



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE MARABÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

ADRIELE DA SILVA SANTOS

ESTUDO DE CASO: CARACTERIZAÇÃO DA ROMBOIDADE NOS
TARUGOS SINOBRAS E AVALIAÇÃO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS
INTRÍNSECOS AO DEFEITO GEOMÉTRICO

MARABÁ
2013

ADRIELE DA SILVA SANTOS

ESTUDO DE CASO: CARACTERIZAÇÃO DA ROMBOIDADE NOS
TARUGOS SINOBRAS E AVALIAÇÃO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS
INTRÍNSECOS AO DEFEITO GEOMÉTRICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Materiais, Campus de Marabá,
Universidade Federal do Pará. Orientador: Prof.
M.Sc. Márcio Corrêa de Carvalho.

MARABÁ
2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Josineide Tavares, Marabá-PA)

Santos, Adriele da Silva.

Estudo de caso: caracterização da romboidade nos tarugos sinobrás e a avaliação dos principais intrínsecos ao defeito geométrico / Adriele da Silva Santos ; Orientador, Márcio Corrêa de Carvalho. – 2013.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia de Materiais, 2013.

1. Engenharia de Materiais. 2. Lingotamento contínuo. 3. Romboidade. I. Título.

CDD - 22 ed.: 620.11

ADRIELE DA SILVA SANTOS

ESTUDO DE CASO: CARACTERIZAÇÃO DA ROMBOIDADE NOS
TARUGOS SINOBRAS E AVALIAÇÃO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS
INTRÍNSECOS AO DEFEITO GEOMÉTRICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Materiais, Campus de Marabá,
Universidade Federal do Pará. Orientador: Prof.
M.Sc. Márcio Corrêa de Carvalho.

Data de aprovação: 16 de agosto de 2013

Banca examinadora:

_____ - Orientador
Prof. M.Sc. Márcio Corrêa de Carvalho – UFPA

_____ - Membro interno
Prof. Esp. Márcio Paulo de Araújo Mafra – UFPA

_____ - Membro interno
Prof. Dr. Edinaldo Teixeira – UFPA

Dedico este trabalho a todos que de
alguma forma contribuíram e
acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

São muitas pessoas que ao longo desses anos de aprendizado deixaram contribuições que com certeza vou levar. É nisso que está o encanto da vida, aprender com as pessoas que nos cercam, com as situações que vivemos, com as dificuldades que enfrentamos.

Agradeço a Deus que me deu o dom da vida e no seu amor incondicional me proporcionou tudo que tenho hoje.

A meus pais e minha irmã que sutilmente foram meus alicerces, minha força minha coragem de permanecer de pé e meu motivo para vencer.

Aos amigos, Renato, Adenilson, Luanda, Rosana e Lydi que perto ou longe fizeram parte desta jornada, que souberam apoiar-me e entender-me nas minhas peculiaridades, e me deram força nos momentos de indecisões e decepções; às amigas Eline e Suely que sempre me lembraram do meu potencial e meus deveres.

A minha amiga Yane que foi minha base de coragem, fé e certeza, que nos momentos de descrença esteve ao meu lado e me fez chegar até o fim.

Ao Bruno Frank que da sua forma soube me fortalecer e tranquilizar-me nos dias tensos.

A Jhol Annes Souza por ser uma peça fundamental na construção deste trabalho e com humildade e paciência me permitir chegar ao fim deste.

“Não basta ter belos sonhos para realizá-los. Mas ninguém realiza grandes obras se não for capaz de sonhar grande. Podemos mudar nosso destino, se nos dedicarmos à luta pela realização de nossos ideais. É preciso sonhar, mas com a condição de crer em nosso sonho; de examinar com atenção a vida real; de confrontar nossa observação com nosso sonho; de realizar, escrupulosamente nossa fantasia. Sonhos, acredite neles.”

(Lenin)

RESUMO

O lingotamento contínuo foi introduzido no cenário mundial com bastante sucesso, gerando um aumento do rendimento, redução dos custos de energia e melhoria da qualidade do produto. Desde então, o lingotamento contínuo tem aumentado sua participação no mundo e tem se tornado um dos processos de solidificação mais importantes.

Este processo é responsável por transformar o aço líquido, vindo da aciaria, em placas ou tarugos que serão posteriormente laminados para comercialização garantindo sua qualidade.

No processo de produção de aços longos via lingotamento contínuo, um dos defeitos mais comuns que comprometem o índice de qualidade das aciarias é a romboidade. A romboidade é determinada pela diferença entre as diagonais da seção transversal do tarugo. É considerada severa se ultrapassar 6 mm a 8 mm. A romboidade pode gerar trincas de canto com ângulo obtuso ou trincas diagonais, além de comprometer as etapas seguintes do processo de produção do aço. Uma série de fatores pode originar a romboidade, entre elas o resfriamento não uniforme do molde (geometria do molde) e na câmara de *sprays*; vazão de água utilizada, pureza da água utilizada, relação Mn/S do aço, dentre outras.

Nesse trabalho foi realizado um estudo de caso para avaliação dos parâmetros que acarretam o surgimento desse defeito, por meio de etapas de observação do comportamento dinâmico do sistema, avaliação dos procedimentos operacionais e das variáveis do processo definindo os elementos causadores dos defeitos sendo possível a elaboração de novos padrões de produção. Os fatores considerados neste trabalho foram as características do molde e seu resfriamento e do resfriamento secundário, e o modo operacional da máquina de lingotamento.

Os resultados encontrados mostram que o dimensionamento do molde e seu desgaste durante o processo são as variáveis que mais acentuam a formação de defeito geométrico durante a solidificação do tarugo.

Palavras-chaves: Lingotamento contínuo, qualidade, romboidade, variáveis.

ABSTRACT

The continuous casting was introduced on the world stage with great success, generating increased revenue, reduced energy costs and improved product quality. Since then, continuous casting has increased its stake in the world and has become one of the most important processes of solidification.

This process is responsible for turning the liquid steel from the steel mill, plates or billets that are subsequently rolled to ensure marketing quality.

In the process of production of long steel through continuous casting, one of the most common defects that compromise the quality index of the steelworks is romboidity. The romboidity is determined by the difference between the diagonals of the cross section of the billet. It is considered severe if it exceeds 6 mm to 8 mm. The romboidity can generate broken corner obtuse angle or diagonal cracks and compromise the steps of the process for producing steel. A number of factors can lead to romboidity, including non-uniform cooling of the mold (mold geometry) and chamber sprays; flow of water used, the purity of the water used, ratio Mn / S steel, among others.

In this paper we present a case study for evaluation of the parameters that cause the appearance of this defect through stages of observation of the dynamic behavior of the system, evaluation procedures operacionaise and process variables defining the elements causing the defects being possible preparation new production patterns. The factors considered in this study were the characteristics of the mold and its cooling and secondary cooling, and operating mode of the machine casting.

The results show that the design of the mold and its wear during the process variables that are more accentuated the formation of geometric defects during solidification of the billet.

Keywords: Continuous casting, quality, romboidity, variables.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Esquema do processo de lingotamento contínuo.....	16
Figura 2 -	Ilustração dos três sistemas metalurgicos, panela, distribuidor e molde, presentes no lingotamento contínuo	18
Figura 3 -	Corte de uma válvula gaveta da panela de aço	19
Figura 4 -	O molde.....	21
Figura 5 -	Representação do tarugo romboide.....	29
Figura 6 -	Representação da contração do tarugo.....	30
Figura 7 -	Representação da casca do molde deformada.....	30
Figura 8 -	Causas do Sucateamento.....	33
Figura 9 -	Fluxograma resumido da metodologia de trabalho.....	34
Figura 10 -	Molde desgastado para análise	36
Figura 11 -	Resumo das temperaturas das corridas romboides	37
Figura 12 -	Passagem dos veios nos rolos	38
Figura 13 -	A – visão inferior dos spray ; B - visão frontal dos spray	39
Figura 14 -	Produção romboide mensal por tipo de aço.....	40
Figura 15 -	Relação Mn/S por tipo de aço.....	41
Figura 16 -	Romboidade por veio operante	41
Figura 17 -	Produção de romboidade por turno.....	42
Figura 18 -	Vida util dos moldes	43
Figura 19 -	Passagem do veio encostado na aba do rolo guia	44
Figura 20 -	Posição do veio nos spray	44
Figura 21 -	Rolos guias para centralização.....	45
Figura 22 -	Passagem do veio centralizado	45
Figura 23 -	Bicos de spray retirados	46
Figura 24 -	Valores da vazão no resfriamento secundário	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Justificativa	13
1.2	Objetivos geral	14
1.3	Objetivos específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Histórico.....	15
2.2	Produtos do lingotamento contínuo de aços.....	15
2.3	Descrição do processo de lingotamento contínuo	16
2.4	Principais partes de um sistema de lingotamento contínuo.....	18
2.4.1	Panela.....	18
2.4.2	Válvula gaveta da panela de aço	19
2.4.3	Carro porta-distribuidor.....	19
2.4.4	Distribuidor.....	20
2.4.5	Válvula gaveta do distribuidor	20
2.4.6	Molde.....	20
2.4.7	Segmentos.....	21
2.4.8	Máquina de corte	22
2.5	Influência de algumas variáveis no processo de lingotamento.....	22
2.5.1	Material do molde.....	22
2.5.2	Coninidade do molde.....	23
2.5.3	Comprimento do molde	24
2.5.4	Velocidade da água de resfriamento do molde.....	24
2.5.5	Velocidade de lingotamento	25
2.5.6	Temperatura de vazamento do aço	26
2.5.7	Características do resfriamento secundário	27
2.6	Defeitos dos produtos lingotado	27
2.6.1	Defeitos de forma	28
2.6.2	Defeitos superficiais	28
2.6.3	Defeitos internos.....	28
2.7	Romboidade	28
2.7.1	Mecanismo de formação da romboidade.....	30

2.7.2	Fatores que afetam a formação da romboidade	31
2.7.2.1	Resfriamento assimétrico do lingote na região do molde	31
2.7.2.2	Varição da dimensão do molde.....	31
2.7.2.3	Lubrificação do molde.....	31
2.7.2.4	Resfriamento deficiente na região de chuveiros.....	31
2.8	Caracterização da empresa	32
2.8.1	Maquina de lingotamento contínuo da sinobras	32
3.	MATERIAIS E METODOLOGIA	34
3.1	Avaliação dos parâmetros do lingotamento contínuo.....	34
3.2	Auditoria do processo.....	35
3.3	Checagem de itens críticos	35
3.3.1	Parâmetros de molde	36
3.3.1.1	Dimensionamento do molde.....	36
3.3.1.2	Refrigeração do molde.....	36
3.3.1.2.1	Temperatura e vazão da água	36
3.3.2	Alinhamento dos veios e rolos guias	38
3.3.3	Parâmetros de resfriamento secundário.....	38
3.3.3.1	Disposição e qualidade dos sprays de jatos	38
3.3.3.2	Vazão da água de resfriamento.....	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
4.1	Característica do aço.....	40
4.1.1	Composição química	40
4.1.2	Relação Mn/S	40
4.2	Veios em operação.....	41
4.3	Auditoria do processo.....	42
4.4	Dimensionamento do molde.....	42
4.5	Temperatura e vazão da água do molde	43
4.6	Alinhamento dos veios e rolos guias	43
4.7	Disposição e qualidade dos spray de jatos	46
4.8	Vazão da água de resfriamento	46
5	CONCLUSÕES	47
6.	REFERÊNCIAS	49

1. INTRODUÇÃO

O advento da máquina de lingotamento contínuo trouxe benefícios consideráveis principalmente em termos de qualidade do produto obtido. Consiste da utilização de três reatores: a panela, o distribuidor e o molde. A panela recebe o aço proveniente do processo de refino e alimenta o distribuidor, cuja função é manter o nível de aço durante a troca de panelas e distribuí-lo para os veios que alimentam os moldes. Neste acontece a solidificação em tarugos que serão posteriormente laminadas.

Como a exigência pela qualidade está se tornando a cada dia um fator decisivo na competitividade das empresas, a busca por meios que garantam a qualidade dos produtos e serviços fornecidos passa a ser um foco constante das equipes envolvidas neste tipo de atividade.

Um dos problemas específicos do lingotamento contínuo de aços é a formação de tarugos com romboidade, que se define como um defeito geométrico onde as dimensões das diagonais do produto são irregulares, este defeito é identificado no tarugo a partir de procedimentos amostrais ao final do processo.

