

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MUDANÇA DE CONFIGURAÇÃO DO MOLDE  
SOBRE A QUALIDADE DO TARUGO EM LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE  
AÇOS**

**VITOR HUGO NOGUEIRA DA SILVA**  
Engenheiro de Produção Mecânica

Dissertação para obtenção do Título de  
*Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia*

Porto Alegre

2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MUDANÇA DE CONFIGURAÇÃO DO MOLDE  
SOBRE A QUALIDADE DO TARUGO EM LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE  
AÇOS**

VITOR HUGO NOGUEIRA DA SILVA  
Engenheiro de Produção Mecânica

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia.

Porto Alegre

2012

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Alvares Spim Junior

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Rocha da Silva, UFRGS

Dr. Eng. Carlos Raimundo Frick Ferreira, UFRGS

Dr. Luis Augusto Colembergue Klujszo, Gerdau Aços Especiais

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGE3M

Porto Alegre, Março de 2012.

Dedico este trabalho a minha mãe Liege, meu pai  
Valdemar e minha noiva Bruna, fontes de  
inspiração fundamentais ao longo deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe, pelo carinho e apoio recebido ao longo de minha vida e por sempre se dedicar ao seu limite para que eu pudesse ter uma educação adequada;

A meu pai pelo exemplo de caráter ético e honroso;

Ao Professor Dr. Jaime Alvares Spim Júnior, pela orientação prestada;

Aos colegas de aciaria, pelo apoio e amizade;

Ao Eng<sup>o</sup>. Sandro da Silva Machado pelo estímulo, oportunidades, confiança, amizade e compreensão;

A equipe de lingotamento da Gerdau Piratini que estiveram envolvidos direta ou indiretamente neste trabalho;

A minha noiva Bruna, pelo amor e compreensão, nos momentos difíceis e de ausência;

À Gerdau Piratini, pela oportunidade de aprendizado e desenvolvimento profissional;

E a Deus por me dar força, saúde e estar sempre presente na minha família, fonte inesgotável de estímulo, carinho, ajuda e compreensão em todos os momentos.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	VIII
LISTA DE TABELAS .....	X
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....	XI
RESUMO.....	XII
ABSTRACT.. .....	XIII
1. INTRODUÇÃO.....	2
2. OBJETIVOS .....	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
3.1 Processo de Lingotamento Contínuo.....	6
3.1.1 Solidificação de Aços no Lingotamento Contínuo.....	8
3.1.2 Molde no Lingotamento Contínuo .....	9
3.1.2.1 Raio de Canto nos Moldes do Lingotamento Contínuo .....	10
3.1.2.2 Fluxo de Calor nos Moldes de Lingotamento Contínuo.....	11
3.1.2.3 Geometria dos Moldes.....	13
3.1.3 Oscilação do Molde .....	15
3.1.4 Formação Macroestrutural.....	17
3.1.5 Qualidade do Tarugo Produzido em Lingotamento Contínuo.....	19
3.1.6 Variáveis de Processo que Afetam a Qualidade do Tarugo .....	24
3.1.7 Velocidade de Lingotamento.....	25
3.2 Composição Química .....	26
3.3 Temperatura de Lingotamento .....	28
3.4 Rolos de Pé.....	29
3.5 Refrigeração Secundária.....	30
3.6 Pó Lubrificante .....	31
3.7 Agitador Eletromagnético .....	33

4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
4.1	Fluxo do Processo na Aciaria .....	35
4.2	Lingotamento Contínuo .....	35
4.3	Equipamentos.....	37
4.4	Os Moldes .....	37
4.4.1	A Nova Configuração de Molde.....	37
4.5	Planejamento dos Testes .....	38
4.5.1	Avaliação da Simetria dos Veios.....	38
4.5.2	Processo de Monitoramento para Avaliação dos Veios .....	39
4.5.3	Resfriamento Secundário.....	41
4.5.4	Qualidades .....	42
4.5.5	Amostragem .....	43
4.5.6	Cuidados com a Rastreabilidade e com Resultados fora da Aciaria .....	43
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	45
5.1	Observações gerais .....	45
5.1.1	Extração de Calor no Molde .....	45
5.1.2	Temperatura na Superfície do Tarugo .....	45
5.1.3	Agitação Eletromagnética.....	47
5.1.4	Defeitos de Forma nos Tarugos .....	48
5.1.5	Análise de Defeitos Superficiais em Tarugos.....	49
5.1.6	Análise de Defeitos Superficiais em Barras .....	50
5.1.7	Análise de Defeitos Internos em Barras e Tarugos .....	51
6.	CONCLUSÕES .....	52
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	53
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	54

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Macro-fluxo do processo de produção da GSB-CHA (Fonte: site Gerdau Aços Especiais, 2011).....	3
Figura 3.1. Representação esquemática da fabricação de tarugos via lingotamento contínuo em uma aciaria elétrica semi-integrada.(Adaptado de <a href="http://www.gerdau.com.br">www.gerdau.com.br</a> ). ....	7
Figura 3.2. Esquema da máquina de lingotamento contínuo (Adaptado de Santos, 2006). ....	8
Figura 3.3. Desenho esquemático dos componentes do molde (Adaptado de Barcellos, 2007), e foto da nova configuração de molde no lingotamento contínuo.....	10
Figura 3.4. Seção transversal de uma pele solidificada comparando a diferença entre um raio de canto de a) 6mm e b) 16mm .....	11
Figura 3.5. Desenho esquemático mostrando as diferentes zonas existentes entre a superfície da parede do molde e a pela solidificada (Taconi, 2007) .....	12
Figura 3.6. Analogia de sistema elétrico para fluxo de calor entre superfície do aço e a água de resfriamento, simbolizados por resistências (Schwerdtfegf, 2003). ....	12
Figura 3.7. Esquema gráfico ilustrando o comportamento da temperatura do molde entre uma geometria linear e uma geometria multitaper (GRUNDY,2011). ....	14
Figura 3.8. Índice de trincas sub-superficiais em função da conicidade do molde, SAMARASEKERA et al. (1984). ....	15
Figura 3.9. Ilustra o tempo de estripagem negativa aumentando proporcionalmente ao curso “Cm”, (Barcelos, 2011). ....	16
Figura 3.10. Mostra a diferença nas marcas de oscilação com a variação da frequência (Barcelos, 2011). ....	16
Figura 3.11. Mostra a fórmula para cálculo de estripagem negativa (Barcelos, 2011). ....	17
Figura 3.12. Ilustração das zonas que compõem a macroestrutura da seção transversal do tarugo. (Adaptado Barcelos, 2011).....	18
Figura 3.13. Formação da estrutura de solidificação e diferentes orientações dos contornos de grão primário. (Adaptado Pierer, 2010).....	19
Figura 3.14. Defeitos típicos em lingotamento contínuo. ....	20
Figura 3.15. Trincas Longitudinais de Canto (adaptado de NOGUEIRA, 2006) .....	20
Figura 3.16. Trinca Transversal de Canto (adaptado de NOGUEIRA, 2006).....	21
Figura 3.17. Trinca Longitudinal de Face (adaptado de NOGUEIRA, 2006).....	22
Figura 3.18. Trinca Transversal de Face (adaptado de NOGUEIRA, 2006).....	23



Figura 3.19. Representação de trincas de tensão (Trinca Off-Corner - TOC) na Seção transversal do tarugo (Adaptado de NOGUEIRA, 2006).....	24
Figura 3.20. Perfil do fluxo de calor no molde para velocidades altas (Chow, 2002) .....	26
Figura 3.21. Efeito do teor de carbono no aço, em peso, sobre a transferência de calor no ....	27
molde (Chow, 2002).....	27
Figura 3.22. Influência da temperatura de lingotamento na estrutura do tarugo (Lait et al.,1982).....	28
Figura 3.23. Efeito do rolo de pé sobre a formação de trinca longitudinal de canto.....	30
(Brimacombe Continuous Casting Course, 2003).....	30
Figura 3.24. Desenho esquemático da seção transversal do tarugo ilustrando a divisão entre a zona de refrigeração primária e secundária (Adaptado de Barcelos, 2011) .....	30
Figura 3.25. Desenho esquemático mostrando as camadas formadas dentro do molde após a adição de pó lubrificante (Adaptado de apostila treinamento interno Gerdau Charqueadas, 2011).....	33
Figura 4.1. Fluxo de produção dentro da aciaria da Gerdau - Charqueadas.....	35
Figura 4.2. Detalhamento da região de interesse do lingotamento contínuo.....	36
Figura 4.2. Figura comparando os dois tipos de moldes e um referencial de montagem de padrão utilizado atualmente.....	38
Figura 4.3. Desenho esquemático mostrando o posicionamento dos sensores acelerômetros no molde.....	39
Figura 4.4. Figura da primeira zona da refrigeração secundária, destacando os bicos extras para refrigeração dos cantos do tarugo. ....	41
Figura 5.1. Figura comparando a variação da temperatura da pele do tarugo lingotado com o molde atual e com a nova configuração (teste). ....	46
Figura 5.2. Figura comparando as temperaturas nos cantos do tarugo lingotado com o molde atual e com a nova configuração (teste). ....	47
Figura 5.3. O gráfico mostra as diferenças dos valores de campo magnético para a configuração teste e normal.....	47
Figura 5.4. Figuras de amostras de tarugos, mostrando o comparativo entre os testes realizados	
.....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Efeito dos óxidos presentes no pó lubrificante e sua relação com viscosidade e temperatura de cristalização (Adaptado de Mills, 1995).....	32
Tabela 4.1. Parâmetros de classificação da trajetória do molde.....	40
Tabela 4.2. Parâmetros de classificação do nível de ruído do molde.....	40
Tabela 4.3. Classificação dos parâmetros metalúrgicos do molde.....	40
Tabela 4.4. Configuração da refrigeração secundária, dividida em zona 1 e zona 2 .....	42
Tabela 4.5. Estrutura dos testes com as características das qualidades testadas. ....	42
Tabela 4.6. Composição química das qualidades do testes.....	43
Tabela 5.1. Medições realizadas para análise de Romboidade.....	48
Tabela 5.2. Programação das inspeções e seus resultados .....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

*CCC* – *Cúbica de Corpo Centrado*;  
*CFC* – *Cúbica de Face Centrada*;  
*KPa* – *Kilo Pascal*;  
*LC* – *lingotamento contínuo*  
*gap* - *espaço interfacial separando o metal e o molde*  
*S [mm]* – *Curso de deslocamento do molde*  
*Cm* - *Curso de deslocamento do molde*  
*cpm* – *Ciclos por minuto*  
*f [min-1]* – *Frequência de oscilação do molde*  
*tN[s]* – *Tempo de estripamento negativo*  
*Vling* – *Velocidade de lingotamento*  
*TOC* – *Trincas de canto*  
*KW/m<sup>2</sup>* - *Kilowatt por metro quadrado*  
 $\delta$  - *ferro delta*  
 $\gamma$  - *ferro gama*  
*%C* – *Percentual de carbono*  
*EMS* – *Agitador eletro-magnético*  
*H* - *intensidade de campo magnético*  
*B* - *densidade de fluxo magnético*  
 $\mu$  - *Permeabilidade magnética*  
*t* – *Toneladas*  
*SEN* – *Válvula submersa de entrada*  
*l/min* – *Litros por minuto*  
*Gauss* – *Unidade de medida de campo magnético*  
*SAC*: *Tarugo sem acabamento*  
*ECA*: *Tarugo com esmerilhamento de canto*  
*ETO*: *Tarugo com esmerilhamento total*

## RESUMO

As empresas que fabricam aços especiais necessitam superar desafios para se manterem competitivas e lucrativas no mercado, já que o aço passou a ser considerado um “*commodity*”. Sendo assim, a busca por novas tecnologias e conceitos, para seguir no mesmo ritmo das demandas oriundas da grande competitividade, indiscutivelmente se tornou extremamente necessária para que as empresas consigam manter seus preços em patamares competitivos e diferenciados.

Este trabalho busca a avaliação de novos conceitos de configurações de molde no lingotamento contínuo de uma aciaria elétrica, verificando quais suas vantagens e desvantagens em relação à qualidade do tarugo produzido via lingotamento contínuo, levando em consideração o seu processo produtivo e o resultado final para o negócio. Sendo assim, realizaram-se testes com nova configuração de molde para a seção quadrada de 240mm, devido a característica de tarugos oriundos desta seção sofrerem maiores tensões durante o processo de endireitamento em uma máquina de lingotamento com 9m de raio. Os testes foram realizados procurando eliminar o máximo de variáveis de ruídos que pudessem influenciar nos resultados a serem avaliados, assim, fez-se a montagem e instalação do novo conceito de configuração de molde em um veio, para que, posteriormente, fosse possível fazer comparações com os tarugos produzidos nos outros dois veios. Um total de quatro corridas foram lingotadas separadamente, onde foi possível observar o aumento da temperatura de superfície do canto durante o processo de endireitamento, em virtude do novo conceito apresentar um maior raio de canto, assim como uma significativa melhora em defeitos relacionados a trincas superficiais e estrutura de solidificação.

## **ABSTRACT**

Companies that produce special steels need to overcome challenges to remain competitive and profitable in the market, since the steel has been considered a "commodity". Thus, the search for new technologies and new concepts, to follow right along with demands coming from the highly competitive, arguably has become extremely necessary for companies to be able to keep prices in levels competitive and differentiated. This work evaluates new concepts of moulds for the continuous casting of an electric melt shop, checking their advantages and disadvantages in relation to the quality of billet and to the productive process and, consequently, the business the company. Therefore, some tests were performed with the new configuration of mould for the 240mm square section, because billets from this section suffer greater stress during the straightening process in a casting machine with 9m radius. The tests were performed seeking to eliminate as many noise variables that could influence the results as possible. Then, became the assembly and installation of the new concept of setting up a mould came from, so that, later, it was possible to make comparisons with the billets produced in the other two strands. A total of four individual heats were casting, where we observed an increase in surface temperature of the corner during the straightening process, since the new concept have an increased corner radius, as well as reduce defects related to surface cracks and structure solidification were also noticed.

## 1. INTRODUÇÃO

O mercado mundial de aços vem se desenvolvendo continuamente. Isso se deve a uma sociedade cada vez mais preocupada com a sustentabilidade, na qual o aço, com seu alto potencial de reciclagem e robustez, passou a ser visto como uma das matérias-primas mais adequadas quando se fala em desenvolvimento sustentável. Dentro de um cenário mundial, competitivo e de acirrada busca pela qualidade, as empresas do ramo de siderurgia procuram diferentes alternativas nos diferentes segmentos em que atuam.

Em geral, empresas cada vez mais buscam melhorias em seus produtos e processos com o intuito de conseguir seus mercados com produtos de qualidade e preços competitivos. A Gerdau Aços Especiais Charqueadas está inserida neste contexto e, perante a uma política de melhoria contínua, visa assegurar a qualidade a seus clientes oferecendo produtos com níveis de preços e de qualidade dentro dos padrões de uma empresa de classe mundial.

Uma das variáveis determinantes na busca por resultados satisfatórios de qualidade na área de lingotamento contínuo é o tipo de molde utilizado. Além de dar forma ao veio e suportá-lo nos estágios iniciais da solidificação, a função mais importante do molde, de acordo com Samarasekera et al. (1982), é a de remover o calor do aço para permitir a formação de uma pele solidificada com espessura suficiente para suportar o metal líquido no interior do veio. É também importante que o molde seja capaz de remover o calor uniformemente para evitar a formação de regiões menos espessas localizadas na pele, que podem romper, causar defeitos internos ou trincas superficiais.

Na linha de produção mais empregada nessa usina, o tarugo é produzido na aciaria através de lingotamento contínuo e então é processado através da laminação a quente para a produção de barras laminadas que posteriormente podem sofrer diferentes acabamentos e tratamentos.

