



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS**  
**MATERIAIS**

**IRANNILDO WALTER GONDIM JÚNIOR**

**DESENVOLVIMENTO DO FIO-MÁQUINA COM O AÇO 1010 PARA PRODUÇÃO**  
**DE VERGALHÃO CA60 EM LAMINADORES A FRIO**

**FORTALEZA**

**2025**

IRANNILDO WALTER GONDIM JÚNIOR

DESENVOLVIMENTO DO FIO-MÁQUINA COM O AÇO 1010 PARA PRODUÇÃO DE  
VERGALHÃO CA60 EM LAMINADORES A FRIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais. Área de concentração: Processos de transformação e degradação de materiais.

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug.

FORTALEZA  
2025

IRANNILDO WALTER GONDIM JÚNIOR

DESENVOLVIMENTO DO FIO-MÁQUINA COM O AÇO 1010 PARA PRODUÇÃO DE  
VERGALHÃO CA60 EM LAMINADORES A FRIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais. Área de concentração: Processos de transformação e degradação de materiais.

Aprovada em: 23/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Mauro Andres Cerra Florez  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco José dos Santos Oliveira  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado do Ceará (IFCE)

A Deus.

Aos meus pais, Irannildo e Joana.

Aos meus filhos, Levi e Davi.

"Não importa tanto o tema da tese quanto a experiência de trabalho que ela comporta. ”  
(ECO, 2001, p.13)

## RESUMO

Atualmente o mercado do aço está cada vez mais competitivo, onde cada minuto a mais de produção é um grande ganho de resultados financeiros. No ano de 2022 uma usina siderúrgica do Ceará, utilizava fio-máquina 5,5mm de aço 1008 para produzir vergalhões CA60 de 3,40mm e fio-máquina 5,5mm de aço 1012 para produzir vergalhões CA60 4,20mm, duas matérias primas diferentes, para dois produtos diferentes, entretanto esses materiais apresentavam oportunidades como por exemplo, dificuldade de atender os requisitos de propriedades da norma brasileira ABNT NBR 7480 que traz os requisitos mínimos dos vergalhões, logo se tem a necessidade de se desenvolver uma nova tecnologia para produção desse material. Esse trabalho tem o intuito de desenvolver um fio-máquina no aço 1010 para que ele se adeque ao processo de laminação a quente e posteriormente o processo de laminação a frio, para que durante o processo de encruamento alcance as propriedades desejadas, diminuindo significativamente a geração de produtos não conformes, além de ter um aço único que passaria a produzir tanto vergalhões CA60 de 3,40mm e 4,20mm. Esse desenvolvimento foi realizado com a produção de um lote piloto de 30 toneladas do aço SAE 1010, onde foram testados três valores de temperatura durante a laminação a quente e posteriormente submetidos ao processo de encruamento (laminação a frio) reduzindo sua seção para 4,20mm e 3,40mm. A validação desse material ocorreu por meio de ensaios de tração realizados em uma máquina calibrada e com utilização de extensômetro, além da caracterização do material para cada parâmetro de temperatura aferindo o seu tamanho de grão que é fator determinante para as características como o limite de escoamento. Os resultados mostraram que quanto maior a temperatura de laminação a quente, teremos o aumento do tamanho de grão que conseqüentemente melhora os valores da relação elástica do material, que é o limite de ruptura dividido pelo limite de escoamento, parâmetro este que é normativo e se tem muita dificuldade de conseguir alcançá-lo utilizando aços diferentes, principalmente o 1012, com isso evidenciar que a temperatura de laminação a quente é fator determinante para o processo de laminação a frio favorecendo a obtenção da relação elástica adequada para o produto.

Palavras-chave: laminação a quente; laminação a frio, fio-máquina; CA60.

## ABSTRACT

Today's steel market is increasingly competitive, where every extra minute of production is a huge gain in financial results. In 2022, a steel mill in Ceará used 5.5mm 1008 steel wire rod to produce 3.40mm CA60 rebars and 5.5mm 1012 steel wire rod to produce 4.20mm CA60 rebars, two different raw materials for two different products. However, these materials presented opportunities, such as difficulties in meeting the property requirements of the Brazilian standard ABNT NBR 7480, which sets out the minimum requirements for rebar, so there was a need to develop a new technology for producing this material. The aim of this work is to develop a wire rod in 1010 steel so that it is suitable for the hot rolling process and then the cold rolling process, so that during the hardening process it achieves the desired properties, significantly reducing the generation of non-conforming products, as well as having a single steel that would produce both 3.40mm and 4.20mm CA60 rebar. This development was carried out by producing a pilot batch of 30 tonnes of SAE 1010 steel, where three temperature values were tested during hot rolling and then subjected to the hardening process (cold rolling), reducing its section to 4.20mm and 3.40mm. This material was validated by means of tensile tests carried out on a calibrated machine using an extensometer, as well as characterising the material for each temperature parameter by measuring its grain size, which is a determining factor for characteristics such as the yield strength. The results showed that the higher the hot rolling temperature, the larger the grain size, which consequently improves the values of the material's elastic ratio, which is the breaking limit divided by the yield limit, a parameter that is normative and which is very difficult to achieve using different steels, especially 1012, thus showing that the hot rolling temperature is a determining factor for the cold rolling process, favouring the achievement of the appropriate elastic ratio for the product

Keywords: hot rolling; cold rolling; wire rod; CA60.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática da laminação a quente. ....	16
Figura 2 – Ilustração do processo de trefilação .....	17
Figura 3 – Esquema de funcionamento de redução da área do material laminado .....	18
Figura 4 – Propriedades mecânicas em função da temperatura de laminação a quente: limite de escoamento e alongamento (média $\pm$ D.P.).....	25
Figura 5 – Limite de resistência à tração em função da temperatura de laminação a quente...	26
Figura 6 – Relação elástica em função da temperatura de laminação a quente.....	27
Figura 7 – Síntese dos resultados mecânicos em função da temperatura de laminação a quente .....	29

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço SAE 1010.....	20
Tabela 2 – Matriz 5W2H do procedimento experimental (continua).....	20
Tabela 2 – Matriz 5W2H do procedimento experimental (continua).....	21
Tabela 2 – Matriz 5W2H do procedimento experimental (conclusão).....	22
Tabela 3 – Resultado dos ensaios mecânicos dos vergalhões CA60.....	24
Tabela 4 – Requisitos mecânicos da norma ABNT NBR 7480 para vergalhões CA60 (continua).....	27
Tabela 4 – Requisitos mecânicos da norma ABNT NBR 7480 para vergalhões CA60 (conclusão).....	28
Tabela 5 – Avaliação da conformidade dos resultados obtidos.....	28

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFC	Universidade Federal do Ceará
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
5W2H	Ferramenta de gestão da qualidade
CA60	Categoria de aço para concreto armado
CA	Concreto armado
SAE	Society of Automotive Engineers
FM	Fio máquina
GG	Gerdau
IBS	Instituto Brasileiro de Siderurgia
LE	Limite de escoamento
LR	Limite de resistência
REL	Relação elástica

