



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA**

**JOSÉ RAPHAEL OLEGÁRIO FRANÇA**

**DESENVOLVIMENTO DO TRATAMENTO TÉRMICO DO VERGALHÃO CA50 EM  
ROLO PELO PROCESSO STELMOR**

**FORTALEZA**

**2015**

JOSÉ RAPHAEL OLEGÁRIO FRANÇA

DESENVOLVIMENTO DO TRATAMENTO TÉRMICO DO VERGALHÃO CA50 EM  
ROLO PELO PROCESSO STELMOR

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug.

FORTALEZA

2015

---

Página reservada para ficha catalográfica que deve ser confeccionada após apresentação e alterações sugeridas pela banca examinadora.

Para solicitar a ficha catalográfica de seu trabalho, acesse o site: [www.biblioteca.ufc.br](http://www.biblioteca.ufc.br), clique no banner Catalogação na Publicação (Solicitação de ficha catalográfica)

---

JOSÉ RAPHAEL OLEGÁRIO FRANÇA

DESENVOLVIMENTO DO TRATAMENTO TÉRMICO DO VERGALHÃO CA50 EM  
ROLO PELO PROCESSO STELMOR

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dra. Janaína Gonçalves Maria da Silva Machado  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus Pais e Família.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus por tudo.

Em segundo a minha Família pela criação e educação que me deram.

Agradeço à UFC - Universidade Federal do Ceará, pela qualidade da formação acadêmica em que me propiciou ao longo do curso de graduação em Engenharia Metalúrgica. Dou uma ênfase ao Professor Dr. Lindberg pela desenvoltura em promover um convênio com a CSN, empresa em que tive o privilégio de estagiar. Agradeço também ao coordenador do curso de Engenharia Metalúrgica, Professor Dr. Marcelo José e a todos os Professores do curso de Engenharia Metalúrgica e Materiais pela atenção.

Ao Professor Dr. Jeferson Leandro Klug pela orientação acadêmica que proporcionou a elaboração desse trabalho como também no projeto o qual fui reconhecido com prêmio inovação tecnológica, nível estudante, da ABM - Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração.

A ABM - Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração pelo reconhecimento dos esforços dos profissionais e estudantes da área como também pelo incentivo a inovação do setor.

Agradeço à CSN, pela excelente oportunidade de estagiar nessa empresa que é referência não só no Brasil, mas no mundo todo. Também agradeço a todos os profissionais desta empresa em que me relacionei, a GGNP, aos engenheiros, técnicos, estagiários e principalmente aos profissionais da GNT. Agradeço em especial à minha orientadora e Coordenadora técnica da Qualidade, Aline da Costa Miranda pela ajuda, paciência e pelo conhecimento em que ela me proporcionou. Agradeço também ao pessoal do Laboratório de Ensaio Mecânicos, onde realizei os ensaios e metalografias, que sempre tiveram tranquilidade e disponibilidade em me ajudar e tirar dúvidas técnicas.

Para finalizar agradeço aos amigos de curso os quais convivi esse tempo todo. Fizemos grandes amizades e podemos criar entre nós uma sinergia e assim evoluirmos juntos, onde cada um trocava as experiências profissionais vivenciadas durante esse período de estágio. São eles: Carlos Filipe, Hillane Mirelle, Francisco Alberto, Delaney Gomes, Francisco Diego, Francisco Leonardo, Tomaz Costa, Marcos Paulo e Reinaldo Cerqueira.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu,  
mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre  
aquilo que todo mundo vê.”

(Arthur Schopenhauer)



## RESUMO

Os vergalhões CA50 bitolas finas 8,00 mm a 16,00 mm, em rolos produzidos via esteira transportadora de espiras, tipo Stelmor, são os produtos de maior demanda da CSN aços longos. Estes produtos sofrem tratamento térmico de resfriamento ao ar forçado via esteira transportadora de espiras, após serem laminados e espiralados. Devido a parâmetros e características do próprio processo o produto final vinha apresentando heterogeneidade nas propriedades mecânicas causada por um resfriamento diferenciado das espiras, gerando reprovação na inspeção da qualidade. Através do uso de pirômetros para monitorar a temperatura das espiras e a taxa de resfriamento durante o tratamento térmico e uma otimização do resfriamento com defletores do fluxo de ar ao longo da esteira transportadora, tornou-se possível reduzir a heterogeneidade das propriedades mecânicas, assim como a elaboração de ferramentas que ajudam na parametrização da esteira transportadora de espiras.

**Palavras-chave:** Stelmor. Resfriamento ao ar forçado. Vergalhão em rolo.

## **ABSTRACT**

The bar CA 50 thin gauges 8.00 mm to 16.00 mm in coils produced via transporter conveyor of coils type Stelmor are the increased demand for long steel products CSN. These products undergo heat treatment Cooling air forced through spiral conveyor belt after being rolled and coiled. Because the parameters and characteristics of the final product process itself showed heterogeneity in mechanical properties that was caused by differential cooling of the coils, causing failure in quality inspection. Through the use of pyrometers to monitor the temperature of the coils and optimization with a cooling airflow baffles along the conveyor belt, it has become possible to reduce the heterogeneity of mechanical properties as well as in the development of tools that help the parameterization transporter conveyor of coils.

**Keywords:** Stelmor. Cooling air forced. Bar coil.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Cadeira de laminação horizontal.....	20
Figura 2	– Cadeira de laminação vertical.....	20
Figura 3	– Esquema do sistema de produção do laminador de aços longos da CSN.....	22
Figura 4	– Laminador de rolos tipo cantilever.....	23
Figura 5	– Formador de espiras e ventiladores sob a esteira transportadora.....	23
Figura 6	– Sistema coletor de espiras para a formação de rolos.....	24
Figura 7	– Estação reformadora das espiras.....	24
Figura 8	– Ganchos transportadores de rolos.....	25
Figura 9	– Componentes do sistema Thermex.....	26
Figura 10	– Sistema de tratamento térmico Thermex de vergalhão em barras.....	27
Figura 11	– Coroa externa de martensita, coroa intermediária de bainita e núcleo de ferrita e perlita.....	28
Figura 12	– Croqui da disposição do formador de espiras e da esteira transportadora de espiras, com coberturas e ventiladores.....	30
Figura 13	– Espiras sendo transportadas para tratamento em linha por resfriamento em tanque com água.....	30
Figura 14	– Transportador de espiras e coberturas isolantes móveis abertas e fechadas..	31
Figura 15	– Desenho da planta completa da esteira transportadora, tipo Stelmor.....	32
Figura 16	– Características das nervuras de um vergalhão CA 50.....	33
Figura 17	– Diagrama C.C.T. para um aço de baixa liga.....	38
Figura 18	– Quatro caixas de água após o bloco acabador e anterior ao formador de espiras.....	39
Figura 19	– Ilustração das posições cabeça, meio e cauda do rolo.....	42
Figura 20	– Esquema das regiões laterais e central.....	42
Figura 21	– Regiões das espiras ao longo da esteira transportadora.....	43

Figura 22	– Ilustração dos aspectos macroscópicos das espiras de fio-máquina.....	45
Figura 23	– Bobina de vergalhão em rolo CSN 50.....	46
Figura 24	– Aspecto macroscópico com logomarca após ensaio de dobramento.....	46
Figura 25	– Esquema das espiras ao longo da esteira transportadora e suas zonas.....	47
Figura 26	– Esquema das espiras com elemento de referência.....	48
Figura 27	– Elemento de referência.....	48
Figura 28a	– Elemento de referência da zona quente.....	49
Figura 28b	– Elemento de referência da zona fria.....	49
Figura 29	– Vergalhão fraturado na região da logomarca após ensaio de dobramento.....	52
Figura 30	– Vergalhão após ensaio de dobramento sem trincas na logomarca.....	52
Figura 31	– Região da nervura sem trincas no ensaio de dobramento.....	53
Figura 32	– Vergalhão fraturado no início do teste na região das nervuras.....	53
Figura 33	– Esquema de retirada das amostras.....	55
Figura 34	– Equipamento do ventilador e <i>dampers</i> .....	56
Figura 35	– Curva CCT e taxas de resfriamento para o aço 1635.....	60

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Variações das temperaturas entre as zonas.....	50
Gráfico 2 – Esquema mostrando as variações das propriedades mecânicas.....	54
Gráfico 3 – Resultados obtidos para esses parâmetros.....	55
Gráfico 4 – Variações de temperatura das regiões após alterações do <i>dampers</i> .....	57
Gráfico 5 – Curva de resfriamento ao longo da esteira com as temperaturas e tempos.....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química dos materiais adotados (% em peso).....	40
Tabela 2 – Parâmetros de resfriamento utilizados nas quatro caixas de água e nos 12 ventiladores.....	44
Tabela 3 – Resultados obtidos durante a produção, aço microligado 1635.....	51
Tabela 4 – Resultados obtidos durante a produção, aço carbono 1030.....	51
Tabela 5 – Resultados dos ensaios mecânicos.....	55
Tabela 6 – Resultados obtidos durante a produção da segunda campanha.....	58

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AL	Alongamento Percentual
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CCT	Transformação a Resfriamento Contínuo
CFC	Cúbica de Face Centrada
CE	Carbono Equivalente
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
CCM	Controle Central de Motores
ITT	Transformação Térmica Isotérmica
LD	Linz-Donawitz
LE	Limite de Escoamento
LR	Limite de Resistência
NBR	Norma Brasileira
TTT	Temperatura Tempo Transformação
VAC	Volts Corrente Alternada

## LISTA DE SÍMBOLOS

Ø	Bitola
%	Porcentagem

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	18
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	19
<b>2.1</b>	<b>Objetivos gerais</b> .....	19
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	19
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	20
<b>3.1</b>	<b>Equipamentos da laminação CSN Aços Longos</b> .....	20
<b>3.2</b>	<b>Laboratórios</b> .....	25
<b>3.2.1</b>	<i>Laboratório de macrografia</i> .....	25
<b>3.2.2</b>	<i>Laboratório de ensaios mecânicos</i> .....	25
<b>3.3</b>	<b>Equipamentos de tratamento térmico em linha</b> .....	26
<b>3.3.1</b>	<i>Thermex</i> .....	26
<b>3.3.2</b>	<i>Formador de espiras e Stelmor</i> .....	29
<b>3.4</b>	<b>Aços para vergalhão</b> .....	32
<b>3.4.1</b>	<i>Aços ao carbono</i> .....	33
<b>3.4.2</b>	<i>Aços microligados</i> .....	34
<b>3.5</b>	<b>Carbono equivalente CE</b> .....	34
<b>3.6</b>	<b>Transformações de fases</b> .....	35
<b>3.6.1</b>	<i>Principais fases existentes no aço</i> .....	36
<b>3.6.2</b>	<i>Curvas de resfriamento</i> .....	37
<b>3.7</b>	<b>Sistemas de resfriamento</b> .....	39
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	40
<b>4.1</b>	<b>Materiais</b> .....	40
<b>4.2</b>	<b>Métodos</b> .....	41
<b>4.2.1</b>	<i>Parâmetros utilizados para o vergalhão em rolo 8,00 mm</i> .....	44
<b>4.2.2</b>	<i>Primeira campanha de produção do Stelmor</i> .....	45
<b>4.2.3</b>	<i>Modelamento do processo</i> .....	47
<b>4.2.4</b>	<i>Confirmação dos cálculos</i> .....	50
<b>5</b>	<b>MELHORIAS E RESULTADOS</b> .....	50
<b>5.1</b>	<b>Resultados obtidos durante a primeira campanha de produção e problematização</b> .....	50
<b>5.2</b>	<b>Confirmação dos resultados</b> .....	54

<b>5.3</b>	<b>Melhorias.....</b>	<b>56</b>
<b>5.4</b>	<b>Resultados obtidos durante a segunda campanha de produção.....</b>	<b>57</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>60</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>61</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços longos produzidos pela Companhia Siderúrgica Nacional - CSN, vergalhão CA 50, vergalhão em rolo CA 50 e fio máquina, são laminados a quente a partir de tarugos de 150 mm x 150 mm ou a partir de blocos 30 mm x 30 mm, esses tarugos são produzidos através de sucatas pelo Forno Elétrico a Arco FEA e forno panela, enquanto que os blocos são produzidos através do corte de placas que são rejeitadas pela CSN aços planos, sua rota de fabricação contempla a aciaria Linz-Donawitz - LD e desgaseificador a vácuo. Os aços planos necessitam de alta qualidade dentro de faixas estreitas de composição química, porém nos aços longos não se necessita de tamanha rigorosidade, fazendo dessas placas rejeitadas uma matéria prima de boa qualidade para os aços longos.

Os tarugos ou blocos são reaquecidos a temperaturas elevadas, cerca 1200 °C para austenitizar e homogeneizar a composição do aço. Em seguida, são submetidos a sequências de deformações que envolvem as etapas do trem laminador de desbaste, intermediário, pré-acabamento, acabamento e laminador de rolos totalizando 28 passes de laminação. Em seguida, tem-se a etapa de resfriamento realizada pelos equipamentos que conferem o tratamento térmico aos aços longos.

Os vergalhões CA 50, aço para concreto armado com 50 Kgf/mm<sup>2</sup> de Limite de Escoamento - LE, bitolas finas 8,00 mm a 16,00 mm, em rolos produzidos via Stelmor são os produtos de maior demanda da CSN aços longos. Estes produtos sofrem tratamento térmico de resfriamento ao ar forçado via esteira transportadora de espiras, após serem laminados e espiralados.

Este trabalho propõe: Processo de implantação e parametrização de controle dos equipamentos de tratamento térmico após a laminação de vergalhão, Thermex e principalmente Stelmor. Isso engloba as áreas do conhecimento metalúrgico como transferência de calor, transformação de fases, tratamento térmico, propriedades mecânicas e metalografia. Além da análise dos parâmetros e características do processo Stelmor, esteira transportadora de espiras, pois o produto final vinha apresentando heterogeneidade nas propriedades mecânicas causada por um resfriamento diferenciado das espiras, gerando reprovação na inspeção da qualidade. Através do uso de pirômetros para monitorar a temperatura das espiras e a taxa de resfriamento durante o tratamento térmico, tornou-se possível reduzir a heterogeneidade das propriedades mecânicas, assim como a elaboração de ferramentas que ajudam na parametrização do Stelmor.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos gerais**

- Demonstrar as possíveis causas das heterogeneidades das propriedades mecânicas do vergalhão CA 50 em rolo;
- Redução das heterogeneidades do produto vergalhão em rolo e adequação à norma NBR 7480.