Identificar as variáveis do processo que influenciam na formação da romboidade é de suma importância para minimizar as perdas por sucateamento, e o conhecimento prévio destas variáveis é de fundamental importância para a produção de um produto lingotado de alta qualidade.

1.1 JUSTIFICATIVA

A indústria siderúrgica passa por uma revisão de seus processos, a fim de obter produtos com elevados níveis de qualidade superficial e interna. No ano de 2012 a SINOBRAS apresentou altos índices de defeitos geométricos em seus tarugos chegando a uma margem de 1600 corridas bloqueadas por romboidade.

Nesse sentido, torna-se evidente a necessidade de analisar e definir quais as variáveis do processo responsáveis pela produção de defeitos buscando uma solução imediata para minimização das perdas.

1.2 OBJETIVOS GERAL

Realizar um estudo sobre o defeito de forma do tarugo SINOBRAS, oriunda do processo de solidificação, denominada romboidade, e avaliar seu mecanismo de formação e os fenômenos relacionados ao processo de solidificação do aço.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICO

O estudo de caso do presente trabalho visa listar e verificar os principais causadores de romboidade nos tarugos SINOBRAS, avaliando as variáveis do processo e seus procedimentos operacionais a fim de sanalos através de um tratamento de falhas nos motivos mais latentes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO

O conceito inicial de lingotamento contínuo surgiu no século XIX. Entretanto, a engenharia da época e a indisponibilidade de recursos, permitiram que as idéias concebidas por G.E. Sellers (1840), J. Laining (1843) e H. Bessemer (1846) fossem utilizadas em baixa escala e para metais não ferrosos com baixo ponto de fusão. Em 1887, o alemão R.M. Daelen propôs a primeira planta com desenho que corresponde às atuais máquinas de lingotamento, que incluía um molde refrigerado a água, aberto no topo e no fundo, alimentado por um fluxo contínuo de metal líquido, refrigeração secundária, barra falsa, rolos extratores e um aparelho de corte para o veio. S. Junghaus (1950), desenvolveu estudos sobre lingotamento contínuo de metais e conseguiu produzir ligas de cobre e alumínio por este processo. Ainda foi responsável pelo desenvolvimento do sistema de oscilação do molde. A partir de 1950, intensificaram-se os estudos acerca de novas tecnologias e melhorias no processo. Em 1955, a primeira máquina de lingotamento contínuo de aço em escala industrial entrou em operação na Rússia. No Brasil, data de 1960 o início da utilização de máquinas de lingotamento contínuo de tarugos e de 1976 a primeira máquina de placas (1).

Com essas pesquisas e as inúmeras patentes criadas, a máquina de lingotamento contínuo foi introduzida no cenário mundial com bastante sucesso, e isso se deve a alguns fatores: aumento do rendimento, eliminação de fornos poços e laminadores desbastadores, redução dos custos de energia e melhoria da qualidade do produto. Desde então, o lingotamento contínuo tem aumentado sua participação no mundo e tem se tornado o processo de solidificação mais importante.

2.2 PRODUTOS DO LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE AÇOS

Segundo Inving (1993), Os principais produtos do lingotamento de aço são:

- Tarugo: tem secção transversal quadrada de no máximo 150 mm ou secção transversal circular de no máximo 150 mm de diâmetro.

- Blocos: tem secção transversal quadrada ou retangular maior que 150 mm até a dimensão de 800 mm x 400mm, respeitando uma razão entre os lados, menor ou igual a 2.

Tarugo com secção transversal circular maior que 150 mm de diâmetro também é considerado como bloco.

- Placas: São considerados os lingotes com razão de lado da secção transversal maior do que 2.

- Placas finas: a espessura do lingote varia de 20 a 80 mm.

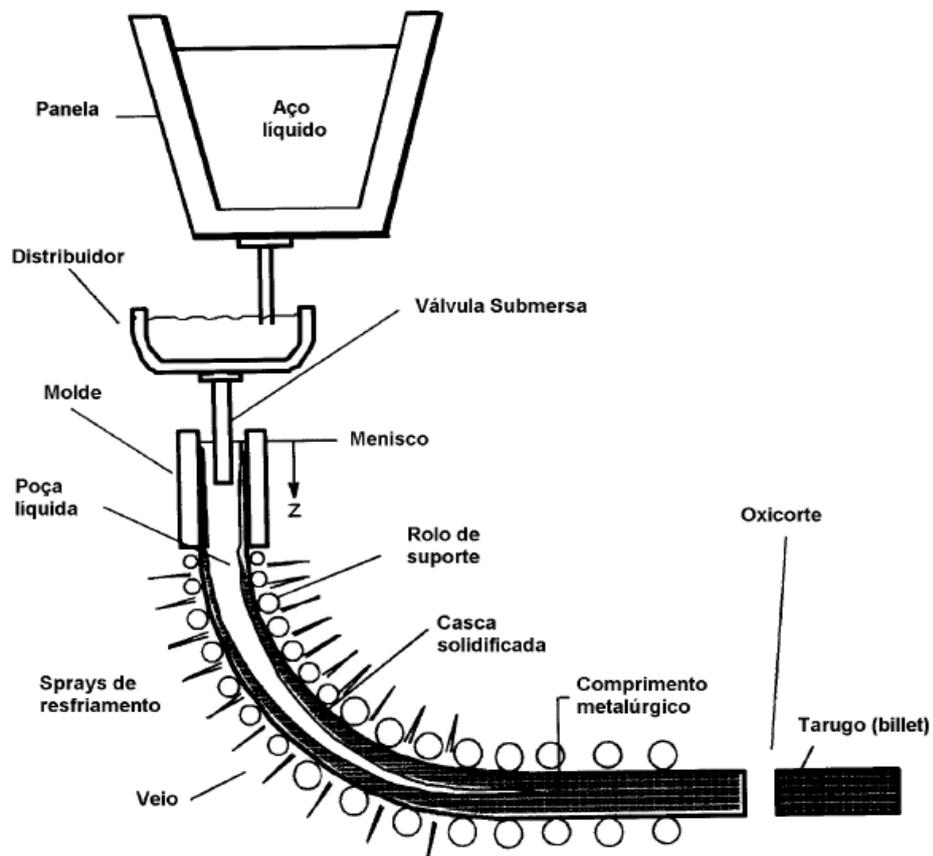
- Tiras finas: tem espessura na faixa de 0,1 a 20 mm.

2.3 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO

O lingotamento contínuo tem como função primordial 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 (2).

O processo de lingotamento contínuo é mostrado esquematicamente na figura 1.

Figura 1 - Esquema do processo de lingotamento contínuo

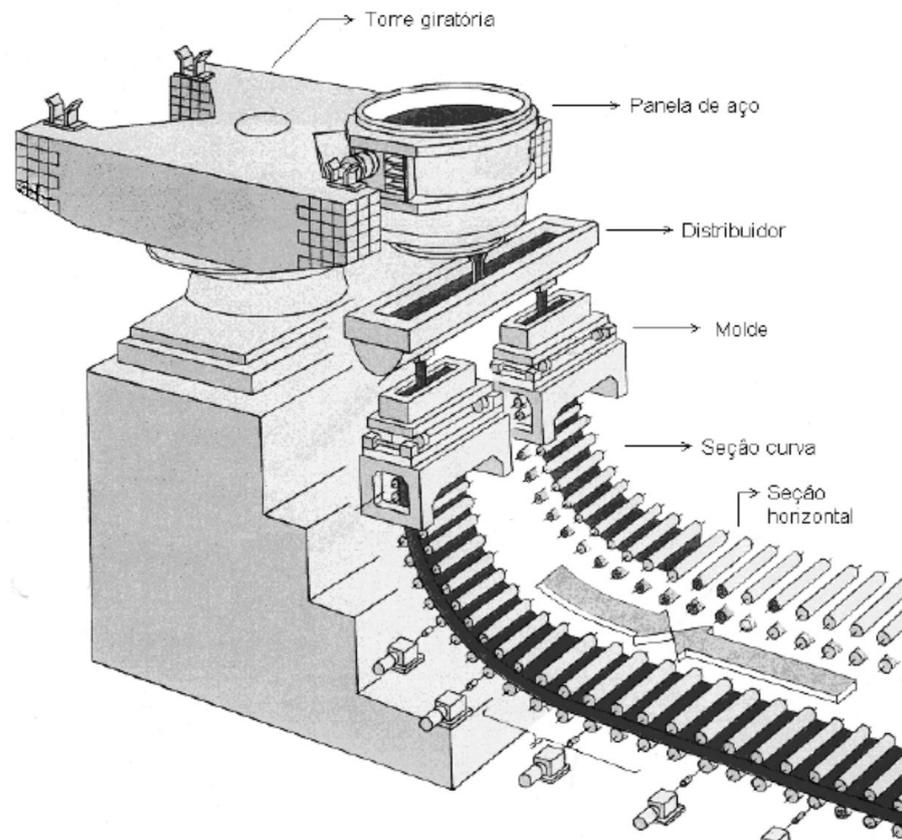


Neste processo, o aço líquido é vazado de uma panela para um reservatório denominado “tundish” (ou distribuidor) e deste para o molde. O distribuidor irá armazenar aço líquido suficiente para promover um fluxo contínuo de aço para o molde, mesmo durante a troca de panelas. Além desta função, o distribuidor funciona como uma estação de refino para flotar inclusões.

O molde, por sua vez é resfriado a água, dando início ao processo de refrigeração primária, onde é formada uma casca sólida que envolve o núcleo ainda líquido. Para evitar a aderência dessa casca com as paredes do molde, são aplicados lubrificantes na forma de óleos ou pós, elaborados para se adequarem às mudanças bruscas nas condições de lingotamento (3). Este molde é oscilado verticalmente, de modo a não permitir que esta casca solidificada se agarre à parede da lingoteira. Rolos-guia, posicionados ao longo da máquina em conjunto com uma máquina extratora irão continuamente extrair a casca solidificada a partir do molde a uma taxa, ou melhor, velocidade de lingotamento, que corresponde à taxa de entrada do aço no molde. Desta forma, o nível de aço no molde irá permanecer constante. Esse fluxo de aço é controlado por um sistema de placas deslizantes que irão restringir ou não a passagem do aço para o molde. Este controle é feito a partir de um sinal enviado por um sensor que detecta o nível de aço no molde.

Abaixo do molde, a casca solidificada terá uma espessura entre 6 e 20 mm (2), suportando o líquido remanescente que será solidificado a partir de um conjunto de sprays dispostos ao longo do raio da máquina e que irão jogar água contra a superfície do tarugo. A vazão de água nos sprays é ajustada para permitir uma correta temperatura superficial do tarugo de modo a ocorrer um mínimo reaquecimento da superfície, até que todo o aço esteja solidificado. Esta vazão deve ser também tal que, no momento em que este tarugo é cortado através da máquina de oxicorte, todo o aço esteja completamente solidificado. Existem, por fim, diferentes processos de lingotamento contínuo que irão produzir diferentes seções em diferentes formas e tamanho, de acordo com o produto final objetivado.

Figura 2 – Ilustração dos três sistemas metalúrgicos, panela, distribuidor e molde, presentes no lingotamento contínuo.



Fonte: BARBOSA,2002 (4).

2.4 PRINCIPAIS PARTES DE UM SISTEMA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO

Para poder entender o processo e funcionamento do lingotamento contínuo, devem-se saber quais são os elementos que fazem à composição da máquina e qual a função de cada elemento (5).