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>1.1 Contextualização</b> .....	12
<b>1.2 O problema</b> .....	12
<b>1.3 Objetivo</b> .....	13
<i>1.3.1 Objetivo Geral</i> .....	13
<i>1.3.2 Objetivos Específicos</i> .....	13
<b>1.4 Delimitação do Estudo</b> .....	13
<b>1.5 Justificativa do Estudo</b> .....	14
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	14
<b>2.1 Processos de conformação mecânica</b> .....	14
<i>2.1.1 Laminação</i> .....	15
<i>2.1.1.1 Laminação a quente</i> .....	15
<i>2.1.1.2 Laminação a frio</i> .....	16
<i>2.1.1.2.1 Laminação a frio em cassetes laminadores</i> .....	17
<i>2.1.1.2.2 Tamanho de grão e propriedades mecânicas</i> .....	18
<i>2.1.2 Relação elástica e requisitos normativos</i> .....	18
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	19
<b>3.2 Processos metodológicos</b> .....	20
<b>3.3 Processo de laminação a frio</b> .....	22

<b>3.4 Caracterização microestrutural .....</b>	<b>23</b>
<b>3.5 Ensaio mecânico.....</b>	<b>23</b>
<b>3.6 Análise dos resultados.....</b>	<b>23</b>
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>24</b>
<b>4.1 Resultados dos ensaios mecânicos .....</b>	<b>24</b>
<b>4.3 Limite de resistência à tração .....</b>	<b>26</b>
<b>4.4 Relação elástica dos vergalhões CA60.....</b>	<b>26</b>
<b>4.5 Discussão integrada dos resultados .....</b>	<b>27</b>
<b>4.6 Discussão dos resultados.....</b>	<b>29</b>
<b>4.7 Considerações finais do capítulo.....</b>	<b>30</b>
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>30</b>
<b>5.1 Conclusão .....</b>	<b>30</b>
<b>5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>31</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>32</b>

## **1 INTRODUÇÃO**

### **1.1 Contextualização**

O setor siderúrgico brasileiro enfrenta, nas últimas décadas, um cenário de elevada competitividade, no qual a eficiência produtiva, a redução de custos e a garantia da qualidade dos produtos tornam-se fatores estratégicos para a sustentabilidade das empresas. Nesse contexto, cada etapa do processo produtivo do aço deve ser cuidadosamente controlada, uma vez que pequenas variações operacionais podem impactar significativamente as propriedades mecânicas do produto final e, conseqüentemente, sua conformidade com as normas técnicas vigentes.

Na construção civil, os vergalhões de aço destinados ao concreto armado exercem papel fundamental na resistência e durabilidade das estruturas. Dentre as categorias disponíveis no mercado, o vergalhão CA60 destaca-se por apresentar elevada resistência mecânica, permitindo a otimização de projetos estruturais, a redução do consumo de material e o aumento da eficiência construtiva. A obtenção desse produto, entretanto, depende diretamente da qualidade do fio-máquina utilizado como matéria-prima, bem como do controle adequado dos processos de laminação a quente e a frio.

Tradicionalmente, as usinas siderúrgicas brasileiras utilizam diferentes classes de aços carbono, como os aços SAE 1008 e SAE 1012, para a produção de fio-máquina destinado à fabricação de vergalhões CA60 em diferentes bitolas. Essa prática, embora consolidada, pode gerar desafios operacionais, especialmente relacionados à variabilidade das propriedades mecânicas, ao atendimento dos requisitos normativos e ao aumento da complexidade do processo produtivo.

### **1.2 O problema**

A utilização de diferentes classes de aço para a produção de vergalhões CA60 pode resultar em dificuldades no atendimento aos requisitos estabelecidos pela norma ABNT NBR 7480, especialmente no que se refere à relação elástica, definida como a razão entre o limite de resistência e o limite de escoamento. Esse parâmetro é fundamental para garantir o desempenho mecânico adequado do vergalhão em aplicações estruturais e, ao mesmo tempo, representa um dos principais desafios no controle da qualidade do produto final.

Além disso, a variabilidade microestrutural associada às condições de laminação a quente, como temperatura, velocidade de deformação e taxa de resfriamento, influencia diretamente o tamanho de grão do fio-máquina, afetando propriedades como resistência, ductilidade e comportamento durante o processo de encruamento na laminação a frio. A ausência de um controle mais refinado de tensão pode resultar em maior geração de produtos não conformes, retrabalho e perdas econômicas.

Dessa forma, torna-se necessário investigar alternativas tecnológicas que permitam a padronização da matéria-prima, a simplificação do processo produtivo e a melhoria das propriedades mecânicas do vergalhão CA60, assegurando simultaneamente a conformidade normativa e a eficiência industrial.

### **1.3 Objetivo**

#### ***1.3.1 Objetivo Geral***

Investigar a influência da temperatura de laminação a quente do fio-máquina de aço SAE 1010 nas propriedades mecânicas e microestruturais do vergalhão CA60 produzido por laminação a frio.

#### ***1.3.2 Objetivos Específicos***

Desenvolver fio-máquina a partir do aço SAE 1010, avaliando sua adequação aos processos de laminação a quente e a frio;

Analisar o efeito de diferentes temperaturas de laminação a quente sobre o tamanho de grão do fio-máquina;

Avaliar as propriedades mecânicas do fio-máquina e do vergalhão CA60 obtido, por meio de ensaios de tração;

Verificar a influência da microestrutura do fio-máquina no comportamento mecânico do vergalhão CA60, com ênfase na relação elástica;

Comparar os resultados obtidos com os requisitos estabelecidos pela norma ABNT NBR 7480.

### **1.4 Delimitação do Estudo**

Este estudo limita-se à análise do aço carbono SAE 1010 aplicado à produção de fio-máquina com diâmetro de 5,5 mm, destinado à fabricação de vergalhão CA60 nas bitolas de 4,20 mm e 3,40 mm. As investigações concentram-se na avaliação de três diferentes temperaturas de laminação a quente, mantendo-se constantes os demais parâmetros operacionais do processo produtivo.

Não fazem parte do escopo deste trabalho análises econômicas detalhadas, estudos comparativos com aços microligados ou avaliações de desempenho estrutural do vergalhão em elementos de concreto armado.

### **1.5 Justificativa do Estudo**

A relevância deste estudo reside na busca por soluções tecnicamente viáveis e industrialmente aplicáveis para a produção de vergalhões CA60 com propriedades mecânicas adequadas e maior estabilidade de processo. A utilização de um único tipo de aço para a fabricação de diferentes bitolas de vergalhão pode contribuir significativamente para a simplificação do fluxo produtivo, a redução de custos operacionais e a diminuição da geração de produtos não conformes.

Do ponto de vista acadêmico, o trabalho contribui para o aprofundamento do conhecimento acerca da relação entre parâmetros de processamento termomecânico, microestrutura e propriedades mecânicas dos aços carbono aplicados à construção civil. Sob a perspectiva industrial, os resultados obtidos podem auxiliar no desenvolvimento de rotas de processamento mais eficientes, favorecendo a competitividade das usinas siderúrgicas e a melhoria da qualidade dos produtos ofertados ao mercado.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

O referencial teórico tem como objetivo fundamentar cientificamente os conceitos relacionados aos processos de conformação mecânica, à laminação a quente e a frio, à produção do fio-máquina e à influência da microestrutura nas propriedades mecânicas dos aços carbono. Esses fundamentos são essenciais para compreender os efeitos da temperatura de laminação a quente na obtenção de vergalhões CA60 produzidos a partir do aço SAE 1010, bem como para subsidiar a análise dos resultados experimentais apresentados posteriormente.

