



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
UNIDADE DO CABO DE SANTO AGOSTINHO  
ENGENHARIA MECÂNICA

**JOSÉ JONATHAN SÁVIO DE SOUZA MOTTA**

**DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA DE CONTROLE DE BOMBAS HIDRÁULICAS  
EM PROCESSO THERMEX PARA REDUÇÃO DE FRAGILIDADE AZUL EM  
BARRAS METÁLICAS.**

CABO DE SANTO AGOSTINHO, 2020

**JOSÉ JONATHAN SÁVIO DE SOUZA MOTTA**

**DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA DE CONTROLE DE BOMBAS HIDRÁULICAS  
EM PROCESSO THERMEX PARA REDUÇÃO DE FRAGILIDADE AZUL EM  
BARRAS METÁLICAS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA), da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), como parte das exigências para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Msc. Alisson Cocci De Souza

CABO DE SANTO AGOSTINHO, 2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Sistema Integrado de Bibliotecas  
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- M921d Motta, José Jonathan Sávio de Souza  
Dimensionamento de sistema de controle de bombas hidráulicas em processo Thermex para redução de fragilidades azul em barras metálicas / José Jonathan Sávio de Souza Motta. - 2020.  
68 f. : il.
- Orientador: Alisson Cocci de Souza.  
Inclui referências e anexo(s).
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em Engenharia Mecânica, Cabo de Santo Agostinho, 2020.
1. Laminação. 2. Thermex. 3. Aço - Fragilidade azul. I. Souza, Alisson Cocci de, orient. II. Título

CDD 620.1

---

**JOSÉ JONATHAN SÁVIO DE SOUZA MOTTA**

**DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA DE CONTROLE DE BOMBAS HIDRÁULICAS  
EM PROCESSO THERMEX PARA REDUÇÃO DE FRAGILIDADE AZUL EM  
BARRAS METÁLICAS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA), da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), como parte das exigências para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: \_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Msc. Alisson Cocci de Souza (Orientador)  
UACSA/UFRPE

---

Prof. Dra. Karla Carolina Alves da Silva (Examinador)  
UACSA/UFRPE

---

Prof. Msc. Alexandre Douglas Araujo de Moura  
(Examinador) UACSA/UFRPE

## **Agradecimentos**

Agradeço à minha família, por todo apoio e suporte, acreditando no meu potencial; e aos meus amigos que seguiram comigo nesta jornada.

Ao meu orientador, Prof. Alisson Cocci dos Santos, pelo incentivo e ajuda para desenvolver este projeto.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco, Campus UACSA, e a todos os professores que contribuíram para minha formação.

## Resumo

O vergalhão de aço é um dos materiais mais difundidos na construção civil, onde suas propriedades mecânicas são regidas às normas técnicas internacionais ou exclusivas de cada país. Ao final da produção de vergalhões laminados a quente ocorre o tratamento térmico por meio de resfriamento, como por exemplo, o Thermex. Neste processo, pode ocorrer heterogeneidade nas propriedades mecânicas da barra, causadas por um resfriamento não uniforme por toda peça metálica, entre elas, a fragilidade azul, que resulta em diminuição de tenacidade e ductilidade nas regiões onde o tratamento térmico foi mais intenso, causando perda metálica por produto não conforme. Foi desenvolvido um sistema automatizado para controlar as bombas hidráulicas do processo Thermex, por meio de controlador lógico programável, responsável pelo controle de acionamento para regular a pressão e vazão água no momento de entrada da barra, buscando reduzir a intensidade do tratamento térmico na sua porção inicial, por ser a parte mais afetada pela fragilidade azul, onde as pressões e vazões reguladas foram dimensionadas a partir de resultados obtidos por meio de simulação, utilizando o método de elementos finitos em software computacional. Através de ensaio de tração das barras tratadas termicamente pelo sistema Thermex dimensionado obteve-se os valores de limite de escoamento, limite de resistência e alongamento. Ao comparar estas propriedades mecânicas com os valores obtidos da barra em condição normal e ao confrontar com os valores de referência da norma técnica, foi percebida uma redução de perda metálica por produto não conforme de 2,56% por barra laminada para 0,64%. O melhor estado das propriedades foi encontrado na barra teste onde o tempo de acionamento foi de 3,4 segundos pelo sinal de acionamento vindo da fotocélula A3, numa pressão de 7 bar, sobre os primeiros 12 metros da barra. Com redução do efeito de fragilidade azul conseguimos um aproveitamento maior da barra, gerando benefício financeiro e ambiental, uma vez que foi reduzido o retrabalho da porção não conforme, diminuindo o consumo energético e hídrico.

**Palavras-chave:** Laminação, Thermex, Aço-fragilidade azul.

## **Abstract**

Steel rebar is one of the most widespread materials in civil construction, where its mechanical properties are governed by international or exclusive technical standards in each country. At the end of the production of hot-rolled rebars, heat treatment takes place by means of cooling, such as Thermex. In this process, heterogeneity in the mechanical properties of the bar can occur, caused by non-uniform cooling throughout the metal part, including the fragility of 500 °F, which results in a decrease in toughness and ductility in the regions where the heat treatment was more intense, causing loss metal by non-compliant product. An automated system was developed to control the hydraulic pumps of the Thermex process, by means of a programmable logic controller, responsible for controlling the drive to regulate the pressure and water flow at the moment of entry of the bar, seeking to reduce the heat treatment intensity in its portion initial, as it is the part most affected by the blue fragility, where the regulated pressures and flows were dimensioned from results obtained through simulation, using the finite element method in computer software. Through the tensile test of the bars thermally treated by the dimensioned Thermex system, the values of yield limit, strength limit and elongation were obtained. When comparing these mechanical properties with the values obtained from the bar in normal condition and comparing with the reference values of the technical standard, a reduction of metallic loss per non-conforming product was perceived from 2.56% per rolled bar to 0.64%. The best state of properties was found in the test bar where the activation time was 3.4 seconds by the activation signal coming from photocell A3, at a pressure of 7 bar, over the first 12 meters of the bar. With the reduction of the blue fragility effect, we achieved a greater use of the bar, generating financial and environmental benefits, since the rework of the non-compliant portion was reduced, reducing energy and water consumption.

**Keywords:** Lamination, Thermex, Steel-fragility of 500 °F.

## Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama de Fases para o sistema Ferro-Carbeto de Ferro .....	16
Figura 2 – Representação esquemática da formação de perlita pela austenita.....	17
Figura 3 – Diagrama de transformação isotérmica referenciando as temperaturas de formação de bainita .....	18
Figura 4 – A célula unitária tetragonal de corpo centrado (TCC) para o aço martensítico mostrando átomos de ferro (círculos) e os sítios que podem ser ocupados por átomos de carbono (cruzes) .....	19
Figura 5 – Diagrama esquemático de transformação para a têmpera .....	21
Figura 6 – Curva de resfriamento para a obtenção de martensita e martensita revenida.....	22
Figura 7 – Cilindros de laminação com canais usinados.....	23
Figura 8 – Desenho esquemático de gaiola de laminação .....	24
Figura 9 – Esquema de conformação mecânica realizada pelos cilindros de laminação .....	25
Figura 10 – Thermex.....	26
Figura 11 – Esquema de processo Thermex .....	27
Figura 12 – (a) Coroa externa de martensita, (b) Coroa intermediária de bainita e (c) Núcleo de ferrita e perlita .....	29
Figura 13 – Variação da dureza do material em função da distância a partir da extremidade temperad.....	30
Figura 14 – Tenacidade em função da temperatura de revenimento para aço SAE 4140 revenido por uma hora.....	30
Figura 15 – Vergalhão com fragilidade azul.....	31
Figura 16 – Princípio de funcionamento do CLP .....	32
Figura 17 – Ciclo de processamento do CLP .....	33
Figura 18 – CLPs: a) SIEMENS SIMATIC S7 6ES7; b) Painel; c) WEG PLC300 .....	34
Figura 19 – Elementos Básicos da Linguagem Ladder.....	35
Figura 20 – Linha de programação Ladder da função AND .....	36
Figura 21 – Linha de programação Ladder da função OR .....	36
Figura 22 – Linha de programação Ladder da função NAND.....	37
Figura 23 – Linha de programação Ladder da função NOR.....	37
Figura 24 – Linha de programação Ladder para as instruções SET e RESET .....	37
Figura 25 – Tela de configuração de temporizador de CLP através do software Clic02LAD.....	39
Figura 26 – Tela de configuração de contador de CLP através do software Clic02LAD .....	39



Figura 27 – Carros do thermex: a) Carro 0, b) Carro 1, c) Carro 2 e d) Carro 3 ....	40
Figura 28 – Veios do Thermex.....	41
Figura 29 – Desenho esquemático de inserto do carro 1 com medidas em milímetros ..	37
Figura 30 – Bomba CPK 80-315 .....	41
Figura 31 – Tubulações de alimentação de água do Thermex .....	42
Figura 32 – Lógica Ladder para sistema de acionamento de bomba do Thermex .....	44
Figura 33 – Posicionamento das fotocélulas e velocidades locais de laminação .....	46
Figura 34 – Leitura de pressão, temperatura e vazão durante processo Thermex em vergalhão de 8mm.....	47
Figura 35 – Temperaturas de equalização obtida pelo software de simulação: a) Condição normal; b) Teste 1; c) Teste 2; d) Teste 3; e) Teste 4 e f) Teste 5.....	50
Figura 36 – Faixa de propriedades mecânicas para vergalhões CA 50 de acordo com a norma NBR 7480 .....	51
Figura 37 – Condição Normal: Limite de escoamento comparado com a norma.....	52
Figura 38 – Condição Normal: Relação LR/LE comparada com a norma .....	53
Figura 39 – Condição Normal: Porcentagem de alongamento comparado com a norma.....	53
Figura 40 – Teste 1: Limite de escoamento comparado com a norma.....	54
Figura 41 – Teste 1: Relação LR/LE comparada com a norma.....	55
Figura 42 – Teste 1: Porcentagem de alongamento comparado com a norma..	55
Figura 43 – Teste 2: Limite de escoamento comparado com a norma.....	56
Figura 44 – Teste 2: Relação LR/LE comparada com a norma.....	57
Figura 45 – Teste 2: Porcentagem de alongamento comparado com a norma..	57
Figura 46 – Teste 3: Limite de escoamento comparado com a norma.....	58
Figura 47 – Teste 3: Relação LR/LE comparada com a norma.....	59
Figura 48 – Teste 3: Porcentagem de alongamento comparado com a norma..	59
Figura 49 – Teste 4: Limite de escoamento comparado com a norma.....	60
Figura 50 – Teste 4: Relação LR/LE comparada com a norma.....	61
Figura 51 – Teste 4: Porcentagem de alongamento comparado com a norma..	61
Figura 52 – Teste 5: Limite de escoamento comparado com a norma.....	62
Figura 53 – Teste 5: Relação LR/LE comparada com a norma.....	63
Figura 54 – Teste 5: Porcentagem de alongamento comparado com a norma..	63

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Padrão operacional de pressão das tubulações do Thermex para vergalhão CA 50 de 8 mm.....	42
Tabela 2 – Padrão operacional de vazão das tubulações do Thermex para vergalhão CA 50 de 8 mm .....	43
Tabela 3 – Tempos de rampa de acionamento calculados para testes .....	46
Tabela 4 – Parâmetros de entrada para condição normal de operação .....	48
Tabela 5 – Temperaturas de equalização de acordo com o valor dimensionado de pressão e vazão.....	49
Tabela 6 – Comparação percentual de comprimento de barra afetada por fragilidade azul e perda metálica da condição normal e testes realizados .....	64

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>14</b>
2.1	Objetivo Geral.....	14
2.2	Objetivos Específicos.....	14
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>15</b>
3.1	Transformação de Fases .....	15
<b>3.1.1</b>	<b>Principais fases existentes no aço</b> .....	<b>15</b>
3.2	Tratamentos Térmicos .....	19
<b>3.2.1</b>	<b>Têmpera</b> .....	<b>20</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Revenimento</b> .....	<b>21</b>
3.3	A Laminação.....	23
3.4	Processo Thermex.....	25
<b>3.4.1</b>	<b>Componentes do processo Thermex</b> .....	<b>25</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Descrição do processo Thermex</b> .....	<b>26</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Análise microestrutural de materiais resultantes do processo Thermex</b> .....	<b>28</b>
3.5	Fragilidade Azul .....	30
3.6	Controlador Lógico Programável.....	31
<b>3.6.1</b>	<b>Definição e funcionamento do CLP</b> .....	<b>32</b>
<b>3.6.2</b>	<b>Linguagem de programação Ladder</b> .....	<b>35</b>
<b>3.6.3</b>	<b>Funções Lógicas em LADDER</b> .....	<b>36</b>
<b>3.6.4</b>	<b>Instruções de “SET” e “RESET”</b> .....	<b>37</b>
<b>3.6.5</b>	<b>Temporizadores e Contadores</b> .....	<b>38</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>40</b>
4.1	Materiais .....	40
4.2	Metodologia de Cálculo .....	44
<b>4.2.1</b>	<b>Cálculo do Tempo de Acionamento</b> .....	<b>45</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Cálculo de Pressão e Vazão</b> .....	<b>46</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Análise das propriedades das barras</b> .....	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>52</b>
5.1	Condição Normal .....	52
5.2	Teste 01 .....	54
5.3	Teste 02.....	56
5.4	Teste 03.....	58
5.5	Teste 04.....	60

5.6	Teste 05.....	62
6	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>66</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>67</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>72</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As transformações de fases que os aços sofrem ao serem resfriados a partir de uma temperatura inicial, ao qual o material está completamente em forma de austenita, é de grande interesse para a indústria siderúrgica. (ALVES FILHO, 2004)(BARRETO, 2009).

Um dos elementos básicos para a construção civil é o vergalhão de aço, este que é produzido no processo de conformação mecânica denominado laminação a quente, onde se tem o aço na forma semiacabada, denominado tarugo, que é uma barra de seção e comprimento definido de acordo com o lingotamento do material. No decorrer da laminação ocorre a redução da seção da matéria prima, através da passagem por dois cilindros que giram em sentidos opostos, onde o material adquire a forma de barra redonda e nervurada ao longo do seu comprimento.

Após o processo de laminação a barra passa por um equipamento onde ocorre efetivamente a troca térmica do sistema, onde a barra e a água são conduzidas no interior de guias injetoras que apresentam uma geometria característica de forma que um fluxo turbulento no sistema possibilite o resfriamento homogêneo da barra durante sua trajetória, evitando a formação de camadas de vapor. (MELO, 2010).

O sistema Thermex apresenta um direcionamento mais estável da barra através dos tubos dos canhões e uma redução de temperatura do leito de resfriamento, melhorando as condições de operação, permitindo assim, uma menor quantidade de água em relação aos demais sistemas. (ALONSO, 2006).

O processo Thermex possui dependência de variáveis para que o produto final fique de acordo com a norma. Dentre elas estão: vazão de água, pressão da água, temperatura de saída do Thermex e temperatura no leito de resfriamento. Segundo Melo (2010) a vazão de água é uma medida importante, pois garante a existência de água na tubulação, estando ou não com a velocidade necessária. Já a pressão da água garante a estabilidade da barra no interior do tubo, evitando o fenômeno de ondulação da barra, o que gera produto não conforme. A temperatura de saída do Thermex nos informa se o tratamento térmico foi efetivo ou não, uma vez que podemos verificar o

resfriamento superficial do material. A temperatura no leito de resfriamento nos mostra a temperatura no momento em que está sendo realizado o auto-revenido do material, que define a real efetividade do tratamento térmico.

Dentre as variáveis, é importante considerar a velocidade de resfriamento do material, assim como os demais parâmetros de processo envolvidos que, por sua vez, se fazem relevantes para a obtenção das características desejadas no produto final. (ALVES FILHO, 2004).

O revenimento de aços na faixa de temperatura na faixa de 230 a 370°C pode resultar na diminuição de ductilidade e tenacidade pela precipitação de cementita no contorno de grão e entre as agulhas de martensita, esse fenômeno é denominado fragilidade azul. (MOREIRA; LEBRÃO, 2004). O vergalhão laminado acometido deste fenômeno possui propriedades mecânicas não conformes com a norma NBR 7480, gerando perda metálica no processo produtivo.

As variáveis do sistema Thermex estudado foram analisadas e controladas através de controlador lógico programável, este sendo um dispositivo de automação industrial que controla máquinas e processos através de lógica digital programada. Desse modo, sinais de entrada provenientes de sensores são logicamente combinados gerando sinais de saída para os atuadores. (PUPO, 2002).

Para reduzir comprimento de barra não conforme por fragilidade azul, foi utilizado um CLP para controlar o tempo de acionamento do motor da bomba de água do processo Thermex, buscando reduzir momentaneamente a pressão e vazão da água para diminuir a intensidade do tratamento térmico na porção inicial da barra, aumentando sua porção útil.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

Dimensionar sistema de controle de tempo de acionamento, vazão e pressão de água de bombas hidráulicas em processo Thermex de uma empresa siderúrgica da região, buscando reduzir os limites de escoamento e de ruptura gerados por excesso de tratamento térmico de tempera no comprimento inicial de vergalhão de 8 mm de seção transversal e comparar as características do aço tratado com seus valores antes do sistema ser implementado por meio de ensaio de materiais.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Dimensionar sistema de controle de acionamento e pressão de bombas hidráulicas
- Mensurar os valores de limite de escoamento e de ruptura do vergalhão de 8 mm tratado termicamente em condição normal e após a implementação do sistema por meio de ensaio de tração
- Determinar a redução de fragilidade azul após sistema de controle em operação ao confrontar os valores de limite de escoamento e ruptura com a norma técnica nacional
- Obter o percentual de redução de perda metálica por produto não conforme após sistema de controle implantado

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

A utilização de metodologia de aumento de resistência mecânica de aços através de tratamento térmico com água, em processo de laminação a quente se consolidou como uma das alternativas mais práticas e rentáveis utilizadas. (ALVES FILHO, 2004). O aço quando submetido a tratamentos térmicos adquirem propriedades mecânicas que variam de acordo com o tipo de tratamento executado. (SILVA; MEI, 1988). Para o processo de laminação o tratamento térmico aplicado mais comum é o Tempcore ou Thermex. (BARRETO, 2009).

#### 3.1 Transformação de Fases

As propriedades mecânicas do produto final estão diretamente relacionadas com as fases existentes e com as suas quantidades. (FRANÇA, 2015).

##### 3.1.1 Principais fases existentes no aço

De acordo com França (2015) a formação das fases do aço carbono depende da composição química e das condições de resfriamento a que o aço está sendo submetido. As principais fases do aço carbono são: ferrita  $\alpha$ , austenita  $\gamma$ , cementita ( $Fe_3C$ ), perlita, bainita e martensita.

A Ferrita  $\alpha$  é uma solução sólida de carbono em ferro com estrutura Cúbica de Corpo Centrado - CCC, existente até a temperatura de 912 °C. Nesta faixa de temperatura, a solubilidade do carbono no ferro é muito baixa, chegando ao máximo de 0,020% a 727°C. (SILVA; MEI, 1988). Segundo Vlack, citado por (FRANÇA, 2015) (pg37), a ferrita tem uma estrutura cúbica de corpo centrado, onde os interstícios são pequenos e alongados, não podendo acomodar com facilidade um pequeno átomo de carbono. Consequentemente, a solubilidade do carbono na ferrita é muito baixa e o átomo de carbono é pequeno demais para a solução sólida substitucional e muito grande para uma solução sólida intersticial. De acordo com Callister (2002), essa fase ferro-carbono, em particular, é relativamente macia, pode



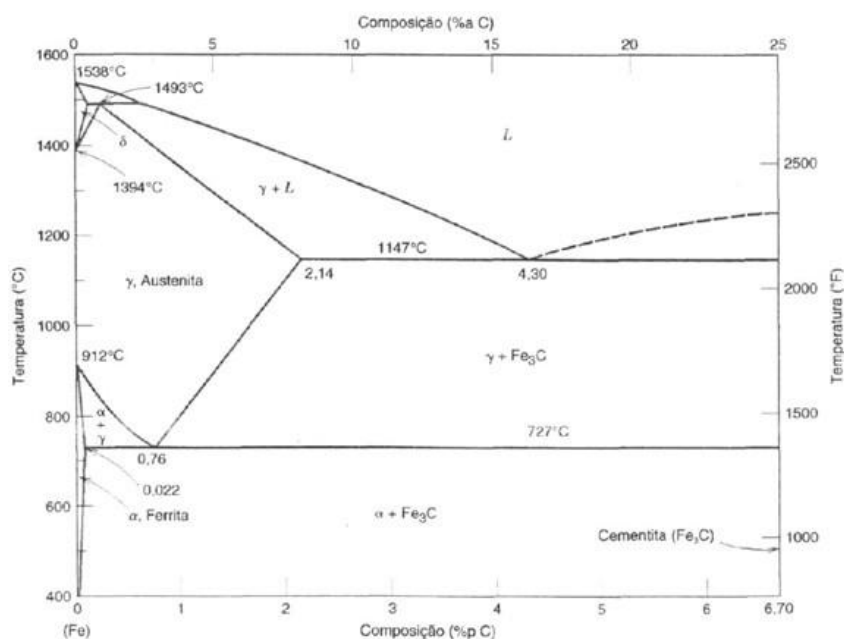
ser tornada magnética à temperatura abaixo de 768°C e possui uma densidade de 7,88 g/cm<sup>3</sup>.