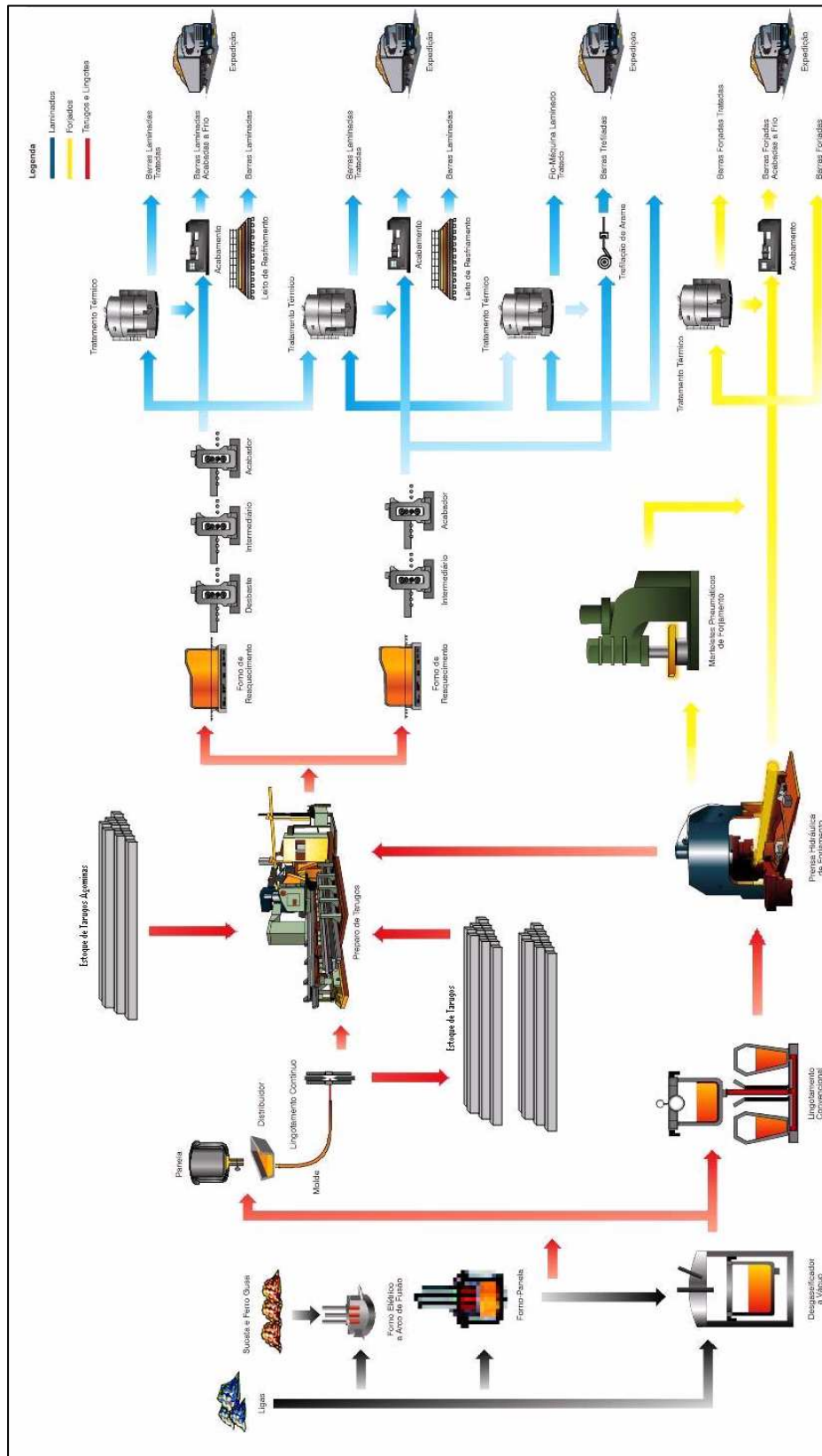


Figura 1.1. Macro-fluxo do processo de produção da GSB-CHA (Fonte: site Gerdau Aços Especiais, 2011).

Para garantia da qualidade das barras laminadas, independentemente de sua secção, bitola ou rota de produção, a qualidade interna e superficial dos tarugos produzido na aciaria, pela rota do processo de lingotamento contínuo, é de importância fundamental.

Para atender e melhorar as principais características que são necessárias para que os moldes atendam as necessidades e venham a contribuir para que se obtenha tarugos de qualidade adequada, diferentes tecnologias vem sendo desenvolvidas por vários fornecedores ao longo dos tempos.

Este trabalho abordará os efeitos da mudança de configurações do molde de lingotamento contínuo na seção quadrada de 240mm e a influência desta mudança na qualidade dos tarugos produzidos.



## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é analisar o efeito das configurações do molde sobre comportamento em relação a defeitos superficiais e internos nos tarugos da aciaria.

Os objetivos específicos a que se propõe este trabalho são:

- Avaliar as diferenças em índices de defeitos superficiais e internos;
- Avaliar as diferenças da extração de calor, pela formação das diferentes zonas de solidificação;
- Análise de novas geometrias de molde;
- Análise da otimização do processo;
- Análise do índice de refugos em relação ao índice em defeitos formados.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Processo de Lingotamento Contínuo**

Na aciaria elétrica, o cestão é carregado com uma composição de sucata metálica, ligas e gusa, de acordo com o tipo de aço a ser produzido, sendo então transportado ao forno que possui capacidade para fundir 65 toneladas a cada corrida.

O aço fundido é vazado numa panela da mesma capacidade e conduzido a estação de refino secundário, sendo aquecido para que as ligas sejam homogeneizadas e a temperatura ideal de lingotamento obtida. Após, a panela é transportada para um sistema de desgaseificação à vácuo, onde se objetiva a retirada dos gases prejudiciais a qualidade do aço e também o ajuste final de composição química.

A panela é então levada ao lingotamento contínuo, onde é colocada em uma torre giratória que posiciona a mesma sobre o distribuidor. Lá, o aço líquido é vazado no distribuidor que reparte o aço líquido em três veios de lingotamento que o solidificam de forma contínua.

Na figura 3.1 pode-se ver o esquema do fluxo de produção na aciaria até a chegada ao lingotamento contínuo.

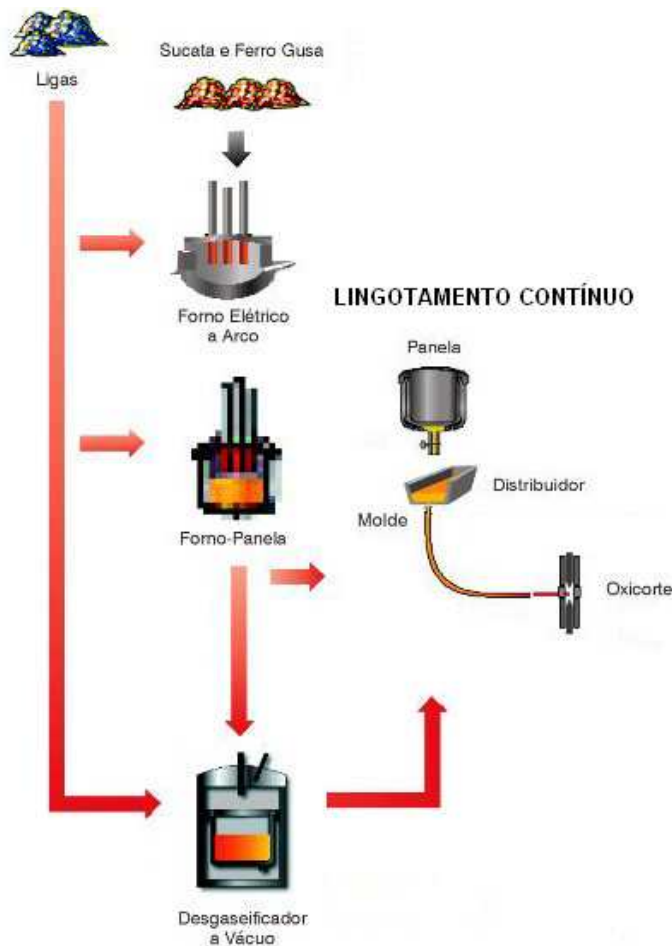


Figura 3.1. Representação esquemática da fabricação de tarugos via lingotamento contínuo em uma aciaria elétrica semi-integrada.(Adaptado de [www.gerdau.com.br](http://www.gerdau.com.br)).

O lingotamento contínuo tem como função principal a transformação do aço da sua forma líquida para a sólida de uma forma contínua. Trata-se do modo mais eficiente de solidificar um grande volume de metal em formas mais simples para posterior laminação (Thomas, 2001).

O aço é solidificado através de perda de temperatura basicamente por meio da extração de calor em três etapas bastante distintas: a primeira é efetuada no molde de cobre com refrigeração a água, no chamado resfriamento primário, na segunda etapa a extração de calor é realizada por sprays que borrifam água ou mistura de água e ar sobre a superfície do tarugo, no chamado resfriamento secundário, e a terceira e última etapa de resfriamento realiza-se diretamente pelo ar na chamada região de radiação livre. (Gschwenter, 2009)

A figura 3.2, mostra um desenho esquemático do processo de lingotamento contínuo de tarugos, destacando as três etapas acima citadas.

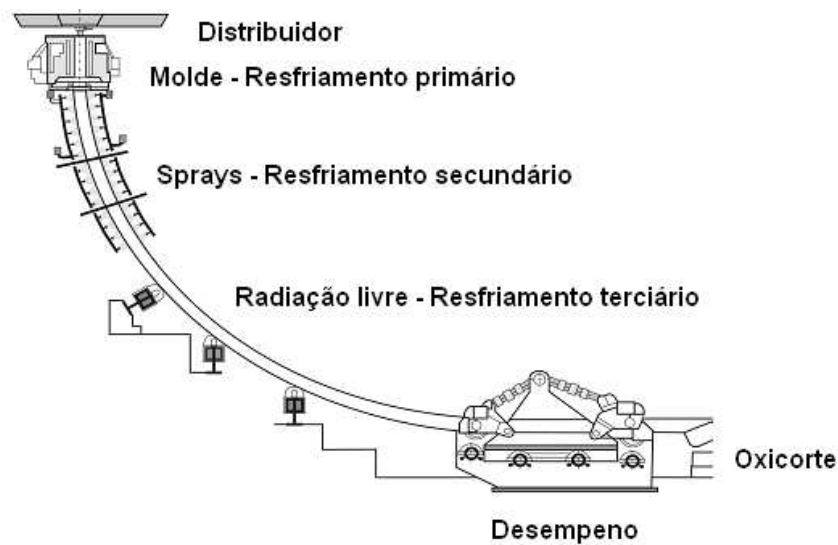


Figura 3.2. Esquema da máquina de lingotamento contínuo (Adaptado de Santos, 2006).

### 3.1.1 Solidificação de Aços no Lingotamento Contínuo

A solidificação dos aços via lingotamento contínuo é fundamentalmente baseada na extração de calor que, pode ser dividida em três etapas que objetivam assegurar o fluxo térmico envolvido no processo:

- Molde ou resfriamento primário: dentro do molde o aço líquido sofre a primeira etapa de resfriamento e solidificação. O objetivo desta etapa é o de assegurar a formação de uma casca sólida com uma espessura tal que permita suportar a pressão metalostática e as tensões mecânica e térmica no processo de modo a evitar rupturas ou trincas. A maioria das trincas geradas no lingotamento contínuo, sejam trincas superficiais ou internas, se formam no molde ou logo abaixo dele, bem como o inclusões que possam a vir se incorporar a frente de solidificação, sejam elas endógenas ou exógenas.
- Resfriamento Secundário ou região de sprays: após a saída do molde, a solidificação é continuada na segunda etapa de retirada de calor. O resfriamento é realizado principalmente por sprays de água, dispostos no início do raio da máquina de lingotamento. Essa região objetiva a solidificação final do poço líquido no interior do tarugo, antes da região de corte. Dentro do projeto do sistema de resfriamento por sprays deve-se buscar um resfriamento uniforme, de modo a evitar trincas sem perder a manutenção de uma velocidade de solidificação relativamente elevada, já que o

objetivo é completar a solidificação no menor tempo e da forma mais eficiente possível. Um dos pontos críticos ao longo do resfriamento secundário é o reaquecimento da superfície do tarugo devido à redução da taxa de extração de calor, que pode ocorrer quando o tarugo passa do molde à etapa de resfriamento por sprays, ou desta para a etapa seguinte de radiação livre, ou ainda entre os diferentes conjuntos de sprays. Este reaquecimento, dependendo do seu grau, provoca tensões térmicas que, dependendo de suas magnitudes, podem levar à formação de trincas. A temperatura da superfície do tarugo diminui gradativamente ao longo do seu deslocamento pelo raio da máquina, sendo que, com o aumento da casca solidificada, a resistência do fluxo de calor do aço líquido para o exterior também aumenta, pois o aço sólido não é um bom condutor.

- Resfriamento terciário/convecção natural: esta etapa de resfriamento é intermediária entre a região de sprays e a região de endireitamento (extratora) e corte dos tarugos. A transferência de calor da superfície do tarugo para o meio é dada por radiação e convecção com o ambiente e por condução na região de contato com os rolos guias, rolos extratores e rolos endireitadores.

### 3.1.2 Molde no Lingotamento Contínuo

O molde é peça fundamental no processo de lingotamento contínuo, vindo a ser descrito por Samarasekera (2003) como o “coração” do lingotamento contínuo. A autora caracteriza o molde como sendo um tubo de cobre (lingoteira) geralmente de seção quadrada com cantos arredondados, que é montado concentricamente dentro de um anteparo (chamado jaqueta ou camisa) de aço onde existe um fluxo de água, normalmente em sentido para cima, através de um espaço entre o tubo e a jaqueta. Uma pressão de aproximadamente 240 KPa é também aplicada. Esta pressão, em combinação com o fluxo de água para cima, garante que todo o espaço entre a jaqueta e o tubo esteja sempre cheio de água (Brimacombe, 1982).

Taconi (2007) diz que o molde tem como função primordial o resfriamento primário, propiciando a formação da primeira “casca” sólida de aço de tal maneira que ao sair do molde, esta casca solidificada seja suficientemente espessa para resistir a pressão ferrostática do aço líquido em seu núcleo. Cada molde é constituído de uma carcaça de aço, suportando

em seu interior um tubo de cobre de parede fina, com camisa de água fechada, que permite a circulação da água a fim de se obter uma rápida remoção de calor.

O molde tem como sua principal função receber o aço líquido proveniente do distribuidor a partir de uma válvula que controla a vazão de aço do distribuidor para o molde. O resfriamento primário ocorre através da extração de calor do aço líquido para o sistema de refrigeração por meio da passagem de água por canais que envolvem o molde de cobre ao longo de seu comprimento e largura, conforme pode ser observado na figura 3.3. À medida que o molde é resfriado com água, a espessura da camada solidificada de aço aumenta até que atinja uma resistência mecânica que suporte a pressão ferrostática e os esforços de extração do tarugo. Na solidificação, a medida que o tarugo contrai-se, a casca solidificada afasta-se do molde criando uma região com “*gap*” de ar. Ocorre uma redução na extração de calor, progressivamente, a partir do menisco até a saída do molde na medida em que o lingote é extraído (Barcellos, 2007).

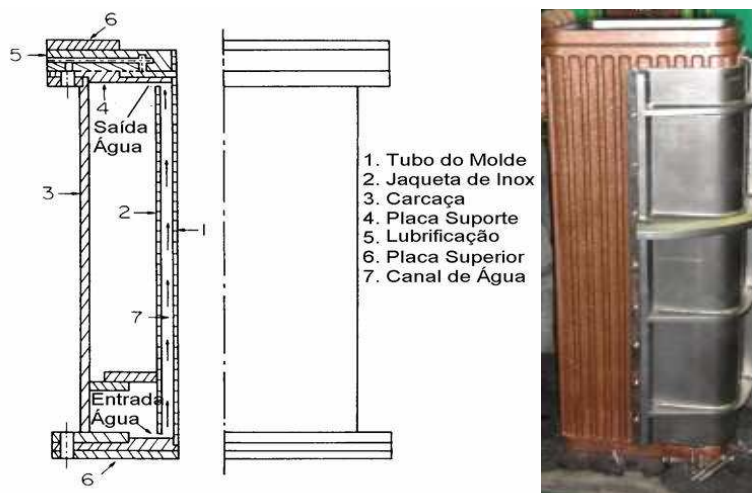


Figura 3.3. Desenho esquemático dos componentes do molde (Adaptado de Barcellos, 2007), e foto da nova configuração de molde no lingotamento contínuo.

### 3.1.2.1 Raio de Canto nos Moldes do Lingotamento Contínuo

Há tempos estuda-se a influência do raio do molde, principalmente devido à sua grande influência na formação de trincas longitudinais de canto em tarugos. Ushijima (1962) fala sobre um crescimento uniforme da pele em moldes com grandes raios de canto (16mm) com a localização das trincas dentro do canto, mas depressões fora do canto para raios pequenos (6mm) e trincas próximas a estas depressões, conforme pode-se observar na figura 3.4.

