

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

Departamento de Metalurgia

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE FLUXANTES APLICADOS NO LINGOTAMENTO
CONTÍNUO DO AÇO SAE 1046 MOD

Vinicius Cardoso da Rocha

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr-Ing. Antônio Cezar Faria Vilela

Porto Alegre
2014

Dedico este trabalho ao meu pai, Coraci e à minha mãe, Irene.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida, saúde e capacidade de aprendizado.

À minha família, fonte inesgotável de incentivo, carinho e amor ao longo de minha trajetória de vida.

Ao Professor Dr-Ing. Antônio Cezar Faria Vilela pela orientação prestada ao longo deste trabalho.

Ao Laboratório de Siderurgia da UFRGS por possibilitar meu primeiro contato direto com os processos siderúrgicos.

Ao colegas Matheus Freitas Kuhn e Tiago Favaretto pela amizade e companheirismo ao longo de minha trajetória acadêmica.

Ao Eng. Msc. Marino Moscardini pelo incentivo e apoio essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Eng. Sandro Machado pela confiança e oportunidade para o desenvolvimento das atividades.

À Tozato Engenharia pelo suporte e apoio técnico para obtenção de dados importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	X
RESUMO.....	XI
ABSTRACT.....	XII
1.0 INTRODUÇÃO.....	1
2.0 REVISÃO DA LITERATURA.....	2
2.1 O processo siderúrgico via aciaria elétrica.....	2
2.2 Lingotamento.....	5
2.2.1 Lingotamento Convencional.....	6
2.2.2 Lingotamento Contínuo.....	7
2.3 Máquina de Lingotamento Contínuo.....	8
2.3.1 Distribuidor.....	9
2.3.2 Válvula submersa.....	10
2.3.3 Molde (resfriamento primário) e oscilação.....	11
2.3.4 Zona de resfriamento secundário.....	14
2.3.5 Zona de resfriamento terciário.....	16
2.4 Pós fluxantes.....	16
2.4.1 Histórico dos pós fluxantes.....	16
2.4.2 Princípio de funcionamento e lubrificação.....	17
2.4.3 Composição química.....	19
2.4.4 Viscosidade.....	20
2.4.5 Taxa de fusão.....	21
2.5 Transferência de calor no molde e o potencial ferrítico.....	24
2.6 Qualidade superficial do produto.....	26
2.6.1 Defeitos superficiais.....	27
2.6.1.1 Trincas longitudinais.....	28
2.6.1.2 Trincas transversais.....	29

3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	30
3.1 Matérias-primas.....	30
3.1.1 Aço lingotado.....	30
3.1.2 Pós fluxantes.....	31
3.2 Equipamentos.....	32
3.2.1 Máquina de lingotamento contínuo.....	32
3.2.2 Instrumentação para medição de frenagem metal/molde.....	34
3.2.3 Instrumentação para medição de desgaste de válvula submersa.....	38
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
4.1 Desgaste de válvula submersa.....	40
4.2 Frenagem (atrito) metal/molde.....	42
4.3 Rejeição de produto por defeitos superficiais.....	48
5.0 CONCLUSÕES.....	51
6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	53
7.0 REFERÊNCIAS.....	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Gráfico da produção mundial de aço, em milhões de toneladas, entre os anos de 1950 e 2013. Fonte: Adaptado de World Steel Association, 2014.....	3
Figura 2.2	Fluxograma das etapas do processo siderúrgico de uma aciaria elétrica.....	4
Figura 2.3	Representação esquemática dos métodos direto e indireto do lingotamento convencional. Fonte: Adaptado de RIZZO, 2005.....	6
Figura 2.4	Representação esquemática de uma máquina de lingotamento contínuo. Fonte: Adaptado de RIZZO, 2005.....	8
Figura 2.5	Detalhe de um distribuidor de 2 (dois) veios com revestimento refratário e zona de impacto para vazamento. Fonte: Adaptado de GARCIA et al, 2006.....	9
Figura 2.6	Representação de um tipo de válvula submersa utilizada em lingotamento contínuo. Fonte: Adaptado de RHI, 2014.....	10
Figura 2.7	Representação de alguns dos perfis que podem ser obtidos via processo de lingotamento contínuo. Fonte: Adaptado de RIZZO, 2005.....	12
Figura 2.8	Molde utilizado no lingotamento contínuo de tarugos. Fonte: Adaptado de NIPPON STEEL CORPORATION, 1998).....	13
Figura 2.9	Detalhe das três etapas na formação das marcas de oscilação durante o lingotamento contínuo. Fonte: Adaptado de DELHALLE et al, 1989.....	14
Figura 2.10	Zona secundária de resfriamento contendo os <i>sprays</i> (com jatos justapostos e sobrepostos) para solidificação continuada durante lingotamento. Fonte: Adaptado de GARCIA et al, 2006.....	15

Figura 2.11	<i>Sprays</i> para as duas espécies de resfriamento. À esquerda, bicos de <i>sprays</i> para água e, à direita, para aplicação de água e ar (atomização). Fonte: Adaptado de SPRAYNG SYSTEM CO., 2006.....	15
Figura 2.12	Camadas do pó fluxante durante seu processo de aplicação e funcionamento. Fonte: Adaptado de MILLS, 2003 citado em SILVA, 2010.....	20
Figura 2.13	Taxa de fusão em função do teor de carbono livre em pós fluxantes para diferentes produtos de lingotamento contínuo. Fonte: Adaptado de MILLS, 2003.....	21
Figura 2.14	Perfil do fluxo de calor nas faces estreitas e largas de um molde para lingotamento de placas. Fonte: Adaptado de PINHEIRO, 1995.....	24
Figura 2.15	Diagrama de tendência à ocorrência de agarramento e depressão, durante lingotamento contínuo, em função do FP. Fonte: KROMHOUT, 2011.....	26
Figura 2.16	Esquema mostrando os tipos de trincas produzidas no lingotamento contínuo. Fonte: BRIMACOMBE, 1984.....	27
Figura 3.1	Projeto de válvula submersa (SEN), com medidas em milímetros, utilizada durante os testes com pós fluxantes. Fonte: Adaptado de RHI, 2014.....	33
Figura 3.2	Molde de cobre para lingotamento contínuo de tarugos com seção quadrada de 240 x 240 mm.....	34
Figura 3.3	Representação da posição dos acelerômetros (em cores) na mesa de oscilação. Fonte: TE-SiMOM ONLINE, 2013.....	35
Figura 3.4	Animação gráfica gerada a partir do sistema de monitoramento da oscilação do molde no momento de subida, partindo da origem.....	36
Figura 3.5	Animação gráfica gerada a partir do sistema de monitoramento da oscilação do molde no momento de descida.....	36
Figura 3.6	Animação gráfica gerada a partir do sistema de monitoramento da oscilação do molde no momento de descida, logo abaixo da origem.....	37

Figura 3.7	Animação gráfica gerada a partir do sistema de monitoramento da oscilação do molde no momento de subida.....	37
Figura 3.8	Representação do ensaio de partículas magnéticas para detecção de descontinuidades superficiais e subsuperficiais. Fonte: Adaptado de DUARTE, 2010.....	38
Figura 3.9	Ferramental para medição do desgaste circular de válvula submersa, com as etapas a) posicionamento da ferramenta e fixação de sua abertura e b) medição da abertura com uma régua simples.....	39
Figura 4.1	Destaque da região de contato direto do fluxante B com a válvula submersa após testes durante lingotamento contínuo do aço SAE 1046 Mod, na condição a) para 6 corridas e b) para 5 corridas.....	39
Figura 4.2	Gráfico em barras da frenagem (atrito) em função dos sensores aplicados no veio 1 para os fluxantes A e B.....	42
Figura 4.3	Gráfico em barras da frenagem (atrito) em função dos sensores aplicados no veio 2 para os fluxantes A e B.....	42
Figura 4.4	Gráfico em barras da frenagem (atrito) em função dos sensores aplicados no veio 3 para os fluxantes A e B.....	43
Figura 4.5	Gráfico exibido pelo <i>software</i> do sistema de acelerômetros da frenagem em função do tempo para os 3 (três) veios durante aplicação do fluxante A.....	44
Figura 4.6	Gráfico exibido pelo <i>software</i> do sistema de acelerômetros da frenagem em função do tempo para os 3 (três) veios durante aplicação do fluxante B.....	45
Figura 4.7	Gráfico do índice de rejeição por defeitos superficiais dos produtos de lingotamento contínuo em função do pó fluxante.....	47
Figura 4.8	Superfície do tarugo com detalhe para trinca longitudinal de canto.....	47
Figura 4.9	Superfície do tarugo com detalhe para trinca transversal de canto. Fonte: Adaptado de SILVA, 2012.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Algumas faixas de composição química de fluxantes para lingotamento contínuo (Adaptado de VIEIRA, 2002 citado em BARRAL, 2006).....	20
Tabela 2.2	Efeito da composição química do fluxante na sua viscosidade. Fonte: Adaptado de KROMHOUT, 2011.....	21
Tabela 3.1	Porcentagem em massa dos elementos no aço SAE 1046 Mod. Fonte: Adaptado de norma específica de cliente.....	30
Tabela 3.2	Relação da composição química dos Fluxantes A e B utilizados durante os testes.....	31
Tabela 3.3	Basicidade para os fluxantes A e B.....	32
Tabela 3.4	Informações gerais da máquina de lingotamento contínuo onde foram realizados os testes.....	33
Tabela 4.1	Relação de pó fluxante com o diâmetro final da válvula submersa.....	40
Tabela 4.2	Relação de pó fluxante com a taxa de desgaste da válvula submersa.....	41
Tabela 4.3	Frenagem nos 4 (quatro) sensores do veio 1 da máquina de lingotamento.....	43
Tabela 4.4	Frenagem nos 4 (quatro) sensores do veio 2 da máquina de lingotamento.....	43
Tabela 4.5	Frenagem nos 4 (quatro) sensores do veio 3 da máquina de lingotamento.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

3D	Tridimensional
%	Porcentagem
η	Viscosidade
Φ	Diâmetro
Φ_i	Diâmetro inicial
Φ_f	Diâmetro final
C	Constante
C _p	Carbono equivalente da reação peritética
FEA	Forno elétrico a arco
FP	Forno – panela
FPot	Potencial ferrítico
LC	Lingotamento contínuo
LCV	Lingotamento convencional
Mod	Modificado
P	Poise
S1	Sensor acelerômetro 1
S2	Sensor acelerômetro 2
S3	Sensor acelerômetro 3
S4	Sensor acelerômetro 4
SAE	Society of Automotive Engineers
SEN	Submerged entry nozzle
V	Velocidade de lingotamento
VD	Vaccum degassing

RESUMO

O processo de produção de aço evoluiu muito nos últimos anos. O lingotamento contínuo, desde o ano de 1840, vem se desenvolvendo e determinando elevados índices de produção de aço, mundialmente. Trata-se de uma etapa complexa dentro do fluxo do aço, onde o entendimento e o controle das variáveis deste processo determinam a integridade do produto final. A produção de aços especiais, via lingotamento contínuo, exige a garantia de produtos de qualidade e excelentes propriedades mecânicas. A funcionalidade dos fluxantes trouxe aplicações para o processo de lingotamento contínuo, visando obtenção de produtos com superfícies íntegras e isentas de defeitos. Frente ao cenário industrial competitivo, o emprego de fluxantes permitiu o aumento da produtividade e redução das perdas metálicas por defeitos superficiais. A escolha do fluxante ideal para cada aço específico torna-se de extrema importância para o processo. Neste estudo, buscou-se evidenciar que a escolha do fluxante tem impacto direto no produto final siderúrgico. Para isso, avaliou-se a aplicabilidade de dois tipos de fluxantes para produção do aço SAE 1046 Mod, objetivando-se o aumento da operação de sequenciamento. Os fluxantes foram testados quanto ao desgaste de válvula submersa, frenagem (atrito) na interface metal/molde e rejeição dos produtos de lingotamento devido à presença de defeitos superficiais. O estudo da frenagem, que avalia a condição de lubrificação, tornou-se possível através da aplicação de sensores acelerômetros na mesa de oscilação. O pó fluxante teste apresentou taxa de desgaste de válvula submersa de 2,2 mm/corrída, frente ao pó padrão com 0,8 mm/corrída. Entretanto, o pó teste demonstrou bons resultados referente à lubrificação do molde, reduzindo a frenagem (atrito) entre o metal e molde e, conseqüentemente, melhorando a qualidade superficial do produto de lingotamento. A rejeição dos produtos por defeitos superficiais reduziu 47% com o fluxante teste.

Palavras-chave: pós fluxantes, lingotamento contínuo, desgaste de válvula submersa, lubrificação do molde, defeitos superficiais.

ABSTRACT

The process of steel production has greatly evolved in recent years. The continuous casting, since 1840, is developing and determining high levels of steel worldwide production. This is a complex step in the flow of steel, where the understanding and control of its process variables determine the integrity of the final product. The production of specialty steels, as of continuous casting, requires the assurance of quality products and excellent mechanical properties. The functionality of mould powders brought applications to the process of continuous casting, in order to obtain products with intact surfaces and defects free. Facing the competitive industrial scenario, the use of mould powders allowed the increase in productivity and reduction in metal losses by surface defects. The choice of the ideal powder, for each specific steel grade, becomes extremely important for the process. In this study, will be demonstrated that the choice of mould powder has a direct impact on the siderurgical final product. So the applicability of two types of mould powder for the production of steel SAE 1046 Mod was evaluated, aiming to increase the sequencing operation. The powders were tested for submerged entry nozzle wear, friction on the interface metal/mould and casting rejection of products due to the presence of surface defects. The study of friction, which evaluates the condition of lubrication, becomes possible by applying accelerometer sensors on the oscillation table. The test powder presented submerged entry nozzle wear of 2,2 mm/heat, against 0,8 mm/heat from standard powder. However, test powder has demonstrated good results related to the mould lubrication, reducing friction between metal and mould and, consequently, improving product superficial quality. The rejection of the products due to the superficial defects reduced 47% applying the test powder.

Keywords: mould powders, continuous casting, submerged entry nozzle wear, mould lubrication, surface defects.

1.0 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da tecnologia, as indústrias do setor siderúrgico têm buscado cada vez mais qualidade e conformidade em seus produtos. A exigência do cliente e a competitividade do mercado mundial do aço representam os alicerces de uma série de planejamentos que direcionam à obtenção de resultados de excelência.

A produção de aço envolve várias etapas, sendo constante a presença de muitas variáveis no decorrer de todo o processo. O controle destas variáveis é de fundamental importância, capaz de garantir os níveis de qualidade exigidos. Para as siderúrgicas de aços especiais, a qualidade e a garantia de produtos íntegros merecem destaque. Cada etapa dentro do fluxo de produção tem sua função intensamente controlada. O funcionamento apropriado de cada uma dessas etapas estabelece o grau de sanidade do produto final.

Na aciaria, a solidificação do aço é estabelecida na última etapa do processo, no lingotamento contínuo. O processo de solidificação dos aços é complexo e exige o controle adequado de cada parâmetro associado à máquina de lingotamento. O fluxante empregado no molde sob a superfície do aço, ainda líquida, assume funções essenciais no que se refere à sanidade do produto siderúrgico, tendo em vista que grande parte dos defeitos possam ser originados no molde.

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a aplicabilidade de pós fluxantes no processo de lingotamento contínuo do aço SAE 1046 Mod, por meio de um estudo comparativo entre dois diferentes fluxantes empregados em aços médio carbono, com vista a um aumento na operação de sequenciamento. Para tal, foram analisados 3 (três) parâmetros durante o processo de lingotamento, a saber, (1) desgaste de válvula submersa, (2) frenagem entre produto e molde e (3) grau de rejeição do produto de lingotamento, devido à presença de defeitos superficiais. O estudo baseou-se em uma amostragem de 11 (onze) corridas, divididas em 2 (dois) sequenciais, para cada fluxante.