### **2.2 Objetivos específicos**

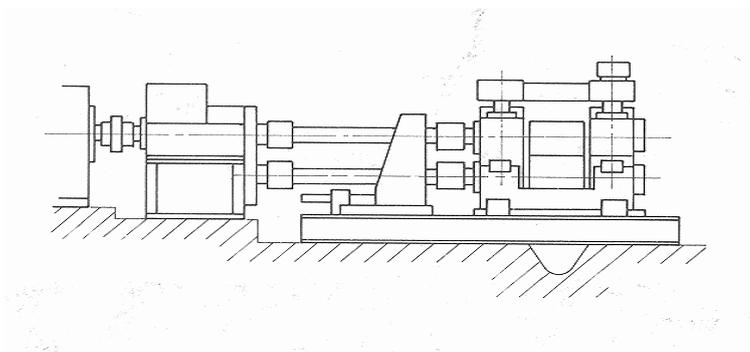
- Realização de medições com pirômetros ao longo da esteira transportadora;
- Elaboração de curvas de resfriamento ao longo da esteira transportadora de espiras;
- Obtenção da Transformação a Resfriamento Contínuo - CCT, do aço microligado utilizado;
- Realização de ensaios de tração nos vergalhões para analisar a variação nas propriedades mecânicas;
- Realização de ensaio de dobramento para verificar se o material quebra;
- Realização de micrografias para analisar a variação na microestrutura obtida com tal taxa de resfriamento.
- Elaborar e aplicar medidas para a redução das heterogeneidades das propriedades mecânicas do vergalhão em rolo.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Equipamentos da laminação CSN Aços Longos

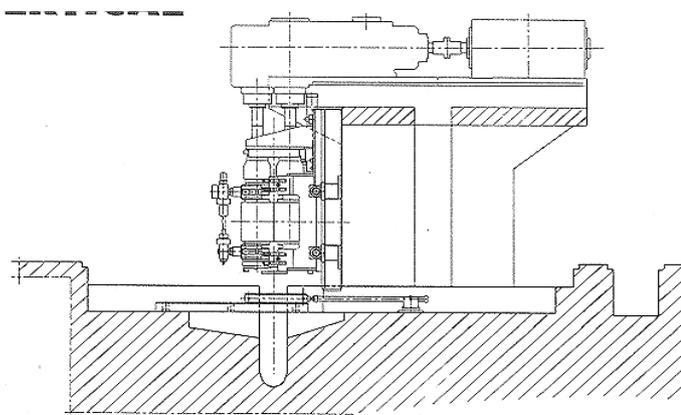
As etapas de processamento para produção de vergalhão e fio-máquina se inicia com o enformamento dos tarugos ou blocos no forno de reaquecimento, após atingirem uma certa temperatura, cerca de 1200 °C, são liberados para a laminação. Os laminadores contínuos da CSN são constituídos de cadeiras alternadamente na horizontal e na vertical, Figura 1 e 2.

Figura 1 - Cadeira de laminação horizontal.



Fonte: CSN módulos de treinamento (2008).

Figura 2 - Cadeira de laminação vertical.



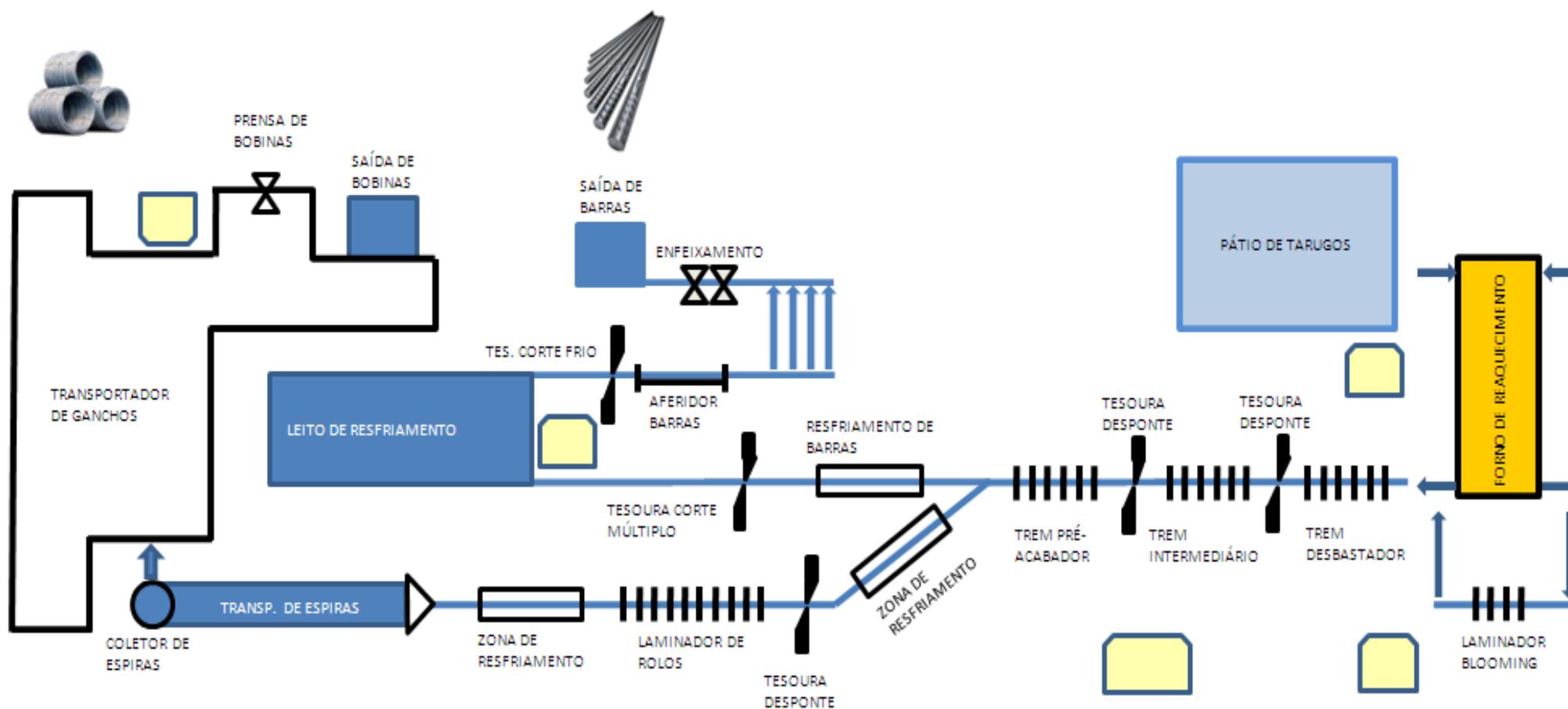
Fonte: CSN módulos de treinamento (2008).

Os tarugos seguem inicialmente para o trem desbastador com 6 cadeiras, quando utiliza-se o bloco ele passa primeiramente pelo laminador blooming para depois entrar no trem desbastador. Seguindo pela tesoura onde se realiza o desponte da cabeça e da cauda, inicia-se, então, a segunda etapa de laminação onde ocorrem mais seis deformações no trem intermediário, ocorre um novo desponte da cabeça e cauda e então, a terceira etapa, tem-se trem pré-acabador com mais seis passes de deformação. Dependendo do produto que se produz, vergalhão ou fio-máquina, o material pode seguir duas rotas, conforme a Figura 3.

Para a produção de vergalhão reto, utiliza-se a rota do leito de resfriamento onde o vergalhão reto recebe um tratamento térmico com água via Thermex, seguindo posteriormente para o leito de resfriamento, tesoura, aferidor de barras, enfeixamento e finalmente para a saída de barras.

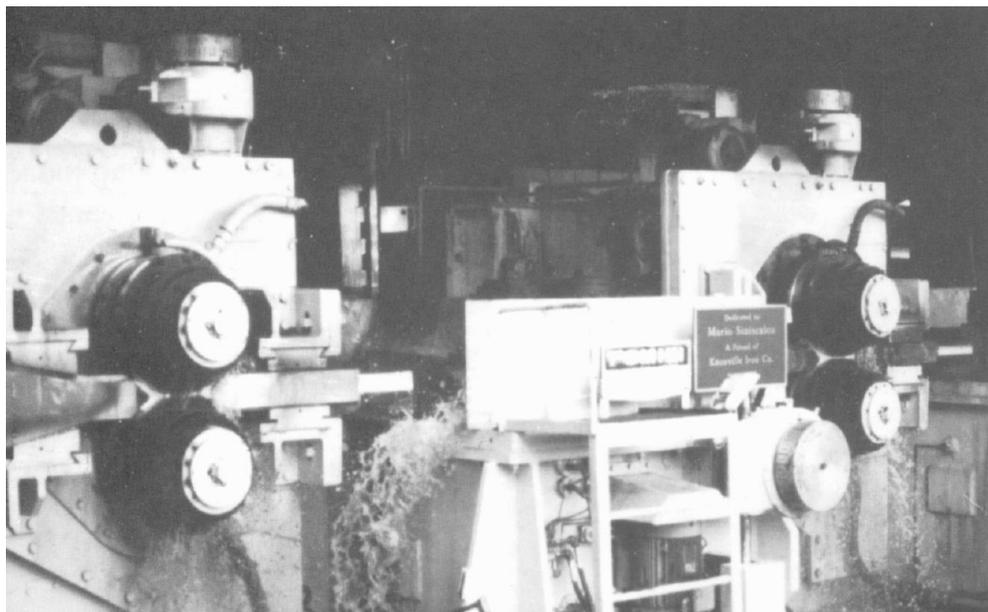
Quando produz-se vergalhão em rolo ou fio-máquina, utiliza-se a rota do laminador de rolos, onde o material sofre mais 10 passes de deformação no trem contínuo acabador tipo cantilever, Figura 4. O material passa por caixas de água que regulam a temperatura de entrada no formador de espiras, que por sua vez transforma em espiras o vergalhão ou fio-máquina e deposita-os na esteira transportadora de espiras, Stelmor. Sob a esteira transportadora de espiras há ventiladores centrífugos de alta capacidade que dão um resfriamento ao ar forçado nas espiras, Figura 5. Ao final há a estação reformadora onde ocorre a coleta das espiras em uma câmara cilíndrica e a formação de rolos, Figura 6 e 7. Ganchos transportadores vão ao encontro dessa câmara cilíndrica e o rolo é transferido aos mesmos. Após serem carregados nos ganchos transportadores, os rolos permanecem sendo transportados, expostos ao ar, até serem prensados, amarrados e posteriormente encaminhado para o estoque ou para expedição, Figura 8.

Figura 3 - Esquema do sistema de produção do laminador de aços longos da CSN.



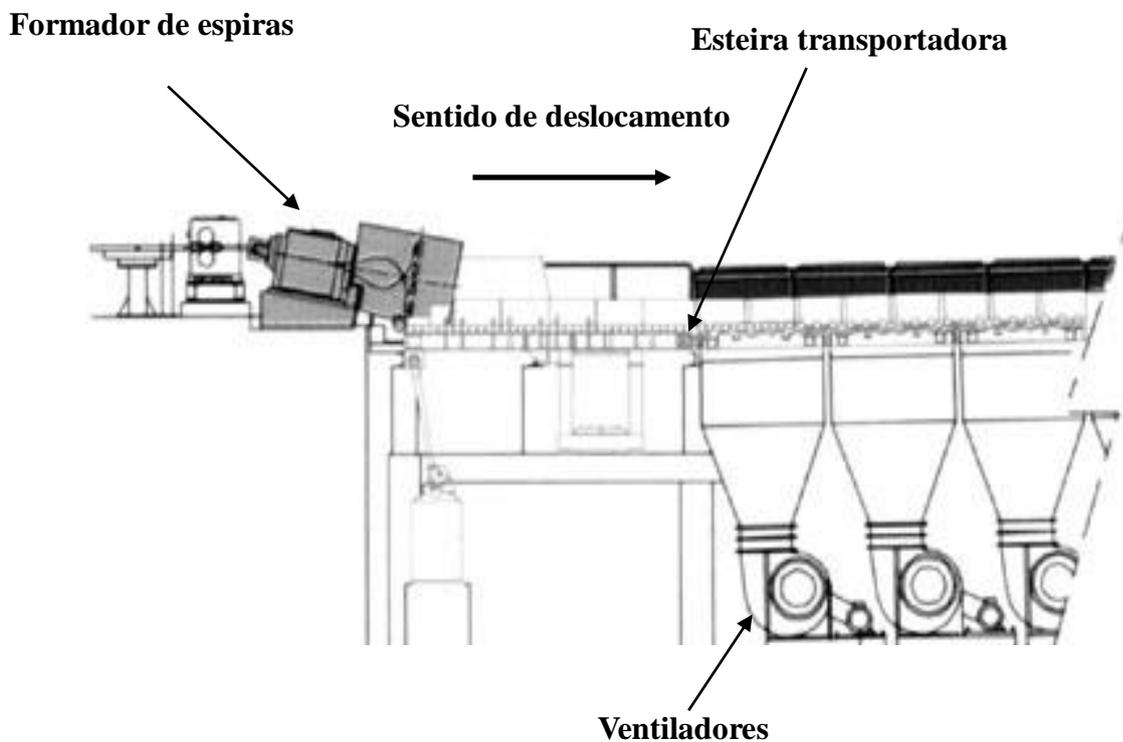
Fonte: CSN módulos de treinamento (2008).

Figura 4 - Laminador de rolos tipo cantilever.



Fonte: CSN módulos de treinamento (2008).

Figura 5 - Formador de espiras e ventiladores sob a esteira transportadora.

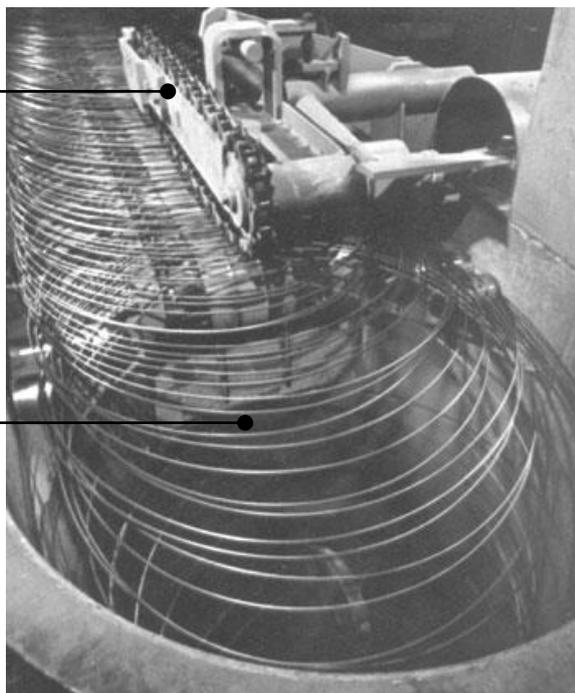


Fonte: CSN módulos de treinamento (2008).

Figura 6 - Sistema coletor de espiras para a formação de rolos.

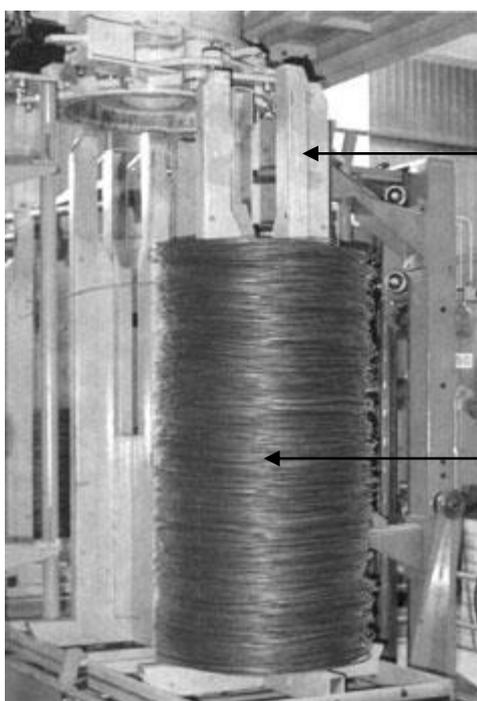
**Dispositivo de separação e distribuição das espiras, para preparar a formação do rolo na câmara de coleta.**

**Queda das espiras na câmara de coleta.**



Fonte: CSN módulos de treinamento (2008).

Figura 7 - Estação reformadora das espiras.