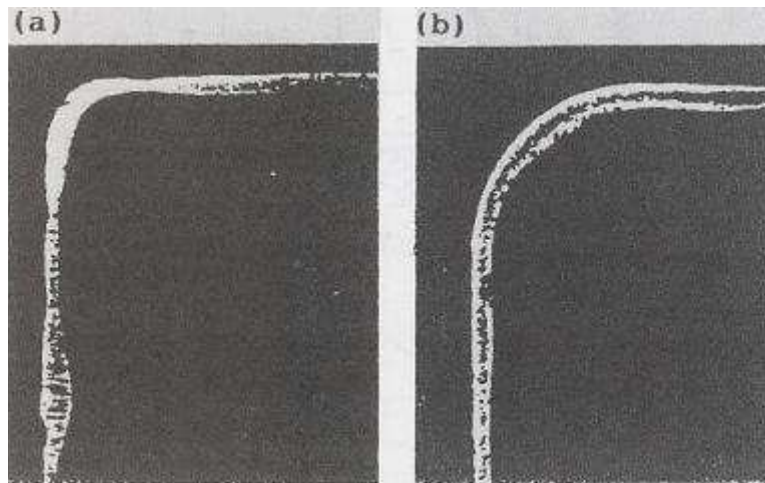


Figura 3.4. Seção transversal de uma pele solidificada comparando a diferença entre um raio de canto de a) 6mm e b) 16mm

Ushijima (1962) ainda comenta que no caso de grandes raios de canto, a casca do menisco tem uma maior contração formando um “*gap*” em volta do canto o qual reduz o fluxo de calor e o crescimento da pele, com subsequente aumento na susceptibilidade às trincas próximas ao canto. Por outro lado, para os raios pequenos, o crescimento da pele se dá pelo fluxo bidirecional de calor no canto, o qual permite às regiões vizinhas afastarem-se da parede do molde, causando uma depressão e, eventualmente, trincas off-corners subsuperficiais, freqüentemente ligadas ao aumento da tensão pela rotação do canto.

#### 3.1.2.2 Fluxo de Calor nos Moldes de Lingotamento Contínuo

O molde é considerado a primeira zona de resfriamento no lingotamento contínuo. A transferência de calor do metal para as paredes do molde é controlada pela condução, convecção e radiação através do gap de ar que se forma em consequência da contração da casca solidificada (Barcellos, 2007). Na figura 3.5 pode-se observar a zona de início de formação de “*gap*” dentro do molde.



Figura 3.5. Desenho esquemático mostrando as diferentes zonas existentes entre a superfície da parede do molde e a pela solidificada (Taconi, 2007)

De acordo com estudos realizados por Schwerdtfeger (2003), o mecanismo de transferência de calor dentro do molde pode ser representado por uma seqüência de 3 resistências conforme mostrado na figura 3.6.

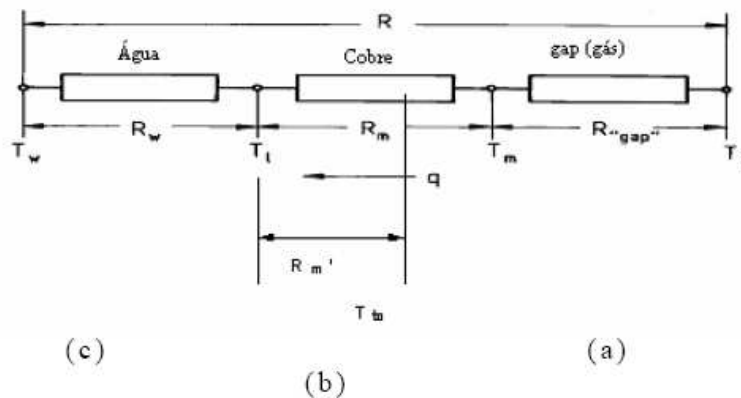


Figura 3.6. Analogia de sistema elétrico para fluxo de calor entre superfície do aço e a água de resfriamento, simbolizados por resistências (Schwerdtfeger, 2003).

Uma estratégia de minimizar o “gap” de ar em função da contração do tarugo é reduzir a seção do molde de forma cônica, com esta redução do gap de ar se obtém uma maior taxa de extração de calor pelo molde e decréscimo da temperatura superficial do tarugo na saída do molde. Se a conicidade do molde for em excesso, pode causar dificuldade na retirada do tarugo, podendo ocasionar desgaste do molde e, em casos extremos, o tarugo pode emperrar na saída do molde (Fukada, 1999).

É comentado por Ho (1984) que no início da solidificação, forma-se um espaço interfacial separando o metal e o molde (“gap”). Com a formação deste gap de ar, se cria uma barreira ao fluxo de calor, dificultando a troca de calor entre o metal e o molde.



Ho (1984) cita alguns mecanismos que podem influenciar a formação e a dimensão deste “gap”, sendo eles:

- Interação do metal com o molde (contração do metal, expansão do molde);
- Transformações ocorridas no metal fundido;
- Efeitos da geometria do molde;
- Oscilação do molde;
- Lubrificação com pó fluxante.

As resistências térmicas de (b) e (c), citadas na figura 3.6, são consideradas pequenas em comparadas com (a), sendo assim, pode-se dizer que a taxa de transferência de calor, durante a solidificação do aço no molde, é controlada através da resistência térmica encontrada na interface do aço com o molde. Conforme Taconi (2007), geralmente é aceito que tal espaço (*gap*) pode se dividir em três regiões:

- Do menisco até o ponto onde a pele solidificada do aço começa a se formar; nessa região o aço líquido é separado das paredes do molde por uma camada fina de escória lubrificante.
- Na região onde a película de aço tem uma resistência mecânica insuficiente para se descolar das paredes do molde, apenas existe um contato intermitente devido às condições da superfície de lingotamento e ao efeito da pressão ferrostática. Seu comprimento depende de vários fatores, tais como, a quantidade de superaquecimento, a composição do aço e a taxa de extração de calor; seu comprimento estimado é de cerca de 200 a 300 mm.
- Na região onde existe um gap (espaço) definido. A partir do ponto onde o mesmo começa, ocorre transferência reduzida de calor por radiação e condução nesta região.

### 3.1.2.3 Geometria dos Moldes

Basicamente, neste trabalho, estará sendo avaliado a diferença entre duas geometrias de moldes, sendo estes curvos, quadrados, porém, com diferenças em suas conicidade, raio de canto, espessura de parede e sistema de refrigeração.

Com relação ao aspecto conicidade, para o estudo em questão, tem-se o molde com conicidade linear e o molde com conicidade multitaper (novo).

Quando se trabalha com moldes multitaper tem-se uma redução do “gap” entre o molde e a pele solidificada, gerando uma melhor distribuição da extração de calor ao longo do molde. Com isso, é observado um aumento na extração de calor variando entre 10 e 20% se comparado a extração de calor em moldes lineares, conforme mostrado na figura 3.7. onde a parte mais escura representa maior extração de calor.

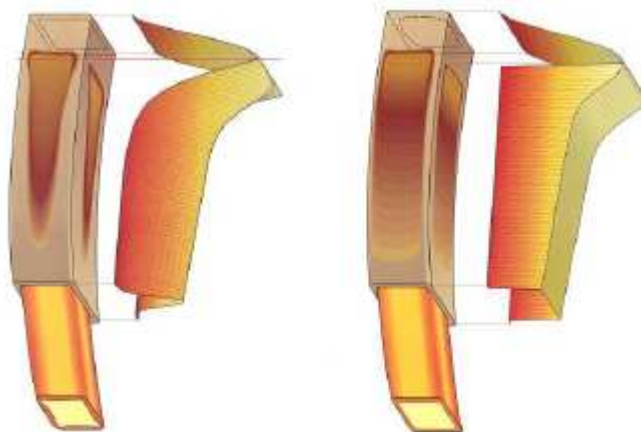


Figura 3.7. Esquema gráfico ilustrando o comportamento da temperatura do molde entre uma geometria linear e uma geometria multitaper (GRUNDY,2011).

Quando se faz uma boa adequação da conicidade do molde, permite-se que o espaçamento entre a pele solidificada e a parede do molde seja pequeno, o que melhora a transferência de calor no molde e reduz a temperatura da superfície da pele solidificada na saída do molde.

Um ajuste da conicidade insuficiente, segundo Samarasekera et al. (1984), leva a uma redução na transferência de calor entre o veio e o molde, causando um aumento na temperatura de saída do tarugo do molde, com a conseqüente elevação do risco de ocorrência de rompimento do tarugo (*breakout*). Por outro lado, quando se objetiva uma conicidade excessiva do molde leva-se a um aumento na fricção molde e a pele solidificada e a um aumento do desgaste do molde. Isso pode ainda levar à formação de trincas longitudinais próximo aos cantos dos tarugos. Portanto, a dimensão do molde deve ser progressivamente reduzida, procurando-se compensar a contração, a fim de se manter um fluxo de calor mais uniforme.

Quando é feito um bom projeto da conicidade do molde, consegue-se atender de maneira satisfatória uma espessura do sólido (pele solidificada) na saída do molde sem aumentar a fricção entre a pele solidificada e o molde. Um indicador efetivo para a condição da conicidade do molde é a incidência de trincas sub superficiais conforme mostrado na figura 3.8.

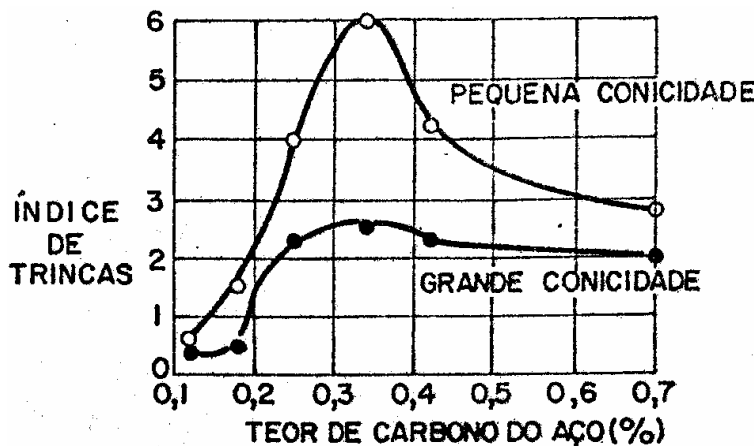


Figura 3.8. Índice de trincas sub-superficiais em função da conicidade do molde, SAMARASEKERA et al. (1984).

### 3.1.3 Oscilação do Molde

O sistema oscilatório do molde tem como principal objetivo evitar que a pele solidificada do tarugo venha a aderir a parede do mesmo. Este sistema vem sendo utilizado desde a segunda guerra mundial. Devido a este sistema oscilatório do molde, são geradas as marcas de oscilação. As marcas de oscilação são fenômenos intrínsecos aos processos de lingotamento contínuo com um molde oscilando.

O movimento de oscilação do molde, que segue geralmente um padrão senoidal, faz com que o molde se desloque durante um período no mesmo sentido do veio e no período seguinte no sentido contrário ao veio. Isto permite que se tenha o estripamento negativo, ou seja, um período em que o molde tem um movimento de descida mais rápido que o movimento de descida do tarugo, proporcionando um ligeiro esforço de compressão na casca solidificada, que permite o fechamento de rupturas e aumenta a resistência da casca solidificada (Taconi, 2007).

Conforme comenta Szekeres (2002), juntamente com a velocidade de lingotamento, as principais variáveis associadas ao movimento de oscilação do molde são: o perfil do movimento cíclico, a amplitude de oscilação (distância percorrida pelo molde de seu ponto mais alto até seu ponto mais baixo) e a frequência de oscilação (número de vezes que o molde oscila a cada minuto).

Para descrever de maneira mais detalhada as principais variáveis atuantes no movimento de oscilação do molde, como comenta Barcellos (2011), pode-se destacar:

- Curso,  $S$  [mm]: Normalmente, variam entre 3 e 10mm. Ao aumentar o curso, o tempo de estripagem negativa aumenta proporcionalmente, conforme mostra a figura 3.9.

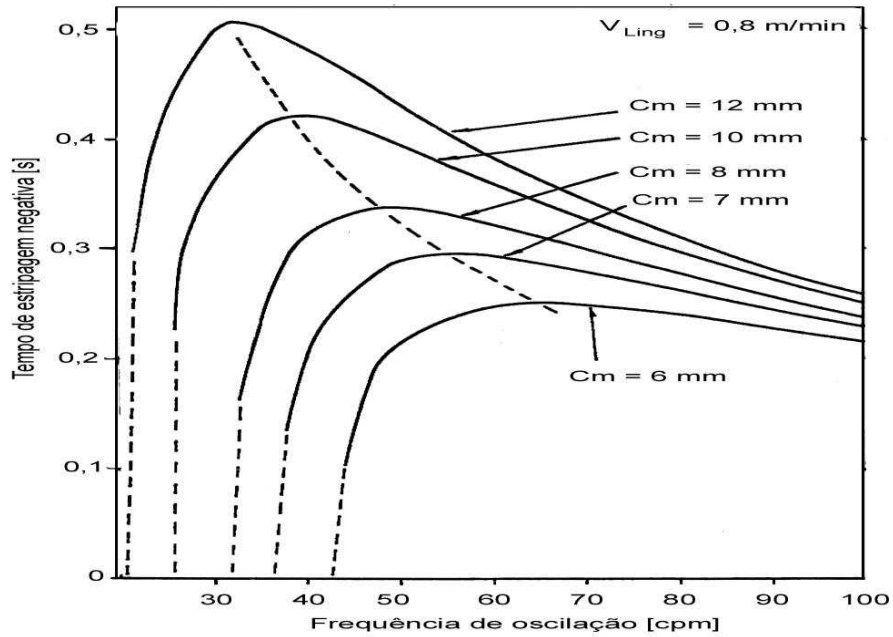


Figura 3.9. Ilustra o tempo de estripagem negativa aumentando proporcionalmente ao curso “ $C_m$ ”, (Barcelos, 2011).

- Frequência,  $f$  [ $\text{min}^{-1}$ ]: Os habituais osciladores de moldes hidráulicos trabalham em frequências entre 100 e 250 ciclos por minuto. Ao aumentar a frequência, diminui o tempo de estripagem negativa, conseqüentemente, a profundidade das marcas de oscilação;

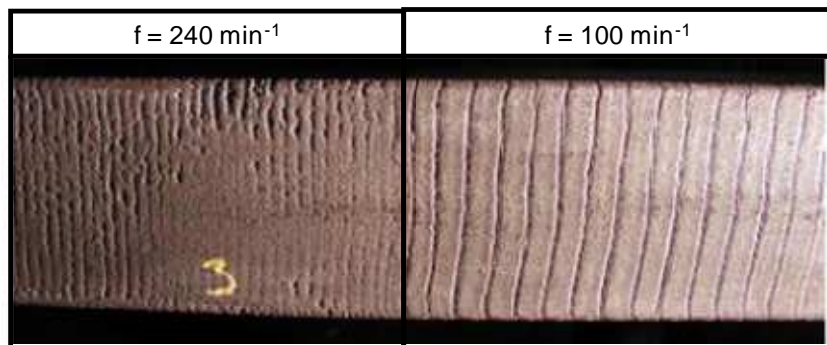


Figura 3.10. Mostra a diferença nas marcas de oscilação com a variação da frequência (Barcelos, 2011).

- Tempo de estripagem negativa,  $t_N$ [s]: O Tempo de estripagem negativa, ou tempo de estripamento negativo, é o período onde a velocidade de descida do molde é superior à velocidade de lingotamento. E o principal fator que influencia a formação das marcas de oscilação. O aumento do tempo de estripagem negativa é acompanhado com o aumento da profundidade das marcas de oscilação. Valores práticos estão na faixa de 0,1 a 0,3 s. Para o lingotamento de tarugos, o recomendado é de 0,12 a 0,15 segundos.

Barcelos (2011) comenta ainda que para o cálculo de estripamento negativo a formula mais comumente usada é:

$$t_N = \frac{60}{\pi \cdot f} \cdot \arccos\left(\frac{1000 \cdot V_{\text{ling}}}{\pi \cdot f \cdot S}\right) [s]$$

Figura 3.11. Mostra a fórmula para cálculo de estripagem negativa (Barcelos, 2011).

Onde “Vling” corresponde a velocidade de lingotamento instantânea.

#### 3.1.4 Formação Macroestrutural

Como, resumidamente, comenta Garcia (2006), a macroestrutura de um tarugo pode ser constituída por três zonas:

Zona coquilhada: localizada na superfície formada por grãos solidificados rapidamente devido ao contato com o molde refrigerado;

Zona colunar: formada devido ao crescimento preferencial em direção ao centro do lingote;

Zona equiaxial: constituída de grãos aleatórios e localizada na região central do tarugo. Para o caso de máquinas de lingotamento contínuo curvas, essa zona não se apresenta simétrica em relação ao centro, mas, desloca-se sem relação ao centro devido a ação da gravidade.

A figura 3.12 ilustra a posição das três zonas na região transversal do tarugo.