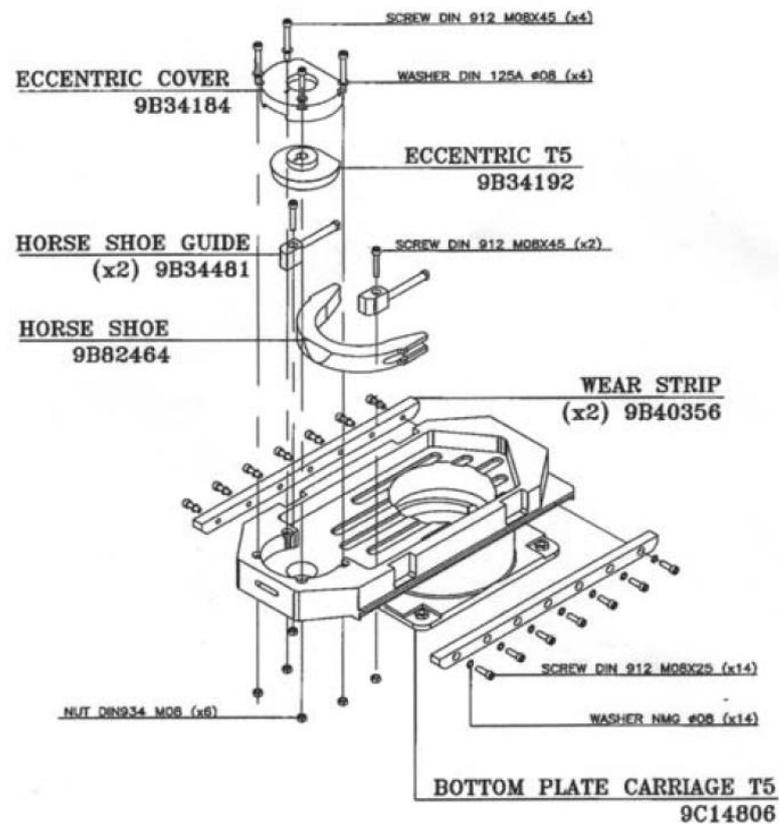
2.4.1 PANELA

Tem como função básica o transporte do aço líquido da aciaria para o lingotamento; possui uma válvula, tipo gaveta em sua parte inferior, uma das responsáveis pelo fluxo do aço no lingotamento contínuo. A panela não é apenas um reservatório, pois, em geral, são realizados tratamentos de ajustes finos na composição química e na temperatura dos aços. Esses processos são conhecidos como metalurgia de panela ou refino secundário.

2.4.2 VÁLVULA GAVETA DA PAINELA DE AÇO

Equipamento instalado na parte inferior da painela de aço responsável pelo controle da vazão do aço da painela de aço para o distribuidor. O controle da vazão se dá através do deslocamento das placas sobrepostas (placas deslizantes). A Figura 3 mostra uma válvula gaveta em corte.

Figura 3 – Corte de uma válvula gaveta da painela de aço



Fonte: V & M Tubes, 2007

2.4.3 CARRO PORTA-DISTRIBUIDOR

É um equipamento responsável pelo transporte do distribuidor entre o pré-aquecedor e os moldes e ainda, pela sustentação do distribuidor sobre o molde durante o lingotamento. É utilizado para inspeções e reparos durante a posição de aquecimento.

2.4.4 DISTRIBUIDOR

É um aparelho instalado entre a panela de aço e o molde, tendo a finalidade de distribuir o aço líquido nos veios da máquina de lingotamento contínuo, proporcionando condições de controle e vazão para o molde, manter a continuidade do processo durante a troca de panelas, realizar ajustes na composição química, bem como para promover a remoção de inclusões. Contudo, para se conseguir melhorar a limpidez do aço no distribuidor é necessário direcionar corretamente o fluxo do aço, de forma a maximizar a flotação das inclusões, minimizar o volume de aço estagnado, volume morto, e eliminar a formação de vórtice(4).

2.4.5 VÁLVULAS GAVETA DO DISTRIBUIDOR

São válvulas localizadas na parte inferior do distribuidor sendo uma por veio, que tem a função de controlar a vazão para o molde, mantendo um nível constante.

2.4.6 MOLDE

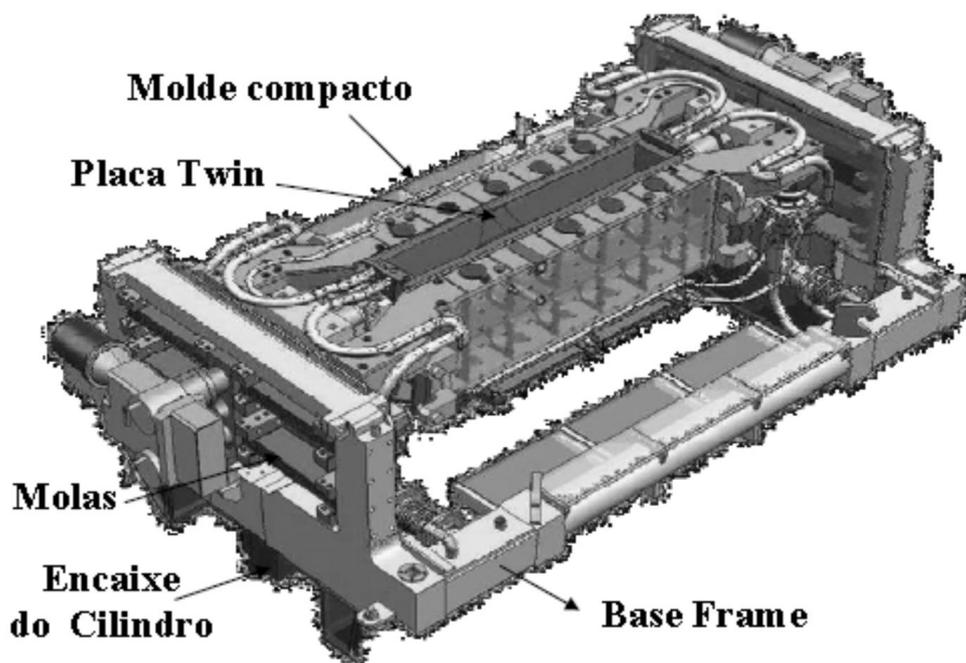
Outro equipamento importante é o molde. Ele é construído normalmente em cobre de alta pureza e possui refrigeração à água. A função principal deste equipamento é promover a solidificação inicial do aço.

O molde é usinado de um bloco inteiriço (para tarugos) ou constituído de um conjunto de placas mantidas firmemente juntas (para placas). Dentro das paredes do molde circula água, que permite o seu resfriamento.

No molde é feita a extração de calor do veio de aço. O veio deve sair do molde com uma camada solidificada que tenha resistência suficiente para que ele não se rompa, nem haja o abaulamento da sua superfície devido à pressão ferrostática. Assim, o comprimento do molde e a velocidade de extração do veio devem ser regulados de forma a permitir que se forme uma camada solidificada de espessura adequada dentro do molde.

Um perfil térmico típico da parede do molde, assim como perfis do fluxo de calor através das superfícies interna e externa da parede do molde são apresentados na Figura 4.

Figura 4 - O Molde



Fonte: CST, 2006

Para uma operação adequada, as características do molde (tipo de material e dimensões), as características do pó fluxante, a profundidade e geometria da válvula submersa, além dos parâmetros de oscilação (frequência e amplitude) e a intensidade da agitação eletromagnética, são os principais parâmetros que devem ser controlados (6).

2.4.7 SEGMENTOS

Logo que deixa o molde, o material é guiado por rolos e o resfriamento se efetua por contato direto com a água(ou água e ar) de uma bateria de sprays. Estas regiões são denominadas resfriamento secundário.

A espessura da pele solidificada vai aumentando ao longo do veio, que é envolvido por rolos guias montados em segmentos.

O resfriamento por sprays deve ser realizado de tal modo que a superfície seja resfriada de forma contínua e tenha uma temperatura mais constante possível em toda a superfície de uma seção transversal da placa. Para facilitar o controle de extração de calor, esta região é dividida em diversas zonas.

2.4.8 MÁQUINA DE CORTE

Efetua o corte automático dos tarugos, através de maçaricos alimentados por gás natural e oxigênio. Os comprimentos são de acordo com as especificações de cada máquina e o marco inicial deve ser após o comprimento metalúrgico, que é o comprimento que o material não contém mais aço líquido em seu interior.

2.5 INFLUÊNCIA DE ALGUMAS VARIÁVEIS NO PROCESSO DE LINGOTAMENTO

O processo de lingotamento contínuo pode ser afetado por uma série de variáveis. No distribuidor tem-se a presença de modificadores de fluxo. No molde tem-se: material do molde, inclinação das paredes internas, comprimento, espessura das paredes, desgaste e distorção, condições de resfriamento, velocidade de lingotamento, temperatura de vazamento do aço, características dos lubrificantes do molde, composição do aço. Na região do resfriamento secundário tem-se uma série de elementos que definem as condições de resfriamento. Em seguida, será analisada a influência de algumas dessas variáveis.

2.5.1 MATERIAL DO MOLDE

Para atender às condições operacionais existentes no processo, o calor de superaquecimento tem de ser transferido para a água de resfriamento; portanto, o molde tem de exibir um nível alto de condutividade térmica; ele também tem de ser suficientemente duro, bem resistente ao desgaste e a danos mecânicos, com uma resistência física definindo sua estabilidade dimensional. Para as temperaturas medidas na parede durante o lingotamento, é necessário que o material do molde conserve uma boa resistência mecânica durante o lingotamento.

Outra propriedade importante é a temperatura de recristalização alta o bastante para impedir o amolecimento do metal. O cobre é o metal que melhor atende a tais exigências, sua liga com pequenas quantidades de fósforo (em torno de 0,030 % de P no molde de Cu) aumenta significativamente a temperatura de recristalização.

Algumas vezes o cobre é ligado com prata (em torno de 0,01 de P, 0,10% de Ag, no molde de Ag - Cu) para aplicações especiais ou com Cromo e Zircônio (cerca de 0,75 % de Cr, 0,10 % de Zr, no molde de Cu - Cr - Zr). Essa última liga de cobre, por causa de suas propriedades físicas e mecânicas superiores, satisfaz aos padrões máximos em termos de liberdade de deformação. De acordo com estudos realizados por Samarasekera et al. (1984),

para uma boa performance o material do molde deve ter uma boa condutividade térmica, limite elástico com estrutura estável à temperatura de trabalho, boa resistência a fadiga e facilidade de usinagem. O cobre e suas ligas são considerados como os materiais que melhor preenchem os diversos requisitos. Existe a possibilidade de mudar o fluxo de calor no molde selecionando materiais com diferentes coeficientes de condutividade térmica.

2.5.2 CONICIDADE DO MOLDE

No passado, moldes eram projetados pelo método de tentativa e erro, começando com lingoteiras isentas de conicidade e progredindo para lingoteiras com dupla conicidade e hoje, lingoteiras com conicidade múltipla ou variável.

A definição da conicidade do molde é calculada pela equação 1 :

$$MT = [(W1 - W2) / W1] * (100 / L) \quad (1)$$

onde:

MT : conicidade do molde (% m-1);

W1: largura interna do molde no topo (m);

W2: largura interna do molde na base (saída do molde) (m).

L: comprimento do molde (m)

As indústrias têm contado cada vez mais com experiências que utilizam moldes instrumentados e modelos matemáticos para se ter uma avaliação mais apurada da conicidade exigida para as características do seu processo. Dentre estes modelos matemáticos incluem-se os modelos para cálculo do perfil térmico e da distorção dinâmica do molde durante operação e ainda para previsão do perfil de contração do tarugo à medida que ele se move no molde.

Estes modelos, citados separadamente em sessões anteriores, têm sido usados com grande sucesso para calcular a conicidade de lingoteiras para o lingotamento de tarugos (7). Conforme Chandra (1993), a quantificação do *gap* entre o molde e o tarugo é o primeiro passo na direção da definição da conicidade do molde.

A conicidade do molde é necessária para acompanhar a distorção do mesmo, causada primeiramente por expansão térmica, e para compensar a contração do tarugo devido à solidificação. As conicidades mais intensas são requeridas no topo do molde, seguido por conicidades menos pronunciadas. Isto se deve ao fato da distorção térmica ser maior no topo

do molde, ao passo que apenas a contração devido à solidificação deve ser levada em consideração próximo à saída do molde (8).

Segundo Chandra (1993), para compensar a contração do tarugo, a distância entre as paredes do molde são reduzidas ao longo do seu comprimento, o que leva à diminuição do *gap* de ar, melhorando a taxa de extração de calor e diminuindo a temperatura do tarugo na saída do molde. Isto reduz a tendência ao reaquecimento da superfície do tarugo na saída do molde e, conseqüentemente, reduz a formação de trinca subsuperficial.

Uma conicidade insuficiente afeta a transferência de calor no molde, e é responsável por alguns defeitos apresentados nas peças obtidas por lingotamento contínuo, tais como: romboidade e trincas longitudinais de quina. Por outro lado, uma conicidade excessiva pode levar ao agarramento do tarugo no molde, provocando o seu desgaste prematuro.