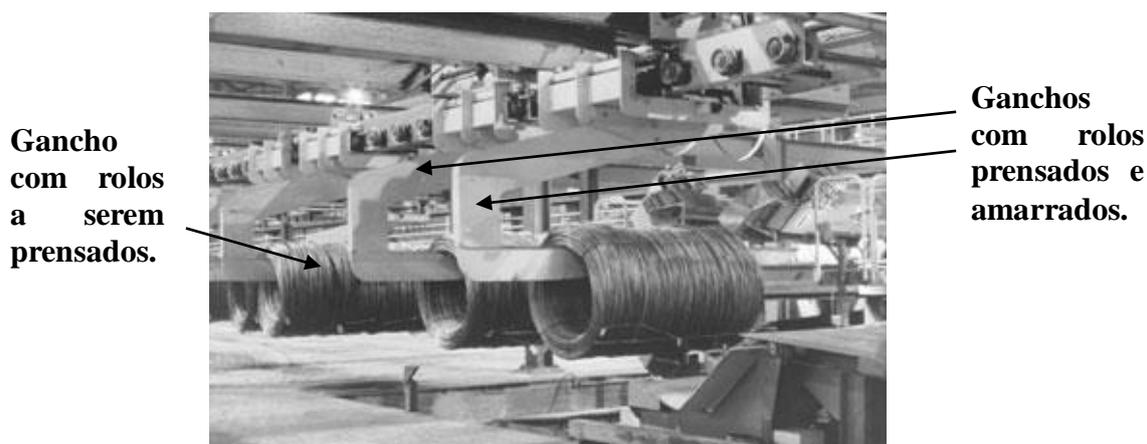


**Suporte (“aranha”) carregado com rolo.**

**Rolo sob a saída da câmara de coleta.**

Fonte: CSN módulos de treinamento (2008).

Figura 8 - Ganchos transportadores de rolos.



Fonte: CSN módulos de treinamento (2008).

## 3.2 Laboratórios

Todo produto que é produzido pela CSN Aços Longos são ensaiados e analisados pelos laboratórios afim de certificar o produto de acordo com as exigências das normas de padronização e qualidade, dentre elas a norma da ABNT NBR 7480, que trata de aços para armadura de construção civil e a certificação do INMETRO.

### 3.2.1 Laboratório de macrografia

Laboratório responsável pela análise representativa das corridas através da inspeção da qualidade dos tarugos produzidos via lingotamento contínuo da aciaria elétrica. São analisados a composição química do aço, as quantidades de poros no tarugo, a segregação no centro do tarugo e a romboidade do tarugo. Após a aprovação por parte da equipe do laboratório a corrida é liberada para o pátio de tarugos onde posteriormente será enfundada e laminada. Caso a análise dos tarugos não seja aprovada a corrida toda será descartada para o pátio de sucatas, onde será reaproveita como tal.

### 3.2.2 Laboratório de ensaios mecânicos

Laboratório responsável pela análise representativa dos produtos produzidos pelo laminador através da inspeção da qualidade dos vergalhões e fio-máquinas. Neste laboratório são realizados diversos ensaios mecânicos como: ensaio de tração, ensaio de

dobramento de 180°, micrografia. Também é analisado as tolerâncias dimensionais dos produtos finais e a presença de defeitos superficiais ou internos. Este laboratório segue as normas ABNT NBR 7480, que trata de aços para armadura de construção civil e o INMETRO.

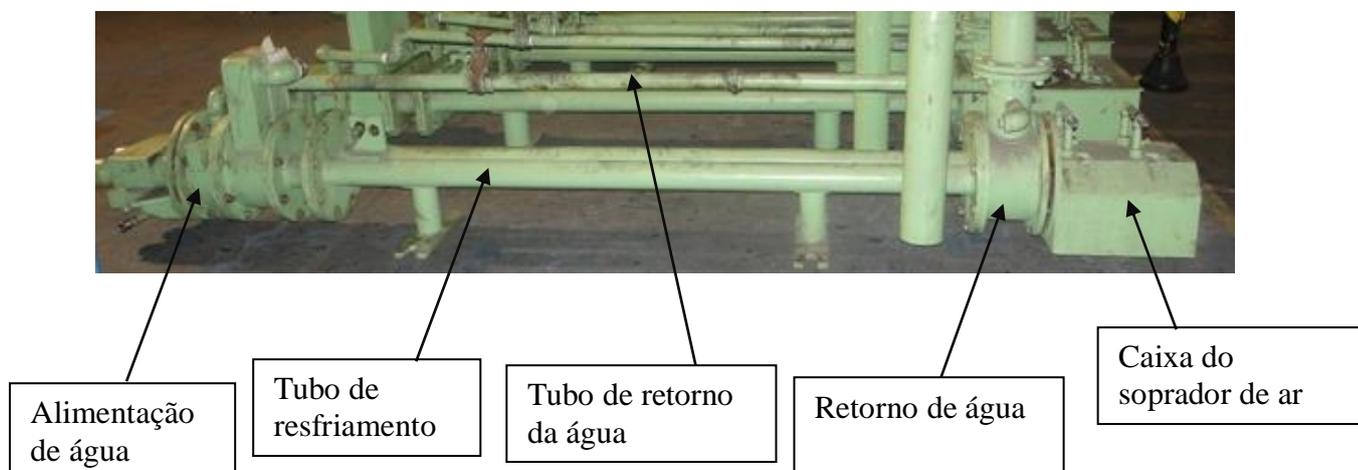
### 3.3 Equipamentos de tratamento térmico em linha

#### 3.3.1 Thermex

A tecnologia 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. Este sistema apresenta uma facilidade de operação e praticamente não requer trabalho operacional durante seu funcionamento.

No sistema Thermex, são utilizados tubos, também denominados de canhões, Figura 9. Ele subdivide-se em três trechos, onde a água pressurizada troca calor com as barras, além de um sistema de sopradores para a remoção da água na superfície das barras. Este sistema de troca térmica garante, por sua vez, que as barras tenham um resfriamento forçado e homogêneo em sua superfície formando uma camada resistente de martensita, Figura 10. Simultaneamente com o resfriamento da camada superficial da barra, o núcleo apresenta um resfriamento mais lento gerando um núcleo mais dúctil de ferrita e perlita, conforme a figura seguinte, Figura 11.

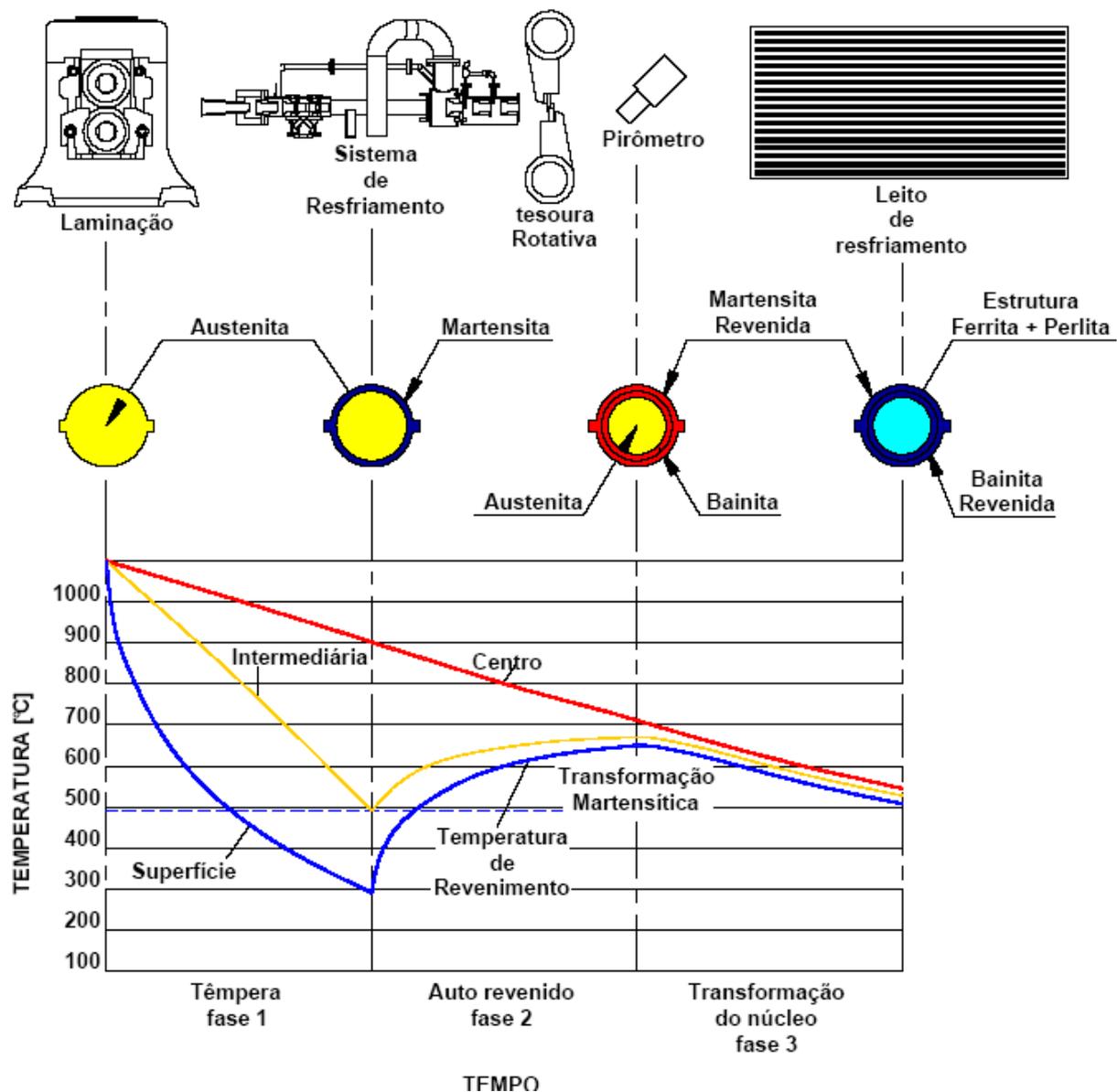
Figura 3 - Componentes do sistema Thermex.



Fonte: CSN módulos de treinamento (2008).

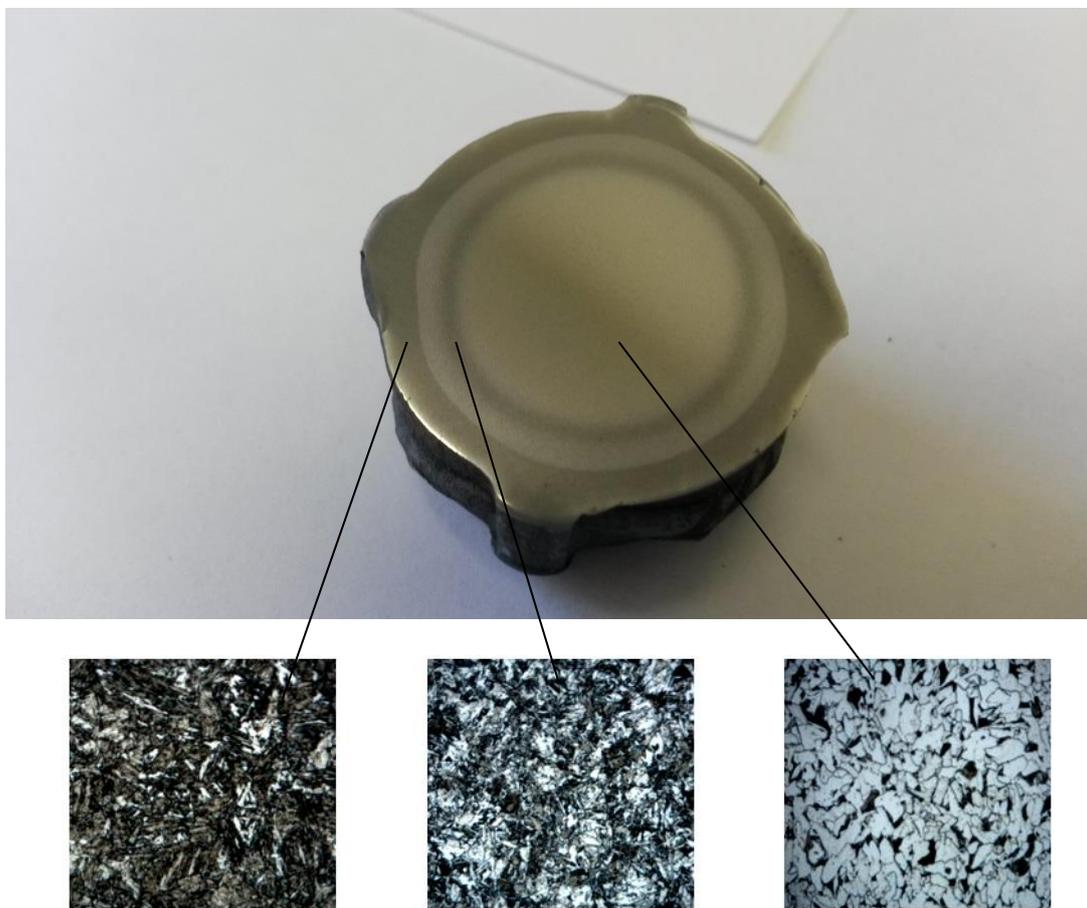
Quando a barra sai do Thermex, cessando o resfriamento forçado com água, ela segue para o leito de resfriamento ao ar em temperatura ambiente. O núcleo ainda quente transfere calor para a superfície da barra reaquecendo-a e sua camada de martensita é então auto-revenida gerando uma combinação de excelentes propriedades mecânicas ao final do processo.

Figura 4 - Sistema de tratamento térmico Thermex de vergalhão em barras.



Fonte: Alves Filho (2004).

Figura 5 – Coroa externa de martensita, coroa intermediária de bainita e núcleo de ferrita e perlita.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O sistema Thermex de resfriamento apresenta dispositivos de controle, baseados na 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:

- 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.

### **3.3.2 Formador de espiras e Stelmor**

Sistema utilizado para a produção de bitolas finas de 5,5 mm até 16 mm de fio-máquina e vergalhão em rolo, devido a essas finas espessuras as barras chegam com alta velocidade. O formador de espiras por sua vez tem a função de transformar as barras retas em espiras, despejando-as na esteira transportadora de espiras. Seguindo, então, na esteira transportadora de espiras na linha de resfriamento, Stelmor.

Localizado após a cabeça formadora de espiras, a esteira transportadora de espiras, Stelmor, é onde as propriedades metalúrgicas desejadas são obtidas através do tratamento de normalização por ar forçado. Segue para a estação reformadora onde as bobinas são recolhidas e enviadas em ganchos para o empacotamento.

A esteira transportadora de espiras tem como função transporta as espiras feitas no Formador de espiras por um caminho de rolos com velocidade regulável, que permite variação na densidade das espiras depositadas. O resfriamento é feito através de 12 ventiladores centrífugos de alta capacidade instalados abaixo dos rolos e divididos em 7 setores, onde há o tratamento térmico. Existem tampas na parte superior da esteira caso seja preciso diminuir a taxa de resfriamento.

As possibilidades de tratamento térmico sobre o Stelmor podem variar conforme o material produzido e as propriedades finais que são desejadas.

Processo de resfriamento lento, quando o material é resfriado lentamente através de uso de coberturas isolantes ao longo da esteira transportadora.

Processo de resfriamento normal, quando o material é resfriado ao ar, apenas pela perda natural de calor.

Processo de resfriamento rápido, quando o produto é submetido a um processo de remoção rápida de calor. Isso faz com que a temperatura do material caia de forma rápida, mas controlada, a partir da temperatura com a qual foram formadas as espiras, geralmente entre 850°C a 920°C.

Há duas formas usadas para realizar o resfriamento controlado durante o percurso no transportador de espiras que são, por meio de ar forçado ou por meio de mergulho das espiras em um tanque com água.

O resfriamento por meio de ar forçado é realizado por um conjunto de ventiladores de grande capacidade localizados abaixo da esteira transportadora, Figura 12. Conforme as espiras passam pela esteira, as mesmas recebem um fluxo de ar ascendente, ocorrendo o resfriamento forçado. A intensidade de remoção de calor é

controlada, ao longo do percurso, para que sejam obtidas as características desejadas no produto final. Na saída de ar desses ventiladores fica instalado um conjunto de defletores, que tem a função de modificar o fluxo de ar soprado, visando produzir um resfriamento uniforme das espiras do material, através de toda a largura da esteira.

