

FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMILA ALVES DE SOUZA ESTEVÃO

GABRIEL COELHO

ISABELLA RODRIGUES RIDEO SUZUKI

ESTUDO TEÓRICO DA INFLUÊNCIA DO FLUXANTE NO
LINGOTAMENTO CONTÍNUO

VOLTA REDONDA

2020

CAMILA ALVES DE SOUZA ESTEVÃO

GABRIEL COELHO

ISABELLA RODRIGUES RIDEO SUZUKI

**ESTUDO TEÓRICO DA INFLUÊNCIA DO FLUXANTE NO
LINGOTAMENTO CONTÍNUO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Alvarenga
Palmeira

VOLTA REDONDA

2020

FOLHA DE APROVAÇÃO

Alunos:

Camila Alves de Souza Estevão

Gabriel Coelho

Isabella Rodrigues Rideo Suzuki

ESTUDO TEÓRICO DA INFLUÊNCIA DO FLUXANTE NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO

Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Banca Examinadora

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Prof. Ms. Rui Aurélio Barbosa

DEDICATÓRIA

Em primeiro lugar, dedicamos esse trabalho a DEUS, por nos proporcionar a realização desse sonho.

Dedicamos ainda aos nossos pais, pelo apoio e a todos os professores e amigos que acreditaram em nós.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus pelo dom da vida e por nos capacitar para alcançar esse objetivo da graduação em engenharia mecânica.

Agradecemos também aos nossos familiares, pelo incentivo, confiança, apoio e investimentos aplicados a nós.

Aos professores pela paciência e pelos conhecimentos passados a nós.

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido a partir de um estudo teórico a fim de demonstrar a influência dos fluxantes no lingotamento contínuo de placas. O procedimento consiste em um processo siderúrgico onde o metal líquido é transformado em placas sólidas, ocorrendo um deslizamento entre a interface da placa e o molde. Este fato deve-se a resistência ao escoamento chamada de fricção que pode promover danos e defeitos nas superfícies. Entretanto podem ser controladas com a adição de um lubrificante entre as zonas de contato. Os fluxantes consistem em uma mistura de minerais que, quando entram em contato com o aço líquido reagem de certa forma que ao se fundir geram uma escória líquida com características particulares para cada condição de lingotamento. Nesta mistura ocorre uma aglomeração de seleção e embalagem granulométrica da mesma influenciando no resultado final, as placas de lingotes. Eles podem ser fornecidos em três diferentes tipos, sendo eles em forma de pó, granulado compacto ou granulado esférico. Materiais que apresentam em sua composição química granulados compactos ou esféricos foram adotados para fornecer melhor qualidade e controle ambiental, porém quando relacionados a requisitos de custo, isolamento térmico, flexibilidade no molde e homogeneidade química os pós apresentam melhor aproveitamento.

Palavras-chave: Lingotamento Contínuo, Fluxante e Minerais.

ABSTRACT

This work was developed from a theoretical study in order to demonstrate the influence of fluxants on the continuous casting of plaques. The procedure consists of a steel process where the liquid metal is transformed into solid plates, occurring a slip between the interface of the plate and the mold. This fact is due to the resistance to the flow called friction that can promote damage and defects on the surfaces. However, they can be controlled by adding a lubricant between the contact zones. Fluxants consist of a mixture of minerals that, when they come into contact with liquid steel react in a certain way that when merging generate a slag characteristics for each casting condition. In this mixture there is a agglomeration of selection and granulometric packaging influence on the final result, the lingot plates. They can be supplied in three different types, being them powder-shaped compact granules or spherical granules. Materials presenting in their chemical composition compact or spherical granulated were adopted to provide better quality and environmental control, but when related to cost requirements, thermal insulation, mold flexibility and chemical homogeneity the powders have better utilization.

Palavras-chave: Continuous Casting, Fluxant and Minerals.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. Situação Analisada.....	19
1.2. Objetivo	20
1.2.1. Objetivo geral	20
1.2.2. Objetivos específicos	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1. Histórico	21
2.2. Descrição do processo	21
2.3. Descrição da máquina	23
2.3.1. Distribuidor.....	25
2.3.2. Válvula submersa	26
2.3.3. Molde.....	28
2.3.4. Lubrificação do molde.....	30
2.4. Conceitos básicos de solidificação	30
2.5. Fluxantes para lingotamento contínuo.....	36
2.5.1. Origem.....	36
2.5.2. Fabricação dos fluxantes.....	41
2.5.3. Funções dos fluxantes	43
2.6. Composição química.....	53
2.7. Parâmetros de desempenho do fluxante do molde	54
2.7.1. Infiltração de escória líquida – consumo específico.....	54
2.7.2. Temperatura de fusão e cristalização	55
2.7.3. Consumo de fluxante	55
2.8. Constituição mineralógica	57
2.9. Interações químicas entre o aço e os fluxantes	58
2.10. Temperatura de solidificação.....	59
2.11. Efeitos dos parâmetros na geração de defeitos superficiais	59

2.11.1. Defeitos superficiais e substanciais.....	60
3. METODOLOGIA.....	63
3.1. Desenvolvimento	63
4. RESULTADO E DISCUSSÕES.....	68
4.1. Informações Iniciais.....	68
4.1.1. Viscosidade	70
4.1.2. Taxa de fusão.....	73
4.1.3. Velocidade de lingotamento.....	78
4.1.4. Transferência de calor	81
4.1.5. Desgaste da válvula submersa	85
4.1.6. Atrito molde x metal.....	86
4.1.7. Defeitos superficiais do produto	88
5. CONCLUSÃO.....	93
6. REFERÊNCIAS.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Corte longitudinal da máquina de lingotamento contínuo com panela de aço na torre giratória.	19
Figura 2: Representação dos produtos do processo de lingotamento contínuo de aços.....	22
Figura 3: Diferenças entre o comprimento de contenção e metalúrgico.	24
Figura 4: Moldes de lingotamento contínuo.....	25
Figura 5: Vista em corte de um distribuidor.....	26
Figura 6: Representação de um tipo de válvula submersa utilizada no lingotamento contínuo.....	27
Figura 7: Mecanismos de captação da escória.	28
Figura 8: Perfil de temperatura da casca solidificada de aço em um equipamento de lingotamento contínuo.	29
Figura 9: Morfologia da interface em função do resfriamento.	32
Figura 10: Crescimento de grãos colunares com orientação favorável à extração de calor.	33
Figura 11: Distribuição dos grãos equiaxiais produzidos no lingotamento de aços contínuo.....	34
Figura 12: Fenômeno da agitação eletromagnética e superaquecimento do aço no distribuidor.....	35
Figura 13: Gráfico volume X Temperatura(a) comparando vidro, cristal e líquido; (b)Vidros formados a diferentes taxas de resfriamento $R_1 < R_2 < R_3$	38
Figura 14: Estrutura de SiO ₂ , mostrando características 3-D. Tetraedro de SiO ₂ e (b) Diferenças de bridging e non-bridging oxygen com formador e modificador de rede.	40
Figura 15: Esquema representativo da estrutura de vidro de silicato de sódio.	40
Figura 16: Barbotina.....	42

Figura 17: Mostrando um esquema de fabricação da suspensão para a granulação via Spray Dryer na Carbox, do abastecimento dos silos até a transferência de carga através da bomba pistão.	43
Figura 18: Principais funções do pó fluxante no lingotamento contínuo.....	44
Figura 19: Ilustração esquemática mostrando o efeito do escoamento do aço líquido no escoamento do pó fluxante.	44
Figura 20: Representação do isolamento térmico pelo fluxante.....	46
Figura 21: Prevenção da reoxidação do banho.....	47
Figura 22: Fricção entre o veio, lubrificante e o molde do lingotamento contínuo....	49
Figura 23: Absorção das inclusões pelo fluxante.	50
Figura 24: Cinética da dissolução de alumina em função da basicidade.	50
Figura 25: Material base para confecção de pós fluxantes.	51
Figura 26: Controle da taxa de transferência de calor.....	52
Figura 27: Superfícies Líquidas no ternário SiO ₂ – CaO – Al ₂ O ₃	54
Figura 28: Relação da velocidade de lingotamento e consumo de fluxante.....	56
Figura 29: Relação da viscosidade e consumo de fluxantes.....	57
Figura 30: Representação da carcaça da placa de aço aos o rompimento.....	59
Figura 31: Perfil de solidificação das faces estreitas do molde.	60
Figura 32: Tipos de trincas produzidas no lingotamento contínuo.	61
Figura 33: Fluxograma do processo de desenvolvimento do projeto.	63
Figura 34: Influência da velocidade de fundição e o consumo do pó fluxante.....	65
Figura 35: Válvula submersa após contato com o fluxante	66
Figura 36: Superfície do tarugo com trinca transversal de canto.	66
Figura 37: Diagrama esquemático do aparelho que foi elaborado por Kawamoto et al (1994).....	74
Figura 38: Desenho esquemático mostrando o teste de gotejamento.	75