2.5.3 COMPRIMENTO DO MOLDE

O comprimento mínimo que um molde deve ter é aquele que permita a formação de uma casca solidificada com uma resistência mecânica suficiente para que não haja o rompimento do veio. Quanto maior a velocidade de lingotamento, maior deve ser o comprimento do molde. No molde, a maior parte do calor é extraída em sua parte superior, de forma que a função da parte inferior do molde é basicamente de sustentação da camada solidificada do veio.

2.5.4 VELOCIDADE DA ÁGUA DE RESFRIAMENTO DO MOLDE

Segundo Pinheiro (1997), a redução na velocidade da água de resfriamento resulta em um menor coeficiente de transferência de calor na face fria do molde, aumentando, então, a sua temperatura. A variação na velocidade da água de resfriamento simplesmente varia a resistência da interface molde/água de resfriamento, que pouco representa no fluxo total de calor, dominado pela resistência representada pelo *gap* (8).

Apesar de, como colocado, a velocidade da água de resfriamento do molde não exercer influência significativa sobre o fluxo de calor no molde, ela tem forte correlação com o fenômeno denominado *boiling hysteresis*, que tem um papel importante na formação de certos defeitos relacionados ao molde como romboidade, trincas longitudinais de canto e trinca *off-corner* (8). Embora a temperatura de resfriamento da água, tipicamente 30°C, esteja bem abaixo da temperatura de saturação, é possível ocorrer ebulição. Caso o molde esteja

suficientemente aquecido, bolhas de vapor podem nuclear em camadas super aquecidas de água, adjacentes ao molde, em locais de alta temperatura. A agitação criada pelas bolhas vai aumentar localmente a transferência de calor do molde para a água de resfriamento (9).

Sob certas condições haverá a ocorrência de um fenômeno denominado *boiling hysteresis*, levando a ciclos térmicos na superfície do molde. Esta nucleação de bolhas irá favorecer também o depósito de resíduos (*scales*), caso a qualidade da água não seja boa. Estes resíduos tendem a aumentar o efeito do *boiling hysteresis* e introduzem uma resistência térmica adicional, que reduz localmente o coeficiente de calor da face fria do molde. Aços com teores mais altos de carbono são mais propensos à ocorrência de *boiling hysteresis*, já que as temperaturas do molde previstas para aços alto carbono são consideravelmente mais altas em virtude de uma maior extração de calor (9).

Experimentos realizados por Samarasekera (1982), mostraram, para uma mesma condição operacional, presença de *boiling* em aços médio/alto carbono e ausência em aços baixo carbono.

Tanto Samarasekera (1982), quanto Bommaraju (1984), colocam que é esperado que o *boiling* ocorra em uma face independentemente da ocorrência ou não nas demais faces e que isto vai levar a uma alteração local da distorção do molde no plano transversal, levando o molde a tomar uma forma rombóide.

Portanto, parece que a qualidade do tarugo pode ser melhorada através da supressão do borbulhamento intermitente no canal de água. Isso pode ser executado por um método ou por uma combinação de métodos: aumentando-se a velocidade da água, elevando-se a pressão de saída da água, e aumentando-se a rugosidade da superfície para minimizar a histerese ou aumentando-se a espessura da parede. Este mecanismo ainda não considera a influência da temperatura do aço e do raio do canto, os quais também afetam a qualidade do tarugo. Essas variáveis influenciam na transferência de calor afetando a formação da espessura de pele do tarugo.

2.5.5 VELOCIDADE DE LINGOTAMENTO

O fluxo de calor no molde, segundo Taylor (1975), aumenta com a velocidade de lingotamento. A transferência de calor é máxima no nível do menisco. Aqui o aço está em íntimo contato com a parede do molde e está em sua mais alta temperatura. O corpo de aço em formação esfria como resultado desse alto nível de extração de calor contrai e se distancia da parede do molde. Embora o molde seja cônico na direção longitudinal, a conicidade na

região intermediária aparentemente não é suficiente a fim de garantir o mesmo grau de íntimo contato com o corpo de aço em formação. O fluxo térmico diminui na medida em que a folga entre o aço e o tubo de cobre cresce. Não antes do corpo de aço atingir o fundo do molde o fluxo de calor começa a aumentar novamente.

De acordo com Taylor (1975), o ligeiro aumento do fluxo de calor próximo à saída do molde pode ser explicado pela penetração da AGU do resfriamento secundário no gap (espaço) nesta região, onde ocorre dissociação, produzindo FeO e um gás rico em H₂, que tem maior condutividade térmica do que a atmosfera do gap (espaço) na parte superior do molde.

Para maiores velocidades de extração do veio, o tempo de solidificação será pequeno e a pele sólida formada será fina e portanto será empurrada mais facilmente pela pressão ferrostática contra a parede do molde, aumentando assim o fluxo de calor (Kcal/cm² x min) com o aumento da velocidade.

2.5.6 TEMPERATURA DE VAZAMENTO DO AÇO

Observa-se que a temperatura de lingotamento influencia a velocidade de solidificação do aço no molde e esta é mais pronunciada para pequenos tempos de residência, isto é, alta velocidade de lingotamento.

Sob o ponto de vista térmico, o superaquecimento normalmente presente no lingotamento contínuo 20 a 40° 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.

Estudos realizados por Lait et al. (1982), mostram que uma baixa temperatura de vazamento pode levar a um resfriamento prematuro de 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 e aumenta a porosidade.

Para o controle da solidificação no molde de lingotamento contínuo, diversas medidas do fluxo de calor têm sido realizadas. Estas medidas são utilizadas para o cálculo da espessura solidificada e temperatura do aço sólido

2.5.7 CARACTERÍSTICAS DO RESFRIAMENTO SECUNDÁRIO

O resfriamento secundário deve ser planejado visando a manutenção de altas taxas de solidificação sem a geração de tensões que possam causar o aparecimento de trincas ou outros defeitos. Os parâmetros que normalmente são utilizados para especificar um sistema de resfriamento são: tipo dos bicos de resfriamento, espaçamento entre os bicos de resfriamento, distância entre o bico de resfriamento e o veio, vazão de água e pressão da água.

A vazão de água é certamente a variável mais importante no resfriamento secundário. Observa-se que quanto maior a vazão, maior o coeficiente de transferência de calor. O aumento da pressão da água também altera positivamente o coeficiente de transferência de calor(10,11).

Alguns experimentos indicam que o aumento da distância entre o bico de resfriamento veio leva a uma distribuição mais uniforme da água sobre a superfície a ser resfriada, mas a vazão de água que efetivamente atinge a superfície é menor. Em termos do fluxo de calor, o aumento da distância leva a uma redução no fluxo de calor.

Um menor espaçamento entre os bicos de resfriamento leva a uma menor oscilação da temperatura da superfície do veio ao longo do processo de resfriamento. O tipo do bico afeta, entre outros: o tamanho médio das partículas de água do spray, o ângulo de incidência das gotas na superfície e a distribuição da água sobre a superfície. Todos estes fatores afetam a extração de calor(11).

2.6 DEFEITOS DOS PRODUTOS LINGOTADOS

Os produtos de lingotamento contínuo tem atualmente qualidade superficial indiscutivelmente superior aos do processo convencional. Por este motivo prestam-se de modo especial à técnica de enformamento a quente ou laminação direta, o que tem sido um atrativo a mais para este processo. O nível de defeitos internos, embora de maior relevo, pode ser adequado com a utilização dos recursos disponíveis para seu controle. Entretanto cabe salientar, que o lingotamento contínuo exige um processo de aciaria diferenciado, muito mais restritivo que o convencional. Existem por uma parte os álbuns de defeitos, que tem informação geral sobre os nomes origem e soluções dos defeitos. Por outra parte, tem-se uma ampla experiência em todo o mundo sobre defeitos em produtos longos, assim podem-se classificar os defeitos em tarugos como:

2.6.1 DEFEITOS DE FORMA

Defeito de Forma se dá à qualidade como a solidificação do tarugo é formada, dentro de defeitos de forma temos classificados:

- Romboidade;
- Achatamento;
- Empeno ou torção;

2.6.2 DEFEITOS SUPERFICIAIS

Defeitos superficiais são aqueles apresentados nas faces externas do tarugo listando assim:

- Trincas
- Sangria
- Perfuração
- Incrustações
- Riscos

2.6.3 DEFEITOS INTERNOS.

Os defeitos internos são incorporados internamente no produto durante sua solidificação, são eles:

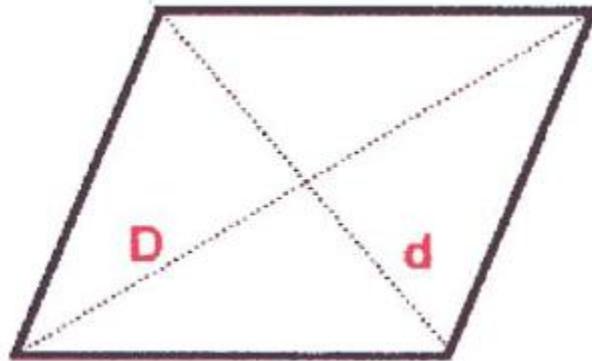
- Porosidade interna
- Macroinclusões
- Trincas “off corner”
- Trincas intermediarias
- Segregação
- Porosidade central

2.7 ROMBOIDADE

A romboidade (*Off-Squareness*) é um defeito de forma que aparece na maioria das usinas, o quadrado fica com dimensões das diagonais diferentes, produzindo-se um tarugo “achatado”. A

medida da romboidade é dada pela simples diferença entre as diagonais do tarugo. É considerada severa se ultrapassar os 6 – 8 mm, porém segundo o padrão de qualidade da Sinobras a tolerância se estende a 10mm. A romboidade às vezes é expressa em porcentagem. Em caso de máquinas novas, os fornecedores garantem 1 ou 2 % de romboidade máxima segundo o caso.

Figura 5 – Representação do tarugo romboide



A romboidade é calculada por meio da relação simples entre as dimensões do tarugo, como representada na equação 2.

$$\text{Romboidade em mm} = D - d \quad (2)$$

Onde:

D = diagonal maior

d = diagonal menor

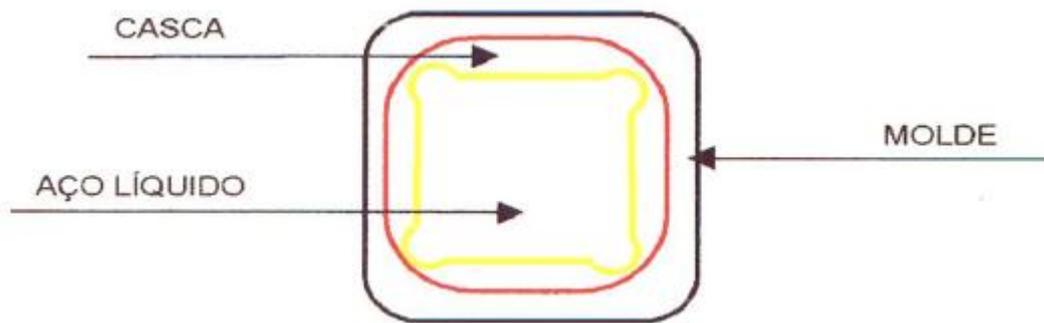
Normalmente ela é expressa em porcentagem por meio da relação da equação 3.

$$R = \frac{D - d}{d} \times 100\% \quad (3)$$

2.7.1 MECANISMO DE FORMAÇÃO DA ROMBOIDADE

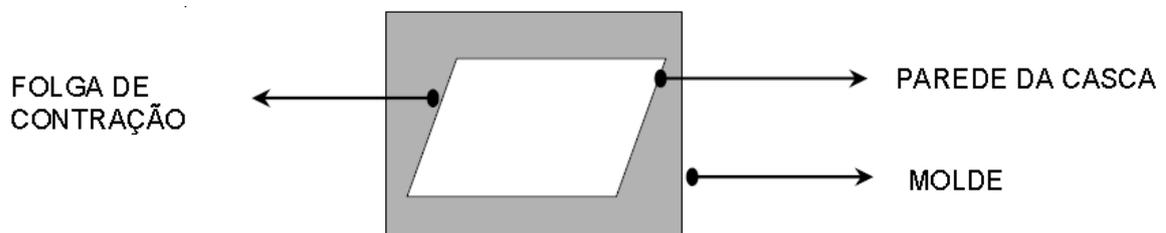
Na solidificação inicial, a casca tende a se contrair, mas não é possível, devido à pressão de aço líquido no seu interior. À medida que o tarugo vai solidificando, a casca vai engrossando e deixando uma folga de contração. Como a velocidade de solidificação nos cantos é menor que a da parede, forma-se uma casca fina com gaps nos cantos como representado na figura 6.

