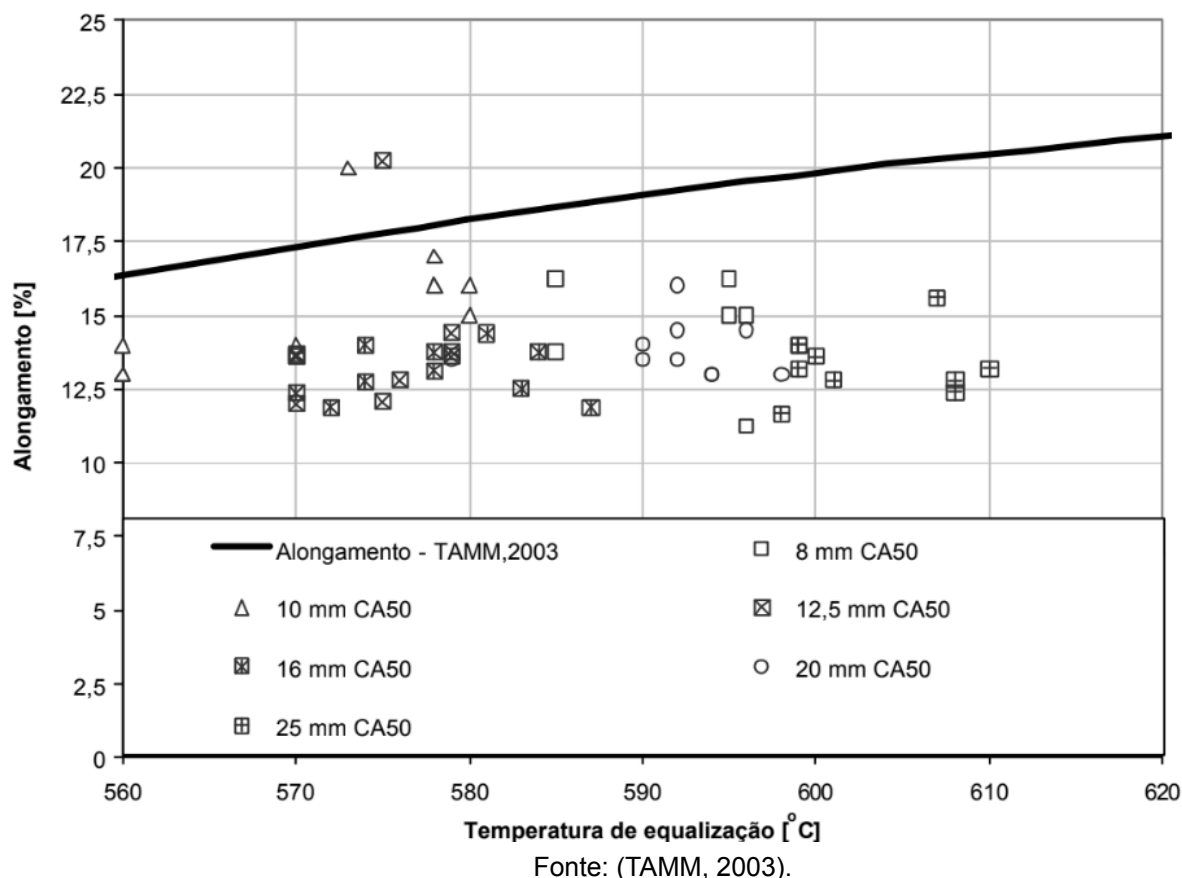
A temperatura de equalização influencia os resultados da tensão de escoamento. Isso ocorre porque uma temperatura mais elevada promove transformações metalúrgicas ao longo do diâmetro da barra de aço, resultando em um material menos resistente. A Figura 3.18 ilustra a relação entre o diâmetro nominal e a temperatura de equalização, as tensões de escoamento e de ruptura, de acordo com Tamm (2003).

Figura 3.18 - Influência da temperatura de equalização na tensão de ruptura e na tensão escoamento



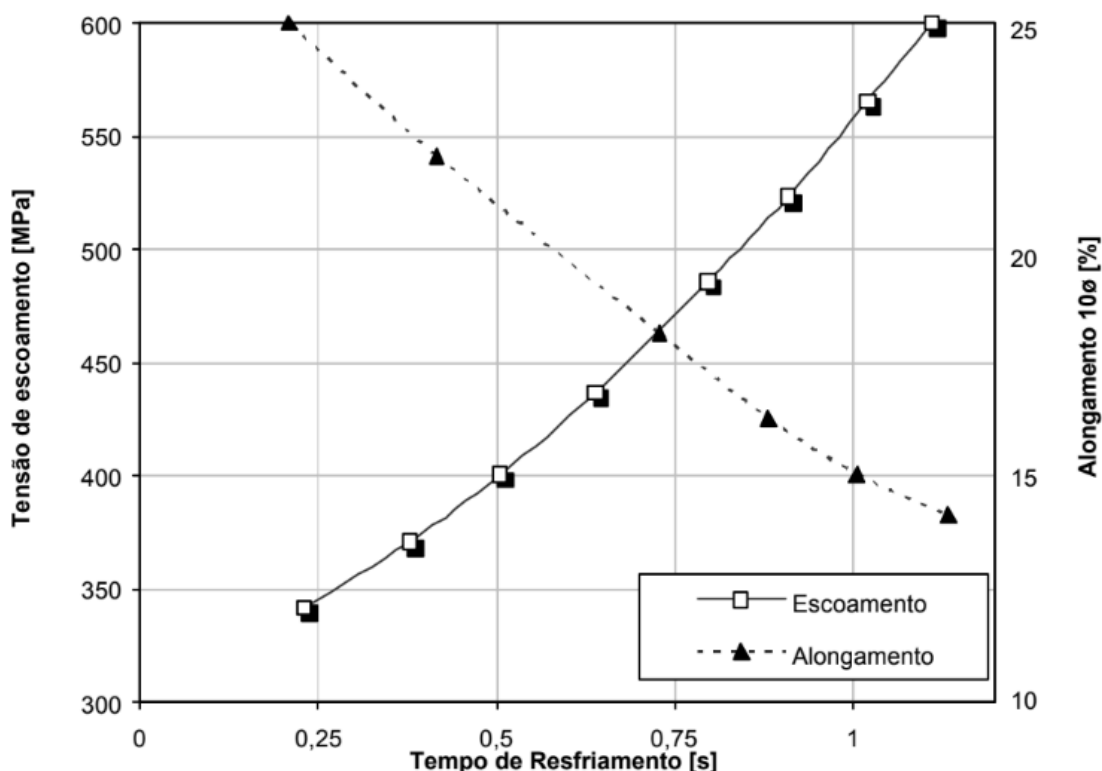
A Figura 3.19 demonstra uma tendência crescente no alongamento para menores taxas de resfriamento, o que corrobora o aumento da rigidez e a redução da ductilidade proporcionalmente à intensidade do tratamento térmico. Adicionalmente, observa-se uma relação diretamente proporcional entre o alongamento e a temperatura de equalização. Contudo, ao analisar individualmente os diâmetros nominais, verifica-se que os valores de alongamento são crescentes mesmo para pequenas variações de temperatura, como exemplificado nos diâmetros nominais de 12,5 mm e 25 mm. Entretanto, outros diâmetros nominais não evidenciaram tal clareza visual (TORQUATO, 2010).

Figura 3.19 - Influência da temperatura de equalização no alongamento



A Figura 3.20 ilustra os resultados do efeito do tempo de resfriamento na tensão de escoamento e no alongamento do material. Observa-se que essas propriedades demonstram comportamentos inversos: um resfriamento mais intenso, medido por sua duração, resulta em maior resistência e rigidez das barras, o que, conseqüentemente, leva à redução de suas propriedades de alongamento. Desta forma, verifica-se que as propriedades desejadas dos aços dependem de condições intermediárias de resistência e alongamento, cujos parâmetros ótimos variam conforme o comportamento do material, de acordo com Tamm (2003).

Figura 3.20 - Tensão de Escoamento e Alongamento versus Tempo de Resfriamento



Fonte: (TAMM, 2003)

### 3.5 ESPECIFICAÇÃO DO VERGALHÃO

A produção e comercialização de vergalhões de aço, elementos estruturais essenciais ao concreto armado, são rigorosamente regulamentadas por normas técnicas compulsórias. Esta obrigatoriedade visa garantir a conformidade do produto em termos de características geométricas, massa linear, propriedades mecânicas e soldabilidade, assegurando a integridade das estruturas e a segurança na construção civil. Como o consumidor final geralmente não dispõe de meios para avaliar tecnicamente o produto, a aderência às normas funciona como uma garantia de qualidade. A verificação da conformidade depende de laboratórios especializados e da aplicação de ensaios destrutivos e não destrutíveis (NUNES, 2009).