Figura 39: Diagrama esquemático de glóbulos das matérias-primas do fluxante separados por partículas de carbono.	76
Figura 40: Diagrama esquemático do equipamento utilizado.....	77
Figura 41: Método dos três arames utilizado para caracterizar as camadas do fluxante sobre o aço líquido.	77
Figura 42: Características da faixa de temperatura da solidificação e da viscosidade para aços acalmados a alumínio com velocidades de 1,0 a 1,7 m/min.....	78
Figura 43: Imagens de microscópio eletrônico de varredura de inclusões de alumina.	82
Figura 44: Destaque da região em que houve o contato direto com os fluxantes A e B, após testes durante o lingotamento o aço SAE 1046 Mod.	86
Figura 45: Parâmetros que afetam a força de atrito entre a parede do molde e o veio.	87
Figura 46: Mecanismos de formação de depressão longitudinal e trincas, em razão de colamento do veio sobre a parede do molde.....	88
Figura 47: Mecanismo de carburação do aço pelo carbono do pó fluxante.	89
Figura 48: Tendência de depressão ou agarramento do veio sobre a parede do molde em função o potencial ferrítico do aço.....	89
Figura 49: Efeito do fluxo horizontal de calor e da categoria do aço sobre o índice de formação de trincas longitudinais no veio.	90
Figura 50: Superfície do tarugo com trinca longitudinal de canto.....	91
Figura 51: Superfície do tarugo com trinca transversal de canto	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação das propriedades dos parâmetros de controle.	36
Tabela 2: Diferenças entre os elementos formadores, modificadores e intermediários.	39
Tabela 3: Parâmetros de comparação dos tipos estruturais de fluxantes.	42
Tabela 4: Teores dos componentes presentes na composição química dos pós fluxantes comerciais.....	53
Tabela 5: Composição dos elementos adicionados ao pó.....	64
Tabela 6: Classificação química dos tipos de inclusões que estão presentes em aços.	69
Tabela 7: Efeito da composição química do pó fluxante na sua viscosidade.	70
Tabela 8: Efeito dos componentes químicos.	71
Tabela 9: Desenho esquemático mostrando alguns testes utilizados para avaliação da taxa de fusão de escórias.....	74
Tabela 10: Propriedades físicas da alumina	81
Tabela 11: Composição química dos aços do grupo II (Aço peritético).	83
Tabela 12: Composição química dos aços do grupo III (aço ultra baixo carbono)....	83

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Força de fricção.....	48
Equação 2: Consumo específico para quantidade de fluxante em Kg/m ²	55
Equação 3: Consumo específico para quantidade de fluxante em Kg/t	55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Gráfico entalpia x temperatura comparando cristal e vidro.....	39
Gráfico 2: Gráfico da análise de fluxo de calor.....	47
Gráfico 3: Curvas de análise térmicas para os fluxantes A, D, E e F.....	79
Gráfico 4: Efeito da velocidade de lingotamento e da amplitude de oscilação sobre o consumo específico de fluxante.	80
Gráfico 5: Consumo específico de pó em função de velocidade de lingotamento. ..	80
Gráfico 6: Variação da viscosidade como inverso da temperatura para três pós fluxantes contendo B ₂ O ₃	84
Gráfico 7: Fluxo de calor versus <i>T_{break}</i>	85
Gráfico 8: Índice de rejeição por defeitos superficiais dos produtos de lingotamento contínuo em função dos fluxantes estudados.	92

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Al – Alumínio	Mn – Manganês
Al ₂ O ₃ – Alumina	MnO – Óxido de Manganês
BaO – Óxido de Bário	MgO – Óxido de Magnésio
B ₂ O ₃ – Óxido de Boro	NaAlF ₃ – Criolita
C – Carbono	Na ₂ CO ₃ – Carbonato de Sódio
Ca ₄ Si ₂ O ₇ F ₂ – Cuspidina	Na ₂ O – Óxido de Sódio
CaAl ₂ Si ₂ O ₇ – Gelenita	Na ₃ AlF ₆ – Hexafluoraluminato de Sódio
CaAl ₂ Si ₂ O ₈ – Anortita	NaCO ₃ – Carbonato de Sódio
CaCO ₃ – Calcita	NaF – Fluoreto de Sódio
CaF ₂ – Fluorita	NBOT/T – <i>Non-Briding Origen</i>
CaO – Cal	Nc – Número de Coordenação
CaO.SiO ₂ – <i>Wollastonita</i>	O ₂ – Oxigênio
CaSiO ₃ – <i>Wollastonita</i>	SEN – Válvula submersa
3CaO. 2SiO ₂ .CaF ₂ – Cuspidina	Si – Silício
Di – Camada Líquida	SiO ₂ – Sílica
F – Flúor	SiO ₄ – Ortosilicato
FeO – Óxido Ferroso	T _{break} – Temperatura de solidificação
K ₂ CO ₃ – Carbonato de Potássio	Tg – Intervalo de Transição Vítrea
K ₂ O – Óxido de Potássio	Ti – Titânio
LiO ₂ – Superóxido de Lítio	TiO ₂ – Rutilo
MEA – Massa específica aparente	Vc – Velocidade de lingotamento
Mg – Magnésio	Vm – Estripamento negativo
MgCO ₃ – Magnesita	

1. INTRODUÇÃO

A siderurgia é considerada como o ramo dedicado desde à fabricação, até o tratamento de aços e ferros fundidos. Estes tratamentos resultam na obtenção de bobinas, que são fabricadas para usinas de chaparia de carros, eletrodomésticos e embalagens de produtos alimentícios, através do processo de lingotamento contínuo.

Designa-se este o processo cujo acontece a solidificação do metal em um produto semiacabado no formato de uma placa sólida, ou tarugo. No Brasil, teve início em 1960 pela empresa Riograndense. Porém teve a primeira produção em 1976 pela Usiminas, com a instalação de uma linha de produção de 02 (duas) máquinas de lingotamento contínuo de 02 (dois) veios cada uma.

Assim que o aço, vazado dos fornos da aciaria, ele é transportado para as máquinas de lingotamento contínuo, onde acontece a produção do aço solidificado em larga escala industrial. O processo de solidificação do material acontece nas paredes do molde (equipamento industrial responsável pela transformação do aço líquido em sólido).

No início desta modificação é formada uma “casca” de metal solidificado, graças a adição de lubrificantes, que por sua vez estão ligados diretamente a estrutura de nucleação das substâncias. Estes lubrificantes são conhecidos como pó fluxante e inicialmente foram originados da utilização de resíduos da queima de hulha em termoelétricas. Localizada na região de *Ruhr*, na Alemanha em meado no ano de 1960, ele começou a ser utilizado como cobertura de aço em painéis e lingoteiras, visto que neste território encontravam-se os principais carboníferos e parques industriais de siderurgia do mundo. Logo após serem utilizados como isolantes, foram feitas tentativas de ajuste de ponto de fusão das cinzas para que desta forma as irregularidades e aspectos apresentados pela escória fossem amenizados. Considerando que, a presença do carbono como adicional em sua composição química, determinava a velocidade com que o pó fundia e transformava em escória líquida. A partir de 1975, foram apresentados trabalhos e pesquisas em congressos de metalurgia sobre o comportamento dos fluxantes no processo de lingotamento contínuo, através de minuciosos trabalhos e verificação de características operacionais de fusão dos pós, induzindo no mecanismo de funcionamento das reações químicas.

