



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

**Estudo de formação de porosidades e bolhas tubulares  
em tarugos de lingotamento contínuo**

DOUGLAS FROZ NETO

MARABÁ-PA  
2010

# **Estudo de formação de porosidades e bolhas tubulares em tarugos de lingotamento contínuo**

DOUGLAS FROZ NETO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará como parte dos pré-requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais, orientado pelo Prof.<sup>o</sup> M.Sc. Clesianu Rodrigues Lima.

Marabá  
2010

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

---

Froz Neto, Douglas.

Estudo de formação de porosidades e bolhas tubulares em tarugos de lingotamento contínuo / Douglas Froz Neto ; orientador, Clesianu Rodrigues Lima. – 2010.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia de Materiais, 2010.

1. Metalografia. 2. Aço-metalografia . 3. Macrografia. Título.

CDD: 22. ed. 669.95

---

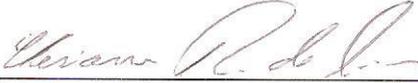
# Estudo de formação de porosidades e bolhas tubulares em tarugos de lingotamento contínuo

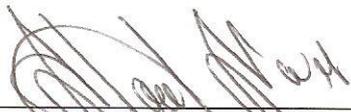
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará como parte dos pré-requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais, orientado pelo Prof.º M.Sc. Clesianu Rodrigues Lima.

**Data de aprovação: 5/03/2010**

Conceito: BOM

**Banca examinadora:**

  
Prof.º M.Sc. Clesianu Rodrigues Lima.  
Universidade Federal do Pará

  
Prof.º M.Sc. Alacid do Socorro Siqueira Neves  
Universidade Federal do Pará

  
Prof.º Dr. Adriano Alves Rabelo  
Universidade Federal do Pará

Dedico este trabalho a minha mãe **Vera Maria Ribeiro Froz** e as minhas irmãs **Daniella Froz Neta** e **Daliane Froz Neta**, enfim, a esta família maravilhosa que Deus me deu e que no decorrer de todos estes anos sempre me demonstraram um carinho e um amor incrível, além da força e encorajamento que lhes são peculiares.

Douglas Froz Neto

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus.

A minha família por sua tão importante contribuição para minha criação.

Ao professor, orientador e amigo Clesianu Rogrigues Lima pela incondicional ajuda e colaboração para a realização deste trabalho.

Aos meus colegas de faculdade.

Aos meus amigos em geral

Aos professores da FEMAT pelos ensinamentos e valiosos conselhos.

Obrigado a todos pela grande contribuição!

## **RESUMO**

O desempenho do processo de lingotamento contínuo influencia diretamente a qualidade do aço fabricado. Dessa forma, o principal objetivo deste trabalho é desenvolver uma estratégia de controle de bolhas e poros no tarugo do lingotamento contínuo, com medidas preventivas no processo de fabricação, como: verificação de temperatura na panela e distribuidor, análise do óleo, excesso de rinsagem, variação do nível de aço no molde, etc.. Que torna-se um dos parâmetros de controle de qualidade fundamental para evitar defeitos e internos no produto. O trabalho compreende-se com a identificação do defeito interno, através da Inspeção Off-Line. Que corresponde à análise da qualidade externa e interna do tarugo produzida na SINOBRAS, através de uma **inspeção visual** do tarugo e **macrográfica** das amostras retiradas dos mesmos. Sendo identificados possíveis defeitos para liberação ou bloqueio de peças para a utilização interna ou a venda do produto.

**PALAVRAS CHAVES:** Inspeção, macrografia, defeitos, lingotamento contínuo.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Máquina de lingotamento contínuo	18
FIGURA 2	Fluxograma do processo do lingotamento contínuo	19
FIGURA 3	Desenho da uma panela com válvula gaveta	20
FIGURA 4	Carro panela n° 1 com panela em operação (posição de lingotamento)	21
FIGURA 5	Carro panela n° 2 com panela recebimento (posição de recebimento)	21
FIGURA 6	Carro panela n° 2 com panela em operação (posição de lingotamento) e carro n°1 sem panela (posição de recebimento)	21
FIGURA 7	Carro panela (posição de recebimento de panela)	22
FIGURA 8	Panela, distribuidor e moldes	23
FIGURA 9	Carro do distribuidor	24
FIGURA 10	Desenho do molde abastecido com aço líquido	25
FIGURA 11	Bico de spray tipo jato cônico	26
FIGURA 12	Câmara de spray com o veio em operação	26
FIGURA 13	Unidade de extração	27
FIGURA 14	Desempeno do veio	27
FIGURA 15	Pinch roll, perfil	28
FIGURA 16	Pinch roll, frente	28
FIGURA 17	Máquina de oxicorte	29
FIGURA 18	Tesoura hidráulica	29
FIGURA 19:	Esquema de introdução da barra falsa e partida de máquina	30
FIGURA 20	Mesa de rolos	31
FIGURA 21	Sistemas de batentes	32
FIGURA 22	Transferidor de tarugos	33
FIGURA 23	Réguas do leito de resfriamento	34
FIGURA 24	Esquema funcional do leito de resfriamento	35
FIGURA 25	Empilhamento dos tarugos	36
FIGURA 26	Estocagem dos tarugos	36
FIGURA 27	Exemplos de defeitos internos no tarugo	37
FIGURA 28	Bolhas tubulares no tarugo	38
FIGURA 29	Banca examinadora de tarugos	40

FIGURA 30	Máquina de serra fita horizontal. Modelo: FM 500A	41
FIGURA 31	Amostra para macrografia	41
FIGURA 32	Amostra para ataque químico	42
FIGURA 33	Identificação da corrida	42
FIGURA 34	Identificação de poros na amostra	43
FIGURA 35:	Identificação de bolhas tubulares na amostra	44
FIGURA 36:	Amostra sem defeitos	48

## SUMÁRIO

	<b>RESUMO</b>	<b>IX</b>
	<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>X</b>
	<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>XI</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>14</b>
3.1	SINOBRAS (SIDERÚRGICA NORTE BRASIL)	14
3.2	HISTÓRICO DO LINGOTAMENTO CONTÍNUO	14
3.3	A MÁQUINA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO	16
3.4	PROCESSO	19
<b>3.4.1</b>	<b>Panela de Aço</b>	<b>19</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Suporte da Panela de Aço</b>	<b>20</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Distribuidor</b>	<b>22</b>
<b>3.4.4</b>	<b>Suporte do Distribuidor</b>	<b>24</b>
<b>3.4.5</b>	<b>Molde (RESFRIAMENTO PRIMÁRIO)</b>	<b>24</b>
<b>3.4.6</b>	<b>Zona de Resfriamento secundário</b>	<b>26</b>
<b>3.4.7</b>	<b>Extração e Desempeno</b>	<b>27</b>
<b>3.4.8</b>	<b>Pinch Roll</b>	<b>28</b>
<b>3.4.9</b>	<b>Máquina de Corte</b>	<b>29</b>
<b>3.4.10</b>	<b>Barra Falsa</b>	<b>30</b>
<b>3.4.11</b>	<b>Sistema de Transferidor de Tarugos</b>	<b>31</b>
3.4.11.1	Mesa de Rolos	31
3.4.11.2	Sistema de Batentes	32
3.4.11.3	Transferidor	33
3.4.11.4	Leito de Resfriamento	34

<b>3.4.12</b>	<b>Esquema Funcional do Leito de Resfriamento</b>	<b>35</b>
<b>3.4.13</b>	<b>Pátio de Estocagem de Tarugos</b>	<b>36</b>
3.5	DEFEITOS	37
<b>3.5.1</b>	<b>Defeitos Internos (<i>Internal Defects</i>)</b>	<b>37</b>
3.5.1.1	Bolhas (PIN-HOLES) e Bolhas Tubulares (BLOW-ROLES)	37
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>40</b>
4.1	PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS PARA ANÁLISE MACROGRÁFICA	40
<b>5</b>	<b>RESULTADO</b>	<b>43</b>
5.1	IDENTIFICAÇÃO DOS DEFEITOS NA AMOSTRA	43
<b>5.1.1</b>	<b>Contagem de Pin-Holes da Corrida</b>	<b>43</b>
5.1.1.1	Classificação das Corridas	43
<b>5.2.2</b>	<b>Contagem de Blow-holes da Corrida</b>	<b>44</b>
5.2.2.1	Classificação das Corridas	44
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>45</b>
6.1	ORIGEM DO DEFEITO	45
6.2	CONTRAMEDIDAS	46
6.3	COMO DETECTAR O DEFEITO	46
6.4	CONSEQÜÊNCIAS DO DEFEITO NO PRODUTO FINAL APÓS LAMINAÇÃO	46
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>49</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>50</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O método tradicionalmente utilizado para a transformação de aço líquido em um produto sólido consiste no vazamento do metal líquido em lingoteiras de ferro fundidos, que com o tempo foram sendo projetadas em diferentes versões, buscando a incorporação de inovações tecnológicas que conduzissem a um maior rendimento do processo (GARCIA, 2006).

O processo de lingotamento contínuo pode ser considerado essencialmente como um processo de transferência de calor, no qual o metal líquido é transformado via solidificação em um produto sólido semi-acabado. O processo é utilizado na produção de chapas e tiras de um grande número de ligas de metais não-ferrosos, mas sob o ponto de vista tecnológico o lingotamento contínuo de aços se sobressai em importância, já que é o processo é responsável por cerca de 90% de todo o aço produzido no mundo (GARCIA, 2006).

Os produtos de lingotamento contínuo têm atualmente qualidade superficial indiscutivelmente superior aos do processo convencional. Por este motivo presta-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 (GARCIA, 2006).

## **2. OBJETIVO**

Estudar os efeitos causados por Bolhas Tubulares e Porosidades nos tarugos de lingotamento contínuo, identificando as causas no processo e soluções por meio de ações corretivas. O desempenho do processo de lingotamento contínuo influencia diretamente na qualidade do aço fabricado. Dessa forma, o principal objetivo deste trabalho é desenvolver uma estratégia de controle de bolhas e poros no tarugo do lingotamento contínuo, um dos parâmetros de controle de qualidade fundamental para evitar defeitos internos no produto.