No mercado brasileiro, a norma vigente é a ABNT NBR 7480, que classifica os vergalhões em três categorias distintas com base em seu limite de escoamento mínimo: CA-25 (250 MPa), CA-50 (500 MPa) e CA-60 (600 MPa). O foco deste estudo recai sobre a categoria CA-50 (Concreto Armado 500 MPa), a mais difundida no mercado nacional. Para esta classe, a norma exige que as barras sejam obrigatoriamente nervuradas, apresentando nervuras transversais oblíquas e, se necessário, longitudinais, com o objetivo de otimizar a aderência mecânica entre o aço e o concreto (DAROIT, 2012).

Em operações de exportação, o fabricante deve adequar seu produto às normas do país de destino. No caso do Peru, a principal referência é a Norma Técnica Peruana (NTP) 341.031, que frequentemente se alinha à norma americana ASTM A615. A categoria mais comum nesse mercado é o "Grado 60" (Grau 60), cuja designação refere-se ao limite de escoamento mínimo de 60.000 psi (libras por polegada quadrada). Este valor equivale a aproximadamente 420 MPa. É fundamental notar que o CA-50 brasileiro (500 MPa) não é tecnicamente equivalente ao Grado 60 peruano ( $\approx 420$  MPa), exigindo que o processo produtivo seja ajustado para atender especificamente aos requisitos deste último.

**Tabela 3.4 - Especificações das propriedades mecânicas dos vergalhões**

Categoria	Valores Mínimos			Ensaio de Dobramento a 180°	
	Limite de Escoamento (Le)	Limite de Resistência (Lr)	Alongamento (%)	Diâmetro do Pino (mm)	
				$\varnothing < 20$	$\varnothing \geq 20$
CA-25	250	1,20 x Le	18	2 x $\varnothing$	4 x $\varnothing$
CA-50	500	1,08 x Le	8	3 x $\varnothing$	6 x $\varnothing$
CA-60	600	1,05 x Le	5	5 x $\varnothing$	-

Fonte: (ABNT -NBR 7480, 2012)

Embora existam diferenças nos valores nominais de escoamento, os princípios de controle de qualidade para aços de concreto armado são consistentes entre as normas. Tanto a ABNT NBR 7480 quanto a NTP 341.031 estabelecem critérios rigorosos para o limite de escoamento, limite de resistência (tensão máxima antes da fratura), alongamento (ductilidade) e geometria das nervuras. A soldabilidade é outra propriedade de grande importância prática, dada a necessidade de unir barras no canteiro de obras devido a limitações de transporte e comprimento dos vergalhões (geralmente 12 metros). A capacidade do aço de ser soldado sem comprometer suas propriedades mecânicas é, portanto, essencial para garantir a integridade monolítica das estruturas de concreto armado (IISA, 2006).

A seleção do processo de fabricação e da composição química é vital para atender aos distintos requisitos normativos dos aços para concreto armado. A principal diferença entre o vergalhão CA-50 (norma brasileira NBR 7480) e o vergalhão para exportação, com exigências de ductilidade semelhantes ao grau 60 (como a NTP 341.031, que especifica Limite de Escoamento - LE de 420 MPa, uma relação Limite de Resistência/Limite de Escoamento - LR/LE de 1,25 e Alongamento de 14,5%), reside na capacidade do material de se deformar plasticamente após o escoamento, um requisito crítico em zonas sísmicas (AREQUIPA, 2022).



O vergalhão CA-50, um produto de larga escala, é otimizado para uma resistência mínima elevada de 500 MPa e uma relação custo-benefício favorável. Para isso, a indústria emprega majoritariamente o Tratamento Termomecânico Controlado (TMCP), também conhecido como Têmpera e Auto-Revenido (QST). Este processo envolve o resfriamento rápido da superfície do vergalhão após a laminação a quente, formando uma camada externa de martensita. O calor residual do núcleo promove um "auto-revenido", atenuando essa camada. A microestrutura final é heterogênea: um anel externo de martensita revenida de alta dureza e um núcleo de ferrita/perlita mais dúctil. Essa estrutura mista eleva o Limite de Escoamento (LE) aos 500 MPa requeridos, usando um aço base de baixo carbono para economicidade. Contudo, essa microestrutura limita a capacidade de deformação, resultando em valores de Alongamento e uma relação Limite de Resistência/Limite de Escoamento (LR/LE) relativamente baixos (tipicamente entre 1,08 e 1,15) (Silva, 1988).

Em contraste, os vergalhões grau 60, regulamentados pela NTP 341.031, são desenvolvidos para aplicações em regiões de alto risco sísmico. Nesses contextos, a segurança é garantida não apenas pelo Limite de Escoamento, mas principalmente pela capacidade do material de absorver energia por deformação plástica antes da ruptura. Esta exigência se traduz em dois requisitos metalúrgicos rigorosos: um Alongamento mínimo elevado (14,5% para bitolas finas) e uma alta relação LR/LE (1,25). O elevado valor de LR/LE indica uma microestrutura com substancial potencial de endurecimento por deformação, o que é um fator de segurança para prevenir o colapso frágil das estruturas (AREQUIPA, 2022).

Para atender aos requisitos de alta ductilidade dos aços de exportação, como o Grau 60 da NTP 341.031 (LE=420 MPa, LR/LE mínimo de 1,25, Alongamento 14,5%), é necessária uma estratégia metalúrgica oposta à do CA-50, excluindo o Tratamento Termomecânico (TMCP), que geraria martensita fragilizante e uma baixa relação LR/LE.

A resistência é obtida exclusivamente por meio de uma liga quimicamente controlada, utilizando alto teor de Manganês para endurecimento por solução sólida e, crucialmente, microligas de Vanádio e Nióbio. Esses microligantes atuam na laminação a quente, promovendo o refino de grão e o endurecimento por precipitação de carbonetos e nitretos ultrafinos. Essa abordagem garante que o limite de escoamento seja atingido, mantendo uma microestrutura majoritariamente ferrítico-perlítica, altamente dúctil, com o potencial de endurecimento por deformação necessário para que o LR se distancie significativamente do LE, atendendo à relação LR/LE maior ou igual a 1,25, essencial para aplicações sísmicas (Silva, 1988).

## 4 METODOLOGIA

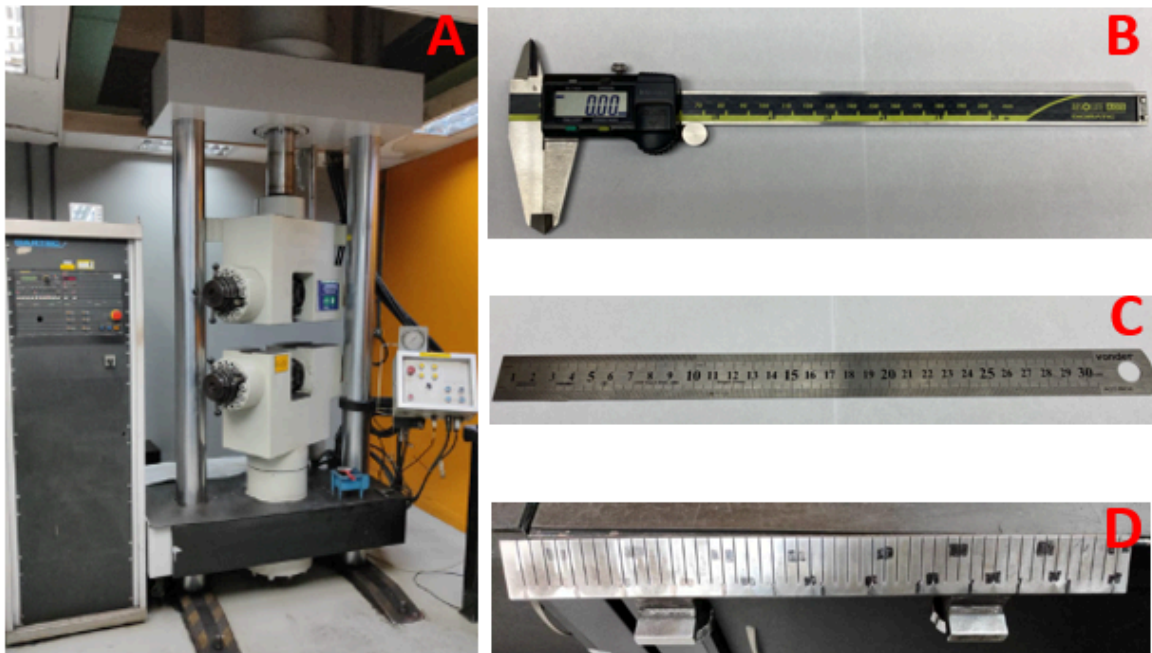
Este trabalho, de natureza aplicada quanto à finalidade, descritiva quanto aos objetivos e de abordagem quali-quantitativa, emprega um método científico hipotético-dedutivo. Os procedimentos adotados são de cunho bibliográfico e experimental. Para o desenvolvimento, foram utilizadas amostras de aço carbono destinado a concreto armado. A realização das análises químicas, tração, microdureza foram executadas no laboratório de controle de qualidade de uma usina siderúrgica. As seções subsequentes detalharão as atividades e os procedimentos para a geração, coleta e organização dos dados desta pesquisa.