O pó quando adicionado sobre a área do molde juntamente com o aço líquido em altas temperaturas, inicia-se o estágio de fusão e solidificação da escória. A reação do lubrificante com a elevada temperatura, tem início com a composição de aglomerados dos grãos e da aderência do material fundido, forma-se então uma camada líquida que auxiliará como um reservatório que ficará sobreposto no intervalo que existe entre a placa e o molde.

Durante o processo de solidificação, ocorre a contração do aço. Este fenômeno é responsável pelo afastamento (*gap*) entre a camada já solidificada e a superfície do equipamento, ocasionando em uma resistência na transferência de calor. Por outro lado, o mecanismo do oscilador assume funções junto a este mesmo processo formado na contração do aço. Ao adentrar na região do *gap*, nesta hora o fluxante fundido tende a formar uma camada de filme vítreo, cristalino e líquido, devido a altas temperaturas da casca solidificada.

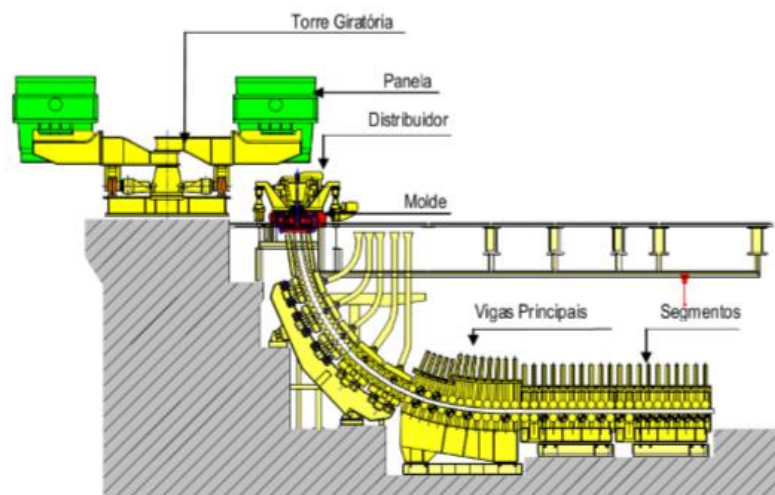


Figura 1: Corte longitudinal da máquina de lingotamento contínuo com placa de aço na torre giratória.

Fonte: Adaptado de (ASHBURN et al., 1999).

1.1. Situação Analisada

Com o aumento das diversas fabricações de aços e suas aplicações, exige-se uma agilidade nos processos de fabricação. Quando pensamos no lingotamento contínuo de aços, a aplicação e o avanço dos fluxantes, que também são conhecidos como escórias sintéticas, têm se destacado dentro das indústrias siderúrgicas, segundo Sales (2017).

Os fluxantes têm diferenças em relação às matérias primas, fonte de CaO, conservando suas similares composições químicas. Serão analisadas as influências dos mesmos no aço.

1.2. Objetivo

1.2.1. Objetivo geral

Realizar um estudo teórico sobre a influência do fluxante no lingotamento contínuo comparando os tipos de lubrificantes utilizados e os tipos de aço originados da adição dele no processo industrial.

1.2.2. Objetivos específicos

O objetivo do trabalho é realizar o estudo teórico sobre os diferentes tipos de lubrificantes no lingotamento contínuo considerando sua composição química e suas propriedades metalúrgicas e mecânicas em função de seus efeitos no lingotamento contínuo.

As principais atribuições do fluxante são:

- Isolante térmico;
- Proteção química da superfície do aço (prevenindo a reoxidação);
- Lubrificante na interface que existe entre a placa de aço solidificada e o molde;
- Controle da taxa de transferência de calor entre a placa de aço em solidificação com o molde;
- Absorção de inclusões não metálicas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Histórico

O início do trabalho a respeito do lingotamento contínuo aconteceu em meados de 1886, patenteado por *Henry Bessemer* e tinha relação com a fabricação de folhas contínuas de ferro e aço. O primeiro projeto constituído em 1887, consistia em um molde refrigerado a água, com aberturas nas partes superiores e inferiores, sendo alimentado por um jato de metal líquido, mecanismos para realização do corte do produto, barra falsa, refrigeração secundária e rolos extratores. Em 1933, tornou-se realidade, através de *Siegfried Junghans*, o sistema de oscilação do molde, que possui como variáveis o curso e a frequência de oscilação.

No Brasil, o equipamento de lingotamento contínuo foi instalado em 1960, pela antiga Gerdau, tratava-se de uma máquina de dois tarugos de dois veios. Em seguida o lingotamento contínuo começou a ser empregado em diversas empresas, entre elas a Companhia Siderúrgica Nacional.

2.2. Descrição do processo

O lingotamento contínuo de aços é um processo que consiste em transformar o metal líquido fundido em produtos sólidos semiacabados, no geral os produtos podem ser:

Blocos: podem ter 150mm de aresta, em relação a largura e espessura <2 ;

Tarugos: Possuem seções quadradas de no mínimo 75 x 75mm ou seções redondas;

Beam blank: pré-formato para vigas e perfis;

Placas: com espessuras no intervalo de 200 a 400 mm, largas de 600 a 4000mm, as placas finas possuem espessuras na faixa de 30 a 150mm. Relação a largura e espessura >2 ;

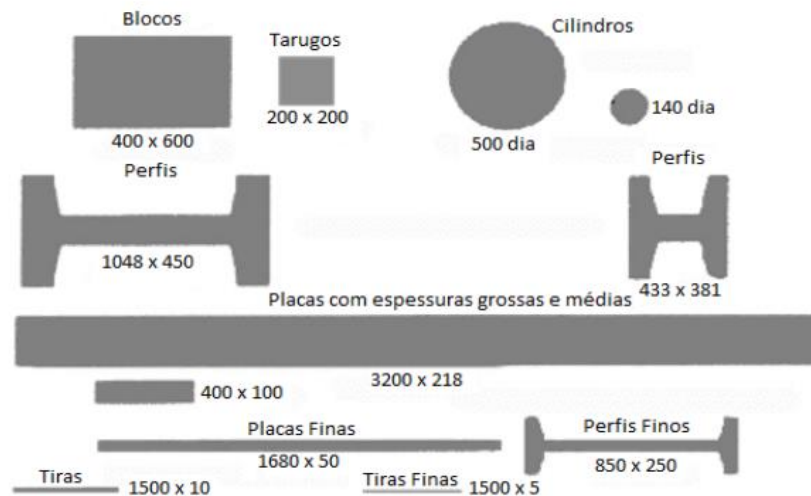


Figura 2: Representação dos produtos do processo de lingotamento contínuo de aço.

Fonte: Adaptado de UFES, 2014.

No processo de lingotamento contínuo, a panela que contém metal líquido é posicionada através da torre giratória e o metal líquido é vazado da panela para o distribuidor com a ajuda do tubo longo. A finalidade do distribuidor é regular o fluxo de aço líquido para o molde. Quando o aço líquido atinge uma certa altura no distribuidor, o controle do fluxo é aberto e se dá início ao enchimento do molde através de um tubo refratário, chamada válvula submersa.

Se inicia o processo através da barra falsa, que em contato com o aço líquido, ele se solidifica rapidamente, então é realizada a extração a uma taxa crescente até um estado estacionário de velocidade, que é definido em função da qualidade e produtividade planejados. O fluxante é utilizado na técnica de que se chama jato protegido, que se trata de quando o aço é transferido do distribuidor para o molde por meio da válvula submersa (SEN). Nos processos que utilizam o jato aberto, sem a válvula submersa, não deve ser aplicado, pois o aço em queda livre arrastaria o fluxante, provocando inclusões no aço e uma lubrificação prejudicada.