A Austenita  $\gamma$  – é uma solução sólida de carbono em ferro com estrutura Cúbica de Face Centrada - CFC, existindo entre as temperaturas de 912 e 1495 °C, e com solubilidade máxima de carbono no ferro de 2,11% a 1148°C (SILVA; MEI, 1988). Em temperaturas de sua estabilidade, a austenita é macia e dúctil, sendo conseqüentemente bastante adequada aos processos de fabricação, os quais, na sua maioria, são por conformação à quente. (FRANÇA, 2015).

Cementita (Fe<sub>3</sub>C) – é um carboneto de ferro Fe<sub>3</sub>C com estrutura ortorrômbica e de alta dureza. A cementita dá origem a um eutetóide de extrema importância no estudo dos aços: a perlita (SILVA; MEI, 1988). A cementita contém 6,67% de carbono, sendo muito dura e quebradiça, ela é responsável pela elevada dureza e resistência dos aços de alto carbono, assim como pela sua menor ductilidade. (FRANÇA, 2015).

Callister (2002) demonstra através do diagrama de fases ferro-carbono, as fases do aço, de acordo com suas temperaturas de estabilidade e porcentagem de teor de carbono, como mostrado na Figura 1.

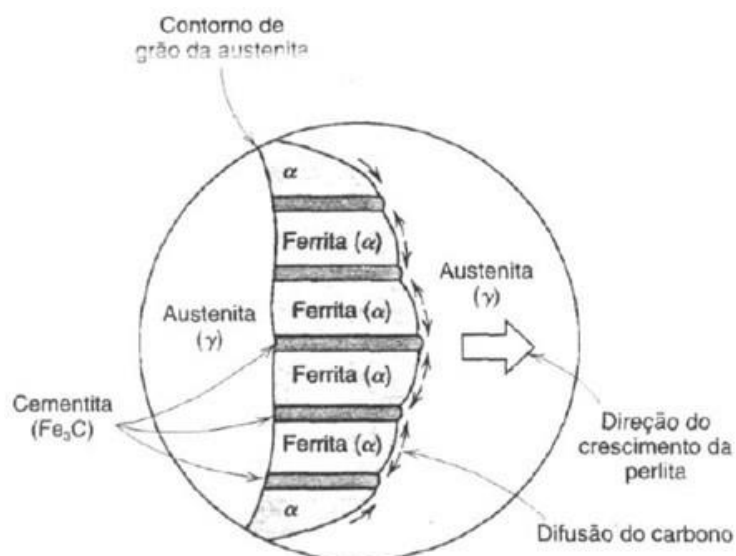
Figura 1 – Diagrama de Fases para o sistema Ferro-Carbeto de Ferro



Fonte: Callister, 2002

A fase de perlita é uma microestrutura característica causada pela reação eutetóide . A perlita não é uma fase, e sim uma mistura mecânica de duas fases: ferrita a 88,5% e cementita a 11,5%, na forma de lâminas finas dispostas alternadamente, também conhecidas por lamelas (Figura 2). As propriedades mecânicas da perlita são, portanto, intermediárias entre as da ferrita e da cementita, dependendo, entretanto, do tamanho das lamelas de cementita. (CALLISTER, 2002). Sua resistência à tração é, em média, 75 kgf/mm<sup>2</sup> (740 MPa). A proporção de perlita num aço cresce de 0% para o ferro até 100% para aço eutetóide (0,77% de carbono) (FRANÇA, 2015).

**Figura 2 – Representação esquemática da formação de perlita pela austenita**



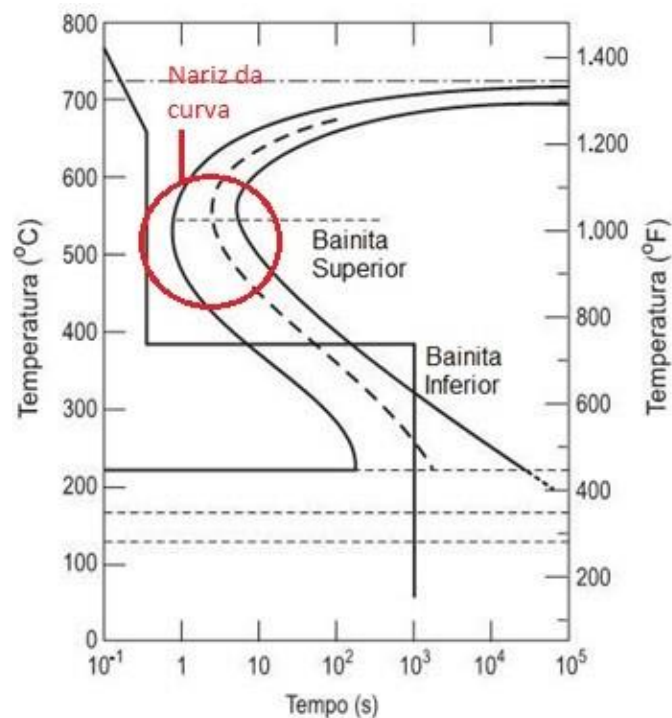
Fonte: Callister, 2002

A Bainita é obtida pelo resfriamento rapidamente para temperaturas abaixo do “nariz” da curva do Diagrama de Temperatura Tempo Transformação (TTT) e mantido nessa temperatura, ocorrendo formação de dessa estrutura. A bainita é classificada como superior ou inferior, de acordo com a temperatura na qual é formada (Figura 3). A formação da bainita é um processo misto que envolve difusão, como ocorre na formação da ferrita e da perlita, e forças de cisalhamento análogas às observadas nas transformações martensíticas. (FRANÇA, 2015).

Uma vez que os aços bainíticos possuem uma estrutura mais fina, isto

é, partículas de ferrita e cementita menores, eles são, em geral, mais resistentes e mais duros do que os aços perlíticos, porém, ainda assim eles exibem uma combinação desejável de resistência e ductilidade. (CALLISTER, 2002).

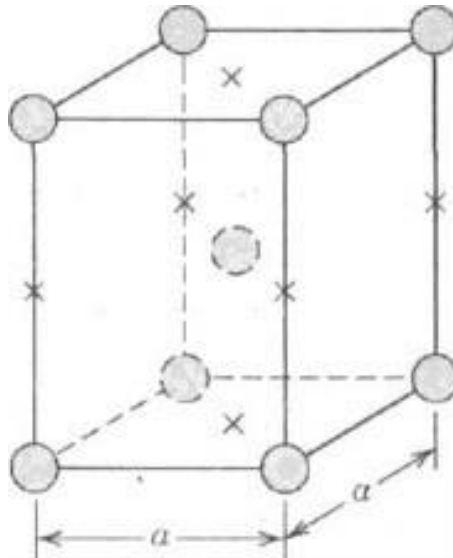
**Figura 3 – Diagrama de transformação isotérmica referenciando as temperaturas de formação de bainita**



Fonte: Callister, 2002

A Martensita é uma solução sólida de carbono em ferrita quando resfriada rapidamente, praticamente instantânea, até uma temperatura relativamente baixa. Apresenta-se como uma estrutura tetragonal de corpo centrado, isto é, uma célula unitária correspondendo a um prisma reto de base quadrada, com as arestas laterais diferentes das arestas da base (Figura 4), onde esta diferença ocorre pela não ocorrência de difusão do carbono durante o resfriamento. Esta microestrutura contém grandes tensões internas, estando o carbono forçosamente distribuído na rede cristalina da ferrita. De acordo com Callister (2002) o aspecto microestrutural da martensita é geralmente sob a forma de agulhas.

**Figura 4 – A célula unitária tetragonal de corpo centrado (TCC) para o aço martensítico mostrando átomos de ferro (círculos) e os sítios que podem ser ocupados por átomos de carbono (cruzes)**



Fonte: Callister, 2002

Segundo Bhadeshia, citado por (FRANÇA, 2015) (pg. 37), a martensita possui elevada dureza devido à precipitação de partículas sub-microscópicas de carboneto de ferro da solução austenítica e retenção dessas partículas na forma de uma solução sólida supersaturada no reticulado de ferrita formado no esfriamento, onde atuam como espécies de “chavetas”, impedindo o escorregamento.

### 3.2 Tratamentos Térmicos

De acordo com Silva e Mei (1988) as operações de aquecimento e resfriamento controlados, que visam afetar as características de aços e ligas especiais, são denominadas tratamentos térmicos. Os tratamentos térmicos dos aços e ligas especiais englobam uma das mais amplas faixas de temperaturas dentre os processos industriais, possuindo diversas taxas de resfriamento empregadas, visando permitir a obtenção da exata estrutura desejada.

Os principais tratamentos térmicos abordados na obtenção de barras metálicas por meio da laminação são têmpera e revenimento.

### 3.2.1 Têmpera

Consiste no resfriamento rápido do aço de uma temperatura superior à sua temperatura crítica, está sendo 727 °C, em um meio como óleo, água, salmoura ou mesmo ar. A velocidade de resfriamento, nessas condições, dependerá do aço, da forma e das dimensões das peças. (SPECTRU INSTRUMENTAL CIENTÍFICO LTDA, 2005) (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, 2007).

No processo de têmpera, a constituição final desejada é a martensita. (ROSA, 2015). O objetivo dessa operação, do ponto de vista de propriedades mecânicas, é o aumento da dureza. (SILVA; MEI, 1988). Também é resultante da têmpera a redução da ductilidade, isto é, baixos valores de alongamento e empescoçamento, redução da tenacidade e o aparecimento de tensões internas. Segundo Moreira e Lebrão (2004) essas tensões são as principais razões para a ocorrência de trincas em componentes temperados. Tais inconvenientes são atenuados ou eliminados pelo revenido.

Para que a têmpera seja bem sucedida, vários fatores devem ser considerados. Inicialmente, a velocidade de esfriamento deve ser tal que impeça a transformação da austenita nas temperaturas mais elevadas em qualquer parte da peça que se deseja endurecer. (SILVA; MEI, 1988).

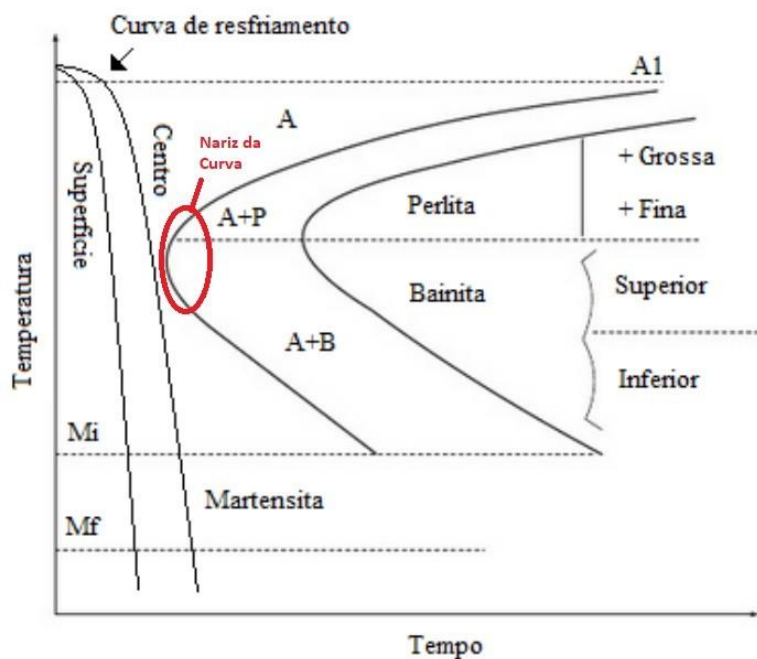
Segundo Spectru Instrumental Científico Ltda (2005), o endurecimento superficial dos aços, para um vasto número de aplicações de peças de máquinas, é, frequentemente, mais conveniente que seu endurecimento total pela têmpera, visto que, nessas aplicações objetiva-se apenas obter uma superfície dura e de grande resistência ao desgaste e à abrasão.

A têmpera superficial consiste em produzir-se uma têmpera localizada apenas na superfície das peças de aço, que assim adquirirá as propriedades e características típicas da estrutura martensítica. (QUEIROZ NETO, 2011).

A Figura 5 esquematiza a transformação de fase por têmpera, onde é possível visualizar que as taxas de resfriamento para a superfície e o centro da peça são diferentes, logo tais regiões podem apresentar microestruturas distintas. É necessário que a curva de resfriamento passe à esquerda do “nariz” da curva, evitando-se assim, que a austenita se transforme em seus

produtos cujo mecanismo de transformação é, ao menos parcialmente, difusional (perlita e bainita). (ROSA, 2015). A fase inicial de formação martensítica no processo de tempera está identificada por  $M_i$  e a fase final identificada por  $M_f$ .

Figura 5 – Diagrama esquemático de transformação para a têmpera



Fonte: Rosa, 2015

### 3.2.2 Revenimento

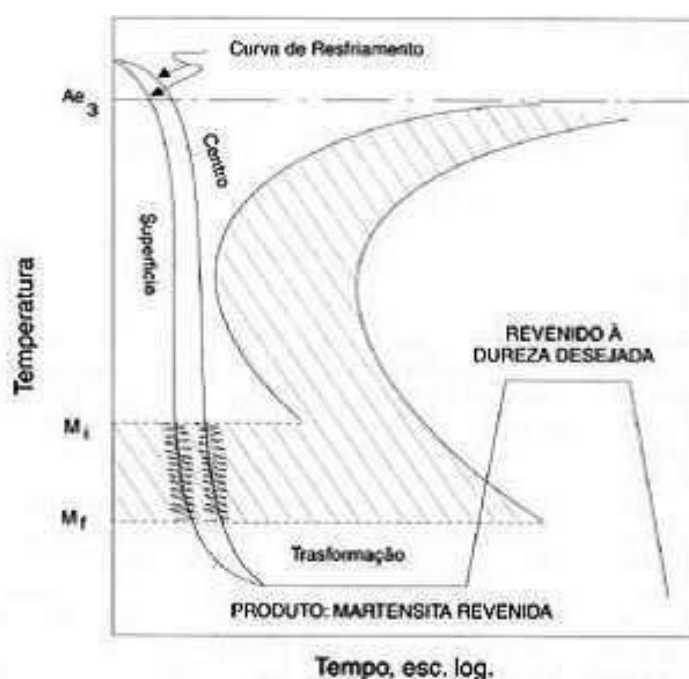
O revenido é o tratamento térmico que normalmente acompanha a têmpera. Ele elimina a maioria dos inconvenientes produzidos no processo, além de aliviar ou remover as tensões internas. Também corrige as excessivas dureza e fragilidade do material, aumentando sua ductilidade e resistência ao choque. (MOREIRA; LEBRÃO, 2004) (QUEIROZ NETO, 2011).

O aquecimento na martensita permite a reversão do reticulado instável ao reticulado estável cúbico centrado, produz reajustes internos que aliviam as tensões e, além disso, uma precipitação de partículas de carbonetos que cresce e se aglomeram de acordo com a temperatura e o tempo. (QUEIROZ NETO, 2011) (SILVA; MEI, 1988). De acordo com a

combinação de propriedades mecânicas que se deseja no aço temperado, é possível escolher a faixa de temperatura em que o revenimento ocorre, está podendo variar entre faixas de 25 a 100 °C, onde acontece segregação e uma redistribuição do carbono em direção as discordâncias, pouco afetando a dureza, ou até em faixas de 600° a 700°C, em que ocorre recristalização de crescimento de grão, em que a cementita precipitada apresenta forma nitidamente esferoidal e a ferrita apresenta forma equi-axial, essa estrutura é frequentemente chamada “esferoidita” e caracteriza-se por ser por muito tenaz e ter baixa dureza. (SPECTRU INSTRUMENTAL CIENTÍFICO LTDA, 2005) (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, 2007).

A Figura 6 ilustra a transformação de um aço austenitizado em martensita. onde essa transformação começa a partir da da linha  $M_i$  e se encerra com a queda de temperatura na linha  $M_f$ , após essa transformação ocorre o reaquecimento do material, onde a fonte de calor pode ser externa ou de calor residual do núcleo da peça metálica, e através desse reaquecimento as tensões internas geradas pelo processo de têmpera são aliviadas, resultando em martensita revenida.

Figura 6 – Curva de resfriamento para a obtenção de martensita e martensita revenida



Fonte: Queiroz, 2011

### 3.3 A Laminação

A laminação é um processo de conformação mecânica que tem como objetivo a redução de seção de placas, blocos ou tarugos, com consequente aumento de comprimento e com a melhoria de propriedades dos materiais, tais como ductilidade, resistência mecânica e estrutura superficial. (SCHAEFFER, 2004).

O processo de laminação a quente, como ocorre no aço CA-50, consiste no aquecimento de 1000 a 1200 °C do tarugo obtido da matéria-prima, através do forno de aquecimento de laminação, a temperaturas acima da temperatura de re- cristalização do metal da peça. Esse aquecimento é realizado de modo a reduzir a resistência à deformação plástica e permitir a recuperação da estrutura do aço, evitando o encruamento (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

Na laminação de produtos longos a partir de tarugos, ocorre a passagem do material em sequência entre dois cilindros com canais usinados, como visto na Figura 7, que estão fixados na gaiola de laminação, como pode ser visto no desenho esquemático da Figura 8, sendo a área entre os cilindros menor que a seção transversal da peça em processo. (NUNES, 2009). Desta forma, o material é submetido a tensões compressivas, resultantes da passagem forçada entre os dois cilindros, e a tensões cisalhantes superficiais, resultantes do atrito com a superfície dos canais usinados nos cilindros.

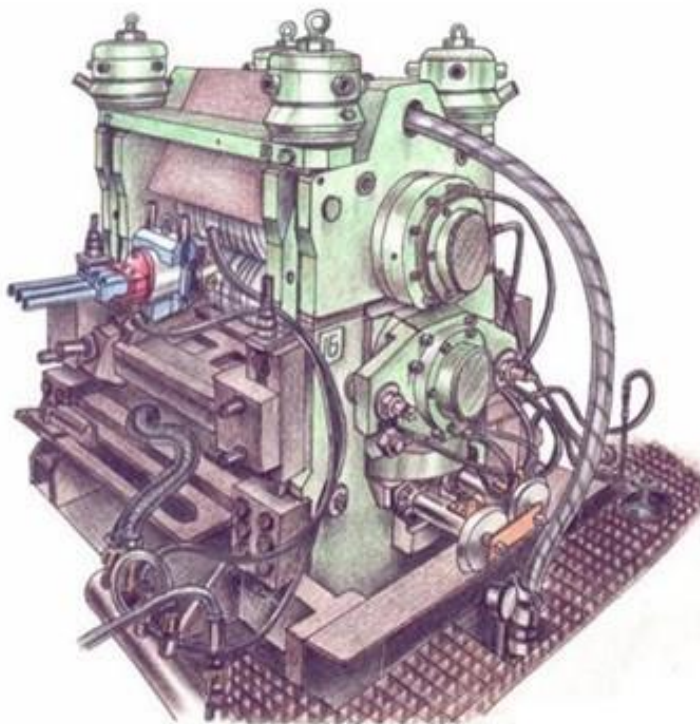
**Figura 7 – Cilindros de laminação com canais usinados**



Fonte: Oliveira, 2012



**Figura 8 – Desenho esquemático de gaiola de laminação**



Fonte: Módulo de treinamento da empresa

O processo de laminação de tarugos pode ser dividido em três etapas: desbaste, preparação e acabamento, onde irão obter o perfil, bitola e dimensões desejadas (ARCELORMITTAL, 2014).

No desbaste a barra será conformada por cilindros, tendo uma diminuição do seu diâmetro e aumento do comprimento. No preparador, adquire o formato de barra laminada, e no acabador recebe as marcações das nervuras, gravações de bitola e marcas, como especificadas nas normas técnicas.

No final do processo a quente, os grãos alongados por deformação sofrem recuperação e recristalização dinâmica, que ocorrem simultaneamente, e a energia acumulada devido aos defeitos criados no aço é a força motriz para estes eventos.(HEBERLE, 2019).

A Figura 9 trata-se de um desenho esquemático que ilustra a conformação mecânica imposta ao material a partir dos cilindros de laminação. O desenho indica a redução de seção do material ao passar pelos cilindros.