### 4.1 MATERIAL

Este trabalho utilizou como matéria-prima aços carbono, sendo um produzido por laminação a quente com tratamento térmico de têmpera e auto-revenimento, e outro também laminado a quente, porém sem tratamento térmico, destinado à exportação. Os equipamentos e ferramentas empregados nas análises do material estão relacionados abaixo:

1. **Máquina Universal de Tração (Dartec 80t):** Sistema servo-hidráulico com capacidade de carga de **800 kN** (80 toneladas) e precisão de força de  **$\pm 0,5\%$**  do valor lido (ver figura 4.1 A);
2. **Paquímetro Digital:** Resolução de **0,01 mm** e faixa de medição de **0 a 150 mm**. (ver figura 4.1B);
3. **Escala Métrica:** Resolução de **1 mm** e comprimento total de **300 mm**. (ver figura 4.1 C);
4. Riscador Mecânico (vide figura 4.1 D);
5. **Durômetro (Otto Wolpert-Werke):** Equipamento universal para ensaios **Rockwell, Vickers e Brinell**, com sistema de medição óptica integrado e cargas de até **250 kgf**.(ver figura 4.2 ).

**Figura 4.1 - Equipamentos empregados para realização do ensaio de tração: (A) Máquina de tração; (B) Escala métrica e Paquímetro digital; (C) Riscador Mecânico**



Fonte: (Elaborado pelo Autor)

**Figura 4.2 - Equipamentos empregados nas análises das amostras: Microdurômetro**



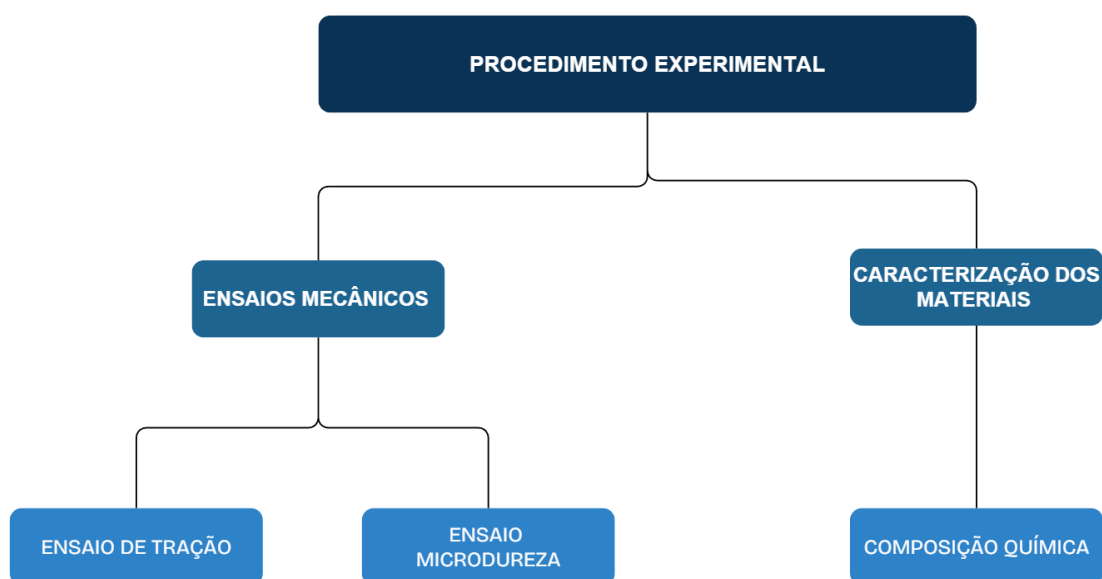
Fonte: (Elaborado pelo Autor)

## 4.2 MÉTODOS

Para a quantificação do perfil de dureza das regiões constituintes, e análise das propriedades mecânicas derradeiras dos vergalhões CA50, o presente estudo concentrou-se especificamente nos diâmetros nominais de 10 mm. Com vistas a um rigoroso estudo comparativo, as análises foram estendidas aos vergalhões da SIDERPERU, representados pelas amostras de 3/8 de polegada. A metodologia aplicada, detalhada no fluxograma da Figura 4.3, empregou técnicas e procedimentos de reconhecida eficácia, assegurando a obtenção de dados robustos para a avaliação final do material.

As condições do tratamento térmico foram alteradas na tentativa de atender à norma peruana. Para o mercado interno, utilizam-se 3 bombas com vazões de 68, 73 e 68 m<sup>3</sup>/h e uma pressão de 18 bar. Contudo, para o estudo em questão, as pressões das bombas foram variadas entre 11 e 14 bar, e as vazões correspondentes das 3 bombas foram ajustadas de 57, 51, 52 m<sup>3</sup>/h para 61, 55, 56 m<sup>3</sup>/h, respectivamente.

Figura 4.3 - Fluxograma da metodologia aplicada da retirada e análise das amostras.



Fonte: (Elaborado pelo Autor)

#### **4.2.1 Composição Química**

A análise química dos aços 1025 A e 1634 A foi realizada no espectrômetro ARL iSpark 8820, no qual primeiramente foram coletadas amostras com diâmetros de 10mm e 3/8 polegadas e cortadas com comprimentos de 50,00mm.

A análise visa a determinação precisa dos teores dos elementos químicos de interesse, garantindo alta confiabilidade nos resultados. É fundamental monitorar elementos principais, como carbono, manganês e silício, por serem cruciais na obtenção direta e indireta das propriedades mecânicas do vergalhão.

O controle rigoroso de elementos residuais, notadamente enxofre e fósforo, é igualmente essencial para preservar a microestrutura e prevenir problemas durante a fabricação e aplicação futura do produto.

Adicionalmente, diversos outros elementos – incluindo cobre, cromo, níquel, molibdênio, nióbio, estanho, arsênio, vanádio, zinco e chumbo – são monitorados. Estes elementos podem estar presentes em concentrações elevadas, oriundas das sucatas utilizadas no processo de fabricação do aço.

Ressalta-se que a principal distinção na composição química entre o vergalhão destinado ao mercado nacional e o vergalhão exportado para o Peru reside na inclusão de teores mais elevados de manganês e vanádio na composição deste último.

#### **4.2.2 Ensaio De Dureza**

O ensaio de dureza Rockwell C foi conduzido ao longo da seção transversal do vergalhão de 10mm e 3/8 polegadas com distância de medição de 2mm possibilitando a determinação do perfil de microdureza das barras laminadas, da superfície das amostras até o núcleo. O equipamento empregado para a realização das medições foi o durômetro Otto Wolpert-Werke. Os procedimentos, as precauções necessárias e os índices de confiabilidade para a execução de ensaios de dureza encontram-se detalhados na norma NBR ISO 6508.

### 4.2.3 Ensaio De Tração

Os ensaios de tração foram conduzidos em conformidade com a norma ABNT NBR ISO 6892-1:2013 (Materiais metálicos - Ensaio de Tração: Método de ensaio à temperatura ambiente). Foram ensaiadas, no total, dez amostras de 10 mm CA50 e dez amostras de 3/8 exportação, além das dez amostras do 10mm CA50 com alteração nos parâmetros do tratamento térmico, utilizando uma máquina de ensaios denominada Dartec, com capacidade de aplicação de carga de 80 toneladas.

As amostras foram seccionadas em um comprimento de 500 mm e demarcadas a cada 20 mm para garantir a máxima confiabilidade na determinação do alongamento após a ruptura. A temperatura e a umidade relativa do ar no laboratório de ensaios são monitoradas e mantidas dentro dos limites especificados, a fim de não comprometer os resultados. É imperativo que tais amostras estejam isentas de empenamentos ou defeitos superficiais, como esfoliações, trincas, dobras de laminação, marcas de canal quebrado, rebarbas, entre outros, para que os resultados não sejam comprometidos. Por intermédio dos ensaios de tração, foram obtidos os resultados das seguintes propriedades mecânicas: limite de escoamento, limite de resistência, alongamento e a relação entre limite de ruptura e limite de escoamento. Os resultados foram subsequentemente comparados com as especificações estabelecidas pela norma brasileira ABNT NBR 7480 e a (NTP) 341.031 (Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 ANÁLISE QUÍMICA

As análises químicas realizadas nas amostras de 10mm CA50 (aço 1025) e 3/8 SIDERPERU (aço 1634) para exportação demonstram o atendimento integral aos requisitos estabelecidos pela norma brasileira ABNT NBR 7480/2022.