Figura 6 – Representação da contração do tarugo



Como consequência, se a folga de contração é maior no canto, as forças de contração agem com maior intensidade nessas áreas provocando assim uma deformação dos cantos na casca mais fina do tarugo. Por ser essa força de solidificação não homogênea, as forças de contração provocam que o lado oposto ao canto com maior gap também sofra o mesmo mecanismo, ficando o tarugo com a forma romboidal. No aço, a tensão de contração aperta o aço do núcleo em formação. Dentro do molde, a casca ficaria deformada, como mostra a figura 7.

Figura 7 – Representação da casca do molde deformada



Quando o tarugo sai do molde, esta situação tende a se agravar, pois no molde as deformações externas da casca não passam das folgas de contração, e na refrigeração secundária, elas estão livres para aumentar. Em outras palavras, no molde existe a limitação física do mesmo, enquanto que, na refrigeração secundária, os limites físicos (rolos endireitadores) são menores.

2.7.2 FATORES QUE AFETAM A FORMAÇÃO DA ROMBOIDADE

2.7.2.1 RESFRIAMENTO ASSIMÉTRICO DO LINGOTE NA REGIÃO DO MOLDE

O resfriamento assimétrico do lingote na região do molde pode levar a formação de trincas longitudinais, devido a pontos isolados de altas temperaturas. Esses pontos isolados são provenientes da má distribuição de pó fluxante, gaps de ar locais ou erosão da casca sólida causadas pelas correntes de aço líquido. Uma vez formados, os defeitos se propagam com as tensões geradas pelos rolos de apoio na saída do molde e pelo resfriamento proporcionados pelos primeiros bicos da região de chuveiros.

2.7.2.2 VARIAÇÃO DA DIMENSÃO DO MOLDE

Na região do menisco o molde pode sofrer abaulamento e desgaste devido ao atrito do lingote na sua saída. Para o caso de tarugos, foi constatado que a frequência de trincas longitudinais de canto aumenta quando a diferença entre as dimensões da seção transversal do molde na região do menisco e na região de saída do lingote exceder de 1,2mm (12).

A distorção do molde se deve ao aquecimento assimétrico do molde durante o processo de lingotamento, causando o defeito geométrico de romboidade, tendo como causas: espessura inadequada da parede de cobre, velocidade insuficiente de água de refrigeração, variação do gap na interface do molde, posicionamento do molde e erros na dimensão durante a fabricação dos moldes.

2.7.2.3 LUBRIFICAÇÃO DO MOLDE

Os moldes do lingotamento contínuo de tarugos geralmente utilizam óleo vegetal proporcionando uma transferência de calor no molde de 15 a 20% superior ao pó fluxante. A lubrificação insuficiente gera defeitos sendo necessário a verificação dos orifícios de alimentação de óleo.

2.7.2.4 RESFRIAMENTO DEFICIENTE NA REGIÃO DE CHUVEIROS

Aços com elementos de liga são susceptíveis à formação de defeitos na região de chuveiros, devido a baixa ductibilidade do aço na zona de temperaturas entre 700 a 900 °C. O resfriamento não uniforme pode gerar romboidade e são geralmente ocasionados por diferenças na disposição dos chuveiros, velocidade de saída da água, bicos entupidos, gerando assim uma solidificação não-uniforme no tarugo.

2.8 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA

A SINOBRAS é a primeira Siderúrgica Integrada de aços longos para construção civil da região Norte e Nordeste do país. Integrada ao Grupo Aço Cearense começou a produzir aço em maio de 2008, voltada para o mercado da construção civil, a SINOBRAS ingressou no setor siderúrgico tendo como primeiro produto final o vergalhão SI 50, comercializado em todos os estados brasileiros.

2.8.1 MAQUINA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DA SINOBRAS

A máquina de lingotamento contínuo da SINOBRAS possui hoje uma capacidade de produção de cerca de 320.000 toneladas de aço.

Trata-se de uma máquina constituída por três veios de lingotamento, cujo produto, denominado tarugo ou “billet”, possui uma seção quadrada de 130 mm e cujo comprimento é 12 metros.

Todo o fluxo de aço é protegido, possibilitando o menor contato possível com o ar, garantindo-se maior qualidade ao produto fabricado. Isto é possível graças à utilização de tubo (ou válvula) longo na passagem do aço da panela para o distribuidor e de válvulas submersas na passagem do aço do distribuidor para o molde. Como lubrificante é utilizado pó fluxante. Esta combinação, válvula submersa e pó fluxante, conforme Pinheiro (2000) pode aumentar a estabilidade do nível de aço no molde, uma vez que a turbulência é bastante diminuída.

O fluxo de aço entre o distribuidor e o molde é controlado por um sistema de válvula gaveta. Estes, em sintonia, irão permitir um nível estável e constante de aço no molde. A capacidade volumétrica do distribuidor é de 15 toneladas.

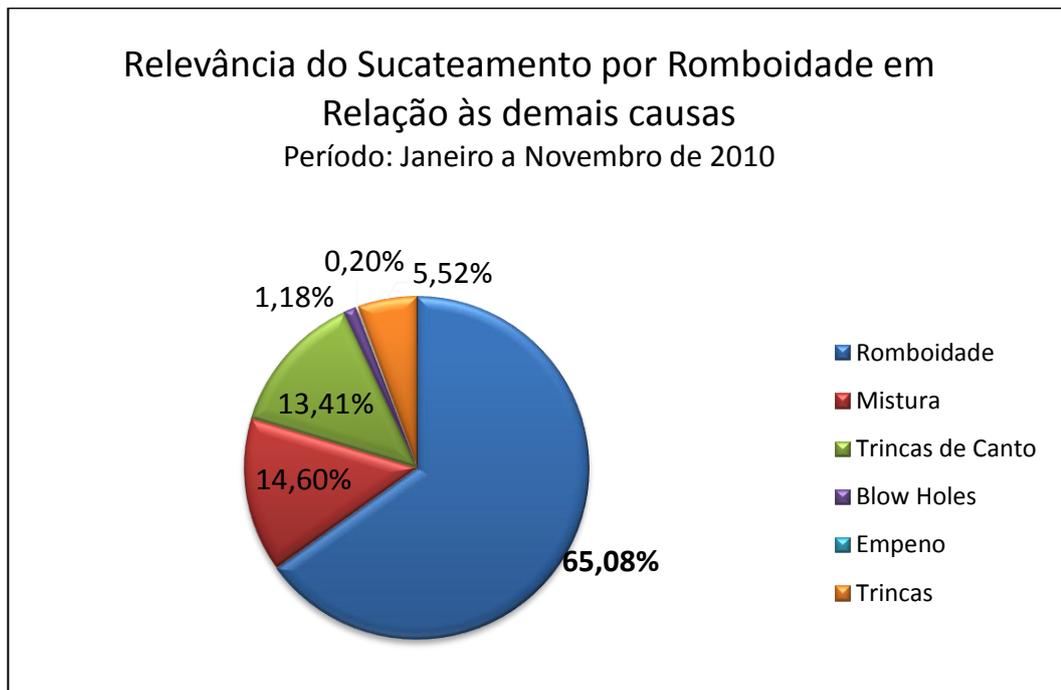
O molde é reto e tem um comprimento de 795 mm, o resfriamento secundário possui apenas uma zona dispostas nos três veio com bicos de irrigação uniformemente distribuídos.

A zona de resfriamento é composta por rolos guias que sustentam e guiam a seção lingotada e numerosos bicos de spray (dispostos nas faces do tarugo) divididos em 3 zonas cuja a vazão é controlada a fim de que a solidificação se faça com rapidez sem contudo comprometer a qualidade superficial do tarugo.

A alta capacidade de produção vem sido comprometida por apresentar defeitos geométricos em seus tarugos, tendo em média uma perda de 80 toneladas por mês por motivos de romboidade, levando ao sucateamento de varias corridas, reduzindo

expressivamente a produtividade do lingotamento contínuo. Essa perda vem sendo altamente expressiva quando comparada sua relevância às outras causas de sucateamento alcançando um índice de 65,08% do sucateamento da indústria como mostra a Figura 8..

Figura 8 – Causas do Sucateamento



Fonte: Mara Cristina, 2012

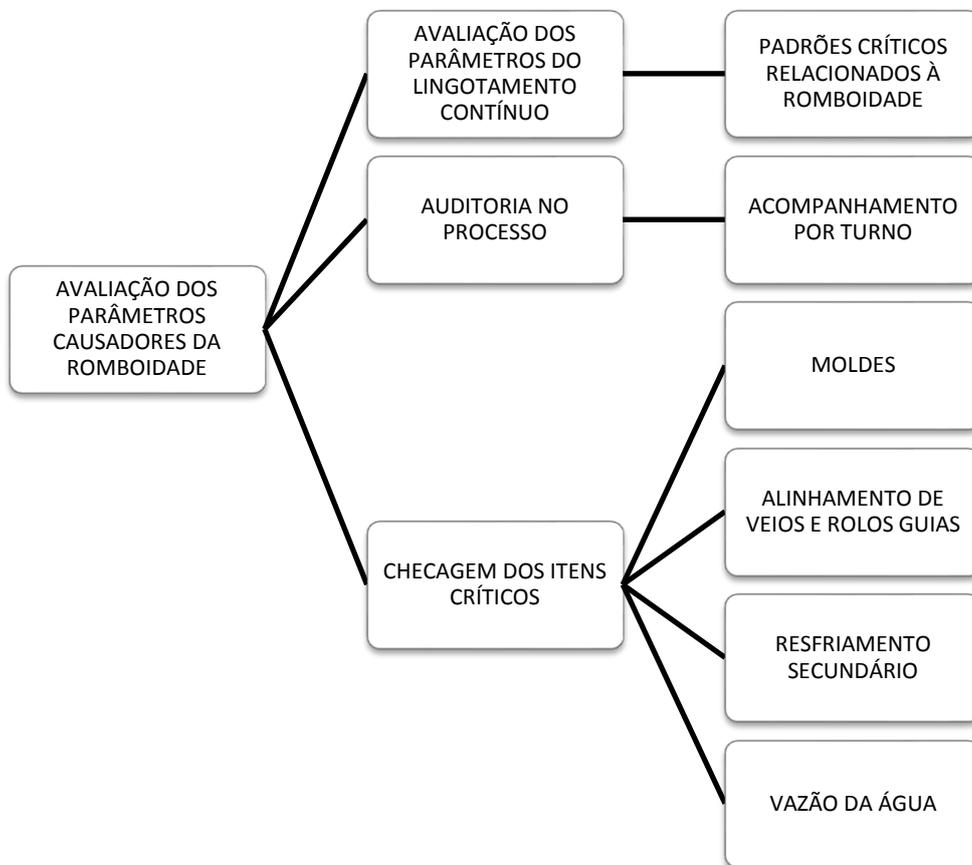
Para tanto a análise dos parâmetros do processo que segundo a literatura podem gerar esses defeitos é uma ação vital para solucionar o problema e normalizar a produtividade do setor.

Segundo o padrão de qualidade da SINOBRAS o valor aceitável de romboidade de tarugos chega a 10 mm, valores superiores a este são separados e inspecionados para um posterior sucateamento.

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho foi o estudo de caso, dividida em diversas atividades que tem como foco a avaliação e definição dos parâmetros que influenciam na formação de romboidade a partir da validação dos dados experimentais e da literatura. A figura 9 mostra de forma esquemática o fluxograma representativo da metodologia desenvolvida.

Figura 9 – Fluxograma resumido da metodologia de trabalho



Fonte: Adriele Santos, 2012

3.1 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO LINGOTAMENTO CONTÍNUO

Nas inspeções realizadas durante a produção foram evidenciados valores altos de romboidade o que foi corroborado com os relatórios mensais de sucateamento por romboidade. Diante disso foi executado um levantamento nos livros de turno e gerado folhas de verificação elaboradas pela operação e *check list* para verificação de cumprimento dos

padrões, além de planilhas para análise dos resultados. Os dados são divididos em seis grupos sendo eles:

1. Dados do aço: identificação numérica da corrida, tipo do aço produzido, relação Mn/S, percentual de C, percentual de S, relação C/Mn e percentual de Mn.
2. Romboidade: valores de romboidade apresentados em cada veio operante.
3. Dados do veio: velocidade do lingotamento, temperatura, quantidades de veio operante.
4. Dados da água do processo: vazão da água do molde, pressão de entrada, pressão de saída, temperatura de entrada e saída.
5. Dados do spray, os mesmo dados mencionados no item 4. Sendo que agora não mais aplicado à zona de resfriamento primária mais sim a secundária.
6. Dados do molde: Identificação numérica do molde, fabricante e quantidade de corridas realizadas.