2.0 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 O processo siderúrgico via aciaria elétrica

Uma das rotas de produção de aços é por meio da fusão e refino de sucatas em aciarias elétricas. Os processos de elaboração de aços a partir da eletricidade ganham importância no âmbito siderúrgico e ambiental, pois estão diretamente associados não só à reciclagem de sucata do tipo ferrosa, mas também a diminuição da exploração de minérios de ferro, carvão e demais matérias-primas. Além disso, inibem, de certa maneira, a poluição gerada pelos gases provenientes da redução do minério de ferro, pois a construção de setores destinados à redução torna-se desnecessária no processo via aciaria elétrica (RIZZO, 2005).

Segundo a *World Steel Association*, o ano de 2013 apresentou-se de forma desafiadora à indústria do aço, devido às questões relacionadas ao excesso de capacidade e custos de matérias-primas. Entretanto, a demanda mundial de aço cresceu em 3,6%, totalizando uma produção mundial de aço bruto de 1,6 bilhão de toneladas. A Figura 2.1 ilustra a ascendente curva da produção mundial de aço bruto, em milhões de toneladas, entre os anos de 1950 e 2013.



Figura 2.1 Gráfico da produção mundial de aço, em milhões de toneladas, entre os anos de 1950 e 2013. Fonte: Adaptado de World Steel Association, 2014.

A aciaria elétrica, em usinas de aços especiais, possui várias células de funcionamento, a saber, o pátio de sucatas, forno elétrico a arco (FEA), forno - panela (FP), desgaseificador à vácuo (VD) e, por último, o lingotamento contínuo (LC) e/ou convencional (LCV). A Figura 2.2 mostra um fluxograma típico do processo de uma usina de aciaria elétrica.

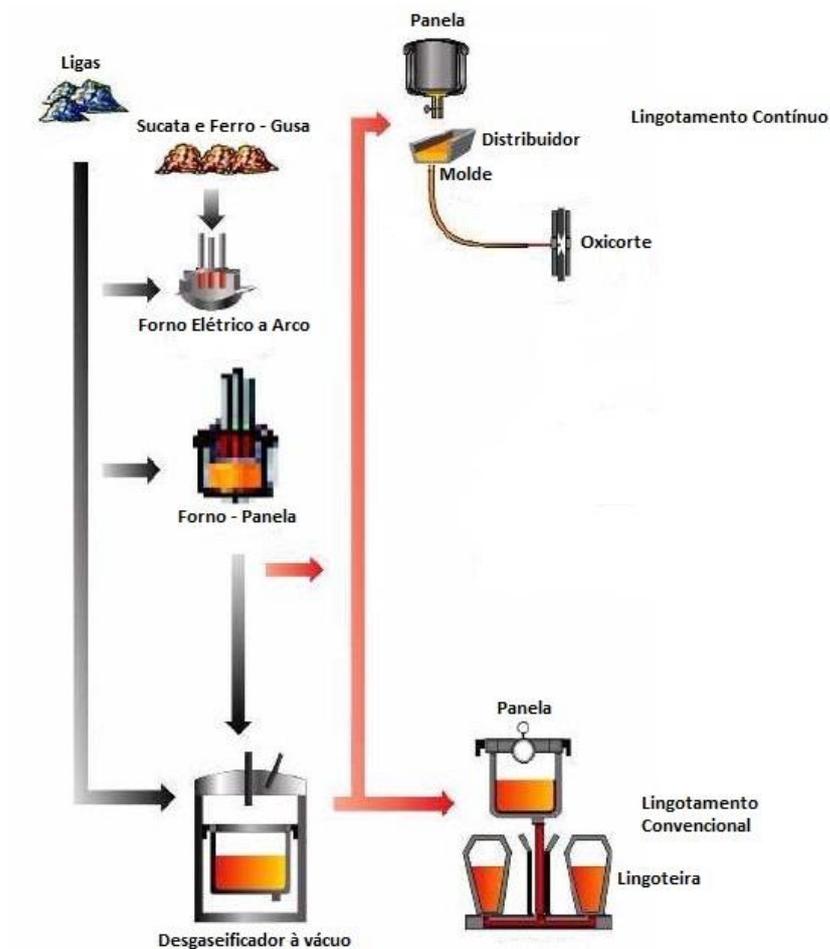


Figura 2.2 Fluxograma das etapas do processo siderúrgico de uma aciaria elétrica.

A fonte principal da matéria-prima de uma aciaria elétrica encontra-se no pátio de sucatas, onde a separação, o tratamento e o armazenamento do material ferroso é estabelecido. Seguindo o fluxo do processo, a carga metálica, composta pela sucata ferrosa e demais matérias-primas, deve ser empregada no FEA. A participação deste tipo de forno na produção de aço teve um salto do ano de 1976 para 2000, crescendo de 19 para 36%, respectivamente (RIZZO, 2005). Um das funções do FEA é a fusão da carga metálica, através da transferência de calor imposta pela aplicação de um arco elétrico entre a carga e os eletrodos de grafita. Esta transferência também ocorre pela condução de corrente elétrica através do constituinte metálico dentro do forno, que é aquecido continuamente devido à inerente resistência elétrica com a passagem da corrente (RIZZO, 2005). O FEA possui outras atribuições importantes,

como a criação de uma atmosfera oxidante, condicionando à ocorrência de reações de descarburização e desfosforação, determinando o refino primário.

Após tratamento no FEA, o aço líquido é vazado em uma panela siderúrgica. Dando início à próxima etapa do processo, o FP, onde o ajuste de composição química e o refino secundário do banho de aço são estabelecidos. De forma semelhante ao FEA, no FP conta-se com o auxílio do arco elétrico para o aquecimento do aço, ainda que a energia proveniente seja menor para esta etapa. O ajuste de composição química do aço é realizado via sistema de silos e correias transportadoras que direcionam o material para dentro da panela contendo o aço líquido. Na etapa do FP tem-se o fenômeno da dessulfuração, visando a incorporação de enxofre pela escória.

Em aciarias de aços especiais, a presença de um desgaseificador à vácuo (VD) torna-se essencial após processamento em FP. A principal função do VD é a remoção de gases dissolvidos no aço líquido, principalmente o hidrogênio (H_2). A presença de gases no produto solidificado tem influência direta e deletéria nas suas propriedades mecânicas, causando fragilização, por isso a necessidade de remoção (RIZZO, 2005). Após realização de vácuo, pode-se realizar o ajuste final de composição química. Em algumas usinas, o ajuste pode ser realizado através da injeção de fios.

Na última etapa do fluxo de uma aciaria elétrica tem-se o lingotamento. O lingotamento pode ser dividido em duas espécies: contínuo e convencional. No lingotamento contínuo, o mais largamente usado, o aço entra em um molde através de um tubo, que denominamos válvula submersa. A válvula submersa pode possuir vários projetos, visando atender índices de qualidade e otimização do próprio processo. Por outro lado, no lingotamento convencional, o aço é fornecido diretamente da panela para as lingoteiras, através de um canal de vazamento.

2.2 Lingotamento

A transformação de aço líquido em um produto sólido ocorre na etapa de lingotamento. Esta transformação também pode ocorrer em moldes para fabricação de peças, denominadas peças fundidas.

Os processos de lingotamento convencional e contínuo devem ser analisados separadamente, devido às particularidades de projeto e características de cada um.

2.2.1 Lingotamento convencional

Tradicionalmente, o processo de solidificação de aços consiste no vazamento do metal líquido em recipientes de ferro fundido, denominados lingoteiras. Com o desenvolvimento tecnológico, diferentes modelos foram implementados, buscando a incorporação de inovações que conduzissem a uma maior produtividade e rendimento (GARCIA et al., 2006).

Conforme a Figura 2.3, o aço líquido é vazado de uma panela siderúrgica para as lingoteiras, onde se dará o processo de solidificação. Tem-se 2 (dois) métodos de lingotamento convencional: direto e indireto. O direto acontece através do vazamento direto pelo topo, preenchendo uma lingoteira de cada vez. Por outro lado, no indireto, o vazamento acontece em um canal vertical central que alimenta dois ou mais canais horizontais que, por sua vez, preenchem as lingoteiras. A partir do método indireto, pode-se preencher duas ou mais lingoteiras ao mesmo tempo, utilizando o princípio dos vasos comunicantes (RIZZO, 2005).

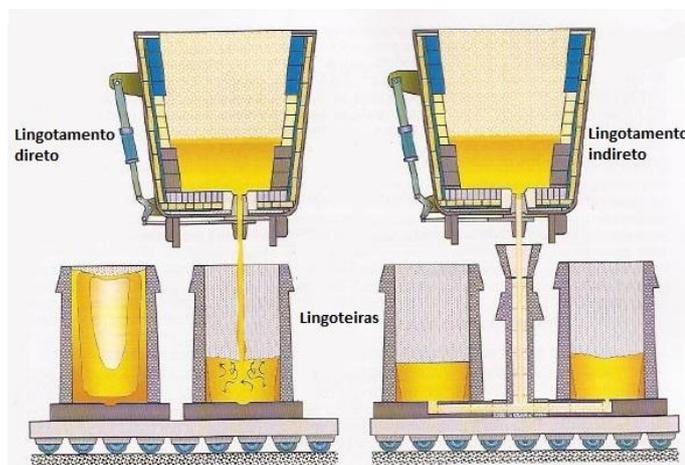


Figura 2.3 Representação esquemática dos métodos direto e indireto do lingotamento convencional. Fonte: Adaptado de RIZZO, 2005.

Após a solidificação completa do aço na lingoteira, ocorre o processo de desmoldagem. As lingoteiras são transportadas para a área de estripamento de lingotes, local onde são retiradas as lingoteiras dos lingotes e vice-versa (RIZZO, 2005). Os lingotes podem

ser laminados para produção de produtos longos (tarugos) que são relaminados para produção de barras, visando a confecção de componentes mecânicos. Os lingotes são transformados em produtos acabados ou semi-acabados (GARCIA et al, 2006).

Pode-se citar uma vantagem do processo convencional. O custo envolvido no investimento para instalação de uma área de lingotamento convencional é muito menor frente ao lingotamento contínuo. A obtenção de produtos em grandes seções torna-se mais viável no processo convencional. Assim, a fabricação de peças de grande porte, como ganchos, âncoras e bases para máquinas têm suas origens no processo de lingotamento convencional (RIZZO, 2005).

2.2.2 Lingotamento contínuo

As primeiras tentativas em atribuir ao processo de lingotamento um caráter contínuo ocorreram próximas ao século XIX. Iniciando em 1840, com Sellers, seguido por Laing, em 1843, e Bessemer, no ano de 1846, aplicado à produção de metais não-ferrosos com baixo ponto de fusão. Embora as dificuldades tecnológicas fossem significativas, na Alemanha, em 1887, a máquina de lingotamento contínuo já apresentava algumas das partes fundamentais que integram o moderno e atual sistema de solidificação (MOURÃO et al, 2007). O processo de lingotamento contínuo possibilita a produção de tarugos (*billets*), blocos (*blooms*) e placas (*slabs*) finas e grossas. A partir deste processo também é possível obter formas arredondadas, com dimensões entre 175 e 200 mm de diâmetro, tiras (*strips*) com espessuras de 5 a 20 mm e tiras mais finas com espessuras menores que 5 mm (GARCIA et al, 2006).

Conforme citado em Rihl (2012), o *International Iron and Steel Institute* declarou que o lingotamento convencional, em 1978, liderava a cadeia de produção de aços, representando 77,7%, comparado ao método contínuo, que ainda não havia ganho força, com apenas 33,3%. Recentemente, a *World Steel Association* publicou um informativo constando o expressivo aumento da produção de aços via lingotamento contínuo, com 95,9% em 2013.

No Brasil, o lingotamento contínuo foi introduzido pela Companhia Siderúrgica Riograndense do Grupo Gerdau, no ano de 1960, apresentando uma máquina de 2 (dois) veios para produção de tarugos (MOURÃO et al, 2007).

Este processo é, atualmente, a forma mais utilizada de se processar o aço líquido. Tendo em vista o sistema que compõe a máquina de lingotamento contínuo, tem-se os 3 (três) principais equipamentos que constituem sua instalação: panela, distribuidor e molde. Esses, por sua vez, compõem uma mesma definição de ferramental, tratando-se de reatores. A Figura 2.4 representa esquematicamente uma máquina de lingotamento contínuo.

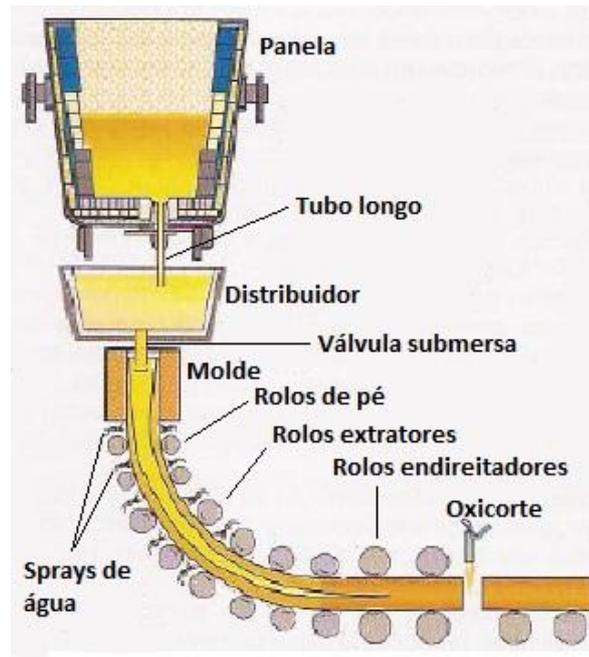


Figura 2.4 Representação esquemática de uma máquina de lingotamento contínuo. Fonte: Adaptado de RIZZO, 2005.

Além dos 3 (três) reatores que compõem o sistema, a Figura 2.4 também ilustra, em maiores detalhes, os demais equipamentos da instalação.

2.3 Máquina de lingotamento contínuo

Os equipamentos necessários para o processo de lingotamento contínuo apresentam uma gama de funções, relacionadas à produtividade e atendimento em qualidade do produto final. A Figura 2.4 torna evidente o arranjo básico de uma máquina de lingotamento contínuo. Entre os principais elementos deste sistema, tem-se: o distribuidor, a válvula submersa, o

molde (e seus componentes) que abrange a região de resfriamento primário, as demais zonas, secundária e terciária e, a região de desempenho e corte. A seguir apresentam-se, em maiores detalhes, os componentes vitais para uma máquina de lingotamento contínuo.

2.3.1 Distribuidor

O distribuidor localiza-se, dentro do processo de lingotamento contínuo, entre a panela e a região do molde. Como o próprio nome já diz, sua principal função é distribuir o aço, ainda líquido, para os moldes, localizados abaixo de cada veio (GARCIA et al, 2006). Os veios são canais de saída do distribuidor, responsáveis pela alimentação de cada molde (RIZZO, 2005). Para melhor entendimento, a Figura 2.5 ilustra um distribuidor em corte.

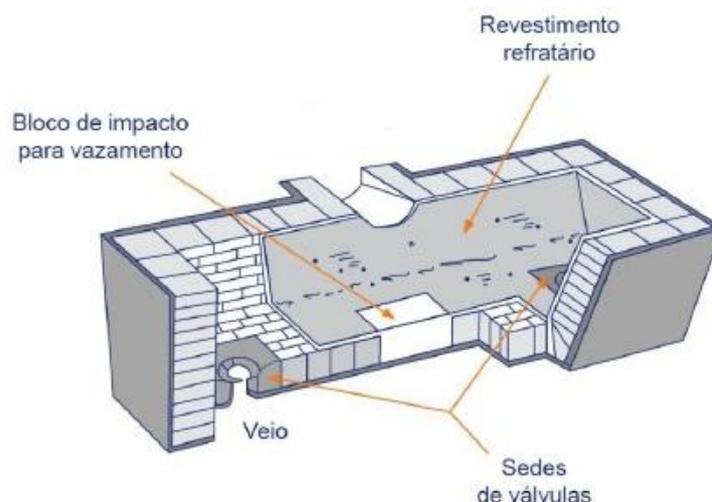


Figura 2.5 Detalhe de um distribuidor de 2 (dois) veios com revestimento refratário e zona de impacto para vazamento. Fonte: Adaptado de GARCIA et al, 2006.