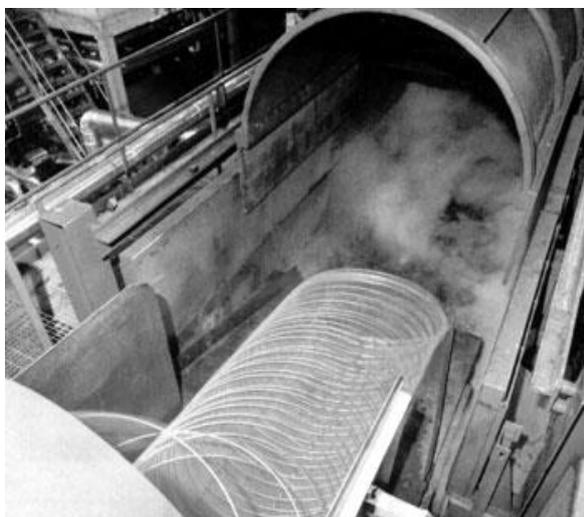
Figura 6 - Croqui da disposição do formador de espiras e da esteira transportadora de espiras, com coberturas e ventiladores.



Fonte: CSN módulos de treinamento (2008).

O resfriamento realizado pelo mergulho em água ocorre por meio da imersão das espiras em um tanque com água, Figura 13, por um determinado tempo, correspondente ao trecho em que essa esteira está sob a água. Essa configuração da esteira transportadora não faz parte dos equipamentos CSN Aços Longos.

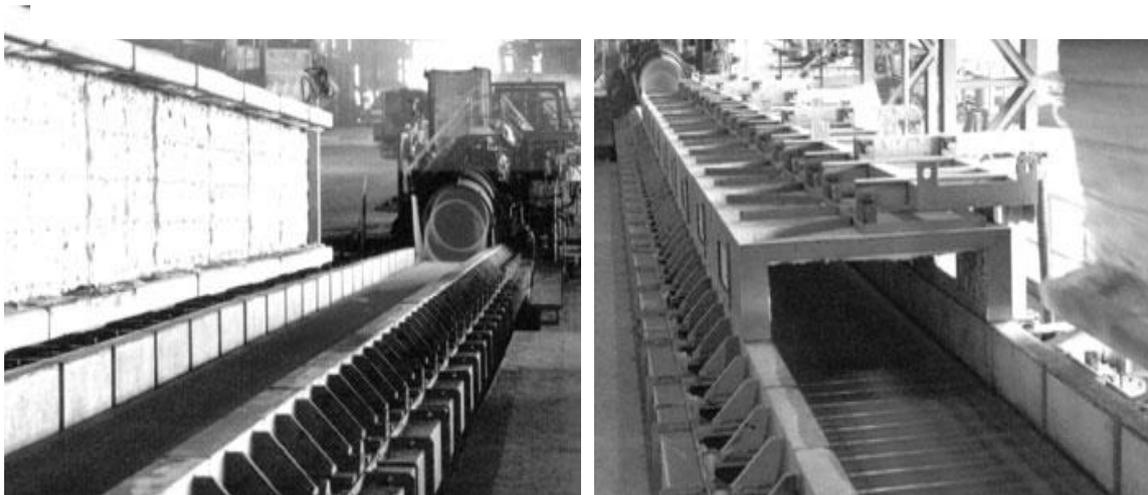
Figura 7 - Espiras sendo transportadas para tratamento em linha por resfriamento em tanque com água.



Fonte: CSN módulos de treinamento (2008).

Por meio de coberturas isolantes ao longo da esteira transportadora ocorre o resfriamento lento, Figura 14, o que reduz a possibilidade de dissipação de calor contido nas espiras. Isso faz com que o material seja resfriado lentamente, a partir da temperatura com a qual foram formadas no formador de espiras, entre 850°C a 920°C. Nessa operação de resfriamento lento, a velocidade de deslocamento das espiras na esteira é reduzida, o que faz com que as espiras fiquem mais agrupadas gerando empilhamento das camadas mais compactadas, o que diminui a dissipação de calor.

Figura 8 - Transportador de espiras e coberturas isolantes móveis abertas e fechadas.

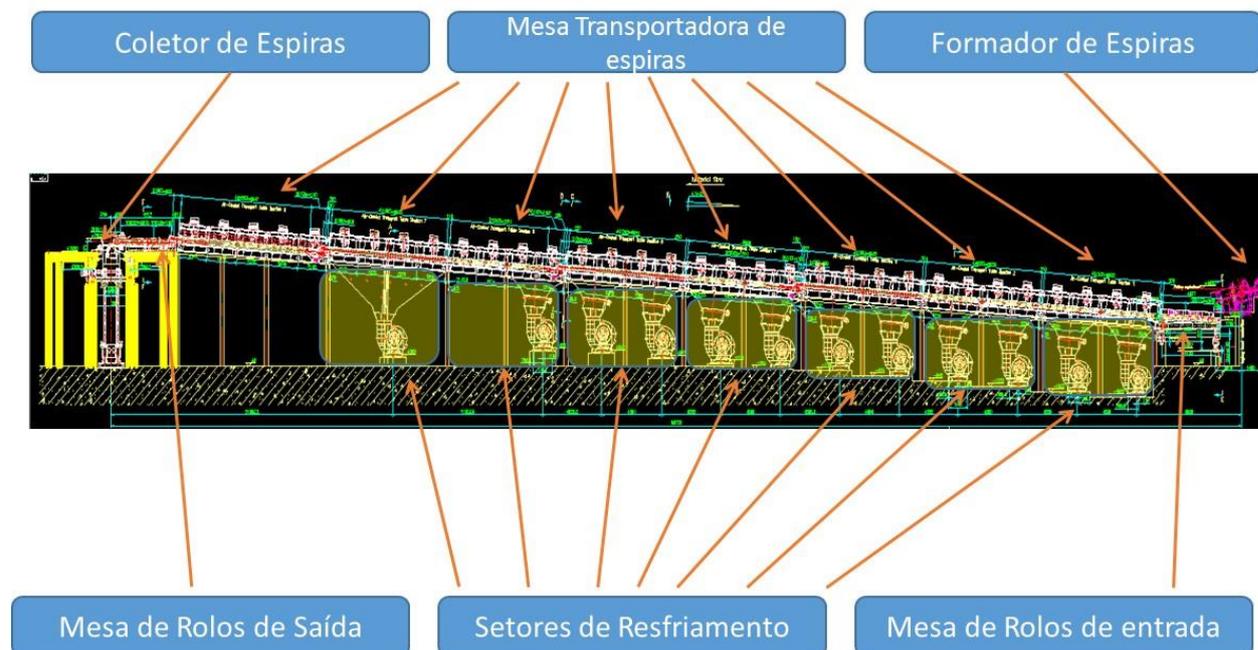


Fonte: CSN módulos de treinamento (2008).

As principais características técnicas do equipamento esteira transportadora de espiras CSN, tipo Stelmor, Figura 15:

- **Comprimento total da mesa:** 83 metros
- **Comprimento da área das Tampas:** 71m
- **Mesa de Rolos:** 10 seções
- **Velocidade dos Rolos:** 0,13 a 2 m/s
- **Vazão de ar de cada ventilador:** 154000M<sup>3</sup>/h
- **Servomotores dos Dampers:** Potência 0,12KW, 460 VAC acionado por CCM.

Figura 9: Desenho da planta completa da esteira transportadora, tipo Stelmor.



Fonte: CISDI Engineering (2007).

### 3.4 Aços para vergalhão

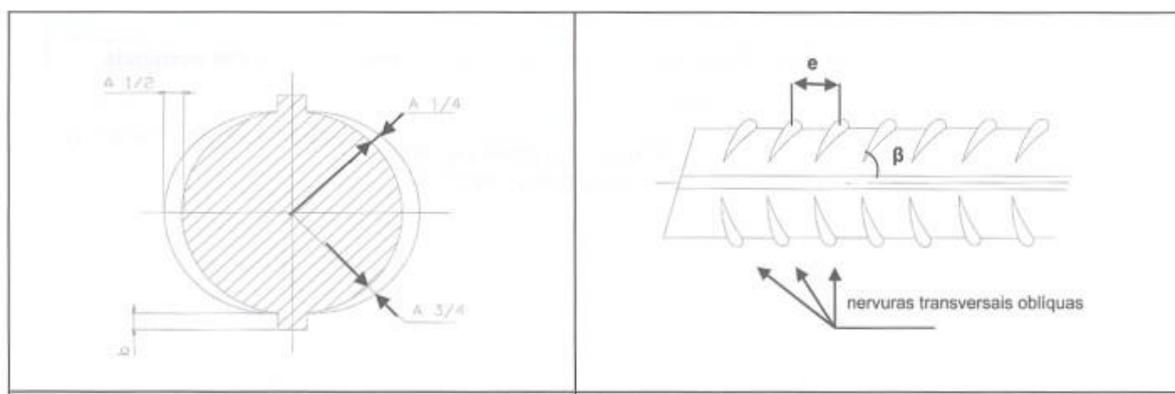
Os aços utilizados para a fabricação de vergalhões são geralmente aços comuns de baixo carbono ou aços microligados com teores menores de carbono e adições de microligantes, em torno de 0,05% a 0,08% em massa, geralmente de elementos como o Nióbio, Titânio, Vanádio e as vezes Alumínio.

Para atingirem as propriedades mecânicas exigidas pela norma NBR 7480, os aços ao carbono recebem um tratamento térmico de têmpera e revenimento, este tratamento transforma em uma microestrutura mais resistente e ao mesmo tempo o material permanece com bom alongamento. Os aços microligados conseguem atingir boas propriedades mecânicas somente pela ação dos microligantes sem a necessidade de realização do tratamento térmico de têmpera, o que torna-se uma rota alternativa quando não se tem tais equipamentos.

De acordo com a norma NBR 7480 que especifica os requisitos exigidos para aços destinados a armaduras para estruturas de concreto armado, esta norma estabelece os requisitos exigidos para fabricação, fornecimento e encomenda de barras e fios de aço. Ela classifica como barras os produtos de diâmetro nominal de 6,3 mm ou

superior, obtidos exclusivamente por laminação a quente sem processo posterior de deformação mecânica. De acordo com o valor característico da resistência de escoamento, as barras de aço são classificadas nas categorias CA-25 de 25 kgf/ mm<sup>2</sup> de LE, CA-50 de 50 kgf/ mm<sup>2</sup> de LE, e os fios de aço na categoria CA-60 de 60 kgf/ mm<sup>2</sup> de LE. O requisito de propriedades mecânicas de dobramento do vergalhão é que ele não deve ocorrer ruptura ou fissura na zona tracionada do corpo de prova quando este for dobrado a 180° em um pino com diâmetro de acordo com a bitola do vergalhão. As barras da categoria CA-50 são obrigatoriamente providas de nervuras transversais oblíquas, conforme Figura 16.

Figura 10: Características das nervuras de um vergalhão CA 50.



Fonte: NBR 7480 (2007).

### 3.4.1 Aços ao carbono

Os aços ao carbono para vergalhão devem ter em sua composição, teores de carbono e de manganês controlados, de tal modo que não apresentem grandes dificuldades no que tange a trabalhabilidade, relacionada com a soldabilidade e o dobramento a 180° do vergalhão, aos quais poderão ser submetidos. Aços com baixos teores em carbono possuem boa ductilidade e boa trabalhabilidade, porém possuem baixa resistência mecânica, não atingindo as propriedades exigidas pela norma.

Equipamentos de tratamento térmico após a laminação possibilitam a obtenção de barras estruturais, com boas condições de resistência mecânica e de fácil soldagem, através de processos de controle da temperatura, que resultam na produção de vergalhões com estruturas metalúrgicas modificadas pelo tratamento térmico, obtendo-se, desta forma, as propriedades desejadas.

Os aços utilizados são ao carbono e as propriedades mecânicas desejadas são obtidas através de tratamento térmico de têmpera e auto-revenimento via Thermex ou Tempcore que transforma a microestrutura do material em martensita revenida na superfície com perlita e cementita no núcleo. O Carbono Equivalente - CE desse aço é baixo, cerca de 0,40 gerando um material de boa soldabilidade, tenacidade e resistência mecânica.

### **3.4.2 Aços microligados**

A utilização de aço microligado é uma alternativa ao uso de aços com teores altos de manganês e carbono estes apresentam um alto CE, o que dificulta a trabalhabilidade do material. A partir da utilização de aços microligados verifica-se um aumento no limite de escoamento e tenacidade devido à característica de possuírem um tamanho de grão mais refinado que é gerado por precipitados na forma de carbonetos, nitretos e carbonitretos.

Na indústria siderúrgica, mudanças tecnológicas têm ocorrido de maneira sistemática, buscando a melhoria das propriedades mecânicas do aço. As propriedades mecânicas do aço são definidas através do controle da sua microestrutura e das fases que as constituem. Isto pode ser conseguido através da escolha adequada da composição química, tratamento térmico e de tratamentos termomecânicos.

As novas tecnologias de processamento dos aços exigem um conhecimento cada vez mais aprofundado do sinergismo entre composição, processo termomecânico, microestrutura e propriedades dos aços.

### **3.5 Carbono equivalente CE**

O carbono tem uma grande influência na temperabilidade do aço, porém a sua adição em altos teores, cerca de 0,40% em massa, leva a uma sensibilidade do aço durante o processo de tratamento térmico e de solda. O aço com alto teor de carbono possui boa resistência mecânica, porém a sua tenacidade é baixa, aumenta a dificuldade de trabalho com esse material e a probabilidade de distorções e fratura em operações de solda.

O CE é uma medida elaborada com o intuito de analisar a soldabilidade do vergalhão. De acordo com a fórmula o carbono tem um maior peso no aumento dessa medida e o CE de vergalhões são padronizados pela norma ABNT NBR 6118. Várias fórmulas baseadas no empirismo, têm sido utilizadas para sinalizar esta propriedade. Porém, a fórmula para o cálculo do CE, com maior utilização é aquela adotada pelo International Institute of Welding - I.I.W., conforme compilação feita por Gorni( 2007).

$$CE= C + Mn/6 + Ni/15 + Cu/15 + Cr/5 + Mo/5 + V/5$$

Dados experimentais e de bibliografia (MODENESI, 2004; REID, 2005) indicam que o CE deve ser limitado, porém não existe um consenso a respeito dos limites máximos estabelecidos para este parâmetro, dada a sua natureza empírica. A amplitude referenciada por diversos autores, em relação ao carbono equivalente máximo adotado para aços soldáveis varia de 0,41% a 0,55%. A limitação do CE expressa a redução da tendência à formação de martensita nas regiões afetadas pelo calor das soldas e, conseqüentemente, da possibilidade do surgimento de trincas, durante o resfriamento, as quais inutilizariam o material.

### 3.6 Transformações de fases

As transformações de fases que os aços sofrem ao serem resfriados a partir de uma temperatura inicial ao qual o material está completamente austenitizado é de grande interesse para a indústria siderúrgica. As propriedades mecânicas do produto final estão diretamente relacionadas com as fases existentes e com as suas quantidades.

Por meio de diagramas como CCT e TTT - Temperatura Tempo Transformação, pode-se identificar as transformações metalúrgicas que os aços sofrem ao serem resfriados. Com estas curvas pode-se identificar as fases constituintes de um aço como também quantifica-las. Em processos industriais, utiliza-se os diagramas CCT, pois os processos ocorrem sob resfriamento contínuo e as curvas TTT são mais indicadas para resfriamentos isotérmicos.

### 3.6.1 Principais fases existentes no aço

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  $\alpha$  - 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, 2006). Ela é muito macia e dúctil, sua resistência à tração é menor que 310 MPa.