Figura 9 – Esquema de conformação mecânica realizada pelos cilindros de laminação



Fonte: Heberle, 2019

### 3.4 Processo Thermex

Tempcore ou Thermex é um processo de resfriamento controlado em linha para a produção de vergalhões, mediante o tratamento térmico de resfriamento com água pressurizada, na laminação a quente, levando a superfície da barra de 1000 a 200°C em segundos. (ALVES FILHO, 2004). Este sistema apresenta uma facilidade de operação e praticamente não requer trabalho operacional durante seu funcionamento.

#### 3.4.1 Componentes do processo Thermex

No processo Thermex (Figura 10), são utilizados tubos, também denominados de canhões. Ele subdivide-se em três trechos, denominados de carros, onde a água pressurizada troca calor com as barras, além de um sistema de sopradores para a remoção da água na superfície das barras. Segundo Melo (2010), este sistema de troca térmica garante, por sua vez, que as barras tenham um resfriamento forçado e homogêneo em sua superfície.

Quando a barra sai do Thermex, cessando o resfriamento forçado com água, ela segue para o leito de resfriamento ao ar em temperatura ambiente.

**Figura 10 – Thermex**



Fonte: <http://thermex-rebars.in/>

### **3.4.2 Descrição do processo Thermex**

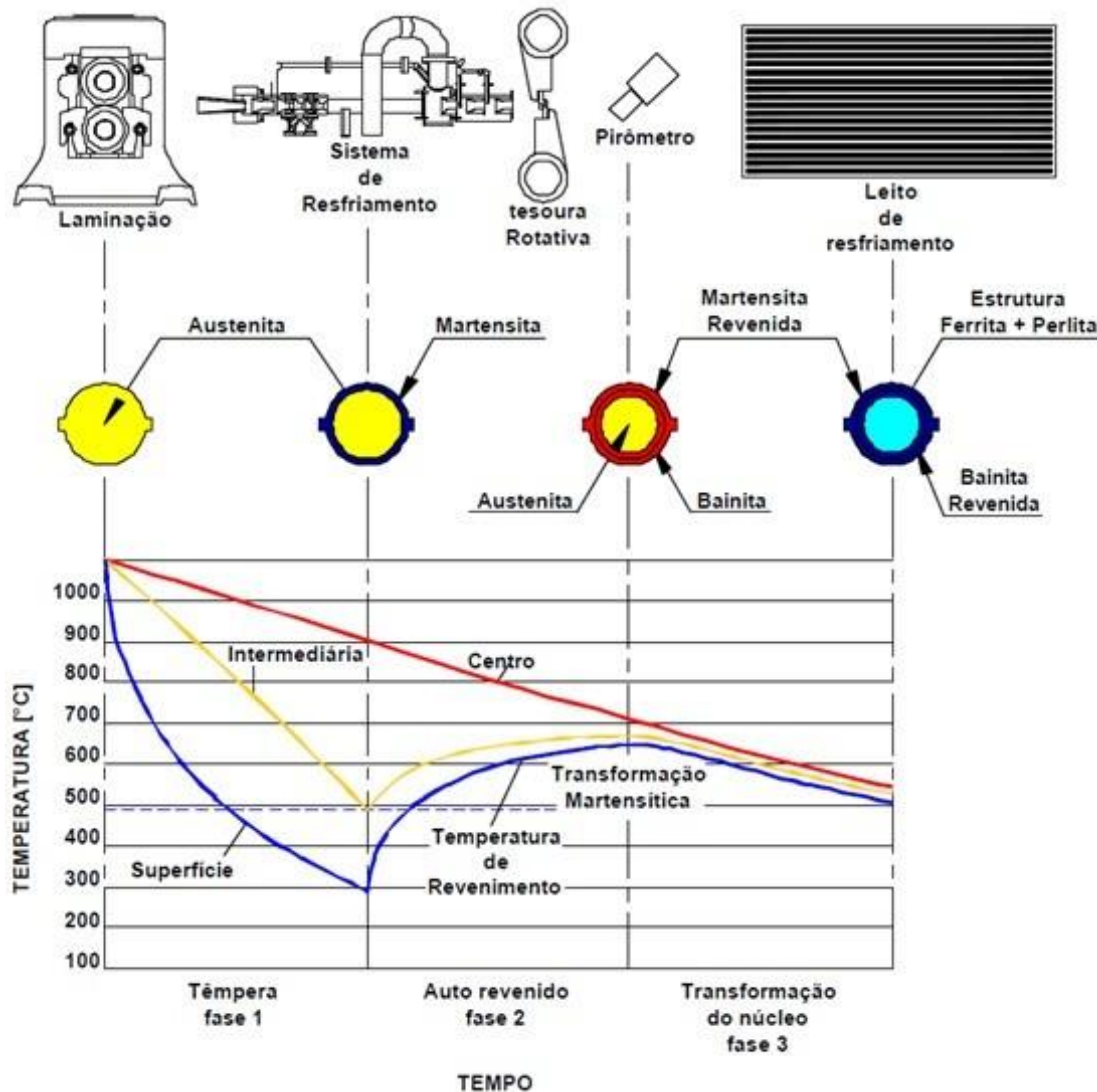
Segundo Alves Filho (2004), o processo pode ser descrito em três fases:

**Fase 1:** Composta pelo período em que ocorre a têmpera da camada superficial da barra, deixando-a com estrutura martensítica enquanto o núcleo permanece aquecido e na estrutura austenítica.

**Fase 2:** Acontece o auto-revenimento pelo calor residual do núcleo da barra, ocorrendo a formação de uma camada intermediária de bainita entre o núcleo ainda austenítico e a martensita da camada superficial, esta tornando-se martensita revenida pelo alívio de tensões gerado pelo reaquecimento.

**Fase 3:** Corresponde ao resfriamento ao ar livre após a saída da barra do thermex, nessa fase ocorre a finalização do revenimento da martensita da superfície, da bainita da camada intermediária e a mudança de fase do núcleo da barra, transformando-se de austenita para uma estrutura composta por ferrita e perlita, como visto na Figura 11.

Figura 11 – Esquema de processo Thermex



Fonte: Alves Filho, 2004

De acordo com Queiroz Neto (2011), o objetivo ao se realizar a têmpera é a obtenção da estrutura da martensita na camada superficial, que possibilite um aumento de dureza e a criação de uma superfície com grande resistência ao desgaste e à abrasão. Além disso, esse processo gera uma redução da ductilidade e da tenacidade, que podem ser abrandados com o revenimento. O revenimento é responsável pelo alívio das tensões internas, aumento da ductilidade e da resistência ao choque.

Como resultado desse processo, segundo Alves Filho (2004), o vergalhão possui uma camada superficial com alto limite de escoamento e núcleo com alta

ductilidade, e as barras que passam por tratamento térmico possuem um aumento na resistência à tração do material e uma redução nos valores de alongamento.

De acordo com Arcelormittal (2014), a barra que passa pelo processo de têmpera e revenimento apresenta também a característica de soldabilidade, podendo ser soldado sem necessidade de pré ou pós-aquecimento da barra e apresenta alta capacidade de dobramento.

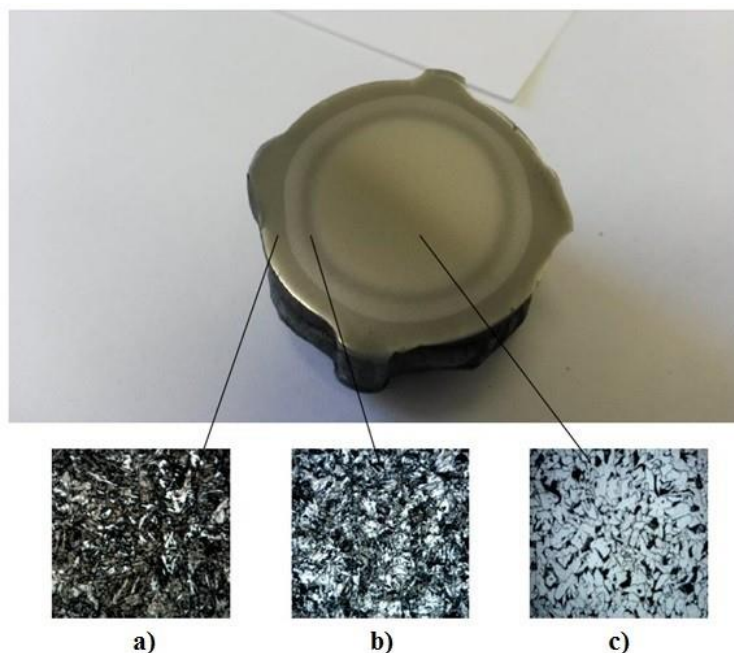
O sistema Thermex de resfriamento apresenta dispositivos de controle, baseados nas medições de temperaturas de entrada e saída da barra, como também nas medições das pressões da água nos canhões. Além destes, são utilizados outros controladores, previamente dispostos nas demais etapas do processo de laminação. Os principais parâmetros controlados relevantes à garantia do processo estão descritos a seguir: (ALVES FILHO, 2004).

- Temperatura de entrada das barras no processo de laminação;
- Temperatura de saída das barras no leito de resfriamento;
- Pressão de água nos canhões e nos três trechos do sistema;
- Temperaturas da água de entrada e retorno do sistema;
- Velocidade de laminação.

### **3.4.3 Análise microestrutural de materiais resultantes do processo Thermex**

Segundo França (2015) através desse processo de tratamento térmico, a superfície e o núcleo são resfriados a diferentes velocidades, com o resfriamento repentino da superfície causando a têmpera da camada mais externa da barra, transformando a austenita, microestrutura primária do aço, em martensita e um resfriamento mais lento do núcleo, gerando um núcleo mais dúctil de ferrita e perlita, conforme a Figura 12.

**Figura 12 – (a) Coroa externa de martensita, (b) Coroa intermediária de bainita e (c) Núcleo de ferrita e perlita**

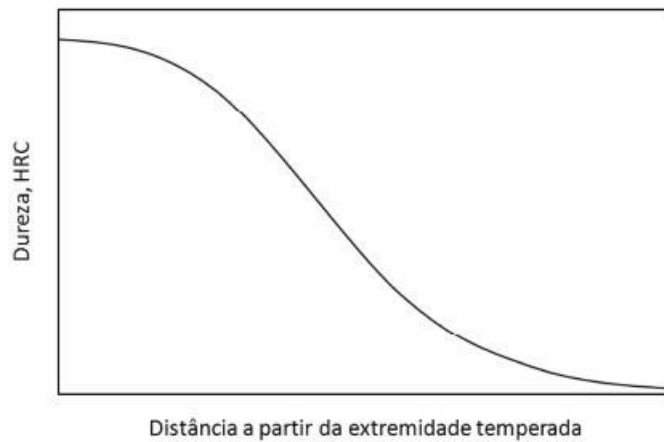


Fonte: França, 2015

Ao ser retirado o resfriamento pelos jatos de água pressurizada a superfície da barra passa a ser reaquecida pelo calor ainda existente no núcleo até que toda a seção fique praticamente na mesma temperatura, o que é conhecido como auto-revenimento, que por sua vez, transforma a martensita criada na camada superficial em martensita revenida. O aquecimento da martensita produz reajustes internos que aliviam as tensões e geram uma microestrutura que atinge altos limites de alongamento e de resistência, sem possuir a fragilidade da martensita (ALVES FILHO, 2007).

A Figura 13 indica a variação de dureza de um material após sofrer tratamento térmico de têmpera em função da distância a partir da extremidade temperada. Nota-se que a extremidade do material temperado passa por um resfriamento mais rápido, exibindo maior dureza, sendo uma posição em que facilmente se encontra microestrutura totalmente de martensita. À medida que se afasta da extremidade, a taxa de resfriamento reduz e resulta em diminuição da dureza. Reduções na taxa de resfriamento significam mais tempo para a difusão de átomos de carbono e formação de outras microestruturas, podendo haver misturas, ao longo da espessura da peça, de martensita, bainita, perlita e ferrita. (OLIVEIRA, 2012).

**Figura 13 – Variação da dureza do material em função da distância a partir da extremidade temperada**

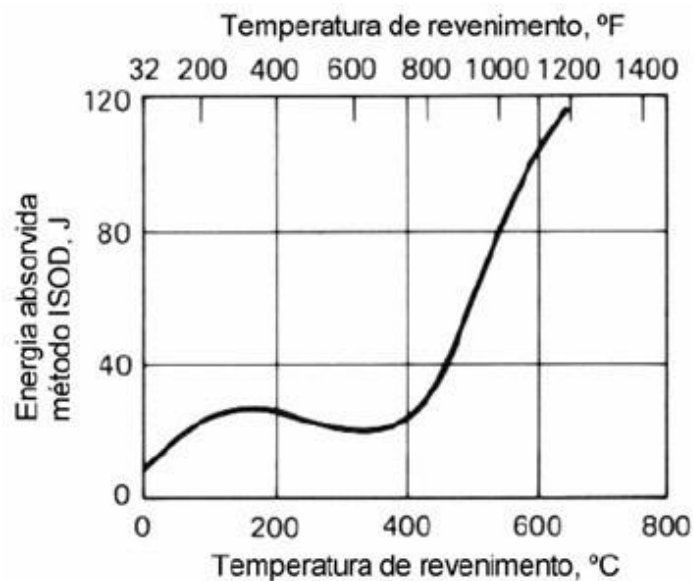


Fonte: Oliveira, 2012

### 3.5 Fragilidade Azul

O revenimento de aços carbono e alguns aços de baixa liga na faixa de temperatura entre 230 e 370°C pode resultar na diminuição de sua ductilidade e tenacidade e aumento do limite de escoamento. (MOREIRA; LEBRÃO, 2004) (SCHEID, 2016). Pela Figura 14 é possível visualizar a queda de energia absorvida nessa faixa.

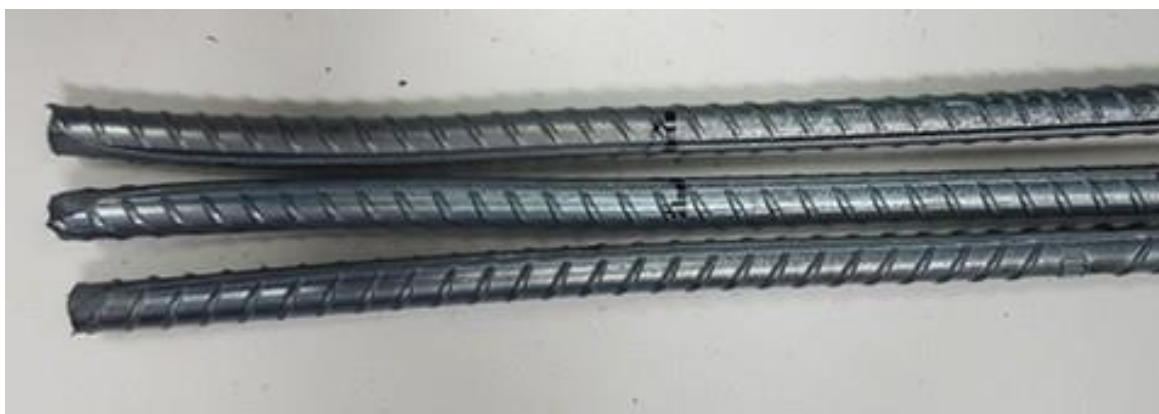
**Figura 14 – Tenacidade em função da temperatura de revenimento para aço SAE 4140 revenido por uma hora**



Fonte: Moreira e Lebrão. 2004

Este fenômeno é denominado fragilidade azul, caracterizado por uma oxidação azulada na superfície dos aços revenidos nessa faixa de temperatura, como visto na Figura 15. Isso ocorre devida à precipitação da cementita em contornos de grão e entre as agulhas de martensita, aumentando fragilidade da barra metálica. (MOREIRA; LEBRÃO, 2004).

**Figura 15 – Vergalhão com fragilidade azul**



Fonte: Autoria Própria

Deve ser evitado o revenimento na faixa entre 230 e 370°C em aços ao carbono temperados empregados em componentes submetidos a grandes esforços de tração e impactos. (TSCHIPTSCHIN, 2010). Dessa forma, tornando-se inviável seu uso para vergalhões de concreto armado, gerando grande perda metálica.

### 3.6 Controlador Lógico Programável

Na década de 60, o aumento da competitividade no mercado automobilístico fez com que as indústrias buscassem melhorias de desempenho em suas linhas de produção, aumentando a sua qualidade e produtividade. Foi observada então a necessidade de encontrar uma opção substituta para os sistemas de controle a relés. Uma saída possível imaginada pela General Motors, seria um sistema baseado em controle computacional.



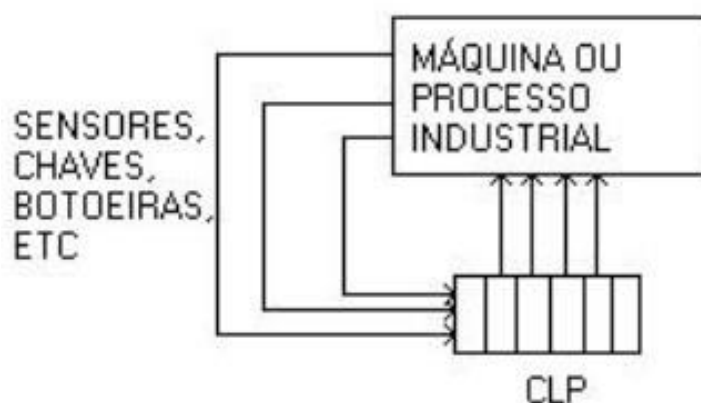
### 3.6.1 Definição e funcionamento do CLP

O Controlador Lógico Programável pode ser definido como um dispositivo de estado sólido, ou seja, um computador industrial capaz de armazenar instruções para implementação de funções de controle (sequência lógica, temporização e contagem, por exemplo), além de realizar operações lógicas aritméticas, manipulação de dados e comunicação em rede, sendo utilizado no controle de Sistemas Automatizados. (STURATO, 2009).

Pode-se subdividir a configuração do CLP em variáveis de entrada, estes sendo os sinais externos recebidos do processo através de sensores, chaves, botoeiras, entre outros, e as variáveis de saída onde o mesmo coordena o processo através dos pontos de saída e o programa, que nada mais é que a execução de ações de controle oriundas de processos lógicos, ativados pela varredura das entradas e memórias internas. (DYBAS; OSTERNACK; LIMA, 2015) .

Um esquema básico do funcionamento de um CLP pode ser visto na Figura 16, onde temos a leitura dos parâmetros de uma máquina ou processo através de sensores, comandos por botoeira ou chave que encaminham sinais elétricos e lógicos para o CLP, que de acordo com a programação implantada, irá emitir um sinal de saída para ajustar os valores reais para os valores desejados de projeto.

Figura 16 – Princípio de funcionamento do CLP



Fonte: Pupo, 2002

Definida por Silveira e Santos, citados por (DYBAS; OSTERNACK; LIMA, 2015), (pg.14) a CPU é a unidade central de processamento, podendo ser encarada como o “cérebro” que controla todas as ações de um CLP, constituída por um processador, memórias e um sistema de interligação (barramento).

A atuação de um controlador pode ser representada graficamente como um fluxo de informações entre módulos com funções distintas, onde um módulo de monitoração obtém uma informação proveniente do processo e envia ao controlador, este procedimento pode conter várias etapas. (STURATO, 2009). O controlador recebe esta informação, toma decisões e comunica a um elemento final a ação a ser tomada, que por sua vez, interfere em alguma condição de processo de modo a controlá-lo corretamente, seguindo o programa do usuário. (SOUZA, 2007).

Pode-se observar na Figura 17 o ciclo de processamento dos dados dentro da CPU.

Figura 17 – Ciclo de processamento do CLP



Fonte: Dybas et al, 2015

A partir da Figura 17 temos a descrição das etapas sequenciais de processamento do CLP:

**Início:** Verifica o funcionamento da CPU, memórias, circuitos auxiliares, estados das chaves, existência de um programa de usuário, emite aviso de erro em caso de falha. Desativa todas as saídas.

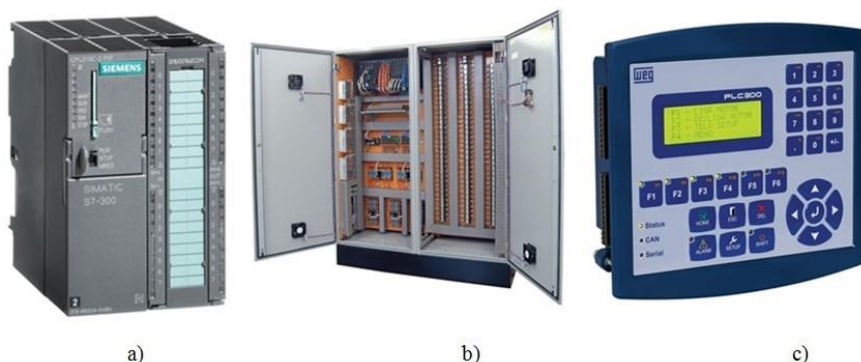
**Verifica o estado das entradas:** Lê cada uma das entradas, verificando se houve acionamento. O processo é chamado de ciclo de varredura.