Este equipamento possui uma importância significativa dentro do processo, afetando diretamente no desempenho e qualidade do produto final. O distribuidor deve possuir um revestimento refratário internamente, visando garantir a manutenção da temperatura, que deve permanecer uniforme e o mais constante possível durante o processamento do aço (GARCIA et al, 2006).

Além de alimentar os moldes com aço líquido, o distribuidor atua também na limpeza do aço. Segundo Garcia et al. (2006), dentro do distribuidor ocorre a flotação, separação de

inclusões não-metálicas e o controle da reoxidação. Com isso, obtêm-se ganhos com o aumento da qualidade interna do produto de lingotamento, devido a uma maior limpeza inclusionária. Inclusões não-metálicas são espécies químicas originadas pela associação metal/não metal, sendo o não metal um dos elementos: oxigênio, enxofre, silício, carbono e, mais raramente, o nitrogênio ou o fósforo (SEABRA, 1982).

2.3.2 Válvula submersa

O fluxo de aço do distribuidor para o molde é dado através de um tubo, que denomina-se válvula submersa ou SEN (*submerged entry nozzle*). Sua utilização no processo de lingotamento contínuo auxilia na prevenção da incorporação de oxigênio proveniente do ar atmosférico, isto é, protegem o jato de aço na entrada do molde e é fundamental na produção de aços especiais. Válvulas submersas são equipamentos vitais para a estabilidade e qualidade do produto de lingotamento (MEMARPOUR, 2011).

Válvulas submersas, conforme representa a Figura 2.6, são tubos cilíndricos feitos em material refratário. No contato formado pela conexão da válvula com o distribuidor é passado gás inerte (argônio), formando uma selagem que evita o arraste de ar atmosférico.



Figura 2.6 Representação de um tipo de válvula submersa utilizada em lingotamento contínuo. Fonte: Adaptado de RHI, 2014.

As características requeridas para uma boa válvula submersa são criar um bom padrão de escoamento na cavidade do molde, ser resistente ao desgaste, a entupimentos e a choques térmicos, além de possuir baixa porosidade e um custo razoável (THOMAS, 1993).

Segundo Gallo (2003), em função das solicitações presentes durante os longos tempos de lingotamento, as válvulas submersas devem possuir as seguintes características:

- Não deve haver aumento de diâmetro dos furos pela erosão.
- A obstrução da válvula, pelo depósito de óxidos e aço, deve ser mínima.
- Não deve haver irregularidades no fluxo de aço por deformação ou trincas.
- Deve apresentar resistência ao choque térmico, resistência à erosão e corrosão, pouca aderência de alumina e alto ponto de fusão.
- A forma do tubo deve originar um modelo de fluxo de aço que auxilie a flotação das inclusões, evitando lavagem da casca solidificada, o envolvimento do pó fluxante, queda de temperatura etc.

Atualmente, o uso de válvulas do tipo $Al_2O_3 - C$ é bastante comum, pois elas apresentam alta durabilidade quando utilizadas no lingotamento de aços, devido suas propriedades, combinando a alta refratariedade do óxido de alumínio (Al_2O_3) com a baixa molhabilidade da grafita pelo aço líquido. Na linha de escória, tem-se na composição química da válvula a presença de zircônia, sua função primordial é garantir uma maior resistência ao desgaste (GALLO, 2003).

2.3.3 Molde (resfriamento primário) e oscilação

É considerado por Mourão et al (2007) a parte mais importante do processo de lingotamento contínuo. A solidificação do aço líquido, proveniente do distribuidor, é iniciada no molde. Este é um componente de maior responsabilidade no processo, pois determina as condições de operação e as características de qualidade do produto (ADORNO, 1982). É a partir do molde que define-se o perfil do produto, ou seja, espessura e largura para o caso de placas e do bloco, a seção, redonda ou quadrada, no caso de tarugo (MOURÃO et al., 2007). A Figura 2.7 identifica os diferentes tipos de perfis que podem ser obtidos via lingotamento contínuo.

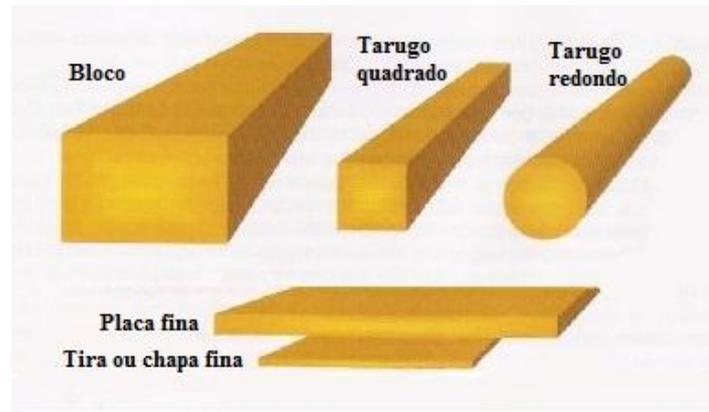


Figura 2.7 Representação de alguns dos perfis que podem ser obtidos via processo de lingotamento contínuo. Fonte: Adaptado de RIZZO, 2005.

A etapa delimitada pela região do molde também é conhecida pela zona de resfriamento primário, sendo sua principal função suportar a coluna de metal líquido até a formação de uma casca sólida suficientemente espessa junto à superfície do molde, durante o estágio inicial da solidificação, permitindo a extração de calor do metal até a zona secundária de resfriamento (GARCIA et al, 2006). O material que compõe o molde deve apresentar alta condutividade térmica, resistência em alta temperatura, baixa distorção térmica, resistência à fadiga, resistência ao desgaste e baixo custo (THOMAS, 2011).

Um molde típico para lingotamento de tarugos e blocos é essencialmente constituído de uma camisa de Cu (cobre) posicionada no interior de uma jaqueta de aço inoxidável com água passando pela fenda formada entre eles. A fixação da camisa de Cu é feita através de chapas (*constraints*), na parte superior e inferior (GARCIA et al, 2006). A Figura 2.8 apresenta um esquema representativo de moldes para tarugos.

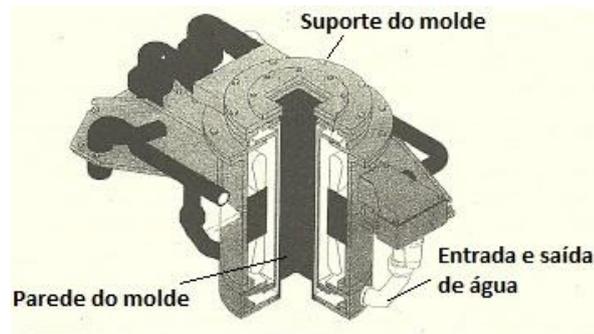


Figura 2.8 Molde utilizado no lingotamento contínuo de tarugos. Fonte: Adaptado de NIPPON STEEL CORPORATION, 1998 citado em MOURÃO, 2007).

As placas de Cu do molde devem ser revestidas para suportar o atrito do produto à sua superfície. Para isto, são usados elementos como o níquel e o cromo, que aumentam consideravelmente a vida útil do molde (MOURÃO, 2007).

Durante o lingotamento contínuo, o molde oscila seguindo um padrão senoidal. A principal função da oscilação é fazer com que o molde desloque-se para baixo o mais rápido possível que o produto (veio) já em solidificação, fornecendo uma estripagem negativa (*negative strip time*). Durante este período de tempo, se houver qualquer tipo de colamento ou aderência da casca sólida com o molde, esta será descolada e, caso haja ruptura desta casca, haverá tempo suficiente para um posterior preenchimento de metal líquido e formação de uma nova casca sólida (GARCIA et al, 2006).

Com o movimento oscilatório, há a formação de marcas superficiais transversais no produto. Estas marcas são intrínsecas no processo de lingotamento contínuo. A formação das marcas ocorre segundo duas etapas: (1) a casca sólida formada na região do menisco é elevada através do movimento de subida do molde. O levantamento promove a formação de duas superfícies convexas, que adquire outro menisco secundário, devido à pressão da oscilação. Na etapa seguinte, (2) o molde se move para baixo, as duas superfícies se fundem e forma-se, então, a marca de oscilação (SATO, 1979).

Outro estudo relacionado às marcas de oscilação foi realizado por Delhalle et al (1989), eles descrevem um modelo de formação baseado em 3 (três) etapas, a saber, (1) transbordamento da poça líquida e formação de um gancho, (2) transbordamento da poça líquida somada à refusão da casca e, por último, (3) dobramento da casca devido à pressão

ferrostática, ocasionando depressão transversal. A Figura 2.9 identifica as etapas propostas por Delhalle et al (1989).

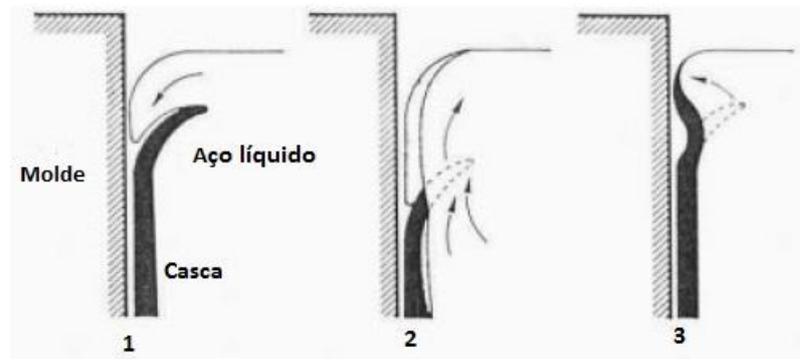


Figura 2.9 Detalhe das três etapas na formação das marcas de oscilação durante o lingotamento contínuo. Fonte: Adaptado de DELHALLE et al, 1989.

2.3.4 Zona de resfriamento secundário

A continuidade do processo de extração de calor logo após a saída do molde (zona primária de resfriamento) é dada através de *sprays* de água (ou água e ar) diretamente na superfície do produto em lingotamento. Estes sistemas borrifam água no produto, finalizando a solidificação antes da região de desempenho (GARCIA et al, 2006). A zona secundária, contendo os *sprays*, está ilustrada na Figura 2.10.

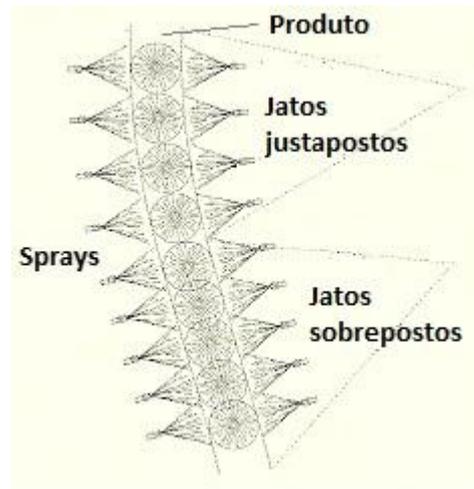


Figura 2.10 Zona secundária de resfriamento contendo os *sprays* (com jatos justapostos e sobrepostos) para solidificação continuada durante lingotamento. Fonte: Adaptado de GARCIA et al, 2006.

Segundo Mourão et al (2007), existem 2 (dois) tipos de resfriamento secundário. O primeiro chama-se resfriamento hidráulico, onde através dos bicos de *sprays* passa somente água para refrigeração. No outro tipo, e bastante utilizado em máquinas de lingotamento contínuo, ar e água são misturados, provocando a atomização da água. Segundo os autores, o tamanho da gota de água é reduzido e torna o processo de troca de calor mais eficiente. Este sistema é conhecido por *air-mist*. A Figura 2.11 mostra 2 (dois) tipos de *sprays* utilizados para o resfriamento secundário.

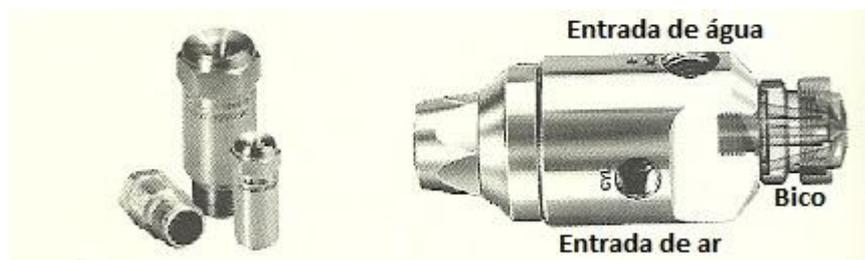


Figura 2.11 *Sprays* para as duas espécies de resfriamento. À esquerda, bicos de *sprays* para água e, à direita, para aplicação de água e ar (atomização). Fonte: Adaptado de GARCIA, 2006.

Estes *sprays* devem possuir controle de vazão individualizado, a fim de garantir uma distribuição de água de forma independente.

2.3.5 Zona de resfriamento terciário

Esta etapa localiza-se em uma região intermediária entre a região de *sprays* e a região de corte do produto de lingotamento, Figura 2.4. A zona de resfriamento terciário é também conhecida pela zona de radiação livre, onde a transferência de calor da superfície do produto é dada por radiação e convecção com o ambiente e, ainda, por condução na região de contato direto com os rolos extratores. Na maioria dos casos, a transferência de calor por condução é mínima e pode ser desprezada (GARCIA et al, 2006).

2.4 Pós fluxantes

Pós fluxantes, ou pós de molde ou simplesmente fluxantes, são escórias sintéticas utilizadas para lubrificação de moldes no processo de lingotamento contínuo, que devem ser aplicados quando o vazamento do metal líquido do distribuidor para o molde ocorre através da válvula submersa, isto é, com jato protegido (GARCIA et al, 2006). Os pós fluxantes constituem a essencialidade do processo de lingotamento na produção de aços especiais. Suas funções são de extrema importância no quesito da garantia da qualidade e produtividade do sistema de solidificação.

Neste capítulo, serão abordados vários assuntos referentes aos pós fluxantes empregados no lingotamento contínuo de aços especiais, incluindo suas principais características, funções e princípio de funcionamento.

2.4.1 Histórico dos pós fluxantes

Os pós fluxantes foram desenvolvidos a partir daqueles utilizados no lingotamento convencional (GARCIA et al, 2006). De fato, em 1958, na Bélgica, eles foram inicialmente aplicados no lingotamento convencional, sendo somente testados em lingotamento contínuo no ano de 1963. Com a utilização dos pós, verificou-se uma melhoria na qualidade do lingote,

através da redução das perdas térmicas e, com isso, menores temperaturas e taxas de lingotamento necessárias (MILLS, 1995).

Segundo Mills (2003), em 1968, pós de molde baseados em cinzas voláteis provenientes de plantas termoelétricas (*fly ash*) foram introduzidos, substituindo o óleo de colza. A colza é uma planta da espécie *Brassica Napus*, cujas sementes originam o óleo de base vegetal, denominado óleo de colza (FOOD INGREDIENTS BRASIL, 2012). Estes pós eram ácidos, contendo essencialmente SiO_2 , Al_2O_3 e fluxantes, como o Na_2CO_3 . Naquele época, a aplicação do pó seria considerada viável para aqueles com teores de carbono mais elevados, obtidos através das usinas termoelétricas de baixa eficiência. Com o aumento da eficiência destas usinas, o *fly ash* proveniente dos resíduos apresentou teores menores de carbono e, com isso, presenciou-se uma redução da disponibilidade dos resíduos adequados. A partir daí, pós sintéticos começaram a ser desenvolvidos.