### **2.1 Processos de conformação mecânica**

Os processos de conformação mecânica dos metais consistem na alteração da forma geométrica de um material sólido por meio da aplicação de esforços mecânicos superiores ao seu limite de escoamento, sem que haja perda significativa de massa. Esses processos são amplamente utilizados na indústria metalúrgica por permitirem elevada produtividade e melhor aproveitamento do material (DIETER, 1986; CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

Durante a conformação, o material sofre deformação plástica, resultando no movimento e multiplicação de discordâncias, o que provoca alterações microestruturais responsáveis pela modificação das propriedades mecânicas. Parâmetros como temperatura, taxa de deformação e grau de deformação exercem influência direta no comportamento mecânico final do material (ASM INTERNATIONAL, 1993).

Os processos de conformação são geralmente classificados em conformação a quente e a frio, dependendo da temperatura em que a deformação ocorre em relação à temperatura de recristalização do material.

### ***2.1.1 Laminação***

A laminação é um processo de conformação mecânica no qual o material é submetido à compressão entre cilindros rotativos, promovendo a redução da seção transversal e o aumento do comprimento. Trata-se de um dos processos mais importantes da indústria siderúrgica, sendo empregado tanto na produção de semiacabados quanto de produtos finais (CHIAVERINI, 2012).

Além da alteração dimensional, a laminação promove mudanças microestruturais significativas, como o alongamento dos grãos, o aumento da densidade de discordâncias e, dependendo das condições de processamento, a recristalização do material. Essas transformações influenciam diretamente propriedades como resistência mecânica, ductilidade e tenacidade (DIETER, 1986; HERTZBERG, 2012).

#### ***2.1.1.1 Laminação a quente***

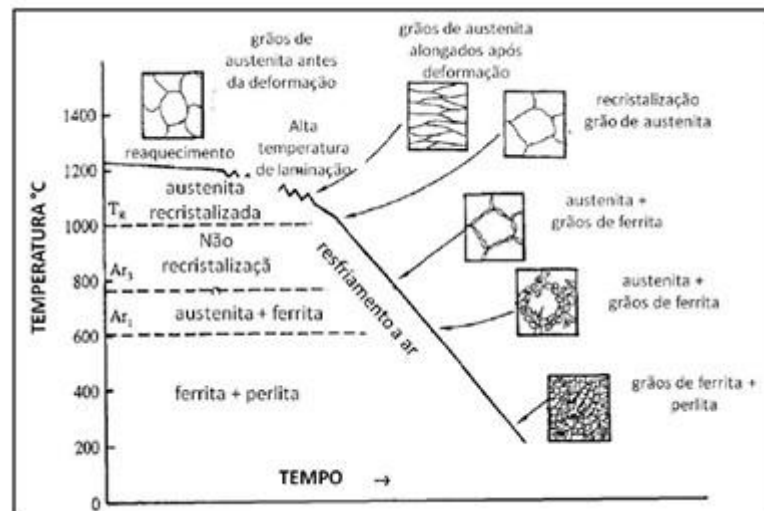
A laminação a quente é realizada a temperaturas superiores à temperatura de recristalização do aço, geralmente acima de 1000 °C. Nessas condições, o material apresenta menor resistência à deformação, permitindo grandes reduções de área com menores esforços mecânicos (CHIAVERINI, 2012).

Durante esse processo, ocorrem fenômenos de recristalização dinâmica e estática, que promovem a renovação da microestrutura e influenciam diretamente o tamanho de grão final. A temperatura de laminação a quente é um parâmetro crítico, pois temperaturas elevadas tendem a favorecer o crescimento de grão, enquanto temperaturas mais baixas contribuem para o refinamento microestrutural, embora aumentem as cargas nos laminadores (TOTEN; HOWES; INOUE, 2002).

Além da temperatura, fatores como velocidade de deformação, tempo entre passes e condições de resfriamento após a laminação exercem influência significativa na microestrutura do fio-máquina. Sistemas de resfriamento controlado, como o processo STELMOR, são amplamente utilizados para promover maior uniformidade estrutural e estabilidade das propriedades mecânicas (ASM INTERNATIONAL, 1993).

A Figura 1 apresenta uma representação esquemática do processo de laminação a quente, evidenciando a redução da seção transversal do material entre os cilindros laminadores.

Figura 1 – Representação esquemática da laminação a quente.



Fonte: TEOH (1995).

### 2.1.1.2 Laminação a frio

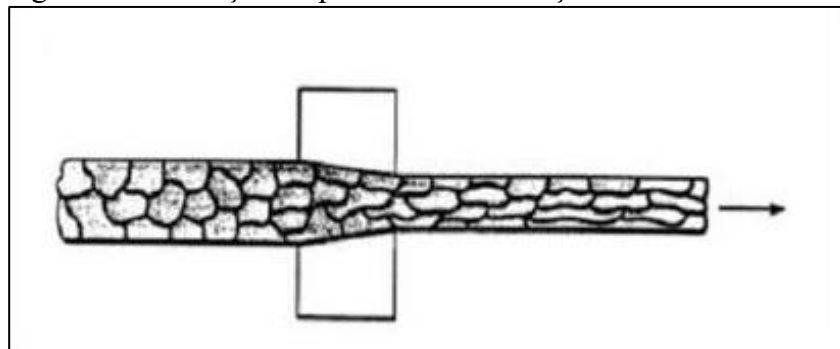
A laminação a frio, também conhecida como trefilação ou laminação em cassetes, é realizada abaixo da temperatura de recristalização do material. Nesse processo, o fio-máquina é submetido a sucessivas reduções de área por meio de fieiras ou conjuntos de rolos, resultando em aumento significativo da resistência mecânica devido ao fenômeno de encruamento.

Durante a deformação a frio, ocorre o aumento da densidade de discordâncias e o alongamento dos grãos na direção da deformação, o que eleva o limite de escoamento e o limite de resistência do material. Contudo, esse aumento de resistência é acompanhado por uma redução da ductilidade, tornando essencial o controle das reduções por passe e da temperatura gerada pelo atrito durante o processo.

O uso de cassetes laminadores em substituição às fieiras convencionais tem sido uma alternativa tecnológica para reduzir o desgaste das ferramentas e melhorar a estabilidade do processo. Nesse sistema, a redução de área ocorre por meio do contato entre o material e discos de metal duro dispostos de forma angular, promovendo deformação mais uniforme e menor geração de calor por atrito.

A Figura 2 ilustra o processo de trefilação, destacando a passagem do material por uma série de fieiras com diâmetros progressivamente menores.

Figura 2 – Ilustração do processo de trefilação



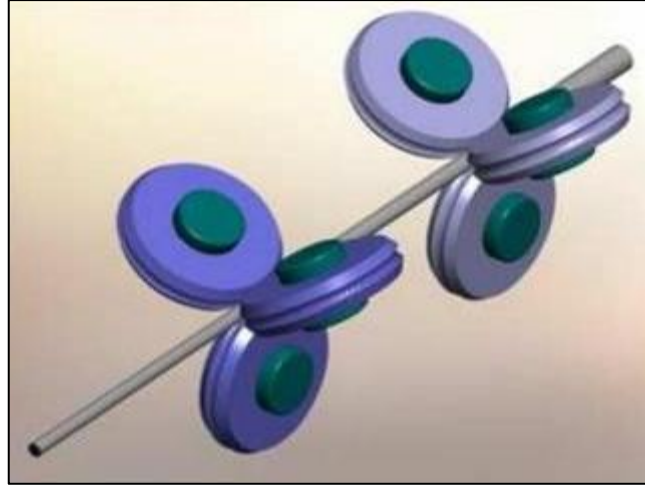
Fonte: SHACKELFOLD (1996).