**Compara com o programa do usuário:** Através das instruções do usuário sobre qual ação tomar em caso de acionamento das entradas o CLP atualiza a memória imagem das saídas.

**Atualiza as saídas:** As saídas são acionadas ou desativadas conforme a determinação da CPU. Um novo ciclo é iniciado.

No mercado atual existem vários fabricantes, como Siemens, Weg e Schneider, por exemplo, e modelos diferentes de controladores lógicos programáveis, podendo ser mais compactos, focados em pequenas operações, com limitadas entradas e saídas em seu barramento (Figura 18 - a) ou de grande porte, podendo a central lógica ocupar grandes painéis (Figura 18 - b), e de acordo com a aplicação, pode apresentar uma interface local de interação homem-máquina, como visto na Figura 18 - c.

Figura 18 – CLPs: a) SIEMENS SIMATIC S7 6ES7; b) Painel; c) WEG PLC300



Fonte: Catálogos das respectivas marcas

### 3.6.2 Linguagem de programação Ladder




A linguagem por diagrama de contatos, denominada Ladder, foi a primeira que surgiu para a programação dos Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), pois sua funcionalidade procurava imitar os antigos diagramas elétricos, utilizados pelos técnicos e engenheiros da época. (STURATO, 2009). O objetivo era evitar uma quebra de paradigmas muito grande, permitindo assim a melhor aceitação do produto no mercado. (PUPO, 2002).

O Ladder pode ser exemplificado por um desenho formado por duas linhas verticais, que representam os polos positivo e negativo de uma bateria, ou fonte de alimentação genérica. Entre as duas linhas verticais são desenhados ramais horizontais que possuem chaveamentos. (SANTANA JÚNIOR, 2003). Estes podem ser normalmente abertos, ou normalmente fechados e representam os estados das entradas do CLP.

Dessa forma torna-se mais intuitivo converter um diagrama elétrico para linguagem Ladder. Transformando as colunas de esquema elétrico em linhas de comando de sinais. (DYBAS; OSTERNACK; LIMA, 2015).

Podemos visualizar os elementos utilizados na programação Ladder a partir da Figura 19.

Figura 19 – Elementos Básicos da Linguagem Ladder

Nomenclatura	Abreviação	Símbolo
Contato Normalmente Aberto	NA	
Contato Normalmente Fechado	NF	
Bobina ou Saída	---	

Fonte: Autoria Própria

### 3.6.3 Funções Lógicas em LADDER

A combinação entre os contatos NA e NF servem de importante orientação para o projetista e programador de circuitos lógicos. (STURATO, 2009). Assim formando sequencias lógicas para obter sinais de saída que resultem em operações dos equipamentos controlados.

Através das figuras seguir pode-se observar as principais funções lógicas em LADDER.

A função “E” (And) é aplicada quando é necessário que todos os sinais de entrada sejam acionados para obter uma resposta, ou seja, sinal de saída de comando (Figura 20).

Figura 20 – Linha de programação Ladder da função AND



Fonte: Autoria Própria

A função “OU” (Or) é aplicada quando apenas um dos sinais de entrada precisa ser acionado para obter um sinal de saída de comando (Figura 21).

Figura 21 – Linha de programação Ladder da função OR



Fonte: Autoria Própria

A função “Não E” (Nand) utiliza o conceito da álgebra booleana  $A \cdot B = A + B$ , consistindo de dois contatos NF em paralelo (Figura 22).

Figura 22 – Linha de programação Ladder da função NAND



Fonte: Autoria Própria

A função “Não OU” (Nor) utiliza o conceito da álgebra booleana  $A+B=A*B$ , consistindo de dois contatos NF em série (Figura 23).

Figura 23 – Linha de programação Ladder da função NOR



Fonte: Autoria Própria

#### 3.6.4 Instruções de “SET” e “RESET”

Além das funções básicas apresentadas, existem também as instruções de “SET”, que liga uma saída e a mantém ligada mesmo que a alimentação da entrada seja retirada e para se desligar esta saída, utiliza-se a instrução “RESET”.

A Figura 24 mostra um exemplo da utilização destas instruções para uma partida direta de um motor:

Figura 24 – Linha de programação Ladder para as instruções SET e RESET



Fonte: Autoria Própria

### **3.6.5 Temporizadores e Contadores**

O temporizador é um elemento fundamental na programação em Ladder, pois a partir deste elemento podem-se montar diversas aplicações. (STURATO, 2009).

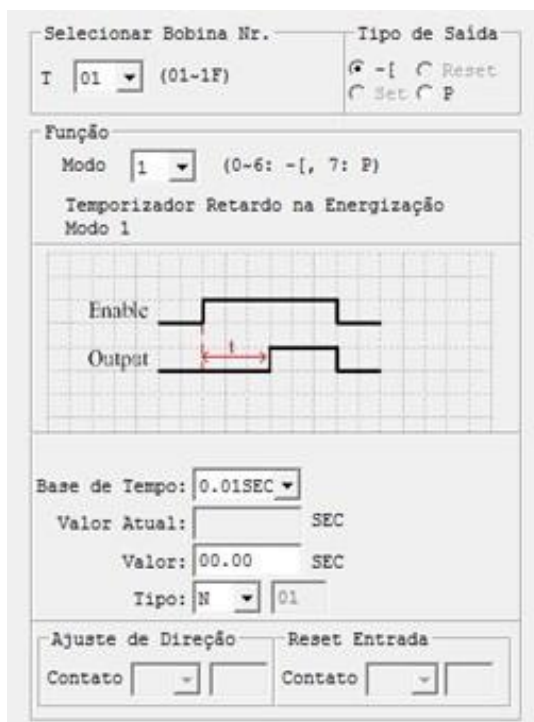
Os temporizadores possuem formas variadas de leituras e contagens de tempo, como por exemplo, tempo de retardo de energização, tempo de duração de sinal comutado e temporizador oscilador. Têm-se também os contadores, que tem como função primordial a contagem de sinais de entrada, e a partir do valor previamente determinado, ocorrer a comutação de sinal e emitida uma resposta de saída.(UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 1999).

As Figuras 25 e 26 demonstram uma tela de configuração de temporizador configurado para retardo de energização e configuração de um contador de cinco pulsos para comutação de sinal, respectivamente, através do software Clic02LAD.

O software Clic02LAD consiste de um simulador de modelos de CLPs da marca WEG onde é possível desenvolver a lógica de programação em Ladder, além das configurações das funções lógicas anteriormente citadas, juntamente com as funções de set e reset, temporizadores e contadores.

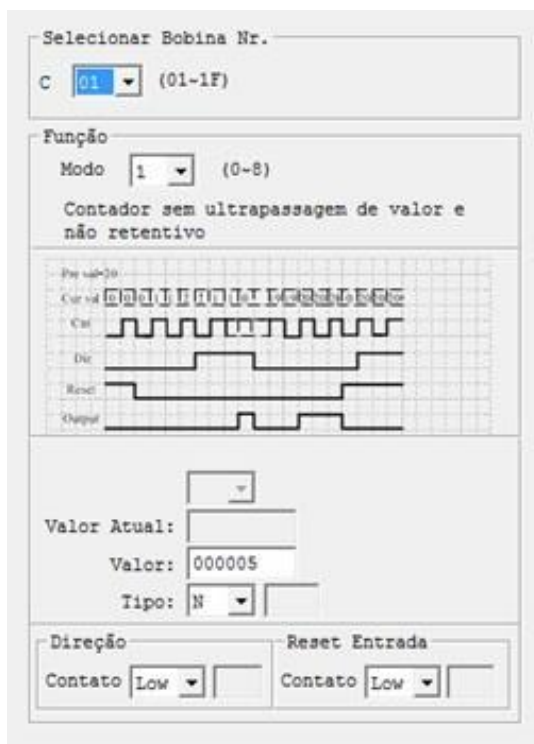
O modelo simulador para a configuração do temporizador e contador das Figuras 25 e 26 é o modelo WEG CLW-02/10HR-A.

Figura 25 – Tela de configuração de temporizador de CLP através do software Clic02LAD



Fonte: Autoria Própria

Figura 26 – Tela de configuração de contador de CLP através do software Clic02LAD



Fonte: Autoria Própria



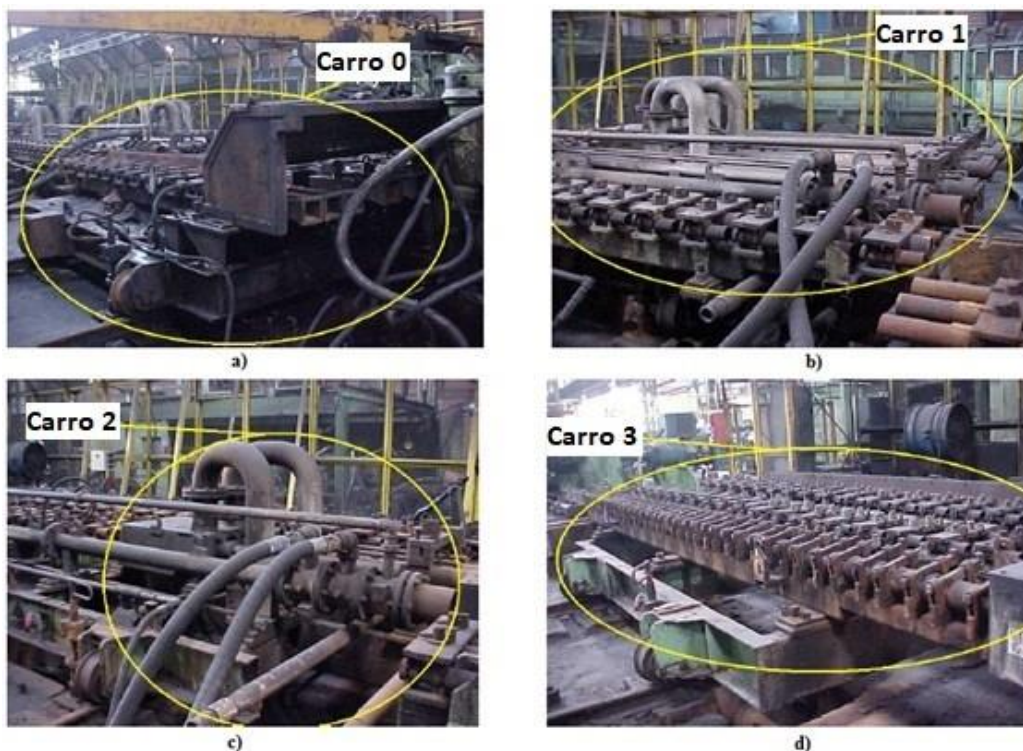
## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi executado no setor de laminação de uma empresa siderúrgica da região, como proposta de solução para a redução de perda metálica gerada por fragilidade azul no comprimento inicial de barras de vergalhão CA 50 de 8 mm. Sendo o comprimento da barra afetada de 12 metros no primeiro corte de 36 metros de barra, sendo 13 cortes no total. Estes cortes acontecem após o processo Thermex, onde a barra laminada é cortada em segmentos de 36 metros, está sendo a medida padronizada com o comprimento do leito de resfriamento.

### 4.1 Materiais

Foi utilizado um sistema Thermex composto por quatro carros, numerados de 0 a 3, como visto na Figura 27, alinhados em série, e em cada carro são dispostos três tubos em paralelo denominados veios, sendo eles o V1, VM e V2, como visto na Figura 28.

Figura 27 – Carros do thermex: a) Carro 0, b) Carro 1, c) Carro 2 e d) Carro 3



Fonte: Autoria Própria

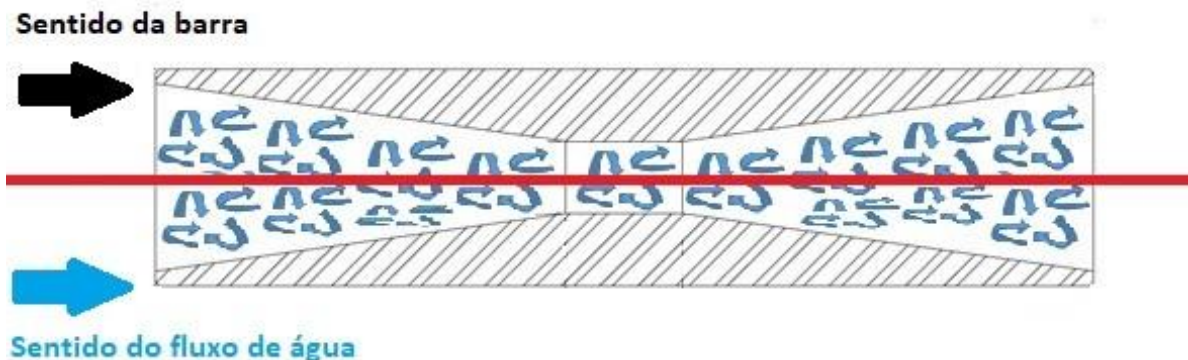
Figura 28 – Veios do Thermex



Fonte: Autoria Própria

O carro 0 é composto por calhas que irão direcionar a barra laminada para o carro 1, este sendo o carro responsável pelo tratamento térmico da barra. O carro 1 é composto internamente por 7 guias intermediárias denominadas de insertos. Pela Figura 29 podemos observar a sua geometria, e também o comportamento da água em regime turbulento ao passar em seu interior, onde o fluxo de água segue o mesmo sentido que o da barra que está sendo tratada termicamente. Os carros 2 e 3 são compostos por tubos que tem como finalidade direcionar a barra tratada para o caminho de rolos e em seguida para leito de resfriamento.

Figura 29 – Desenho esquemático de inserto do carro 1 com medidas em milímetros



Fonte: Autoria Própria

Na bomba modelo CPK 80-315 da KSB utilizada (Figura 30), a pressão da água do sistema é elevada de 5 kgf/cm<sup>2</sup> para até 25 kgf/cm<sup>2</sup>. A água utilizada no sistema Thermex é do sistema de água limpa ligado a um afluente, funcionando com no máximo 2 bombas, uma operando e outra em *stand by*. A pressão de operação para o processo Thermex sobre o vergalhão de 8 mm CA50 pode ser visualizado pela Tabela 1, sendo o valor nominal o utilizado em condição normal no processo de tratamento térmico.

**Figura 30 – Bomba CPK 80-315**



Fonte: Autoria Própria

**Tabela 1 – Padrão operacional de pressão das tubulações do Thermex para vergalhão CA 50 de 8 mm**

Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Muito Baixa	Baixa	Nominal	Alta	Muito Alta
Tubo 1 – Vermelho	-	-	0	-	-
Tubo 2 – Amarelo	7	8,75	10,50	12,25	14
Tubo 3 – Azul	-	-	0	-	-
Tubo 4 – Verde	7	8,75	10,50	12,25	14
Tubo 5 – Branco	7	8,75	10,50	12,25	14

Fonte: Padrão de operação da empresa

A conexão de alimentação de água no Thermex é obtida por meio de mangueiras interligadas às suas tubulações. São cinco tubulações diferenciadas por cores (branca, verde, azul, amarela e vermelha), como observado na Figura 31.

**Figura 31 – Tubulações de alimentação de água do Thermex**



Fonte: Autoria Própria

O controle de vazão é realizado remotamente através das válvulas reguladoras de vazão, de acordo com padrão operacional da empresa, como visto na Tabela 2.

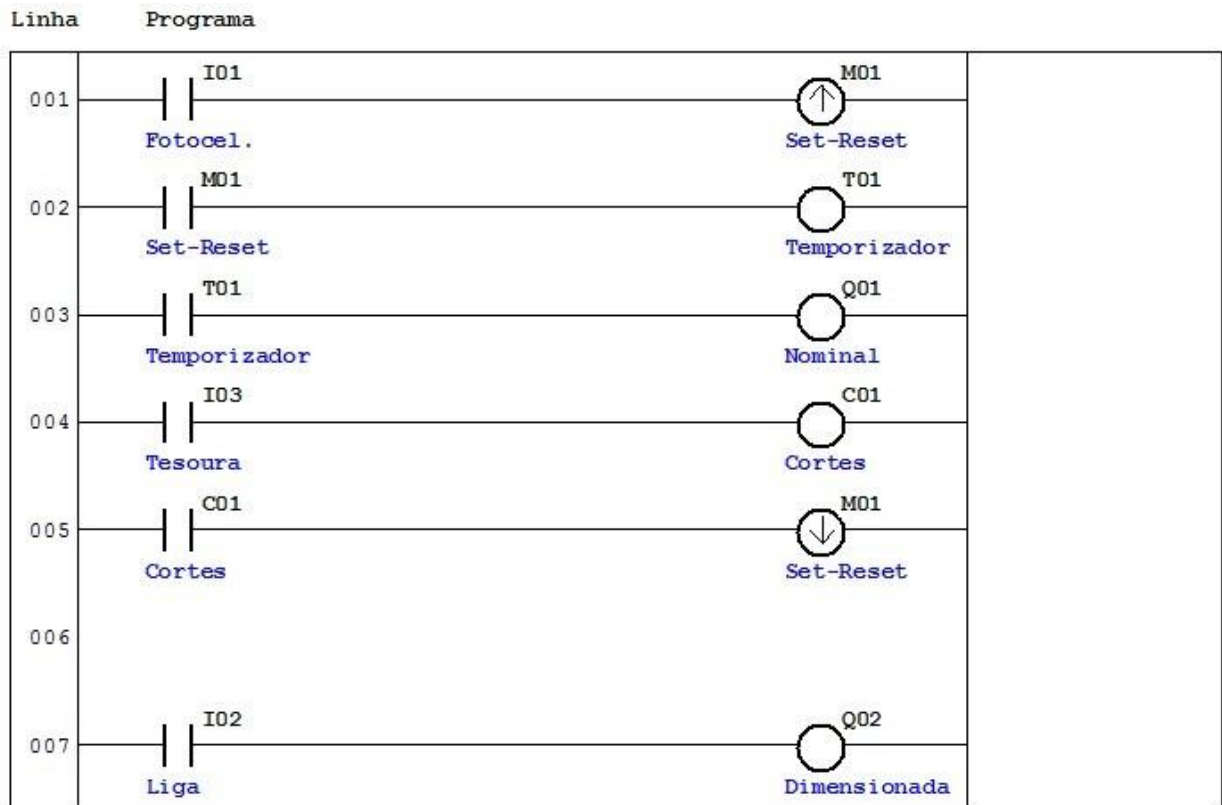
**Tabela 2 – Padrão operacional de vazão das tubulações do Thermex para vergalhão CA 50 de 8 mm**

Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Muito Baixa	Baixa	Nominal	Alta	Muito Alta
Tubo 1 – Vermelho	-	-	0	-	-
Tubo 2 – Amarelo	42	46,5	51	55,50	60
Tubo 3 – Azul	-	-	0	-	-
Tubo 4 – Verde	42	46,5	51	55,50	60
Tubo 5 – Branco	42	46,5	51	55,50	60

Fonte: Padrão de operação da empresa

O sistema de controle para o processo Thermex foi obtido pelo CLP Automax da empresa Reliance. Onde foi desenvolvida uma lógica para o controle de tempo de acionamento do inversor de frequência conectado ao motor da bomba para temporizar o período em que a pressão inicial ficará abaixo da nominal e, ao final da contagem emitir um sinal para o inversor de frequência, fazendo a bomba retornar a sua pressão e vazão nominal de operação. Este funcionamento segue a lógica em Ladder descrita pela Figura 32.

**Figura 32 – Lógica Ladder para sistema de acionamento de bomba do Thermex**



Fonte: Autoria Própria

#### 4.2 Metodologia de Cálculo

Para dimensionar o sistema de controle de acionamento das bombas hidráulicas de maneira que as propriedades mecânicas de limite de escoamento, limite de resistência e alongamento da cabeça da barra estivessem de acordo com a norma técnica foi necessário calcular o tempo de duração em que a

pressão e vazão reduzida iria ser atuado através da função horária do movimento retilíneo uniforme e as pressões e vazões adequadas por meio de simulação computacional.

#### 4.2.1 Cálculo do Tempo de Acionamento

Para que a porção inicial da barra seja tratada com menor intensidade pela redução momentânea de pressão e vazão de água, foram dimensionados tempos de acionamento do motor da bomba do Thermex. Esses tempos foram obtidos através da relação do deslocamento da barra entre gaiolas de laminação e do Thermex com as suas velocidades locais, utilizando a função horária do movimento retilíneo uniforme.