É imperativo salientar que a amostra de 3/8 (aço 1634), destinada ao mercado de exportação, cumpre adicionalmente a norma técnica peruana NTP 341.031:2019, atestando sua conformidade com os padrões internacionais.

Particular atenção foi dedicada ao parâmetro de carbono equivalente, o qual se revela crucial para a avaliação da soldabilidade do aço, em consonância com o estipulado pela ABNT NBR 7480/2022.

Ademais, ressalta-se a distinção entre os dois tipos de aço avaliados, o 1025 (para 10mm CA50) e o 1634 (3/8 SIDERPERU). O aço 1634, especificamente empregado para atender às demandas do mercado externo, exibe uma composição química diferenciada, caracterizada por um teor de carbono mais elevado ( $\approx 0,35\%$  vs.  $0,25\%$ ) em comparação ao 1025, além de um volume superior de manganês ( $\approx 1,08\%$  vs  $0,54\%$  no 1025A) e vanádio ( $0,015\%$  vs.  $0,003\%$  residual no 1025A). Esta composição otimizada confere ao aço 1634 as propriedades mecânicas exigidas para o mercado externo sem a necessidade de um tratamento térmico complementar de têmpera e auto-revenimento.

Na sequência, apresentam-se as imagens da tabela de referência da ABNT NBR 7480/2022, contendo os teores máximos permitidos para os elementos químicos, bem como os resultados reais obtidos para cada vergalhão analisado.

**Tabela 5.1 - Tabela de Referência dos elementos químicos e seus máximos teores**

Grupo Sucat a	Código Aço	Faixas	Composição química (%)																	
			C	Mn	Si	B	S	P	Cu	Cr	Ni	Mo	V	As	Nb	Sn	Pb	Zn	N (ppm)	Ceq
'III	1025 A	MÍN	0,22	0,45	0,09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,30
		Objetivar	0,24	0,45	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			0,26	0,50	0,13	-	0,035	0,020	0,28	0,20	0,10	0,030	0,010	0,010	0,025	0,030	0,005	0,015	-	-
		MÁX	0,30	0,70	0,25	-	0,050	0,040	0,50	0,45	0,30	0,10	0,10	0,050	0,050	0,200	0,050	0,050	200	0,55
III	1634 A	MÍN	0,34	1,02	0,13	-	-	-	-	-	-	-	0,013	-	-	-	-	-	-	0,53
		Objetivar	0,35	1,07	0,15	-	-	-	-	-	-	-	0,015	-	-	-	-	-	-	0,54
			0,37	1,10	0,20	-	0,035	0,030	0,200	0,150	0,080	0,015	0,017	0,015	0,015	0,045	0,015	0,015	200	0,56
		MÁX	0,38	1,12	0,25	-	0,050	0,040	0,250	0,200	0,100	0,025	0,020	0,020	0,020	0,060	0,020	0,020	300	0,59

Fonte: (NBR 7480/2022)

#### Observações:

- $Ceq. = \%C + Mn/6 + (\%Cr + \%V + \%Mo)/5 + (\%Cu + \%Ni)/15$ ;
- $Ceq.1 = \%C + \%Mn/6 + Cu/40 + \%Ni/20 + \%Cr/10 - \%Mo/50 - \%V/10$ ;

- A rinsagem dos aços listados acima deve ser realizada com nitrogênio;
- Os valores de Nitrogênio especificados são somente para orientação, não sendo motivo de reprovação.

Tabela 5.2 - Resultado da análise química realizada do vergalhão 10mm CA50

Elemento	N	C	Mn	Si	S	P	Cu	Cr	Ni	Mo	As	V	Nb	Sn
Mínimo	0.00	0.22	0.45	0.09	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mínimo Trabalho	0.00	0.22	0.45	0.09	0.010	0.005	0.100	0.050	0.040	0.007	0.002	0.001	0.001	0.010
Máximo Trabalho	150.00	0.30	0.70	0.25	0.040	0.020	0.300	0.200	0.100	0.025	0.006	0.007	0.007	0.020
Máximo	500.00	0.30	0.70	0.25	0.050	0.040	0.500	0.450	0.300	0.100	0.050	0.100	0.050	0.200
Previsto	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Obtido	95.40	0.26	0.56	0.15	0.029	0.011	0.162	0.126	0.057	0.020	0.004	0.003	0.003	0.012

Fonte: (Elaborado pelo Autor)

Tabela 5.3 - Resultado da análise química realizada do vergalhão 3/8 SIDERPERU

Elemento	CeqI	N	C	Mn	Si	S	P	Cu	Cr	Ni	Mo	V	As	Nb	Sn	Zn	Pb
Mínimo	0.53	0.00	0.34	1.02	0.13	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mínimo Trabalho	0.54	0.00	0.37	1.07	0.15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Máximo Trabalho	0.55	200.00	0.38	1.10	0.20	0.035	0.030	0.200	0.150	0.080	0.015	0.017	0.015	0.015	0.045	0.015	0.015
Máximo	0.59	300.00	0.38	1.12	0.25	0.050	0.045	0.400	0.200	0.150	0.033	0.020	0.020	0.020	0.060	0.020	0.020
Previsto	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Obtido	0.56	75.40	0.36	1.05	0.2	0.024	0.012	0.145	0.114	0.048	0.011	0.016	0.004	0.002	0.011	0.004	0.002

Fonte: (Elaborado pelo Autor)

## 5.2 MICRODUREZA

Nesta seção, são apresentados os resultados das medições de dureza Rockwell C (HRC) realizadas na seção transversal das amostras. O objetivo deste ensaio foi mapear o perfil de dureza da superfície até o núcleo, permitindo identificar a microestrutura resultante das diferentes rotas de fabricação (Têmpera Auto-Revenida versus Auto-Liga).

A Tabela 5.4 a seguir apresenta os valores médios de dureza superficial e de núcleo obtidos para os três grupos estudados, evidenciando o gradiente de propriedades.



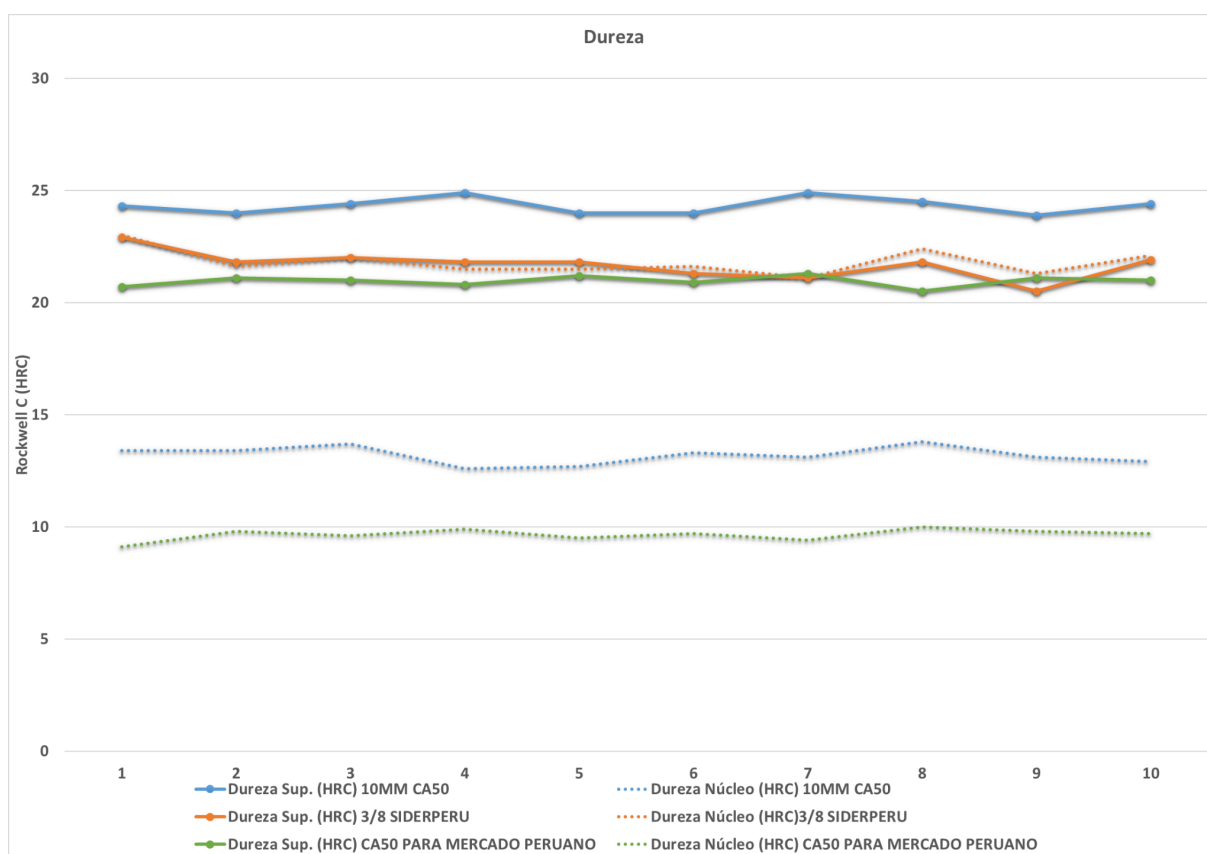
Tabela 5.4 - Resultado do ensaio de dureza