### 3. REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 SINOBRAS (SIDERÚRGICA NORTE BRASIL)

A SINOBRAS foi implantada em Marabá com investimentos da ordem de US\$ 250.000.000,00, é a primeira usina siderúrgica integrada das regiões Norte e Nordeste do Brasil. Produz anualmente para o mercado interno 300.000 toneladas por ano a partir de 2008, aços para construção civil, fio máquina, arames e seus derivados. A SINOBRAS entrou em funcionamento no primeiro semestre de 2008. Localizada no Distrito Industrial do Município de Marabá.

#### 3.2 HISTÓRICO DO LINGOTAMENTO CONTÍNUO

Uma das primeiras referências ao Lingotamento Contínuo (LC) é uma patente concedida em 1840 para *George Sellers* que desenvolveu uma máquina para lingotamento de tubos de chumbo. Em 1846, *Henry Bessemer* patenteou um processo de LC para fabricação de chapas de ferros e aço, mas acabou caindo no esquecimento devido à falta de possibilidades técnicas e construtivas. Em 1887, R. M. Daelen propôs a possibilidade de solidificar o aço usando um molde refrigerado à água, aberto na superfície e na base. Ele patenteou e imaginou um processo por onde o fluxo de aço líquido é vazado verticalmente em um molde aberto formando uma casca sólida, passando posteriormente por uma região de resfriamento por spray de água e após isto conduzindo a uma região de corte. Estes fatores constituem em essência o atual princípio de funcionamento das máquinas de lingotamento contínuo. (PEHLKE, 1988).

O LC teve início após o começo do século XX, mas somente em torno de 1933, na Alemanha, a primeira planta industrial de LC foi construída por *Siegfried Junghans* com a produção comercial de tarugo de latão. *Siegfried Junghans* forneceu muitas melhoras no processo, em particular a introdução do sistema de oscilação no molde para prevenir o agarramento da casca solidificada na parede do molde refrigerado à água. Na mesma época, outras melhorias foram implantadas ao processo, com a lubrificação do molde com o óleo e a conicidade do modo para

compensar a concentração do metal na solidificação, fornecendo melhorias na transferência de calor nessa primeira etapa de resfriamento. (PEHLKE, 1988).

Em 1935, os EUA iniciaram a produção de placas de latão; e em 1936 já possuíam máquina de lingotamento semicontínuo para a produção de ligas de alumínio. Imediatamente após a 2ª Guerra Mundial, o desenvolvimento comercial do LC de aços se expandiu, com plantas piloto espalhadas em diversos países. As primeiras plantas foram construídas em *Babcock e Wilcox Company* (EUA), *Low Moor* (Inglaterra), *Amagasaki* (Japão), *Eisenwrk Breitenfeld* (Áustria), *Bisra* (Inglaterra), e *Allegheny Ludlum Corporation* (EUA), entre anos de 1946 e 1947. (PEHLKE, 1988).

*Schneckenbueger e Kung* deram entrada na patente de uma máquina de LC com molde curvo em 1956 na Suíça, mas a produção somente iniciou-se comercialmente em 1963 com a produção de tarugos de aço. A introdução de moldes curvos tem maior vantagem à redução para menos da metade da altura total da instalação do lingotamento contínuo vertical tradicional utilizado, representando maior facilidade de construção e menor custo. (PEHLKE, 1988).

Em 1961, na *Dillinger Steelworks* (Alemanha Ocidental), entrou em operação a primeira máquina de LC de placas com curvamento do veio da posição vertical para horizontal. Nesse momento o LC estava entrando em uma nova era de desenvolvimento, não somente com respeito ao aumento de sua aplicação no processo produtivo, mas também em sua própria evolução como um processo e sua interação com outros processos na fabricação de aço. (PEHLKE, 1988).

Atualmente, a aplicação mais importante do processo de lingotamento contínuo refere-se à produção de placas, blocos e tarugos de aço, constituindo parte essencial de uma usina siderúrgica moderna. Este processo sofreu grande impulso a partir dos anos 60 com a introdução de equipamentos com moldes curvos. O impulso decorrente desta inovação pode ser constatado pelo fato de que em 1963 havia no mundo todo, menos de 100 instalações com pouco menos de 200 veios em operação ou em construção. Cinco anos mais tarde já havia 300 equipamentos em funcionamento e, em 1970, 438 equipamentos com 1120 veios, chegando a 1980

com 986 equipamentos com 2869 veios. A partir do amadurecimento do processo, os esforços passaram a serem direcionados à ampliação da produtividade através de aumentos da seção lingotada, adoção de veios múltiplos, modificações nos projetos de moldes para permitir o aumento da velocidade de produção, além da ampliação dos tipos de aços possíveis de serem produzidos por lingotamento contínuo (GARCIA, 2006).

No Brasil, o lingotamento contínuo teve início em 1960, com a instalação de uma máquina para a produção de tarugos pela empresa RIOGRANDENSE. Em 1976 foi iniciada a produção de placas pela USIMINAS, com a instalação de uma linha de produção de duas máquinas de lingotamento contínuo de dois veios cada uma. A seguir este processo foi introduzido também na CSN, ACESITA e COSIPA. (GARCIA, 2006).

### 3.3 A MÁQUINA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO

Na Figura 1, é possível observar o esquema de uma máquina de lingotamento contínuo. SANTOS (2003) descrevem seus principais componentes:

- Carro panela: tem como função principal sustentar a panela, posicionando-a sobre o distribuidor durante o lingotamento. Quando este termina, a ponte rolante troca de panela;
- Carro 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;
- Distribuidor: sua função principal é distribuir o aço fundido entre seus múltiplos veios. Além disso, ele deve suprir o molde de um fluxo constante de aço, atuar como reservatório durante a troca de painéis, promover a separação de inclusões metálicas e controlar a velocidade de lingotamento;
- Aquecedor de panela e distribuidor: tem como função secar e aquecer o revestimento refratário;
- Molde: tem como função primordial o resfriamento primário, propiciando a formação da pele sólida de aço, por meio de uma transferência de calor uniforme e eficiente, de tal forma que ao sair do molde, esta pele seja capaz

de suportar a pressão ferrostática do aço líquido em seu interior. O molde, nada mais é que uma carcaça de aço, com um tubo de cobre de parede fina em seu interior, que dá forma ao metal lingotado. Esse reservatório de cobre por sua vez, é refrigerado a água para promover uma rápida remoção de calor;

- Oscilador do molde: deve minimizar problemas operacionais de lingotabilidade, permitindo uma adequada lubrificação da pele solidificada, minimizando também a incidência de defeitos superficiais no produto devido ao atrito da casca sólida com as paredes do molde;
- Agitador eletromagnético: tem como objetivo elevar a qualidade do produto através da melhoria da estrutura interna;
- Barra falsa: equipamento que faz um fundo falso no interior do molde para permitir o início da extração da placa ou tarugo;
- Resfriamento secundário: para extração do tarugo ou placa de aço, são colocados rolos extratores na saída do molde. Entre esses rolos, são posicionados *sprays* que realizam aspersion de água em todas as faces do tarugo, com a finalidade de remover calor do aço para que a solidificação seja concluída;
- Unidade de extração e desempenho: montada após a saída da câmara de resfriamento tem como função desempenar o tarugo e enviá-lo para a máquina de corte;
- Máquina de corte: equipamento utilizado no corte dos tarugos em tamanhos pré-programados;
- Mesa de rolos, transporte e descarga;
- Transferidor de tarugos;
- Leito de resfriamento.

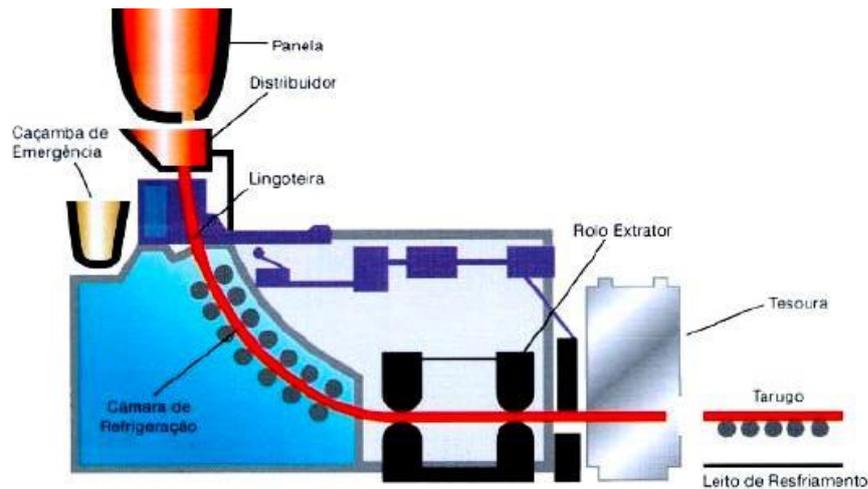


FIGURA 1 – Máquina de Lingotamento Contínuo.

### 3.4 O PROCESSO DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO

O processo de lingotamento contínuo pode ser considerado essencialmente como um processo de transferência de calor, no qual o metal líquido é transformado via solidificação em um produto sólido semi-acabado. O processo é utilizado na produção de chapas e tarugos de um grande número de ligas de metais não-ferrosos, mas sob o ponto de vista tecnológico o lingotamento contínuo de aços se sobressai em importância, já que esse processo é responsável por cerca de 90% de todo o aço produzido no mundo. (GARCIA 2006).

Como ilustrado na Figura 2 a seguir o lingotamento contínuo pode ser dividido em oito seções: Panela, distribuidor, molde (resfriamento primário), câmara de spray (resfriamento secundário), extração e desempenho, máquinas de corte, barra falsa e sistema de transferência de tarugos.