Foram analisada 1000 corridas, os dados foram obtidas junto ao setor do Tecnologia da Informação, gerados pelas supervisórios, software que abastece o SAP.

3.2 AUDITORIA NO PROCESSO

A empresa possui documentos intitulados, padrões operacionais, que visam manter o operador constantemente informado sobre as atividades críticas a serem executadas, normas de segurança e manutenção do equipamento. Todos os padrões operacionais ligados a atividades relacionadas que poderiam ser causadoras de defeitos da romboidade foram reavaliados.

Após a etapa de revisão e constatação de que os padrões operacionais estavam adequados à atividade, foi estabelecidas auditorias nessas atividades, que consistia no acompanhamento enquanto o operador realizava as suas atividades normais. Também foi avaliado o numero de corridas produzidas por cada turno de trabalho e a taxa de romboidade desta produção.

3.3 CHECAGEM DE ITENS CRÍTICOS

Após ter sido realizado um levantamento dos itens críticos, estes foram verificados se estavam dentro do determinado em padrão técnico e apresentavam perfeitas condições de uso, com manutenção em dias.

3.3.1 PARÂMETROS DE MOLDE

3.3.1.1 DIMENSIONAMENTO DO MOLDE

A máquina do lingotamento contínuo opera em três veios com moldes retos com comprimento de 795 mm e dimensões de 130 mm x 130 mm. Na inspeção dos moldes foram retirados da máquina de lingotamento e levados a oficina de moldes como mostrados na figura 13, aqueles que apresentaram um maior índice de romboidade segundo os dados operacionais e analisados suas características dimensionais, objetivando alcançar o nível de desgaste físico na parede do molde e sua relação com o defeito.

A medição das dimensões do molde foi feita em todo o seu comprimento, por meio de paquímetro em suas extremidades, e em seu interior com reguas relacionadas. Sua conicidade também foi verificada segundo a equação 1, visando relacionar com o surgimento do defeito.

Figura 10 – Molde desgastado para análise



Fonte : Sinobras, 2012.

3.3.1.2 REFRIGERAÇÃO DO MOLDE

3.3.1.2.1 TEMPERATURA E VAZÃO DA ÁGUA NO MOLDE

Outra importante variável na qualidade da retirada de calor e solidificação do tarugo para ausência de defeitos é a temperatura de entrada e saída do molde, estando essa diferença

padronizada para o lingotamento pela qualidade de tarugos. Segundo o padrão de qualidade essa diferença deve se manter entre 5 e 8° C, segunda a equação 4 a seguir.

$$\Delta T = T_f - T_i \quad (4)$$

A avaliação desta temperatura foi feita a partir da produção de planilhas com dados de temperatura das corridas que apresentaram índices de romboidade maiores que 10 mm, a Figura 11 apresenta o resumo destes dados.

Figura 11 – Resumo das temperaturas das corridas romboides

Refrigeração do Molde			
Vazão (l/min)	Pressão (bar)	Temperatura Entrada	Temperatura Saída
1545	2,58	32,23	44,24
1559	2,5	31,71	43,78
1558	2,51	32,01	44,1
1560	2,57	31,74	43,84
1555	2,58	31,86	43,78
1559	2,57	37,44	38,89
1561	2,59	38,22	40,57
1558	2,58	35,05	43,58
1395	2,56	31,02	42,48
1396	1,95	39,96	45,2
1451	2,07	31,02	48,67
1457	3,1	31,97	41,38
1629	2,44	31	47
1627	2,44	33	47
1630	2,09	29	44

Fonte: Adriele Santos,2012

3.3.2 ALINHAMENTO DOS VEIO E ROLOS GUIAS

Os rolos guias são responsáveis pela sustentação além de guiar a seção lingotada, estão dispostos abaixo dos moldes e permitem a passagem do tarugo pelas zonas de resfriamento.

Esses rolos recebem o material com uma casca solidificada ainda fina, portanto a avaliação da disposição uniforme destes permite acrescentar uma variável responsável pela criação de defeitos.

A avaliação consistiu na inspeção visual da passagem do tarugo, como ilustrada na Figura 12, durante seu lingotamento a fim de perceber a centralização dos veios durante o processo.

Figura 12 – Passagem dos veios nos rolos



Fonte: Sinobras, 2012

3.3.3 PARÂMETROS DO RESFRIAMENTO SECUNDÁRIO

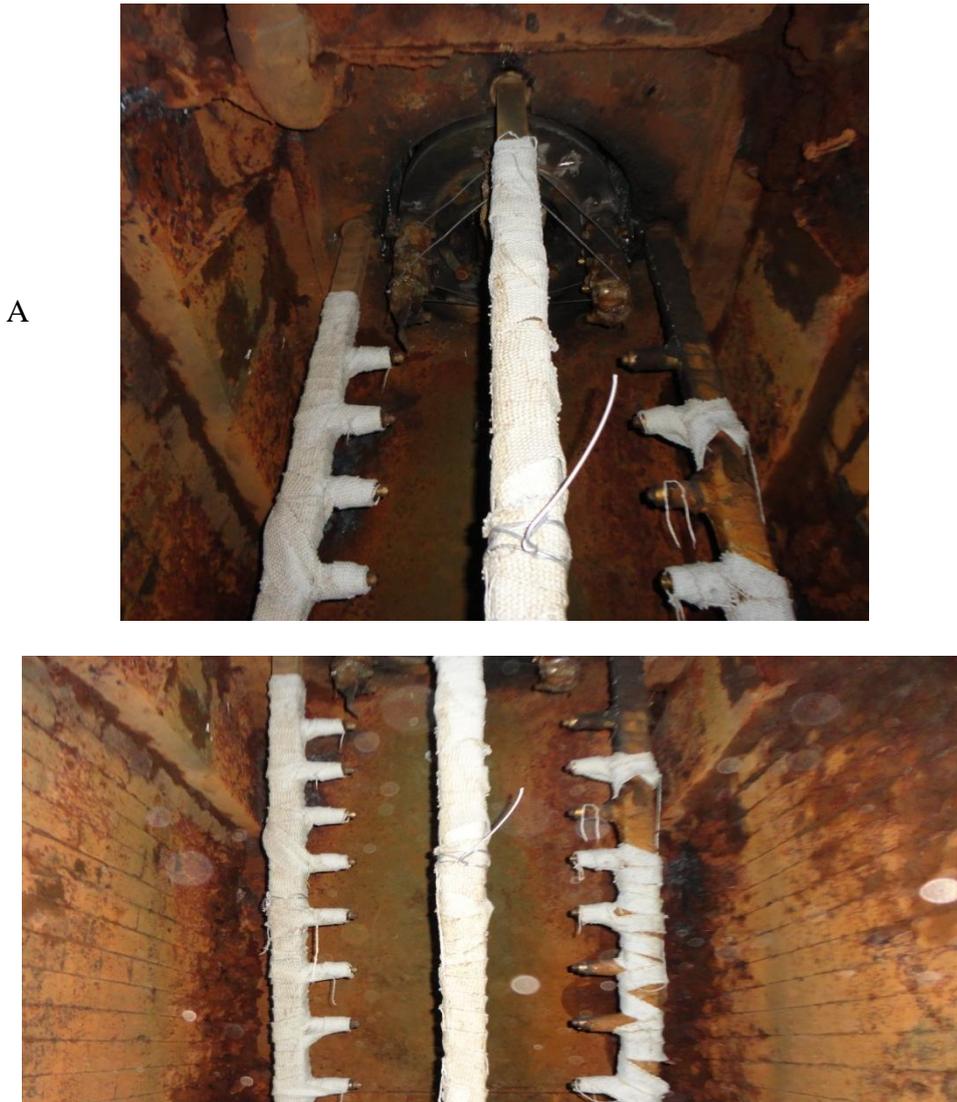
3.3.3.1 DISPOSIÇÃO E QUALIDADE DOS *SPRAY* DE JATOS

O resfriamento secundario na primeira zona é feito por jatos de água de *sprays* dispostos em uma coluna de aço em toda a passagem do aço, como mostrado nas figuras 13A com uma visão inferior e 13B com uma visão frontal. A disposição desses *spray* devem ser uniformemente dispostos e com vazões padronizadas para permitir uma retirada de calor uniforme em todas as faces do tarugo aliviando suas possíveis tensões durante a solidificação.

Também foi avaliada a manutenção deste *spray* em relação à limpeza, destacando a situação dos bicos de saída, visando avaliar a vazão de água uniforme.

A medição dos *spray* foi feita por meio de trenas, avaliando o espaçamento entre eles, e a distância destes com o veio.

Figura 13 : A – visão inferior dos *spray* ; B - visão frontal dos *spray*



Fonte: Sinobras, 2012

3.3.3.2 VAZÃO DA ÁGUA DE RESFRIAMENTO

Durante a etapa de verificação dos padrões operacionais optou-se por recalcular a vazão da água na zona de *spray*, para avaliar o desempenho com uma taxa menor de vazão e sua influência na solidificação dos tarugos. Essa ação foi feita a partir do levantamento de dados, realização de testes e alteração da vazão padrão da produção. O cálculo de vazão da

água foi feito por meio do supervisorio da propria indústria, com receita de variação indisponível para divulgação, onde permitiu a variação da mesma.

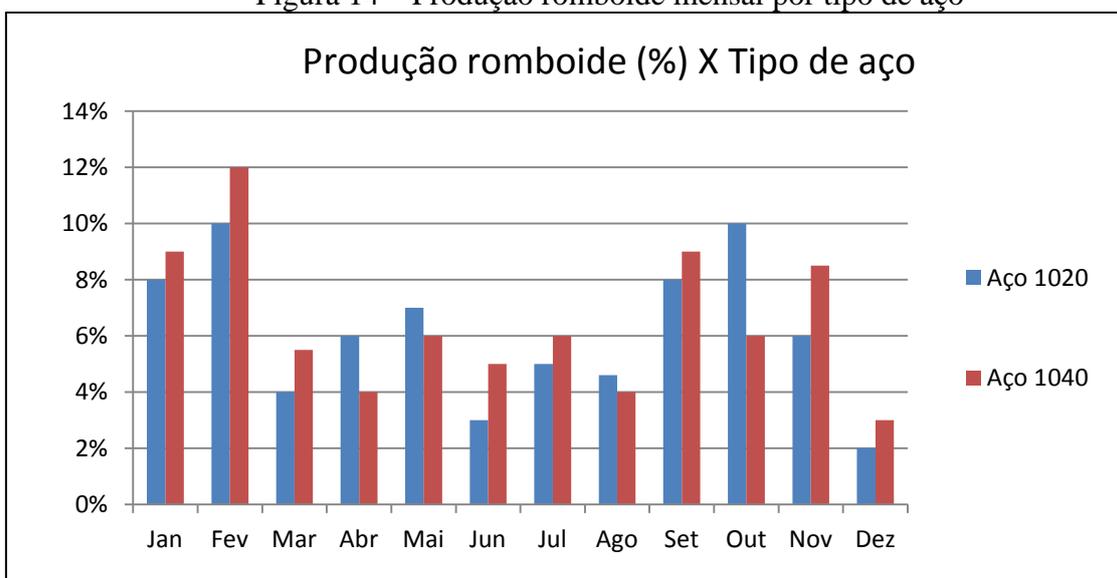
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERISTICAS DO AÇO

4.1.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

O levantamento de dados relativo à formação da romboidade em tarugos relevantes ao tipo de aço por sua composição química, avaliando os aços 1020 e 1040, forneceu os resultados apresentados na figura 14.