Mills (1995) também afirma que a composição química desses pós sintéticos é dada a partir da combinação de diferentes elementos, sendo o seu desenvolvimento baseado, inicialmente, através de misturas de sílica e bauxita com adições de fluxantes.

2.4.2 Princípio de funcionamento e lubrificação

O pó fluxante e o aço apresentam imiscibilidade e densidades diferentes. No molde, o pó fluxante fica sobre o aço líquido, justamente devido à sua menor densidade. Mills (2003) aponta as 5 (cinco) principais funções atribuídas aos pós fluxantes:

- Proteger a superfície líquida de aço contra oxidação;
- Promover o isolamento térmico do aço, evitando sua solidificação precipitada na superfície do molde;
- Absorver inclusões (como, por exemplo, Al_2O_3 e TiO_2);
- Promover a lubrificação entre a casca solidificada e o molde;
- Promover uma transferência de calor uniforme entre o aço e o molde;

Para fins deste estudo, serão comentadas somente as duas últimas funções dos pós fluxantes, que tratam da lubrificação e transferência de calor. As demais funções poderão ser conferidas, em maiores detalhes, em Mills (2003).

Durante o processo de solidificação, dentro do molde, ocorre o fenômeno de contração do aço. Esta contração é responsável pelo afastamento (*gap*) entre a casca solidificada de aço e a superfície do molde de cobre, gerando uma resistência na transferência de calor. Em contrapartida, com o mecanismo de oscilação do molde, o pó fluxante assume suas funções junto ao processo, de forma a preencher este vazio formado durante a contração do aço (OLIVEIRA, 2009).

Ao penetrar na região do *gap*, o pó fluxante fundido tende a formar uma camada de filme vítreo, cristalino e líquido. A Figura 2.12 ilustra a estratificação do fluxante. Segundo Oliveira (2009), isto ocorre porque na interface metal/molde o fluxante estará submetido às baixas temperaturas (180 a 208 °C) do molde de cobre e às altas temperaturas (da ordem de 1350 °C) da casca solidificada de aço.

Como citado anteriormente, uma das atribuições do pó fluxante, no processo de lingotamento contínuo, é promover a lubrificação entre a casca solidificada de aço e o molde. A adequada lubrificação garante reduzidas forças de atrito e, conseqüentemente, melhor qualidade superficial do produto. Ma et al (2008), afirmam que a força de atrito também pode afetar a produtividade de lingotamento.

No molde a força de atrito pode ter origem a partir de 2 (dois) diferentes mecanismos, (YIN, 2005) :

- i. Movimento do molde relativo à casca solidificada, ocorrendo em contato com um filme de escória líquida, causando atrito devido à viscosidade do filme. A este mecanismo dá-se o nome de “lubrificação sólida”.
- ii. Movimento relativo que ocorre entre a parede do molde de cobre e o filme de escória sólida, causando atrito devido ao contato sólido-sólido, caracterizando o “atrito sólido”.

Segundo Wolf (1991), a força de atrito estaria relacionada também com baixas velocidades de lingotamento, onde o consumo excessivo de pó poderia ser observado, conduzindo a uma profundidade da poça de escória abaixo do requerido para infiltração

estável do fluxante. Entretanto, a influência da velocidade de lingotamento sobre o atrito deve ser analisada de forma cuidadosa, pois a força de atrito depende também da frequência de oscilação (SILVA, 2010).

Baseado em estudos da força de atrito no processo de lingotamento contínuo, a diminuição da viscosidade da escória líquida e o aumento da espessura do filme de escória (através do aumento da frequência de oscilação do molde e da redução na velocidade de lingotamento) são fatores que induzem a uma redução do atrito líquido (PINHEIRO, 1995). Segundo Pinheiro (1995), o atrito líquido ocorre na região superior do molde, onde existe uma alta temperatura e pressão uniforme. Já o atrito sólido torna-se presente na região inferior do molde.

Segundo Szekeres (2011), o teor de carbono do aço também influencia nas condições de lubrificação do molde. Para especificações de aços peritéticos (0,09 a 0,15% em massa) a lubrificação é favorecida, evitando o atrito acentuado, comparado aos aços com 0,16 a 0,26% em massa de carbono. Szekeres (2011) afirma que para teores mais elevados, o atrito entre o metal e o molde tende a diminuir.

2.4.3 Composição química

Essencialmente, os pós fluxantes utilizados em lingotamento contínuo constituem em uma mistura de CaO , SiO_2 , CaF_2 , Al_2O_3 e Na_2O , com adições menores de MgO , FeO e MnO . A especificação da composição química do pó fluxante é função do tipo de aço, condições de contorno de lingotamento contínuo e, também, do fornecedor. Segundo Barral (2006), a composição química afeta uma série de fatores, a saber, taxa de fusão, viscosidade, temperatura de cristalização e de solidificação e taxa de absorção de alumina.

Na Tabela 2.1, Vieira (2002) ilustra alguns constituintes fundamentais em fluxantes e sua faixa de composição típica para lingotamento contínuo:

Tabela 2.1 Algumas faixas de composição química de fluxantes para lingotamento contínuo (Adaptado de VIEIRA, 2002 citado em BARRAL, 2006).

Constituinte	Composição química (% em massa)
CaO	25 ~ 45
SiO ₂	20 ~ 50
MgO	0 ~ 10
Al ₂ O ₃	0 ~ 10
Na ₂ O + K ₂ O	1 ~ 25
MnO	0 ~ 10
C _{livre}	1 ~ 25
F	4 ~ 10

Os fluxantes são desenvolvidos para atender a cada condição de lingotamento e, também, para cada tipo específico de aço. A composição química dos fluxantes depende de suas propriedades requeridas.

2.4.4 Viscosidade

A viscosidade é uma importante característica associada à pós fluxantes. Para uma breve definição, a viscosidade caracteriza a resistência encontrada por um fluido em escoamento, quando este é submetido a uma força de origem externa. Pode-se determinar a viscosidade da escória líquida a partir de sua temperatura e composição química (BARRAL, 2006). A Tabela 2.2 identifica o efeito de alguns constituintes do fluxante com a sua viscosidade.

Tabela 2.2 Efeito da composição química do fluxante na sua viscosidade. Fonte: Adaptado de KROMHOUT, 2011.

Constituinte	Viscosidade
CaO	Diminui
SiO ₂	Aumenta
MgO	Diminui
Al ₂ O ₃	Aumenta
Na ₂ O + K ₂ O	Diminui
MnO	Diminui
F	Diminui

A unidade utilizada para medição de viscosidade é denominada *poise* (P), sendo 1 P equivalente $0,1 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ (TURKDOGAN, 1996). Segundo Soares (1998), a viscosidade dos pós fluxantes é uma das propriedades determinantes na boa operação e qualidade de um lingotamento contínuo.

Estudos realizados por OGIBAYASHI et al (1987) buscaram correlacionar a viscosidade com a velocidade de lingotamento. A partir daí, foi desenvolvida a seguinte relação:

$$\eta \cdot V = C \quad (1)$$

Onde η é a viscosidade, V a velocidade de lingotamento e C uma constante qualquer, que deve variar de 1 a $3,5 \text{ P} \cdot \text{m}/\text{mm}$, a fim de garantir as mínimas forças de fricção e variações de temperatura (OGIBAYASHI et al, 1987 citado em SOARES, 1998). Para elevadas velocidades de lingotamento, deve-se objetivar a aplicação de pós fluxantes com baixa viscosidade e, vice-versa, obtendo-se a faixa ideal estabelecida pelo produto da equação 1.

2.4.5 Taxa de fusão

O pó fluxante quando adicionado no molde, através de um sistema automatizado de injeção, sofre aquecimento e posterior fusão, devido à transferência de calor proveniente do contato direto com o aço líquido. Em verdade ocorre a formação de 4 (quatro) diferentes camadas de pó na região do molde, a saber, (1) camada com o pó na sua condição natural

(sem reagir), (2) camada de pó iniciando o processo de sinterização, logo abaixo a camada (3) identifica uma zona pastosa, onde está ocorrendo o processo de fusão do pó e, por último, (4) a camada de escória líquida em contato direto com o aço líquido (EN-FA et al, 2006). As 4 (quatro) camadas podem ser observadas na Figura 2.12.

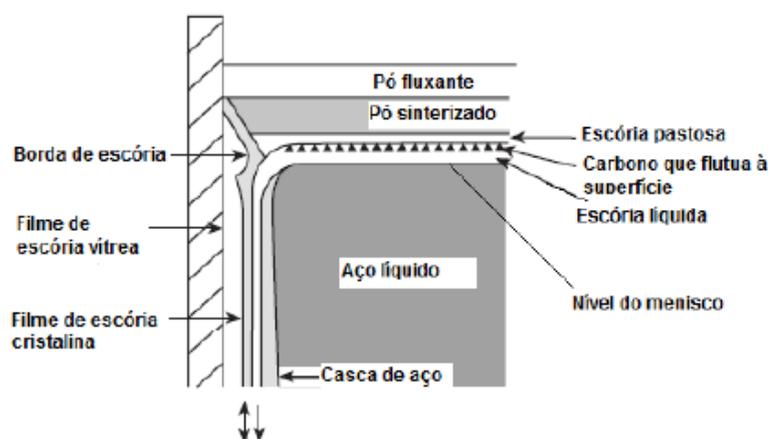


Figura 2.12 Camadas do pó fluxante durante seu processo de aplicação e funcionamento.

Fonte: Adaptado de MILLS, 2003 citado em SILVA, 2010.

Segundo Soares (1998), a taxa de fusão do pó fluxante, quando adequada, fornecerá uma camada líquida suficiente para dar continuidade ao processo. É necessário que a taxa de fusão do fluxante coincida com seu consumo. Quando há troca de distribuidor, alterações na velocidade de lingotamento e, inclusive partida de máquina, o processo torna-se instável, sendo necessário que o pó fluxante forneça escória fundida ao sistema.

A taxa de fusão pode ser mensurada a partir de alguns métodos conhecidos. Alguns desses métodos apresentam fluxo de calor unidirecional e outros multidirecional. Segundo Soares (1998), o teste experimental com aquecimento multidirecional não é confiável, pois não retrata a prática operacional, sendo assim aconselha-se a aplicação de métodos onde haja fluxo unidirecional de calor. Dentre os métodos, Mills (1995) destaca o realizado por Kawamoto et al (1993), onde 1 (uma) tonelada de aço é alimentada em uma espécie de cadinho com 750 (setecentos e cinquenta) mm de altura e 700 (setecentos) mm de diâmetro de fundo. Na superfície do aço adiciona-se o fluxante, sendo fundido unidirecionalmente. Para avaliação da fusão no decorrer do tempo de experimento, utiliza-se um termopar em 50 (cinquenta) mm abaixo da superfície do aço. A profundidade da escória líquida no decorrer do

tempo estabelece a taxa de fusão do pó. Esse método para a determinação da taxa de fusão é relativamente caro, pois se necessita de 1 (uma) tonelada de aço líquido disponível, exigindo ainda um longo tempo de preparação.

A taxa de fusão é função da quantidade de carbono livre presente no pó, composição química e ponto de fusão. Mills (2003) também cita outros fatores que controlam a taxa de fusão, como a densidade do fluxo de calor vertical – afetada por parâmetros de lingotamento contínuo –, conteúdo de carbonatos no fluxante e, ainda, a presença de constituintes exotérmicos. Kawamoto et al (1993), a partir do método experimental desenvolvido, concluiu que o teor de carbono livre presente no fluxante é o principal responsável pelo controle da taxa de fusão. Aumentando-se o teor de carbono livre no fluxante, a sua taxa de fusão tende a diminuir, conforme Figura 2.13. Conforme Bezerra et al (2005), devido ao alto ponto de fusão do carbono, forma-se uma barreira inerte entre as partículas sólidas e gotas líquidas, controlando a taxa de fusão do fluxante. Observa-se também que, para teores de carbono livre menores que 1% a fusão torna-se instável (KAWAMOTO et al, 1993).

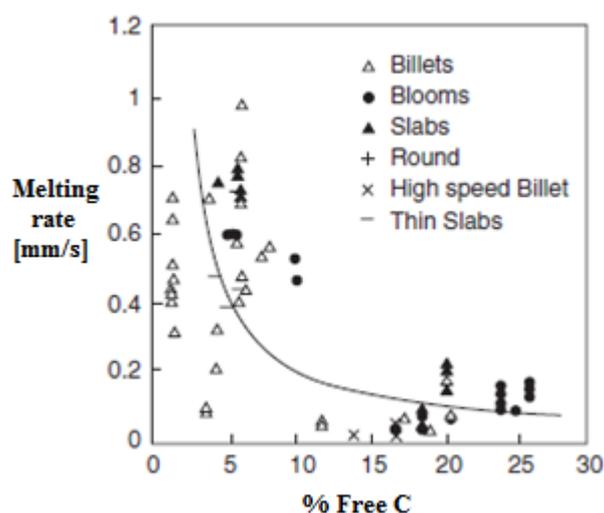


Figura 2.13 Taxa de fusão em função do teor de carbono livre em pós fluxantes para diferentes produtos de lingotamento contínuo. Fonte: Adaptado de MILLS, 2003.

2.5 Transferência de calor no molde e o potencial ferrítico

A transferência de calor no molde apresenta uma série de fenômenos complexos que atuam simultaneamente. São fenômenos que têm influência direta sobre a qualidade do produto final de lingotamento contínuo.

Segundo Pinheiro (1995), na frente de solidificação o calor é transferido a partir dos seguintes mecanismos:

- i. Transferência por convecção no aço líquido.
- ii. Condução através da casca solidificada.
- iii. Extração de calor através do filme de fluxante na interface metal/molde.
- iv. Extração de calor através dos possíveis “*gaps*” de ar entre o molde e a casca solidificada.
- v. Condução através das paredes do molde de cobre.
- vi. Convecção na interface do molde e da água de resfriamento.

Existem muitos fatores que estão relacionados com a extração de calor entre o molde e o produto (lingote) durante seu processo de solidificação. Dentre os principais, a velocidade de lingotamento, a composição química do aço e as propriedades de pós fluxantes são destaques. Porém, também têm sido relacionado ao fluxo de calor, a geometria do molde, a frequência de oscilação, o projeto de válvula submersa (SEN) e, até mesmo o teor de hidrogênio dissolvido no aço (PINHEIRO, 1995).

Para o lingotamento de placas, o perfil característico do fluxo de calor no molde pode ser observado a partir da Figura 2.14. O pico máximo que pode ser analisado a partir do gráfico existe logo após a região do menisco, diminuindo a medida que nos aproximamos do fundo do molde. Antes da saída do molde, evidencia-se um aumento suave do fluxo.

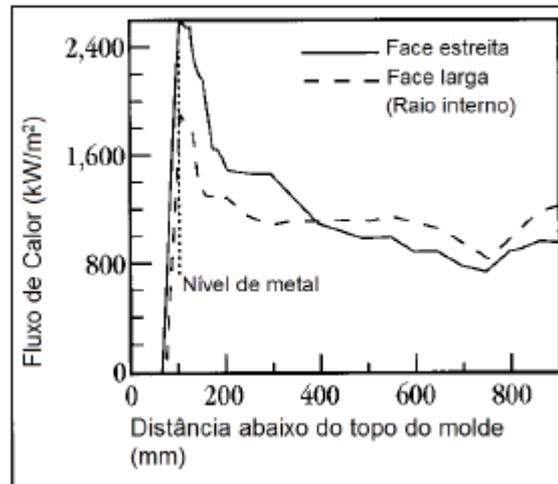


Figura 2.14 Perfil do fluxo de calor nas faces estreitas e largas de um molde para lingotamento de placas. Fonte: Adaptado de PINHEIRO, 1995.