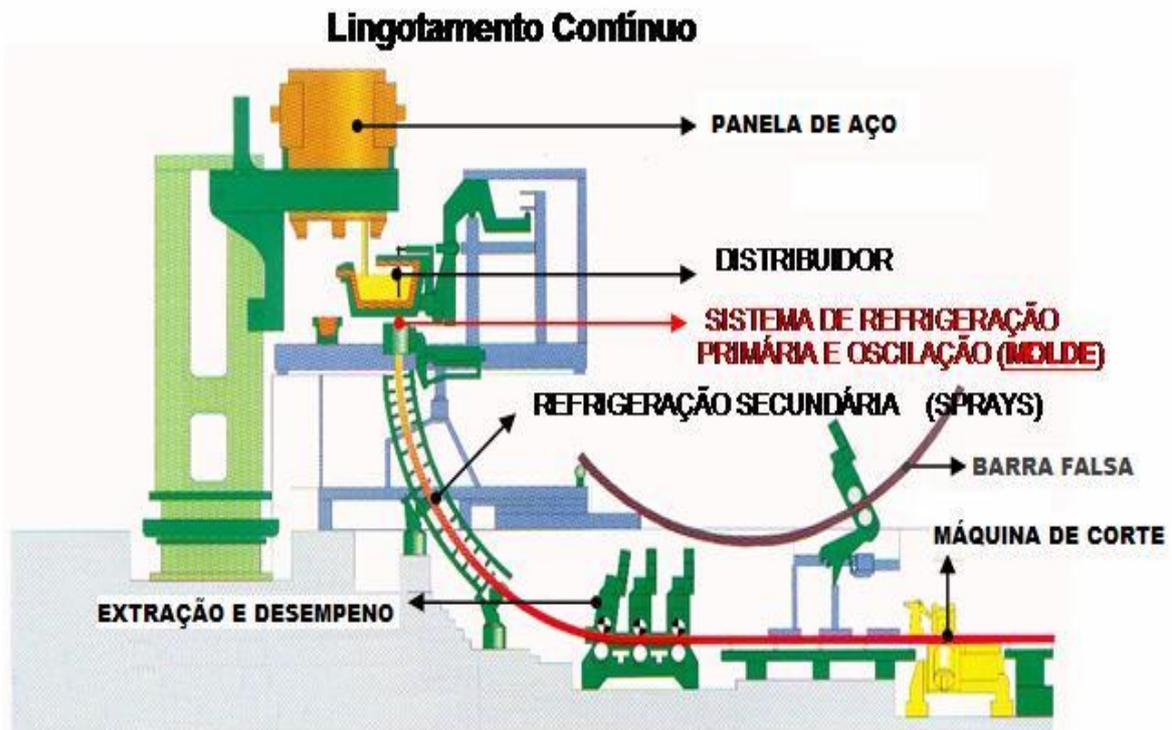


FIGURA 2: Fluxograma do Processo do Lingotamento Contínuo.

### 3.4.1 Painela de Aço

A painela é um vaso metálico com revestimento refratário (tijolos) internos usados para transportar até as máquinas de lingotamento Contínuo o aço Líquido vazado pelo Forno Elétrico. Com relação ao modo de vazamento do aço para o distribuidor. As painelas podem ser classificadas em três tipos: Painela com o bico, a painela com tampão e a painela com válvula gaveta.

A painela, representada na Figura 3 a seguir, transfere o aço para o distribuidor através de seu basculamento. Nos tempos iniciais de lingotamento Contínuo, quando a capacidade das painelas era pequena e o tempo de lingotamento era bastante longo, era o tipo de painela mais utilizado. Esse tipo de painela ainda é utilizado em equipamentos de pequena capacidade.

Atualmente é possível atingir altas velocidades de lingotamento devido a melhorias no equipamento e nas técnicas operacionais, sendo possível manter o tempo de lingotamento em menos de uma hora por corrida, mesmo para painelas de

grande capacidade. Tem havido sensíveis melhorias nos materiais dos tampões e válvula gaveta. Com o resultado, a panela com tampão é utilizada em algumas usinas. Contudo nos dias de hoje o tipo de panela mais utilizada é a com válvula gaveta.

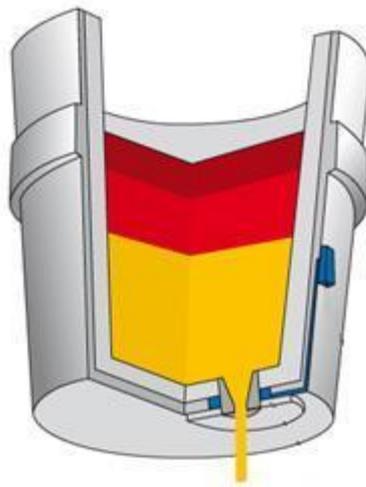


FIGURA 3: Desenho da uma panela com válvula gaveta.

### 3.4.2 Suporte da Panela de Aço

Este equipamento tem a função de manter a panela de aço sobre o distribuidor para que a máquina de lingotamento contínuo seja abastecida com o aço líquido.

Existem 4 tipos de suporte de panelas:

- Ponte Rolante;
- Plataforma de panelas;
- Torre Giratória;
- Carro panela;

O suporte usado aqui na SINOBRAS é o Carro Panela tipo solidário, ou seja, os carros são unidos por isso não movem de forma independente, representada nas FIGURAS 4 a 7, a seguir. Este sistema constitui 2 carros que trabalham de forma alternada quanto a posição de lingotamento. O carro panela fica em uma posição de

recebimento e quando a panela é depositada o mesmo vai para a posição de lingotamento.

Quando o aço da panela que esta na posição de lingotamento acaba o carro vai para a posição de recebimento e o outro que esta com uma panela cheia o substituem dando seqüência ao processo.

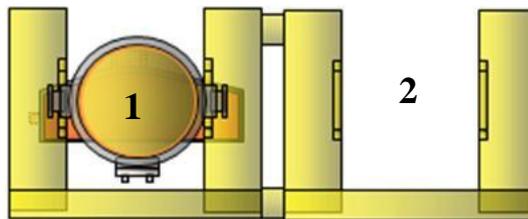


FIGURA 4: Carro panela nº 1 com panela em operação (posição de lingotamento)

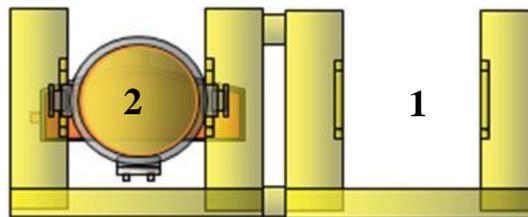


FIGURA 5: Carro panela nº 2 com panela recebimento (posição de recebimento)

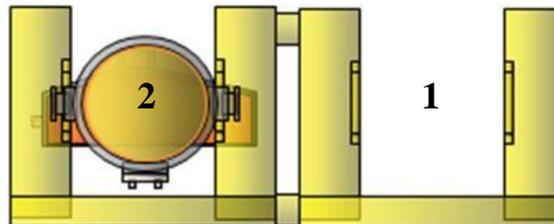


FIGURA 6: Carro panela nº 2 com panela em operação (posição de lingotamento) e carro nº1 sem panela (posição de recebimento)



FIGURA 7: Carro Panela (posição de Recebimento de Panela)

### 3.4.3 Distribuidor

O distribuidor é um recipiente intermediário que recebe o aço da panela e distribui este aço para os veios. Sua principal finalidade é permitir o controle da vazão do aço para o molde, pois a pressão ferrostática é bastante diminuída em relação à pressão do jato da panela. Outra Vantagem é permitir a flotação de impurezas que tenha sido arrastada.

O distribuidor é revestido internamente com refratários e em seu fundo, são instaladas válvulas (que permitem a passagem do aço) de acordo com o numero de veios que a máquina possuir.

A capacidade e o método de controle da vazão são dois fatores que devem ser tomados em consideração a estrutura do distribuidor. Levando em conta fatores como a flotação de materiais oriundos da desoxidação, estabilidade do jato de aço da panela e remoção de refratário no ponto de impacto do jato de aço da panela. Além disso, é necessário um volume suficiente para permitir o lingotamento

seqüencial de corridas (troca de panelas). A baixo esquematicamente representada na Figura 8.

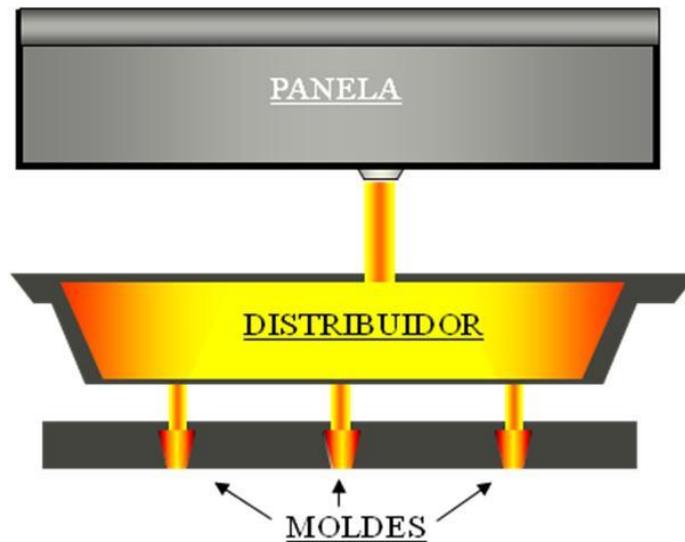


FIGURA 8: Panela, distribuidor e moldes.

#### Principais funções do distribuidor:

- Distribuir aço para os moldes;
- Propiciar a flotação das inclusões;
- Equalizar a temperatura do aço vazado da panela;
- Permitir um melhor monitoramento da temperatura do aço;
- Diminuir consideravelmente o jato de aço para abastecimento da máquina;
- Permitir que os moldes sejam abastecidos com aço durante a troca de panela;

### 3.4.4 Suporte do Distribuidor

Normalmente o distribuidor é colocado sobre um carro que se desloca ao longo da plataforma operacional. Esse carro tem a finalidade de posicionar o distribuidor para aquecimento ou para colocá-lo na posição de lingotamento para operação. Este sistema é similar ao carro panela, a diferença é que a máquina de lingotamento possui apenas um carro de distribuidor, conforme demonstrado na Figura 9.