#### 2.1.1.2.1 Laminação a frio em cassetes laminadores

Uma alternativa tecnológica ao uso de fieiras convencionais é a laminação a frio por meio de cassetes laminadores, nos quais a redução de área ocorre pelo contato do material com discos de metal duro dispostos de forma angular. Esse sistema promove uma deformação mais uniforme, menor geração de calor por atrito e redução do desgaste das ferramentas.

A Figura 3 apresenta um esquema de funcionamento do sistema de redução de área em cassetes laminadores, evidenciando a disposição dos discos e a conformação do material.

Figura 3 – Esquema de funcionamento de redução da área do material laminado



Fonte: ROCHA (2012).

#### 2.1.1.2.2 Tamanho de grão e propriedades mecânicas

O tamanho de grão é um dos principais fatores microestruturais que influenciam as propriedades mecânicas dos aços. De acordo com a relação de Hall–Petch, a redução do tamanho de grão resulta no aumento do limite de escoamento, uma vez que os contornos de grão atuam como barreiras ao movimento das discordâncias (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

Entretanto, grãos excessivamente refinados podem comprometer a ductilidade e a relação elástica do material, aspecto relevante para vergalhões utilizados em concreto armado. Dessa forma, o controle do tamanho de grão do fio-máquina torna-se essencial para equilibrar resistência mecânica e comportamento dúctil no produto final (DIETER, 1986).

A temperatura de laminação a quente exerce influência direta no crescimento dos grãos austeníticos, sendo, portanto, um parâmetro estratégico para o ajuste das propriedades mecânicas do fio-máquina e do vergalhão obtido por laminação a frio (TOTEN; HOWES; INOUE, 2002).

#### ***2.1.2 Relação elástica e requisitos normativos***

A relação elástica, definida como a razão entre o limite de resistência e o limite de escoamento, é um parâmetro fundamental para o desempenho dos vergalhões utilizados em

estruturas de concreto armado. Valores adequados dessa relação garantem comportamento dúctil e maior segurança estrutural em situações de sobrecarga (ABNT, 2007).

A norma ABNT NBR 7480 estabelece os requisitos mínimos para as propriedades mecânicas dos vergalhões CA60, incluindo limites específicos para resistência, escoamento e relação elástica. O atendimento a esses requisitos representa um desafio industrial, especialmente quando se busca padronizar a matéria-prima e reduzir a variabilidade do processo produtivo.

Nesse contexto, o controle da microestrutura do fio-máquina por meio do ajuste da temperatura de laminação a quente apresenta-se como uma alternativa viável para a obtenção de vergalhões CA60 com propriedades mecânicas estáveis e conformes às exigências normativas.

### **3 METODOLOGIA**

Esta pesquisa caracteriza-se como um estudo experimental de natureza aplicada, com abordagem quantitativa, desenvolvido com o objetivo de avaliar a influência da temperatura de laminação a quente do fio-máquina de aço SAE 1010 nas propriedades mecânicas e microestruturais do vergalhão CA60 produzido por laminação a frio. A metodologia adotada foi estruturada de modo a garantir a reprodutibilidade dos ensaios, o controle dos parâmetros de processo e a confiabilidade dos resultados obtidos, em conformidade com práticas consagradas na literatura metalúrgica.

#### **3.1 Material utilizado**

O material empregado neste estudo foi o aço carbono SAE 1010, amplamente utilizado na indústria siderúrgica devido à sua boa conformabilidade e ao equilíbrio entre resistência mecânica e ductilidade. Sua composição química está apresentada na Tabela 1. A escolha desse aço justifica-se pela possibilidade de padronização da matéria-prima para a produção de diferentes bitolas de vergalhão CA60, reduzindo a variabilidade do processo produtivo (CHIAVERINI, 2012).

Os tarugos de aço SAE 1010 utilizados como matéria-prima apresentaram composição química compatível com as especificações normativas, sendo processados industrialmente para a obtenção do fio-máquina com diâmetro nominal de 5,5 mm.

Tabela 1 – Composição química do aço SAE 1010

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Outros
0,08 – 0,13	0,30 – 0,60	0,030	0,050	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2 Processos metodológicos

Os procedimentos metodológicos foram organizados em etapas sequenciais, de modo a garantir o controle das variáveis de processo e a rastreabilidade dos dados obtidos ao longo da pesquisa. As etapas envolvem desde a definição dos parâmetros de laminação a quente até a realização dos ensaios mecânicos nos vergalhões produzidos.

A Figura do fluxo metodológico está descrita de forma estruturada na Tabela 2, que apresenta a metodologia da pesquisa utilizando a ferramenta 5W2H.

Tabela 2 – Matriz 5W2H do procedimento experimental (continua)

O que?	Por que?	Onde ?	Quando?	Quem?	Como?
Produzir um lote piloto com 30 toneladas de tarugo no aço SAE 1010.	Para testar o comportamento do aço nos processos a quente e frio, no processo analisado na usina siderúrgica. A ideia é substituir os aços 1008 e 1012 no processo em questão.	Maracanaú	Abril/23	Irannildo	A condição será feita em uma aciaria que usará sucata comum para a produção desses tarugos.
Transportar para outra usina que tenha laminação.	Para realizar o processo de laminação.	Caucaia	Abril/23	Irannildo	Contratação e faturamento dos tarugos para transportar.
Laminar os tarugos a quente, 10 toneladas na temperatura de 770°C. Para se obter o fio-máquina.	Para testar suas propriedades mecânicas e comparar os resultados quando se obter o produto final.	Caucaia	Maio/2023	Irannildo	Aquecendo o tarugo em forno de reaquecimento até 1100°C e no final da laminação a quente o produto chegar a 770°C.
Retirar amostras do fio máquina laminado a 770°C.	Para conseguir realizar os ensaios mecânicos e metalográficos que por sua vez são relevantes para o estudo em questão.	Caucaia	Maio/2023	Irannildo	Após o material terminar de laminar, será tirada uma amostra da cabeça e uma da cauda de 600mm de comprimento. Do início, do meio e do fim da corrida.
Laminar os tarugos a quente, 10 toneladas na temperatura de 840°C. Para se obter o fio-máquina.	Para testar suas propriedades mecânicas e comparar os resultados quando se obter o produto final.	Caucaia	Maio/2023	Irannildo	Aquecendo o tarugo em forno de reaquecimento até 1100°C e no final da laminação a quente o produto chegar a 840°C.