Figura 14 – Produção romboide mensal por tipo de aço



Fonte: Adriele Santos,2012

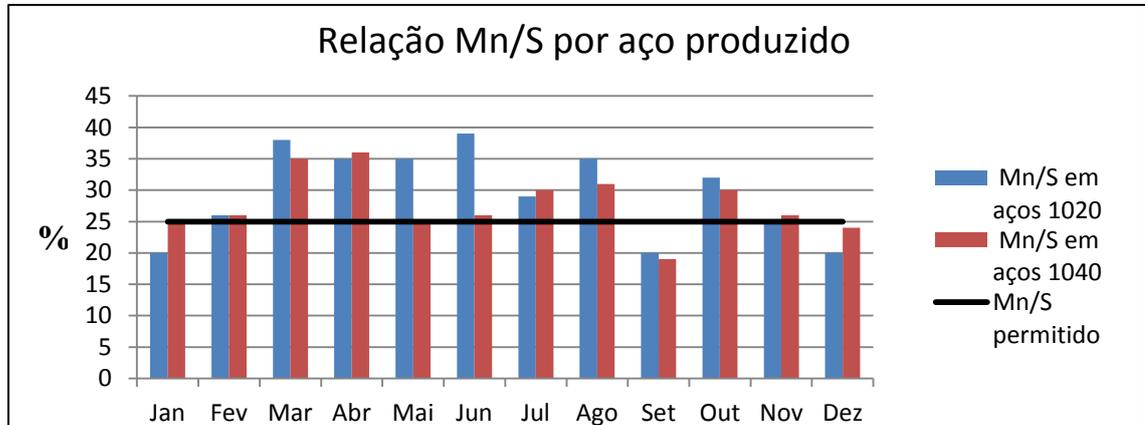
Analizando a incidência de romboidade nas diferentes composições químicas dos aços notou-se que a taxa de carbono no aço não acarretava o defeito no tarugo, pois este estava ocorrendo nos dois tipos de aço.

4.1.2 RELAÇÃO Mg/S

Segundo a literatura a relação Mn/S pode levar a suscetibilidade de ocorrência de defeitos no lingotamento contínuo, no padrão de aço SINOBRAS seu limite máximo padrão

para prevenção de ocorrência de romboidade é de 25. Para tanto foi avaliado a taxa de Mn/S nas corridas de 2010 gerando os resultados apresentados na figura 15.

Figura 15 – Relação Mn/S por tipo de aço



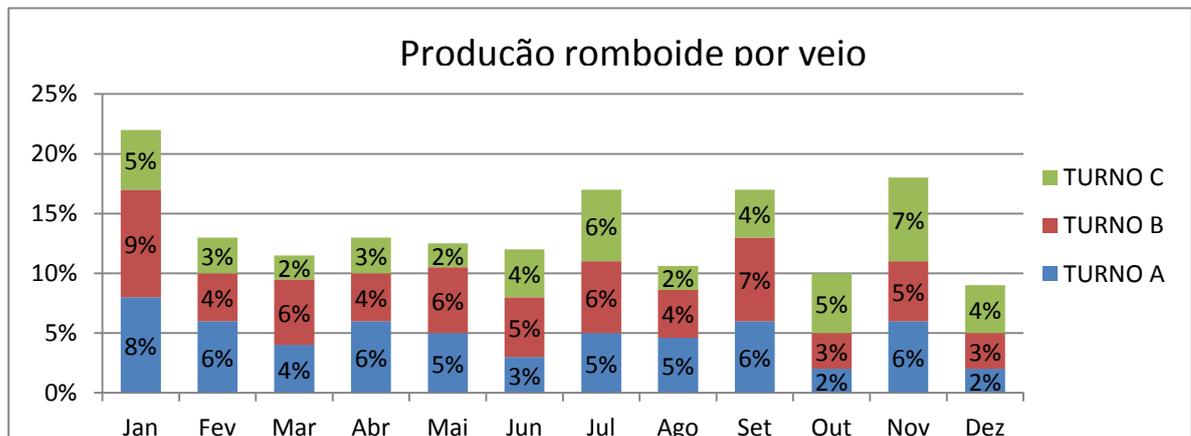
Fonte: Adriele Santos, 2012

Avaliando os valores da figura 15, verifica-se que a relação dos elementos de liga para os dois tipos de aço estão acima do permitido, segundo o padrão de qualidade SINOBRAS para a ocorrência do defeito, podendo ser uma das causas diretas da formação da romboidade, sendo necessária a padronização do seu controle durante o processo.

4.2 VEIOS EM OPERAÇÃO

A avaliação quanto aos veios operantes na formação do defeito forneceu o resultado apresentado na figura 16, onde se nota que todos os 3 veios da máquina de lingotamento contínuo apresentaram altos índices de romboidade, constatando assim que não era características intrínsecas dos veios a formação do defeito.

Figura 16 - Romboidade por veio operante

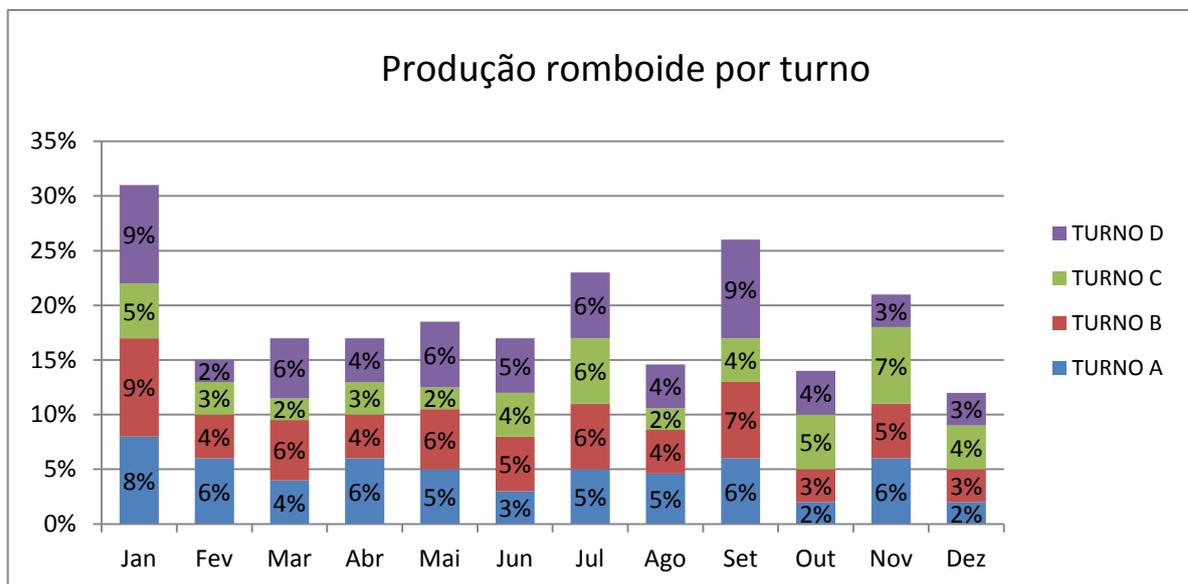


Fonte: Adriele Santos, 2012

4.3 AUDITORIA DO PROCESSO

As atividades realizadas pelos operadores estavam dentro do padrão da empresa estipulados pela gestão de qualidade, e a avaliação da produção de corridas romboides por turno mostrou que não houve disparidades de valores na produção de corridas com defeitos como mostrado na Figura 17, onde os valores de produção de tarugos romboides estão mantendo uma uniformidade, levando à conclusão de que o defeito não é causado por erros no procedimento operacional.

Figura 17 – Produção de romboidade por turno



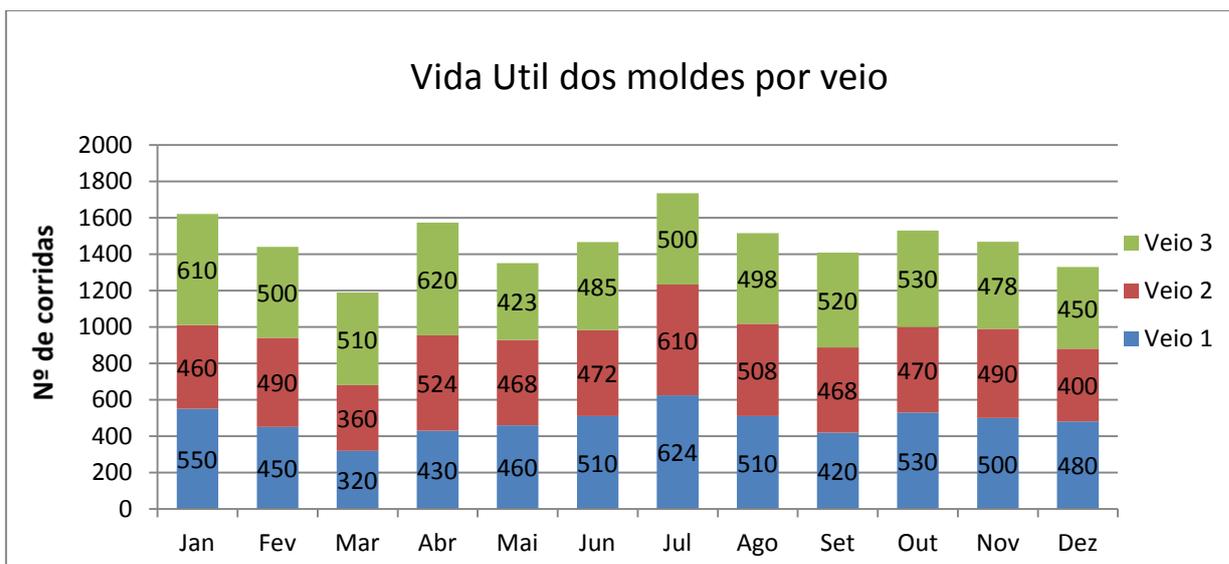
Fonte: Adriele Santos,2012

4.4 DIMENSIONAMENTO DO MOLDE

Ao analisar o dimensionamento do molde objetivou-se discriminar sua deformação por tempo de uso e sua influência na formação de defeitos. Como resultado notou-se que as paredes do molde estavam com altas variações de medida principalmente no centro ocasionando diferentes taxas de resfriamento, o que induzia à formação irregular de tensões durante a solidificação do tarugo causando a deformação na parede do produto levando altos índices de romboidade.

Diante desse resultado, foi levantado a vida útil dos moldes utilizados na máquina de lingotamento nos três veios operantes gerando dados conclusivos apresentados na figura 18.

Figura 18 – Vida útil dos moldes



Fonte: Adriele Santos, 2012

Ao analisar a vida útil dos moldes utilizados concluiu-se que o tempo de uso das peças ultrapassava sua vida média que segundo a indústria é de 400 corridas/molde, justificando seus altos índices de deformação e o ocasionamento de defeitos no produto final.

Diante desses dados foi efetuada a troca dos moldes e criado padrões de inspeção e manutenção dos mesmos, objetivando a redução da romboidade por deficiência de perfil de moldes.

A medição da conicidade do molde também concluiu uma taxa de desgaste nas paredes do mesmo acarretando a variação da espessura da parede do tarugo e sua solidificação não uniforme.

4.5 TEMPERATURA E VAZÃO DA ÁGUA DO MOLDE

Segundo a análise dos valores da Figura 11, a temperatura e vazão da água de refrigeração do molde estão dentro do padrão estabelecido pela qualidade SINOBRAS, não ultrapassando os limites de vazão de 1560-1640 L/min e de temperatura entre 5 a 8° C de diferença entre a temperatura de entrada e saída.

4.6 ALINHAMENTO DOS VEIO E ROLOS GUIAS

Por meio das inspeções na máquina do LC notou-se uma irregularidade quanto a centralização do veio na passagem nos rolos guias como mostrado na Figura 19, onde o veio

se encontra encostado na aba do rolo gerando cascas no tarugo de espessuras diferentes e produzindo um resfriamento deficiente.

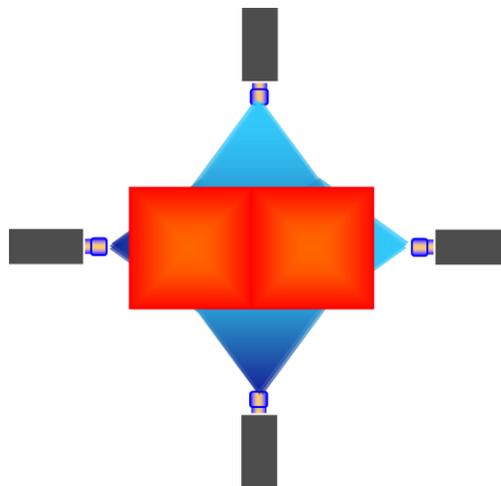
Figura 19 – Passagem de veio encostado na aba do rolo guia



Fonte: Sinobras, 2012

A movimentação do veio varia a posição do tarugo durante a operação alterando sua centralização na passagem pelos spray do resfriamento secundário como mostra a figura 20, ocasionando assim seu resfriamento irregular e formação posterior de defeitos.