FIGURA 9: Carro do distribuidor

### 3.4.5 Molde (RESFRIAMENTO PRIMÁRIO)

Os moldes empregados no lingotamento contínuo devem ser de material de boa condutividade térmica e boa resistência mecânica. Usa-se o cobre puro ou uma liga de cobre revestida com cromo ou níquel, como forma de aumentar à resistência a abrasão. Internamente os moldes são refrigerados pela passagem, em rasgos ou furos, da água a alta pressão. A forma do molde pode ser dividida em 3 tipos: Blocos, tubular e placas ajustáveis, na nossa máquina de lingotamento é utilizado o tipo tubular.

As principais funções do molde são: promover a refrigeração primária formando a primeira pele do veio, dar forma ao produto e sustentar o veio nos estágios iniciais de lingotamento, representada na Figura 10.



FIGURA 10: Desenho do molde abastecido com aço líquido.

O molde é dotado de um movimento de subida e descida chamado oscilação. Normalmente o tipo de oscilação empregada é o senoidal (como a de um pêndulo). O equipamento responsável por este trabalho é denominado **Oscilador do molde**.

A principal razão da existência de tal oscilação é a de evitar que haja um colamento do aço com a parede do molde. A oscilação atua como uma bomba, fazendo com que o óleo fluxante penetre entre o aço e o molde, lubrificando e impedindo o contato entre os dois.

A combinação ideal do curso (amplitude) e a frequência de oscilação têm como objetivo melhorar a lubrificação e a qualidade superficial da placa obtida é feita levando-se em consideração o tipo de aço lingotado, a velocidade de lingotamento e o tipo de fluxante empregado.

### 3.4.6 Zona de Resfriamento Secundário

A espessura da pele do veio na saída do molde varia de 10 a 30 mm suficiente para suportar a pressão exercida pelo aço líquido em seu interior (pressão ferrostática). O resfriamento secundário que inicia-se abaixo do molde tem a finalidade de acelerar a solidificação do veio, evitando o seu rompimento.

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), Figura 11, 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, representada na Figura 12.



FIGURA 11: Bico de spray tipo jato cônico;

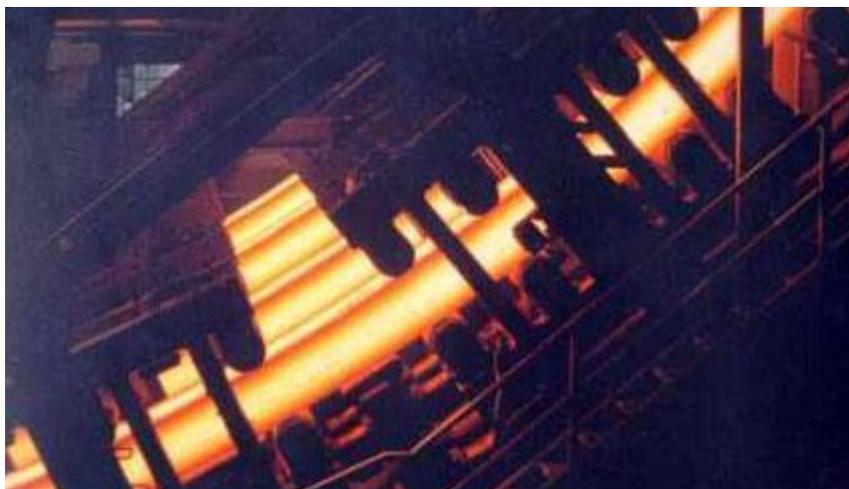


FIGURA 12: Câmara de spray com o veio em operação;

### 3.4.7 Extração e Desempeno

A função dos rolos extratores, representada na Figura 13, é suportar a seção lingotada e extraí-la com velocidade determinada pelo nível de aço no molde. A velocidade da unidade de extração é em função do controle automático do nível de aço no molde. Cada veio possui uma unidade de extração e unidade é formada por um par de rolos extratores. A unidade de desempenho, conforme mostrada na Figura 14 tem a função de desconectar a barra falsa nos estágios iniciais do lingotamento e realizar a função de endireitar a seção lingotada.

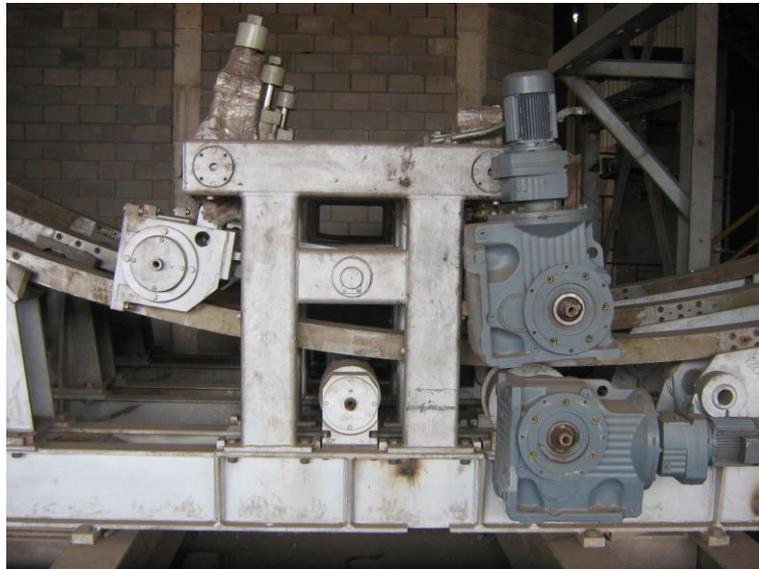


FIGURA 13: Unidade de extração.



FIGURA 14: Desempeno do veio;

### 3.4.8 Pinch Roll

A função deste equipamento é auxiliar a extração do veio durante o lingotamento aliviando a pressão exercida pela unidade de extração e desempenho e no final de lingotamento remover o veio até a máquina de corte assim que o mesmo sai dos rolos extratores. O Pinch roll, representado pelas Figuras 15 e 16, é posicionado antes das máquinas de corte e são dotados de movimento de elevação.

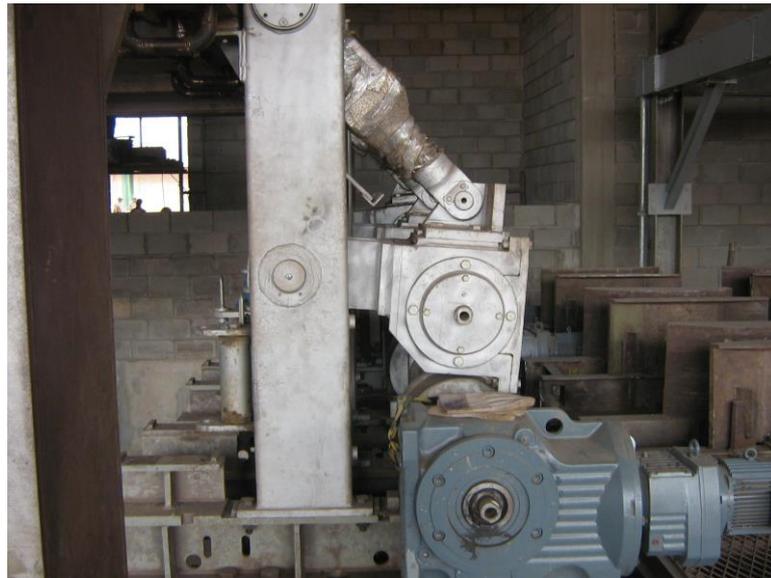


FIGURA 15: Pinch Roll, perfil.

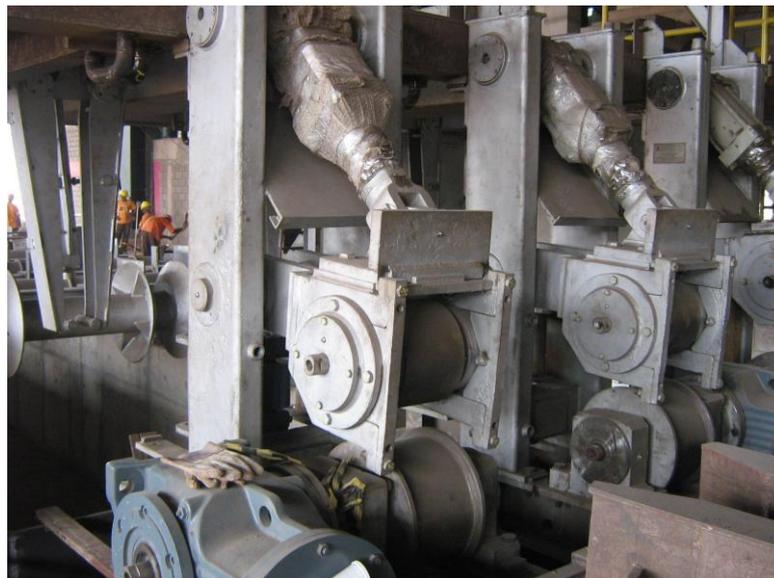


FIGURA 16: Pinch Roll, frente.

### 3.4.9 Máquina de Corte

A função deste equipamento é cortar a seção lingotada (veio) em comprimentos pré-determinado pela laminação. Sendo 3 tipos de máquinas de corte podem ser utilizados em processos de Lingotamento Contínuo: Corte a plasma; Tesoura; (Figura 18) e Máquina de oxicorte; (maçarico oxicorte).

O corte normalmente é feito por maçaricos que empregam uma chama feita com oxigênio/Acetileno ou oxigênio/GLP (utilizado na SINOBRAS) representada na Figura 17.



FIGURA 17: Máquina de oxicorte.



FIGURA 18: Tesoura hidráulica.

### 3.4.10 Barra Falsa

A Barra Falsa é o componente responsável pelo início da operação das máquinas de lingotamento contínuo, ela tem a função fazer um fundo falso no molde para iniciar a extração do veio até a unidade de desconexão. Demonstrado na Figura 19.