Tabela 3 – Matriz 5W2H do procedimento experimental (continua)

O que?	Por que?	Onde ?	Quando?	Quem?	Como?
Retirar amostras do fio máquina laminado a 840°C.	Para conseguir realizar os ensaios mecânicos que são relevantes para o estudo em questão.	Caucaia	Maio/2023	Irannildo	Após o material terminar de laminar, será tirada uma amostra da cabeça e uma da cauda de 600mm de comprimento. Do início, do meio e do fim da corrida.
Laminar os tarugos a quente, 10 toneladas na temperatura de 920°C. Para se obter o fio-máquina.	Para testar suas propriedades mecânicas e comparar os resultados quando se obter o produto final.	Caucaia	Maio/2023	Irannildo	Aquecendo o tarugo em forno de reauecimento até 1100°C e no final da laminação a quente o produto chegar a 920°C.
Retirar amostras do fio máquina laminado a 920°C.	Para conseguir realizar os ensaios mecânicos que são relevantes para o estudo em questão.	Caucaia	Maio/2023	Irannildo	Após o material terminar de laminar, será tirada uma amostra da cabeça e uma da cauda de 600mm de comprimento. Do início, do meio e do fim da corrida.
Realizar ensaios de tração das amostras coletadas fio-máquina laminado a 770°C, 840°C e 920°C.	Para se obter os resultados de propriedades mecânicas.	Caucaia	(Jun/Jul)/2023	Irannildo	Utilizando a máquina de tração do modelo Kratos serão ensaiadas 15 amostras de fio-máquina. Serão 5 amostras de cada condição temperatura.
Laminar o fio máquina em um laminador a frio.	Para se obter o vergalhão CA60 de 4,20mm.	Caucaia	Agosto/2023	Irannildo	O fio máquina irá passar por duas reduções de área transversal, a primeira de 28,21% vindo a ficar com diâmetro de 4,66mm, logo em seguida outra redução de 19,92%, ficando assim, com um diâmetro final de 4,17 mm aproximadamente.
Retirar amostras do vergalhão CA60 de 4,20mm.	Para realizar ensaios de tração.	Caucaia	Agosto/23	Irannildo	Serão retiradas 5 amostras para cada condição de temperatura do fio-máquina com 600mm de comprimento cada, sendo assim um total de 15 amostras.
Realizar ensaios de tração das amostras coletadas do vergalhão CA60 de 4,20mm.	Para se obter os resultados de propriedades mecânicas.	Caucaia	(Set/Out/Nov)/23	Irannildo	Utilizando a máquina de tração do modelo Kratos serão ensaiadas 27 amostras de vergalhão CA60.
Embutir amostras do fio-máquina.	Para realizar ensaios metalográficos.	Maracanaú	Novembro/23	Irannildo	Utilizando a baquelite e a máquina de embutimento da marca arotec, mantendo uma pressão constante entre 150 kgf/cm <sup>2</sup> e 200 kgf/cm <sup>2</sup> , por aproximadamente 10 minutos.

Tabela 4 – Matriz 5W2H do procedimento experimental (conclusão)

O que?	Por que?	Onde ?	Quando?	Quem?	Como?
Lixamento das amostras de fio-máquina embutidas.	Para se ter uma superfície plana e uniforme.	Caucaia	Novembro/23	Mark <sup>1</sup>	Utilizando uma máquina de lixamento metalográficos da marca arotec, o lixamento será feito com as lixas de (100, 200, 400, 600, 800 e 1200) grãos. A cada troca de lixa a amostra será girada 90° da sua posição anterior.
Polimento das amostras lixadas.	Para se ter uma superfície sem arranhões.	Caucaia	Novembro/23	Mark <sup>1</sup>	Utilizando os panos de polimento, alumina e uma lixadora metalográfica para se retirar as manchas e riscos pequenos, com rotações baixas em torno de 300 RPM.
Ataque químico.	Para revelar os grãos e as fases do material.	Caucaia	Novembro/23	Mark <sup>1</sup>	Utilizando o Nital 2%, a amostra será mergulhada por 3 segundos, em seguida retirada e colocada em água corrente para retirar o Nital da superfície.
Análise Microscópica	Para visualizar as fases do material e seu contorno de grão.	Caucaia	Novembro/23	Irannildo e Mark <sup>1</sup>	Após a etapa de ataque químico, será levada a amostra para o microscópio para se visualizar seu contorno de grão e suas fases, utilizando um aumento de 500x.
Análise dos resultados.	Para entender os resultados.	Fortaleza	(Dez/Jan)/(23/24)	Irannildo	Usando ferramentas como excel e minitab, iremos verificar os resultados e avaliar qual temperatura será a melhor se de laminar.
Publicação dos resultados no CBECIMAT e um periódico reconhecido	É importante para o programa de pós-graduação.	Fortaleza	Dezembro/24	Irannildo e Jeferson	Reuniões entre Iranildo e Jeferson para confecção dos 2 artigos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3 Processo de laminação a frio

O fio-máquina obtido na etapa de laminação a quente foi posteriormente processado por laminação a frio em cassetes laminadores, resultando na produção de vergalhões CA60 nas bitolas de 4,20 mm e 3,40 mm. O processo de laminação a frio foi conduzido com reduções de área previamente estabelecidas, de modo a atingir as propriedades mecânicas exigidas pela norma ABNT NBR 7480.

Durante a laminação a frio, foram mantidas condições operacionais constantes, como velocidade de processamento e alinhamento dos cassetes, a fim de minimizar a influência de variáveis externas nos resultados. O fenômeno de encruamento decorrente da deformação a frio foi considerado um fator determinante para o aumento da resistência mecânica do material (DIETER, 1986; HERTZBERG, 2012).

### **3.4 Caracterização microestrutural**

A caracterização microestrutural do fio-máquina foi realizada com o objetivo de avaliar a influência da temperatura de laminação a quente no tamanho de grão do material. Amostras representativas foram coletadas após a laminação a quente e submetidas a procedimentos metalográficos convencionais, incluindo corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico adequado.

As análises microestruturais foram realizadas por meio de microscopia óptica, permitindo a observação da morfologia dos grãos e a determinação do tamanho médio de grão, conforme metodologias descritas na literatura técnica (ASM INTERNATIONAL, 1993). O tamanho de grão foi utilizado como parâmetro de correlação com as propriedades mecânicas obtidas nos ensaios subsequentes.

### **3.5 Ensaios mecânicos**

A avaliação das propriedades mecânicas do fio-máquina e dos vergalhões CA60 foi realizada por meio de ensaios de tração uniaxial, conduzidos de acordo com normas técnicas aplicáveis. Os ensaios permitiram a determinação do limite de escoamento, do limite de resistência à tração e da relação elástica, parâmetros fundamentais para a classificação do vergalhão CA60 conforme a ABNT NBR 7480.

Os corpos de prova foram preparados de forma a garantir representatividade e repetibilidade dos resultados. Para cada condição de temperatura de laminação a quente, foram realizados ensaios em número suficiente para permitir a análise comparativa dos resultados e a identificação de tendências associadas às variáveis de processo.

### **3.6 Análise dos resultados**

Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos e nas análises microestruturais foram tratados e analisados de forma comparativa, buscando-se estabelecer correlações entre a temperatura de laminação a quente, o tamanho de grão do fio-máquina e as propriedades mecânicas do vergalhão CA60 produzido por laminação a frio.

A discussão dos resultados foi fundamentada em modelos teóricos e em dados da literatura, com ênfase na relação entre microestrutura e comportamento mecânico dos aços carbono, conforme descrito por autores clássicos da área (DIETER, 1986; CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

## 4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos a partir dos ensaios mecânicos realizados nos vergalhões CA60 produzidos a partir do aço SAE 1010, considerando diferentes temperaturas de laminação a quente do fio-máquina. A análise busca correlacionar as condições de processamento térmico com as propriedades mecânicas finais do material, à luz dos fundamentos teóricos apresentados anteriormente e dos requisitos normativos estabelecidos pela ABNT NBR 7480.