AMOSTRA	10MM CA50		3/8 SIDERPERU		CA50 PARA MERCADO PERUANO	
	Dureza Sup. (HRC)	Dureza Núcleo (HRC)	Dureza Sup. (HRC)	Dureza Núcleo (HRC)	Dureza Sup. (HRC)	Dureza Núcleo (HRC)
1	24,30	13,40	22,90	23,00	20,70	9,10
2	24,00	13,40	21,80	21,60	21,10	9,80
3	24,40	13,70	22,00	22,00	21,00	9,60
4	24,90	12,60	21,80	21,50	20,80	9,90
5	24,00	12,70	21,80	21,50	21,20	9,50
6	24,00	13,30	21,30	21,60	20,90	9,70
7	24,90	13,10	21,10	21,10	21,30	9,40
8	24,50	13,80	21,80	22,40	20,50	10,00
9	23,90	13,10	20,50	21,30	21,10	9,80
10	24,40	12,90	21,90	22,10	21,00	9,70
Média	24,33	13,20	21,69	21,81	20,96	9,65

Fonte: (Elaborado pelo Autor)

Para ilustrar a diferença no comportamento microestrutural entre os materiais, o Figura 5.1 compara visualmente a dureza da borda em relação ao centro para cada grupo.

Figura 5.1 - Gráfico do resultado do ensaio de dureza



Fonte: (Elaborado pelo Autor)

A análise dos perfis de microdureza constituiu a evidência física definitiva para distinguir as rotas de fabricação e explicar o comportamento interno dos materiais.

Para os grupos compostos pelo aço 1025A (CA-50), observou-se o perfil heterogêneo característico do processo de Têmpera Auto-Revenida, apresentando um gradiente abrupto entre a superfície martensítica dura ( $\approx 21\text{-}24$  HRC) e o núcleo macio ( $\approx 9\text{-}14$  HRC).

Neste contexto, é importante ressaltar uma observação metodológica quanto aos valores obtidos nos núcleos destas amostras. Os resultados situam-se abaixo de 20 HRC, região considerada o limite inferior de calibração da escala Rockwell C. A opção por manter a escala HRC para estas medições teve o propósito de permitir a visualização contínua e direta do gradiente de dureza em relação à superfície, garantindo a comparabilidade dos dados. Ademais, estes valores, embora baixos, apresentaram correlação física consistente com os Limites de Resistência LR\$ obtidos nos ensaios de tração para estas amostras, validando a presença de uma microestrutura ferrítico-perlítica macia no núcleo.

Em contrapartida, o Aço 1634A (Siderperu) exibiu um perfil de dureza homogêneo, com valores médios virtualmente idênticos entre superfície e núcleo ( $\approx 21,6$  HRC), validando que sua resistência mecânica provém do endurecimento por solução sólida e não de gradientes térmicos.

Adicionalmente, uma particularidade relevante observada em algumas amostras do Aço 1634A (Siderperu) foi a ocorrência pontual de valores de dureza no núcleo ligeiramente superiores aos da superfície. Este fenômeno corrobora a ausência total de têmpera, visto que em aços resfriados bruscamente a superfície é obrigatoriamente mais dura. A leve inversão observada deve-se à dispersão estatística natural do ensaio em uma microestrutura uniforme e, possivelmente, ao fenômeno metalúrgico da segregação central, onde elementos de liga como Carbono e Manganês tendem a se concentrar no centro da barra durante a solidificação contínua, elevando sutilmente a dureza local no núcleo em aços de alta liga.

### 5.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Para a análise comparativa das propriedades mecânicas, o ensaio de tração foi conduzido em um total de 30 amostras, distribuídas em três lotes distintos de dez. O primeiro lote consistiu em 10 amostras de vergalhões 10mm CA-50, representando o padrão do mercado interno (avaliado conforme a NBR 7480, Tabela 5.5). O segundo lote, de 3/8" Siderperu, foi estabelecido como a referência para os requisitos de exportação peruana (NTP 341.031, Tabela 5.6). Por fim, o terceiro lote, composto por 10 amostras de 10mm CA-50, foi submetido a um protocolo experimental com modificações nas vazões e nas pressões do processo de Têmpera Auto-Revenida, visando verificar a possibilidade de atingir os parâmetros de exportação.

Tabela 5.5 - Ensaio de Tração - Conforme Norma NBR- 7480

Bitola (mm)	Especificação			
	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Relação LR/LE	% Along. Lo=10xØ
	MIN	MIN	MIN	MIN
10,0	510	1,10 x LE= 561	1,10	8,0

Fonte: (ABNT,2020)

Observações:

1. Para o cálculo do LE e o do LR devemos considerar a seção REAL do produto, obtida através da massa linear.
2. Ø = Diâmetro Nominal.
3. O Alongamento Inicial (Lo) por Bitola, deve ser 10 x Ø Diâmetro nominal.

Tabela 5.6 - Ensaio de Tração ASTM A615-Grado 60

Nº DESIG	Ø NOM (mm)	Área Teórica (mm²)	Especificação				
			Limite de Escoamento (MPa)		Limite de Resistência (MPa)	Relação LR/LE	% Along. Lo=200mm
			MIN	MAX	MIN	MIN	MIN
3/8"	9,5	71	420	540	620	1,25	14,0

Fonte: (AREQUIPA,2022)

Observações:

1. Para o cálculo do LE e o do LR deve-se utilizar a ÁREA TEÓRICA.
2. Ø = Diâmetro Nominal.

A análise do processo demonstrou que a obtenção das propriedades de alta performance do Aço de Exportação ( $LR \geq 620$  MPa) está ancorada na distinção

fundamental entre Composição Química (Liga) e Processamento por Têmpera Auto-Revenida. A tentativa de obter as propriedades de Exportação no Aço 1025A é motivada pela redução de custos, visto que o Manganês ( $\approx 1,08\%$ ) e, especialmente, o Vanádio ( $\approx 0,015\%$ ) presentes no 1634A são elementos de liga onerosos.

O AISI 1634 comporta-se como um material de auto-liga, utilizando o alto teor de Carbono ( $\approx 0,35\%$  vs.  $0,25\%$  no 1025A) e Manganês para conferir Dureza/Resistência e Temperabilidade, respectivamente, eliminando a necessidade de Têmpera Auto-Revenida para atender à norma peruana NTP 341.031. Por outro lado, o Aço 1025A (base do CA-50), com baixos teores de liga, é obrigado a utilizar a Têmpera Auto-Revenida.

Contudo, mesmo sob o Protocolo Máximo, o processo falhou. A baixa temperabilidade resultante do menor teor de Mn ( $\approx 0,54\%$ ) impediu que o aço gerasse o aumento de Dureza/Resistência necessário sem comprometer drasticamente a ductilidade. O resultado foi um Alongamento ( $\%A \approx 12,5\%$ ) e uma Relação LR/LE ( $\approx 1,22$ ) insuficientes, evidenciando a inviabilidade técnica de atender à NTP 341.031 utilizando um aço comum de baixa liga que, originalmente, atende apenas às exigências da norma brasileira NBR 7480.

A Tabela 5.7 apresenta os dados obtidos no ensaio de tração da amostra de 10mm CA50, e a Tabela 5.8 contém os dados resultantes do ensaio de tração das amostras de 3/8 SIDERPERU.

**Tabela 5.7 - Resultado das propriedades mecânicas das amostras 10mm CA50**

10MM CA50								
AMOSTRA	ML (kg/m)	LE (MPa)	LR (MPa)	LR/LE	%A	Dureza Sup. (HRC)	Dureza Núcleo (HRC)	Status
1	0,60	603,00	726,00	1,20	18,10	24,30	13,40	APROVADO
2	0,59	601,00	732,00	1,22	19,79	24,00	13,40	APROVADO
3	0,60	617,00	731,00	1,18	17,64	24,40	13,70	APROVADO
4	0,60	602,00	709,00	1,18	18,98	24,90	12,60	APROVADO
5	0,60	583,00	709,00	1,22	18,17	24,00	12,70	APROVADO
6	0,60	581,00	744,00	1,28	16,45	24,00	13,30	APROVADO
7	0,60	613,00	716,00	1,17	17,85	24,90	13,10	APROVADO
8	0,60	587,00	737,00	1,26	18,98	24,50	13,80	APROVADO
9	0,60	600,00	726,00	1,21	17,58	23,90	13,10	APROVADO
10	0,60	617,00	711,00	1,15	19,06	24,40	12,90	APROVADO
<b>Média</b>	<b>0,60</b>	<b>600,40</b>	<b>724,10</b>	<b>1,21</b>	<b>18,26</b>	<b>24,33</b>	<b>13,20</b>	

Fonte: (Elaborado pelo Autor)

Tabela 5.8 - Resultado das propriedades mecânicas das amostras 3/8 SIDERPERU.