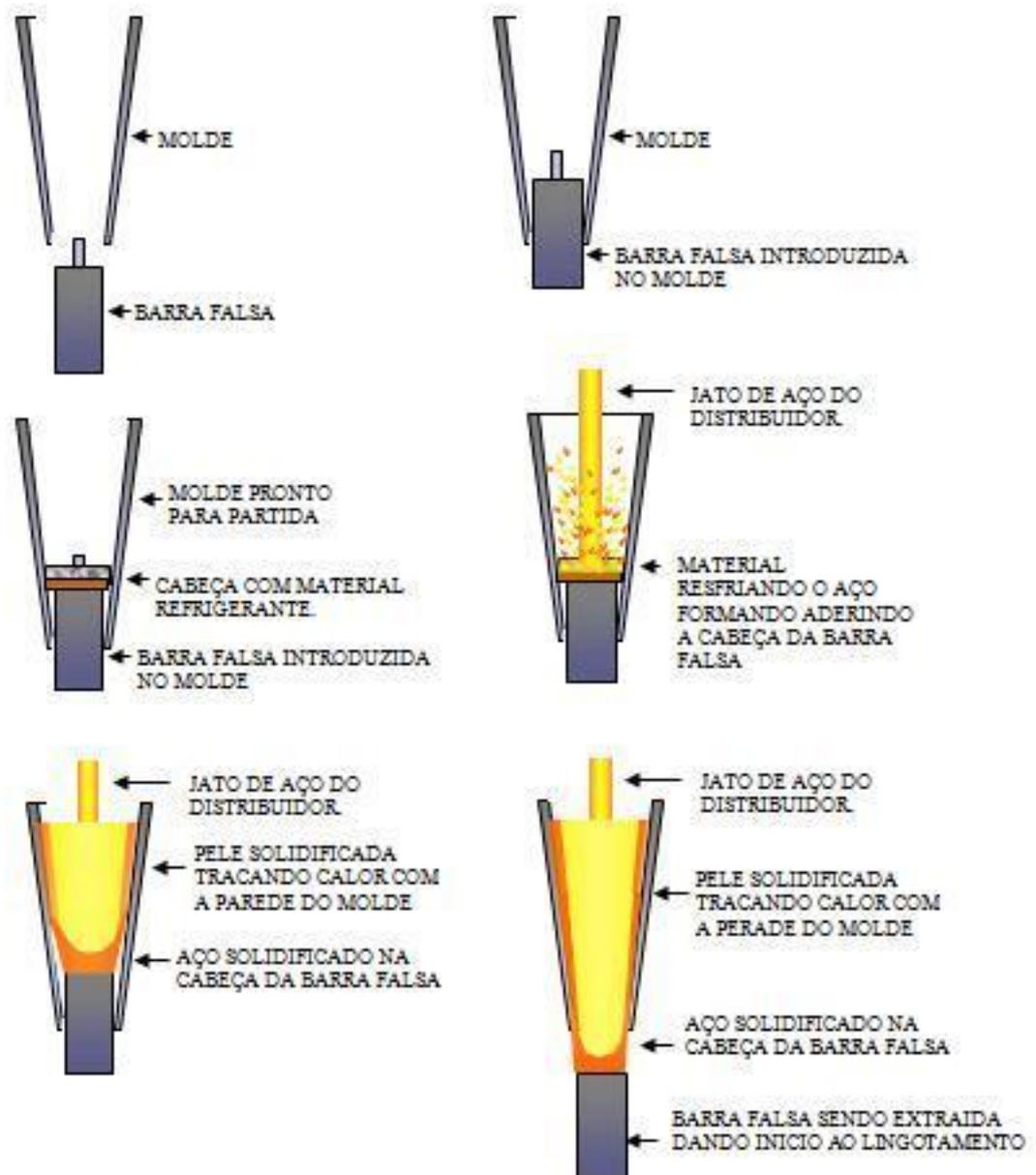
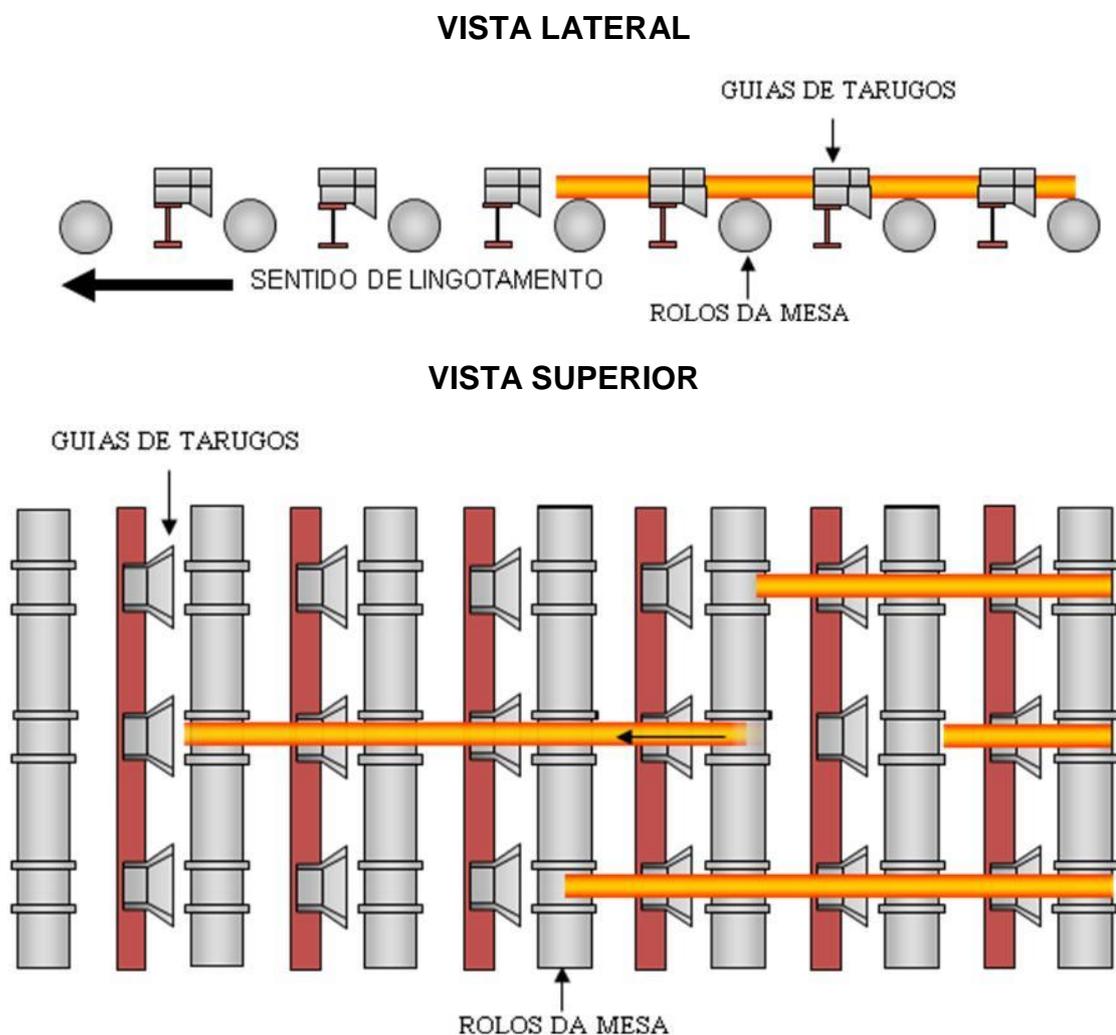


FIGURA 19: Esquema de introdução da barra falsa e partida de máquina

### 3.4.11 Sistema de Transferência de Tarugos

#### 3.4.11.1 Mesa de Rolos

Após as máquinas do corte os tarugos são transportados por uma mesa de rolos, onde no final desta mesa se inicia a transferência de tarugos para o pátio de estocagem. Estas mesas possuem “rolos comuns”, ou seja, uns rolos que atendem a todos os veios com um único acionamento conforme a Figura 20.



### 3.4.11.2 Sistema de Batentes

No final da mesa de rolos existem **batentes** que tem a finalidade de separar os tarugos (cortados com menos de 6 m) em duas baterias e impedir que outros tarugos entrem na mesa de transferência, onde por sua vez possui um equipamento chamado de transferidor de tarugos. Demonstrado na Figura 21.