### 4.1 Resultados dos ensaios mecânicos

Os resultados dos ensaios mecânicos realizados nos vergalhões CA60 incluem a determinação do limite de escoamento, do limite de resistência à tração e da relação elástica. Esses parâmetros são fundamentais para avaliar o desempenho do material em aplicações estruturais e para verificar a conformidade com os requisitos normativos.

A Tabela 3 apresenta os valores médios obtidos nos ensaios mecânicos para os vergalhões produzidos sob diferentes condições de temperatura de laminação a quente do fio-máquina

Tabela 5 – Resultado dos ensaios mecânicos dos vergalhões CA60

Temperatura (°C)	Tam. Médio de grão (µm)	Tam. de grão (µm;ASTM)
770	8,76	10,37
840	9,20	9,95
920	9,74	9,64

Fonte: Elaborado pelo autor.

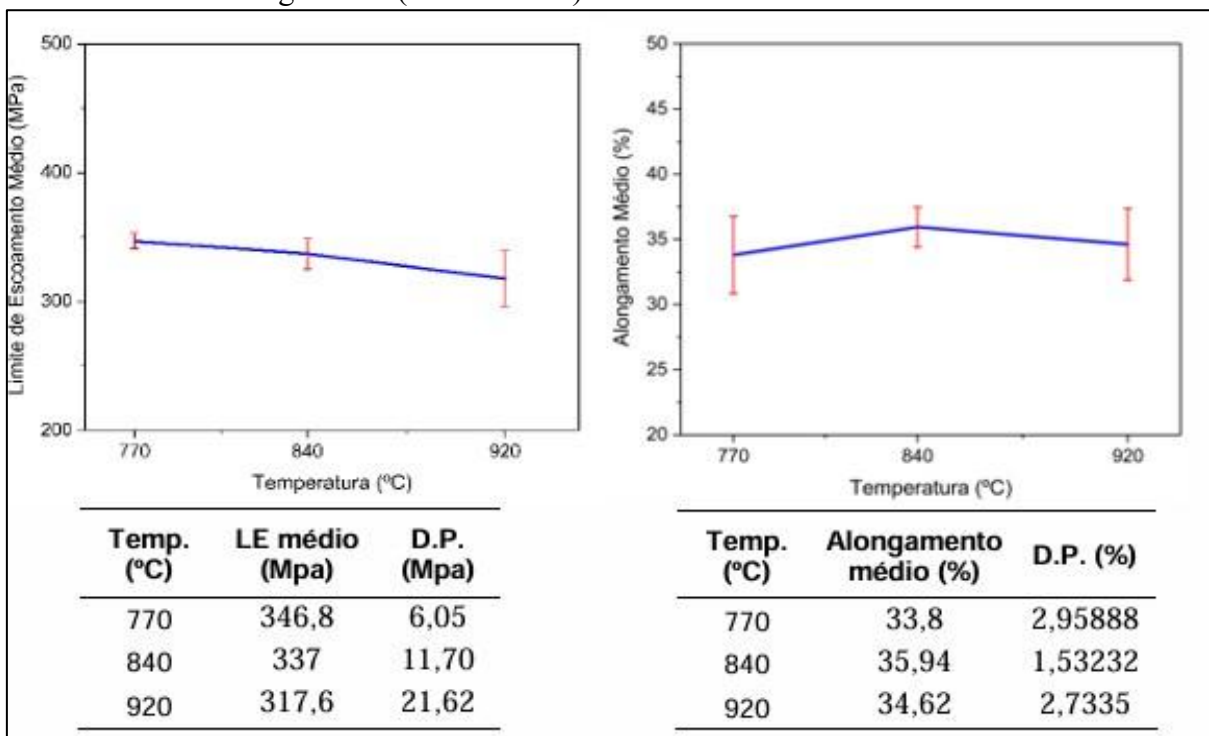
A análise inicial dos dados evidencia variações nos valores de resistência mecânica e relação elástica em função da temperatura de laminação a quente, indicando que esse parâmetro exerce influência significativa no comportamento final do produto.

#### 4.2 Influência da temperatura de laminação a quente

A temperatura de laminação a quente do fio-máquina desempenha papel determinante na definição da microestrutura inicial do material, influenciando diretamente as propriedades mecânicas após a laminação a frio. Temperaturas mais elevadas tendem a favorecer o crescimento do grão austenítico, enquanto temperaturas mais controladas contribuem para o refinamento microestrutural.

A Figura 4 apresenta a variação do limite de escoamento dos vergalhões CA60 em função da temperatura de laminação a quente do fio-máquina.

Figura 4 – Propriedades mecânicas em função da temperatura de laminação a quente: limite de escoamento e alongamento (média  $\pm$  D.P.)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que o aumento excessivo da temperatura de laminação a quente pode resultar em redução do limite de escoamento, associada ao crescimento de grão, conforme previsto pela

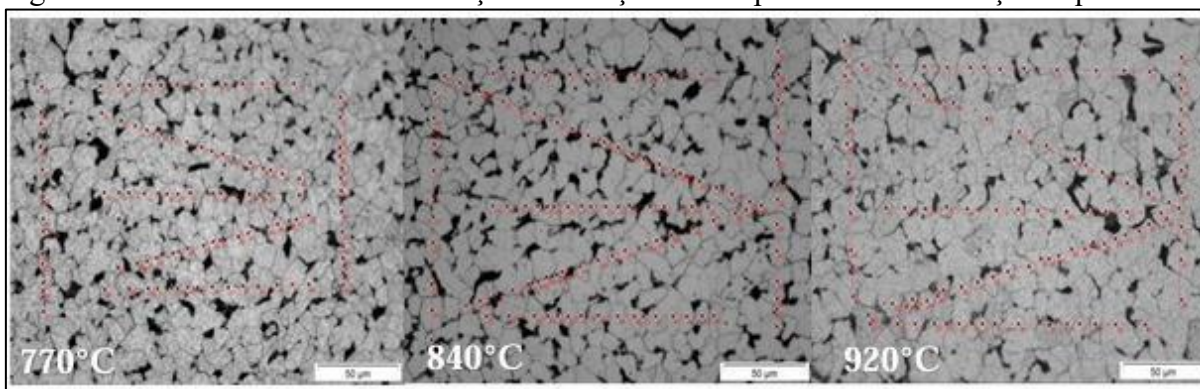
relação de Hall–Petch. Por outro lado, temperaturas mais adequadas favorecem a obtenção de valores de resistência compatíveis com os requisitos normativos.

### 4.3 Limite de resistência à tração

O limite de resistência à tração representa a máxima tensão suportada pelo material antes da ruptura e é um parâmetro essencial para o desempenho estrutural dos vergalhões CA60.

A Figura 5 apresenta a variação desse parâmetro em função da temperatura de laminação a quente.

Figura 5 – Limite de resistência à tração em função da temperatura de laminação a quente



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados indicam que o limite de resistência à tração apresenta tendência semelhante à observada para o limite de escoamento, sendo influenciado pelas transformações microestruturais decorrentes do processamento térmico. A combinação entre laminação a quente e laminação a frio mostrou-se eficaz para alcançar os níveis de resistência exigidos pela norma.