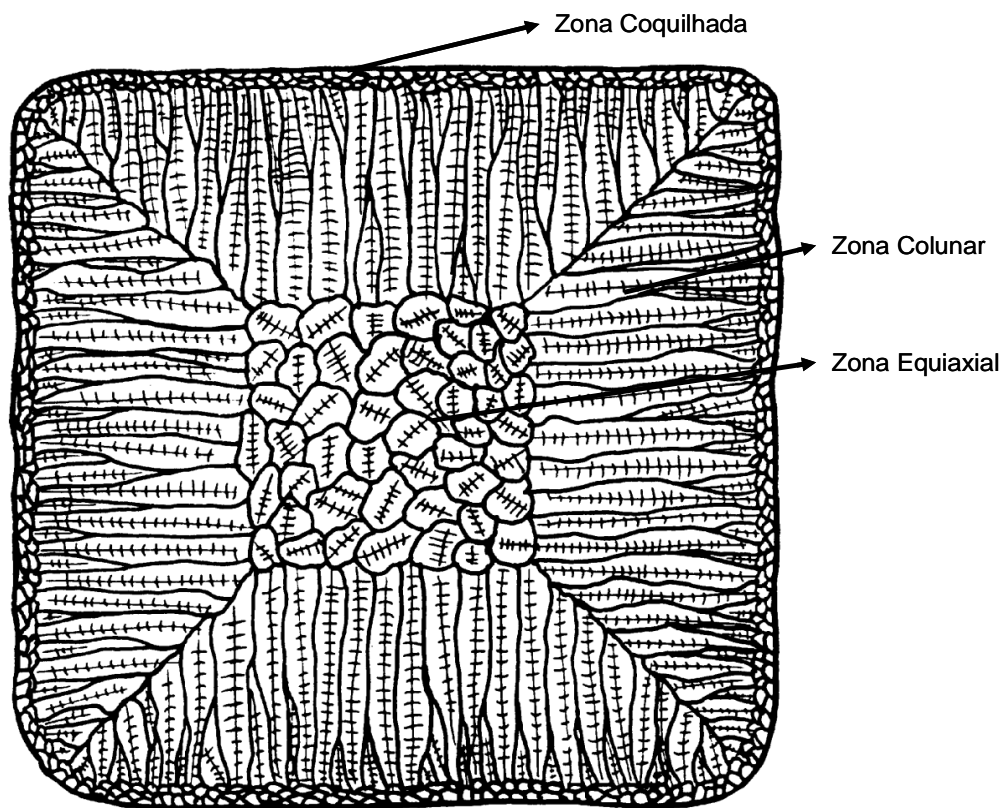


Figura 3.12. Ilustração das zonas que compõem a macroestrutura da seção transversal do tarugo. (Adaptado Barcelos, 2011).

O crescimento da zona colunar é afetado por vários fatores, como o superaquecimento, concentração de carbono, tamanho da seção do lingote e taxa de extração de calor (Garcia, 2006).

As trincas a quente durante o lingotamento contínuo, conforme afirma Pierer (2010), ocorrem preferencialmente nos contornos de grão primários. À medida que os grãos primários crescem, a quantidade do número de contornos de grãos diminuem, devido ao afastamento da superfície próxima ao molde, mas, o comprimento do contorno de grãos no mesmo sentido, aumentam. Esta situação pode ser vista na figura 3.13, onde a parte de cima da figura mostra claramente a estrutura de solidificação da superfície para o centro, exemplificando o crescimento de grão primários (em que as dendritas tem a mesma direção), a orientação dos contornos de grãos primários, na seção transversal entre as dendritas, são diferentes e existe um filme líquido entre estes grãos, mostrado na parte inferior da figura 3.13.

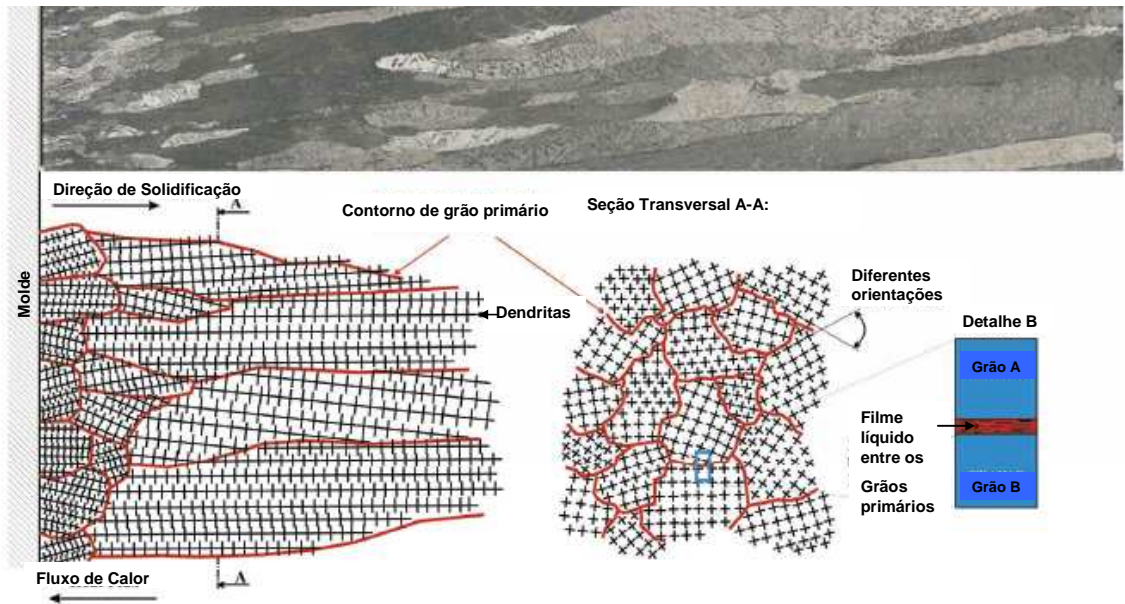


Figura 3.13. Formação da estrutura de solidificação e diferentes orientações dos contornos de grão primário. (Adaptado Pierer, 2010).

### 3.1.5 Qualidade do Tarugo Produzido em Lingotamento Contínuo

Todos os tarugos produzidos via lingotamento contínuo, principalmente os que são produzidos em lingotamento que trabalham com aços especiais, como é o caso da Gerdau – Charqueadas, devem atender requisitos mínimos de qualidade para seguir as etapas seguintes do seu processo de transformação.

Segundo Fernandes (2004), os principais tipos de defeitos superficiais e internos num tarugo são ilustrados na figura 3.14.



Figura 3.14. Defeitos típicos em lingotamento contínuo.

Como será esclarecido ao longo do trabalho, e já comentado anteriormente, a análise de defeitos será focada em:

- Defeitos superficiais (Trincas longitudinais e trincas transversais)
- Defeitos Internos (Trincas centrais, trincas de meio e trincas de canto)

NOGUEIRA (2006) descreve que as trincas longitudinais podem ocorrer no canto ou na face, bem como as trincas transversais. O autor ainda faz um paralelo entre a característica dos defeitos e um breve comentário das possíveis causas para geração de cada defeito. Então, conforme o autor:

- Trincas longitudinais de canto são trincas abertas localizadas nos cantos paralelas ao eixo do tarugo e tem como suas possíveis causas:
  - Desenho incorreto do molde;
  - Mal estado ou desgaste excessivo do molde;
  - Refrigeração assimétrica do molde;
  - Pó de molde inadequado.

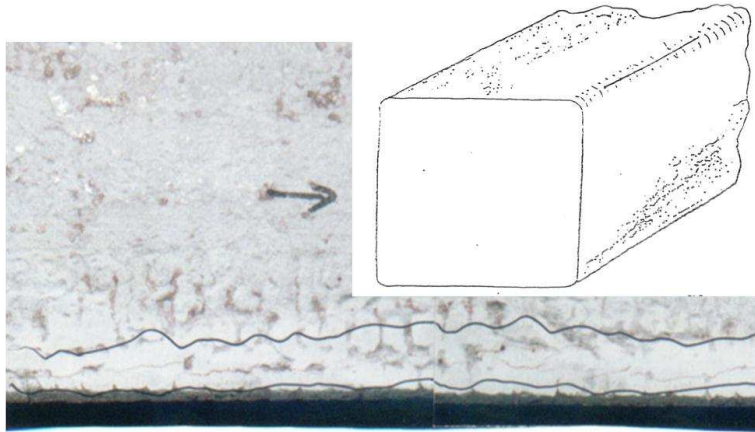


Figura 3.15. Trincas longitudinais de canto (Adaptado de NOGUEIRA, 2006)

- Trincas transversais de canto são trincas perpendiculares ao eixo do tarugo localizadas nos cantos ou muito próximas a eles, na maioria das vezes aparecem no fundo das marcas de oscilação, e tem como suas possíveis causas:
  - Endireitamento a temperatura muito baixa;
  - Diferença excessiva de temperatura entre os cantos e o centro dos lados;



- Agarre do tarugo ao molde;
- Funcionamento irregular dos rolos guia ou dos rolos de extração;
- Má regulagem do mecanismo de extração;
- Oscilação em mal estado ou oscilação irregular.



Figura 3.16. Trinca transversal de canto (Adaptado de NOGUEIRA, 2006)

- Trincas longitudinais de face são trincas abertas centralizadas nos lados ou nas zonas próximas aos cantos e em muitos casos aparecem em regiões de depressão (afundadas) do tarugo. Elas podem se estender a longo de todo o tarugo ou se interromper e continuar posteriormente e têm como suas possíveis causas:
  - Refrigeração não uniforme nas laterais do molde;
  - Refrigeração secundária não uniforme nos diferentes lados do tarugo;
  - Defeitos na superfície interna do molde;
  - Pó de molde inadequado ou de má qualidade.



Figura 3.17. Trinca longitudinal de face (Adaptado de NOGUEIRA, 2006)

- Trincas transversais de face são trincas perpendiculares ao eixo do tarugo localizadas lateralmente, de profundidade variável. Estes defeitos são mais prejudiciais do que as trincas de canto e em certos casos, a profundidade é maior do que 10 mm, podendo atingir o centro do tarugo e tem como suas possíveis causas:
  - Trações anormais nos mecanismos de extração do tarugo;
  - Temperatura insuficiente durante o endireitamento;
  - Fragilidade do aço a quente;
  - Agarramentos no molde que acaba produzindo trações anormais na camada solidificada;
  - Má regulagem entre a oscilação do molde e a velocidade de extração;
  - Mau alinhamento dos rolos ou uma distância excessiva entre os mesmos;
  - Grandes flutuações do nível de aço no molde.



Figura 3.18. Trinca transversal de face (Adaptado de NOGUEIRA, 2006)

Com relação a defeitos internos (trincas internas de tensão ou trincas de canto), o autor descreve trinca de tensão como tendo a característica de se formarem no molde, depois da primeira pele solidificada de aço e depois expande-se para o seu interior. O maior problema é que podem aflorar à superfície durante a laminação. Se estão afastadas da superfície podem chegar a fechar durante a laminação, desde que se tenha um grau de redução suficiente para que tal aconteça. Estas trincas fechadas são conhecidas como “*Ghostline*”.

É comentado por Ray (2004) que as trincas internas de tensão ou trincas de canto (off-corner), também aparecem de maneira sub-superficial e geram freqüentes problemas de qualidade em tarugos produzidos via lingotamento contínuo. As trincas de canto não são observadas na superfícies dos tarugos, mas aparecem na seção transversal de uma macroestrutura analisada de um tarugo produzido via lingotamento contínuo. Em geral, clientes que utilizam estes materiais rejeitam ou aceitam suas aplicações somente após uma verificação da qualidade da seção macroestrutural, pois a presença de TOC requer uma reclassificação dos tarugos, restringindo sua aplicação para determinados produtos.

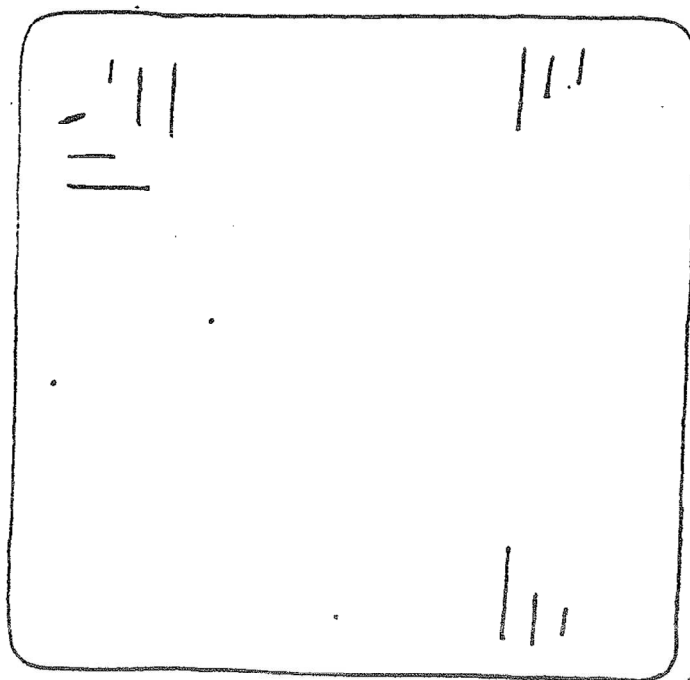


Figura 3.19. Representação de trincas de tensão (Trinca Off-Corner - TOC) na Seção transversal do tarugo (Adaptado de NOGUEIRA, 2006)

Como comenta Kitana, *et al.* (2000), a formação de TOC é iniciada por uma espessura de pele solidificada desuniforme na formação do tarugo ao redor do molde, que atua como primeira fonte para geração de trincas longitudinais ou TOC localizadas nos tarugos. Isso se dá devido a transferência de calor através das paredes do molde com os controles de nucleação da pele solidificada e de seu crescimento.

A uniformidade da refrigeração do molde depende de fatores como raio de canto, formato do molde, qualidade do aço e distribuição do lubrificante no “gap” existente entre o molde e a pele solidificada do tarugo ao longo de sua periferia.

### 3.1.6 Variáveis de Processo que Afetam a Qualidade do Tarugo

Existem várias variáveis que podem influenciar na formação de defeitos e conforme descreve Taylor (1963), o princípio de controle é um dos quatro princípios da administração científica que foi desenvolvido pelo próprio autor. Ele comenta que o princípio do controle consiste em controlar o trabalho para se certificar de que o mesmo está sendo executado de acordo com o método estabelecido e segundo os padrões pré-estabelecidos, salientando que, nada adianta ser feito todo um sistema de padronização se não tiver uma certificação para verificar se todas as variáveis estão sendo objetivadas conforme o descrito nos padrões.

A influência de relevantes variáveis que contribuem para a formação de defeitos, tais como, composição química, parâmetros de lingotamento e condições físicas e mecânicas da máquina de lingotamento contínuo devem ser avaliadas criteriosamente, de maneira que se possa obter limitações do equipamento e se possa tomar ações que reduzam a formação de defeitos durante o processo de lingotamento. (Ray, 2004).

### 3.1.7 Velocidade de Lingotamento

Chow (2002) comenta que o aumento na velocidade de lingotamento causa aumento na transferência de calor, tanto no meio da face quanto nos cantos do molde, e que isto se deve a três razões:

- menor tempo de residência do aço no molde, o que leva a uma menor espessura da casca solidificada, que assim oferecerá menor resistência à pressão ferrostática, reduzindo-se o *gap* de ar;
- o menor tempo de residência resulta numa superfície do tarugo mais quente, aumentando a força motriz, que é o gradiente térmico, para o fluxo de calor;
- há uma menor contração térmica da casca solidificada em temperaturas mais altas, o que melhora o contato molde/tarugo, não contribuindo para o tamanho do *gap*.

O aumento da velocidade é mais sentida na transferência de calor próximo ao menisco do que na saída do molde. Em velocidades mais altas (a partir de 3,0 m/min), a taxa de aumento do fluxo de calor é muito menor comparativamente a velocidades mais baixas (0,6 a 1,3 m/min). Assim, a transferência de calor no molde é menos sensível a mudanças de velocidade em altas velocidades de lingotamento (Chow, 2002).

Também é mostrado por Chow (2002) que em altas velocidades de lingotamento há uma queda significativa na taxa de transferência de calor a 200 mm da saída do molde, primeiramente na face com a curvatura interna da parede, indicando que há um forte efeito da velocidade de lingotamento na saída do molde. Isso provavelmente é resultado da formação de um *gap* entre o molde e o tarugo nesta face, causada pela combinação de um molde mais comprido, gravidade, curvatura do molde e conicidade inadequada. A figura 3.20 ilustra o que foi mencionado acima.

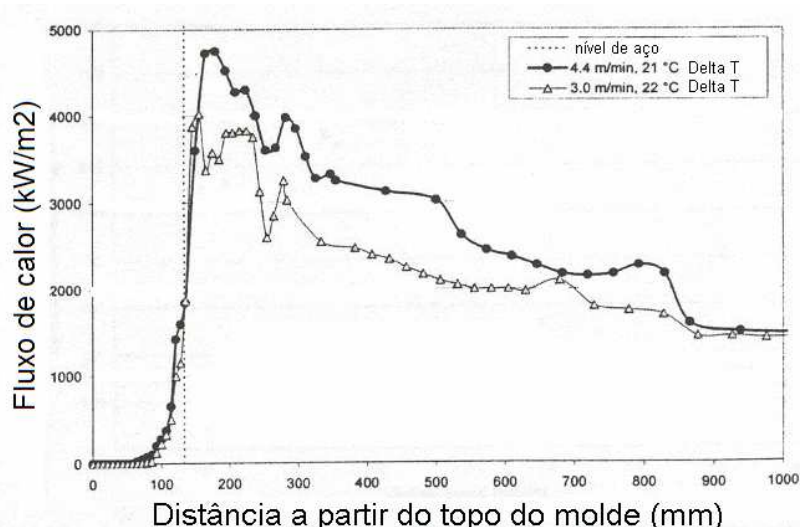


Figura 3.20. Perfil do fluxo de calor no molde para velocidades altas (Chow, 2002)

Outro importante ponto citado por Chow (2002) é que em velocidades de lingotamento denominadas de transição (casting speed transients), que ocorrem durante o período em que a velocidade de lingotamento é progressivamente aumentada ou diminuída, há uma contribuição para a flutuação do nível de aço no molde. Dependendo da variação de nível já existente no processo, este fato pode trazer um sério impacto, alterando-se localmente a temperatura do molde, o que reflete em variações na solidificação do tarugo e defeitos relacionados ao molde.