3/8 SIDERPERU								
AMOSTRA	ML (kg/m)	LE (MPa)	LR (MPa)	LR/LE	%A	Dureza Sup. (HRC)	Dureza Núcleo (HRC)	Status
1	0,55	495,00	696,00	1,41	16,05	22,90	23,00	APROVADO
2	0,55	473,00	685,00	1,45	16,80	21,80	21,60	APROVADO
3	0,55	475,00	700,00	1,47	15,69	22,00	22,00	APROVADO
4	0,55	473,00	686,00	1,45	15,03	21,80	21,50	APROVADO
5	0,55	472,00	673,00	1,43	15,67	21,80	21,50	APROVADO
6	0,56	496,00	712,00	1,44	15,37	21,30	21,60	APROVADO
7	0,55	489,00	701,00	1,43	15,36	21,10	21,10	APROVADO
8	0,55	479,00	697,00	1,46	17,37	21,80	22,40	APROVADO
9	0,55	519,00	682,00	1,31	15,96	20,50	21,30	APROVADO
10	0,55	479,00	698,00	1,46	17,41	21,90	22,10	APROVADO
<b>Média</b>	<b>0,55</b>	<b>485,00</b>	<b>693,00</b>	<b>1,43</b>	<b>16,07</b>	<b>21,69</b>	<b>21,81</b>	

Fonte: (Elaborado pelo Autor)

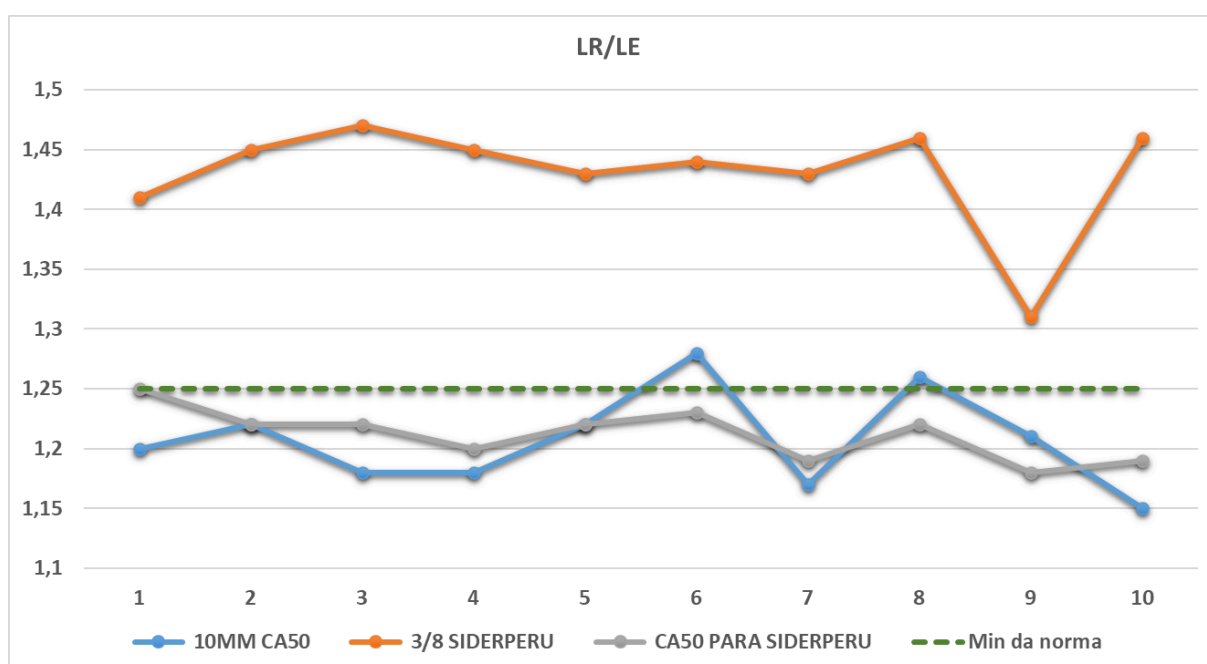
Os resultados obtidos nos ensaios de tração confirmaram que as amostras de referência (Siderperu e CA-50) atenderam plenamente às suas respectivas exigências normativas. Entretanto, o objetivo central deste estudo, que era atingir as propriedades mecânicas requeridas pela NTP 341.031 através da modificação das variáveis do tratamento térmico de têmpera auto-revenida no CA-50, não gerou resultados satisfatórios. Conforme detalhado no Tabela 5.9, que apresenta os resultados da tentativa experimental, o CA-50 modificado não conseguiu atender aos requisitos críticos de ductilidade e resistência do padrão de exportação. A inviabilidade técnica da substituição é reforçada pela análise comparativa das propriedades individuais, ilustrada nas Figuras 5.2 (Relação LR/LE), 5.3 (%Alongamento), 5.4 (Limite de Escoamento) e 5.5 (Limite de Resistência). Desta forma, o desempenho do aço 1634A de exportação, que utiliza a composição química como rota de fabricação, consolida a conclusão de que o uso de aços autoligados é mandatório para o cumprimento integral dos requisitos da NTP 341.031. Essa conclusão é sintetizada e visualizada na Figura 5.6, intitulada: Análise geral das propriedades mecânicas de todas as amostras, tomando como base a NTP 341.031.

Tabela 5.9 - Resultado das propriedades mecânicas das amostras CA50 para o mercado peruano

CA50 PARA MERCADO PERUANO								
AMOSTRA	ML (kg/m)	LE (MPa)	LR (MPa)	LR/LE	%A	Dureza Sup. (HRC)	Dureza Núcleo (HRC)	Status
1	0,60	468,00	586,00	1,25	13,90	20,70	9,10	REPROVADO (LR;%A)
2	0,60	506,00	617,00	1,22	12,10	21,10	9,80	REPROVADO (LR;LR/LE;%A)
3	0,59	507,00	619,00	1,22	12,92	21,00	9,60	REPROVADO (LR;LR/LE;%A)
4	0,60	511,00	613,00	1,20	12,38	20,80	9,90	REPROVADO (LR;LR/LE;%A)
5	0,59	506,00	616,00	1,22	12,08	21,20	9,50	REPROVADO (LR;LR/LE;%A)
6	0,59	501,00	615,00	1,23	11,91	20,90	9,70	REPROVADO (LR;LR/LE;%A)
7	0,60	519,00	619,00	1,19	11,92	21,30	9,40	REPROVADO (LR;LR/LE;%A)
8	0,59	501,00	613,00	1,22	13,04	20,50	10,00	REPROVADO (LR;LR/LE;%A)
9	0,60	518,00	609,00	1,18	11,74	21,10	9,80	REPROVADO (LR;LR/LE;%A)
10	0,59	516,00	616,00	1,19	12,64	21,00	9,70	REPROVADO (LR;LR/LE;%A)
<b>Média</b>	<b>0,60</b>	<b>505,30</b>	<b>612,30</b>	<b>1,21</b>	<b>12,46</b>	<b>20,96</b>	<b>9,65</b>	

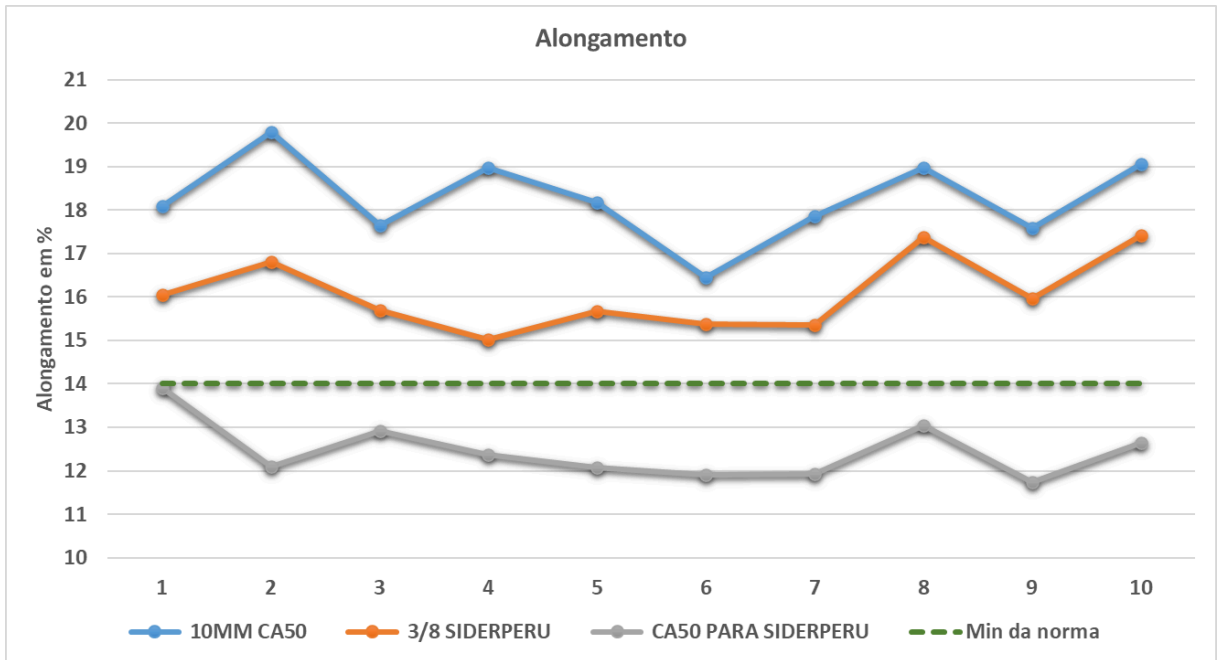
Fonte: (Elaborado pelo Autor)