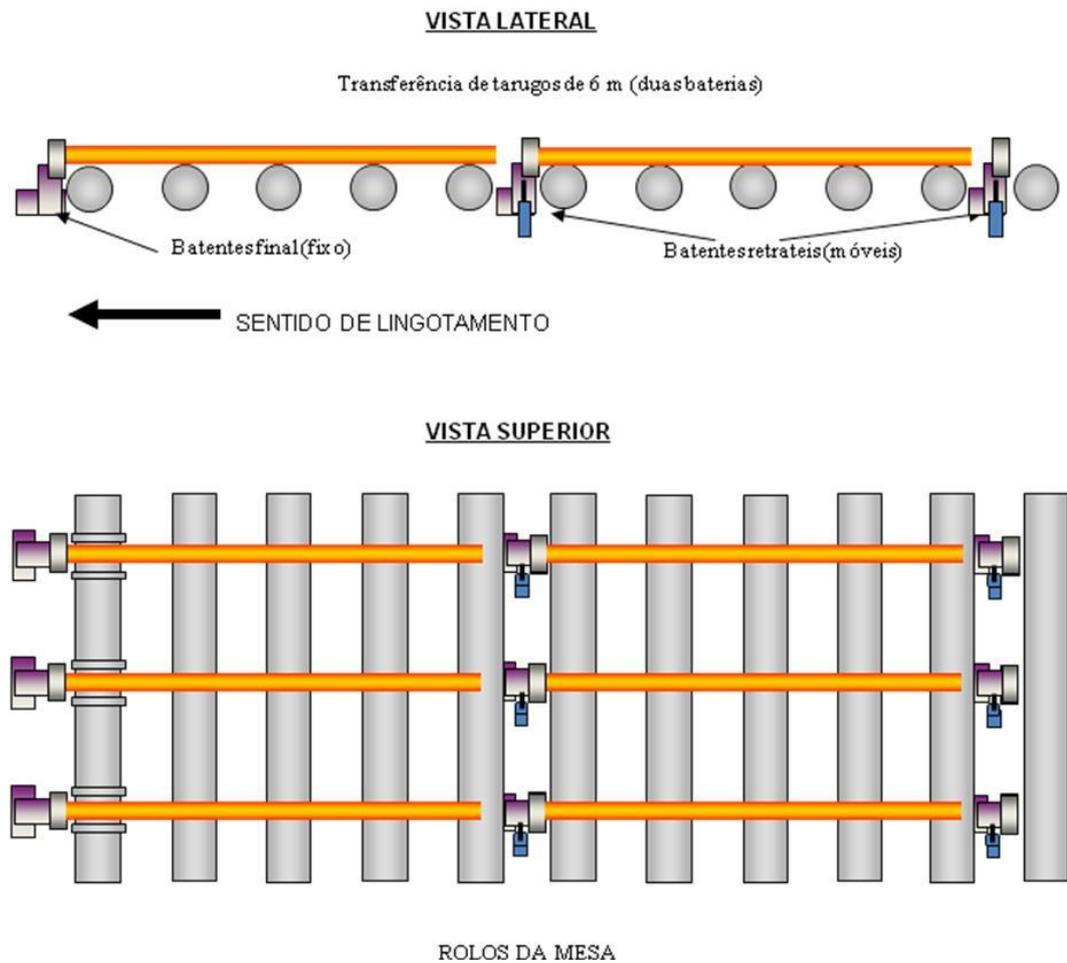


FIGURA 21: Sistemas de Batentes

### 3.4.11.3 Transferidor

As mesas de transferências devem ser ágeis, atendendo as diversas lógicas de transferências automaticamente. O transferidor de tarugos é responsável pelo deslocamento dos tarugos da mesa de rolos para o Leito de Resfriamento, este sistema funciona acionado por um motor elétrico, que rotaciona um eixo conectado a um sistema de cabos de aço que por sua vez movimentam o transferidor, conforme a Figura 22.

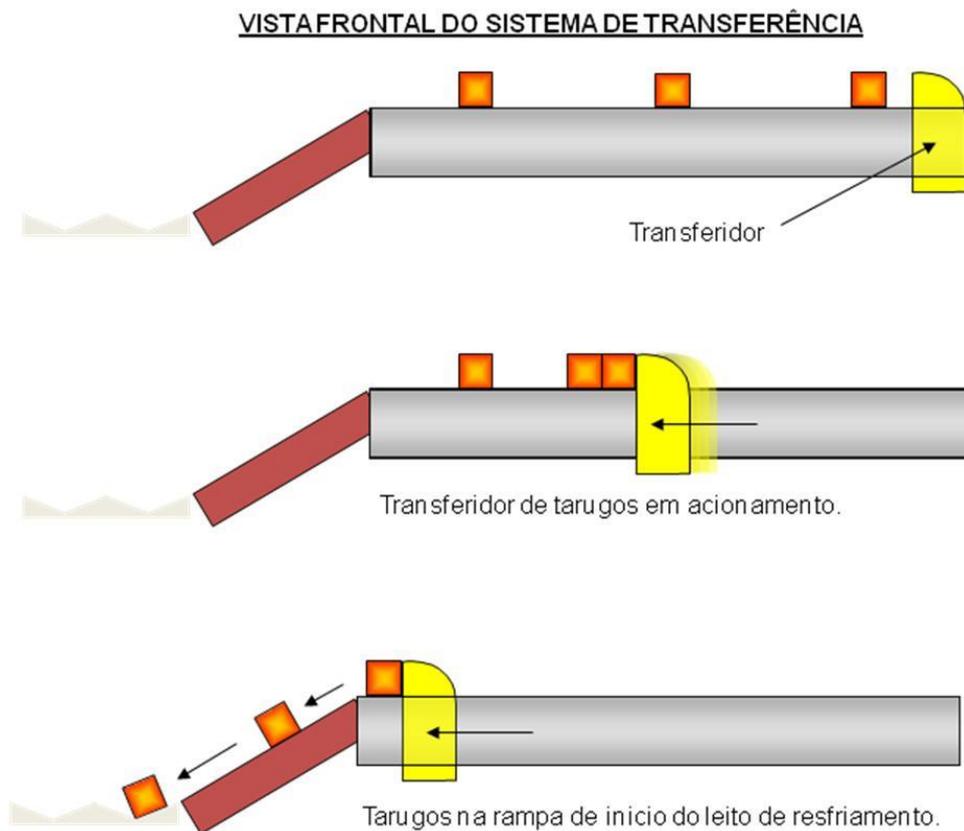


FIGURA 22: Transferidor de tarugos.

#### 3.4.11.4 Leito de Resfriamento

Os leitos de resfriamento devem ser projetados para assegurar a retilidade dos tarugos, assegurarem a retirada homogênea do calor remanescente dos tarugos e assim possibilitar sua estocagem sem problemas, e um mínimo de manutenção, conforme a Figura 23 a seguir.

O leito de resfriamento é constituído por um sistema de régua dentada sendo que uma é fixa e a outra é móvel acionada por cilindros hidráulicos. Estas régua fazem com que os tarugos caminhem para o leito fixo que possam ser retiradas para o pátio de estocagem.



FIGURA 23: Régua do leito de resfriamento;

### 3.4.12 Esquema Funcional do Leito de Resfriamento

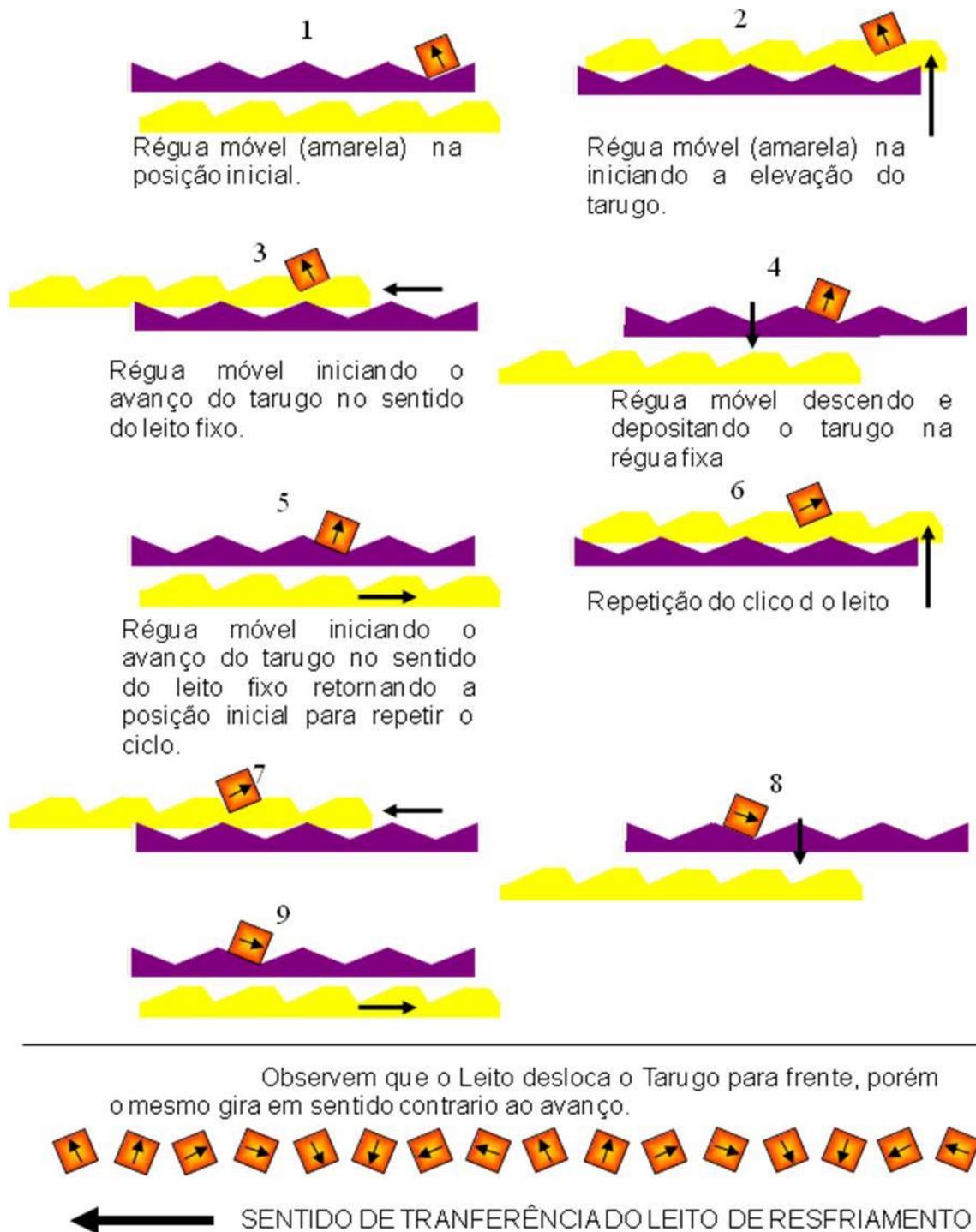


FIGURA 24: Esquema funcional do Leito de Resfriamento

### 3.4.13 Pátio de Estocagem de Tarugos

No PTL (Pátio de Tarugos Lingotados), os tarugos lingotados são estocados em baias e separados por tipo de aço com identificação, do número da corrida e a quantidade de peças que a mesma produziu.

Neste local é feita a inspeção a frio dos tarugos. Depois de inspecionados e identificados os tarugos são transportados para o forno de reaquecimento da laminação para serem laminados, porém existe a possibilidade que estes sejam enviados por carretas até os clientes, conforme a Figura 25.



FIGURA 25: Empilhamento dos tarugos

Os tarugos são retirados do leito fixo e empilhados nas Baias do PTL, demonstrada na Figura 26, com o auxílio de uma ponte rolante do eletroímã.



FIGURA 26: Estocagem dos tarugos.

## 3.5 DEFEITOS

### 3.5.1 Defeitos Internos:

O estudo sobre as bolhas tubulares e poros em produtos lingotados continuamente, discutiremos os defeitos internos, onde defeitos como porosidade interna, macroinclusões, trincas “off corner”, trincas intermediarias, segregação e porosidade central serão descritos.

#### 3.5.1.1 Bolhas (PIN-HOLES) e Bolhas Tubulares (BLOW-HOLES)

Defeitos superficiais abertos originados pelo desprendimento de gás do aço são normalmente conhecidos como bolhas, defeitos grosseiros, sub-superficiais formado pelo aprisionamento de gás de forma tubular são chamados bolhas tubulares, demonstrado na Figura 27.