### 3.2 Composição Química

É dito por Chow (2002) que com o aumento do teor de carbono em um aço altera-se o perfil de transferência de calor entre o aço e o molde, do mesmo modo que um aumento na velocidade de lingotamento este perfil também é alterado, principalmente na região do menisco. Este efeito do teor de carbono no aço sobre a transferência de calor no molde é representado através da figura 3.21.

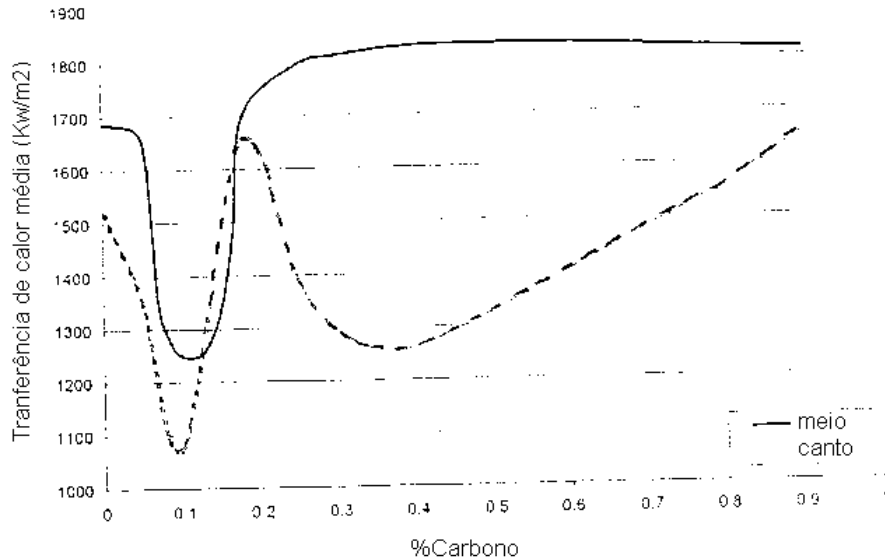


Figura 3.21. Efeito do teor de carbono no aço, em peso, sobre a transferência de calor no molde (Chow, 2002).

Samarasekera et al. (1984) dizem que a superfície interna de veios rompidos de aços com 0,1% C é ondulada. À medida que se aumenta o teor de carbono, esse efeito vai diminuindo até praticamente desaparecer com 0,4% C. Acredita-se que esses efeitos estejam relacionados com a redução de volume associado à transformação de fases ferro delta ( $\delta$ ) CCC em ferro gama ( $\gamma$ ) CFC. A contração do aço é máxima para o aço com 0,1 % C.

Quando falamos em transferência de calor, a contração levaria a um aumento do espaçamento entre o molde e o veio, o que por sua vez levaria a um aumento na resistência à transferência de calor. O mecanismo sugerido para a formação da superfície ondulada é o seguinte:

O aço em contato com o molde próximo ao menisco se solidifica e resfria o suficiente para que haja a transformação de fase  $\delta - \gamma$ . Com essa transformação ocorre a formação de um vazio entre a pele solidificada do tarugo e a parede do molde, gerando uma redução localizada de transferência de calor que gera um reaquecimento e, por conseqüência, perda da resistência nesse ponto. Após isso, a pressão ferrostática empurra a casca solidificada parcialmente de volta em direção ao molde. As deformações resultantes desse processo são as visíveis ondulações na superfície interna da pele solidificada.

Foi também comentado por Samarasekera et al. (1984) que enxofre e níquel também afetam a transferência de calor no molde. Para aços com 0,10% C, o enxofre e o níquel

umentam o fluxo de calor no molde. Para aços com 0,70%C, o enxofre reduz o fluxo de calor no molde.

### 3.3 Temperatura de Lingotamento

É relatado por Lait et al. (1982) que um aumento na temperatura de lingotamento produz um aumento do comprimento da zona colunar, porque em altas temperaturas os cristais equiaxiais formados no molde podem ser mais facilmente refundidos. Poucos cristais são então disponibilizados para formar a zona equiaxial e as dendritas colunares poderão crescer livremente para a região central do veio.

Nos moldes curvos, a estrutura de solidificação não é simétrica. Este fato é importante, pois significa que trincas internas se formarão preferencialmente adjacentes à face do raio interno, onde a estrutura colunar predomina. As condições de fluxo na zona líquida (centro líquido) têm uma significativa influência na formação do cristal equiaxial e estrutura. Pelo aumento da turbulência do líquido no molde, o número de cristais formados aumenta e produz uma mudança na estrutura de lingotamento. Esta estrutura poderia ser devido à maior dissipação de calor, a qual acarreta diminuição do grau de superaquecimento na zona líquida. Cristais equiaxiais encontrariam condições mais favoráveis de nucleação e crescimento. O rompimento das pontes de dendritas colunares, gerando sítios de nucleação heterogênea de cristais equiaxiais, também ocorrem nesta fase.

Abaixo, a figura 3.22 ilustra a influência da temperatura de lingotamento na estrutura bruta de solidificação.

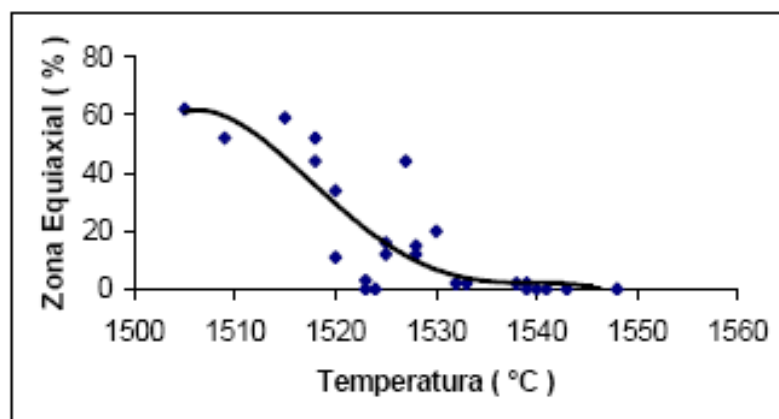


Figura 3.22. Influência da temperatura de lingotamento na estrutura do tarugo (Lait et al.,1982)



Observa-se ainda, segundo Lait et al. (1982), que a temperatura de lingotamento influencia diretamente a velocidade de solidificação do aço no molde e esta é mais percebida para pequenos tempos de residência, ou seja, em altas velocidades de lingotamento. Sob o ponto de vista térmico, o superaquecimento normalmente presente no lingotamento contínuo, variando em média entre 25 a 50° C, influencia o fluxo de calor no molde, e se comparado a outras variáveis, como velocidade de lingotamento e características do lubrificante, é menos relevante. O autor comenta ainda que uma baixa temperatura de vazamento pode levar a um resfriamento prematuro do aço na válvula de alimentação, assim como a um aumento do nível de inclusões, pois a baixa temperatura dificulta a flotação de inclusões. Uma alta temperatura de vazamento, por sua vez, acarreta as seguintes consequências:

- Estrutura preferencialmente colunar, que é mais suscetível à formação de trincas internas, aumenta a segregação central bem como a porosidade;
- Menor espessura da camada solidificada, em especial nas quinas do veio, o que aumenta a probabilidade de rompimento do veio (*break-out*).

### 3.4 Rolos de Pé

Segundo Thomas (2002) a existência de um suporte na saída do molde, juntamente com os rolos de pé (*foot rolls*), possibilitaria um aumento da velocidade de lingotamento e produtividade sem a ocorrência de TOC.

O uso de rolos de pé fechados cerca de 0,25 mm em cada face em relação à saída do molde contribui para redução de TOC e reduz o desgaste do molde na saída por suportar mais a carga ferrostática local (Szekeres, Brimacombe Continuous Casting Course, 2003), como mostrado na figura 3.23. Brimacombe (1980) aponta que a ocorrência aleatória da trinca off-corner pode estar associada a um jogo de rolos de pé impróprios ou a um movimento cambaleante do molde durante o ciclo de oscilação, fazendo com que o tarugo se mova na região inferior do molde.

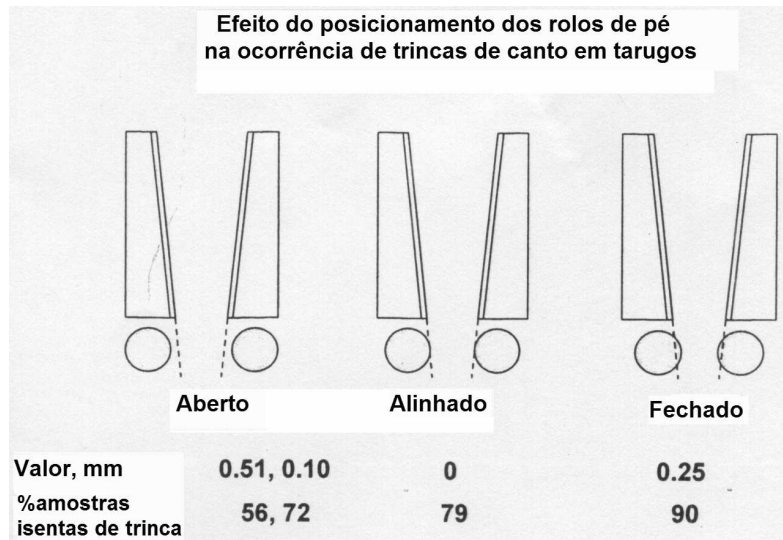


Figura 3.23. Efeito do rolo de pé sobre a formação de trinca longitudinal de canto  
(Brimacombe Continuous Casting Course, 2003)

### 3.5 Refrigeração Secundária

Logo após tarugo sair do molde, o processo de solidificação continua em uma segunda etapa de retirada de calor. O tarugo já com uma pele solidificada formada no molde é suportado por rolos e o resfriamento é realizado principalmente pelo jato de água emitido pelos bicos de águas dos chuveiros dispostos entre os rolos, conforme mostra a figura 3.24.

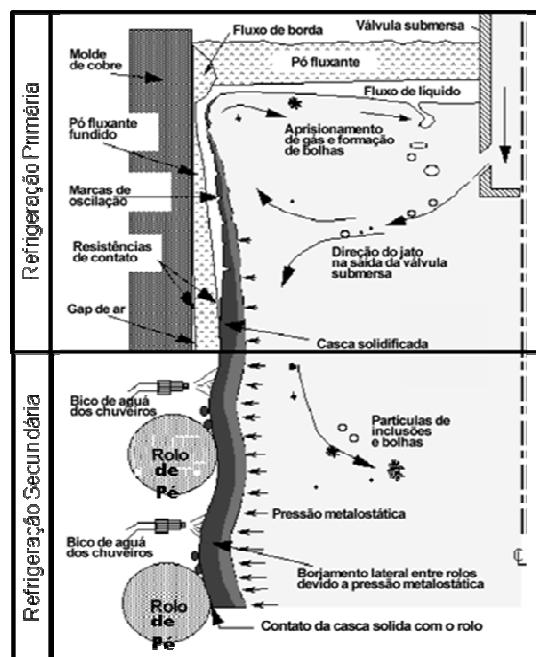


Figura 3.24. Desenho esquemático da seção transversal do tarugo ilustrando a divisão entre a zona de refrigeração primária e secundária (Adaptado de Barcelos, 2011)

A zona de refrigeração secundária se estende ao longo do lingotamento, depois da saída do molde, e objetiva a solidificação final do poço líquido no interior do tarugo, antes da região de corte. O desenvolvimento de um resfriamento uniforme e coerente com a temperatura da superfície do lingote objetiva eliminar a formação de defeitos (Barcelos, 2011).

### 3.6 Pó Lubrificante

Os pós lubrificantes, também comumente chamados de pós fluxantes ou pós de molde, são escórias sintéticas usados no lingotamento contínuo de aços quando utiliza-se válvula submersa para fazer a transferência de aço líquido do distribuidor para o molde (jato protegido). Destacando as principais funções do pó fluxante pode-se citar:

- Retenção de pequenas inclusões;
- Auxílio na extração de calor;
- Lubrificação do molde;
- Barreira isolante entre o aço líquido, dentro do molde e o oxigênio, evitando assim a re-oxidação.

Durante os primeiros momentos de lingotamento (partida da máquina), o pó lubrificante é adicionado sobre o aço líquido e uma porção acaba solidificando contra o molde resfriado a água, formado um filme de escória de duas fases, uma vítrea e outra cristalina, além da parte líquida.

Segundo Mills (1995), em muitos casos a parte vítrea do filme de escória existirá do início ao fim do processo, a menos que a transferência de calor mude radicalmente dentro do molde ou quando o filme de escória é refundido. A temperatura de cristalização de escória é muito importante, pois determina a espessura desta camada de filme de escória. A temperatura de cristalização é determinada pela composição química do pó fluxante. O efeito de vários óxidos sobre a temperatura de cristalização, viscosidade e ponto de fusão pode ser visto na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Efeito dos óxidos presentes no pó lubrificante e sua relação com viscosidade e temperatura de cristalização (Adaptado de Mills, 1995)

AUMENTO	VISCOSIDADE	TEMPERATURA DE CRISTALIZAÇÃO
CaO	Diminui	Aumenta
SiO <sub>2</sub>	Aumenta	Diminui
BAS	Diminui	Aumenta
AlO <sub>3</sub>	Aumenta	Diminui
Na <sub>2</sub> O	Diminui	Diminui
F	Diminui	Aumenta
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Diminui	Diminui
MnO	Diminui	Diminui
MgO	Diminui	Diminui
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Diminui	Diminui
BaO	Diminui	Diminui
Li <sub>2</sub> O	Diminui	Diminui
TiO <sub>2</sub>	Não troca	Aumenta
K <sub>2</sub> O	Diminui	Diminui

Com relação ao processo de fabricação de pós lubrificantes existem diferentes classificações, e podem ser escritas como:

- Base Fly Ash: Misturado Fisicamente
- Sintético : Misturado Fisicamente
- Vítreo/Fritted: Pré-fundido, Quebrado, Peneirado
- Granular: Em Spray, Extrudado, Peletizado
- Semi-Vítreo/Pré-Reagido: Misturado Fisicamente com componentes Pré-Reagidos
- Exotérmico: Misturado Fisicamente com agentes exotérmicos.

Empresas que trabalham com produção de tarugos de aços especiais, como o caso da Gerdau Charqueadas, geralmente trabalham com pós lubrificantes granulares.

O pó lubrificante granular deve mostrar excelentes propriedades de fluxo (“espalhabilidade”) com a qual se estabelece uma superfície flexível, que será responsável por formar uma camada superficial homogênea, gerando uma camada isolante efetiva, ilustrado através da figura 3.25. Para tal, é necessário que se tenha um bom procedimento de adição do pó lubrificante, bem como a maior homogeneidade possível na forma e tamanho dos granulados. (Apostila Treinamento Interno, 2011).