No início do resfriamento primário do aço, acontece no molde refrigerado a água. No menisco, que se trata da superfície curva que se modela na extremidade superior da coluna de líquido compreendida em um tubo, é intensa a extração de calor, por isso, o aço inicia sua solidificação criando uma pele que se constitui de fora para dentro, necessária para sustentar a pressão ferrostática do líquido e as invocações

mecânicas externas. Ocorre a oscilação constante do molde com pré definidos a frequência e a amplitude. A movimentação do molde consiste no estripamento negativo, que significa quando a velocidade média no molde é maior que a da extração da placa. O movimento de estripamento positivo, que ocorre em seguida é em sentido contrário.

A etapa mais crítica é quando ocorre o início da solidificação do aço, porque são maiores os riscos de ocorrer situações indesejadas, como por exemplo o rompimento do veio, que se trata do rompimento da pele solidificada, fazendo com que o aço líquido vaze no molde. Quando o rompimento do veio ocorre, é obrigatória a parada do mesmo e o processo só reinicia quando o aço solidificado é retirado.

Quando a placa se afasta do molde, o veio é conduzido por rolos e o resfriamento é realizado através de água de uma série de sprays e através de radiação térmica, esse processo é denominado de resfriamento secundário. O padrão esperado é que a superfície seja resfriada continuamente e tenha a temperatura constante na transversal do veio. Essa etapa é dividida em diversas seções para controle da extração do calor.

2.3. Descrição da máquina

O equipamento de lingotamento contínuo de aços deve ser utilizado e adaptado para cada necessidade industrial. Para tal, são feitas análises das variáveis do forno, a qualidade do aço a ser fabricado, as características do processo e os equipamentos de produção. A figura 3, mostra o chamado comprimento metalúrgico, que é a distância ao longo da linha central da placa entre o menisco, onde se dá início a solidificação do aço, até a seção em que a solidificação é completa.

Na parte central do veio a pressão exercida pelo aço líquido, aumenta cerca de 0,71atm/m no sentido vertical. Se faz necessário o comprimento de limitação, para que seja decrescido o abaulamento da pele em solidificação do aço na saída do molde, mostrado em P na figura 4. Esse abaulamento com o auxílio de rolos situados na saída do molde é minimizado.

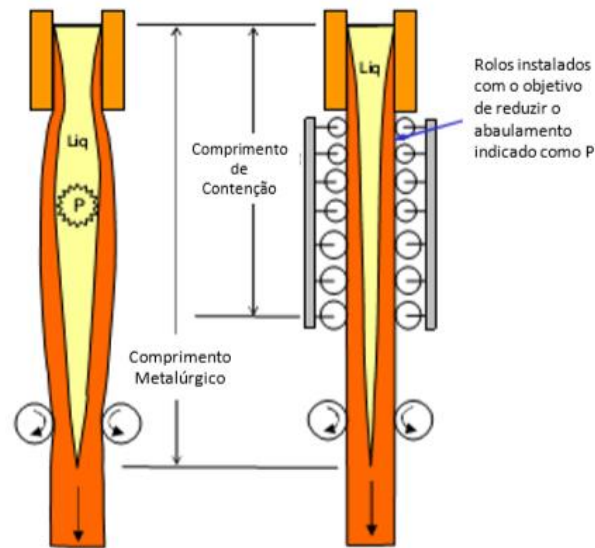


Figura 3: Diferenças entre o comprimento de contenção e metalúrgico.

Fonte: Adaptado de (BRIMACOMBRE, 2012).

A determinação do comprimento da contenção é realizada pelo comprimento metalúrgico e também pela proporção e tamanho do veio. No lingotamento contínuo de tarugos, não há necessidade da restrição na saída do molde, quando o molde apresenta seção horizontal associação de 1/1, figura 4. No caso do lingotamento contínuo de blocos, o comprimento de restrição necessário é menor do que o metalúrgico, quando a relação é de 2/1. No lingotamento contínuo de placas, quando a relação excede 2,5/1, os comprimentos de contenção e metalúrgicos são iguais. O comprimento de contenção necessita também da velocidade de lingotamento, espessura da seção do veio e da qualidade do aço.

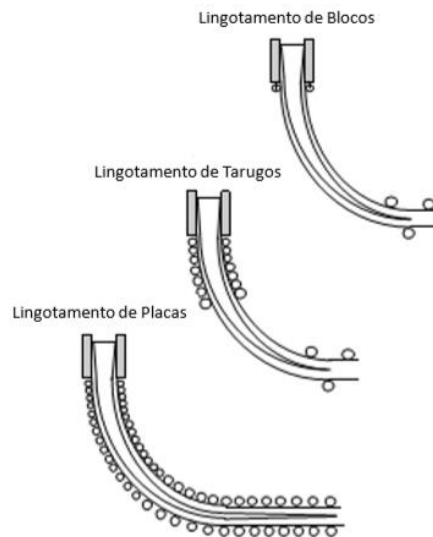


Figura 4: Moldes de lingotamento contínuo.

Fonte: Adaptado de (BRIMACOMBE, 2012).

A principal diferença nas configurações das máquinas de lingotamento contínuo está na altura dela, e pode estar relativo ao acontecimento de defeitos no produto final. Quanto menor for a altura, menor será o impacto e geração de trincas internas, porém as inclusões não metálicas devem crescer por conta da dificuldade de eliminação por flotação. Algumas diferenças que são significativas estão na deformidade do encurvamento e desencurvamento, e está referente à geração de trincas e de abaulamento nas placas, deformidade da camada superficial solidificada, etc.

2.3.1. Distribuidor

O distribuidor se posiciona entre a panela e a região do molde. Sua principal função é de distribuir o aço ainda na fase líquida para os moldes, localizado abaixo dos veios. Os veios são canais de saída do distribuidor, para o abastecimento de cada molde, a figura 5 ilustra um distribuidor.

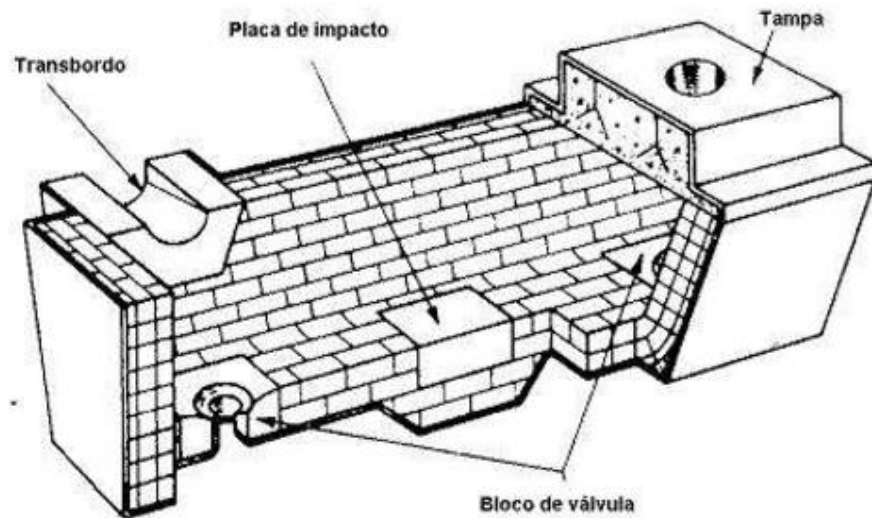


Figura 5: Vista em corte de um distribuidor.

Fonte: Tópicos em lingotamento contínuo, 2020.

Esse equipamento é de suma importância dentro do processo de lingotamento, pois afeta diretamente na qualidade e desempenho dos produtos finais. Visando a manutenção da temperatura, o distribuidor deve possuir o interno de refratário, mantendo a temperatura o mais constante possível durante a preparação do aço.

Dentro do distribuidor ocorre a separação das inclusões não metálicas e o controle da reoxidação, além do distribuidor também trabalhar na limpeza do aço, segundo Garcia et al., 2006. Com isso ganha-se com o aumento da qualidade do produto finalizado, devido a limpidez incursionaria.

2.3.2. Válvula submersa

As propriedades requeridas para uma boa válvula submersa são resistir ao desgaste, entupimentos, choques térmicos, ter um padrão bom de escoamento na cavidade do molde, ser economicamente razoável e possuir baixa porosidade, segundo Thomas (1993). As válvulas mais utilizadas no lingotamento contínuo, são as demonstradas na figura, “bifurcada” e “multiportas”.