Como a ferrita tem uma estrutura cúbica de corpo centrado, os interstícios são pequenos e alongados, não podendo acomodar com facilidade um pequeno átomo de carbono. Conseqüentemente, 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. (VLACK, 2003)

Austenita  $\gamma$  - é uma solução sólida de carbono em ferro com estrutura Cúbica de Face Centrada - CFC, existindo entre as temperaturas de 727 e 1495 °C, e com solubilidade máxima de carbono no ferro de 2,11% a 1148°C. (SILVA,2006).

É difícil comparar as propriedades mecânicas entre ferrita e austenita porque isto teria que ser para temperaturas diferentes. Contudo, pode-se dizer que nas 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 a quente.

Cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) - é um carboneto de ferro com estrutura ortorrômbica e de alta dureza. A cementita dá origem a um eutetóide de extrema importância no estudo dos aços: a perlita. A cementita (do latim "caementum") é o carboneto de ferro  $\text{Fe}_3\text{C}$  contendo 6,67% de carbono; muito dura (na escala Moh's ocuparia aproximadamente o lugar do feldspato) e quebradiça; é responsável pela elevada dureza e resistência dos aços de alto carbono, assim como pela sua menor ductilidade.

Perlita - a reação eutetóide, em aços, produz uma microestrutura característica chamada perlita. A perlita não é uma fase, e sim uma mistura de duas fases, ferrita e cementita, que ocorrem sob a forma de lamelas paralelas.

A perlita é uma mistura mecânica de 88,5% de ferrita e 11,5% de cementita, na forma de lâminas finas, dispostas alternadamente. As propriedades mecânicas da

perlita são, portanto, intermediárias entre as da ferrita e da cementita, dependendo, entretanto, do tamanho das lamelas de cementita. 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).

Bainita - é obtida pelo resfriamento rapidamente para temperaturas abaixo do nariz da curva Transformação Térmica Isotérmica - ITT e mantido nessa temperatura, ocorrendo a formação de dessa estrutura. A bainita é classificada como superior ou inferior, de acordo com a temperatura na qual é formada. 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. Na parte mais baixa do diagrama TTT, a bainita caracteriza-se pela excelente ductilidade e resistência ao choque, com durezas elevadas, acima mesmo de 50 Rockwell C.

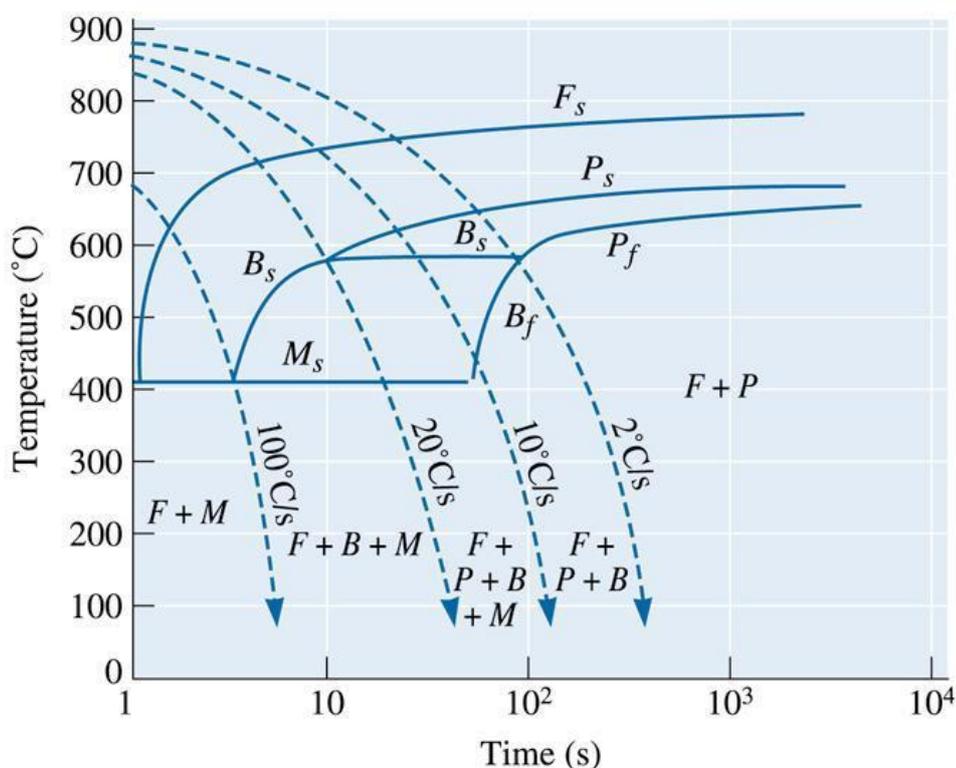
Martensita - é uma solução sólida de carbono em ferro  $\alpha$  (ferrita), apresentando uma estrutura tetragonal de corpo centrado, isto é, uma célula unitária correspondendo a um prisma reto de base quadrada, com as arestas laterais diferentes das arestas da base. Esta microestrutura contém grandes tensões internas, estando o carbono forçosamente distribuído na rede cristalina da ferrita. O aspecto microestrutural da martensita é geralmente sob forma de agulhas. A martensita apresenta um reticulado tetragonal e sua dureza é muito elevada, podendo atingir 65 a 67 Rockwell C. Sua elevada dureza é devido a diversos fatores como precipitação de partículas submicroscópicas de carboneto de ferro da solução sólida gama e retenção dessas partículas na forma de uma solução sólida supersaturada no reticulado do ferro alfa (formado no esfriamento) onde atuam como espécies de “chavetas”, impedindo o escorregamento. (BHADESHIA, 1996)

### ***3.6.2 Curvas de resfriamento***

As curvas de transformação por resfriamento contínuo, denominada de Transformação por Resfriamento Contínuo – CCT, apresenta a relação entre a taxa de resfriamento e as possibilidades de formação das fases como também suas quantidades, que serão obtidas nas transformações que ocorrerão, em função do tempo e da variação da temperatura que será aplicada a este material, durante o tratamento térmico.

Na Figura 17 que representa um diagrama CCT para um aço microligado, a curva identificada por  $F_s$  representa as condições de início de formação da ferrita. As curvas identificadas por  $P_s$  e  $P_f$  representam as condições de início e final, respectivamente, da formação da fase perlita. As curvas identificadas por  $B_s$  e  $B_f$  representam as condições de início e final, respectivamente, da formação da fase bainita. A reta  $M_s$  mostra as condições de início de formação da fase martensítica.

Figura 11 - Diagrama C.C.T. para um aço de baixa liga.



Fonte: Askeland (2010).

Este tipo de gráfico é de grande ajuda na parametrização dos equipamentos de tratamento térmico. Para cada composição diferente de aço a CCT também muda.

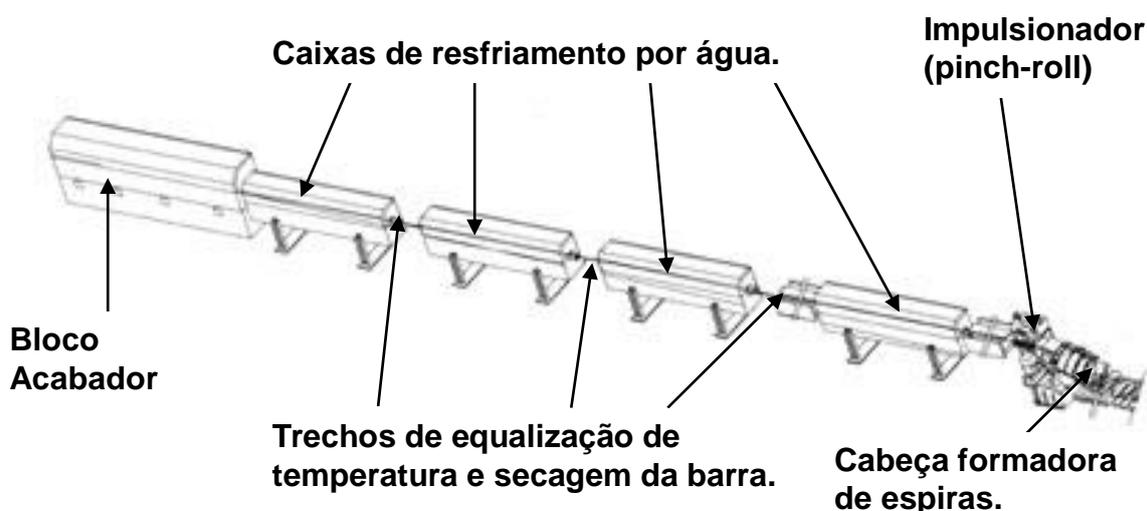
De acordo com a CCT de tal aço nota-se que sob resfriamento lento, tratamento de normalização, por exemplo, observa-se a formação de uma estrutura totalmente de ferrita e perlita. Conforme se aumenta a taxa de resfriamento, consegue-se obter outras estruturas, como bainita e em maiores taxas a martensita. As propriedades mecânicas, como já foi dito, estão relacionadas com as microestruturas as quais o aço é constituído, daí a importância da CCT.

### 3.7 Sistemas de resfriamento

Uma barra de vergalhão resfriada imediatamente após a conclusão da laminação, preserva em grande medida o refinamento da estrutura de grãos austeníticos produzidos por deformação a quente, tornando o aço mais sensível às operações subsequentes de tratamento térmico ao ar forçado.

A taxa de resfriamento de barras de aço em um sistema Stelmor depende de vários parâmetros operacionais. Dentre estes parâmetros os mais importantes são o tamanho da bitola, a velocidade da barra nas caixas de água, velocidade da barra na esteira, a temperatura de entrada da barra na esteira transportadora, fluxo de água nas caixas de água, fluxo de ar do ventiladores sob a esteira.

Figura 12 - Quatro caixas de água após o bloco acabador e anterior ao formador de espiras.



Fonte: CSN módulos de treinamento (2008).

Para algumas condições de operação dadas, a velocidade de resfriamento definirá uma distribuição de temperatura ao longo da barra de aço pouco antes da sua entrada para a transformação de fase na esteira transportadora. As quatro caixas de água, Figura 18, são de grande importância para o processo de resfriamento subsequente ao longo da esteira transportadora. Elas têm a função de controlar e equalizar a temperatura de entrada das barras na esteira.

Uma vez que a transformação da austenita em perlita e ferrita deve ocorrer ao longo da esteira transportadora sob ar forçado, esta temperatura de entrada se torna muito importante para o desempenho do processo, conforme a análise da Figura 3 anterior. Se esta temperatura é elevada há o perigo de que a transformação de fase no interior da haste pode terminar fora da zona de arrefecimento de ar forçado, esteira transportadora. Isto permitirá a precipitação de uma perlita grosseira que diminuirá as propriedades mecânicas do produto final. Porém se a temperatura da barra for baixa na entrada da esteira transportadora poderá ocorrer a transformação de estruturas metaestáveis, bainita ou martensita, muito resistente, porém frágil que também não é o objetivo.

Na esteira transportadora é onde ocorrem as transformações de fases e o controle do tamanho de grão. Através de 12 ventiladores centrífugos de alta capacidade, sob esteira transportadora, gera-se um forte fluxo de ar ascendente que resfria as espiras, dando-lhes um tratamento térmico de normalização ao ar forçado.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Materiais

Para a realização deste trabalho foram utilizadas amostras de vergalhão CA50 de Ø 8,00 mm, grau de Aço 1635 microligado ao vanádio com 0.36% a 0.40% de carbono e alto teor de manganês, acima de um por cento, Tabela 1. A rota de fabricação utilizada para a produção dos aços contempla o forno elétrico a arco e o forno panela.

As amostras analisadas foram processadas por laminação de desbaste, laminador intermediário, laminador pré-acabador, e laminador acabador de rolos com posterior resfriamento ao ar forçado via esteira transportadora de espiras, Stelmor.

Tabela 1 - Composição química dos materiais adotados (% em peso).

<b>Composição Química – Aço 1635, corrida A00560 (%massa)</b>									
<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>S</b>	<b>P</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Sn</b>	<b>V</b>
0,34	1,05	0,32	0,018	0,027	0,156	0,041	0,092	0,019	0,035

Todas as amostras foram ensaiadas na máquina de tração do laboratório de ensaios mecânicos, assim como no teste de dobramento semi guiado de acordo com as normas NBR ISO 6892 e NBR 6153 respectivamente.

Para a elaboração das curvas de resfriamento ao longo da esteira transportadora, utilizou-se pirômetros portáteis de mão com capacidade de ler temperaturas de 400°C a 1600°C e de 100°C a 600°C. Mediu-se as temperaturas ao longo da esteira transportadora de espiras, local onde ocorre o resfriamento ao ar forçado, a cada 5 metros começando pelo formador de espiras.

Realizou-se metalografias de algumas amostras antes de serem ensaiadas mecanicamente. Os corpos de prova foram seccionados em uma máquina de corte com disco de 2 mm de espessura em refrigeração através de fluido abundantemente para evitar o aquecimento e conseqüentemente alteração microestrutural. Todas as amostras foram embutidas em baquelite, lixadas, polidas e atacadas obedecendo aos procedimentos de preparação de amostras metalográficas via microscopia ótica.

O desbaste grosseiro foi realizado em lixas sequenciais com granulometria de 220 *mesh*, 400 *mesh*, 600 *mesh* e 1.200 *mesh* e a preparação final em politriz dotada de prato giratório com pano fino utilizando pastas de diamante 4  $\mu\text{m}$  e 2  $\mu\text{m}$  para obtenção de uma superfície espelhada e livre de deformações. As amostras de aço foram submetidas a ataque químico com o reativo Nital 3%, durante aproximadamente 10 segundos para a revelação da microestrutura. Todos esses ensaios foram realizados no laboratório de ensaios mecânicos da CSN – Aços Longos.

## 4.2 Métodos

Foram analisadas três bobinas do vergalhão e retiradas três espiras de cada, uma na cabeça da bobina, uma no meio e outra na cauda, Figura 19. Cada espira foi cortada e dividida em diversos pedaços, cerca de 40 cm e desespiralizadas, conforme o esquema da Figura 20, para realização de ensaios mecânicos.

Com o diâmetro da espira em torno de 100 cm, após desespiralizar, ficando com 314 cm de comprimento para cada espira retiradas. Com amostras de 40 cm de comprimento, gerou-se sete amostras por espiras, totalizando 63 amostras nas três

bobinas.

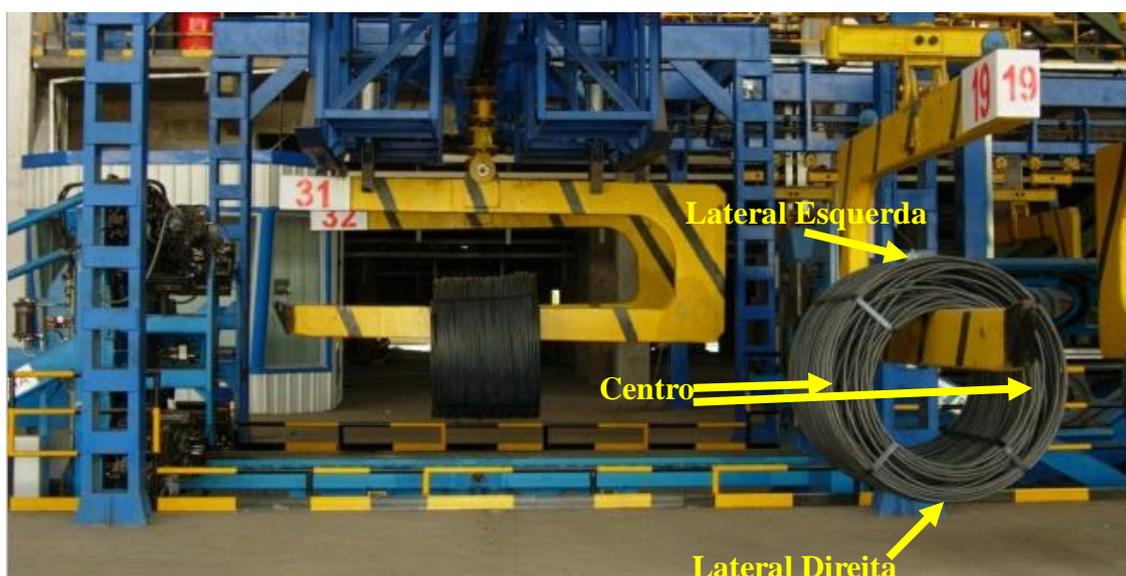
Tomou-se o cuidado durante a retirada das amostras de separar a localização das espiras dentro rolo, dividindo o rolo em três setores, cabeça, meio e cauda.