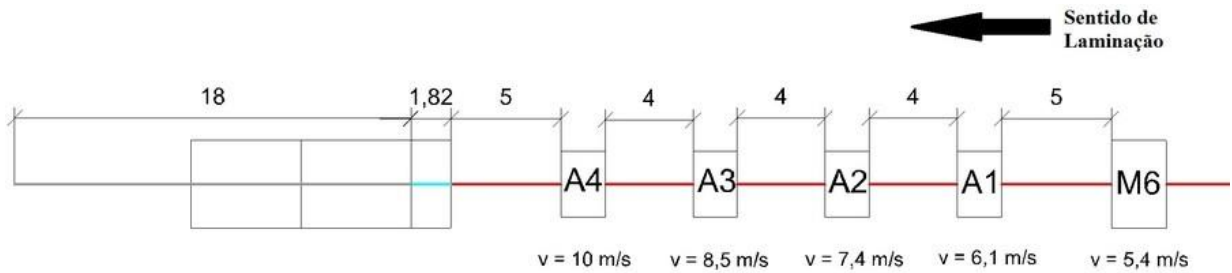
$$S = S_0 + V \times T$$

Onde S é o espaço final, este sendo a distância do ponto de leitura da fotocélula escolhida até a extremidade da barra que recebeu o tratamento térmico nos seus primeiros 18 metros,  $S_0$  é o ponto de referência inicial, dado pela fotocélula escolhida, como sempre ele é o ponto de partida, ele é zero, V é a velocidade da barra laminada, sendo um dado já conhecido, e T é o tempo de deslocamento da barra a partir da referência da fotocélula até o espaço final S, o tempo deste deslocamento é o mesmo tempo de acionamento a ser encontrado.

Para garantir que toda essa porção da barra, os 12 metros iniciais, fosse tratada pela pressão e vazão dimensionada, foi definido que o cálculo dos tempos de acionamento considerariam que o tratamento térmico reduzido ocorresse nos 18 metros iniciais, para ter uma margem de segurança, sendo este comprimento escolhido como referencial para os cálculos.

O ponto de partida da barra para os cálculos dos tempos foi determinado pela leitura de sensores de fotocélula localizados nas saídas das gaiolas de laminação, como demonstrado no esboço da Figura 33.

**Figura 33 – Posicionamento das fotocélulas e velocidades locais de laminação**



Fonte: Autoria Própria

As fotocélulas escolhidas foram a A3, A1 e M6, pois, de acordo com os tempos calculados, estas fotocélulas foram o referencial de partida para que a porção tratada sob pressão e vazão dimensionada atingissem o mesmo comprimento estipulado de 18 metros. A relação de tempos dimensionados e sua fotocélula correspondente podem ser visualizadas através da Tabela 3.

**Tabela 3 – Tempos de rampa de acionamento calculados para testes**

Testes	Fotocélula	Tempo dimensionado (s)
Teste 1	M6	5,21
Teste 2	A1	4,25
Teste 3	A3	3,4
Teste 4	A3	3,7
Teste 5	A3	3,1

Fonte: Autoria Própria

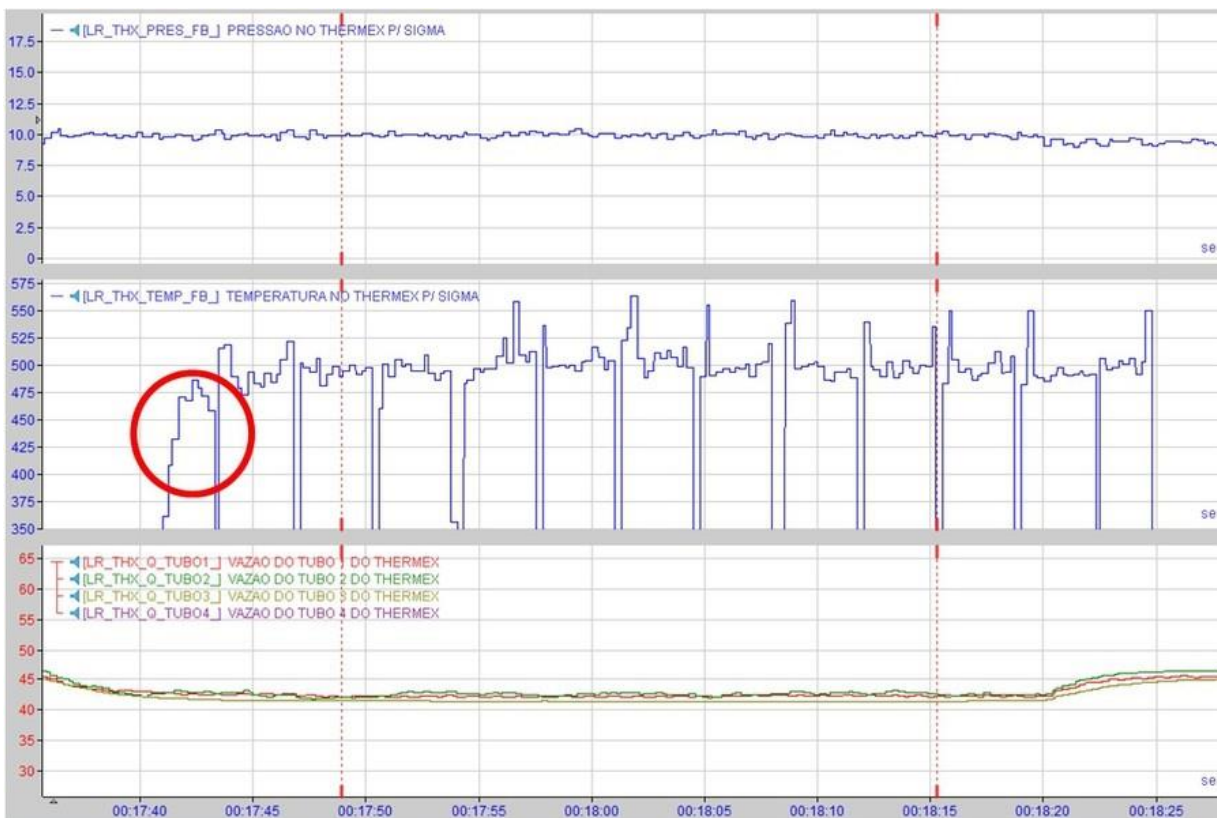
Uma vez determinado o tempo de acionamento, esse valor foi inserido no temporizador do CLP para execução dos testes.

#### 4.2.2 Cálculo de Pressão e Vazão

O processo Thermex analisado, em seu estado nominal de operação, possui a configuração de velocidade de linha de laminação a 10,2 m/s, 10 Bar de pressão e 43 m<sup>3</sup>/h de vazão de água. A leitura dos sensores

apresentava uma temperatura inferior na porção inicial da barra comparada com o restante de seu comprimento, como pode ser visto na área marcada na Figura 34.

Figura 34 – Leitura de pressão, vazão e temperatura no processo Thermex



Fonte: Autoria Própria

O principal fator que deve ser controlado no processo de resfriamento de barras para se obter as propriedades mecânicas desejadas é a temperatura de equalização na chegada do leito de resfriamento. (ECONOMOPOULOS et al., 1975) (SIMON; ECONOMOPOULOS; NILLES, 1984).

De acordo com Alves Filho (2004), o controle desta temperatura pode ser realizado através dos parâmetros de pressão da água dos canhões e da velocidade da linha de laminação.

Como no ambiente do teste a velocidade de laminação não poderia ser alterada, devida a configuração das gaiolas, foi utilizado a variação de pressão e vazão para o controle de temperatura de equalização.



Para definir os valores de pressão e vazão para os testes, foi utilizado o software 10020raftondo2232A, fornecido pela empresa AF STEEL ENGINEERING, fabricante do Thermex analisado, o qual se baseia em análises pelo método de elementos finitos, dividido em 100 elementos e 10 nós.

As variáveis de entrada para obter a temperatura de equalização desejada do Thermex estudado são: velocidade da linha de laminação, diâmetro da barra laminada, vazão e pressão de água, geometria do inserto (diâmetro máximo, diâmetro mínimo, comprimento convergente, paralelo e divergente), temperaturas de entrada da água e da barra e propriedades termofísicas do aço, estas obtidas pela tabela A1 do (INCROPERA; DEWITT, 2017) em anexo. Assim, calculou-se a temperatura de equalização da barra após tratamento.

Pela Tabela 4 podemos observar os parâmetros da condição normal de operação.

**Tabela 4 – Parâmetros de entrada para condição normal de operação**

Parâmetros de entrada	Valor	Unidades
Velocidade de laminação	10,2	m/s
Diâmetro da barra laminada	8	mm
Diâmetro máximo do inserto	52	mm
Diâmetro mínimo do inserto	20	mm
Comprimento convergente do inserto	114	mm
Comprimento paralelo	32	mm
Comprimento divergente do inserto	114	mm
Número de insertos	7	-
Vazão de água	43	m <sup>3</sup> /h
Pressão de água	10	bar
Temperatura de entrada da água	35	°C

Temperatura de entrada da barra laminada	1000	°C
Condutividade térmica do aço	38	Kcal/mh°K
Densidade do aço	7800	Kg/m <sup>3</sup>
Calor específico do aço	0,13	Kcal/Kg °C

Fonte: Autoria Própria

Os valores dimensionados para pressão e vazão a partir dos resultados obtidos nas simulações no software de elementos finitos podem ser visualizados pela Tabela 5:

**Tabela 5 – Temperaturas de equalização de acordo com o valor dimensionado de pressão e vazão**

Estado	Fotocélula	Pressão (bar)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura Equalização (°C)
Condição Normal	-	9,856	42,606	543
Teste 1 - 5,21 s	M6	4,928	31,862	609
Teste 2 - 4,25 s	A1	5,913	34,893	593
Teste 3 - 3,4 s	A3	7,711	36,774	582
Teste 4 - 3,7 s	A3	7,610	37,289	580
Teste 5 - 3,1 s	A3	7,561	37,456	579

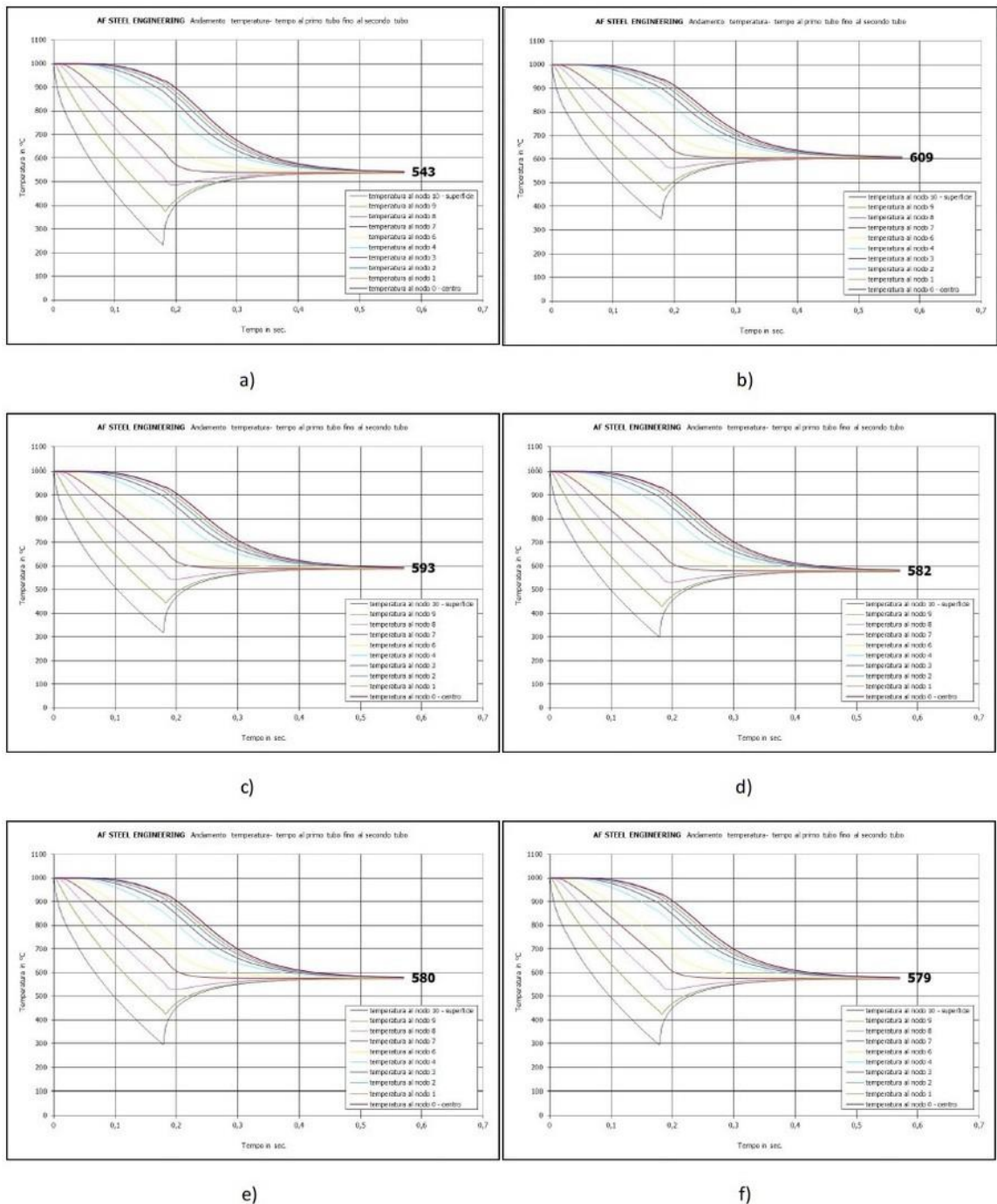
Fonte: Autoria Própria

Esses valores foram escolhidos após análise dos gráficos TTT resultantes da simulação do software, como pode ser visto na Figura 35, que indicava que a curva de temperatura de equalização, ou seja, a temperatura em que o núcleo e superfície da barra se igualam, da barra em condição normal estava abaixo da faixa operacional de 560°C a 610°C.

Os valores dimensionados obtiveram valores satisfatórios para essa faixa. De acordo com Alves Filho (2004) a faixa de 560°C a 610°C de temperatura de equalização é a ideal para que se obtenha propriedades mecânicas do vergalhão laminado de acordo com a norma.

Outro fator considerado para os testes foi a limitação do dispositivo, que apenas permitia rampas de acionamento a partir de 3 segundos, e que as pressões menores fossem utilizadas em tempos de rampa maiores, buscando menos esforço durante a partida do motor da bomba para elevação de pressão, garantindo a integridade do maquinário.

**Figura 35 – Temperaturas de equalização obtida pelo software de simulação: a) Condição normal; b) Teste 1; c) Teste 2; d) Teste 3; e) Teste 4 e f) Teste 5**



Fonte: Autoria Própria

### 4.2.3 Análise das propriedades das barras

Após as barras serem submetidas ao tratamento térmico no Thermex, foram realizadas as análises das suas propriedades mecânicas de limite de escoamento, limite de resistência e alongamento por meio de ensaio de tração, tanto da barra em condição normal, quanto as dos testes.

Foram determinados pontos específicos para análise, sendo marcados a cada 3 metros da cabeça da barra tratada termicamente, e a partir dos pontos marcados das barras eram extraídos corpos de prova, estes com 50 cm de comprimento.

Todas as amostras foram ensaiadas na máquina de tração do laboratório de ensaios mecânicos e controle de qualidade da empresa, sendo uma DARTEC de 900 Nm de capacidade de torque, operando durante a execução dos ensaios a uma velocidade de 20 mm/min, aplicando 53,2 KN de força.

Os valores das faixas de propriedades mecânicas e limite de escoamento, limite de resistência e alongamento para vergalhões CA 50 são padronizados de acordo com a NBR 7480, como observado na Figura 36. Vale ressaltar que a empresa utiliza valores superiores ao normalizado por questões de segurança.

**Figura 36 – Faixa de propriedades mecânicas para vergalhões CA 50 de acordo com a norma NBR 7480**

Bitola (mm)	Faixa de Trabalho					Especificação			
	Limite de Escoamento (MPa)		Limite de Resistência (MPa)	Relação LR/LE	% Along. Lo=10xØ	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Relação LR/LE	% Along. Lo=10xØ
	MIN	MAX	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN
6,30	550	630	1,10 x LE = 605	1,10	10	510	1,08 x LE = 550	1,08	8,0
8,00									
10,0									
12,5									
16,0									
20,0									
25,0									
32,0	600								

Fonte: Padrão de operação da empresa

## 5 RESULTADOS

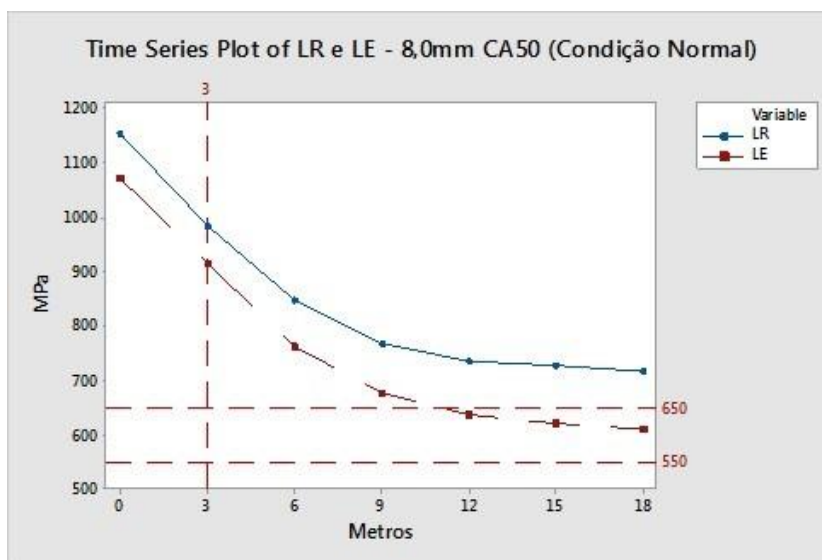
Após os testes, o problema de fragilidade azul não foi eliminado. Porém, o comprimento afetado foi reduzido de 12 metros, para apenas 3 metros em todas as barras testadas.

### 5.1 Condição Normal

No ensaio de tração foi verificado que a barra em condição normal, até 12 metros, não atendia a especificações de propriedades mecânicas de limite de escoamento (LE) e de limite de resistência (LR) exigida pela norma. Isto pode ser visualizado através da Figura 37, onde foram colocadas linhas referenciais dos valores padrão sobre os valores obtidos de propriedades mecânicas.

Através da Figura 37 vemos que, só após 12 metros, a barra entrou na faixa de trabalho padronizada para limite de escoamento.

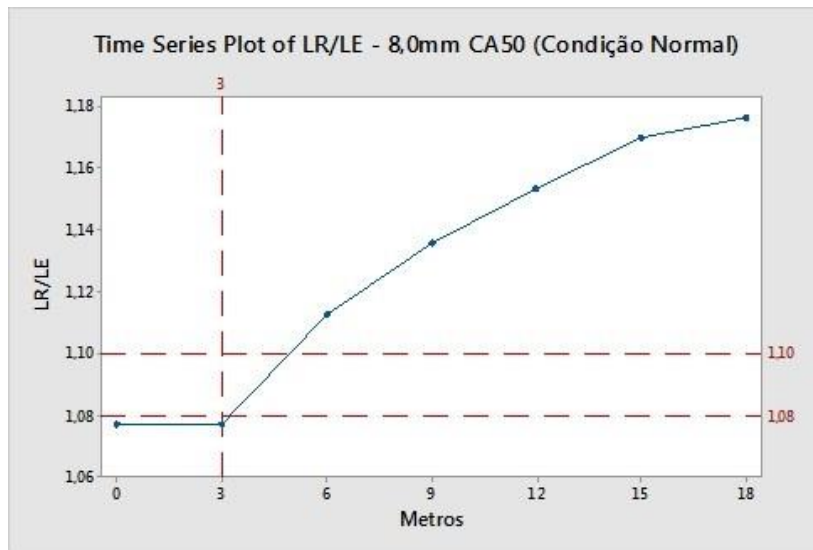
**Figura 37 – Condição Normal: Limite de escoamento comparado com a norma**



Fonte: Autoria Própria

Através da Figura 38 observamos que nos primeiros 3 metros de barra, a mesma encontra-se abaixo do mínimo da norma em relação LR/LE, onde só irá ultrapassar o valor mínimo padronizado de 1,10 em 6 metros.