FIGURA 27: Exemplos de defeitos internos no tarugo

A presença de bolhas superficiais é comum para todos os aços semi-acalmados lingotados com óleo. Os “pin-holes” podem dar lugares a defeitos superficiais críticos no produto laminado, caso ocorra uma penetração considerável ou acúmulo em uma determinada região.

As bolhas superficiais apresentam formação de carepa na superfície e certa decarbonetação na matriz metálica ao redor da bolha. Isto é uma diferença importante em relação as bolhas subsuperficiais ou “blow-holes”. A carepa impede a solda durante a laminação. O defeito gerado pelo “pin-hole” é normalmente pequeno. Porém, se há muitos pin-holes ou se são particularmente profundos,

podem dar lugar a defeitos indesejáveis. O tempo de permanência e a temperatura no forno de preaquecimento caso o tarugo tenha pin-holes também podem agravar a situação.

Os valores normais de vazão de óleo estão entre 30 e 40 ml/min, dependendo das características do óleo, bitola lingotada e velocidade de lingotamento. Para minimizar a formação de pin-holes não só é importante assegurar-se que a adição de óleo esteja dentro de valores normais, fazendo curvas de calibração dos reostatos, mas também verificar que a distribuição seja homogênea na seção transversal. Isto pode ser feito no intervalo entre seqüências, mediante uma caixa com compartimentos que receba na base do molde o óleo que desce, durante um tempo definido e com uma posição determinada do reostato. A distribuição homogênea do óleo é favorecida por ranhuras de lubrificação estreitas e utilização de uma vedação ou “gasket” que impede um excesso de óleo nos cantos.

Um caso extremo, originado por presença excessiva de hidrogênio devida à deficiência na secagem do revestimento novo de uma panela. As bolhas começam a aparecer aproximadamente 5 mm da pele, após a faixa “chill”, e terminam neste caso a uns 20 mm, quando a pressão ferrostática compensa a pressão dos gases dissolvidos no aço.

É interessante observar a forma das bolhas, em relação com mecanismo de formação. Estas bolhas às vezes, quando observados imediatamente após o ataque com reativo de Oberhofer, apresentam segregação na direção de solidificação. Isto tem a ver com o mecanismo de formação de bolhas no espaço interdendrítico, conforme já mencionado.



FIGURA 28: Bolhas tubulares no tarugo.

Existem diversos modelos baseados na físico-química que permitem avaliar as condições para evitar a formação de bolhas durante o lingotamento. Estes modelos se baseiam no postulado que a formação de bolhas durante a solidificação do aço é uma consequência da microsegregação de soluto durante a solidificação dendrítica do aço líquido e a interação de soluto no líquido interdendrítico enriquecido por impurezas.

Os solutos dissolvidos no aço líquido que contribuem à formação de bolhas são, para o caso de aços lingotados sem injeção de argônio, o H, N e CO. Quando a soma das pressões parciais de equilíbrio destes solutos no líquido interdendrítico supera a pressão externa nesse ponto, se geram as bolhas de gás, resultando na expulsão do líquido interdendrítico e na formação de poros que ficam aprisionados e crescem dentro da rede de dendritas. Podemos descrever isso mediante a equação:

$$p_{H_2} + p_{N_2} + p_{CO} > P_s + P_f + 2\sigma/r$$

Onde:

**$P_s$**  – Pressão atmosférica sobre a superfície do aço líquida;

**$P_f$**  - Pressão ferrostática na localização do poro;

**$\sigma$**  - Tensão superficial do aço líquido em contato com a bolha de gás de raio  **$r$** .

Para uma bolha de gás de 1 mm de raio a pressão em excesso devida à tensão superficial é só de 0,02-0,03 bar. Para o tamanho dos poros observados no tarugo, o efeito da tensão superficial tornar-se insignificante.

Para os aços Si-Mn, o problema passa por obter uma desoxidação suficiente para evitar a formação de poros sem dar lugar à obstrução da válvula da panela ou distribuidor por formação de inclusões parcialmente sólidas.

O procedimento de injetar arame de alumínio no molde pode ser uma solução para o problema, mas traz consequências, tais como inclusões duras, tendência à incrustação de escória, dificuldade para o controle do tamanho de grão, etc.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS PARA ANÁLISE MACROGRÁFICA

A inspeção off-line inicia com a separação da corrida após o término do lingotamento. A escolha foi realizada aleatoriamente, pois a cada dia uma corrida é separada para análise de defeitos superficiais e internos, este último através de macrografia, é o que nos interessa para a identificação de bolhas e poros nos tarugos.

A corrida separada em um local pré-estabelecido conforme a Figura 29 abaixo, as corridas em geral apresentam em média 25 peças de 12 m de comprimento e seção 130 mm.



FIGURA 29: Banca examinadora de tarugos

Foram selecionadas 10 peças aleatoriamente para a inspeção, sendo que duas delas foram realizadas a macrografia.

**1º. – Passo:**

- Foi medido com auxílio de uma trena 300 mm para o corte, conforme a Figura 31, utilizando um maçarico, e posteriormente identificando-a com o número da corrida e o veio em que foi retirado.
- Em seguida, foi medido 100 mm, e sendo demarcado conforme a Figura 30 a baixo, cortando a amostra através da serra fita. A utilização da serra fita nesta etapa é para não alterar as propriedades mecânicas da amostra não mascarar o resultado na macrografia, devido à alta temperatura do maçarico.



FIGURA 30: Máquina de Serra Fita Horizontal. MODELO: FM 500A, fabricante FRANHO.



FIGURA 31: Amostra para macrografia.

**2º. – Passo:**

- O lixamento das superfícies das amostras ocorreu com lixas 80 e 100 mesh, através de uma lixadeira giratória preparando-as posteriormente para ataque químico.
- Foram utilizados dois tipos de reagentes em amostras diferentes, são elas:

- HCl: Adicionando 50 mL de ácido clorídrico, para Becker de 1000 mL contendo 50 mL de água. O ataque químico, para esta solução foi de 30 minutos nas duas superfícies e de 10 minutos nas faces das amostras, a fim de revelar possíveis Pin-Holes nas mesmas.
- Nital 4%: A solução conteve 96 mL de álcool e 4 mL de ácido nítrico. O ataque químico durou 3 minutos tanto na superfície quanto também para as faces da amostra, demonstrada na Figura 32.

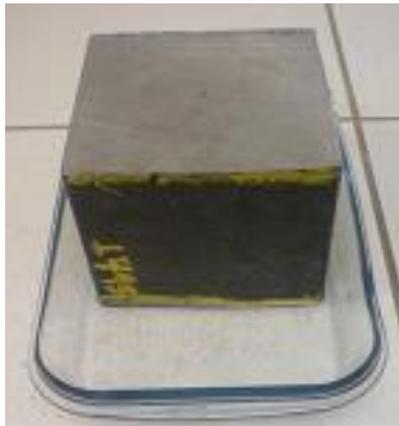


FIGURA 32: Ataque químico.

### 3°. – Passo:

- Para a identificação de PINHOLES na amostra, as quatro faces da amostra foram lavadas com a solução HCl, para revelação de Pin Holes escondidas por carepa. Posteriormente foi lavada com água e em seguida com álcool etílico, a fim de remover a solução, representada na Figura 33. Cada face foi atacada por 10 minutos com a mesma solução utilizada anteriormente.

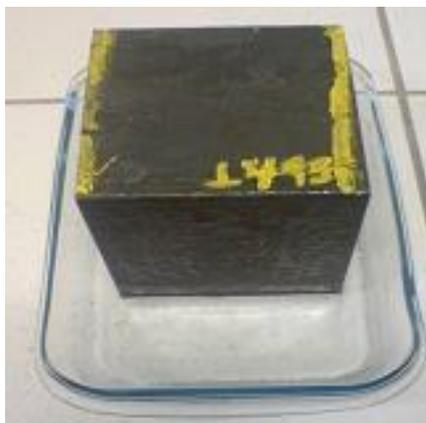


FIGURA 33: Amostra da corrida N° 1493.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 IDENTIFICAÇÃO DOS DEFEITOS NA AMOSTRA:

#### 5.1.1 Contagem de PIN-HOLES da Corrida:

Contando visualmente o número de Pin-Holes com diâmetro maior ou igual a 0,5 mm nas 4 faces da amostra do tarugo. O comprimento do tarugo para a amostra deve ser no mínimo de 100 milímetros. Para se garantir o diâmetro máximo do Pin-Holes deve se usar uma lapiseira com grafite 0,5 mm, introduzindo o grafite no orifício se passar desclassificar, em seguida os poros devem ser identificados com um círculo, conforme a figura 34.

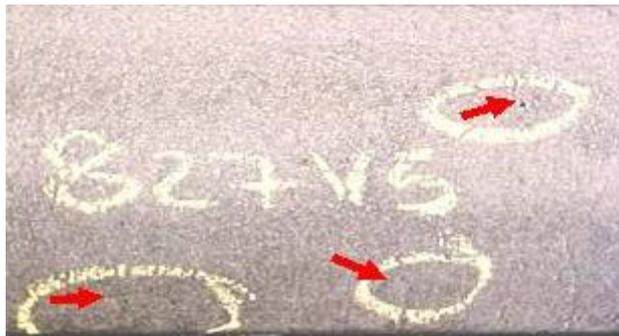


FIGURA 34: Identificação de poros na amostra.

#### 5.1.1.1 Classificação das Corridas:

Classificando as corridas conforme o número de Pin-Holes.

- $0 < n \leq 3$  maior que 0.5 mm aço I (ISENTO)
- $3 < n \leq 5$  maior que 0.5 mm L (LEVE)
- $n > 5$  = desclassificado para mercado interno.

As corridas após serem reclassificadas no laboratório deverão ter suas fichas alteradas e se preciso a mesma deve ser alteradas no GPP.

### 5.2.1 Contagem de Blow-Roles da Corrida:

Observando a superfície interna e externa da amostra se há presença de vazios conforme a figura 35.