Figura 13 - Ilustração das posições cabeça, meio e cauda do rolo.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

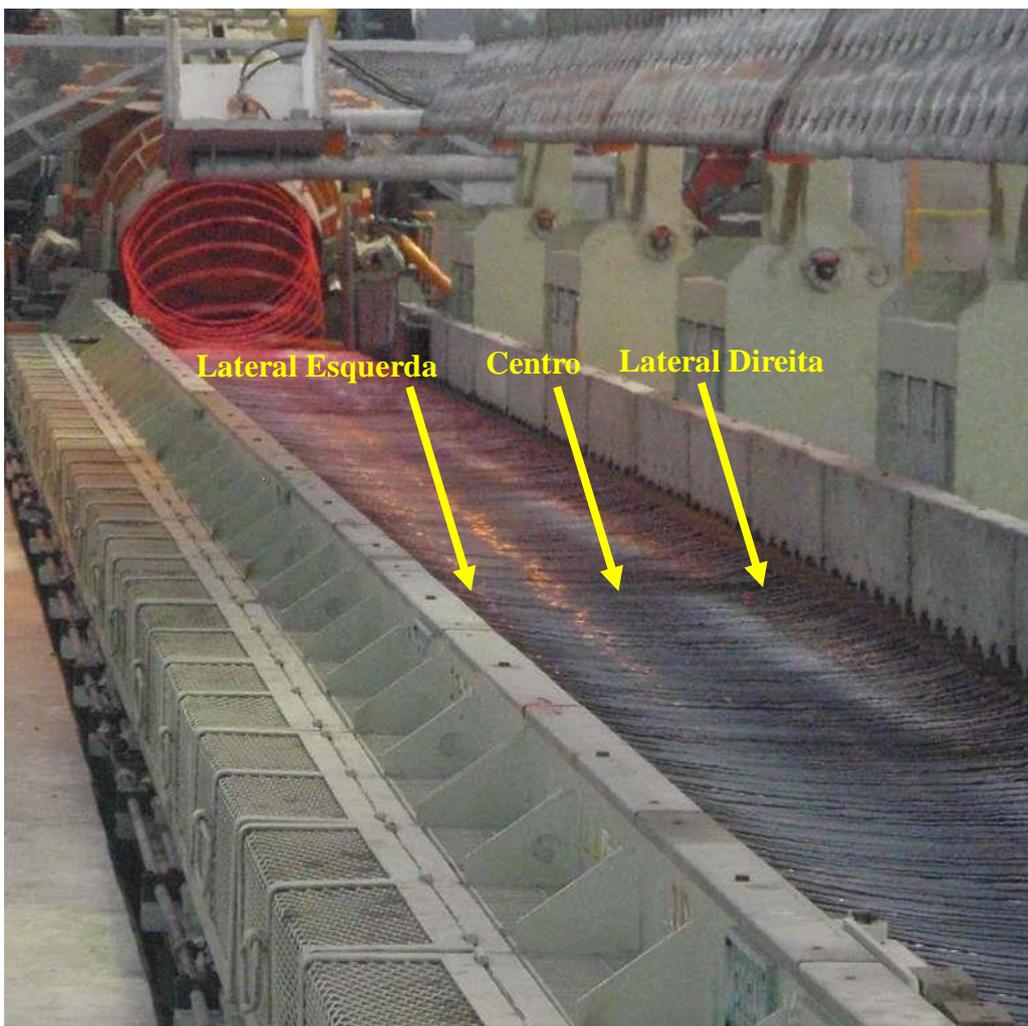
Figura 14 - Esquema das regiões laterais e central.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

As espiras por sua vez foram, divididas conforme sua localização ao longo da esteira transportadora, em região lateral esquerda, região lateral direita e centro da esteira, com a intenção de analisar a homogeneidade do produto e possíveis diferença entre as regiões da espira e os setores do rolo, Figura 21.

Figura 15 - Regiões das espiras ao longo da esteira transportadora.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Realizou-se, também, o desmonte de três espiras no setor da cabeça e três espiras no setor da cauda, pois estas espiras durante o processamento final quando passavam pelas caixas de água, antes de entrarem no formador de espiras, estas não recebiam o mesmo resfriamento dos outros setores do rolo devido a uma defasagem do acionamento das caixas de água, o que gerava uma diferença de temperatura.

#### 4.2.1 Parâmetros utilizados para o vergalhão em rolo 8,00 mm

Usou-se os parâmetros de resfriamento nas caixas de água e nos ventiladores da esteira transportadora de espiras conforme a Tabela 2. Essa parametrização foi baseada nos parâmetros fornecidos pela fornecedora dos equipamentos, CISDI.

Tabela 2 – Parâmetros de resfriamento utilizados nas quatro caixas de água e nos 12 ventiladores.

Produto	Aços	Diâmetro nominal (mm)	Caixas de água (Kg/mm <sup>2</sup> )					Temperatura (°C)		Cobertura de isolamento térmico e controle do ventilador de resfriamento para transportador de espiras												
			Laminador	Anteriores ao formador de espiras				Enfornamento	Formador de Espiras	Seção 1		Seção 2		Seção 3		Seção 4		Seção 5		Seção 6	Seção 7	
Vergalhão e Fio-máquina	1012	8,0	Cx1	Cx2	Cx3	Cx4	Cx5			Cx6	Cx7	V1(%)	V2(%)	V3(%)	V4(%)	V5(%)	V6(%)	V7(%)	V8(%)	V9(%)	V10(%)	V11(%)
	1024																					
	1030																					
	1635		0	0	0	0	0	0	0	1100~1150	950~1050	90	90	90	90	50	50	50	50	50	50	50
<b>Velocidade da esteira (m/s)</b>																						
		<b>Rolo 1</b>		<b>Rolo 2</b>		<b>Rolo 3</b>		<b>Rolo 4</b>		<b>Rolo 5</b>		<b>Rolo 6</b>		<b>Rolo 7</b>		<b>Rolo 8</b>		<b>Rolo 9</b>		<b>Rolo 10</b>		
		0,80		0,78		0,80		0,78		0,80		0,78		0,80		0,78		0,80		0,40		

Fonte: CISDI Engineering (2007).

#### ***4.2.2 Primeira campanha de produção do Stelmor***

Durante a primeira campanha de produção dos produtos em rolo via laminador de rolos e esteira transportadora foram produzidos fio-máquina com bitola de 10 mm, aço 1012, assim como vergalhão em rolo com bitola de 8 mm, aços: 1024, 1030 e 1635.

O grau de aço 1635, como já especificado anteriormente, é um aço microligado ao vanádio. Os aços 1024 e 1030 são aços ao carbono que apresentam teores de carbono respectivamente entre 0.23% a 0.27% e 0.28% a 0.32%.

Os produtos, vergalhão em rolo e fio-máquina, apresentaram características visuais ótimas, assim como as características dimensionais, que satisfizeram as normas que padroniza tais produtos, conforme Figuras 22, 23 e 24.

Figura 16 - Ilustração dos aspectos macroscópicos das espiras de fio-máquina.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura 17 - Bobina de vergalhão em rolo CSN 50.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura 18 - Aspecto macroscópico com logomarca e bitola do vergalhão.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Os resultados das propriedades mecânicas dos vergalhões com aço 1024 e 1030 obtidos após os ensaios mecânicos, porém, não foram satisfatórios gerando reprovação do produto por apresentarem LE abaixo do especificado pela Norma NBR 7480.

Os resultados das propriedades mecânicas dos vergalhões com aço microligado ao

vanádio 1635 obtidos após os ensaios mecânicos foram bem elevados e ao mesmo tempo com baixo alongamento percentual. No teste de dobramento semi guiado muitas amostras desse material apresentaram fissuras ou mesmo o rompimento do material gerando reprovação do produto. Algumas amostras do mesmo material não romperam durante o ensaio de dobramento, o que caracterizou uma grande heterogeneidade do material com diferenças de propriedades mecânicas bastante significativas.

O fio-máquina produzido foi todo aprovado, com as características dimensionais e visuais dentro da norma, quanto às características de propriedades mecânicas a norma não estabelece um valor a ser atingido para o fio-máquina.

#### 4.2.3 Modelamento do processo

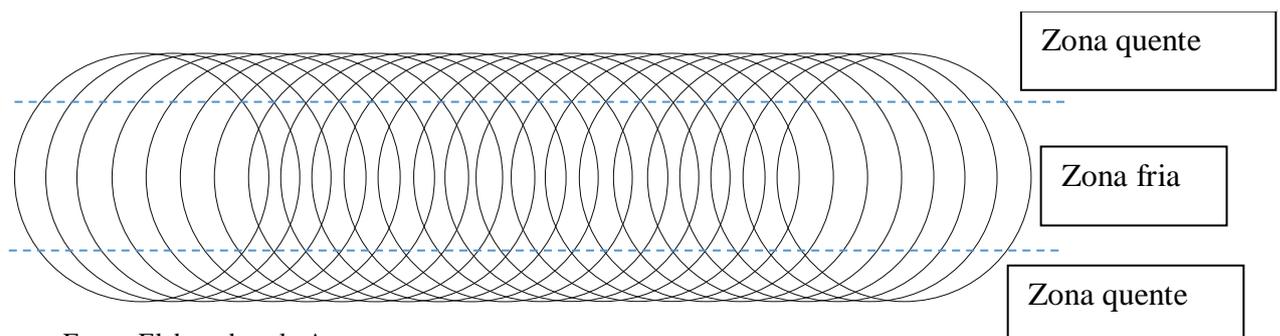
Durante a primeira campanha analisou-se as variáveis do processo, *in loco*, da esteira transportadora de espira, observou-se uma variação de resfriamento dentro do processo, onde as regiões laterais permaneciam mais incandescentes ao longo da esteira que as regiões centrais, gerando-se variações de propriedades mecânicas.

No processo, de acordo com a Figura 25, notou-se regiões com maior quantidade de massa, região lateral, do que a região central, com menor quantidade de massa.

Consequentemente a capacidade térmica, que é diretamente proporcional à quantidade de massa, também será maior na região lateral do que na região central.

Devido a essa variação da capacidade térmica na região lateral e central na esteira transportadora, essas regiões, geram zonas de resfriamento diferentes, com regiões de maior resfriamento (região central) e regiões de menor resfriamento (região lateral), conforme destacado na figura abaixo.

Figura 25 - Esquema das espiras ao longo da esteira transportadora e suas zonas.

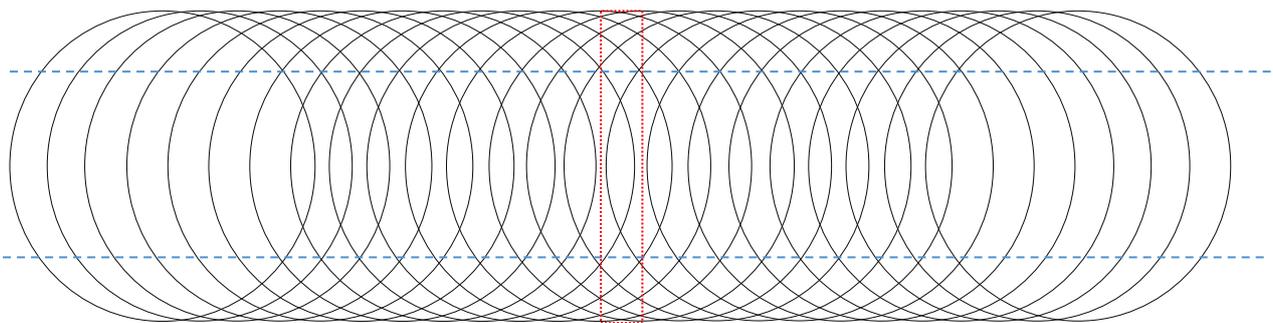


Fonte: Elaborada pelo Autor.

Assim as propriedades mecânicas variam de região para região. Logo as amostras da região central por receber maior resfriamento terão maiores propriedades mecânicas (LE e LR) do que as regiões laterais que receberam menor resfriamento gerando menores propriedades mecânicas (LE e LR).

Demonstração da variação de massa nas regiões, usando um elemento de referência de modo que representa o comportamento de todos os outros, Figura 26.

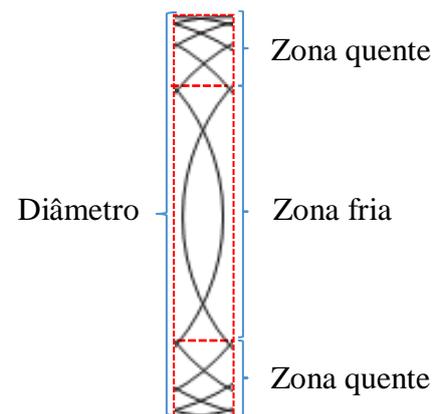
Figura 19 - Esquema das espiras com elemento de referência.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

D – Diâmetro da espira: 1000 mm;  
 $\alpha$  – ângulo da zona quente:  $102,2^\circ$ ;  
 $\beta$  – ângulo da zona fria:  $77,8^\circ$ ;

Figura 20 - Elemento de referência.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Com a ajuda da computação gráfica, fazendo uma escala do tamanho real para o esquema gráfico do computador, conseguiu-se calcular os ângulos em cada comprimento de arco de cada zona.

Fazendo a separação das zonas, Figura 32 à 33b, calculando o comprimento de vergalhão contido para cada zona e multiplicando pela massa linear (Kg/mm) do vergalhão de bitola 8,00 mm, chegou-se a massa de material contido em cada zona.

Lq – quantidade de fio na zona quente: 1782,8 mm;

$$Lq = \left( \frac{2 \cdot \alpha}{360} * 2 * \pi * R \right) * 2 = 1782,8 \text{ mm}$$

Figura 28a - Elemento de referência da zona quente.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Lf – quantidade de fio na zona fria: 1357,2 mm;

$$Lf = \left( \frac{2 \cdot \beta}{360} * 2 * \pi * R \right) = 1357,2 \text{ mm}$$

Figura 28b - Elemento de referência da zona fria.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Mq – massa na zona quente;

$$\text{Massa linear} * Lq - 395\text{g/m} * 1,7828\text{m} = 704,21\text{g}$$

Mf – massa na zona fria;

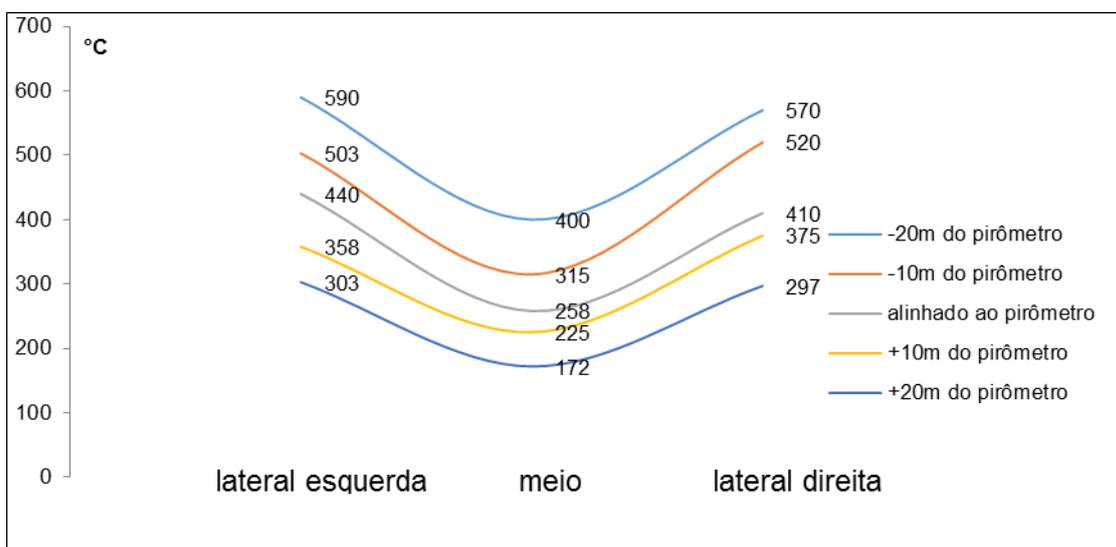
$$\text{Massa linear} * Lf - 395\text{g/m} * 1,3572\text{m} = 536,10\text{g}$$

De acordo com a fórmula  $E = m * C_p * \partial T / \partial t$ , logo nota-se uma maior quantidade de calor que, por conseguinte, resfria menos e assim gerando essas variações das propriedades mecânicas e microestruturais.