Figura 6: Representação de um tipo de válvula submersa utilizada no lingotamento contínuo.

Fonte: Adaptado de RHI, 2014.

As válvulas submersas devem possuir as seguintes características em função das solicitações presentes, segundo Gallo (2003).

- A obstrução da válvula com óxidos e aço deve ser mínima;
- Não pode haver fluxo de aço irregular por deformações;
- Deve mostrar resistência ao choque térmico, à erosão e corrosão, alto ponto de fusão e pouca aderência de alumina;
- O formato do tubo deve ser originado de um modelo de fluxo de aço que auxilia na flotação das inclusões, impedindo a lavagem da camada solidificada, o envolvimento do fluxante;

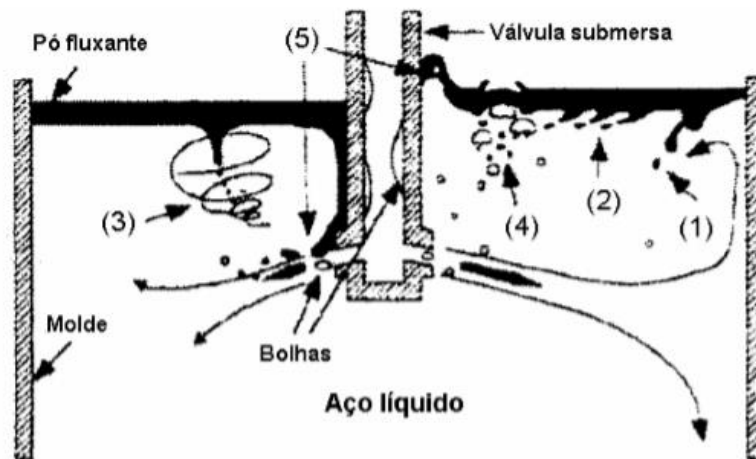


Figura 7: Mecanismos de captura da escória.

Fonte: Zhang et al., (2003).

2.3.3. Molde

O molde é considerado o elemento principal da máquina de lingotamento contínuo, por se tratar de um equipamento onde é efetuada a extração de calor e a geração da casca sólida. Essa casca irá envolver o metal líquido no período da refrigeração por jatos d'água até a inteira solidificação do meio.

A figura 8 indica esquematicamente isotermais da camada superficial solidificada na máquina de lingotamento contínuo. Pode-se perceber que a solidificação do metal ocorre na maior parte fora do molde.

É de suma importância o escoamento do aço líquido no molde para a criação da pele solidificada. O perfil da válvula submersa pode favorecer ou prejudicar esse processo. Existe um equipamento capaz de mudar de forma significativa o escoamento no interno do molde e hoje em dia tem sido utilizado em algumas empresas, se chama equipamento de freio eletromagnético do jato. A figura 8 demonstra o funcionamento desse equipamento. A força eletromagnética que esse equipamento exerce pelas bobinas, é capaz de fornecer a flotação de inclusões e diminuir o jato que é direcionado às paredes do molde, de forma a manter a interface metal e fluxante com menos turbulência. Porém esse equipamento tem um custo muito alto, fazendo com que tenha um estudo para alternativas mais econômicas e favoráveis.

Um dos fenômenos pertinentes que podem no molde é a captação de partículas do lubrificante. Há alguns meios importantes para a captação de escória, segundo *Zhang et al* (2004) e são demonstrados na figura 8.

Esses meios estão associados a:

- A agitação e nível de flutuação do menisco. As partículas de escória podem ser captadas se o jato da válvula submersa gerar um nível alto de flutuação junto ao menisco.
- Alteração periódica do nível de aço no molde, submetida pelo escoamento não estacionário, provocado pelos problemas de alteração de vazão do aço líquido, originário da válvula submersa;
- Vórtice criado através da assimetria no molde;
- Emulsificação na área de interação metal/escória, provocada por rupturas de bolhas flotando para essa interface;
- Sucção provocada pelo jato da válvula submersa. Há a captação da escória através da baixa pressão na ponta de saída da válvula submersa e se acaso atingir o jato, podem haver sérios problemas de incisão de escória.
- Incidência do jato na área de contato metal/escória, provocado pela excessiva injeção de gás (quando esse procedimento é adotado).

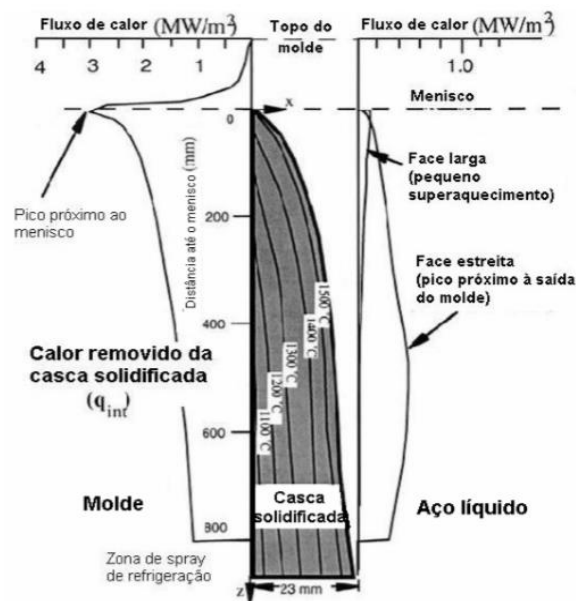


Figura 8: Perfil de temperatura da casca solidificada de aço em um equipamento de lingotamento contínuo.

Fonte: Tomas (2003).

Nesta etapa os equipamentos operacionais envolvidos são:

- a) Rolo condutor: rolo de carcaça de cobre, revestido de cromo. É o primeiro de vários rolos condutores de corrente elétrica que atuam no estanhamento;
- b) Rolo secador: rolo de Neoprene, liso e adaptado com pressão pneumática. Possui a função de impedir que a solução pré-tratamento passe entre a tira e o rolo condutor, gerando recusa de material;
- c) Rolo submerso: rolo de borracha, cuja função é transportar a tira dentro do tanque;
- d) Tanque de processo: possui uma solução levemente ácida em constante circulação, que umedece e dá fluxo na tira adequando-a ao estanhamento eletrolítico;
- e) Tanque de circulação: seu objetivo é garantir a circulação entre ele próprio e o tanque de pré-tratamento, além de aquecer, homogeneizar a solução e decantar resíduos.

2.3.4. Lubrificação do molde

Como já mencionado, em processo de lingotamento contínuo, deve-se utilizar um lubrificante para evitar o atrito da pele do aço em contato com as paredes do molde. Em lingotamentos contínuos com vazamento com jato aberto, o lubrificante mais utilizado é o óleo lubrificante. Para a situação em que se utiliza a válvula submersa para o vazamento, a lubrificação é realizada pelo uso de pós ao molde.

Os fluxantes são escórias sintéticas aplicadas na lubrificação de moldes no lingotamento contínuo, quando o vazamento de metal líquido é realizado pela válvula submersa. Eles foram desenvolvidos através de pós sintéticos usados como antiaderentes no lingotamento estático convencional, para completar a necessidade de desenvolver novos aços.

2.4. Conceitos básicos de solidificação

A solidificação consiste em a transformação de um material do estado líquido para seu estado sólido. Quando falamos em configuração básica do lingotamento contínuo, a solidificação que acontece nas paredes do molde, sentido contrário, ou

seja, o resfriamento que ocorre da superfície externa para a superfície interna pode gerar defeitos em funções da molhabilidade do aço líquido sobre o molde sólido. No início desta transformação de fase, forma-se uma “casca” durante o processo de resfriamento do mesmo, onde na parede do molde a temperatura e velocidade são extremamente importantes nesta etapa permitindo a formação desta camada por meio da adição de lubrificantes proporcionando um aspecto natural e evitando com que esta placa não se oxide ou fracture durante o processo.

No estágio em que ocorre esta transformação de fase, é possível identificar duas etapas sucessivas de nucleação e crescimento de uma nova fase. Entretanto o crescimento é o qual o modo destes núcleos cresce sob a forma de cristais ou grãos cristalinos. O caso em que a fase sólida nucleia na fase líquida sem se quer que tenha uma interferência ou agentes estranhos em sua microestrutura é chamada de nucleação homogênea, enquanto isso quando é identificado agentes estranhos em meio a adição de contribuição energética como impurezas ou inoculantes é conhecida como nucleação heterogênea.