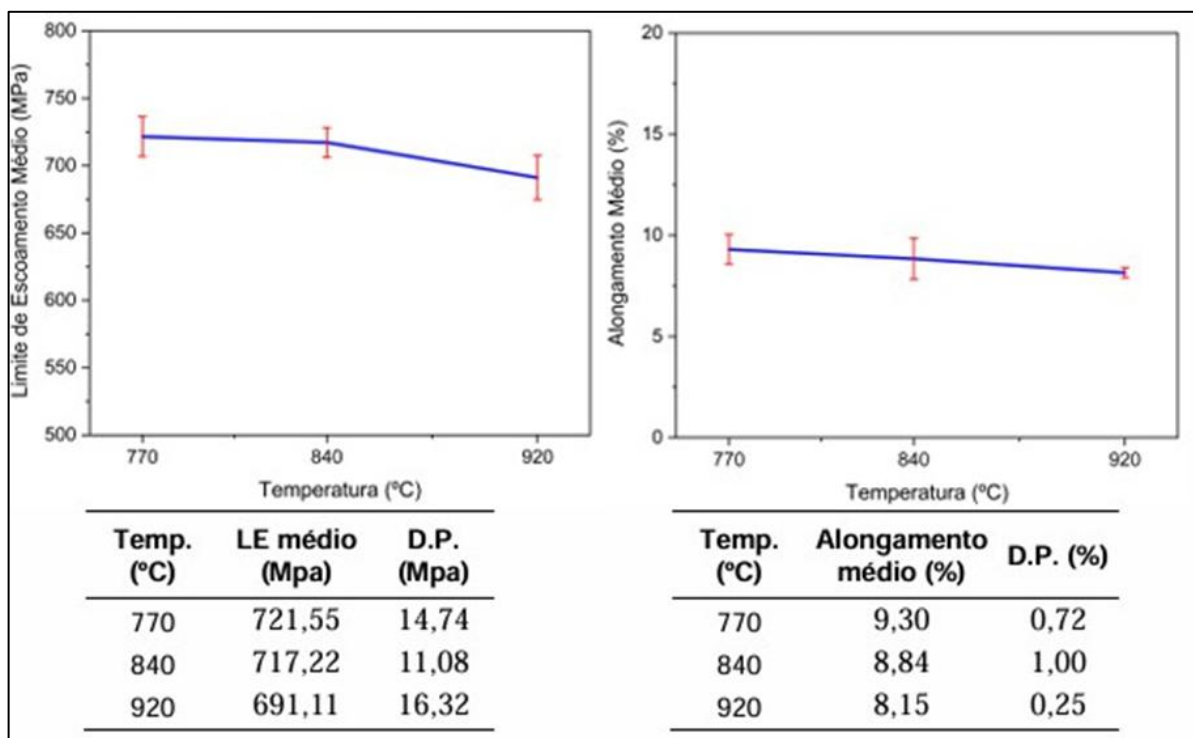
### 4.4 Relação elástica dos vergalhões CA60

A relação elástica é um parâmetro crítico para a segurança estrutural, pois está diretamente associada ao comportamento dúctil do material. Valores adequados garantem maior capacidade de redistribuição de esforços em estruturas de concreto armado.

A análise dos resultados demonstra que determinadas faixas de temperatura favorecem o atendimento simultâneo aos requisitos de resistência e relação elástica, evidenciando a importância do controle térmico na etapa de laminação a quente do fio-máquina.

A Figura 6 apresenta a relação elástica dos vergalhões CA60 produzidos sob diferentes temperaturas de laminação a quente.

Figura 6 – Relação elástica em função da temperatura de laminação a quente



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.5 Discussão integrada dos resultados

A conformidade dos vergalhões CA60 com a norma ABNT NBR 7480 foi avaliada a partir da comparação dos resultados experimentais com os limites mínimos estabelecidos para cada propriedade mecânica. A Tabela 4 apresenta os requisitos normativos aplicáveis, enquanto a Tabela 5 resume a avaliação de conformidade dos resultados obtidos.

Tabela 6 – Requisitos mecânicos da norma ABNT NBR 7480 para vergalhões CA60 (continua)

Temperatura de Processo (°C)	LE (MPa)	LR (MPa)	REL	Along. (%)
770°C	348	483	1,39	37,4
770°C	340	472	1,39	29,5
770°C	341	460	1,35	33,0
770°C	353	477	1,39	35,5
770°C	352	472	1,34	33,6

Tabela 7 – Requisitos mecânicos da norma ABNT NBR 7480 para vergalhões CA60 (conclusão)

Temperatura de Processo (°C)	LE (MPa)	LR (MPa)	REL	Along. (%)
840°C	348	483	1,39	37,4
840°C	345	460	1,33	36,4
840°C	342	461	1,35	37,2
840°C	330	453	1,37	33,9
840°C	320	461	1,44	34,8
920°C	348	483	1,39	37,4
920°C	315	443	1,41	37,2
920°C	287	432	1,51	34,8
920°C	319	452	1,42	32,1
920°C	319	447	1,40	31,6

Fonte: Adaptado de ABNT (2007).

Tabela 8 – Avaliação da conformidade dos resultados obtidos

Temperatura (°C)	LE (MPa)	LR (MPa)	REL	AL (%)	DOB	MASSA (kg/m)
770°C	725	763	1,05	9,22	OK	0,108
770°C	712	758	1,06	8,45	OK	0,108
770°C	708	743	1,05	8,60	OK	0,108
770°C	710	759	1,07	8,80	OK	0,108
770°C	716	752	1,05	10,63	OK	0,108
770°C	715	755	1,06	11,25	OK	0,108
770°C	702	751	1,07	9,25	OK	0,107
770°C	745	792	1,06	9,13	OK	0,109
770°C	761	789	1,04	8,40	OK	0,109
840°C	698	742	1,06	9,38	OK	0,106
840°C	734	790	1,08	9,67	OK	0,106
840°C	717	756	1,05	9,32	OK	0,109
840°C	694	750	1,08	9,65	OK	0,109
840°C	718	755	1,05	10,15	OK	0,109
840°C	710	748	1,05	9,43	OK	0,110
840°C	721	761	1,06	8,23	OK	0,109
840°C	722	763	1,06	7,20	OK	0,109
840°C	741	779	1,05	6,60	OK	0,109
920°C	699	753	1,08	8,52	OK	0,108
920°C	704	762	1,08	8,50	OK	0,108
920°C	678	745	1,10	8,05	OK	0,104
920°C	663	740	1,12	8,15	OK	0,104
920°C	690	759	1,10	8,15	OK	0,104
920°C	706	761	1,08	8,60	OK	0,104
920°C	712	780	1,10	7,75	OK	0,104
920°C	660	763	1,16	7,80	OK	0,104
920°C	708	769	1,09	7,88	OK	0,104

Fonte: Elaborado pelo autor.