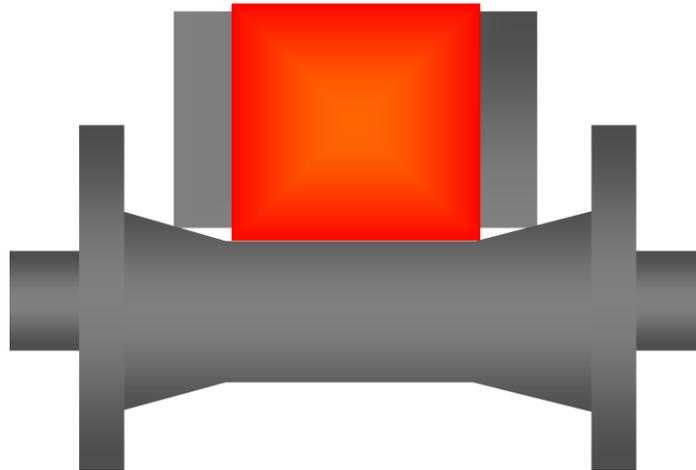
Figura 20 – Posição do veio nos spray



Fonte: Adriele Santos, 2012

Diante desta avaliação foi proposto a confecção de novos rolos guias com outro modelo como mostra a figura 21, objetivando a centralização dos veios durante a operação e consequentemente uma solidificação uniforme do tarugo eliminando as tensões desiguais e a formação da romboidade.

Figura 21 – Rolos guias para centralização



Fonte: Adriele Santos,2012

Com a confecção e instalação dos novos rolos guias o veio se manteve centralizado como mostrado na Figura 22, minimizando assim o defeito de solidificação iniciado na saída dos moldes.

Figura 22 – Passagem do veio centralizado



Fonte: Sinobras, 2012

4.7 DISPOSIÇÃO E QUALIDADE DOS SPRAY DE JATOS

Durante a avaliação dos bicos dos sprays notou-se um grande número de bicos entupidos ocasionados pelo nível de impureza da água, gerando um resfriamento deficiente por causa da distribuição do líquido, acarretando a formação de defeito.

Para tanto, na tentativa de sanar esse causador de defeitos foi criado um padrão de inspeção e reparo na câmara de spray para retirada e limpeza dos bicos entupidos como mostrado na figura 23, durante o processo para prevenir falhas e o defeito nos tarugos.

Figura 23 – Bicos de spray retirados



Fonte: Adriele Santos, 2012

4.8 VAZÃO DA ÁGUA DE RESFRIAMENTO

Como citado no item 3.3.3.2 a curva de resfriamento secundário foi recalculado por meio de destes no supervisorio a fim de diminuir a incidência de romboidade nos tarugos lingotados. A variância dos valores foram apresentados na figura 24, a receita usada anteriormente figura 24 A, e após o tratamento de falhas a receita 24 B.

Figura 24 – Valores da vazão no resfriamento secundário

Veloc [m/min]	2,45	2,50	2,55	2,60	2,65	2,70	2,75	2,80	2,85	2,93	2,95	3,00
1 zona	288	295	303	310	318	325	333	340	348	360	363	370
2 zona	387	396	404	413	422	431	439	448	457	471	474	483
3 zona	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
vazão total[l/min]	674	691	707	723	739	756	772	788	804	830	837	853
resfr. espec.[l/kg]	2,08	2,09	2,10	2,11	2,11	2,12	2,13	2,13	2,14	2,15	2,15	2,15

A

Veloc [m/min]	2,45	2,50	2,55	2,60	2,65	2,70	2,75	2,80	2,85	2,93	2,95	3,00
1 zona	248	255	262	269	276	283	290	297	304	315	318	325
2 zona	288	295	302	309	316	323	330	337	344	355	358	365
3 zona	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
vazão total[l/min]	536	500	564	578	592	606	620	634	648	670	676	690
resfr. espec.[l/kg]	1,66	1,67	1,68	1,68	1,69	1,70	1,71	1,72	1,72	1,73	1,74	1,74

B

Fonte: SINOBRAS, 2012.

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho, um estudo de caso na SINOBRAS no processo de lingotamento foi desenvolvido a fim de definir as razões de formação de romboidade em tarugos, proposta a partir de uma metodologia baseada em análise físicas do processo e suas máquinas, onde os resultados práticos sugeriram:

- O uso da metodologia de estudo de caso prático a partir da análise e auditoria dos processos mostrou-se ser bastante útil na avaliação da relação dos parâmetros de processo com a ocorrência de romboidade, sendo um instrumento eficaz para otimização e melhoria do processo industrial.

- A qualidade da refrigeração dos moldes não exerceram influência sobre a ocorrência de romboidade, pois apresentou parâmetros como temperatura e qualidade da água dentro dos padrões de qualidade de operação.

- A variância da composição química não estava acarretando a formação de defeito no tarugo por suas características mecânicas intrínsecas a cada aço.

- A relação Mn/S estava acima do padrão para a prevenção de ocorrência do defeito, sendo uma variável responsável por seu aparecimento, sendo necessário uma padronização e observação na composição do aço em relação aos seus elementos de liga.

- A disposição dos veio não permitia uma centralização do tarugo durante o lingotamento, provocando uma solidificação não uniforme, colaborando em grande parte para o aparecimento de defeitos no material. Assim a modificação nos rolos guias criando uma inclinação forçando o veio a centralizar-se é mais indicado ao processo, mostrando ser eficaz na redução do defeito.

- O fluxo de água livre de impurezas da refrigeração secundária permitiu um maior controle da vazão diminuindo as taxas de extração de calor irregulares ao longo da superfície do lingote, reduzindo as percas de material por romboidade e elevando a vida útil dos bicos srays.

- O alinhamento não uniforme dos bicos de spray foi uma das variáveis do processo responsável pela presença de romboidade nos tarugos, provocando um resfriamento inadequado levando a uma distribuição de temperatura interna não uniforme no tarugo contribuindo para a formação do defeito.

- O desgaste e falta de verificação de qualidade do molde foi um dos parâmetros de maior influência para formação de defeitos no produto final. O desgaste do molde provocava a maior resistência à extração de calor no molde, por permitir uma distribuição irregular da temperatura do aço provocando uma solidificação não uniforme e um aumento das tensões nas diagonais do tarugo.

- A produção de novos padrões de inspeção e manutenção dos moldes e equipamentos da refrigeração secundária foi crucial para a permanência dos baixos índices de romboidades na produção de tarugos após apresentação dos resultados deste trabalho.

SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS

A partir da realização deste trabalho apresentam-se as seguintes sugestões:

- Avaliar outras variáveis relevantes ao processo que possam está provocando os defeitos no produto final.

- Fazer um estudo aprofundado nas variáveis relevantes neste trabalho para verificar suas consequências no processo.

- Com base na ampla aquisição de dados adquiridos durante a realização deste trabalho, seria interessante aprofunda-lo com o auxílio das Ferramentas de Qualidade, visando especificar cada variável causadora do defeito, além de propor uma solução mais viável à situação, reduzindo em custos, os danos na produção.

6. REFERÊNCIAS

1. ARAÚJO, L. A., Manual de Siderurgia, São Paulo: Editora Arte & Ciência, 1997. Volume 1.
2. THOMAS, Brian G. Fluid Flow in the Mold. The Making, Shaping and Treating of Steel, A.W. Cramb. The AISE Steel Foundation. 11ª edição. Casting Volume. 2003
3. CHEVRAND, L. J. S. (Coord), REIS, G. O. N. dos (Coord) Lingotamento Contínuo de Billets. Curso Associação Brasileira de Metais – ABM. São Paulo, 1989
4. BARBOSA, F. A. Modelamento matemático e físico do escoamento do aço líquido em diferentes projetos de distribuidor do processo de lingotamento contínuo da USIMINAS. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2002. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).
5. TONIATI, A. e NASCIMENTO, R. M. Otimização do Sistema de Controle do Nível de Aço do distribuidor do Lingotamento Contínuo da Companhia Siderúrgica Tubarão (CST), UCL – Faculdade Centro Leste, Serra – ES, 2004.
6. COSTA, A.M., BARBOSA, F.A., TAVARES, R.P., FILHO, G.M.A., “Modelamento Matemático e Físico do escoamento do Aço Líquido em Diferentes Projetos de Distribuidor do Lingotamento Contínuo da Usiminas”. XXXIV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, p 427-436, Belo Horizonte – MG, 19 a 21 de maio de 2003.
7. ZIETSMAN, J.H.; KUMAR, S.; MEECH, J.A.; SAMARASEKERA, I.V. & BRIMACOMBE, J.K. “Taper design in continuous billet casting using artificial neural networks”. Ironmaking and Steelmaking, v. 25, n. 6, p. 476-483, 1986.
8. 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.
9. SAMARASEKERA, I.V., BRIMACOMBE, J.K. , Thermal e and mechanical behaviour of continuous billet molds. In: BRIMACOMBE (1982), V. 4, pp.117-125.
10. BRIMACOMBE, J.K.; AGARWAL, P.K.; HIBBINS, S.; PRABHAKER, B.; BAPTISTA, L.A. Spray cooling in the continuous casting of steel. In: BRIMACOMBE, J.K.; SAMARASEKERA, I.V.; LAIT, J.E. *Continuous Casting*. Heat Flow, Solidification and Crack Formation. Warrendale: Iron and Steel Society, 1984. v.2, p. 109-123.
11. MIZIKAR, E.A. Spray cooling investigation for continuous casting of billets and blooms. In: BRIMACOMBE, J.K.; SAMARASEKERA, I.V.; LAIT, J.E. *Continuous Casting*. Heat Flow, Solidification and Crack Formation. Warrendale: Iron and Steel Society, 1984. v.2, p. 125-132.
12. BRIMACOMBE, J.K.; SORIMACHI, K. Crack formation in the continuous casting of steel. Metallurgical Transactions B, v. 8, n.3, p 489 – 505, Sept. 1977.

13. BOMMARAJU, R; BRIMACOMBE, J.K & SAMARASEKERA, IV. Mould behaviour and solidification in the continuous casting of steel billets. Part II. ISS Transactions, v. 5, p. 79-94, 1984.
13. Dados Operacionais do Lingotamento Contínuo, Companhia Siderúrgica de Tubarão, 2006.
14. CHANDRA, S.; BRIMACOMBE, J.K. & SAMARASEKERA, I.V. “Mould-strand interaction in continuous casting of steel billets. Part3: mould heat transfer and taper”. Ironmaking Steelmaking, v. 20, n. 2, p. 104-112, 1993.
15. PINHEIRO, C.A.M. “Mould thermal response, billet surface quality and mould-flux behavior in the continuous casting of steel billets with powder lubrication”. Tese de PhD, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, 1997.
16. LAIT, J.E.; BRIMACOMBE, J.K. Solidification during continuous casting of steel. In: BRIMACOMBE, J.K.; SAMARASEKERA, I.V.; LAIT, J.E. *Continuous Casting*. Heat Flow, Solidification and Crack Formation. Warrendale: Iron and Steel Society, 1984. v.2, p. 171-183.
17. TOLEDO DE, G.A.; CAMPO, O. & LAINEZ, E. “Influence of sulfur and Mn/S ratio on the hot ductility os steels during continuous casting”. Process Metallurgy.
18. JAUCH, R.; LÖWENKAMP, H.; REGNITTER, F.; FISHER, K.; SCHROER, H.; SIMON, R.W. & JERICHO, E. “Quality of continuous cast blooms and billets”. Metallurgical Plant and Technology, n. 2, p. 24-33, 1978.
19. 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.
20. VAN DRUNEN, G.; BRIMACOMBE, J.K & WEINBERG, F. Internal Cracks in strand-cast billets. Ironmaking Steelmaking (Quarterly), v. 2, p. 125-133,1975.
21. WERKEMA, M.C.C.; AGUIAR, S. Planejamento e Análise de EXperimentos: como identificar as principais variáveis influentes em um processo. Série Ferramentas da Qualidade, Fundação Christiano Ottoni, Universidade Federal de Minas Gerais, v.8, 1996.