Nestas circunstâncias é explícito que para haver o processo de solidificação é necessária a presença de um núcleo, estudos realizados em laboratórios mostram que o líquido pode resistir a um resfriamento de até 20% sem apresentar qualquer nucleação considerável.

Porém na prática, pode-se observar que a fase sólida pode ser nucleada com muita facilidade em líquidos super resfriados não mais que 2% de sua real temperatura de solidificação. Consequentemente este processo térmico sempre se inicializará por uma nucleação heterogênea.

Uma grande questão para poder definir a qualidade do produto é a sua estrutura em condição do lingotamento. O controle e identificação da formação da estrutura são peças chaves para que ocorra a melhoria deles. A partir da microestrutura caracterizada é possível a determinação pela morfologia da interface sólido/líquido podendo ter as suas formas planas, celular ou dendrítica como é mostrada na figura 9:

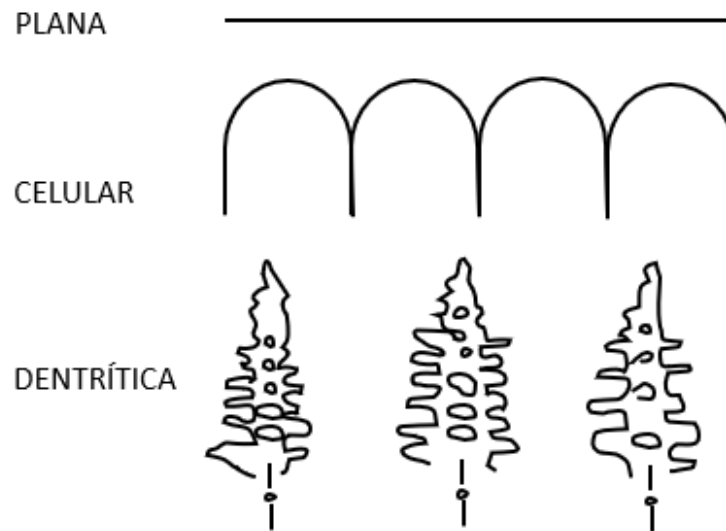


Figura 9: Morfologia da interface em função do resfriamento.

Fonte: Adaptado de ABM Lingotamento Contínuo

No resfriamento que ocorre no lingotamento contínuo é essencial que a interface seja dendrítica, existindo em três regiões: sólida, líquida e sólida + líquida, onde o calor latente da solidificação é liberado na respectiva região sólida + líquida. Esta microestrutura é representada por espaçamentos primários e secundários, que é uma determinante para a definição da propriedade de ductilidade do aço e definição das possíveis trincas onde os elementos são segregados. Os espaçamentos são reduzidos com o aumento da taxa do resfriamento e teores de liga. Para diminuição das micro segregações e a formação de defeitos na superfície, obter uma estrutura fina com o aumento do resfriamento é fundamental.

Com base no tipo de aço e condições para que ocorram a solidificação, são apresentadas 03 zonas distintas na placa do lingotamento, sendo elas as zonas: coquilhadas, colunas e equiaxial central.

Quando o aço é solidificado em contato com as paredes do molde, acontece a nucleação fácil que ocorre devido ao elevado super-resfriamento. A estrutura é constituída de pequenos grãos equiaxiais com cristalografia aleatória com uma espessura de aproximadamente 5 mm. Esta agitação e primeiro contato com o resfriamento é conhecida como zona coquilhada.

Conforme o contato com a parede do molde vai sendo reduzido, decorre uma redução do resfriamento onde a nucleação será dificultada. Os grãos formados na

fase anterior começam a crescer perpendicular à superfície contrário ao fluxo de calor. Em contra partida, os mesmos grãos que são favoráveis a direção do líquido bloqueiam os crescimentos dos grãos que não são favoráveis ilustrando o aparecimento da zona colunar. Os grãos da zona equiaxial central, originam a partir da zona coquilhada ou de pontas da zona colunar, que são carregadas para o centro da placa.

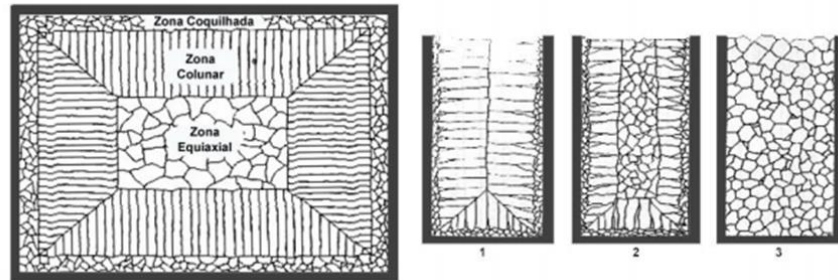


Figura 10: Crescimento de grãos colunares com orientação favorável à extração de calor.

Fonte: Nuclemat, PUCRS, 2008.

O surgimento e crescimento dos grãos na região coquilhada podem ocorrer também devido ao processo de nucleação heterogênea provocada por nucleantes artificiais, que por sua condição geram dimensões pequenas. A zona equiaxial formada bloqueia o crescimento progressivo da zona colunar. Todavia com a curvatura em que a placa é submetida, no processo de lingotamento contínuo, a região equiaxial é apresentada na parte inferior da placa. Quanto a macroestrutura dos materiais metálicos, é recomendado fortemente as estruturas equiaxiais por serem isotrópicas e possuírem uma propriedade superior. Para que essa constituição seja reestruturada, estímulos favoráveis precisam ser realizados para que assim possam inibir a progressão colunar da mesma. Estes estímulos são realizados por meio de dois principais procedimentos, sendo eles: o controle da nucleação e a utilização de métodos físicos.

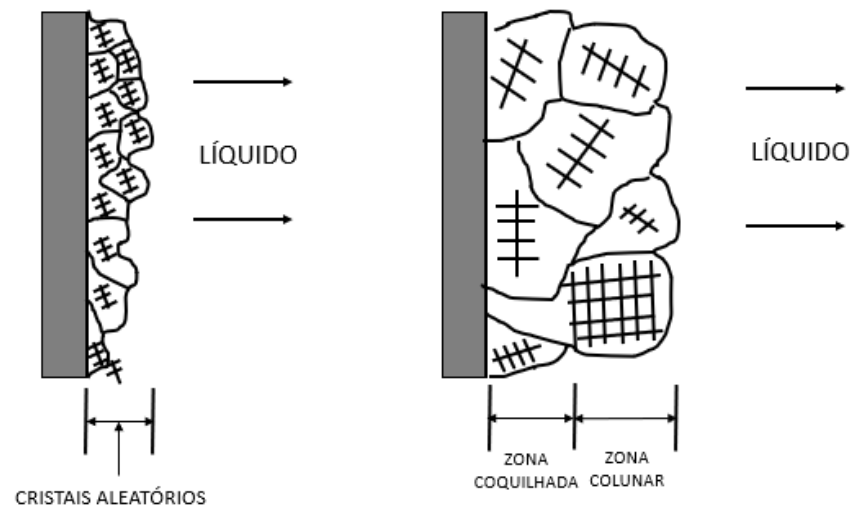


Figura 11: Distribuição dos grãos equiaxiais produzidos no lingotamento de aços contínuo.

Fonte: Adaptado de ABM Lingotamento Contínuo.

No controle da nucleação, para que cristais não sejam refundidos e tornem-se a se desenvolver, qualquer movimento do material líquido, a condição para que ocorra o desenvolvimento da zona equiaxial, é feita a remoção de todo superaquecimento. Assim o controle da temperatura no aço enquanto estiver no distribuidor é de grande importância. Na medida em que a redução do calor é dificultada a ocorrência da zona correspondente é facilitada, promovendo 100% de fragmentação resultando na extensão da zona colunar.