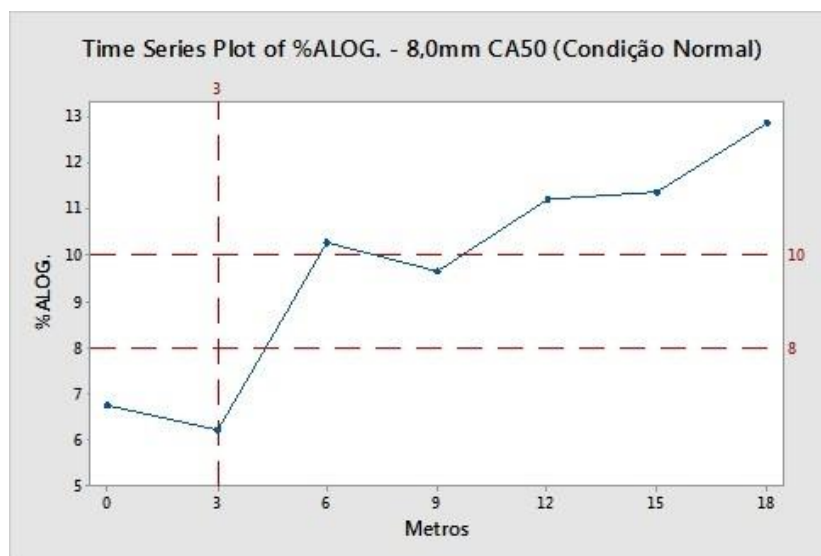
**Figura 38 – Condição Normal: Relação LR/LE comparada com a norma**



Fonte: Autoria Própria

Pela Figura 39 vemos novamente que em 3 metros de barra, a mesma está abaixo do mínimo da norma para porcentagem de alongamento, onde só irá ultrapassar o valor mínimo padronizado, de 10%, em 6 metros. Contudo, foi percebida uma inconsistência em 9 metros de barra, que estava com valor de alongamento acima da norma, porém abaixo do padrão da empresa, retornando a valores superiores a faixa com constância em 12 metros.

**Figura 39 – Condição Normal: Porcentagem de alongamento comparado com a norma**



Fonte: Autoria Própria

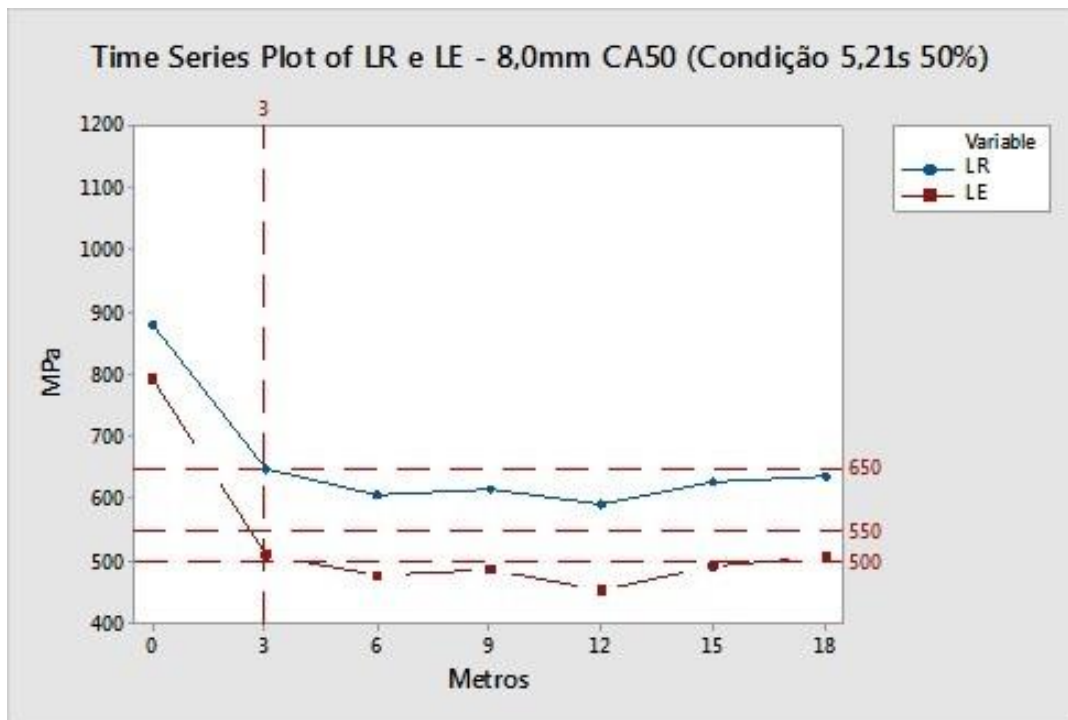
## 5.2 Teste 01

No Teste 01, foi mensurado o tempo de acionamento de 5,21 segundos, pelo sinal de entrada emitido pela fotocélula M6, com pressão configurada para 5 bar. A barra apresentou fragilidade azul nos primeiros 3 metros.

Entre 3 metros e 12 metros, foi verificado que as propriedades de limite de escoamento e de limite de resistência ficaram abaixo dos valores padronizados pela empresa e pela norma, ficando limítrofe a norma a partir dos 15 metros, como visto na Figura 40.

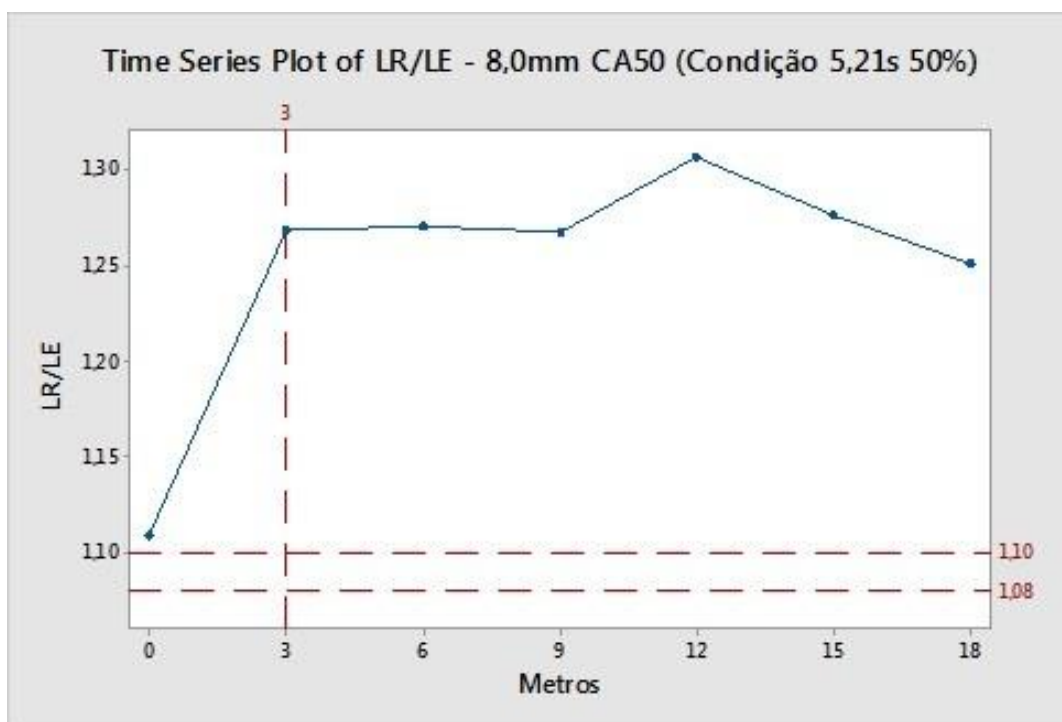
Os valores referentes a relação de limite de resistência pelo de escoamento LR/LE e alongamento estavam de acordo com o padrão operacional da empresa e com a norma, como é possível observar nas Figuras 41 e 42 respectivamente.

**Figura 40 – Teste 1: Limite de escoamento comparado com a norma**



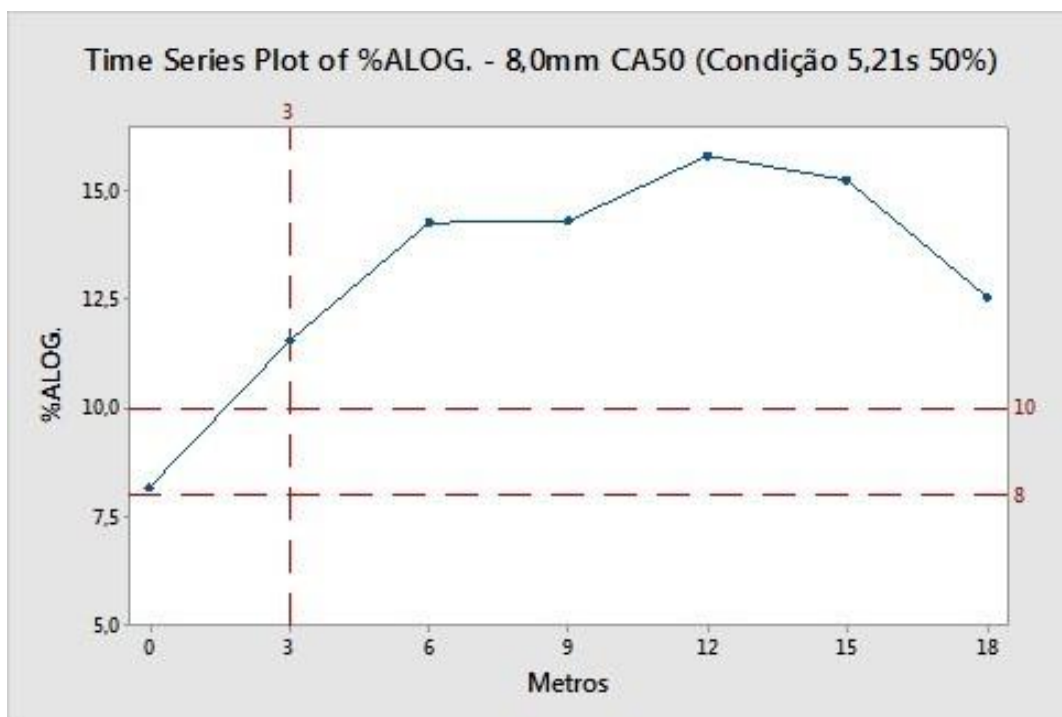
Fonte: Autoria Própria

Figura 41 – Teste 1: Relação LR/LE comparada com a norma



Fonte: Autoria Própria

Figura 42 – Teste 1: Porcentagem de alongamento comparado com a norma



Fonte: Autoria Própria



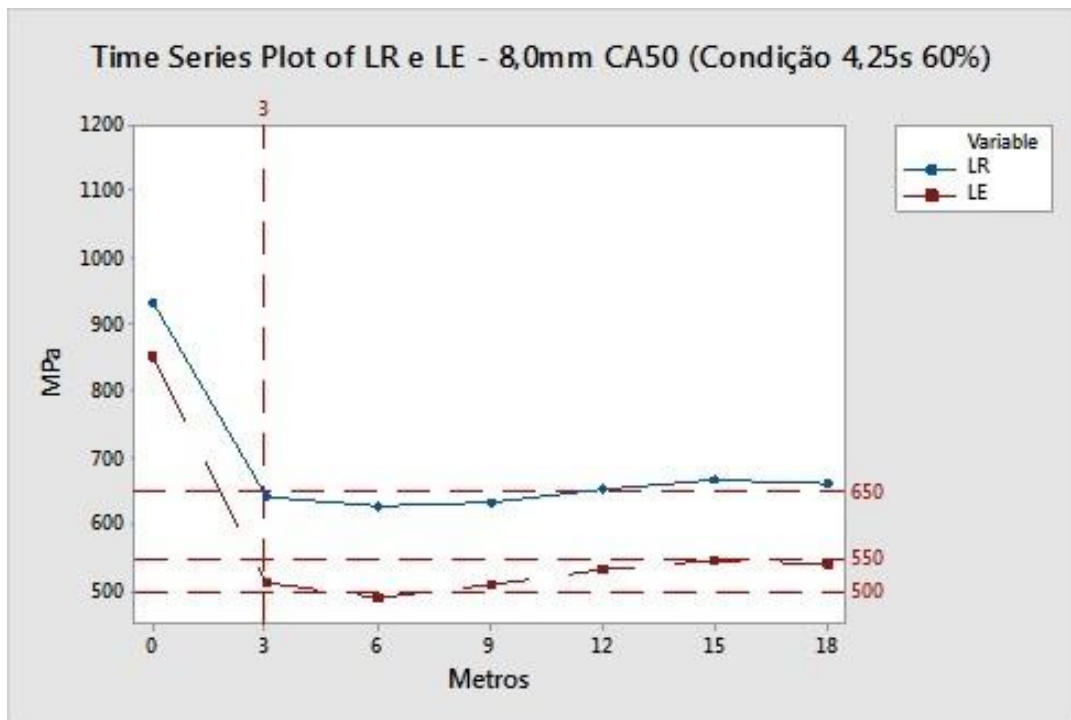
### 5.3 Teste 02

No Teste 02, foi mensurado o tempo de acionamento de 4,25 segundos, pelo sinal de entrada emitido pela fotocélula A1, com pressão configurada para 6 bar. A barra apresentou fragilidade azul nos primeiros 3 metros.

Entre 3 metros e 12 metros, foi verificado que as propriedades de limite de escoamento e de limite de resistência ficaram abaixo dos valores padronizados pela empresa, porém, acima do limite mínimo da norma, a partir dos 9 metros de barra, como visto na Figura 43.

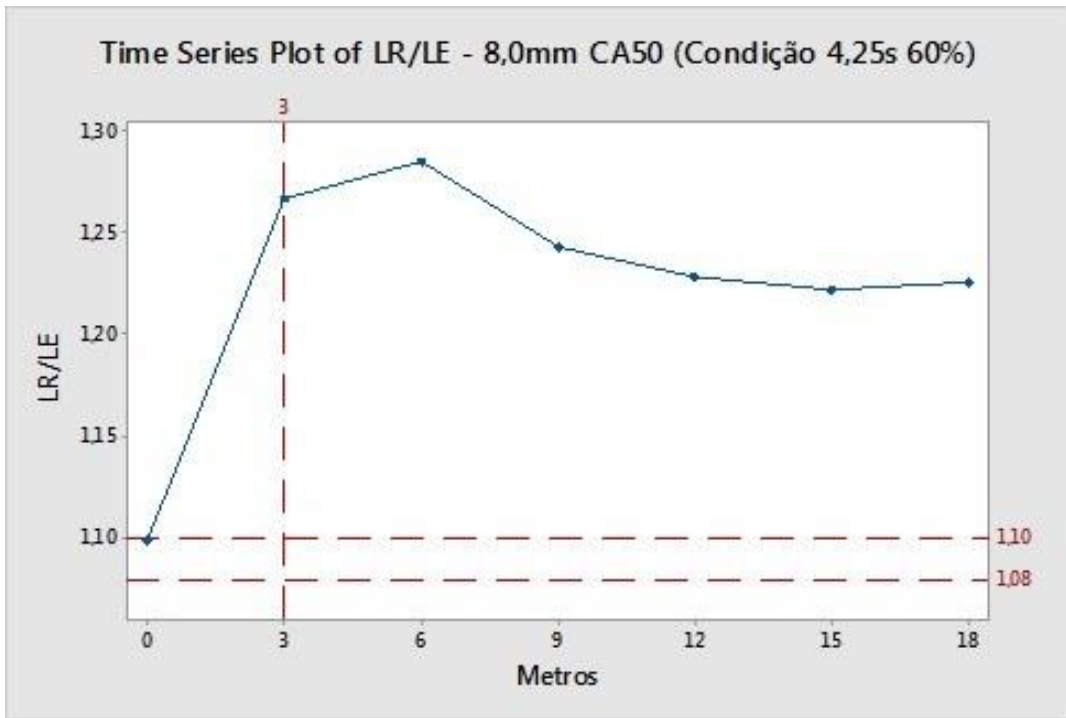
Os valores referentes a relação de limite de resistência pelo de escoamento LR/LE e alongamento estavam de acordo com o padrão operacional da empresa e da norma, como visto nas Figuras 44 e 45.

**Figura 43 – Teste 2: Limite de escoamento comparado com a norma**



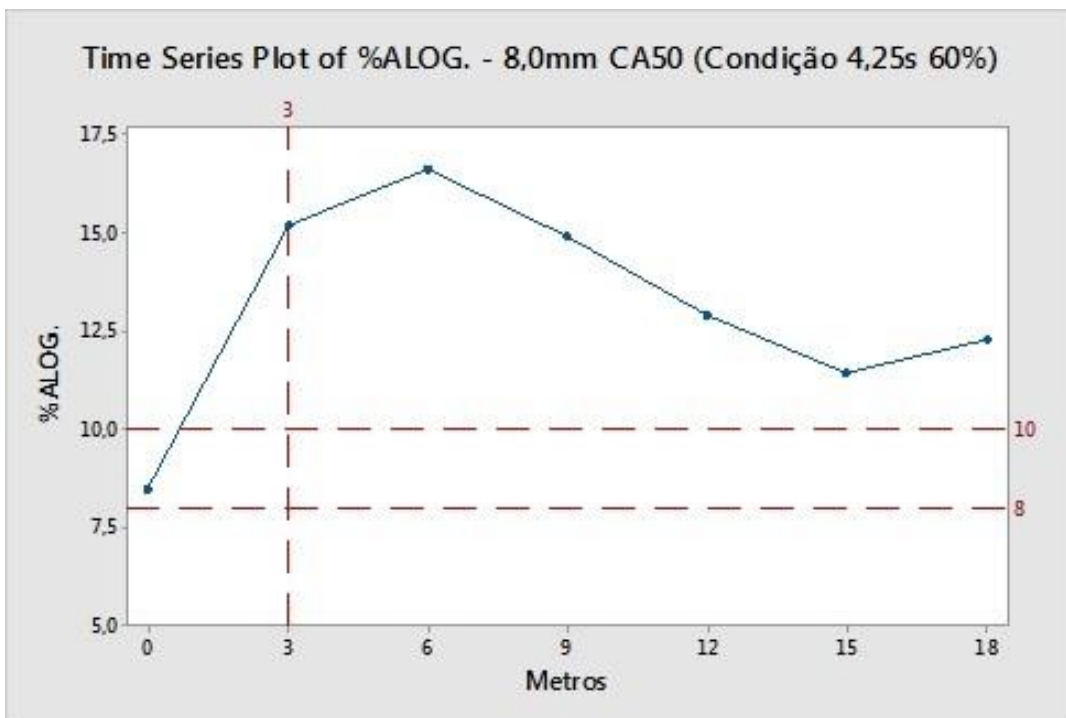
Fonte: Autoria Própria

Figura 44 – Teste 2: Relação LR/LE comparada com a norma



Fonte: Autoria Própria

Figura 45 – Teste 2: Porcentagem de alongamento comparado com a norma



Fonte: Autoria Própria

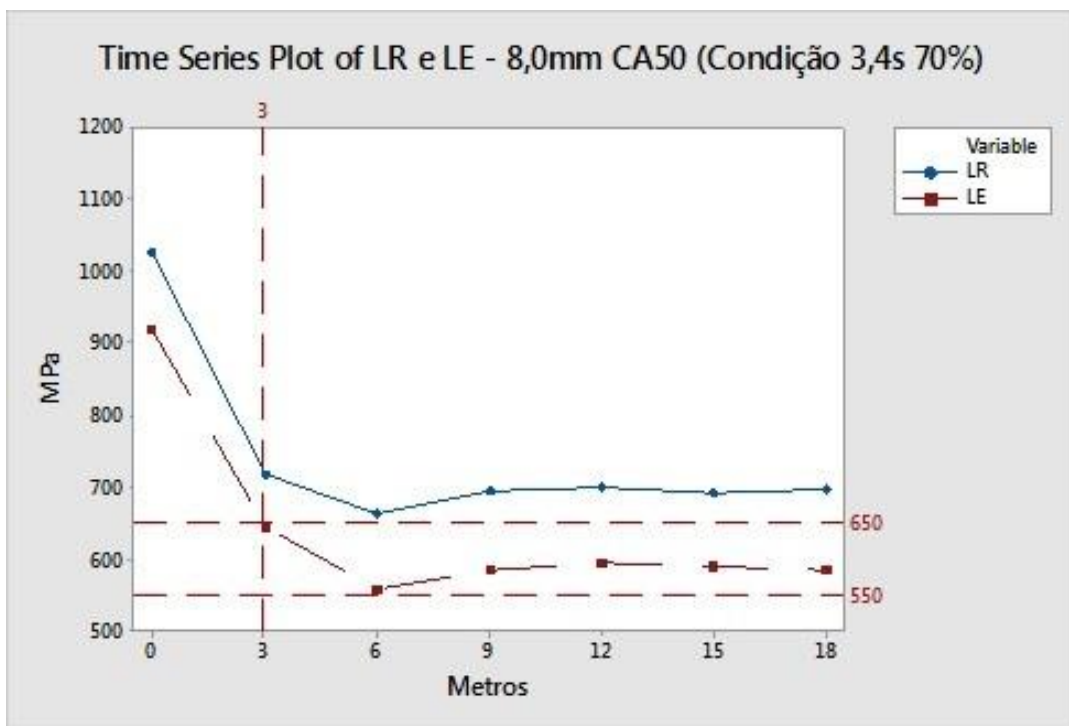
#### 5.4 Teste 03

No Teste 03, foi mensurado o tempo de acionamento de 3,4 segundos, pelo sinal de entrada emitido pela fotocélula A3, com pressão configurada para 7 bar. A barra apresentou fragilidade azul nos primeiros 3 metros.