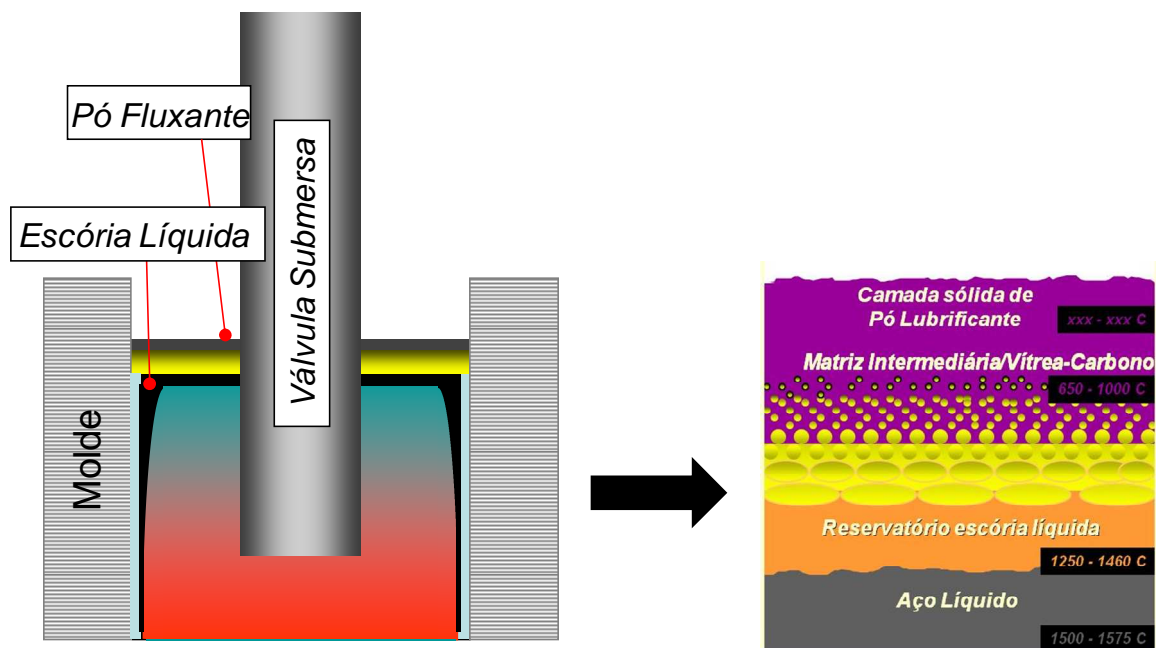


Figura 3.25. Desenho esquemático mostrando as camadas formadas dentro do molde após a adição de pó lubrificante (Adaptado de apostila treinamento interno Gerdau Charqueadas, 2011)

### 3.7 Agitador Eletromagnético

No processo de lingotamento contínuo, o principal objetivo da utilização de agitadores eletromagnéticos é elevar a qualidade do tarugo através da melhoria da estrutura interna, do índice de limpeza, da qualidade superficial do tarugo, da homogeneização da composição química e de propriedades mecânicas do produto com o intuito de flexibilizar a utilização da máquina de lingotamento contínuo para a produção de uma ampla variedade de qualidades de aço, bem como conseguir aumentar as velocidades de lingotamento, aumento a produtividade.

Trindade (2001) comenta que o uso de agitadores eletromagnéticos para tarugos e placas tem se mostrado uma ferramenta essencial para a melhoria da qualidade do aço quando utilizados de maneira adequada. Com o uso dos EMS (*eletromagnetic stirrer*) pode ser observado um aumento da região equiaxial solidificada e também a redistribuição dos solutos. Avaliando-se a transição, ou transformação, de estrutura colunar para uma estrutura equiaxial, pode-se definir dois mecanismos:

Primeiro, as pontas das dendritas colunares são quebradas pelo mecanismo de arraste ou por refundição. Essas pontas de dendritas são cristais que servirão mais tarde como núcleos

de grãos equiaxiais. O líquido pode se tornar levemente resfriado devido às pontas de dendritas frias e, nessas condições, os cristais livres podem começar a crescer.

Segundo, o superaquecimento é rapidamente eliminado devido à alta transferência de calor provocada pela agitação.

Um outro fator importante a ser observado, principalmente quando se avalia densidade de fluxo magnético, é a permeabilidade magnética do meio, pois, mesmo que bobinas forneçam a mesma intensidade de campo magnético (H), a densidade de fluxo magnético (B) vai alterar, em função da permeabilidade magnética ( $\mu$ ) ser modificada, e esta, depende do meio, sendo demonstrado através da fórmula:  $B = \mu \cdot H$  (Halliday, 1971)

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Todos os testes foram realizados em escala industrial na Gerdau Charqueadas em uma aciaria voltada para a produção de aços especiais, concentrando os testes na etapa de lingotamento contínuo.

### 4.1 Fluxo do Processo na Aciaria

A aciaria possui um forno elétrico a arco com capacidade de 75 t; um forno panela; uma estação de tratamento sob vácuo; e uma máquina de lingotamento contínuo de tarugos curva de três veios com moldes em seção quadrada de 155 ou 240 mm e 9m de raio. As panelas possuem capacidade de 65 t e são agitadas com gás inerte. No lingotamento contínuo, o distribuidor tem o formato delta com 16 t de capacidade (este trabalho está focado nesta etapa).

A Figura 4.1 ilustra o fluxo de produção dentro da aciaria da Gerdau Charqueadas, conforme descrito acima.

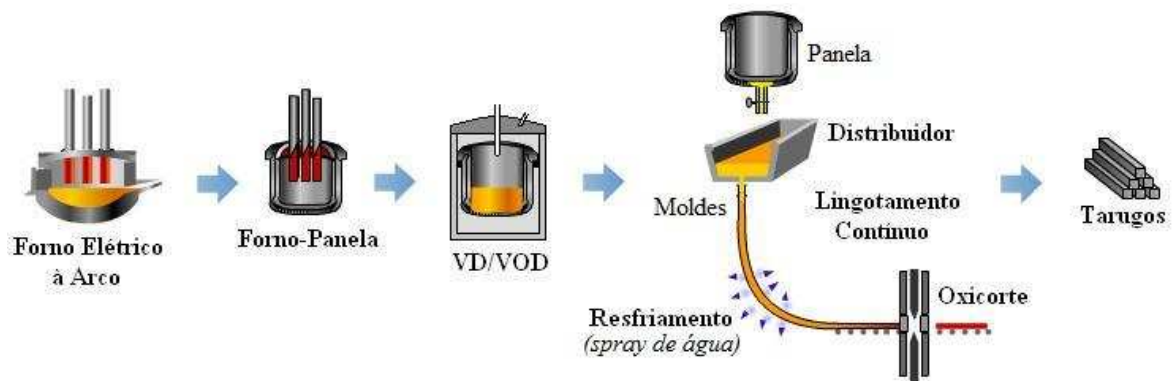


Figura 4.1. Fluxo de produção dentro da aciaria da Gerdau - Charqueadas.

### 4.2 Lingotamento Contínuo

A Figura 4.2 ilustra a área de lingotamento contínuo, destacando a região de interesse para este trabalho (molde).

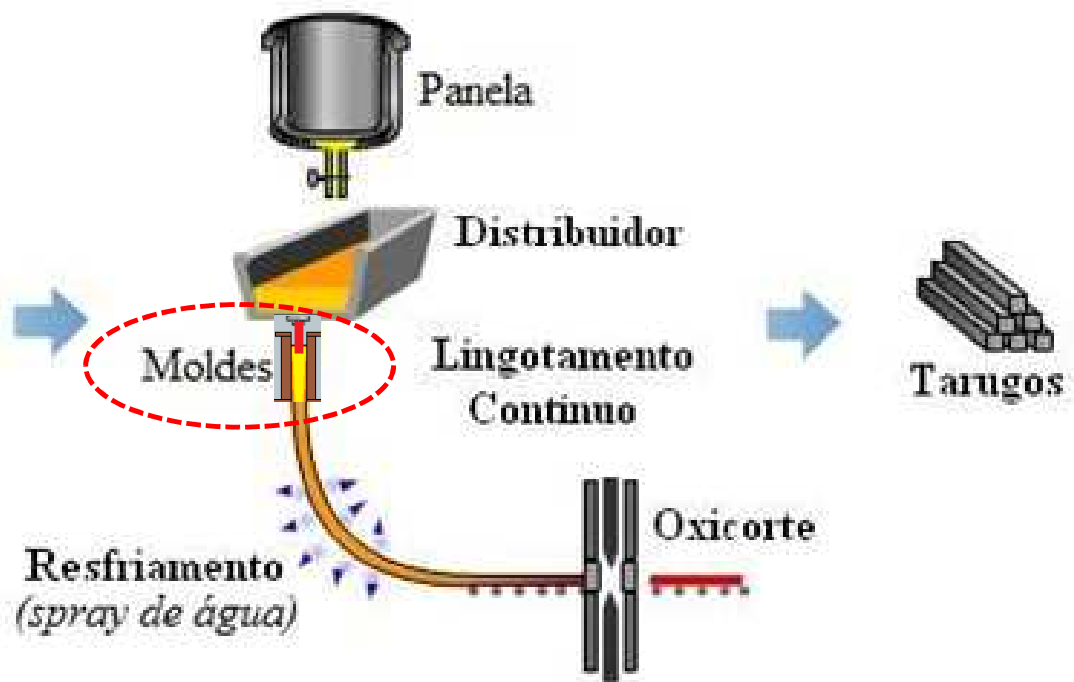


Figura 4.2. Detalhamento da região de interesse do lingotamento contínuo

Na Figura 4.2, pode-se ver uma ilustração do fluxo do aço que é transferido da panela, com capacidade de 65 t para o distribuidor delta com capacidade de 16 t através de um tubo refratário longo selado com argônio na região de contato com a válvula gaveta da panela. O aço do distribuidor é dividido entre os três veios de lingotamento, onde é formada a casca sólida quadrada na seção de 240 mm ou 155mm. A transferência do aço do distribuidor para os moldes é feita através de válvulas submersas (SEN) com vazão controlada por movimento sobe/desce através de um tampão controlado por um mecanismo eletromecânico. A lubrificação do aço nos moldes é feita com pó de molde. O nível de aço nos moldes é controlado através de sistema com fonte radioativa em cada um dos veios. Esta máquina está equipada com agitador eletromagnético nos moldes e também no final do comprimento metalúrgico dos tarugos lingotados, com objetivo de homogeneizar estrutura solidificada e minimizar segregações centrais. O resfriamento secundário é com *spray* de água ou água/ar (dependendo do processo) e a oscilação dos moldes é hidráulica. O corte dos tarugos é feito com tochas de oxicorte. Após os tarugos cortados, os mesmos são despachados para o estoque ou diretamente para etapas posteriores de processo.



### 4.3 Equipamentos

Utilizou-se a máquina de lingotamento contínuo da Gerdau Charqueadas para realização dos testes com as duas diferentes configurações de molde.

Para avaliação de defeitos superficiais foram utilizados equipamentos com princípio de funcionamento por campo de fuga e por partícula magnética.

Para avaliação de defeitos internos foram utilizados equipamentos de ultrassom (em barras laminadas) e ensaio Baumman (em tarugos).

### 4.4 Os Moldes

Atualmente, na seção quadrada de 240mm, onde foram realizados os testes, trabalha-se com moldes de “*taper*” linear, de 800mm de comprimento e 6mm de raio de canto. As faces das paredes do molde (externas e internas) são planas, com espessura 22mm, sem refrigeração direta nos cantos dos tarugos após a saída do molde.

#### 4.4.1 A Nova Configuração de Molde

A nova configuração apresenta um molde com configuração “*multi-taper*” com raio de canto de 22mm, suporte do molde mais robusto, devido à parede do molde ter menor resistência mecânica, pois é estriada, apresentando espessuras de 20mm nos picos e 14mm nos vales, a refrigeração secundária também foi modificada, sendo adicionado bicos extras nos cantos do tarugo, logo após a saída do molde.

A nova configuração de molde apresenta como principais diferenças:

Geometria da parede (espessura e formato);

Raio de canto (maior);

Geometria do suporte (jaqueta);

Geometria da refrigeração secundária.



Figura 4.2. Fotos dos dois tipos de moldes e um referencial de montagem de padrão utilizado atualmente.

#### 4.5 Planejamento dos Testes

Para uma avaliação da influência da mudança de configuração do molde sobre a qualidade dos tarugos produzidos e procurando eliminar o máximo de variáveis de ruídos que pudessem influenciar nos resultados a serem avaliados, os testes foram realizados com a montagem e instalação do novo conceito de configuração de molde (a partir daqui referenciado somente como “molde novo” ou “novo”), no veio 3, para que, posteriormente, fosse possível fazer comparações com os tarugos produzidos nos outros dois veios de lingotamento (veio 1 e veio 2), utilizando parâmetros de lingotamento padrões da empresa.

Um total de quatro corridas foram lingotadas separadamente com o intuito de avaliar cuidadosamente a performance da nova configuração sem correr riscos da realização de uma produção excessiva de qualidade inferior, o que poderia gerar um alto índice de sucateamento, vindo a comprometer os resultados da empresa.

##### 4.5.1 Avaliação da Simetria dos Veios

Como medida de prevenção e para evitar ao máximo a influência de possíveis diferenças entre o desempenho dos veios que pudessem impactar na qualidade dos tarugos, e também evitar a necessidade de uma grande base estatística para avaliação dos resultados, o que neste caso geraria um alto custo para empresa, se teve o cuidado de contratar uma

empresa especializada na avaliação de máquinas de lingotamento contínuo para realizar medições e emitir um relatório técnico sobre a simetria dos 3 veios. Então, em 2011 uma equipe técnica realizou o serviço de medição tri-dimensional computadorizada da oscilação dos moldes hidráulicos nos veios 1, 2 e 3 da Gerdau Charqueadas. O serviço de consultoria computadorizada de monitoração da oscilação do molde é usado para identificar rapidamente problemas mecânicos nos osciladores e mesas de oscilação, otimizar a manutenção dos osciladores através de um plano de manutenções preventivas, comparar as condições de lingotamento os testes foram realizados a quente (máquina lingotando, com aço) e a frio (máquina em simulação, sem aço), buscando identificar erros de desalinhamento com o raio da máquina, além do comportamento do molde com carga e sem carga. Também são avaliadas práticas dos parâmetros metalúrgicos operacionais e de qualidade da oscilação bem como práticas de lubrificação do molde.

#### 4.5.2 Processo de Monitoramento para Avaliação dos Veios

O sistema de monitoração da oscilação do molde consistiu em um computador “laptop”, interface para aquisição de dados, cabos resistentes à alta temperatura e oito sensores acelerômetros tri-axiais compactos que foram fixados magneticamente nos quatros cantos da parte superior do molde, conforme ilustra a figura 4.3.

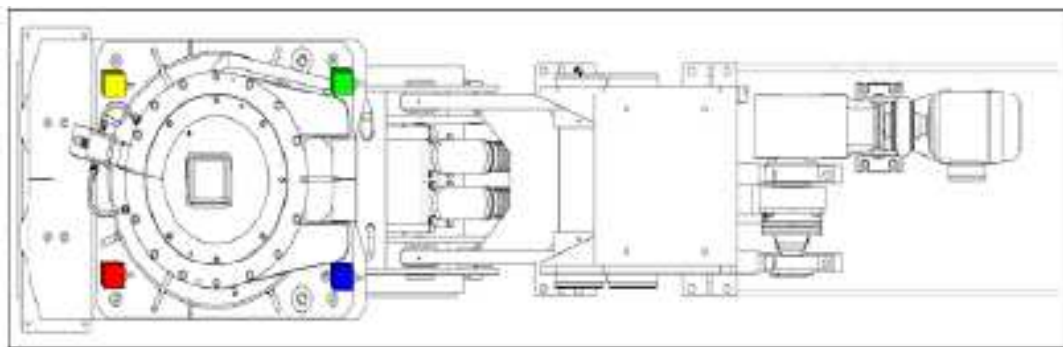


Figura 4.3. Desenho esquemático mostrando o posicionamento dos sensores acelerômetros no molde.

Ainda foram realizadas medições no excêntrico e na redutora com a finalidade de mensurar possíveis folgas e excessos de ruídos. Com a máquina lingotando e sem a máquina estar lingotando, apenas com o molde fazendo seu movimento oscilatório, o software desenhou, em 3D a movimentação real que o molde estava fazendo nos eixos X, Y e Z.

Para avaliação dos resultados do teste comparativo dos 3 veios, foram considerados referências, utilizadas como parâmetros de performance para o estudo do funcionamento da oscilação do molde, em relação a parâmetros de trajetória, nível de ruído e metalúrgico, conforme demonstram as tabelas 4.1, 4.2 e 4.3:

Tolerância na trajetória do molde:

Parâmetros	Projetado	Bom	Média	Pobre
Deslocamento Vertical (mm)	0.00	0.100	0.200	0.300
Deslocamento Lateral (mm)	0.00	0.100	0.200	0.300
Deslocamento Frontal (mm)	0.00	0.100	0.200	0.300
Fase (Grau)	0.00	1.00	1.50	2.50

Tabela 4.1. Parâmetros de classificação da trajetória do molde

Tolerância no nível de ruído do molde:

Parâmetros	Projetado	Bom	Média	Pobre
Deslocamento Residual (mm)	0.00	0.100	0.250	0.350
Baixa Freqüência Vibração. (mm/s <sup>2</sup> )	0.00	25.0	50.0	75.0
Média Freqüência Vibração. (mm/s <sup>2</sup> )	0.00	25.0	50.0	75.0
Alta Freqüência Vibração. (mm/s <sup>2</sup> )	0.00	15.0	30.0	70.0

Tabela 4.2. Parâmetros de classificação do nível de ruído do molde

Tolerância dos parâmetros metalúrgicos do molde:

Parâmetros	Projetado	Bom	Média	Pobre
Simetria (%)				
Tempo Estrip Neg (seg)	0.11 - 0.18	0.11 / 0.18	0.10/0.19	0.09/0.20
Taxa Estrip Neg (%)	30 - 40%	29 / 41	28 / 42	27 / 43
Tempo Estrip Pos (seg)	0.40 - 0.26	0.42 / 0.22	0.45 0.18	0.48 /0.17
Taxa Estrip Pos (%)	70 - 60%	71 / 59	72 / 58	73 / 57
Mold Lead (mm)	2.00 - 4.00	1.90 / 4.10	1.80/4.20	1.70/4.30
Fricção (mm/s <sup>2</sup> )#				
Prof. M. de Osc. (mm)		0.02	0.03	0.04

Tabela 4.3. Classificação dos parâmetros metalúrgicos do molde

Durante a coleta de dados realizada na máquina de lingotamento contínuo da Gerdau Charqueadas e após a avaliação feita entre os veios, não foi constatado nenhuma diferença que pudesse causar alguma influência para que algum veio tivesse melhor ou pior performance que o outro.