Na utilização de métodos físicos, encontra-se o refino dinâmico de grãos que nada mais é da agitação que ocorre do molde enquanto há o resfriamento consecutivo na criação de núcleos dendríticos, provocando a desintegração das mesmas e conseqüentemente o aumento da zona colunar. O uso deste procedimento de agitação na estrutura de um aço, é o mais utilizado para obtenção deste fenômeno, com a temperatura de lingotamento usual.

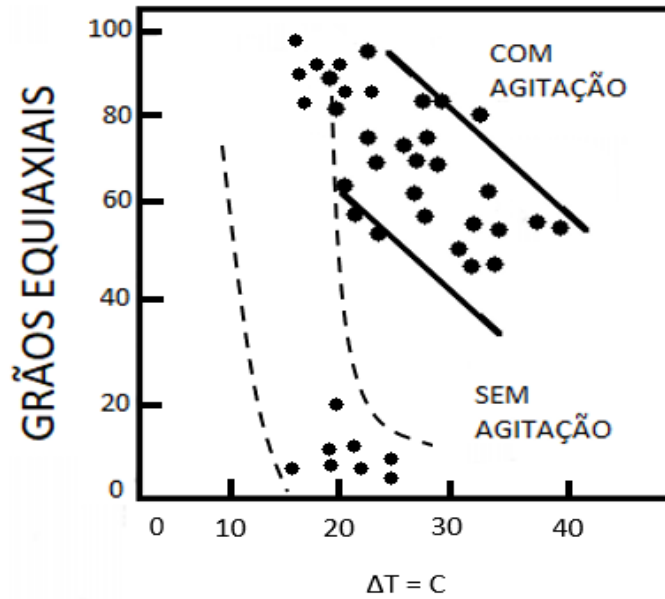


Figura 12: Fenômeno da agitação eletromagnética e superaquecimento do aço no distribuidor.

Fonte: ABM Lingotamento Contínuo

A tabela 1 mostra de forma exemplificada as possibilidades de controlar a estrutura por meio de parâmetros deste processo de mudança de estado líquido para o estado sólido.

PARÂMETROS DE CONTROLE	ZONAS DA MACROESTRUTURA		
	COQUILHADA	COLUNAR	EQUIAXIAL
AUMENTO DO SUPERAQUECIMENTO	↓	↑	↓
AGITAÇÃO DO LÍQUIDO	↓	↓	↑
AUMENTAR NO TEOR DE SOLUTO	↑	↓	↑
ADIÇÃO DE NUCLEANTES ARTIFICIAIS	↑	↓	↑
AUMENTO DA EXTRAÇÃO DE CALOR NO SISTEMA METAL/MOLDE	↑	↑	↓
SIMBOLOGIA	AUMENTO ↑	SEM EFEITO →	DIMINUIÇÃO ↓

Tabela 1: Comparação das propriedades dos parâmetros de controle.

Fonte: ABM Lingotamento Contínuo

2.5. Fluxantes para lingotamento contínuo

2.5.1. Origem

O atrito é o grande fator para o desgaste mecânico, segundo Carreteiro e Belmiro (2006), quando uma superfície se movimenta em relação a outra, há uma força oposta a esse movimento, força definida como atrito. Uma definição mais completa é: atrito é um contato de rugosidade entre dois corpos unidos, permitindo a troca de forças na direção tangencial a região onde ocorre o contato entre os sólidos.

A queima de hulha (um dos carvões fósseis mais importantes e abundantes, com teor de carbono de 80% em sua composição) em usinas termoelétricas deu origem aos fluxantes, que são provenientes dos resíduos dessa queima. A queima desse carvão gera até 30% em cinzas. O *fly ash* é o principal poluente dessa operação de pulverização do carvão.

Este resíduo começou a ser utilizado por volta de 1960, na região de *Ruhr* na Alemanha, onde se encontravam as principais siderurgias do país, ele era utilizado em painéis e lingoteiras, como coberturas de aço.

Foi verificado que as cinzas tinham dois comportamentos, um servia como refratário e outro com facilidade de fundição. Pesquisado esses comportamentos, viu-se que as mudanças que ocorriam na composição das cinzas eram responsáveis por

diferentes aspectos produzidos na escória e eram em função dos teores originais de $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ e Al_2O_3 .

As tentativas de ajustes do ponto de fusão das cinzas foram bem satisfatórias, mediante a inclusão de fundentes como NaF , Na_3AlF_6 e Na_2CO_3 . A adição exata desses fundentes facilitou a obtenção das cinzas que fundem em temperaturas pré-determinadas, conforme as condições de vazamento e do tipo de aço.

A presença de maior ou menor quantidade de teor de carbono determina com qual velocidade o pó funde e se modifica em escória líquida. A partir daí, iniciou-se a produção do lubrificante com a composição da escória com controle da composição química, tendo em base as cinzas das termoelétricas.

O sistema vítreo fundido, equipara-se a um líquido, que com a diminuição da temperatura, no lingotamento, gera um material que se assemelha a um vidro, um material de alta viscosidade. Os vidros se incluem em materiais que possuem propriedades estruturais como ausência de cadeia longa, de arranjo periódico e desempenho dependente da velocidade de resfriamento, (*SHELBY*, 1997). Conforme *Kingery* (*KINGERY*, 1975), a ocorrência de uma mudança descontínua de volume na posição de fusão, ocorre quando o material cristalino se solidifica desde o resfriamento em seu estado líquido. O volume do líquido diminui até um período abaixo da fusão, no caso dos materiais vítreos, onde ocorre a redução ainda mais no coeficiente de expansão e não há a cristalização. Então, o intervalo que está entre o estado vítreo e o líquido super resfriado, chama-se de intervalo de transição vítrea (T_g), e observa-se o aumento da viscosidade. Este comportamento é observado na figura 13.

É provável realizar a análise da T_g em curvas de análises térmicas ou curvas de expansão, levando em conta um valor não absoluto, mas sim um indicador. Para a estrutura se ordenar, a T_g é influenciada pela taxa de resfriamento e de modo a ser diminuído. Há o aumento da T_g com o aumento da taxa de resfriamento.

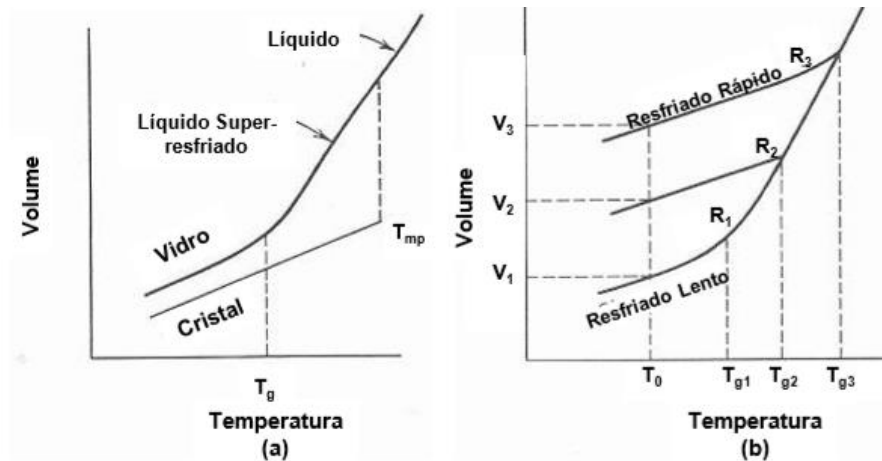


Figura 13: Gráfico volume X Temperatura(a) comparando vidro, cristal e líquido; (b) Vidros formados a diferentes taxas de resfriamento $R_1 < R_2 < R_3$.

Fonte: Adaptado de (WOLF, 1975).

A propriedade cristalina do fluxante pode ser referente ao modelo de *Zachariasen-Warren* ou pode ser relacionado ao modelo irregular que é aplicado em vidros. A teoria de *Zachariasen* é fundamentada em ideias de *Goldschmidt*, que mostra o motivo por que os elementos químicos são propensos a formarem vidros em função do número de coordenação em conexão ao oxigênio. Foi notado por *Shelby*, que após fundir, cristais de silicatos que constituem vidros, ao invés de recristalizar, mostraram uma estrutura na forma de rede, em contradição com a compactada fechada. Esta rede é tridimensional e consiste em tetraedros que são conectados em 4 vértices, semelhantes com o cristalino, entretanto não é periódico e com simetria com os cristais (*SHELBY*, 1997).