Entre 3 metros e 12 metros, foi verificado que todas as propriedades estavam de acordo com a norma e padrão da empresa, como visto nas Figuras 46, 47 e 48.

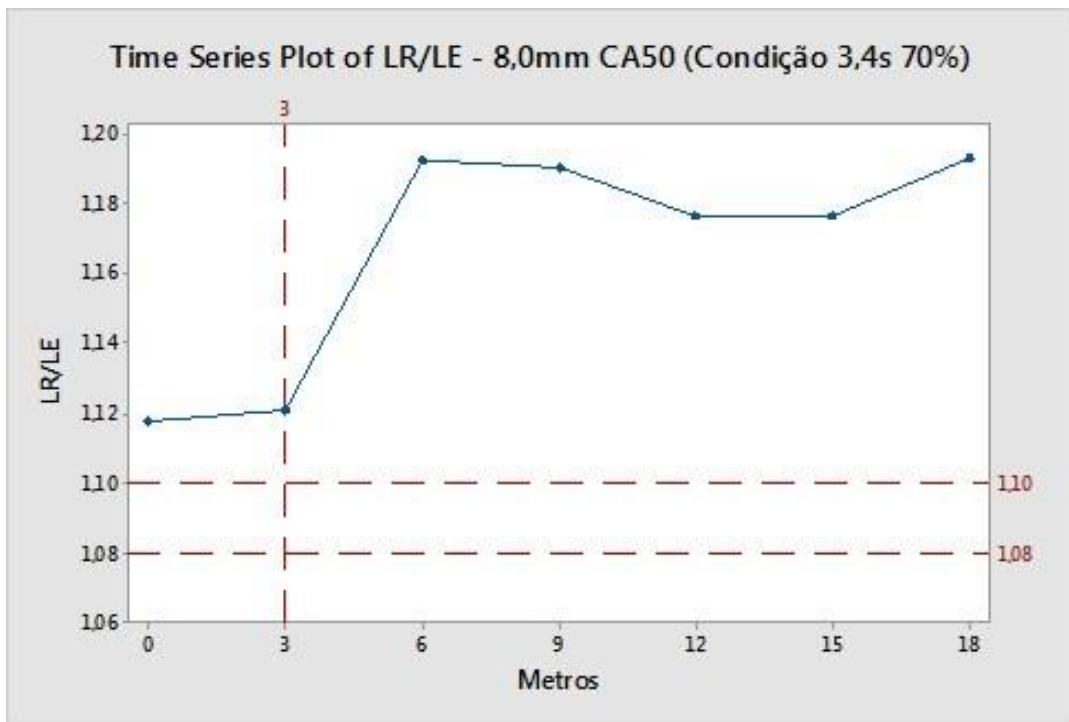
Após o resultado positivo com relação à pressão e vazão à 7 bar, foram feitos mais dois testes para afinamento do tempo de acionamento.

**Figura 46 – Teste 3: Limite de escoamento comparado com a norma**



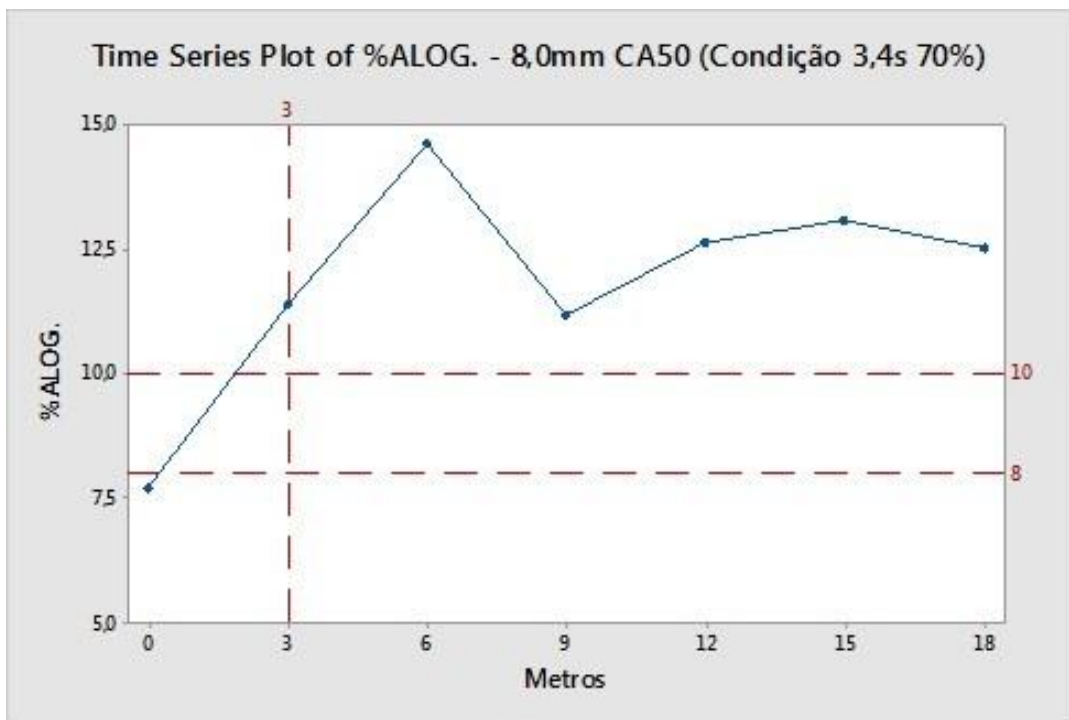
Fonte: Autoria Própria

Figura 47 – Teste 3: Relação LR/LE comparada com a norma



Fonte: Autoria Própria

Figura 48 – Teste 3: Porcentagem de alongamento comparado com a norma



Fonte: Autoria Própria

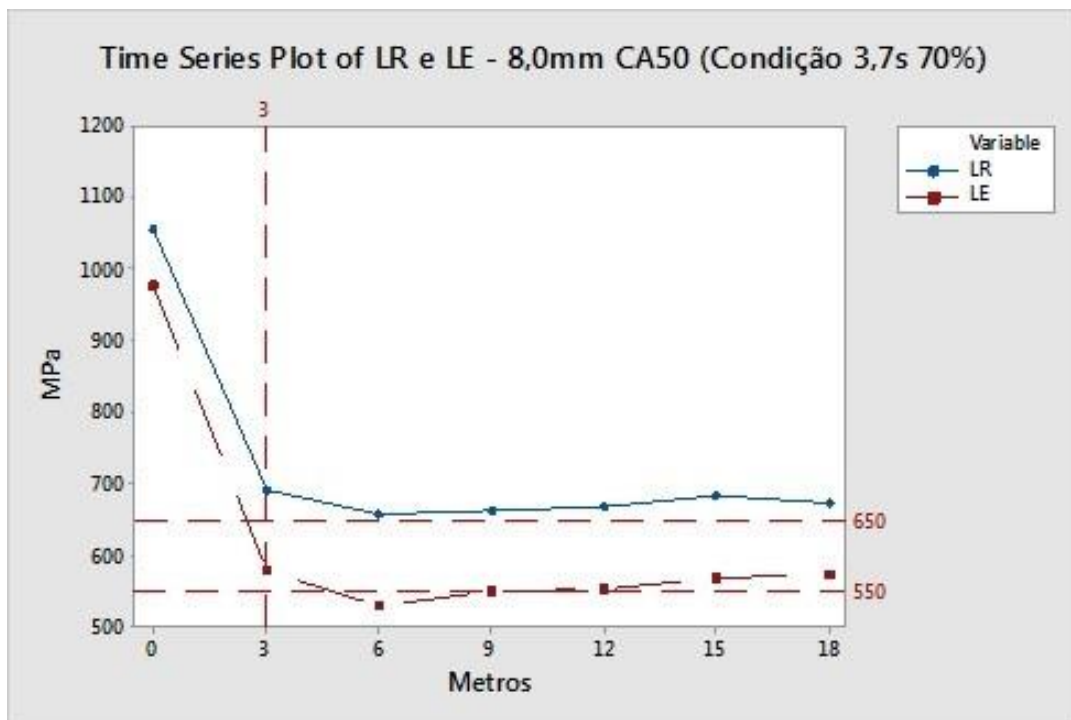
## 5.5 Teste 04

No teste 04, foi mensurado o tempo de acionamento de 3,7 segundos, pelo sinal de entrada emitido pela fotocélula A3, com pressão configurada para 7 bar. A barra apresentou fragilidade azul nos primeiros 3 metros.

Entre 3 metros e 12 metros, foi verificado que as propriedades de limite de escoamento e de limite de resistência ficaram abaixo dos valores padronizados pela empresa, porém, no limite mínimo da norma, visto na Figura 49.

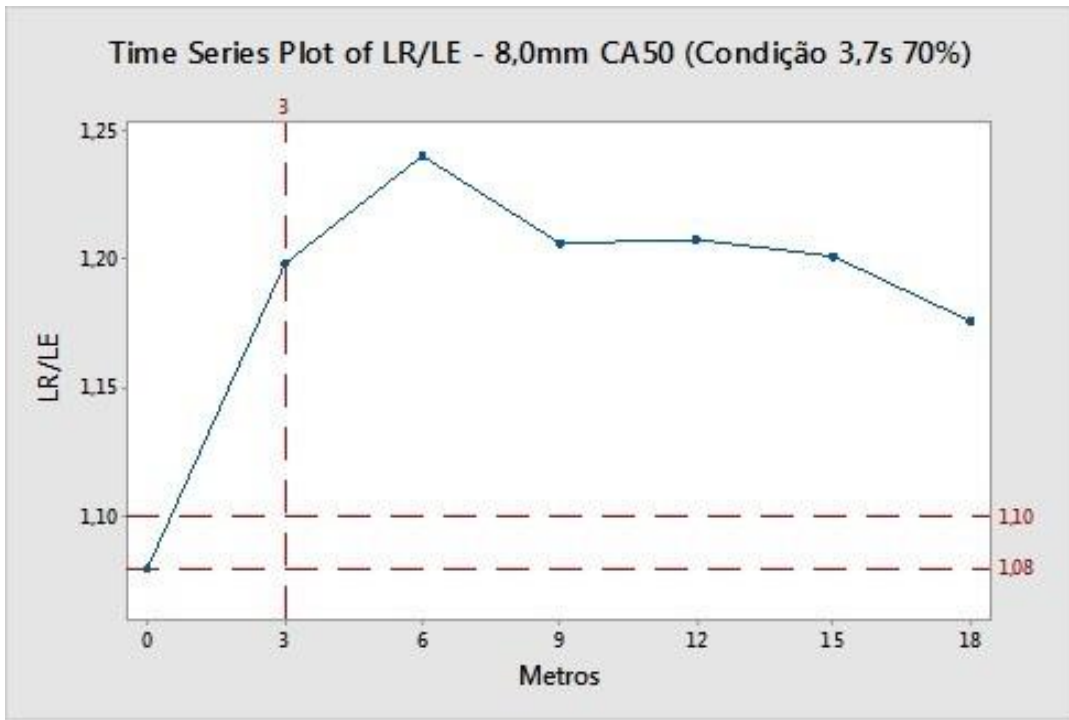
Os valores referentes a relação de limite de resistência pelo de escoamento LR/LE e alongamento estavam de acordo com a norma, como visto nas Figuras 50 e 51.

**Figura 49 – Teste 4: Limite de escoamento comparado com a norma**



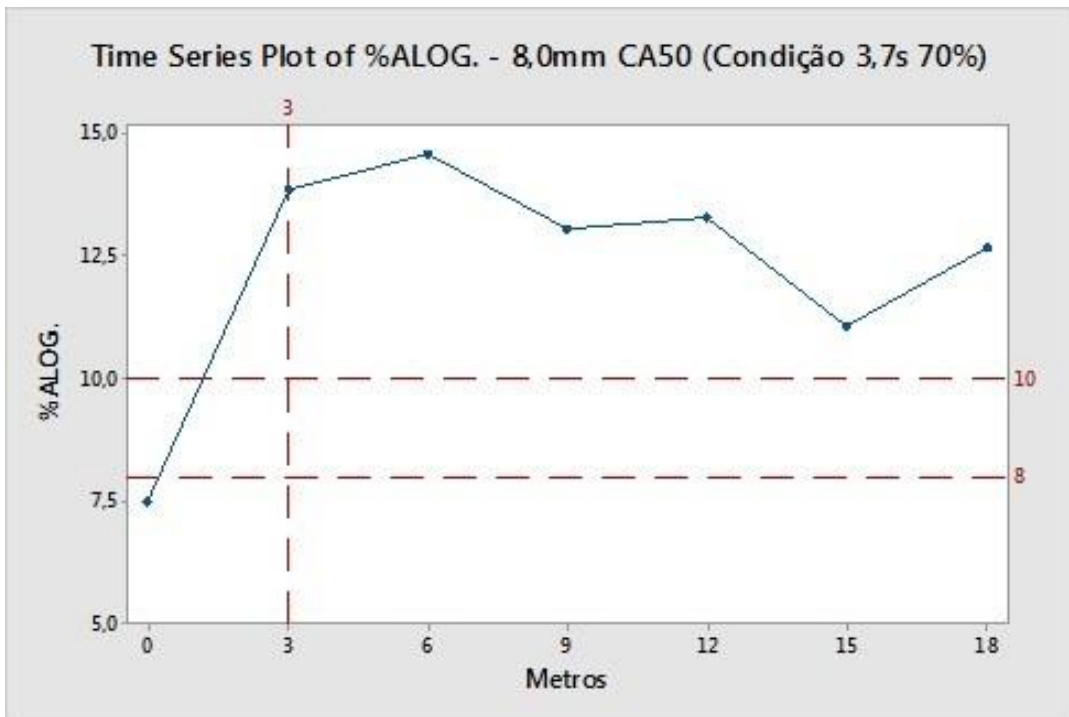
Fonte: Autoria Própria

Figura 50 – Teste 4: Relação LR/LE comparada com a norma



Fonte: Autoria Própria

Figura 51 – Teste 4: Porcentagem de alongamento comparado com a norma



Fonte: Autoria Própria

## 5.6 Teste 05

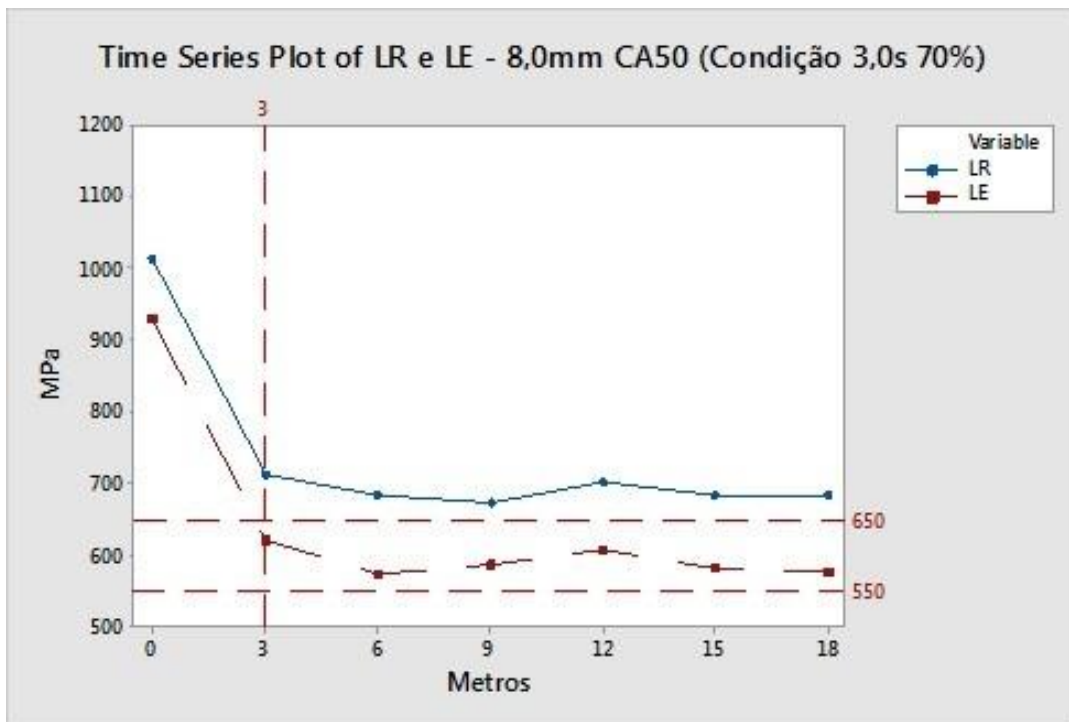
No teste 05, foi mensurado o tempo de acionamento de 3,1 segundos, pelo sinal de entrada emitido pela fotocélula A3, com pressão configurada para 7 bar. A barra apresentou fragilidade azul nos primeiros 3 metros.

Entre 3 metros e 12 metros, foi verificado que as propriedades de limite de escoamento e de limite de resistência ficaram dentro da faixa valores padronizados pela empresa e da norma, visto na Figura 52.

Os valores referentes a relação de limite de resistência pelo de escoamento LR/LE ficou de acordo com a norma, visto na Figura 53.

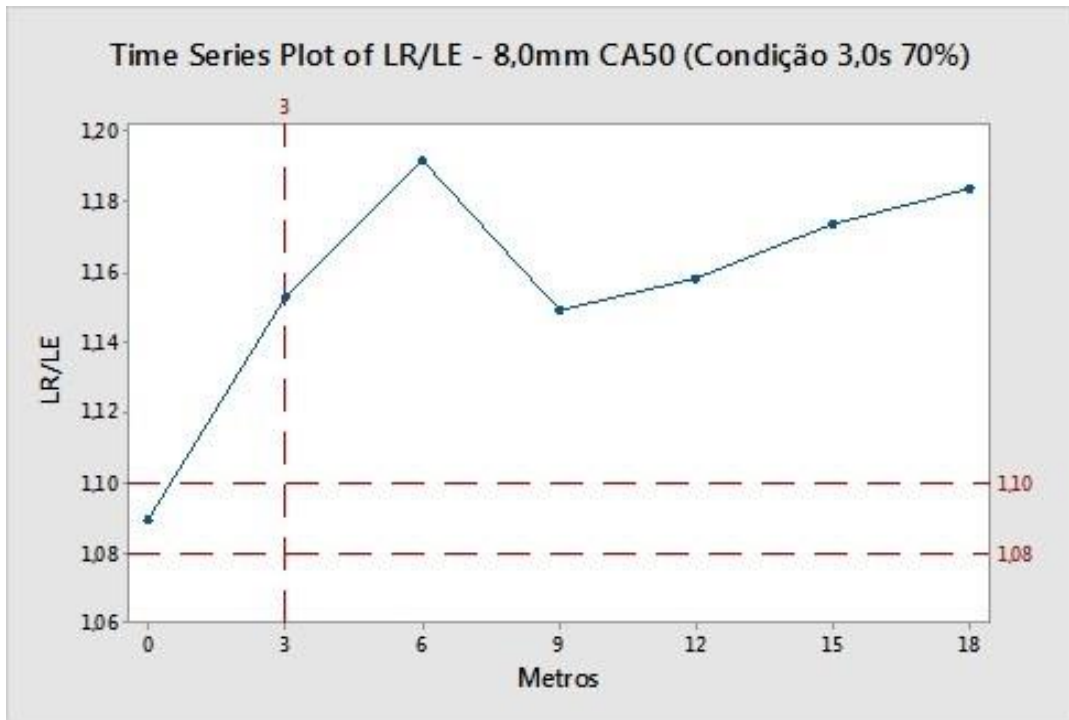
O alongamento apresentou uma instabilidade partir de 6 metros, ficando com valores abaixo do padrão da empresa e no limite da norma, como visualizado pela Figura 54.