#### 4.5.3 Resfriamento Secundário

A refrigeração secundária é dividida em zona 1 e zona 2. Para uma melhor uniformidade de refrigeração e padrão de distribuição da água dos bicos de refrigeração, na zona 1, foram colocadas 4 fileiras, com 3 bicos, uma em cada canto, conforme mostra a figura 4.4.

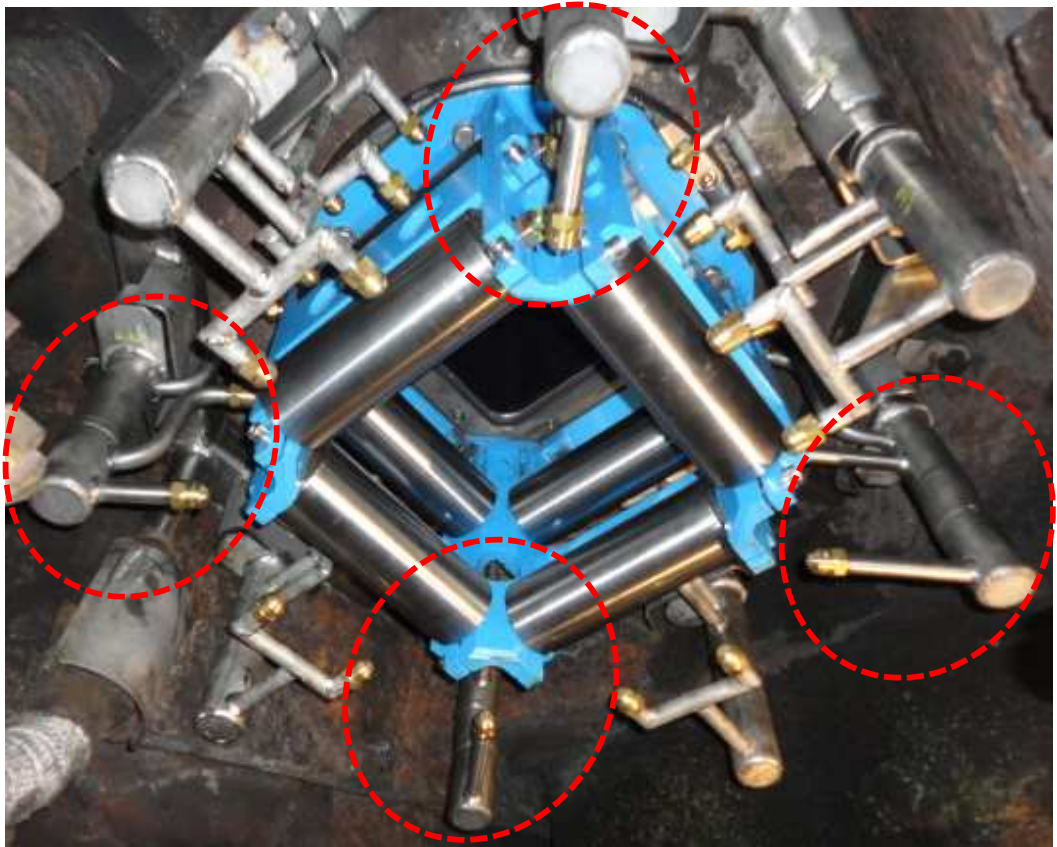


Figura 4.4. Figura da primeira zona da refrigeração secundária, destacando os bicos extras para refrigeração dos cantos do tarugo.

Na segunda zona da refrigeração secundária, para o veio 3, foram testados bicos de outro fabricante, objetivando uma melhor uniformidade da refrigeração.

A configuração final da refrigeração secundária para os testes é demonstrada na tabela 4.4:

		Veios 1 e 2-Modelo de Bico	Veio 3-Teste-Modelo de Bico
Zona 1	Face – Bico 1	486	486
	Canto - Bico 1	-	2045
	Face – Bico 2	486	486
	Canto - Bico 2	-	1545
	Face – Bico 3	444	444
	Canto - Bico 3	-	1545
Zone 2	Face - Bicos 1 e 2	BCO	AM2
	Face – Bicos 2 e 4	BCO	AM2

Tabela 4.4. Configuração da refrigeração secundária, dividida em zona 1 e zona 2

#### 4.5.4 Qualidades

Os veios 1 e 2 foram lingotados com as práticas padrões utilizadas atualmente pela empresa.

Como já comentado, um total de quatro corridas foram lingotadas separadamente com o intuito de avaliar cuidadosamente a performance da nova configuração sem correr riscos da realização de uma produção excessiva de qualidade inferior, o que poderia gerar um alto índice de sucateamento, vindo a comprometer os resultados da empresa.

Para se ter uma base mais sólida de resultados e, sempre buscando obter resultados alinhados aos objetivos da empresa, optou-se por realizar os testes em aços com diferentes características e que fossem mais representativos, tanto em volume de produção como quanto a problemas de sucateamento por qualidade dos tarugos enfrentado internamente na empresa. Então, os quatro testes realizados foram feitos nas qualidades listadas na tabela 4.5.

Tabela 4.5. Estrutura dos testes com as características das qualidades testadas.

Teste	Qualidade	Características
1	SAE 1045	Médio Carbono e Baixo Enxofre
2	SAE 1020	“Peritético”
3	38MnS5	Medio Carbono e Alto Enxofre
4	20MnCr5_mod	“Peritético” e Baixo Enxofre

Sendo suas composições químicas demonstradas na tabela 4.6.

Testes	Qualidade	%-C	%-Si	%-Mn	%-P	%-S	%-Cr	%-Ni	%-Mo	%-Al	%-Cu	%-V
Teste 1	SAE 1045	0.44	0.25	0.64	0.016	0.022	0.06	0.08	0.02	0.016	0.16	0.001
Teste 2	SAE 1020	0.18	0.19	1.24	0.024	0.017	0.15	0.13	0.02		0.13	-
Teste 3	38MnS5	0.40	0.57	1.45	0.025	0.040	0.15	0.06	0.02	0.010	0.14	0.04
Teste 4	20MnCr5mod	0.14	0.20	1.10	0.016	0.014	1.03	0.13	0.04	-	0.14	-

Tabela 4.6. Composição química das qualidades do testes.

#### 4.5.5 Amostragem

Com o objetivo de se conseguir dados para análise dos resultados das qualidades dos tarugos, o planejamento para retirada de amostras dentro da aciaria foi desenhado da seguinte forma, conforme seu objetivo e quantidade:

Amostras para análise de Baumann (com 110mm de comprimento) em tarugo, conforme abaixo:

Veio 1: Uma amostra do 2º tarugo e uma amostra do 7º tarugo;

Veio 3: Uma amostra do 2º tarugo e uma amostra do 7º tarugo.

Para análise superficial de tarugos, com ensaio de partículas magnéticas (500mm de comprimento) foram:

Veio 1: Uma amostra do último tarugo;

Veio 3: Uma amostra do segundo tarugo e uma amostra do último tarugo lingotado;

#### 4.5.6 Cuidados com a Rastreabilidade e com Resultados fora da Aciaria

Alguns cuidados foram estabelecidos para garantir uma boa rastreabilidade e consistência dos resultados:

- Entregar em seqüência as três ordens de tarugos para que fossem utilizadas para a laminação do mesmo item (mesmos parâmetros de processo), na mesma campanha de laminação e em seqüência;
- Seguir programação para que as três ordens de tarugos fossem utilizadas para a laminação do mesmo item e na mesma campanha de laminação (em seqüência);
- Garantir todos os padrões críticos de laminação dentro dos limites estabelecidos;
- Abrir tratamento de falha se houvesse alguma anormalidade durante a laminação;

Como variáveis resposta foram utilizadas: defeitos internos, defeitos superficiais e defeitos de forma. Porém, os defeitos de forma foram avaliados somente em tarugos, enquanto os defeitos internos e superficiais foram avaliados tanto em tarugo quanto em barras laminadas. Os quais foram divididos da seguinte forma:

- Defeitos de forma e estrutura interna do tarugo: onde se verificou a romboidade das amostras de tarugos e comportamento das diferentes zonas de solidificação;
- Defeitos internos: avaliação de trincas *off-corner*, porosidades e trincas internas;
- Defeitos superficiais: avaliação através de ensaio por partículas magnéticas (em amostras retiradas do tarugo) e por campo de fuga (sistema automático para barras laminadas).

Algumas outras observações importantes foram levadas em consideração para embasar a quantificação de resultados

- Extração de calor no molde: observada através da diferença de temperatura entre a entrada e a saída da água de molde;
- Temperatura na superfície do tarugo: medida na zona de endireitamento, imediatamente após o extrator e observada na saída dos moldes;
- Oscilação: comportamento da oscilação durante a descida do tarugo;
- Agitação eletromagnética: medida através do comportamento do campo magnético.



## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### 5.1 Observações gerais

Durante toda a etapa dos testes foi feito um acompanhamento minucioso de modo a reduzir ao máximo os ruídos que viessem a comprometer os resultados. Segue no trabalho uma estratificação de resultados e também descritivos das observações realizadas durante a produção no período de testes.

#### 5.1.1 Extração de Calor no Molde

Durante a observação da extração de calor do molde nos testes realizados, foi possível identificar um aumento de temperatura da água de refrigeração de molde entre 0,5 e 1,0 °C, indicando uma maior extração de calor durante o processo de lingotamento. Esta variação da temperatura de água do molde foi obtida através do teste realizado com uma vazão de água ajustada para 2200l/min durante a primeira corrida. Nos subseqüentes testes realizados, o fluxo foi reduzido conforme o padrão utilizado nos outros dois veios mantendo o ajuste da vazão de água de molde em 2050l/min, o qual foi possível observar variações de temperatura similares ao teste com 2200l/min.

#### 5.1.2 Temperatura na Superfície do Tarugo

Dependendo da qualidade de aço se adota diferentes estratégias de refrigeração secundária. Com a nova configuração, se notou uma melhor homogeneidade de temperatura na face do tarugo na região da refrigeração secundária, como pode ser observado na figura 5.1.



Atual

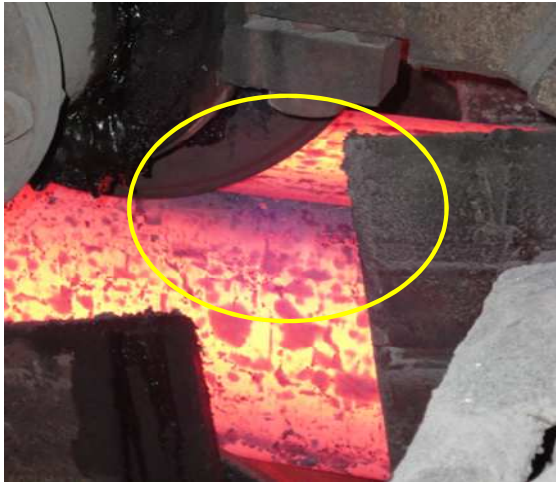


Teste

Figura 5.1. Figura comparando a variação da temperatura da pele do tarugo lingotado com o molde atual e com a nova configuração (teste).

Na zona de endireitamento (imediatamente atrás do extrator), foram realizadas medições de temperatura nos cantos dos tarugos com pirômetro manual aferido. Para os veios (veio 1 e veio 2) onde se utilizou o molde normal, não pode ser realizada a medição devido ao limite de escala do equipamento (muito baixa). O veio 3, com a nova configuração, mostrou um comportamento diferente, com temperaturas mais altas onde foi possível ser feita a medição. Nas temperaturas medidas no canto dos tarugos, observou-se um aumento na ordem entre 20 a 60°C. Esta observação pode ser constatada devido ao raio de canto maior no molde com a nova configuração. Sendo assim, esta análise pode ser considerada como um benefício alcançado com a nova configuração, gerando menos tensão nesta zona de endireitamento em virtude do raio de canto maior, onde a diferença de temperatura entre face e canto do tarugo se fica menor.

Na figura 5.2 pode ser observada a diferença de temperatura nos cantos dos tarugos lingotados com a nova configuração e com o molde atual.



Atual



Teste

Figura 5.2. Figura comparando as temperaturas nos cantos do tarugo lingotado com o molde atual e com a nova configuração (teste).

### 5.1.3 Agitação Eletromagnética

Em relação à agitação eletromagnética no molde, conforme discutido na literatura (Halliday, 1971), quando ocorre uma redução na espessura da parede do molde, e com isso um aumento da permeabilidade magnética. Observou-se neste trabalho um aumento de aproximadamente 15%, em Gauss, na intensidade do campo, conforme mostra a figura 5.3.

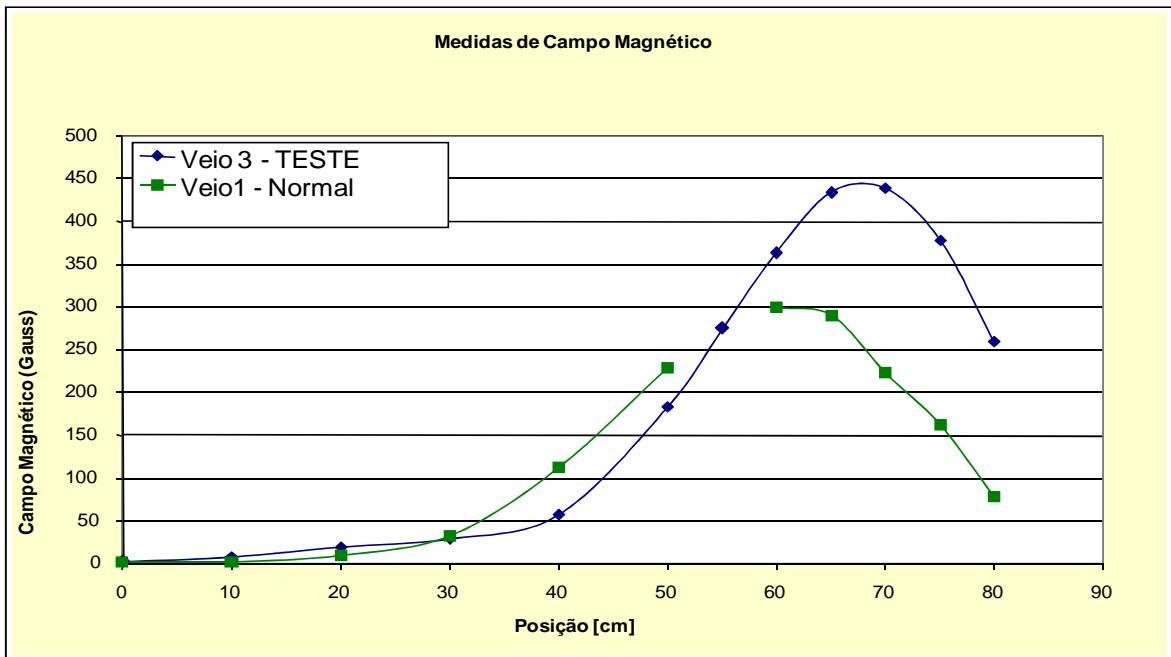


Figura 5.3. O gráfico mostra as diferenças dos valores de campo magnético para a configuração teste e normal.

Também foi possível se verificar um aumento da zona equiaxial nas amostras que foram analisadas posteriormente através de amostras por ensaio Baumanns.

#### 5.1.4 Defeitos de Forma nos Tarugos

Foram verificados possíveis defeitos de forma das amostras na sala de análises. Os tarugos foram observados visualmente, nenhuma ocorrência de defeito foi encontrada.

Também foi possível verificar uma boa precisão das amostras em relação às suas respectivas dimensões, ficando todas as dimensões observadas dentro do padrão de tolerâncias. O tamanho da seção transversal dos tarugos produzidos com o molde teste e os produzidos com o molde padrão é similar, conforme pode ser visto na tabela 5.1, onde o número do veio é indicado pelo primeiro dígito da amostra e os outros dois dígitos mostram a posição do tarugo durante o lingotamento. (ex. “amostra 102” – amostra do veio 1, segundo tarugo).