A redução do fluxo de calor abaixo do menisco deve-se aos seguintes fatores (PINHEIRO, 1995) :

- Aumento do *gap* separando o metal do molde;
- Acréscimo da fração sólida do fluxante;
- Aumento da espessura da casca sólida;
- Redução da convecção no interior do aço líquido;

A composição química do aço tem influência na transferência de calor. As reações e transformações que ocorrerão durante a solidificação são caracterizadas pela composição química. Por isso, torna-se necessário classificar os aços que são produzidos no lingotamento contínuo quanto ao *potencial ferrítico* ou *potencial de ferrita* (FPot). O FPot indica a fração de ferrita primária formada durante a solidificação (FERNANDES, 2005).

Wolf (1991) afirma que o comportamento do aço dentro do molde é uma função do FPot e do carbono equivalente da reação peritética (Cp). As equações 2 e 3 a seguir demonstram as relações da composição química dos aços com o FPot e Cp.

$$C_p = [\%C] + 0,04[\%Mn] + 0,1[\%Ni] + 0,7[\%N] - 0,14[\%Si] - 0,04[\%Cr] - 0,1[\%Mo] - 0,4[\%Ti] \quad (2)$$

$$FPot = 2,5 (0,5 - \%Cp) \quad (3)$$

A tendência para que ocorram defeitos inerentes ao processo de lingotamento contínuo (trincas, depressões e agarramentos) pode ser avaliada em função do potencial de ferrita. A Figura 2.15 ilustra esta tendência, em função do FPot.

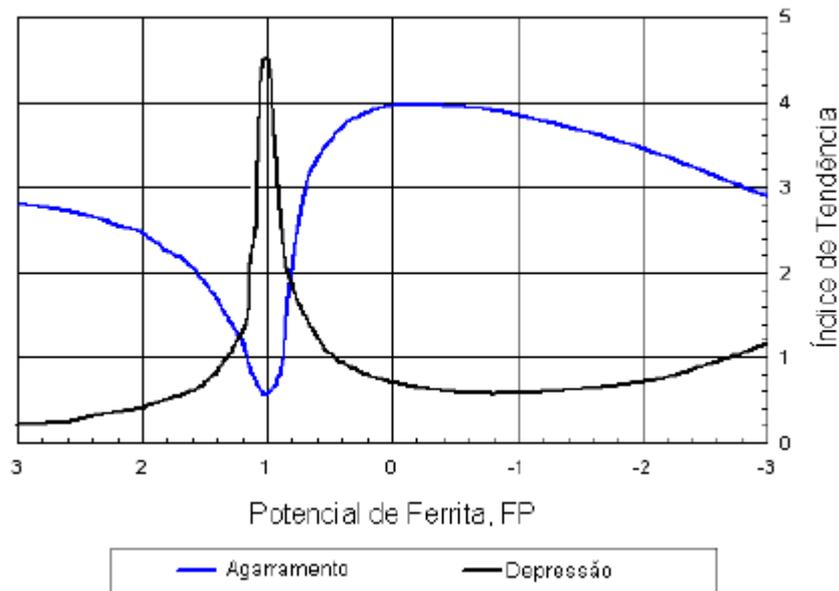


Figura 2.15 Diagrama de tendência à ocorrência de agarramento e depressão, durante lingotamento contínuo, em função do FPot. Fonte: KROMHOUT, 2011.

Interpretando o diagrama da Figura 2.15, afirma-se que para FPot entre 0,85 e 1,05 tem-se maior sensibilidade à formação de depressões junto à superfície do produto. Por outro lado, para valores de FPot fora deste intervalo, o aço é mais sensível ao fenômeno de agarramento no interior do molde.

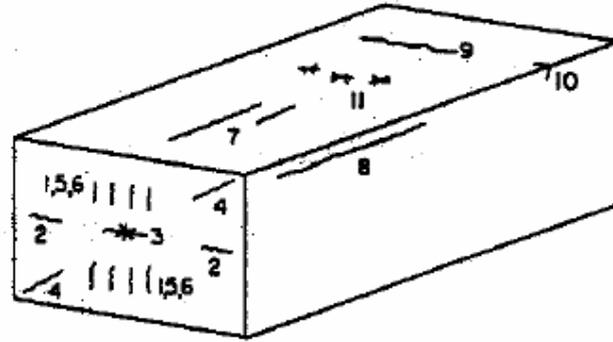
2.6 Qualidade superficial do produto

Dos capítulos anteriores, conclui-se que o molde representa uma etapa crítica dentro do processo de lingotamento contínuo. A qualidade superficial dos produtos lingotados de forma contínua está ligada, diretamente, aos estágios iniciais de solidificação do aço (GONÇALVES, 2014). Os aços destinados à construção mecânica, aplicados na indústria

automotiva, por exemplo, possuem exigências de qualidade bastante criteriosas. Melhorias nas propriedades mecânicas dos produtos laminados, qualidade interna e superficial, são cada vez mais exigidas pela indústria automobilística. Segundo Soares (1998), a produção de aços especiais em lingotamento contínuo de tarugos com pequenas seções apresentou um rápido progresso com o aumento de rendimento, redução nas etapas de processamento e consumo de energia. Por outro lado, defeitos superficiais e a tentativa de remoção (esmerilhamento) resultam em consumo de tempo, afetando diretamente no custo de produção.

2.6.1 Defeitos superficiais

No processo de lingotamento contínuo, um dos problemas mais sérios relacionados à qualidade do produto final é a formação de defeitos (trincas) que podem alcançar qualquer lugar da superfície ou interior do tarugo (GARCIA et al, 2006). As trincas superficiais geralmente representam um problema maior que as trincas internas, devido às superfícies estarem expostas ao ar, oxidarem e não possibilitarem o caldeamento durante o processo de laminação (BRIMACOMBE, 1984). A Figura 2.16 mostra esquematicamente os defeitos (superficiais e internos) encontrados em lingotamento contínuo.



Trincas em aços produzidos por lingotamento contínuo

Trincas internas

- 1 no meio das faces
- 2 de ponto triplo
- 3 centrais
- 4 diagonais
- 5 de curvamento/desencurvamento
- 6 da região dos rolos de extração

Trincas superficiais

- 7 longitudinais no meio da face
- 8 longitudinais na quina
- 9 transversais no meio da face
- 10 transversais na quina
- 11 em estrela

Figura 2.16 Esquema mostrando os tipos de trincas produzidas no lingotamento contínuo.

Fonte: BRIMACOMBE, 1984.

Embora exista um grande número de tipos de trincas, é possível formar um conjunto de medidas com o objetivo de prevenir seu aparecimento. Por interesse deste trabalho serão tratadas somente as trincas superficiais longitudinais e transversais.

2.6.1.1 Trincas longitudinais

Segundo Fernandes (2005), uma maior susceptibilidade de trincas longitudinais é observada em seções redondas, porém a presença deste tipo de defeito em seções quadradas também é perceptível. Este tipo de defeito está associado à depressões na superfície devido à vários fatores, a saber, propriedade mecânica do aço em alta temperatura, efeitos de elementos fragilizantes, extração de calor e fluxo de aço no molde.

As trincas longitudinais surgem nas regiões mais finas da casca solidificada, sendo necessária a garantia da estabilidade de fluxo de calor durante o processo de lingotamento, para reduzir a incidência deste defeito (DIHL, 2012).

Oliveira (2009) afirma que o surgimento deste tipo de trinca é decorrente de uma má formação da casca solidificada, sendo o seu crescimento não uniforme, que é fortemente influenciado pelo escoamento turbulento do metal e/ou pela flutuação do nível do menisco no molde.

2.6.1.2 Trincas transversais

São defeitos com profundidade da ordem de 1 a 15 mm, podendo aparecer de forma mais pronunciada nas quinas do tarugo. Segundo Pereira (2011), as trincas transversais são originadas na região dos rolos de endireitamento ou nas câmaras de refrigeração. São formadas, no caso do endireitamento, à baixas temperaturas (de 700 a 900 °C) e, na região de refrigeração por *sprays*, quando se tem elevados gradientes térmicos na direção longitudinal. Estas trincas estão relacionadas com a precipitação de nitretos, principalmente o AlN (nitreto de alumínio). Segundo Fernandes (2005), as trincas transversais são amplificadas pela precipitação dinâmica de carbo-nitretos durante o endireitamento do aço, no intervalo de temperatura em que se observa uma redução drástica na coesão entre os grãos presentes na sua estrutura.

É possível que a formação das trincas transversais ocorra na região de endireitamento, para isto é necessário que as marcas de oscilação formadas durante o lingotamento sejam bastante acentuadas (OLIVEIRA, 2009). Segundo ainda esse autor, uma possível proposta para minimizar o aparecimento de trincas transversais é a redução da concentração de elementos como o nióbio, alumínio, vanádio e nitrogênio dentro das especificações dos aços.

Na adoção de estratégias para redução de trincas transversais nos produtos de lingotamento contínuo, torna-se interessante otimizar a viscosidade do pó fluxante e a oscilação do molde, visando minimizar a profundidade da marca de oscilação para valores abaixo de 0,2 mm. Esta otimização também está associada à uma manutenção adequada da máquina de lingotamento contínuo, incluindo o alinhamento dos rolos e o controle dos *sprays* para refrigeração (OLIVEIRA, 2009).

3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo será descrito o tipo de aço empregado durante os testes, a composição química dos pós fluxantes e a máquina de lingotamento contínuo. Também será apresentada a metodologia empregada para a avaliação da lubrificação do molde e a frenagem na interface metal/molde.

Para obtenção dos dados foram desenvolvidas 22 (vinte e duas) corridas, igualmente divididas para os (2) dois pós fluxantes, ou seja, foram testadas 11 (onze) corridas para cada fluxante. Estas 11 (onze) corridas foram devidamente divididas em 2 (dois) sequenciais, sendo o primeiro sequencial com 6 (seis) corridas e o segundo com 5 (cinco) corridas. Os tarugos produzidos durante o lingotamento destes sequenciais foram laminados e, posteriormente, inspecionados via técnica de partículas magnéticas.

3.1 Matérias-primas

3.1.1 Aço lingotado

O aço empregado no desenvolvimento deste trabalho possui composição química nominal descrita segundo norma SAE 1046 Mod, conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Porcentagem em massa dos elementos no aço SAE 1046 Mod. Fonte: Adaptado de norma específica de cliente.

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni
Mínimo [%]	0,43	0,3	1	-	0,02	-	-
Máximo [%]	0,5	0,6	1,3	0,04	0,05	0,2	0,1

A modificação da norma apresenta teor pouco mais elevado de manganês e a presença de cobre e níquel, comparada com a norma SAE 1046. Conforme o teor de carbono apresentado, pode-se afirmar que trata-se de um aço médio carbono. Este tipo de aço é destinado para forjamento.

O potencial ferrítico para este aço é de, aproximadamente, 0,15. Segundo a Figura 2.15, apresentada no capítulo anterior, para este valor tem-se uma maior sensibilidade ao fenômeno de agarramento no interior do molde. Evidenciando, assim, a necessidade de uma boa lubrificação da parede interna do molde.

3.1.2 Pós fluxantes

Para o desenvolvimento deste estudo, foram avaliados 2 (dois) pós fluxantes diferentes (Fluxantes A e B), sob as mesmas condições de operação, isto é, qualidade de aço e parâmetros de lingotamento mantidos constantes. A Tabela 3.2 mostra a relação dos fluxantes utilizados durante os testes.

Tabela 3.2 Relação da composição química dos Fluxantes A e B utilizados durante os testes.

Constituintes	Fluxante A	Fluxante B
	% (em massa)	
CaO	30,9	18,5
SiO ₂	28,1	26,6
MgO	-	1,9
Al ₂ O ₃	4,8	5,5
Na ₂ O + K ₂ O	5,3	8,5
Fe ₂ O ₃	-	3,9
CO ₂	9,4	5,4
F	4,5	5,8
C _{livre}	16,0	22,0

O Fluxante A é referenciado como padrão, sendo o Fluxante B denominado como pó teste. A principal motivação para aplicação do Fluxante B é verificar o possível aumento de sequenciamento para o aço representado na Tabela 3.1, mantendo a qualidade superficial dos produtos de lingotamento contínuo e a integridade da válvula submersa.

Como o teor de CaO difere de um pó para outro, verifica-se uma diferença na basicidade de ambos, sendo obtida a partir da razão de CaO e SiO₂, conforme Tabela 3.3.

Tabela 3.3 Basicidade para os Fluxantes A e B.

	Fluxante A	Fluxante B
Basicidade (CaO/SiO ₂)	1,10	0,70

Conforme especificações do fornecedor, a viscosidade para ambos pós fluxantes, a 1300 °C, é de 0,24 Poise. Segundo Silva (2010), utiliza-se esta temperatura para determinar a viscosidade, pois representa a temperatura média na camada de escória líquida.

3.2 Equipamentos

3.2.1 Máquina de lingotamento contínuo

A seguir apresenta-se a composição da máquina de lingotamento contínuo, a partir de uma descrição do distribuidor, da válvula submersa e do molde. A Tabela 3.4 mostra as características gerais do equipamento de lingotamento onde foram realizados os testes.

Tabela 3.4 Informações gerais da máquina de lingotamento contínuo onde foram realizados os testes.

Características da máquina	
Capacidade de distribuidor [t]	15
Número de veios	3
Seção [mm]	240 x 240
Fluxo de aço (panela/distribuidor)	Tubo longo
Fluxo de aço (distribuidor/molde)	Válvula submersa (SEN)
Velocidade de lingotamento [m/min]	0,85
Frequência de oscilação [cpm]	160
Sistema de corte	Oxicorte
Alimentação de pó fluxante	Semiautomático pneumático
Tipo de molde	Linear
Comprimento do molde [mm]	900

Em todos os testes utilizaram-se válvulas submersas (SEN), em cada um dos 3 (três) veios do distribuidor, a fim de alimentar os moldes com aço líquido e, ao mesmo instante, evitar o contato direto do aço com o ar. Foram utilizadas válvulas submersas de um tipo apenas, com revestimento de zircônia na linha de escória e com saída única pelo fundo. As válvulas empregadas nos testes possuíam 70 (setenta) mm de Φ (diâmetro) no fundo e comprimento total de 880 (oitocentos e oito) mm, conforme desenho na Figura 3.1.

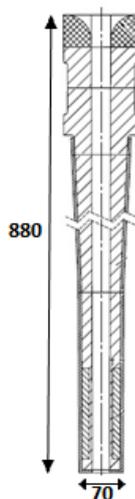


Figura 3.1 Projeto de válvula submersa (SEN), com medidas em milímetros, utilizada durante os testes com pós fluxantes. Fonte: Adaptado de RHI, 2014.

O molde, ilustrado na Figura 3.2, apresenta seção quadrada, medindo 240 x 240 mm. Possui um revestimento interno de cromo, conferindo uma superfície dura e bastante rígida. Externamente, o material utilizado na confecção do molde é cobre puro.



Figura 3.2 Molde de cobre para lingotamento contínuo de tarugos com seção quadrada de 240 x 240 mm.

3.2.2 Instrumentação para medição de frenagem (atrito) metal/molde

Para avaliar os efeitos de lubrificação de cada fluxante no interior do molde utilizou-se um sistema baseado em sensores acelerômetros tri-axiais, fixados na própria mesa de oscilação, conforme Figura 3.3. Cada veio possui 4 (quatro) sensores acoplados, de forma idêntica, na mesa de oscilação correspondente. Os sensores são bastante sensíveis ao movimento, tanto lateral como vertical. Torna-se fundamental a realização dos devidos procedimentos de calibração, para eliminar qualquer fonte de erro durante a aquisição de dados (TOZATO ENGENHARIA, 2013). Este sistema, denominado TE-SiMOM ONLINE, é capaz de monitorar a oscilação do molde no decorrer de todo processo de lingotamento contínuo.