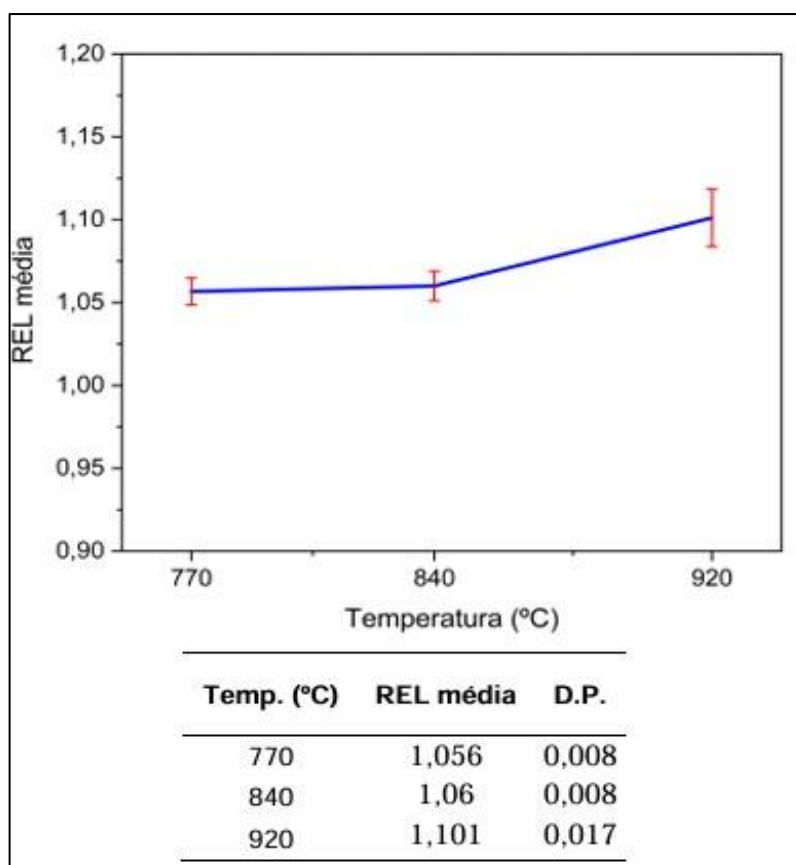
A comparação evidencia que os vergalhões produzidos dentro de faixas controladas de temperatura de laminação a quente atendem aos requisitos normativos, enquanto desvios térmicos excessivos podem comprometer a relação elástica e a uniformidade das propriedades mecânicas.

#### 4.6 Discussão dos resultados

Os resultados obtidos confirmam a relevância do controle da temperatura de laminação a quente do fio-máquina como variável estratégica no processo produtivo de vergalhões CA60. A influência desse parâmetro na microestrutura inicial do material reflete-se diretamente nas propriedades mecânicas finais após a laminação a frio.

A Figura 7 apresenta uma síntese gráfica do comportamento mecânico dos vergalhões CA60 em função das condições de processamento térmico, permitindo visualizar de forma integrada a influência da temperatura de laminação a quente.

Figura 7 – Síntese dos resultados mecânicos em função da temperatura de laminação a quente



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### **4.7 Considerações finais do capítulo**

Com base na análise realizada, observa-se que a temperatura de laminação a quente do fio- máquina exerce influência direta e significativa nas propriedades mecânicas dos vergalhões CA60. O controle adequado desse parâmetro contribui para o atendimento aos requisitos normativos, para a redução da variabilidade do processo produtivo e para a melhoria da confiabilidade do produto final.

Esses resultados fornecem subsídios técnicos relevantes para a otimização do processo industrial e para o desenvolvimento de estratégias de controle de qualidade na produção de vergalhões para concreto armado.

### **5 CONCLUSÃO**

#### **5.1 Conclusão**

O presente trabalho teve como objetivo investigar a influência da temperatura de laminação a quente do fio-máquina de aço SAE 1010 nas propriedades mecânicas e microestruturais do vergalhão CA60 produzido por laminação a frio. A partir dos resultados obtidos, foi possível estabelecer correlações consistentes entre os parâmetros de processamento, a microestrutura do fio-máquina e o desempenho mecânico do produto final.

Os resultados da caracterização microestrutural demonstraram que a temperatura de laminação a quente exerce influência direta no tamanho de grão do fio-máquina, sendo observado crescimento progressivo dos grãos com o aumento da temperatura. Esse comportamento está de acordo com os mecanismos de recristalização e crescimento de grão descritos na literatura para aços carbono laminados a quente.

No que se refere às propriedades mecânicas, verificou-se que o fio-máquina laminado em temperaturas mais elevadas apresentou menores valores de limite de escoamento e limite de resistência, em decorrência do aumento do tamanho de grão. Entretanto, após o processo de laminação a frio, todos os vergalhões CA60 produzidos atingiram os valores mínimos de resistência exigidos pela norma ABNT NBR 7480, evidenciando a eficiência do encruamento promovido pelo processo.

A relação elástica, parâmetro crítico para a aplicação dos vergalhões em estruturas de concreto armado, mostrou-se sensível às condições microestruturais iniciais do fio-máquina.

Os resultados indicaram que maiores temperaturas de laminação a quente favoreceram a obtenção de valores mais elevados de relação elástica após a laminação a frio, proporcionando melhor equilíbrio entre resistência e ductilidade.

Dessa forma, conclui-se que o controle da temperatura de laminação a quente do fio-máquina de aço SAE 1010 constitui uma estratégia tecnicamente viável para a produção de vergalhões CA60 com propriedades mecânicas adequadas e maior estabilidade de processo. A utilização de um único tipo de aço para a produção de diferentes bitolas de vergalhão contribui para a simplificação do fluxo produtivo, redução de variabilidade e potencial diminuição de custos operacionais, sem prejuízo ao atendimento dos requisitos normativos.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com base nos resultados obtidos e nas limitações deste estudo, recomenda-se que trabalhos futuros abordem os seguintes aspectos:

- Avaliação do efeito de diferentes taxas de resfriamento após a laminação a quente sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas do fio-máquina;
- Investigação da influência de elementos microligantes, como nióbio, vanádio ou titânio, na produção de vergalhões CA60 a partir do aço SAE 1010;
- Análise do comportamento à fadiga e da tenacidade à fratura dos vergalhões CA60 produzidos sob diferentes condições de processamento;
- Estudo comparativo entre aços SAE 1010 e outras classes de aços carbono tradicionalmente utilizadas na produção de vergalhões CA60;
- Avaliação do impacto econômico e energético da padronização da matéria-prima na produção industrial de vergalhões.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado — Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook: Properties and Selection – Irons, Steels, and High-Performance Alloys**. v. 1. Materials Park: ASM International, 1993.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction**. 10. ed. New York: John Wiley & Sons, 2018.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM), 2012.
- DIETER, G. E. **Mechanical metallurgy**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1986.
- ECO, U. **Como se faz uma tese**. 17. ed. São Paulo: Perspectiva, 2001.pa
- HERTZBERG, R. W. **Deformation and fracture mechanics of engineering materials**. 5. ed. New York: John Wiley & Sons, 2012.
- ROCHA, F. A. C. da. **Desenvolvimento de um sistema de ventilação forçada para secar o fio-máquina na laminação a frio de vergalhões**. 2012. Dissertação (Mestrado) — PGETEMA, Porto Alegre, 2012.
- SHACKELFORD, J. F. **Introduction to materials science for engineers**. 4. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- TEOH, L. L. **Thermo-mechanical processing and microstructure of microalloyed steel bar and wire rod products**. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 48, p. 475-481, 1995.
- TOTEN, G. E.; HOWES, M. A. H.; INOUE, T. **Handbook of residual stress and deformation of steel**. Materials Park: ASM International, 2002.