Tabela 5.1. Medições realizadas para análise de romboidade

Testes	Amostras	Largura	Altura	Romboidade
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]
1 Grade SAE 1045	102	242.0	239.2	4.2
	106	240.3	240.0	0.8
	302	241.0	240.8	2.0
	308	240.2	239.6	0.6
2 Grade SAE 1020	102	239.9	240.6	2.5
	302	239.9	240.9	2.4
	307	239.9	240.0	3.7
3 Grade 38MnS5	102	240.1	239.9	2.5
	106	240.6	239.6	2.7
	302	239.9	240.5	2.5
4 Grade 20MnCr5	102	239.9	240.6	1.8
	105	239.6	241.6	2.5
	302	239.9	240.6	2.5
	306	240.6	239.5	2.3

### 5.1.5 Análise de Defeitos Superficiais em Tarugos

As análises de defeitos superficiais em tarugos foram realizadas via ensaio de partículas magnéticas, a partir de amostras dos tarugos produzidos com aproximadamente 500mm de comprimento, comparando-se o desempenho dos tarugos produzidos com a configuração normal e a configuração teste. Em todas as análises, nenhuma outra incidência de defeito foi constatada. Segue a figura 5.4 mostrando a comparação entre as amostras retiradas de tarugos com a configuração normal (veio 1) e com a nova configuração teste (veio 3). Dentro dos quadros de cada teste, as fotos da direita são das amostras após uma decapagem mecânica para retirada de carepa e as da esquerda são durante o ensaio de partícula magnética.

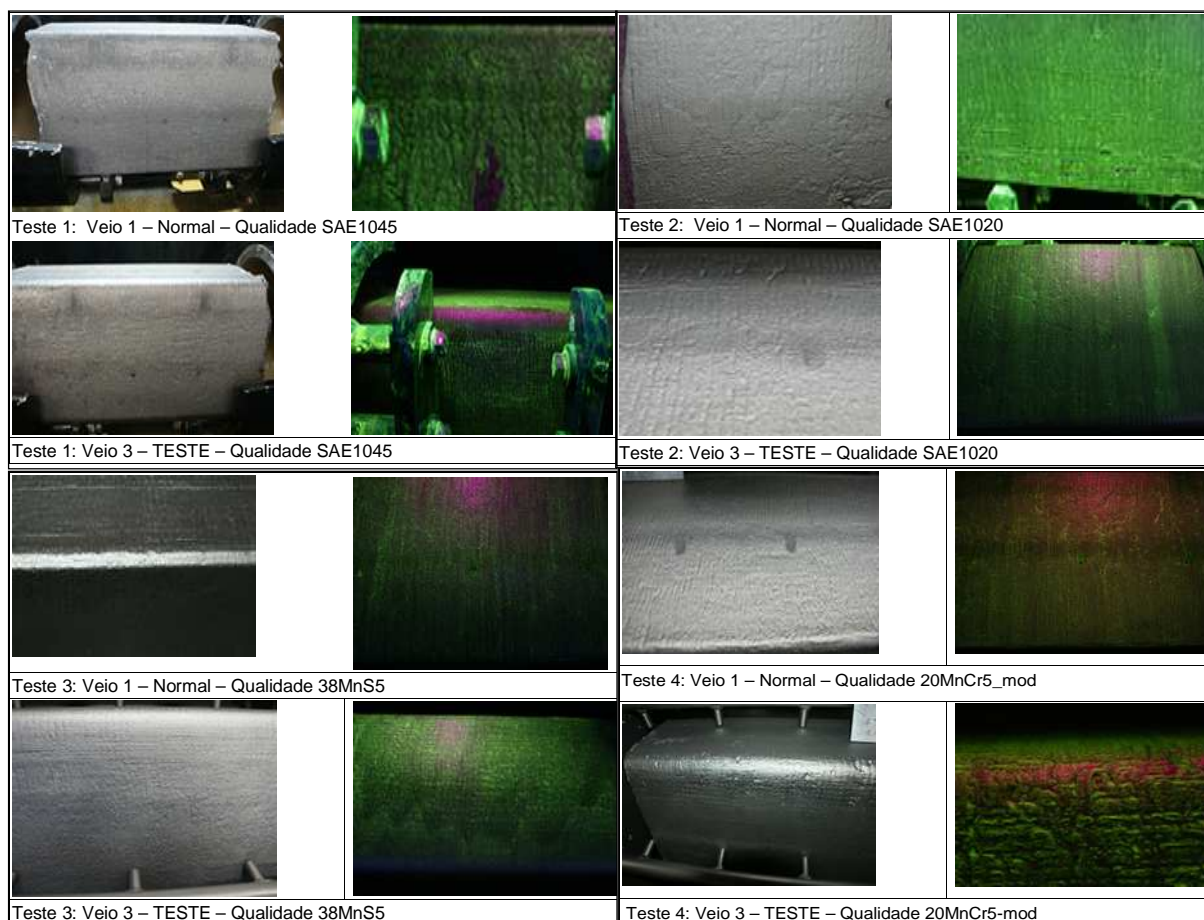


Figura 5.4. Fotos de amostras de tarugos, mostrando o comparativo entre os testes realizados

### 5.1.6 Análise de Defeitos Superficiais em Barras

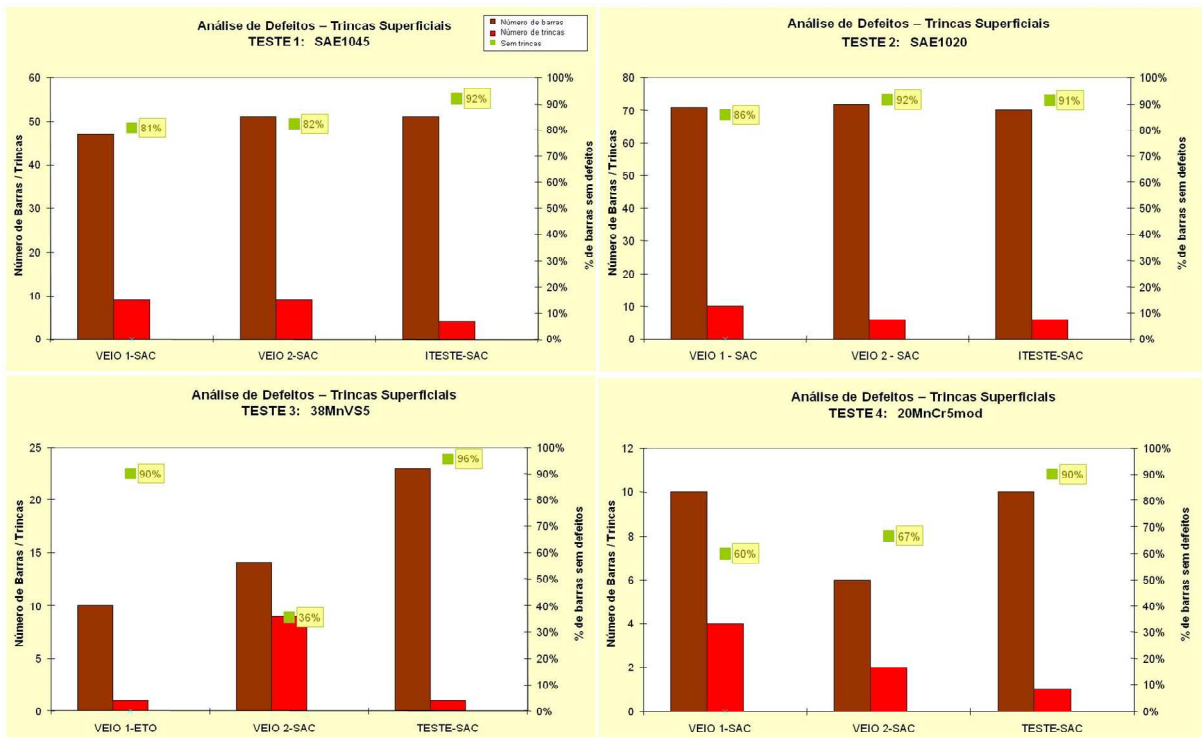
Como discutido anteriormente, alguns tipos de trincas superficiais tem seu início durante o processo de lingotamento contínuo. Para esta análise, foram utilizados diferentes tipos de classificação de tratamento de superfície antes da laminação, que são definidos abaixo:

- SAC: Tarugo sem acabamento
- ECA: Tarugo com esmerilhamento de canto
- ETO: Tarugo com esmerilhamento total

Os quatro testes realizados foram analisados e processados conforme a indicação da tabela 5.2 e tem seus resultados expressos na figura 5.5.

Tabela 5.2. Programação das inspeções e seus resultados

Teste	Veio e Acabamento do Tarugo	Quantidade de Barras Inspeccionadas	Quantidade de Trincas Encontradas	% Barra sem Trincas (Barras boas)
1	Veio 1-SAC	47	9	81%
	Veio 2-SAC	51	9	82%
	Teste-SAC	51	4	92%
2	Veio 1-SAC	71	10	86%
	Veio 2-SAC	72	6	92%
	Teste-SAC	70	6	91%
3	Veio 1-ETO	10	1	<b>90%</b>
	Veio 2-SAC	14	9	36%
	Teste-SAC	23	1	<b>96%</b>
4	Veio 1-SAC	10	4	60%
	Veio 2-SAC	6	2	67%
	Teste-SAC	10	1	90%



### 5.1.7 Análise de Defeitos Internos em Barras e Tarugos

Algumas pequenas trincas de canto foram observadas nos tarugos da qualidade SAE1045 em todas as amostras, tanto no molde normal quanto no molde teste. As trincas foram observadas a aproximadamente entre 22 e 25mm da superfície. Nas amostras retiradas, não foi encontrada nenhuma trinca interna, nem nas que foram retiradas de tarugos produzidos com o molde normal e nem tão pouco das originadas de tarugos lingotados a partir do molde teste.

## 6. CONCLUSÕES

- Os resultados mostram uma diminuição na frequência de trincas superficiais utilizando a nova configuração de molde;
- Não foram verificadas alterações na quantidade e morfologia de defeitos internos, com exceção de um aumento da zona equiaxial, o que é considerado um benefício obtido em função do aumento da performance do agitador eletro magnético;
- As principais melhorias esperadas foram atingidas, principalmente pelas observações feitas com relação ao aumento da temperatura de superfície do canto do tarugo durante a etapa de endireitamento, o que era esperado em função do maior raio de canto na nova configuração. Também foi verificado uma melhor uniformidade de temperatura ao longo da face do tarugo na região da refrigeração secundária;
- Para a qualidade 38MnS5, que é uma qualidade muito crítica para trincas superficiais, observou-se que as barras originadas a partir de tarugos lingotados com a nova configuração de molde e, sem esmerilhamento prévio do tarugo, tiveram resultados de qualidade superficial similares as barras que foram laminadas a partir de tarugos lingotados com molde de geometria padrão, os quais, atualmente, são previamente esmerilhados.



## **7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

– Realizar monitoramento com termopares do novo conceito de molde apresentado neste trabalho;

– Realizar estudo para redução de materiais que precisam de esmerilhamento, considerando os resultados do uso da nova configuração de molde apresentados neste trabalho.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

THOMAS, B.G., **Continuous Casting**, *The Encyclopedia of materials: Science and Technology*. Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, v.2, p. 1595-1599, 2001.

GSCHWENTER, V. L. S. **Correlação Entre Parâmetros de Solidificação e Formação Estrutural de Aços Especiais Produzidos Pelo Processo de Lingotamento Contínuo**. Dissertação para Obtenção do Título de Mestre em Engenharia UFRGS. Porto Alegre, 2009.

SANTOS, C.A.; Garcia, A.; Frick, C.; Spim, J. A., **Evaluation of Heat Transfer Coefficients Along the Secondary Cooling Zones in the Continuous Casting of Steel Billets**. *Inverse Problems in Engineering*, vol. 14, n. 6, pp. 687-700, (2006).

THOMAS, G. & LI. **“Maximum casting speed for continuous cast steel billets bases on sub-mold bulging computation”**. *85<sup>th</sup> Conference Proceedings, ISS*, p. 109-130. 2002.

PARK J.K.; THOMAS, B.G. & SAMARASEKERA, I.V. **“Analysis of thermomechanical behaviour in billet casting with different mould corner radii”**. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 29, n. 5, p. 359-375, 2002.

SAMARASEKERA, I.V.; CHANDRA, S.; CAMPBELL, A.Z. & BRIMACOMBE, K.J. **“Mould shape, heat transfer and mould strand interactions in the casting off steel billets”**. Conference on Continuous Casting of Ssteel in Developing Countries, Beijin, China, 1993.

SZEKERES, E.S. **“Overview of mold oscillation in continuous casting. Brimacombe Continuous Casting Course”**, v.II, 2002

BRIMACOMBE, J.K.; HAWBOLT E.B. & WEINBERG, F. **“Formation of off-corner internal cracks in continuously-cast billets”**. *Canadian Metallurgical Quaterly*, v.19, p. 215-227, 1980.

CHOW, C. & SAMARASEKERA, I.V. **“High speed continuous casting of steel billets Part 1: General overview”**. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 29, n. 1, p. 53-60, 2002.

GARCIA, A.; Spim, J.A.; Santos, C.A.; Cheung, N. **Lingotamento contínuo de aços**. Associação Brasileira de Metalurgia, São Paulo, SP.(2006)

BARCELOS, V.K; **Apostila do Curso de Lingotamento Contínuo dos Aços**, ABM, 2011.

PIERER, R.; Bernhard. C.; **“The Nature of Internal Defects in Continuously Cast Steel and their Impact on Final Product Quality”**. University of Leoben,, Austria, p.193-203. 2010.

**BRIMACOMBE CONTINUOUS CASTING COURSE (BCCC)**, 2008

HO, K., Pehlke, R.D. **“Mechanisms of heat transfer at a metal-mold interface”**. *AFS Transactions*, V. 92, p. 587 - 598. (1984).

[http://www.gerdau.com.br/gerdauacosespeciais//afp/afp\\_producao\\_zoom.asp](http://www.gerdau.com.br/gerdauacosespeciais//afp/afp_producao_zoom.asp)  
acessado em 22.04.11 às 19:05 h.

SAMARASEKERA, I.V., BRIMACOMBE, J.K. , “**Thermal e and mechanical behavior of continuous billet molds**”. In: BRIMACOMBE (1982), V. 4, pp.117-125.

LAIT, J.E., BRIMACOMBE, J.K., “**Solidification during continuous casting, ISS Transactions**”, v.1, p. 1-13, 1982.

FERNANDES, P.C. **Otimização dos Parâmetros de Lingotamento Contínuo para Minimizar a Ocorrência de Trincas Superficiais no Aço DIN-20MnCr5 Modificado**. Dissertação para Obtenção do Título de Mestre em Engenharia UFRGS. Porto Alegre, 2004

TACONI, L. L. **Análise Térmica do Molde de Lingotamento Contínuo de tarugos**. Dissertação para Obtenção do Título de Mestre em Engenharia REDEMAT. Ouro Preto, 2007

NOGUEIRA, V.H. **Material de Treinamento Interno – Gerdau Charqueadas, Charqueadas, 2006**

SAMARASEKERA, I.V. “**The Making, Shaping and Treating of Steel**”, 11ª Edition, Casting Volume, 17, Continuous Casting of Steel billets, 2003

BARCELLOS, V. K. **Análise da Transferência de Calor Durante a Solidificação de Aços em Moldes no Lingotamento Contínuo de tarugos**. Dissertação para Obtenção do Título de Mestre em Engenharia UFRGS. Porto Alegre, 2007

FUKADA, N.; Marukawa, Y.; Abe, K.; Ando, T. “**Development of mold (HS-Mold) for high speed casting. Canadian Metallurgical Quarterly**”, V. 38, Nº 5, pp. 337-346. (1999).

KLAUS SCHWERDTFEGER **Short course on issues in caster operation, process and quality control (2003)**, p.45-66.

J.K, SAMARASEKERA, I.V., I.V. e LAIT, J.E. “**Contínuous Casting**”. Heat Flow, solidification and Crack Formation. Warrendade: Iron and Steel Society, 1984.v2, p.59-72

Y. AKETA and K. USHIJIMA, "Study on the Mechanism of the Occurrence and the Prevention of Cracks in Continuously Cast Billets of Steel", Tetsu-to-Hagané Overseas, Vol. 2, 1962, pp. 334-343.

MILLS, K. C. “**Mould Powders for Continuous Casting**” - Imperial College. London, 1995.

TOLENTINO, G. **Comportamento de Fluxantes**. Apostila de Treinamento Interno na Gerdau Charqueadas, 2011.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Física, Eletricidade, Magnetismo e Optica**, Parte II, 2ª.Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1971.

N. Grundy, F. Kawa, B. Kündig and M. Hogenschurz, “**From CONVEX Technology® to INVEX®**”, METEC InSteelCon, Düsseldorf, 1-2 June, 2011; Düsseldorf, 2011