#### 4.2.4 Confirmação dos cálculos

Medições das temperaturas realizadas nas zonas ao longo do Stelmor com a utilização de pirômetro comprovaram a variação de temperatura entre as zonas de cerca de 200°C, conforme o Gráfico 1:

Gráfico 1 - Variações das temperaturas entre as zonas.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

## 5 RESULTADOS E MELHORIAS

### 5.1 Resultados obtidos durante a primeira campanha de produção e problematização

A Tabela 3 e 4 mostram os resultados obtidos durante a produção do vergalhão em rolo através de ensaios mecânicos realizados pelos técnicos do laboratório de ensaios mecânicos.

Tabela 3 - Resultados obtidos durante a produção, aço microligado 1635.

<b>Propriedades mecânicas CA50 Ø 8,00 mm, aço 1635</b>						
<b>Grau do aço</b>	<b>Corrida</b>	<b>Posição</b>	<b>L.E.(Kg/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>L.R.(Kg/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Al.(%)</b>	<b>Dobramento</b>
1635	01	-	64,7	96,2	10	Não OK
	02	Cabeça	65,5	90	-	Não OK
		Cauda	61,3	87,7	-	OK
	03	Cabeça	61,6	89,7	7,5	OK
		Cauda	64,2	90,8	8,8	OK
	04	Cabeça	58,3	87,7	11,3	Não OK
		Cauda	64,1	100,3	3,8	Não OK
	05	Cabeça	61,1	98,7	7,5	Não OK
		Cauda	60,5	95,7	7,5	Não OK

Tabela 4 - Resultados obtidos durante a produção, aço ao carbono 1030.

<b>Propriedades mecânicas CA50 Ø 8,00 mm, aço 1030</b>							
<b>Grau do aço</b>	<b>Posição</b>	<b>LE (kgf/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>LR (kgf/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>LR/LE (Kgf/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Al (%)</b>	<b>Carga Máxima (Kgf)</b>	<b>Dobramento</b>
1030	09 cabeça	42,0	-	-	-	3496,8	Ok
	09 cauda	48,4	-	-	-	3541,4	Ok
	10 cabeça	45,7	-	-	-	3539,9	Ok
	10 cauda	44,4	-	-	-	3670,4	Ok

Houve uma variação nos limite de escoamento, limite de resistência e alongamento. Nos testes de dobramento realizados durante a produção também houve amostras reprovadas e aprovadas. Isso fez com que o material fosse reprovado pela equipe técnica do laboratório de ensaios mecânicos.

O teste de dobramento realizado pela CSN Aços Longos é feito em cima da logomarca CSN 50, vergalhão CSN 50 Kgf/mm<sup>2</sup> de LE, conforme as Figuras 28 à 31, pois

essa região é descontínua das nervuras ao longo da barra e que são mais susceptíveis ao aparecimento de trincas durante a operação de dobramento.

A região da logomarca é um concentrador de tensões e conforme as Figuras abaixo houveram amostras pouco tenazes que não suportaram o dobramento enquanto que outras suportaram sem deixar trincas ou fraturar.

Figura 29 - Vergalhão fraturado na região da logomarca após ensaio de dobramento.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura 30 - vergalhão após ensaio de dobramento sem trincas na logomarca.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Região nervurada da barra apesar de possuir menos concentrador de tensão houveram amostras que fraturaram como também amostras que não fraturaram durante ensaio de dobramento.

Conforme os resultados dos ensaios mecânicos obtidos, percebe-se nitidamente a heterogeneidade quanto as propriedades mecânicas do material, Gráfico 2, gerando reprovação por não atendimento à norma NBR 7480.

Figura 3121 - Região da nervura sem trincas no ensaio de dobramento.



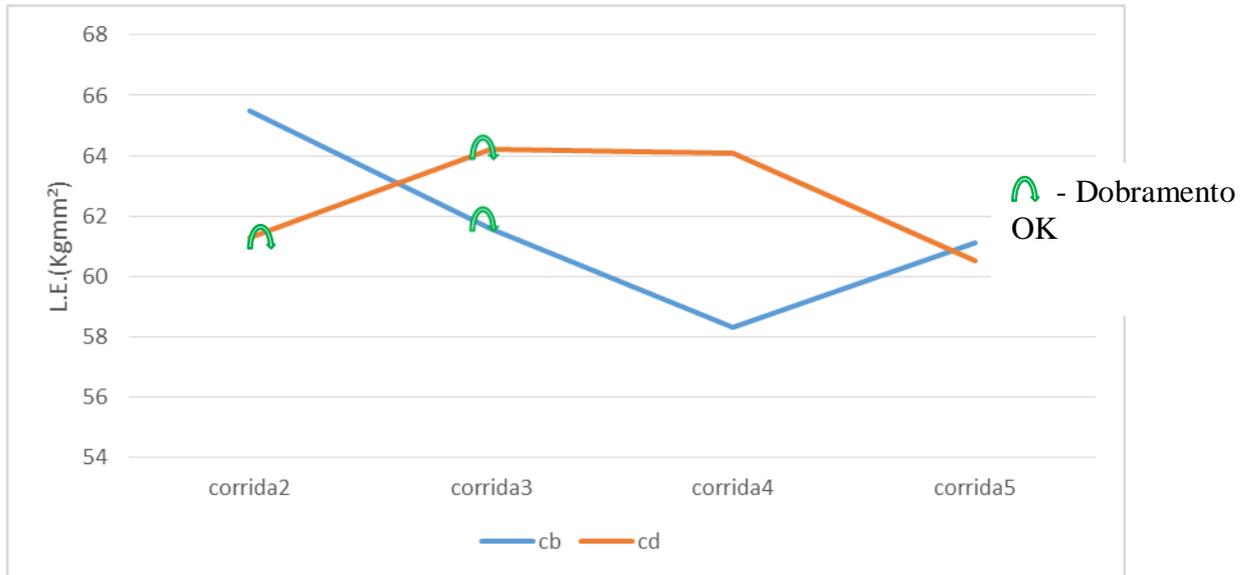
Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura 32 - Vergalhão fraturado no início do teste na região das nervuras.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Gráfico 2 - Esquema mostrando as variações das propriedades mecânicas.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com isso, gerou-se uma desconfiança dos equipamentos de ensaios mecânicos quanto à confiabilidade dos resultados, como também dos técnicos dos laboratórios. A partir desse ponto buscou-se as possíveis causas técnicas que justificassem tais heterogeneidades e posteriormente a elaboração de ações corretivas, afim de melhorar a qualidade do produto e o enquadramento da norma.

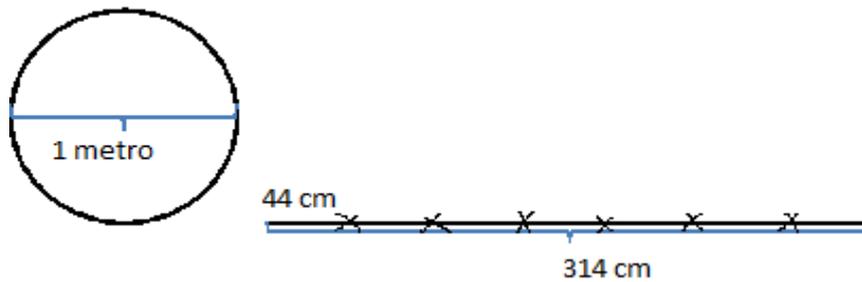
## 5.2 Confirmação dos resultados

Neste trabalho não se objetivou a análise da capacidade do processo, mas sim demonstrar as causas das heterogeneidades do produto final o qual vinha apresentando.

Realizou-se outros ensaios, afim de, mostrar que as variações eram por conta do processo em si e não por erro ou problema dos equipamentos de ensaio mecânico. Foram retiradas três espiras, uma na cabeça do rolo, uma no meio do rolo e outra na cauda do rolo de cada um dos três volumes analisados. Cada espira foi cortada e dividida em diversos pedaços de mais ou menos 400 mm, endireitadas para realização de ensaios mecânicos.

Com diâmetro da espira de mais ou menos 1000 mm, após o endireitamento ficou com 3,14 metros de comprimento para cada espira, Figura 32. Com amostras de cera de 400 mm de comprimento, gerou sete amostras por espiras totalizando 63 amostras nos três volumes.

Figura 3322 - Esquema de retirada das amostras.



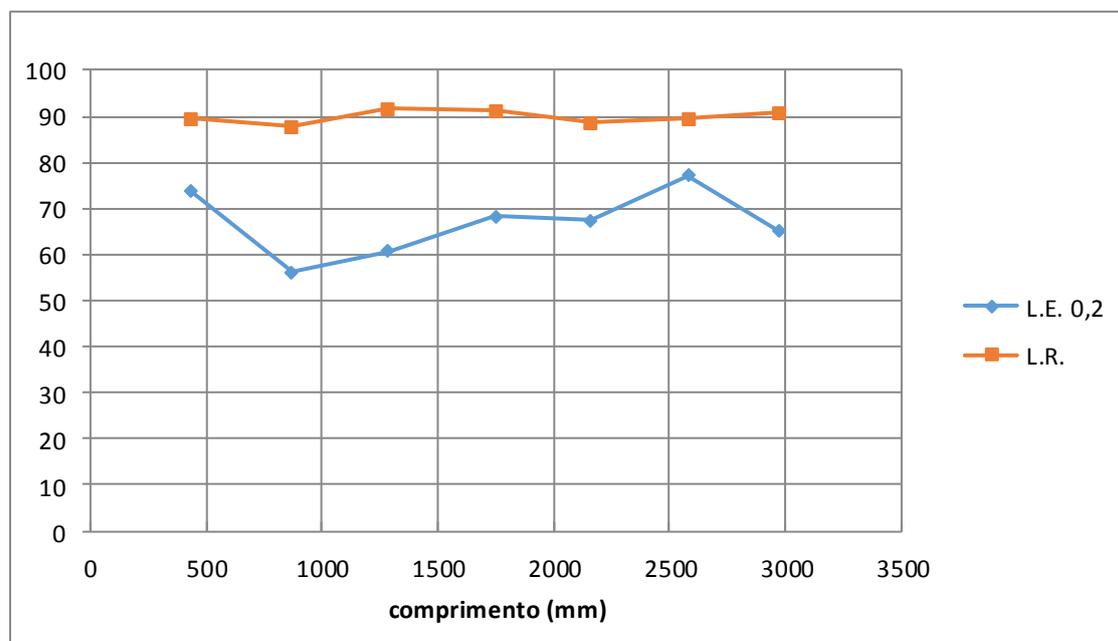
Fonte: Elaborada pelo Autor.

Confirmou-se as variações de propriedades mecânica do produto. Foram obtidas variações com mais de 20% no LE, Tabela 5, Gráfico 3.

Tabela 5 - Resultado dos ensaios mecânicos.

Posição	Amostra-tamanho (mm)	L.E. (kg/mm <sup>2</sup> )	L.R. (Kg/mm <sup>2</sup> )	AI (%)	L.R/LE	
Cauda – v2	1 – 435	73,7	89,5	-	1,214383	
	2 – 435	56,2	87,7	-	1,560498	
	3 – 415	60,6	91,7	8,9	1,513201	
	4 – 465	68,2	91,2	-	1,337243	
	5 – 410	67,3	88,6	8,4	1,316493	
	6 – 422	77,2	89,5	6,3	1,159326	
	7 – 394	65,0	90,8	7,4	1,396923	

Gráfico 3 - Resultados obtidos para esses parâmetros.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

### 5.3 Melhorias

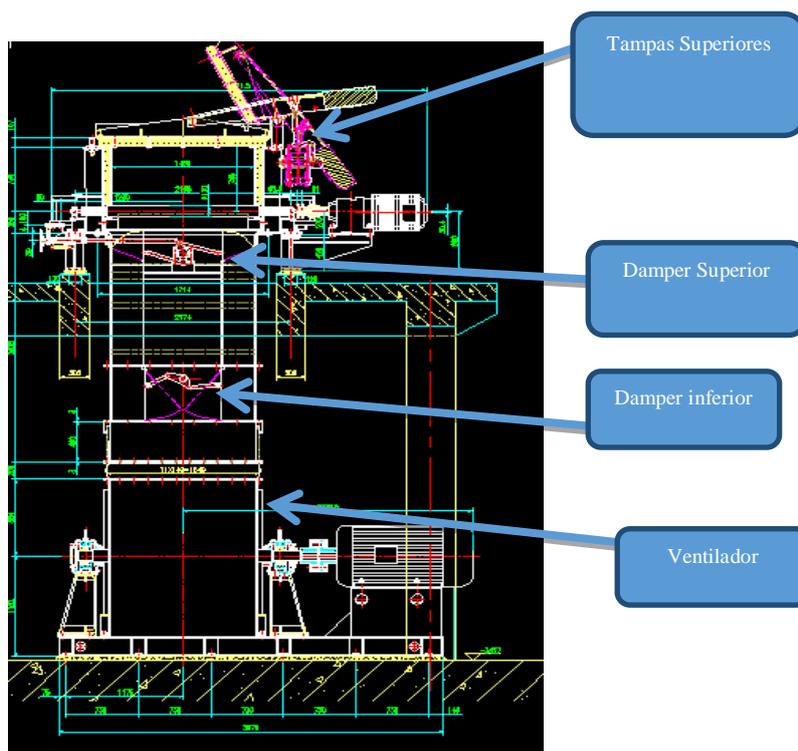
Zona fria com maior área e menor massa terá uma menor quantidade de calor e a Zona quente com maior massa terá uma maior quantidade de calor.

Devido a maior quantidade de calor nas regiões laterais, torna-se necessário uma maior ventilação nessas zonas, de modo a diminuir a diferença de temperatura entre as zonas, assim haverá um maior equilíbrio quanto à taxa de resfriamento, por conseguinte, a obtenção de propriedades mecânicas e microestruturais mais homogêneas.

Buscou-se então direcionar o fluxo de ar dos ventiladores para as regiões laterais por meio dos *dampers* do ventilador, Figura 33. Isso foi descoberto através do manual dos equipamentos e por meio de informações dos fornecedores do equipamento conforme Figura a seguir. O aumento na ventilação nas zonas laterais foi de pelo menos 30% a mais de ventilação que a zona central.

$$\frac{M_q}{M_f} = 1,31 - \text{Zona quente com 31\% a mais de massa que a zona fria.}$$

Figura 34 - Equipamento do ventilador e *dampers*.