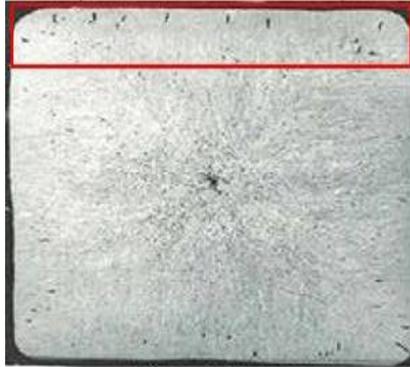


FIGURA 35: Identificação de bolhas tubulares na amostra.

#### 5.2.1.1 Classificação das Corridas:

Classificando as corridas conforme o número de Bow Holes.

- $0 < n \leq 3$  maior que 5 mm aço I (ISENTO)
- $3 < n \leq 5$  maior que 5 mm L (LEVE)
- $n > 5$  = desclassificado para mercado interno.

As corridas após serem reclassificadas no laboratório deverão ter suas fichas alteradas e se preciso a mesma deve ser alteradas no GPP.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 ORIGEM DO DEFEITO:

- Corrida oxidada, altos teores de  $H_2$  e  $N_2$  – A quantidade excessiva de gases presentes no aço líquido no momento em que ocorre o lingotamento no molde, devido a velocidade de solidificação e o fluxo de aço por pressão ferrostática, são fatores que ocasionam a impossibilidade do despreendimento de gases, gerando defeitos como bolhas e poros no aço;
- Excesso de óleo de lubrificação no molde ou umidade (água misturada no óleo) – A lubrificação em excesso no molde, principalmente no momento em que se inicia o processo de lingotamento, acarreta um acúmulo de óleo na superfície do molde, que posteriormente é arrastado devido o fluxo do aço para o centro do aço líquido, juntamente com bolhas de ar. Caso a temperatura do aço líquido esteja no seu limite mínimo de lingotamento, o ar presente junto o óleo ficará aprisionado no aço, gerando bolhas e poros;
- Umidade no tundish dos refratários e/ou da palha de arroz – Os distribuidores no início de partida, tem uma baixa temperatura em relação ao aço líquido a ser lingotado, mesmo ao serem aquecidos a  $1000^\circ C$ . O distribuidor só estará equilibrado termicamente com o aço líquido quando denominamos que o mesmo esteja “encharcado” termo designado para definir que a temperatura do distribuidor esteja praticamente igual ao aço que esteja lingotando. Pois o distribuidor que sai do aquecedor ele apresenta certa quantidade de gases agregados nos refratários, que no momento do lingotamento são despreendidos para o aço líquido e levados até o molde. As palhas de arroz úmidas transferem a umidade para o aço líquido ocasionando praticamente os mesmos problemas.
- Excesso de argônio que passa do distribuidor para o molde através da válvula submersa;
- Variação do nível de aço no molde – A variação do nível de aço líquido no molde pode acarretar o arrastamento de gases presos na superfície do molde para o interior do aço líquido. Originando possíveis bolhas ou poros no tarugo.
- Parada da máquina de injeção de Al – O alumínio tem a função de desoxidar o aço líquido pela facilidade do Alumínio se ligar com o Oxigênio

transformando em alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). A alumina formada é conduzida através da solidificação das dendritas para o centro do molde. Devido a sua pequena quantidade não acarreta problemas quanto a qualidade do aço.

## 6.2 CONTRAMEDIDAS

- Implementar uma correta prática operacional que permita obtenção de corridas desoxidadas;
- Efetiva selagem de jato entre panela/distribuidor e molde para evitar reoxidação;
- Pré-aquecimento do pó ou óleo de lubrificação;
- Adição de fio de Al no molde, quando for possível sua fusão dentro do molde;
- Agitação eletromagnética do molde (stirring) para reduzir a quantidade de bolhas comuns e tubulares na superfície do aço ou próximos a ela;
- Minimizar a flutuação do nível do molde.

## 6.3 COMO DETECTAR O DEFEITO:

- Muito difícil observá-la durante o lingotamento;
- Visível após limpeza mecânica da superfície (bolhas);
- Visível após ataque químico (Bolhas);
- As bolhas comuns são visível mesmo antes da limpeza da superfície, mas algumas podem ficar ocultas sob a carepa. É importante a limpeza mecânica e melhor ainda a decapagem química.
- As bolhas tubulares só podem se observadas na seção reta do tarugo através de exame macrográfico ou impressão de Baumann.

## 6.4 CONSEQÜÊNCIAS DO DEFEITO NO PRODUTO FINAL APÓS LAMINAÇÃO:

- Dependendo da quantidade de redução as bolhas podem causar trincas superficiais de diferentes comprimentos na superfície do laminado (por exemplo, 30 a 40 cm de comprimento e de 0,07 a 1,0 mm de profundidade, trincas muito freqüentes na laminação de fio máquina);
- Trincas tubulares próximas à superfície podem abrir e causar sérios danos ao produto laminado. Bolhas tubulares mais afastadas da superfície

normalmente caldeiam durante o processo de laminação causando poucos problemas.

- As porosidades leves e médias causam o aparecimento de dobras e/ou trincas nos laminados.
- As porosidades graves geram o aparecimento de lascas nos laminados.

Quanto ao controle operacional, deve-se ter em mente que todo sistema possui um tempo de resposta a qualquer mudança em algumas de suas variáveis, ou seja, uma situação que foi analisada em um intervalo de tempo deverá levar em consideração o tempo de processamento da condição atual recebida por algum sensor, o tempo de resposta do controlador para o atuador e o tempo de ação do atuador para tomar decisões que levem a alterações nos parâmetros operacionais do equipamento. O controle da qualidade dos produtos obtidos pelo processo de lingotamento contínuo é de suma importância para a minimização de custos, tempo de processo e obtenção de reprodutibilidade nas corridas. Aliado a uma boa produtividade, não pode ser alcançado sem um amplo conhecimento do processo, englobando parâmetros e variáveis de influência tais como características do equipamento, metal lingotado, comportamento de cada componente do sistema e condições operacionais.

As contramedidas comentadas foram aplicadas as corridas seguintes. A fim de solucionar os problemas de processo de fabricação de tarugos no lingotamento contínuo, evitando assim gastos ocasionados pelos defeitos que gerariam sucata. A seguir foi retirada uma amostra do tarugo sem qualquer tipo de defeito, após as medidas de correções de falhas anteriores, demonstrada na figura 36.

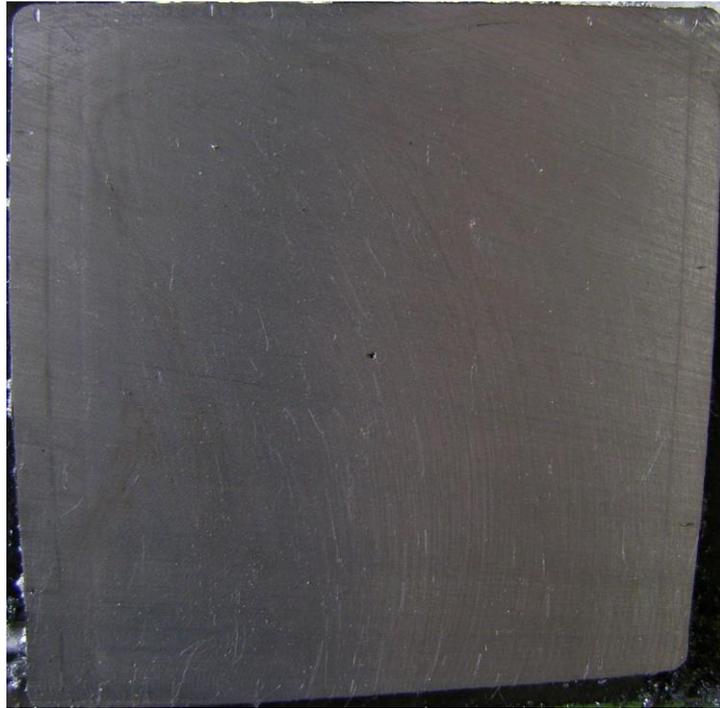


FIGURA 36: Amostra sem defeitos.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- A influência da baixa temperatura na formação de bolhas tubulares e poros no tarugo.
- Controle de temperatura na liberação da panela para o lingotamento contínuo.
- Controle da rinsagem no forno panela.
- Análise de temperatura e desgaste do distribuidor.

## BIBLIOGRAFIA

- ARAÚJO, Hiller Geraldo Vieira. **Desenvolvimento de uma metodologia para análise de fluxo de aço no interior de moldes de lingotamento contínuo, através de modelamento físico**. Dissertação de Mestrado - Rede Temática de Engenharia de Materiais, UFOP, Ouro Preto, 2000.
- CHEVRAND, Lauro José Salles; REIS, Guilherme Otávio Nogueira dos. **Lingotamento Contínuo de Billets**. São Paulo: Associações Brasileiras de Metais, 1989.
- Chiaverini, Vicente, **Tecnologia mecânica** (Processos de fabricação e tratamento), 2<sup>o</sup> edição volume III: MAKRON Books do Brasil editora LTDA, 1986.
- Freitas, S.L.; **Estudo do Escoamento e do Arraste de Escória no Molde de Lingotamento Contínuo**. Porto Alegre, 2000. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Curso de Pós – Graduação em Engenharia Metalúrgica da UFRGS.
- Garcia, A.; Spim, J.A.; Santos, CA.; Cheung, N. Lingotamento Contínuo de Aços. **Associação Brasileira de Metalurgia**, São Paulo, SP. (2006).
- H., Lawrence / Van Vlack, **Princípios da ciência e tecnologia dos materiais**. Tradução da 4<sup>o</sup> edição: Editora Campus, 1984.
- Pehlke, R. D; Harabuchi, T.B. “Continuous Casting Vo. IV”. **Iron & Steel Society, University of Michigan**, pp. 308 – 316 (1988).
- SANTOS, Vicente Campanharo dos. **Lingotamento Contínuo de Tarugos com uso de Agitação Eletromagnética no Molde**: Resultados Metalúrgicos. Dissertação de Mestrado - Rede Temática de Engenharia de Materiais, UFOP, Ouro Preto, 2003.