Figura 5.2 - Resultado relação LR/LE de todas as amostras tomando como base a NTP 341.031



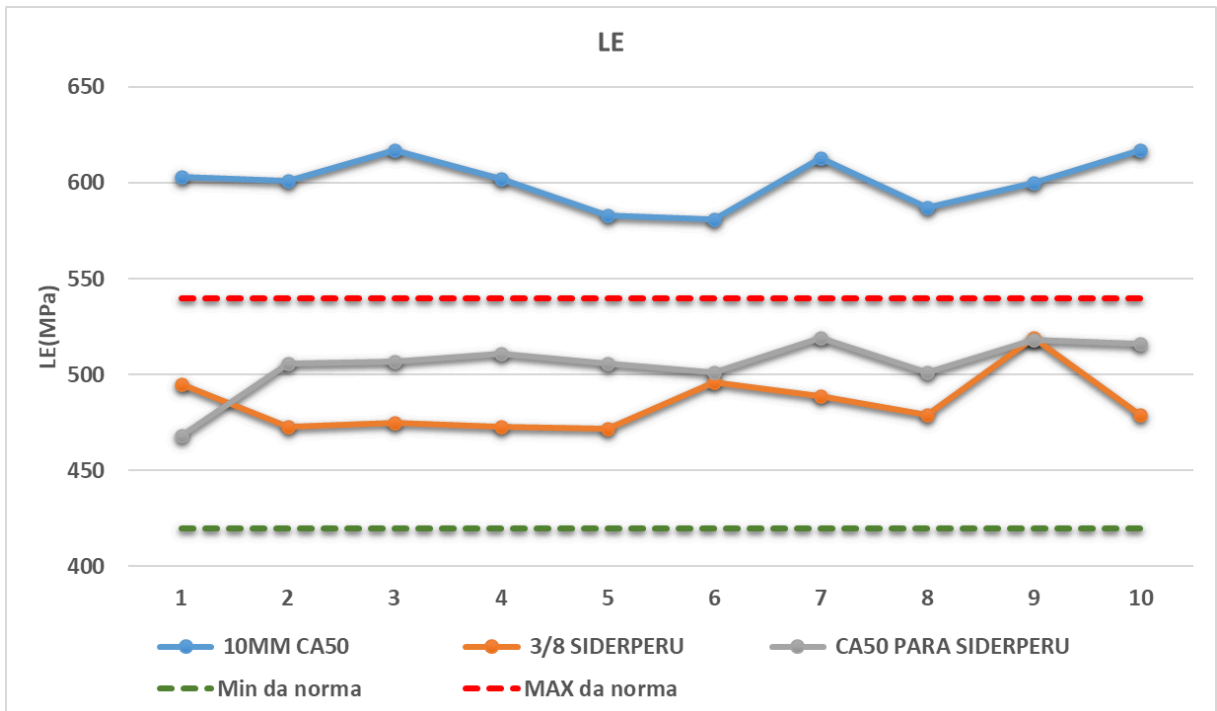
Fonte: (Elaborado pelo Autor)

**Figura 5.3 - Resultado do alongamento de todas as amostras tomando como base a NTP 341.031**



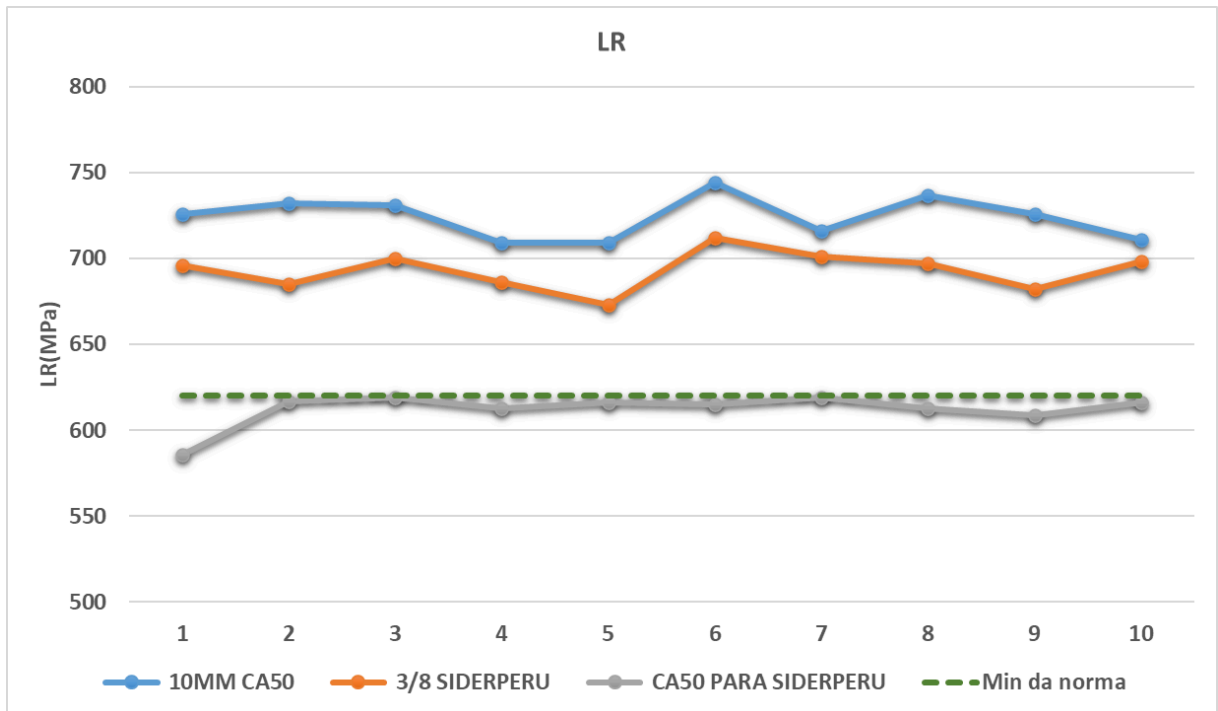
Fonte: (Elaborado pelo Autor)

**Figura 5.4 - Resultado do limite de escoamento de todas as amostras tomando como base a NTP 341.031**



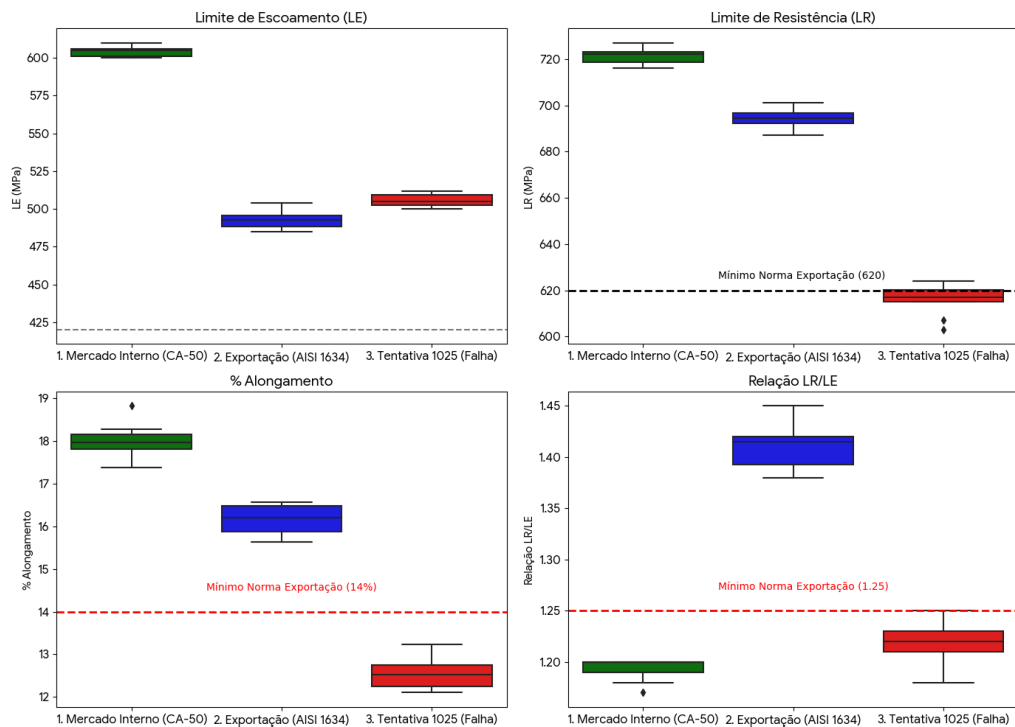
Fonte: (Elaborado pelo Autor)