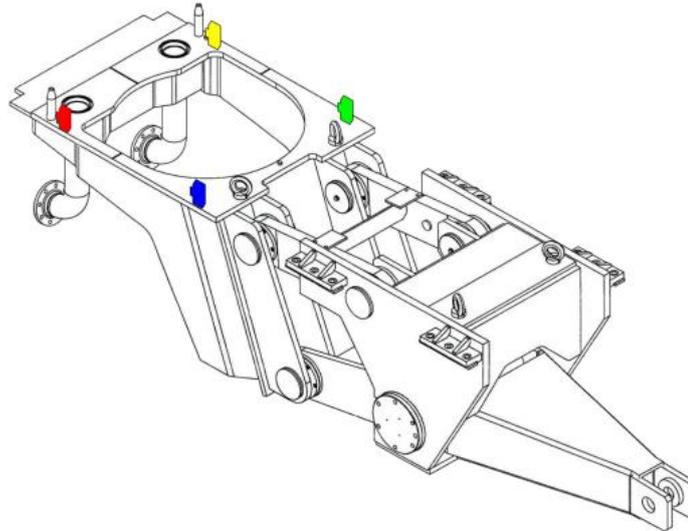


Figura 3.3 Representação da posição dos sensores acelerômetros (em cores) na mesa de oscilação. Fonte: TOZATO ENGENHARIA, 2013.

Durante o lingotamento contínuo, o sistema de medição alimenta um programa com dados referentes ao próprio processo, como frequência, tempo de estripamento negativo, velocidade real de lingotamento, deslocamentos vertical e lateral do molde, frenagem entre metal e molde etc. Os valores destas variáveis são medidos em tempo real e devidamente armazenados em um microcomputador.

Neste trabalho buscou-se avaliar a lubrificação do molde, tanto para o fluxante padrão como para o teste. Para isto, considerou-se de maior importância a variável frenagem (atrito). Os sensores medem o módulo da aceleração, em mm/s^2 , durante a oscilação do molde. Considera-se o módulo, pois a frenagem representa o esforço vertical contrário em relação à descida do veio no processo de lingotamento, sendo, portanto um valor negativo. A frenagem, nesta ocasião, pode ser definida como a resistência encontrada pelo veio através das paredes do molde, favorecendo o agarramento da casca solidificada. Elevados módulos de frenagem impactam na formação de superfícies de baixa qualidade sobre os produtos de lingotamento contínuo. As Figuras 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 representam os passos da oscilação do molde, em animação, a partir do monitoramento dos 4 (quatro) sensores fixados na mesa de oscilação, em função da frenagem (atrito) do metal com o molde, em escala de cores.

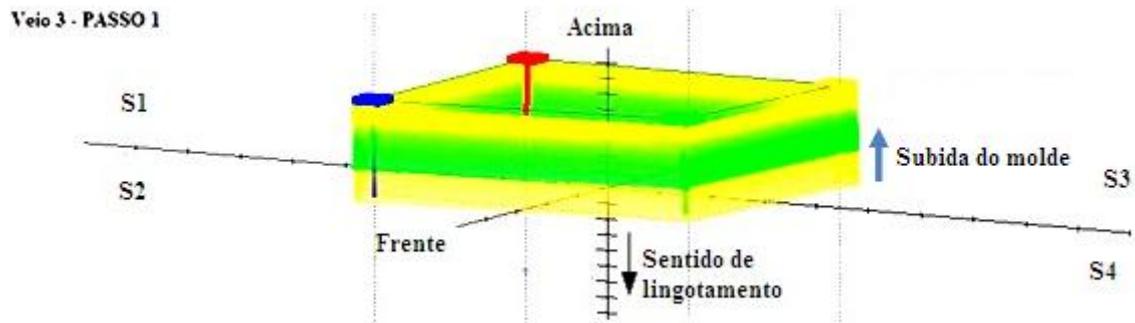


Figura 3.4 Animação gráfica gerada a partir do sistema de monitoramento da oscilação do molde no momento de subida, partindo da origem.

O sistema de monitoração da oscilação do molde, a partir dos sensores acelerômetros, estabelece uma animação 3D em modelo computacional. O modelo possui um sistema de coordenadas (x,y,z) onde se apresenta a oscilação. A oscilação inicia-se com a subida do molde no Passo 1 (um), como mostra a Figura 3.4, com ponto central partindo da origem (0,0,0).

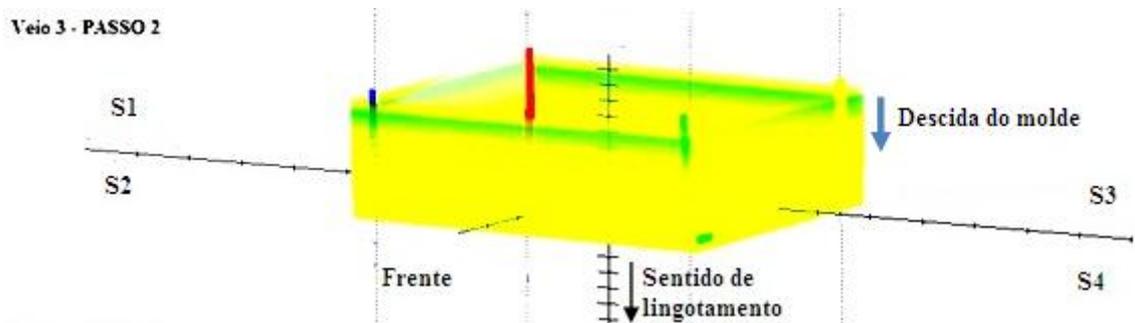


Figura 3.5 Animação gráfica gerada a partir do sistema de monitoramento da oscilação do molde no momento de descida.

Após o molde atingir seu ponto máximo de subida, tem-se o Passo 2 (dois). Neste passo ocorre a descida do molde até, novamente, à posição de origem, conforme Figura 3.5.

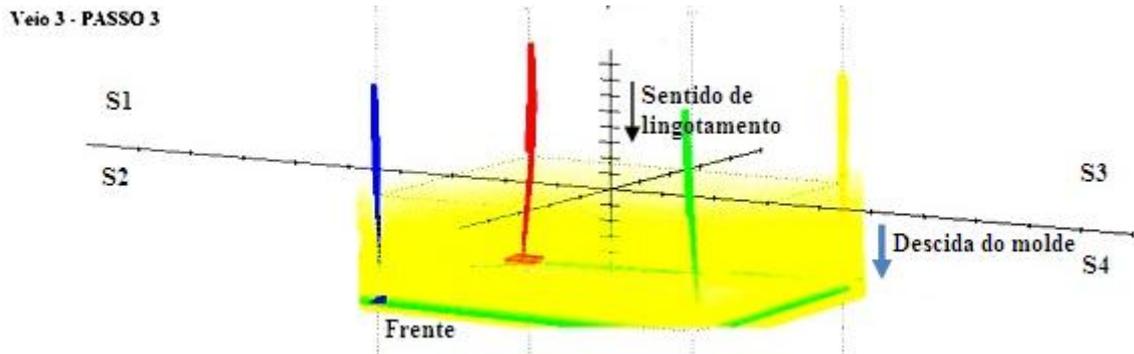


Figura 3.6 Animação gráfica gerada a partir do sistema de monitoramento da oscilação do molde no momento de descida, logo abaixo da origem.

A continuação da descida do molde é estabelecida no Passo 3 (três), na Figura 3.6. Neste instante tem-se o movimento do molde para baixo, partindo da posição de origem.

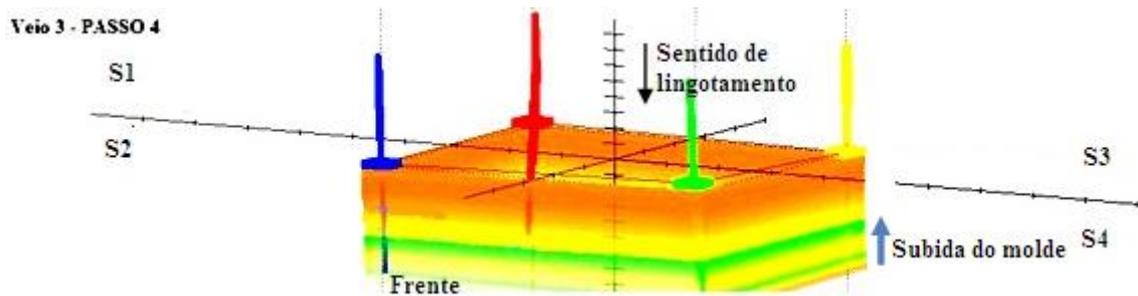


Figura 3.7 Animação gráfica gerada a partir do sistema de monitoramento da oscilação do molde no momento de subida.

No Passo 4 (quatro), apresenta-se a subida do molde até o ponto de partida, fechando o ciclo oscilatório, ilustrado pela Figura 3.7. O movimento de subida começa logo após o molde atingir seu ponto máximo de descida, identificado pelo Passo 3, na Figura 3.6.

A escala de cores que acompanha a oscilação indica a frenagem (atrito) entre o metal e o molde. A escala varia da cor verde até a cor vermelha, representando, respectivamente, baixos a altos módulos de frenagem. Boas condições de lubrificação do molde devem apresentar coloração esverdeada. Entretanto, para condições adversas, onde a frenagem predomina, as cores tendem ao amarelo escuro até o vermelho.

Para caracterização da qualidade superficial dos produtos de lingotamento foi empregada inspeção não destrutiva, a partir da técnica de partículas magnéticas, em equipamento Circoflux. Trata-se de uma técnica de inspeção que tem como objetivo detectar as discontinuidades (trincas, dobras, vazios e etc) superficiais e subsuperficiais em materiais ferromagnéticos. As partículas empregadas na inspeção são do tipo fluorescente dispersas em líquido que, sob ação de luz negra, exibem uma acentuada fluorescência (amarelo-esverdeado). A partir de um campo magnético, o produto em análise é magnetizado. Quando na presença de discontinuidades, o campo sofre desvios, deslocando-se para a superfície da peça, gerando o que denomina-se campos de fuga, conforme mostra Figura 3.8. Dessa forma, o operador consegue identificar a discontinuidade, bem como caracterizá-la.

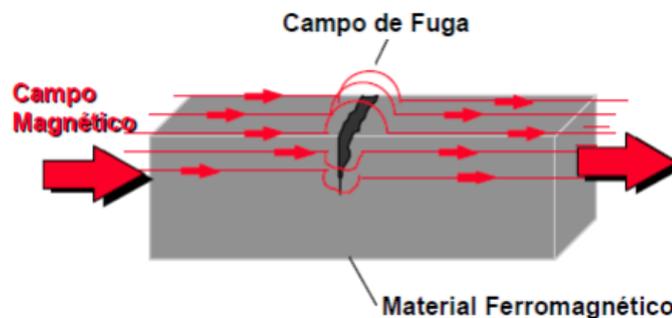


Figura 3.8 Representação do ensaio de partículas magnéticas para detecção de discontinuidades superficiais e subsuperficiais. Fonte: Adaptado de DUARTE, 2010.

3.2.3 Instrumentação para medição de desgaste de válvula submersa

Para o dimensionamento do desgaste sofrido pela válvula submersa durante o processo de lingotamento contínuo, utilizou-se um ferramental simples e de fácil aplicação, conforme Figura 3.9. Como já citado anteriormente, as válvulas submersas apresentaram Φ_i de 70 (setenta) mm. O Φ_i foi conferido segundo mesmo método identificado na Figura 3.9. Para medição do Φ_f , esperou-se o resfriamento parcial da válvula submersa, minimizando possíveis erros de medição decorrentes da alta temperatura logo após o processo de lingotamento.

O ferramental utilizado para conferir o grau de erosão da válvula é bastante prático. A medição é realizada exatamente na região de contato da escória (fluxante) na válvula

submersa. Para isso, posiciona-se a ferramenta no local descrito e, fixando sua abertura, conforme Figura 3.9a, pode-se estabelecer o Φ_f . Com o auxílio de uma régua, mede-se o tamanho da abertura do instrumento, que corresponde ao Φ_f , Figura 3.9b.



Figura 3.9 Ferramental para medição do desgaste circular de válvula submersa, na condição a) posicionamento da ferramenta e fixação de sua abertura e b) medição da abertura com uma régua simples.

As medições, por via de regra, foram realizadas sempre no final de cada sequencial. Sendo realizadas nas válvulas submersas dos 3 (três) veios da máquina, seguindo o mesmo método e instrumentação. Como tem-se 2 (dois) sequenciais para cada fluxante, presenciaram-se 12 (doze) medições no total, isto é, considerando os 2 (dois) fluxantes.

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Desgaste de válvula submersa

Em função do pó fluxante utilizado durante o lingotamento contínuo, foi avaliado o desgaste da válvula submersa. A partir do Φ_i e Φ_f da válvula, na região em contato com aço, torna-se possível o estudo do desgaste. É importante lembrar que o Φ_i da válvula era de 70 mm. A Tabela 4.1 relaciona o Φ_f da válvula em função do tipo de pó fluxante empregado.

Tabela 4.1 Relação de pó fluxante com o diâmetro final da válvula submersa.

Pó fluxante	Sequencial	Φ_f [mm]		
		Veio 1	Veio 2	Veio 3
A	1º sequencial: 6 corridas	67	65	63
	2º sequencial: 5 corridas	65	65	65
B	1º sequencial: 6 corridas	54	59	57
	2º sequencial: 5 corridas	67	65	65

Pode-se, também, realizar uma análise considerando a taxa de desgaste da válvula submersa, em mm/corrida. A partir da Tabela 4.2, verifica-se uma elevada taxa de desgaste para o Fluxante B, quando aplicado no sequencial maior, de 6 (seis) corridas. O desgaste acentuado da válvula, nessa ocasião, está relacionado ao maior tempo de contato do pó fluxante com a superfície da válvula. Segundo Silva (2010), a taxa de erosão/desgaste da válvula submersa está diretamente relacionada à fluidez da escória formada a partir do fluxante. Porém, tanto o Fluxante A como o B apresentaram, conforme especificação, a mesma viscosidade. Embora possuam a mesma viscosidade, o Fluxante B indicou mais índices de erosão à válvula. A Tabela 3.2 mostra que o Fluxante B apresenta 1,3% em massa de flúor a mais do que o Fluxante A. Isso pode ser uma das explicações possíveis para o resultado danoso causado pelo Fluxante B à válvula.

Tabela 4.2 Relação de pó fluxante com a taxa de desgaste da válvula submersa.

Pó fluxante	Sequencial	Taxa de desgaste [mm/corrida]		
		Veio 1	Veio 2	Veio 3
A	1º sequencial: 6 corridas	0,5	0,8	1,2
	2º sequencial: 5 corridas	1,0	1,0	1,0
B	1º sequencial: 6 corridas	2,7	1,8	2,2
	2º sequencial: 5 corridas	0,6	1	1

As válvulas submersas utilizadas durante os testes com o pó Fluxante B podem ser visualizadas nas Figuras 4.1a e 4.1b, evidenciando (em vermelho) a região de contato direto do fluxante com a superfície da válvula, para o primeiro sequencial (6 corridas) e para o segundo (5 corridas), respectivamente.