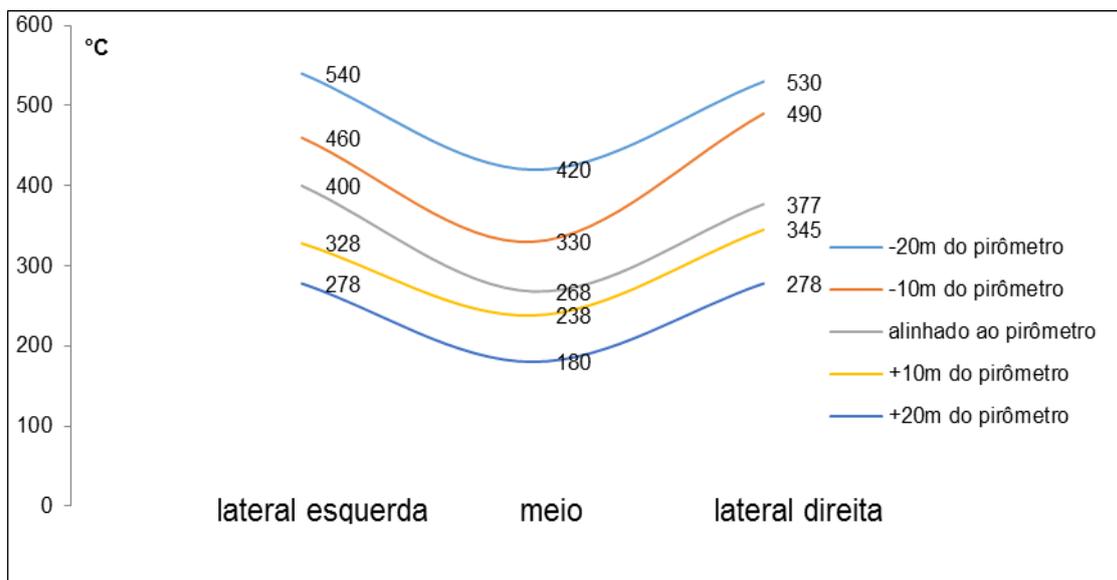


Fonte: CISDI Engineering (2007).

#### 5.4 Resultados obtidos durante a segunda campanha de produção

Para a segunda campanha de produção de vergalhão em rolo foram feitas as modificações conforme descrito acima, também foram realizadas novas medições das zonas laterais e centrais, o Gráfico 4 ilustra a nova configuração entre as zonas.

Gráfico 1 - Variações de temperatura das regiões após alteração dos *dampers*.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Observou-se uma redução na diferença de temperatura entre as zonas de 200°C para 100°C aproximadamente, conseqüentemente uma redução da variação das propriedades mecânicas entre as zonas, gerando uma maior homogeneidade do produto e por conseqüência uma redução na reprovação do produto junto à equipe da qualidade.

Os resultados da segunda campanha feitos no laboratório de ensaios mecânicos realizados durante a produção mostram uma redução significativa na variação das propriedades mecânicas, Tabela 6.

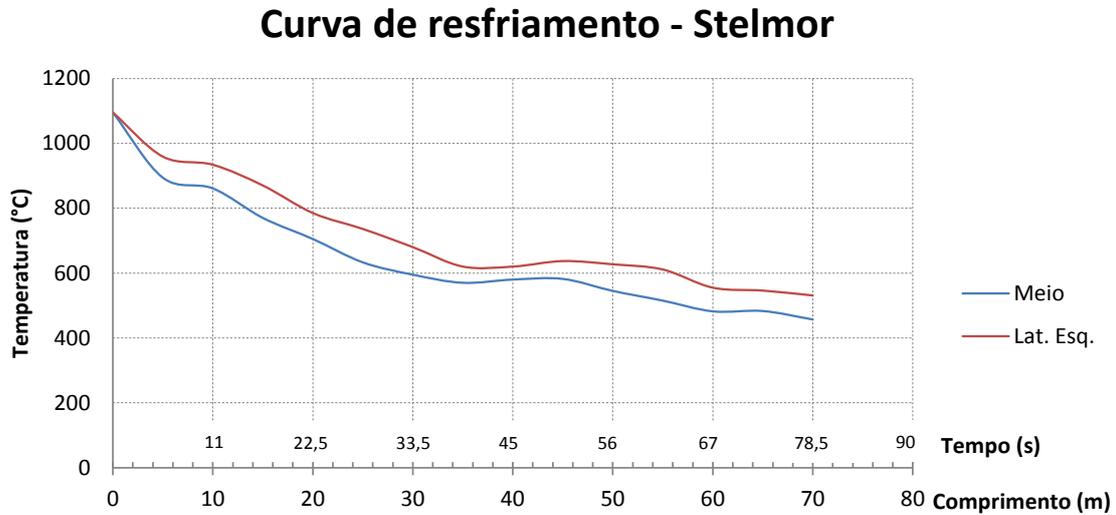
Tabela 6 - Resultados obtidos durante a produção da segunda campanha.

<b>Propriedades mecânicas – Ø 10 mm aço 1635</b>							
<b>Lote</b>	<b>Diâmetro Real (mm)</b>	<b>LE (kgf/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>LR (kgf/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>LR/LE (Kgf/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Al (%)</b>	<b>Massa linear (kg/m)</b>	<b>Dobramento</b>
<b>V 01-Cab</b>	9,74	60,3	83,3	1,38	15	0,585	OK
<b>V 01-Cau</b>	9,86	55,0	83,7	1,52	16	0,600	OK
<b>V 03-Cab</b>	9,93	56,8	79,6	1,44	18	0,607	OK
<b>V 03-Cau</b>	9,93	57,6	85,7	1,48	17,0	0,607	OK
<b>V 06-Cab</b>	9,91	56,3	81,0	1,43	15,0	0,605	OK
<b>V 06-Cau</b>	9,93	54,9	81,3	1,48	16,0	0,608	OK
<b>V 10-Cab</b>	9,93	55,3	81,3	1,47	15,0	0,608	OK
<b>V 10-Cau</b>	9,91	54,3	81,1	1,48	14,0	0,605	OK
<b>V 19-Cab</b>	9,91	55,1	82,0	1,48	16,0	0,605	OK
<b>V 19-cau</b>	9,95	53,2	81,2	1,52	17,0	0,611	OK

Assim um maior controle e conhecimento do processo com ganhos significativos de qualidade no produto estão sendo alcançados.

Para maior controle e conhecimento do processo foram também desenhadas as curvas de resfriamento ao longo da esteira transportadora através de pirômetro, afim de, ter um maior conhecimento em relação à taxa de resfriamento, temperatura de mudança de fase e o tratamento térmico sofrido pelas espiras ao longo da esteira transportadora de espiras, conforme o Gráfico 5.

Gráfico 2 - Curva de resfriamento ao longo da esteira com as temperaturas e tempos.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

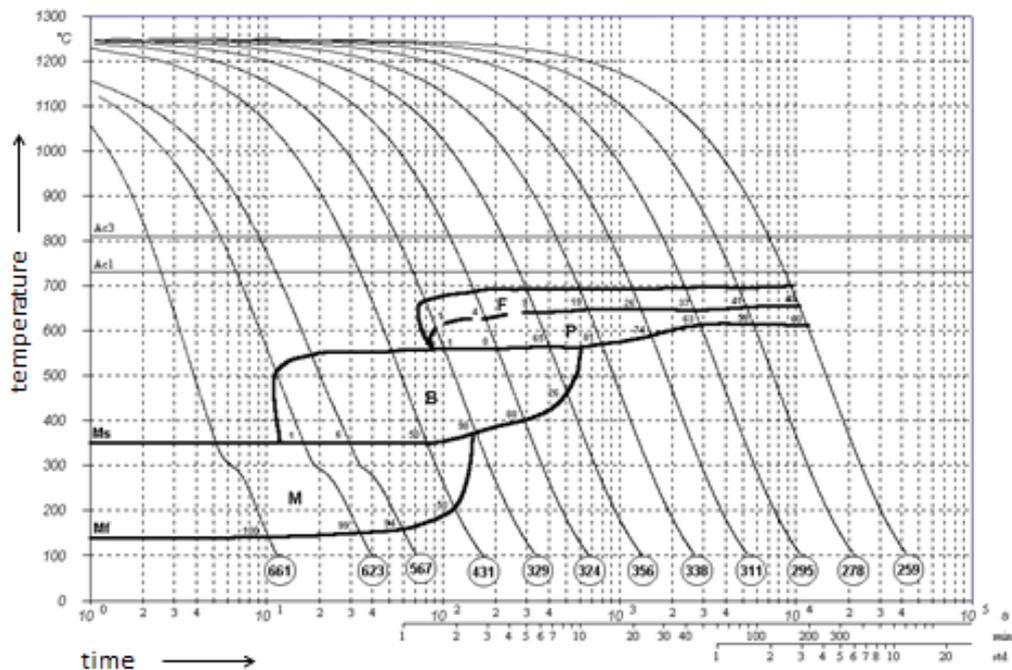
Na primeira campanha de produção do vergalhão em rolo com a utilização do aço 1635, microligado ao Vanádio, notou-se uma forte tendência à formação de estrutura bainita, mesmo com baixas taxas de resfriamento, resfriamento ao ar.

Então, entrou-se em contato com membros da Vanitec (comitê internacional para o desenvolvimento do vanádio), órgão responsável pela elaboração de pesquisas em aços microligados ao vanádio, para o fornecimento e apoio na elaboração da curva CCT do Aço 1635. Os mesmos nos forneceram prontamente uma curva semelhante ao Aço utilizado pela CSN Aço Longos, 1635.

Conforme a Figura 34 da curva CCT fornecida, nota-se realmente o quanto ele realmente é temperável e sensível ao resfriamento, com o campo da Ferrita e Perlita muito afastados, enquanto os campos da Martensita e Bainita são muito próximos e grandes.

Notou-se também que as caixas de água anteriores ao formador de espiras são o principal meio de controle de propriedades mecânicas e microestruturais. Sua função é de equalização, homogeneização da temperatura ao longo do seu comprimento e a principal, controlar a temperatura de entrada na esteira transportadora. Assim quanto menor a temperatura de entrada na esteira mais fácil de se obter uma microestrutura bainítica e quanto maior a temperatura mais fácil de se obter ferrita e perlita.

Figura 35 - Curva CCT e taxas de resfriamento para o aço 1635.



Fonte: VANITEC (1985).

Com essas ferramentas elaboradas traz um maior conhecimento e controle do processo, uma vez que assim, pode-se atingir as propriedades mecânicas e microestruturas desejadas usando determinadas taxas de resfriamento, por conseguinte, o enquadramento dentro da norma NBR 7480, que trata de aços para armadura de construção civil, usando determinadas taxas de resfriamento.

Essas ferramentas também são muito importantes para uma boa parametrização da abertura dos ventiladores, seguindo o seguinte raciocínio dos extremos: com altas porcentagens dos ventiladores, pode-se atingir estruturas 100% bainíticas, ou então, sem nenhuma ventilação pode-se atingir estruturas ferríticas nos contornos de grão arredondando a estrutura perlítica dentro dos grãos.

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, buscou-se a elaboração de ferramentas para conseguir um maior conhecimento e controle do processo, uma vez que assim, pode-se atingir as microestruturas desejadas e conseqüentemente as propriedades mecânicas resultantes pelo uso de determinadas taxas de resfriamento. Essas ferramentas também são muito importantes para

uma boa parametrização da abertura dos ventiladores, pode-se atingir estruturas 100% bainíticas, com alta ventilação, ou então, sem nenhuma ventilação pode-se atingir estrutura perlítica arrodada de ferrita.

As causas das heterogeneidades do vergalhão em rolo foram demonstradas que estavam ligadas a característica do processo em si, que por sua vez gerava um resfriamento diferenciado entre as regiões. A diferença de temperatura entre as zonas, após a modificação do fluxo de ar em 31% a mais para as regiões laterais, conseguiu-se uma redução de 200°C para menos de 100 °C, essa redução trouxe uma homogeneidade maior das propriedades mecânicas, reduzindo-se as perdas por reprovação do material. Finalmente, o enquadramento do produto vergalhão em rolo CA50 Ø 8,00 mm dentro da norma NBR 7480, que trata de aços para armadura de construção civil.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Com os dados medidos das temperaturas ao longo da esteira transportadora elaborar um modelo para a transferência de calor das espiras durante o resfriamento ao ar forçado.
- Analisar possíveis modificações da esteira transportadora com o objetivo de aumentar a taxa de resfriamento e relacioná-las com as propriedades mecânicas obtidas.
- Estudar mais detalhadamente a influência dos parâmetro de resfriamento nas caixas de água, assim como a influência da temperatura das espiras na entrada da esteira.
- Estudar mais detalhadamente a influência dos parâmetro da laminação a quente como temperatura de laminação, taxa de deformação, velocidade de laminação na evolução da microestrutura para a otimização do processo.

## REFERÊNCIAS

- ASKELAND, Donald R. **The science and engineering of materials**. Pradeep P. Phule, 6th Ed, 2010.
- CAMPBELL, P.C., Application of microstructural engineering to the controlled cooling of steel wire rod, A Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, The University of British Columbia, 1989.
- BHADESHIA, H.K.D.H., Honeycombe, R.W.K., **Steels: Microstructure and Properties**, third ed. Butterworth-Heinemann, London; 2006.
- CSN – Companhia Siderúrgica Nacional, **Módulos Técnico de Treinamento em Aços Longos**, 2008.
- CISDI ENGINEERING, **Technical Proposal For Wire Rod & Bar Mill CSN-UPV**, May 2007.
- HANADA, Y., UENO, K., NODA, A., KONDOH, H., SAKAMOTO T. and MINE K., **New Type Stelmor Equipamento of Wire Rod and Bar Mill, Kawasaki Steel Technical Report**, (15), p. 50-57. (1986).
- RIZZO, E. M. S. **Processos de Laminação de Produtos Longos de Aço**. São Paulo, ABM, 2007.
- CAMPBELL, P.C., HAWBOLT, E.B. and BRIMACOMBE, J.K., **Microstructural Engineering Applied to the Controlled Cooling of Steel Wire Rod- Part III**. Experimental Design and Heat Transfer, Met. Trans., 22A, pp. 2769-2778, (1991).
- VANADIUM INTERNATIONAL TECHNICAL COMMITTEE, **Transformation Diagrams for Vanadium Steels**, Vanitec, (1985).
- MORALEZ, R.D.; LÓPEZ A.G. and OLIVARES I.M. **Heat Transfer Analysis during Water Spray Cooling of Steel Rods**. ISIJ International México, 1989.
- ALVES FILHO, Cláudio H. M. **Análise da influência da taxa de resfriamento no gradiente microestrutural de barras laminadas a quente tratadas termicamente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Centro de Ciências Exatas de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2004.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. **Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará**. Fortaleza, 2013.
- GORNI, Antônio A. **Steel forming and heat treating handbook**, 2007.
- MODENESI, Paulo J. **Soldabilidade dos aços transformáveis**, 2004. 71f. Trabalho acadêmico – Departamento de engenharia metalúrgica e de materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Departamento de engenharia metalúrgica e de materiais. Universidade Federal de Minas Gerais Belo Horizonte, 2006.

REID CONSTRUCTION SYSTEMS, **Reinforcing features and benefits**, New Zealand, 2005.

SILVA, A. L.V. da Costa; MEI, Paulo R. **Aços e ligas especiais**, São Paulo, 1ª Ed. Edgar Blücher, 2006.

VANITEC - Vanadium International Technical committee, **Transformation Diagrams for Vanadium Steels**, Vanitec, (1985).

VLACK, V. Lawrence H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. Rio de Janeiro, Elsevier, 1984.