**Figura 5.5 - Resultado do limite de resistência de todas as amostras tomando como base a NTP 341.031**



Fonte: (Elaborado pelo Autor)

**Figura 5.6 - Análise geral das propriedades mecânicas de todas as amostras tomando como base a NTP 341.031**



Fonte: (Elaborado pelo Autor)



A análise comparativa entre o aço 1025A (brasileiro) e o 3/8 Siderperu revela que, embora ambos atendam aos requisitos de resistência mecânica e ductilidade para o mercado nacional, existe uma discrepância crítica no desempenho voltado para exportação. O aço 1025A, processado via Têmpera Auto-Revenida, apresentou uma relação LR/LE média de 1,22, valor que se posiciona abaixo do limite mínimo de 1,25 estabelecido pela norma peruana NTP 341.031. Esse comportamento deve-se ao fato de o tratamento térmico elevar substancialmente o limite de escoamento (LE), reduzindo a margem de segurança plástica necessária para a absorção de energia em zonas de alta atividade sísmica, como é o caso do mercado peruano.

Em contrapartida, as amostras do aço 3/8 Siderperu demonstraram uma superioridade técnica clara para essa aplicação específica, com uma relação LR/LE de 1,48 e alongamento superior (19%). A presença de elementos microligantes, especialmente o Vanádio, permite que o material atinja altos índices de tenacidade sem a necessidade de uma camada martensítica periférica tão rígida quanto a do 1025A. Portanto, conclui-se que, para que o aço de baixo custo (1025A) se torne uma alternativa viável ao aço microligado de exportação, é indispensável um ajuste rigoroso nos parâmetros de resfriamento da têmpera ou uma leve alteração na carga de manganês, visando reduzir o escoamento sem sacrificar a resistência última do material.

## 6 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo central avaliar a viabilidade técnica e econômica de substituir o aço de alta liga AISI 1634 (destinado à exportação) pelo aço de baixo custo AISI 1025 (base do CA-50), mediante a otimização do processo de Têmpera Auto-Revenida. A integração das análises química, microestrutural e mecânica permitiu as seguintes conclusões definitivas:

Em síntese, o trabalho demonstra que o sucesso na produção de vergalhões é um equilíbrio delicado entre Custo Econômico e Rigor Normativo. A eficácia da Têmpera Auto-Revenida é validada para o Vergalhão CA-50 (AISI 1025), onde a resistência mínima exigida é alcançável e aceita pelo mercado interno devido à menor exigência de ductilidade.

No entanto, para as exigências do Aço de Exportação, as normas internacionais requerem maior margem de segurança sísmica. Conclui-se que a substituição do aço de alta liga pelo aço comum via tratamento térmico é tecnicamente inviável para este padrão. A chave para o desempenho reside fundamentalmente na adição estratégica de elementos de liga. O teor de Manganês no 1634A ( $\approx 1,08\%$ ), que é o dobro do encontrado no 1025A, somado ao Vanádio, garante a temperabilidade necessária. Essa composição química elimina o *trade-off* imposto pela Têmpera Auto-Revenida agressiva, assegurando que o aço atinja, de forma robusta e simultânea, os altos níveis de Resistência e Tenacidade exigidos, garantindo a integridade estrutural do produto final.

Como continuidade a esta pesquisa, sugere-se a realização de uma análise metalográfica detalhada em microscopia óptica e eletrônica de varredura (MEV). O objetivo seria correlacionar as propriedades mecânicas obtidas com a morfologia das fases presentes, quantificando a espessura da camada de martensita revenida e o tamanho de grão ferrítico no núcleo das barras de aço 1025A. Tal estudo permitiria identificar com precisão como o gradiente microestrutural influencia a relação LR/LE, possibilitando ajustes mais refinados no tempo de resfriamento e na pressão da água durante o processo de Têmpera Auto-Revenida, visando aproximar o desempenho do aço nacional aos requisitos de ductilidade exigidos pelas normas peruanas. Outra linha de investigação promissora seria o estudo da viabilidade técnica de aços com composições intermediárias, que busquem um equilíbrio entre custo e desempenho sem depender exclusivamente de um tratamento térmico severo. Sugere-se testar ligas de baixo custo com teores residuais de elementos refinadores ou variações no teor de silício e manganês que não atinjam o custo do aço microligado com vanádio. Esta análise permitiria verificar se uma base metalúrgica ligeiramente superior ao 1025A, combinada com uma têmpera menos agressiva, seria capaz de atender consistentemente à relação LR/LE de 1,25, garantindo a conformidade normativa para zonas sísmicas de forma economicamente competitiva.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AREQUIPA, Aceros. Fierro Corrugado ASTM A615-Grado 60. **NTP 341.031**, v. 94, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação. Rio de Janeiro, 2020.

ALTO-FORNO. *Altoforno*. Disponível em: <https://www.scribd.com/document/264444774/Altoforno>. Acesso em: 12 jul. 2025.

BRASIL. Ministério da Educação (MEC). Rede e-Tec Brasil. Siderurgia. Redeetec MEC, 16 out. 2012. Disponível em: [https://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo\\_ctrl\\_proc\\_indust/tec\\_metal/siderurgia/161012\\_siderurgia.pdf](https://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_ctrl_proc_indust/tec_metal/siderurgia/161012_siderurgia.pdf). Acesso em: 12 jul. 2025.

CALLISTER JR, William D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5. Ed. LTC – Livros Técnico e Científico Editora S. A., Rio de Janeiro, 2002.

CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos, 7. ed. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2005.

CHIAVERINI, V. Tratamentos térmicos das ligas metálicas. TercArt Editora Ltda, São Paulo, 2003.

COLPAERT, Hubertus. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 4ª edição. Edgard Blucher, São Paulo, 2008.

COSTA, André Luiz V. et al. Aços e ligas especiais. Editora Blucher, 2010

DA SILVEIRA RIZZO, Ernandes Marcos. **Processos de laminação dos aços: uma introdução**. ABM, 2007.

DA SILVEIRA RIZZO, ERNANDES MARCOS. Introdução aos processos Siderúrgicos. **São Paulo**, 2005.

DAROIT, M. Estudo de Aço Microligado ao vanádio para a produção de barra nervurada para concreto armado com característica de soldabilidade segundo a norma ABNT NBR 8965:1985. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica). UFRS, Porto Alegre, 2012.

ALVES FILHO, Cláudio Henrique Macedo Alves. Análise de Influência da Taxa de Resfriamento no Gradiente Microestrutural de Barras Laminadas a Quente Tratadas Termicamente. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). PUCPR. Curitiba, 2004.

FREITAS, Paulo Sérgio de. Tratamento Térmico dos Metais. SENAI-SP editora. São Paulo, 2014.

GOMES, Rodrigo da Silveira. Análise dos impactos ambientais e da sustentabilidade em usinas siderúrgicas integradas a coque. 2016.

LOURENÇO, J. P. Florindo. Estudo do comportamento de varões de aço para betão obtidos através do processo tempcore. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Materiais). Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Portugal, 2012.

MACHADO, M. et al. Siderurgia para não siderúrgicos. Espírito Santo: IFES (Instituto Federal do Espírito Santo), 2013.

MOURÃO, M. Breda. **Fundamentos da Siderurgia**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. São Paulo, 2013.

MSPC informações técnicas. Têmpera e Revenido. São Paulo, 2005. Disponível em: <http://www.mspc.eng.br>  
Acesso em: 12 jul. 2025.

NUNES, L. Miranda. Desenvolvimento de aço microligado para a produção de vergalhão nervurado. Dissertação. PUC-RJ, Rio de Janeiro, 2009.

SILVA, André Luiz da Costa; MEI, Paulo Roberto. Aços e ligas especiais. 2ª edição. **Sumaré–SP. Editora Eletrometal SA Metais Especiais**, 1988.

SCHEID, Adriano. Aço – Fabricação, Transformações e Usos. UFPR, Curitiba, 2007.

TAMM, H. (2003). Manual técnico do Thermex -HSE. Hennigsdorfer Stahl Engineering, 1988.