Figura 52 – Teste 5: Limite de escoamento comparado com a norma



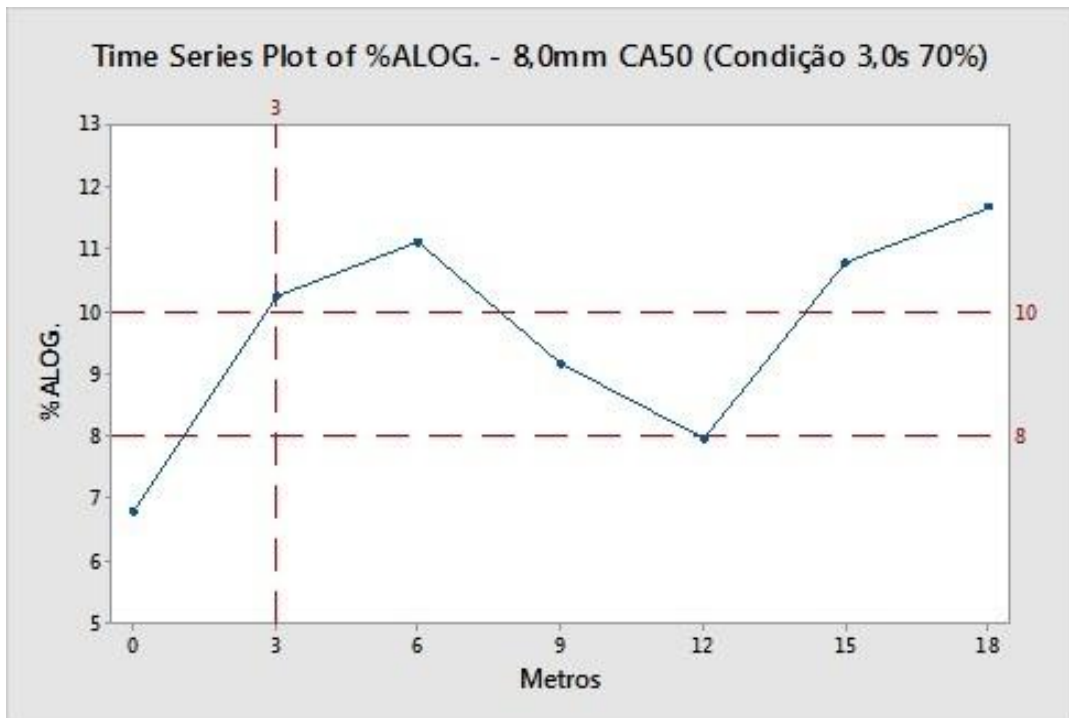
Fonte: Autoria Própria

Figura 53 – Teste 5: Relação LR/LE comparada com a norma



Fonte: Autoria Própria

Figura 54 – Teste 5: Porcentagem de alongamento comparado com a norma



Fonte: Autoria Própria



Foi verificado que após a implantação deste sistema houve uma redução de perda metálica de 2,56% por barra laminada na condição normal para 0,64% nos testes, como observado na Tabela 6

**Tabela 6 – Comparação percentual de comprimento de barra afetada por fragilidade azul e perda metálica da condição normal e testes realizados**

Estado	Comprimento da 1ª barra (m)	Comprimento de Fragilidade Azul (m)	Comprimento total de barra laminada (13 cortes * 36 m)	% 1º Corte de Barra	% Total Barra Laminada
Condição normal	36	12	468	33,33	2,56
Testes	36	3	468	8,33	0,64

Fonte: Autoria Própria

Segundo Alves Filho (2004) e corroborado por Barreto (2009), sem os sistemas de resfriamento as barras permaneceriam em altas temperaturas e, conseqüentemente apresentariam uma baixa resistência e uma grande facilidade de deformação se comparadas às propriedades do aço a temperatura ambiente.

O sistema Thermex apresenta uma grande simplicidade construtiva e seus resultados estão relacionados aos princípios físicos de troca de calor, associadas à água que passa no interior dos canhões, conferindo um resfriamento homogêneo ao longo da barra e também evitando o contato excessivo do material com a água, o que pode gerar um resfriamento demasiado. (MELO, 2010).

Neste trabalho foi verificado que a temperatura de equalização da cabeça da barra foi elevada, conseqüentemente reduzindo o valor de limite de escoamento, trazendo-o para valores mais próximos da faixa de trabalho na área afetada.

No momento em que a barra foi tratada com a pressão reduzida, ela obteve uma elevação da temperatura de equalização, que, através dos ensaios de tração, foi observada a redução do limite de escoamento para a faixa operacional, reduzindo a área afetada pelo fenômeno de fragilidade

azul. Esse fenômeno não foi eliminado das barras testadas, porém, houve uma diminuição de 33,33% de comprimento afetado, para 8,33%, na primeira barra laminada.

Embora a diminuição de fragilidade azul foi obtida em todos testes, as propriedades da barra sofreram alterações consideráveis, principalmente quando a pressão foi reduzida de 10 bar para 5 bar e para 6 bar. A melhor pressão aplicada foi a 7 bar.

Uma vez estabelecida a pressão ideal para essa porção inicial da barra no valor de 7 bar, foram estabelecidos tempos diferentes de acionamentos para o retorno às condições nominais de operação no restante da barra. Essas variações, mesmo pequenas, resultaram em diferenças consideráveis nas propriedades das barras testadas. Isso é justificado por Alves Filho (2004) que enfatiza que quanto maior for a temperatura de equalização do material, menor será a taxa de resfriamento nas barras, mesmo tendo a faixa de trabalho relativamente estreita. A melhor condição foi com tempo de acionamento de 3,4 segundos.

Após avaliação final das barras testadas, foi verificado que os valores experimentais obtidos condiziam aos números obtidos no ensaio do software, evitando um número maior de execuções e elevação dos custos operacionais. Isso condiz com o trabalho de Çetinel, Toparli e Özsoyeller (1999) que enfatiza que a realização dos testes acarretam alto custo operacional quando não se tem uma configuração de parâmetros de comparação bem definido.

## 6 CONCLUSÃO

Foi verificado que o processo Thermex, quando modificado momentaneamente sua pressão e vazão, há uma diminuição considerável do efeito de fragilidade azul, porém, não o elimina por completo.

Dentre os testes realizados, o melhor cenário foi quando a pressão foi colocada à 70% da pressão nominal, ou seja, 7 bar. Apesar disso, com tempos de rampa de acionamento próximos, não obteve estabilidade na propriedade de alongamento, mas permaneceu com valores acima da norma e do padrão da empresa.

A melhor situação das propriedades foi encontrada no Teste 3, onde o tempo de acionamento foi de 3,4 segundos pela fotocélula A3.

Foi constatado que elevar temperatura aleatoriamente não garante a adequação das propriedades mecânicas da barra na faixa normalizada.

Com redução do efeito de fragilidade azul, conseguimos um aproveitamento maior da barra, gerando benefício financeiro e ambiental, uma vez que será reduzido o refugo da porção não conforme, diminuindo o consumo energético e hídrico.

O sistema automatizado funciona bem para reduzir o efeito de fragilidade azul. Contudo, para um processo contínuo de laminação ainda carece de equipamentos mais robustos que suportem a variação constante das pressões e vazões sem causar danos ou aumento de custo com manutenção das máquinas.

Outra proposta seria de reprojeter a geometria do inserto, para que os parâmetros sejam estabilizados, proporcionando propriedades mecânicas de acordo com a norma, de forma uniforme na barra. Esta sendo uma proposta mais viável, por possuir um nível de complexidade menor para simulação de eficiência comparada a uma simulação por alteração de ligas do aço, o que necessitaria de muitos testes para validar um resultado satisfatório, conseqüentemente, elevando o custo de implantação.

## REFERÊNCIAS

ALONSO, M. D. B. **Caracterização de união por solda de topo em barras Ca-50 com eletrodos revestidos**. 2006. 70 p. Dissertação (Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/88828>. Acesso em: 20 Maio 2020

ALVES FILHO, C. H. **Análise da Influência da Taxa de Resfriamento no gradiente Microestrutural de barras laminadas a quente tratadas termicamente**. 2004. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Disponível em: [http://www.biblioteca.pucpr.br/tede/tde\\_arquivos/11/TDE-2005-10-24T131353Z-220/Publico/Claudio%20HenriqueMec.pdf](http://www.biblioteca.pucpr.br/tede/tde_arquivos/11/TDE-2005-10-24T131353Z-220/Publico/Claudio%20HenriqueMec.pdf). Acesso em: 23 Maio 2020

ALVES FILHO, C. H. Analysis of tempcore process: microstructural gradient formation and their influence on the final mechanical properties. In: COBEM, 2007, Brasília. **19th International Congress of Mechanical Engineering**. Brasília, 2007. p. 1 – 13. Disponível em: <https://www.abcm.org.br/anais/cobem/2007/pdf/COBEM2007-1416.pdf>. Acesso em: 23 Maio 2020

ARCELORMITTAL. **Manual do Processo de Fabricação de CA50S, CA25 e CA60 Nervurado**. Luxemburgo, 2014. Disponível em: <https://document.onl/documents/manual-processo-de-fabricacao-ca-50-e-ca-60.html>. Acesso em: 20 Maio 2020.

BARRETO, M. de Faria e O. **Características mecânicas de vergalhões de aço auto-revenido**. 2009. 158 p. Dissertação (Construção Civil) — Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/ISMS-837LJQ#:~:text=O%20processo%20de%20resfriamento%20dos,propriedades%20mec%C3%A2nicas%20diferentes%20entre%20si>. Acesso em: 21 Maio 2020.

BRESCIANI FILHO, E. et al. (coord.). **Conformação plástica dos metais**. 6. ed. [S.l.]: -, 2011. 258 p. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/CONFORMACAOPLASTICADOSMETAIS.pdf>. Acesso em: 24 Maio 2020.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. [S.l.]: Ltc, 2002. 594 p.

ÇETINEL, H.; TOPARLI, M.; ÖZSOYELLER, L. A finite element based prediction of the microstructural evolution of steels subjected to the Tempcore process. **Mechanics of Materials**, p. 1 – 9, Dezembro 1999. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167663600000090>. Acesso em: 21 Ago. 2020.

DYBAS, G. G.; OSTERNACK, M. S.; LIMA, R. T. D. **Manequim automatizado para testes em expositores verticais refrigerados**. 2015. 80 p. Monografia (Tecnologia em Automação Industrial) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/4000>. Acesso em: 19 Jun. 2020.

ECONOMOPOULOS, M. et al. **TEMPCORE: Process to the Fabrication of High Yield Strength Concrete Reinforcing Bars**. CRM, v. 45, p. 1 – 17, Dezembro 1975. Disponível em: <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&lang=en&idt=PASCAL7674008717>. Acesso em: 23 Maio 2020.

FRANÇA, J. R. O. **Desenvolvimento do tratamento térmico do vergalhão CA50 em rolo pelo processo stelmor**. 2015. 64 p. Monografia (Engenharia Metalúrgica) — Universidade Federal do Ceará. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/desenvolvimento-do-tratamento-termico-do-vergalhao-ca50-em-rola-pelo-processo-stelmor>. Acesso em: 24 Maio 2020.

HEBERLE, M. de A. **Avaliação da Influência do Sentido de Laminação e do Tratamento Térmico de Normalização no Desgaste de Aços 1020 Laminados a Quente**. 2019. 25 p. Monografia (Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/198349>. Acesso em: 28 Maio 2020.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MELO, J. B. D. **Estudo técnico sobre a implementação de um sistema de controle no processo de tratamento térmico de vergalhões**. 2010. 120 p. Monografia (Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/159270>. Acesso em: 19 Jun. 2020

MOREIRA, M. F.; LEBRÃO, S. M. G. **Tratamentos térmicos dos aços**. São Paulo: [s.n.], 2004. Disponível em: <https://document.onl/documents/tratamento-termico-5599377a6b34a.html>. Acesso em: 28 Maio 2020.

NUNES, L. M. **Desenvolvimento de Aço Microligado para a Produção de Vergalhão Nervurado**. 2009. 74 p. Dissertação (Engenharia de Materiais e de Processos Químicos). Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=32736@1>. Acesso em: 29 Maio 2020.

OLIVEIRA, E. L. de. **Estudo da otimização de manganês em aço sae 1541 modificado e da sua influência nas propriedades mecânicas de vergalhões**. 2012. 72 p. Monografia (Engenharia Metalúrgica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/86158>. Acesso em: 29 Maio 2020.

PUPO, M. S. **Interface homem-máquina para supervisão de um CLP em controle de processos através da www**. 2002. 113 p. Dissertação (Engenharia Elétrica) — Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18133/tde-11072002-085859/pt-br.php>. Acesso em: 19 Jun. 2020.

QUEIROZ NETO, M. **Caracterização microestrutural de diferentes bitolas do aço CA-50 com composição química definida**. 2011. 76 p. Monografia (Engenharia Metalúrgica) — Universidade Federal do Ceará. Disponível em: <http://www.repositoriobib.ufc.br/000020/0000203a.pdf>. Acesso em: 28 Maio 2020.

ROSA, J. B. D. **Efeito da temperatura de aquecimento na têmpera sobre a microestrutura e a dureza do aço aisi m2 após revenimento em temperaturas diversas**. 2015. 67 p. Monografia (Engenharia de Materiais) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Disponível em: [http://www.demat.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/25/2018/06/TCCII-\\_2%C2%B A-2015\\_Junia-Bicalo-Duarte-vers%C3%A3o-final.pdf](http://www.demat.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/25/2018/06/TCCII-_2%C2%B A-2015_Junia-Bicalo-Duarte-vers%C3%A3o-final.pdf). Acesso em: 28 Maio 2020.

SANTANA JÚNIOR, A. **Estudo Sobre Controle Automático Utilizando Controlador Lógico Programável – PLC**. 2003. 92 p. Monografia (Ciência da Computação) — Centro Universitário do Triângulo – Unit. Disponível em: <http://www.computacao.unitri.edu.br/downloads/monografia/72751129125638.pdf>. Acesso em: 19 Jun. 2020.

SCHAEFFER, L. **Conformação mecânica**. 2. ed. [S.l.]: Imprensa Livre, 2004. 167 p. SCHEID, A. **Tratamentos Térmicos dos Aços**. 2016. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EME774/Aula%20Especial%20-%20Tratamentos%20T%C3%A9rmicos%20dos%20A%C3%A7os.pdf>. Acesso em: 30 Maio 2020.

SILVA, A. L. da Costa e; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 2. ed. Sumaré: Eletrometal Metais Especiais, 1988. 512 p. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/47222816/acos-e-ligas-especiais-costa-e-silva>. Acesso em: 30 Maio 2020

SIMON, P.; ECONOMOPOULOS, M.; NILLES, P. A new Process for the production of High-Quality Reinforcing Bars. **Iron and Steel Engineering**, p. 53 – 57, Março 1984. Disponível em: [http://www.crmgroup.be/sites/default/files/downloads/2018-10/tc-new\\_process.pdf](http://www.crmgroup.be/sites/default/files/downloads/2018-10/tc-new_process.pdf). Acesso em: 19 Ago. 2020.

SOUZA, P. H. T. D. O. E. **Estudo e desenvolvimento de um sistema inteligente de controle de uma planta piloto**. 2007. 34 p. Monografia (Engenharia Elétrica) — Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-17052010-165037/?&lang=br>. Acesso em: 14 Ago. 2020.

SPECTRU INSTRUMENTAL CIENTÍFICO LTDA. **Tratamento Térmico dos aços: Recozimento, Normalização, Têmpera e Revenido**. [S.l.], 2005. Disponível em: <http://www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/tratamento.pdf>. Acesso em: 19 Ago. 2020.

STURATO, A. Z. **Automação de bombas dosadoras com auxílio de Controlador lógico programável**. 2009. 58 p. Monografia (Engenharia Mecânica) — Universidade São Francisco. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/68430865/controladores-logicos-programaveis-24>. Acesso em: 19 Ago. 2020.

TSCIPTSCHIN, A. P. **Tratamentos Térmicos dos Aços**. 2010. Disponível em: <http://www.pmt.usp.br/pmt2402/TRATAMENTO%20T%C3%89RMICO%20DE%20A%C3%87OS.pdf>. Acesso em: 23 Ago. 2020.

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **Curso de Controladores Lógicos Programáveis**. 1999. Disponível em: <http://www.lee.eng.uerj.br/downloads/cursos/clp/clp.pdf>. Acesso em: 28 Ago. 2020.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. **Constituintes estruturais de equilíbrio dos aços**. 2007. Disponível em: [http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasivan/processoscorte\\_arquivos/FerroAcoConceitos.pdf](http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasivan/processoscorte_arquivos/FerroAcoConceitos.pdf). Acesso em: 28 Maio 2020.

## **ANEXOS**



## ANEXO A - Tabela de Propriedades Termofísicas dos Sólidos

TABLE A.1 Thermophysical Properties of Selected Metallic Solids<sup>a</sup>

Composition	Melting Point (K)	Properties at 300 K					Properties at Various Temperatures (K)													
		$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg · K)	$k$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k$ (W/m · K)/ $c_p$ (J/kg · K)														
						100	200	400	600	800	1000	1200	1500	2000	2500					
Aluminum																				
Pure	933	2702	903	237	97.1	302	237	240	231	218										
Alloy 2024-T6 (4.5% Cu, 1.5% Mg, 0.6% Mn)	775	2770	875	177	73.0	482	798	949	1033	1146										
Alloy 195, Cast (4.5% Cu)		2790	883	168	68.2			174	185											
Beryllium	1550	1850	1825	200	59.2	990	301	161	126	106	90.8	78.7								
						203	1114	2191	2604	2823	3018	3227	3519							
Bismuth	545	9780	122	7.86	6.59	16.5	9.69	7.04												
						112	120	127												
Boron	2573	2500	1107	27.0	9.76	190	55.5	16.8	10.6	9.60	9.85									
						128	600	1463	1892	2160	2338									
Cadmium	594	8650	231	96.8	48.4	203	99.3	94.7												
						198	222	242												
Chromium	2118	7160	449	93.7	29.1	159	111	90.9	80.7	71.3	65.4	61.9	57.2	49.4						
						192	384	484	542	581	616	682	779	937						
Cobalt	1769	8862	421	99.2	26.6	167	122	85.4	67.4	58.2	52.1	49.3	42.5							
						236	379	450	503	550	628	733	674							
Copper																				
Pure	1358	8933	385	401	117	482	413	393	379	366	352	339								
						252	356	397	417	433	451	480								
Commercial bronze (90% Cu, 10% Al)	1293	8800	420	52	14		42	52	59											
Phosphor gear bronze (89% Cu, 11% Sn)	1104	8780	355	54	17		785	460	545											
							41	65	74											
Cartridge brass (70% Cu, 30% Zn)	1188	8530	380	110	33.9	75	95	137	149											
							360	395	425											
Constantan (55% Cu, 45% Ni)	1493	8920	384	23	6.71	17	19													
						237	362													
Germanium	1211	5360	322	59.9	34.7	232	96.8	43.2	27.3	19.8	17.4	17.4								
						190	290	337	348	357	375	395								

Fonte: Incropera, 2017

## ANEXO B - Tabela de Propriedades Termofísicas dos Sólidos (Continuação)

TABLE A.1 Continued

Composition	Melting Point (K)	Properties at 300 K				Properties at Various Temperatures (K)												
		$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg · K)	$k$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k$ (W/m · K)/ $c_p$ (J/kg · K)												
						100	200	400	600	800	1000	1200	1500	2000	2500			
Gold	1336	19300	129	317	127	327	323	311	298	284	270	255						
Iridium	2720	22500	130	147	50.3	172	153	144	138	132	126	120	111					
Iron																		
Pure	1810	7870	447	80.2	23.1	134	94.0	69.5	54.7	43.3	32.8	28.3	32.1					
Armco (99.75% pure)		7870	447	72.7	20.7	95.6	80.6	65.7	53.1	42.2	32.3	28.7	31.4					
						216	384	490	574	680	975	609	654					
Carbon steels																		
Plain carbon (Mn ≤ 1%, Si ≤ 0.1%)		7854	434	60.5	17.7			56.7	48.0	39.2	30.0							
AISI 1010		7832	434	63.9	18.8			487	559	685	1169							
Carbon-silicon (Mn ≤ 1%, 0.1% < Si ≤ 0.6%)		7817	446	51.9	14.9			58.7	48.8	39.2	31.3							
Carbon-manganese-silicon (1% < Mn ≤ 1.65%, 0.1% < Si ≤ 0.6%)		8131	434	41.0	11.6			487	559	685	1168							
								49.8	44.0	37.4	29.3							
								501	582	699	971							
								42.2	39.7	35.0	27.6							
								487	559	685	1090							
Chromium (low) steels																		
$\frac{1}{2}$ Cr- $\frac{1}{4}$ Mo-Si (0.18% C, 0.65% Cr, 0.23% Mo, 0.6% Si)		7822	444	37.7	10.9			38.2	36.7	33.3	26.9							
1 Cr- $\frac{1}{2}$ Mo (0.16% C, 1% Cr, 0.54% Mo, 0.39% Si)		7858	442	42.3	12.2			492	575	688	969							
1 Cr-V (0.2% C, 1.02% Cr, 0.15% V)		7836	443	48.9	14.1			42.0	39.1	34.5	27.4							
								492	575	688	969							
								46.8	42.1	36.3	28.2							
								492	575	688	969							

Fonte: Incropera, 2017