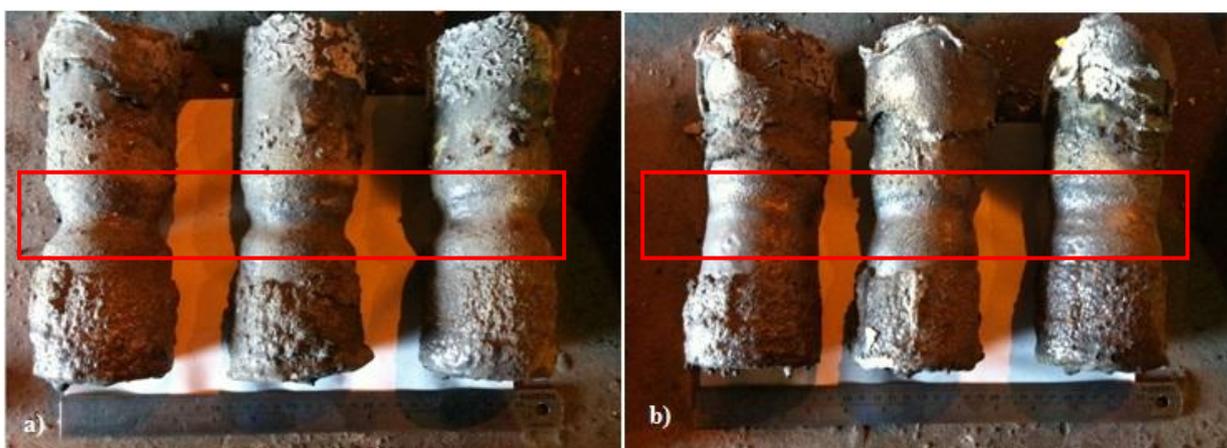


Figura 4.1 Destaque da região de contato direto do Fluxante B com a válvula submersa após testes durante lingotamento contínuo do aço SAE 1046 Mod, na condição a) para 6 corridas e b) para 5 corridas.

Durante os experimentos, foram considerados tempos e temperaturas de pré-aquecimento das válvulas submersas, em conjunto com o distribuidor, iguais para a aplicação dos dois fluxantes. Portanto, caso não tenham sido realmente iguais, é possível que esses parâmetros de pré-aquecimento sejam fontes de erro para os resultados, pois segundo

Yingnakorna (2014), a temperatura, por exemplo, influencia diretamente na vida útil da válvula submersa. Para o caso de elevadas temperaturas, tem-se o fenômeno de oxidação da válvula e para baixas temperaturas, durante o lingotamento, pode-se presenciar a fratura da válvula.

Não foi realizada nenhuma análise de difração de raios – x nos fluxantes utilizados no estudo. O que dificulta, talvez, a melhor caracterização da erosão da válvula submersa. Em testes realizados por Devic (2007), notou-se que a presença de teores baixos de wollastonita no fluxante pode acentuar a erosão da válvula apreciavelmente.

Na linha de escória da válvula submersa utiliza-se ZrO_2 (zircônia), devido sua alta resistência ao desgaste/erosão. A presença deste constituinte no refratário da válvula ocasiona em aumento de vida útil e, inclusive, garante potencial possibilidade para aumento de sequenciamento da máquina de lingotamento. Um estudo realizado por Cirilli et al (2008), a respeito do revestimento de ZrO_2 , mostra-se coerente com os resultados obtidos durante os experimentos com os Fluxantes A e B. O estudo obteve conclusões referente à degradação do revestimento da válvula submersa na linha de escória. Para fluxantes com mais baixo teor de CaO e alto teor de SiO_2 , a degradação da superfície refratária da válvula evidenciou-se de forma mais acentuada.

Neste estudo, o maior desgaste obtido foi para o Fluxante B que, por sua vez, apresenta, em relação ao Fluxante A, menor teor de CaO e, praticamente, mesmo teor de SiO_2 (Tabela 3.2). Esse resultado está de acordo com Cirilli et al (2008). Segundo eles, a baixa atividade de CaO implica no aumento da capacidade da escória em dissolver CaO, causando redução da vida útil do refratário da válvula submersa, devido principalmente à degradação dos grãos de ZrO_2 . Portanto, em função dos resultados obtidos, o Fluxante B não é indicado para aplicação em aumento de sequenciamento.

4.2 Frenagem (atrito) metal/molde

O estudo da frenagem foi desenvolvido a partir de um sistema contendo sensores acelerômetros, acoplados na mesa de oscilação, nos 3 (três) veios da máquina de lingotamento. As Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 apresentam as médias de frenagem para os Fluxantes A e B, obtidas nos 3 (três) veios. Cada veio possui 4 (quatro) sensores, denominados S1, S2, S3 e S4.

Tabela 4.3 Frenagem nos 4 (quatro) sensores do veio 1 da máquina de lingotamento.

Veio 1	Pó fluxante	Frenagem [mm/s ²]			
		S1	S2	S3	S4
	A	430,6	427,4	445,2	454,8
	B	382,6	409,9	458,7	421,1

Tabela 4.4 Frenagem nos 4 (quatro) sensores do veio 2 da máquina de lingotamento.

Veio 2	Pó fluxante	Frenagem [mm/s ²]			
		S1	S2	S3	S4
	A	386,9	402,3	443,1	414,9
	B	375,7	383,9	417,3	227,1

Tabela 4.5 Frenagem nos 4 (quatro) sensores do veio 3 da máquina de lingotamento.

Veio 3	Pó fluxante	Frenagem [mm/s ²]			
		S1	S2	S3	S4
	A	327,3	325,4	336,2	341,9
	B	270,2	262,6	279,6	279

A partir dos dados acima, verifica-se que o pó Fluxante A apresenta maior tendência à frenagem que o pó Fluxante B, nos 4 (quatro) sensores. A baixa lubrificação do Fluxante A pode estar associada a sua alta basicidade, em relação ao Fluxante B. Valores maiores de basicidade, geralmente, resultam na formação de filmes de escória mais cristalinos e rígidos, reduzindo a transferência de calor e lubrificação do molde. Por outro lado, basicidades menores induzem a formação de filmes vítreos, melhorando a lubrificação e transferência de calor do molde (KROMHOUT, 2011).

Para melhor visualização, os dados referentes às tabelas acima podem ser representados a partir das Figuras 4.2, 4.3 e 4.4. De fato, o Fluxante B apresenta menores índices de atrito em relação ao Fluxante A. Entretanto, a avaliação de melhorias de processo em detrimento das características do Fluxante B deve ser analisada cuidadosamente, pois existem outros fatores que podem influenciar nas condições de lubrificação do molde, por exemplo, a taxa de alimentação de pó fluxante através do sistema semi-pneumático. Considerou-se, para este trabalho, uma taxa de alimentação constante e igual em todas as

corridas desenvolvidas, tanto para o Fluxante A como para o Fluxante B. Da mesma forma, desprezou-se variações da frequência de oscilação e tempo de estripamento negativo.

Comparando com os veios 1 e 2, verificou-se um índice de frenagem menor no veio 3, para todos os sensores. Possivelmente, este fato pode estar associado à máquina de lingotamento contínuo, como por exemplo, um desalinhamento da mesa de oscilação, pois em ambos fluxantes a redução da frenagem foi percebida, eliminando a hipótese da influência direta de algum fluxante em específico.

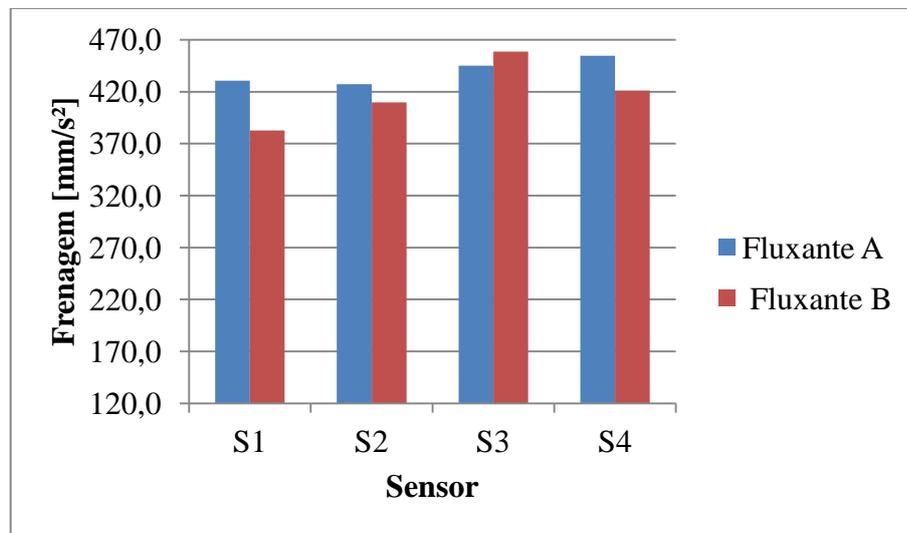


Figura 4.2 Gráfico em barras da frenagem (atrimento) em função dos sensores aplicados no veio 1 para os Fluxantes A e B.

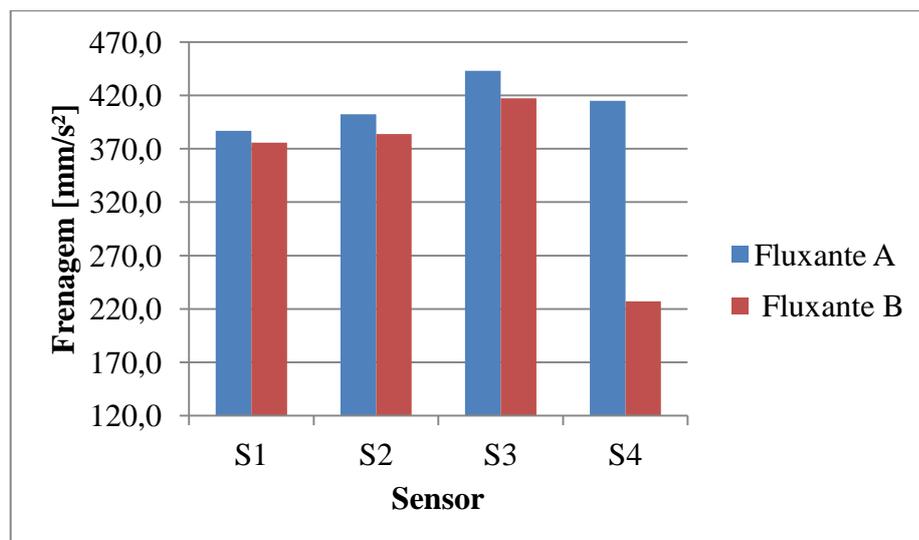


Figura 4.3 Gráfico em barras da frenagem (atrimento) em função dos sensores aplicados no veio 2 para os Fluxantes A e B.

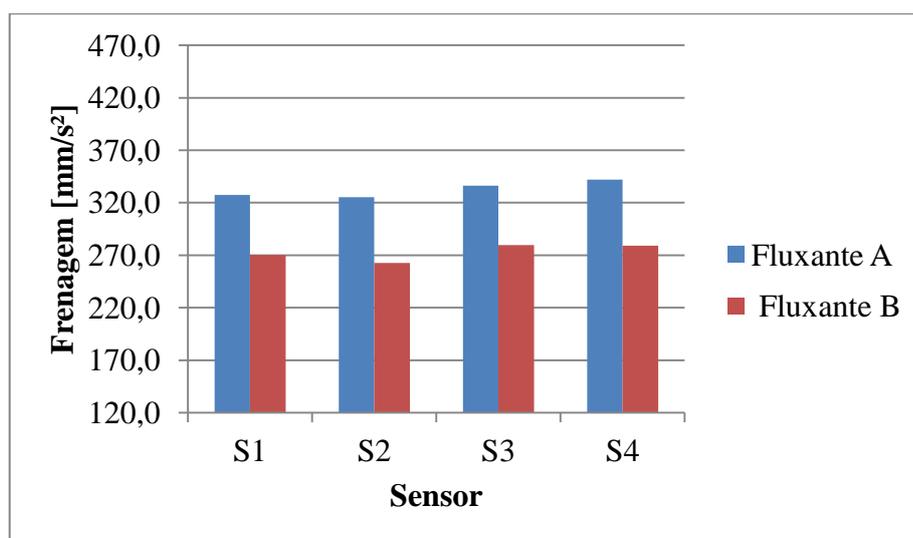


Figura 4.4 Gráfico em barras da frenagem (atrito) em função dos sensores aplicados no veio 3 para os Fluxantes A e B.

O sistema de medição online da oscilação armazena todos os dados referente ao processo de lingotamento em um microcomputador. O sistema possui um programa de monitoramento que consegue ler os arquivos gerados durante a oscilação, em tempo real. Uma das ferramentas disponibilizadas é a representação gráfica da frenagem (atrito) do metal e as paredes do molde. Para exemplificar, as Figuras 4.5 e 4.6 ilustram, graficamente, a frenagem (atrito) em função do tempo de uma das corridas estudadas, para cada veio da máquina de lingotamento com o Fluxante A e B, respectivamente. Essas figuras são originadas do monitoramento apresentado na Figura 3.4, onde a escala de cores relaciona-se com o grau de frenagem dentro do molde. É possível observar uma menor intensidade e, ao mesmo tempo, maior estabilidade do Fluxante B quanto ao grau de frenagem ou atrito entre o metal e a parede do molde.

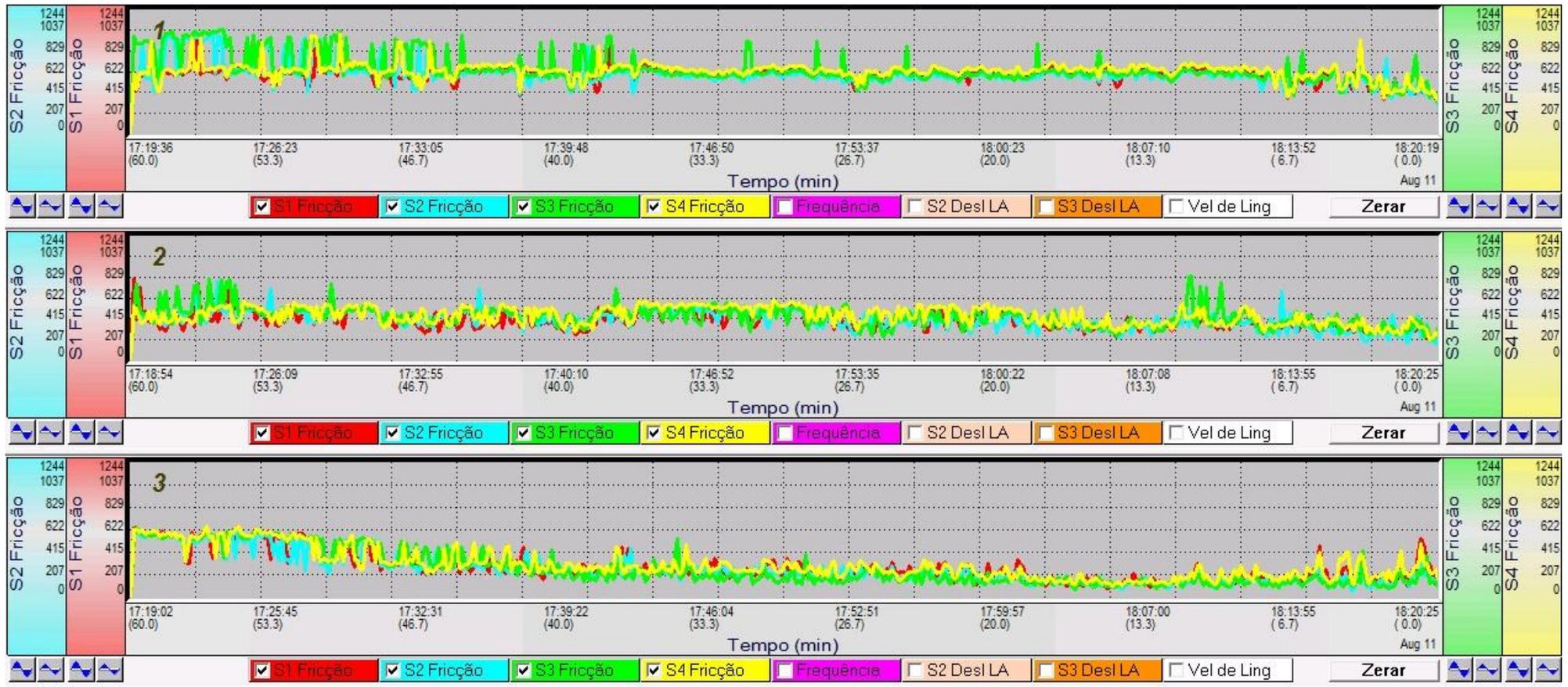


Figura 4.5 Gráfico exibido pelo *software* do sistema de acelerômetros da frenagem em função do tempo para os 3 (três) veios durante aplicação do fluxante A.



Figura 4.6 Gráfico exibido pelo *software* do sistema de acelerômetros da frenagem em função do tempo para os 3 (três) veios durante aplicação do fluxante B.

Fator que pode ter contribuído para a baixa lubrificação do Fluxante A é sua elevada basicidade (>1). Segundo Kromhout (2011), a formação de um filme de cristais torna-se maior quando a relação CaO/SiO_2 é elevada, aumentando perceptivelmente o atrito entre a casca solidificada e a parede do molde. O baixo teor de CaO no Fluxante B, em relação ao Fluxante A, apresentou significativas diferenças quanto à interação da casca solidificada com o molde.

Embora não tenha sido realizado nenhum experimento para medir a formação das camadas do fluxante durante o processo de lingotamento, Kromhout (2011) afirma que o reduzido teor de CaO proporciona a formação de uma camada de filme vítreo maior, próximo à parede do molde, favorecendo as condições de lubrificação, conforme dados das Tabelas 4.3, 4.4, 4.5 e Figura 4.6.

4.3 Rejeição de produto por defeitos superficiais

Sabe-se que muitos dos defeitos dos produtos de lingotamento contínuo podem ser originados no molde, sendo portanto uma etapa crítica dentro do processo siderúrgico. Um dos parâmetros que permitem controlar a incidência de defeitos superficiais nos produtos de lingotamento é a lubrificação do molde. Dentro do leque de atribuições e funções dos pós fluxantes está a lubrificação das paredes internas do molde, desfavorecendo o agarramento da casca solidificada, principalmente em aços com potencial ferrítico fora do intervalo de 0,85 e 1,05.

Das 11 (onze) corridas avaliadas para cada fluxante, a aplicação do pó Fluxante B apresentou o menor índice de rejeição, comparado ao pó Fluxante A. Como observado no item anterior, o fluxante A apresentou baixas condições de lubrificação do molde. Este fato reflete, diretamente, na formação de defeitos superficiais no produto de lingotamento. A Figura 4.5 retrata a redução da rejeição por defeitos superficiais percebida no emprego do pó Fluxante B.

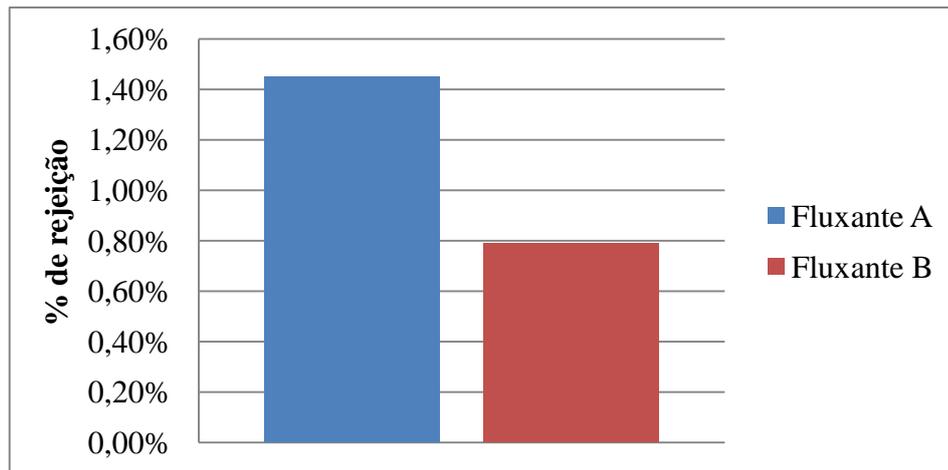


Figura 4.7 Gráfico do índice de rejeição por defeitos superficiais dos produtos de lingotamento contínuo em função do pó fluxante.

Alguns defeitos superficiais que foram reduzidos podem ser conferidos nas Figuras 4.8 e 4.9. São as trincas transversais e longitudinais de canto, decorrentes da aplicação de pó fluxante indevido ou fenômenos de agarramento dentro do molde, ocasionados pela baixa lubrificação. Agarramentos da casca solidificada nas paredes do molde são extremamente prejudiciais, pois produzem tensões de tração que darão origem às trincas superficiais.



Figura 4.8 Superfície do tarugo com detalhe para trinca longitudinal de canto.



Figura 4.9 Superfície do tarugo com detalhe para trinca transversal de canto. Fonte: Adaptado de SILVA, 2012.

Sob o ponto de vista da rejeição, a aplicação do Fluxante B trouxe melhorias no processo de lingotamento contínuo, já que se tornou perceptível uma redução da ocorrência de defeitos superficiais nos produtos da aciaria. As trincas superficiais do tipo transversal e longitudinal, representadas nas Figuras 4.8 e 4.9, foram minimizadas através da aplicação do Fluxante B. A redução do percentual de rejeição está diretamente associada à adequada condição de lubrificação do molde, evitando elevado atrito e fricção na interface metal/molde.

Conforme Figura 4.7, é possível identificar uma redução de 47% (quarenta e sete por cento) na rejeição de produtos por defeitos superficiais, reduzindo de 1,49% para 0,79% de rejeição.

5.0 CONCLUSÕES

O presente trabalho possibilitou a obtenção de informações importantes a cerca do processo de lingotamento contínuo, tratando da aplicabilidade de fluxantes, segundo parâmetros como desgaste de válvula submersa, frenagem produzida através do atrito metal/molde e índice de rejeição dos produtos de lingotamento devido à presença de defeitos superficiais, como trincas transversais e longitudinais.

Com base nos resultados do estudo comparativo, pode-se concluir que:

- A média do diâmetro final das válvulas submersas nos 3 (três) veios, para o sequencial de 6 (seis) corridas, foi de 65 mm e 56,7 mm para o Fluxante A e B, respectivamente.
- O Fluxante B apresentou taxa de desgaste média de 2,2 mm/corrída, para 6 (seis) corridas, frente à taxa média de 0,8 mm/corrída do Fluxante A.
- Para o sequencial menor (5 corridas), a diferença do desgaste pode ser considerada desprezível, já que para ambos fluxantes o desgaste evidenciou-se de forma semelhante.
- Para aumento de sequenciamento, o Fluxante B não deve ser empregado. Os resultados mostraram que o ataque à válvula submersa foi mais intenso com a aplicação do Fluxante B.
- O teor de CaO de 18,5 e do SiO₂ de 26,6% em massa, do Fluxante B, possivelmente foram determinantes para a erosão do revestimento do refratário da válvula submersa, principalmente na linha de escória, causando a degradação do revestimento de ZrO₂.
- O teor de 5,5% em massa de flúor do Fluxante B, que representa 1,1% a mais em relação ao Fluxante A, pode ter amplificado o desgaste da válvula submersa durante a tentativa de aumento do sequenciamento.

- O Fluxante A apresentou os maiores módulos de frenagem (atrito) metal/molde, ou seja, menores condições de lubrificação, devido sua alta basicidade de 1,1.
- As corridas com aplicação dos Fluxantes A e B apresentaram índices de rejeição por defeitos superficiais de 1,49% e 0,79%, respectivamente. Representando uma redução de 47%.

6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar maior número de testes com os Fluxantes A e B, envolvendo outras qualidades de aço médio carbono, visando obter maior amostragem para reavaliação dos resultados.
- Testar nova versão do Fluxante B, com menor teor de flúor, visando aumento de sequenciamento e vida útil de válvula submersa.
- Estudar de forma aprofundada a interação metal/molde com os fluxantes apresentados, a partir de ferramentas matemáticas e termodinâmicas.
- Avaliar a possibilidade de incidência de outras espécies de defeitos sobre os tarugos produzidos a partir dos fluxantes apresentados.

7.0 REFERÊNCIAS

ADORNO, M. A. **Simulação de processo de solidificação na etapa de resfriamento primário do lingotamento contínuo de metais**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica: Unicamp, 1982.

ASSOCIATION, W. S. **World steel in figures 2014**. World Steel Association. <<http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/World-Steel-in-Figures-2014/document/World%20Steel%20in%20Figures%202014%20Final.pdf>> Acesso em 23 Set. 2014.

BARRAL, C. E. P. **Efeito de parâmetros geométricos e operacionais sobre o comportamento do pó fluxante no molde de lingotamento contínuo de placas**. Dissertação. PPGEM: UFMG, 2006.

BEZERRA, M. C. C. et al. **Avaliação da taxa de fusão de fluxantes para lingotamento contínuo de aços**. XXXVI Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais – Internacional, p.211-220, 2005.

BRIMACOMBE, J.K, SORIMACHI, K. **Crack formation in the continuous casting of steel**. Continuous Casting: Heat Flow, Solidification and Crack Formation. Warrendale: Iron and Steel Society, v.2, p.199-214, 1984.

CIRILLI, F. et al. **Corrosion mechanisms of zirconia/carbon based refractory materials by slag in presence of steel**. La Metallurgia Italiana. Outubro, 2008.

DELHALLE, A., LARRECQ, M., PETEGNIEF, J., RADOT, J.P. **La Revue de Métallurgie**. CIT, p.483-489, 1989.

DEVIC, S., MARCETA, L. **Erosion of submerged entry nozzles by casting powders**. American Ceramic Society Bulletin, v. 86, n.6. 2007.

DUARTE, G. D. **O controle da qualidade em processos de produção mecânica não-seriada**. Trabalho de Diplomação. Escola Politécnica USP. São Paulo, 2010.

EN-FA, W., YIN-DONG, Y., CHANG-LIN, F., SOMMERVILLE, I. D., MCLEAN, A. **Effect of carbon properties on melting behavior of mold fluxes for continuous casting of steels**. Journal of Iron and Steel Research, International, p.22-26, 2006.

FERNANDES, P. C. **Otimização dos parâmetros de lingotamento contínuo para minimizar a ocorrência de trincas superficiais no aço DIN-20MnCr5 Mod**. Dissertação. PPGEM: UFRGS, 2005.

FOOD INGREDIENTS BRASIL. **Canola. Uma variação genética mundialmente apreciada.** Revista Food Ingredients, n.21, 2012. <<http://www.revista-fi.com/materias/224.pdf>> Acesso em 26 Nov 2014.

GALLO, M. **Refratários para lingotamento contínuo.** Curso Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003.

GARCIA, A. et al. **Lingotamento contínuo de aços.** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Coleção Metalurgia e Materiais, v.1, 2006.

GONÇALVES, M. M .F., REIS, R. F., BELLIGOLI, G. C. D. **Desenvolvimento de sistema para medição da oscilação do molde de lingotamento contínuo nas aciarias da Usiminas.** 45º Seminário de Aciaria – Internacional, Brasil, Rio Grande do Sul, 2014.

KAWAMOTO, M. et al. **The melting rate of the molten powder for continuous casting.** Ironmaking and Steelmaking, p.65, 1995

KROMHOUT, J. A. **Mould powders for high speed continuous casting of steel.** Tese. Universidade Técnica de Delft, 2011.

MA, Y. et al. **Experimental research on effect of control model on lubrication for slab continuous casting mould.** Ironmaking and Steelmaking, p.164-168, 2008.

MEMARPOUR, A. **An experimental study of submerged entry nozzle (SEN) focusing on decarburization and clogging.** Tese. Royal Institute of Technology, Sweden, 2011.

MILLS, K. C. **The performance of casting powders and their effect on surface quality.** Steelmaking Conference Proceedings, p.121, 1991.

MILLS, K. C. **Curso fluxantes para lingotamento contínuo.** Brasil, Volta Redonda, 1995.

MILLS, K. C. **Mold powders for continuous casting.** The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, 2003.

MOURÃO, M. B. et al. **Introdução à siderurgia.** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Coleção Metalurgia e Materiais, v.2, 2007.

NIPPON STEEL CORPORATION. **Plant & Machine Division.** Catálogo, 1998.

OGIBAYASHI, S. et al. **Mold powder technology for continuous casting of low-carbon aluminum killed steels.** Nippon Steel Technical Report, p.1, 1987.

OLIVEIRA, L. J. S. **Comportamento dos aços peritéticos durante a solidificação no molde de lingotamento contínuo.** Dissertação. PPGEM: UFMG, 2009.

PEREIRA, R. O. S. **Modelamento matemático do escoamento turbulento da transferência de calor e da solidificação no distribuidor e na máquina de lingotamento contínuo.** Tese. PPGEM: UFMG, 2004.

PINHEIRO, C. A., SAMARASEKERA, I. V., BRIMACOMBE, J. K. **Mold flux for continuous casting of steel.** Iron and Steelmaker, XIV, p.54-56, 1995.

PINHEIRO, C. A., SAMARASEKERA, I. V., BRIMACOMBE, J. K. **Mold flux for continuous casting of steel.** Iron and Steelmaker, XV, p.43-44, 1995.

RHI Group. **Submerged entry nozzle. A World Market Leader in Refractories.** <http://www.rhiag.com/internet_en/products_solutions_en/steel_en/steel_agg_en/steel_agg_c_en/> Acesso em 5 Set. 2014.

RIHL, D. J. **Estudo da influência do tempo de estripamento negativo na formação das marcas de oscilação e seus impactos em defeitos superficiais.** Dissertação. PPGEM: UFRGS, 2012.

RIZZO, E. M. S. **Introdução aos processos siderúrgicos.** Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2005.

SATO, R. **Steelmaking proceedings.** Detroit, Michigan, v.62, p.48-67, 1979.

SEABRA, A.V., SALTA, M.M.R. **Inclusões não-metálicas em aços e ferros fundidos.** Lisboa, 1982.

SCHREWE, H. F. **Historical developments of continuous steel casting.** Continuous casting of steel: fundamental principles and practice. Düsseldorf, Stahleisen, p.1-9, 1987.

SILVA, D. R. **Análise termodinâmica da formação de Al_2O_3 durante o lingotamento contínuo através da interação química entre pós fluxantes sem flúor e uma liga de Fe líquido saturada com alumínio e oxigênio.** Dissertação. PPGEM: UFRGS, 2010.

SILVA, V. H. N. **Análise da influência da mudança de configuração do molde sobre a qualidade do tarugo em lingotamento contínuo de aços.** Dissertação. PPGEM: UFRGS, 2012.

SOARES, R. B. **Fluxantes para molde em lingotamento contínuo.** Dissertação. PPGEM: UFRGS, 1998.

SZEKERES, E. S. **Mould friction in continuous casting.** Brimacombe Continuous Casting Course, 2011.

THOMAS, B. G. **Continuous casting of billets, blooms and slabs.** The Centre for Metallurgical Process Engineering, The University of British Columbia, v.1, 1993.

THOMAS, B. G. **Basics aspects of mould.** Brimacombe Continuous Casting Course, 2011.

TOZATO ENGENHARIA. **Sistema de monitoração da oscilação do molde.** Manual de funcionamento. TE-SIMOM ONLINE, v. 1.0.3.0. Brasil, 2013.

TURKDOGAN, E. T. **Fundamentals of steelmaking.** The Institute of Materials, United Kingdom, 1996.

VIEIRA, F. B. **Desenvolvimento de uma metodologia para seleção de pó fluxante para o lingotamento placas de aços com comportamento peritético.** Dissertação. PPGEM: UFGM, 2002.

WOLF, M. M. **Mold oscillation guidelines.** Steelmaking Conference Proceedings, p.51-71, 1991.

YIN, H. B. YAO, M. **Analysis of nonuniform slag film, mold friction, and the new cracking criterion for round billet continuous casting.** Metallurgical and Materials Transaction B, p.857-864, 2005.

YINGNAKORNA, T., KHUMKOOA, S. **Corrosion behavior of submerged entry nozzle (SEN) during continuous casting of steel.** International Conference on Multidisciplinary Innovation for Sustainability and Growth. Malaysia, 2014.