Zachariasen, certificou que a constituição do vidro pode acontecer nas seguintes condições:

- É possível manter uma estrutura cristalina, pois o material abrange alta proporção de cátions, que é suficiente para ficar envolvidos por triângulos ou por tetraedros de O_2 .
- Tetraedros são ligados apenas por seus vértices, estando a rede numa estrutura aberta e O_2 são conectados somente por dois cátions e não constituem ligações adicionais.

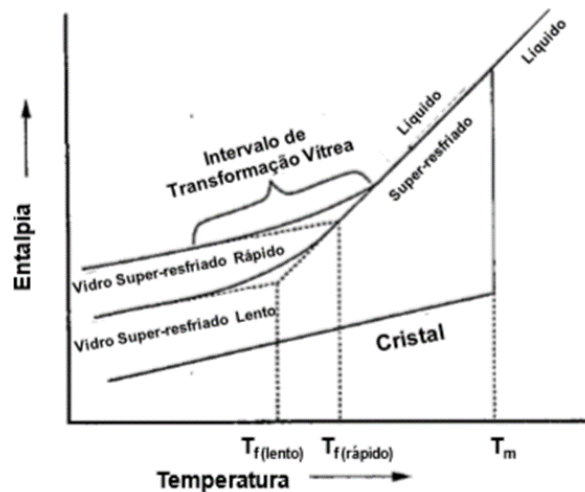


Gráfico 1: Gráfico entalpia x temperatura comparando cristal e vidro.

Fonte: Adaptado de (SHELBY, 1997).

A tabela abaixo demonstra elementos químicos com desigualdades de energias de dissociação, forças de ligação e números de coordenação (NC), que levam categorização como intermediário, formador e modificador de rede. Normalmente o princípio para o cátion depende da valência, do valor que é relacionado à força de ligação unitária e da quantidade de coordenação. (KINGERY, 1975).

	M no MOx	Valência	Energia dissociada por MOx (Kcal/g-átomo)	Número de coordenação	Força de ligação (Kcal/g-átomo)
Formadores de vidro	B	3	356	3	119
	Si	4	424	4	106
	Ge	4	431	4	108
	Al	3	402 - 317	4	101-79
	Zr	4	485	6	81
Intermediários	Ti	4	435	6	73
	Zn	2	144	2	72
	Al	3	317- 402	6	53 – 67
	Zr	4	485	6	61
Modificadores	Mg	2	222	6	37
	Li	1	144	4	36
	Zn	2	144	4	36
	Ba	2	260	8	33
	Ca	2	257	8	32
	Na	1	120	6	20
	K	1	115	9	13

Tabela 2: Diferenças entre os elementos formadores, modificadores e intermediários.

Fonte Adaptado de (KINGERY, 1975).

Os sistemas das escórias e vidros são poliméricas em forma de cadeias feitas de elementos de tetraedros de SiO_4 , e a estrutura do mesmo é uma rede com íon Si^{4+} , cercado por 4 íons O^{2-} de forma constituir arranjos tetraedricamente e cada O^{2-} junto a dois O^{2-} , denominado *Bridging Oxygen*, que ocasionam a formação de uma ordenação 3-D (MILLS, YUAN; JONES, 2011).

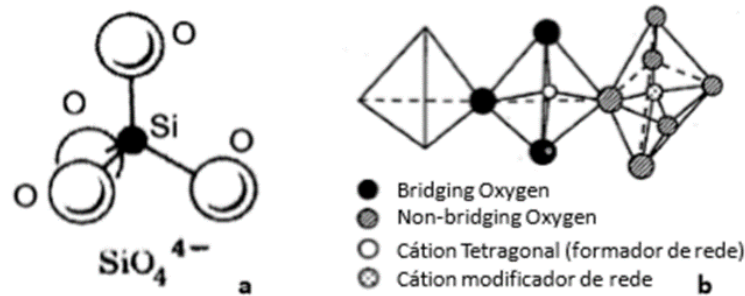


Figura 14: Estrutura de SiO_2 , mostrando características 3-D. Tetraedro de SiO_2 e (b) Diferenças de *bridging* e *non-bridging oxygen* com formador e modificador de rede.

Fonte: Retirado de (MILLS; YUAN; JONES, 2011).

A demonstração do grau de polimerização mostrado em termos de números de ligações de entre oxigênio ligados, não ligados e os livres, é o conceito de oxigênio não ligado por tetraedro (*non-bridging oxygen* NBO/T). NBO/T é definido sendo a razão entre os oxigênios ligados tetragonalmente e os não ligantes.

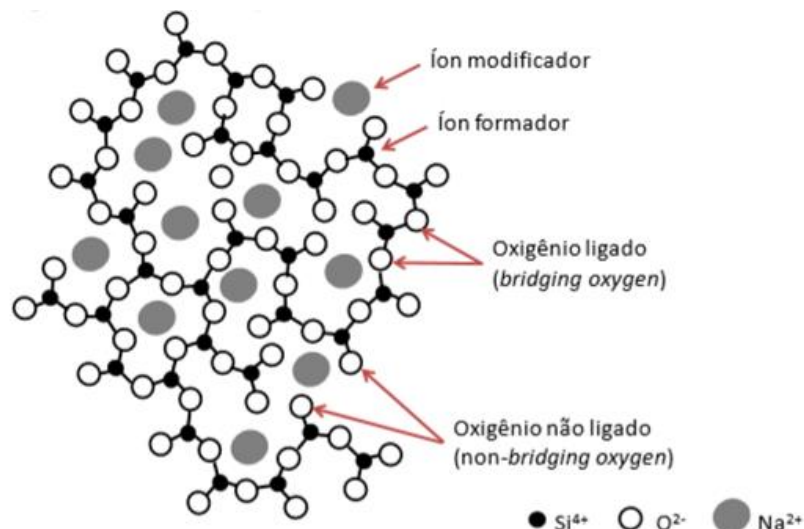


Figura 15: Esquema representativo da estrutura de vidro de silicato de sódio.

Fonte: Adaptado de (SHELBY, 1997).

2.5.2. Fabricação dos fluxantes

A mistura de minerais que quando entra em contato com o aço líquido, gera uma camada de escória líquida com propriedades específicas, conforme a condição de lingotamento.

Os lubrificantes podem ser oferecidos em três tipos: pó, granulado compacto ou esférico. Os tipos classificados em pó são feitos de misturas de vários tipos de matérias primas em misturadores do tipo betoneira ou *Ribbon Blender*.

Os que são designados como granulado compacto são fabricados a partir da mistura das matérias primas, seguido de aglomeração delas através de um aglomerante que pode ser dextrinas ou amidos, ou pode ser inorgânico da linha dos silicatos. Nesse tipo o tamanho dos grãos deve ser muito bem controlado.

Para o fabrico dos esféricos, as matérias primas são colocadas em um tanque de agitação junto com a quantidade ideal de água afim de formar uma argila chamada barbotina. Essa argila é transferida para um tanque de alimentação de *spray dryer* e depois conduzida para dentro da câmara de *spray*.

Para o grão ficar conforme desejado, é determinado o tamanho do bico do *spray*, a pressão de entrada do material, a densidade e viscosidade da barbotina.

No início eram fabricados apenas os fluxantes incorpóreos, que possuem excelente vantagem em relação ao isolamento térmico na camada superficial do aço líquido, entretanto suas desvantagens incluem a suspensão de partículas finas na área de operação e pode haver heterogeneidade em relação a segregação dos componentes com diferentes densidades. Por esses motivos foram criados os modelos esféricos e granulados compactos, para haver um melhor controle da qualidade e do meio ambiente.

Item	Pó	Granulado esférico	Granulado compacto	Pré fundido
Preço	Ótimo	Bom	Regular	Regular
Isolamento térmico	Ótimo	Bom	Regular	Ótimo
Espalhabilidade	Regular	Ótimo	Bom	Regular
Homogeneidade química	Regular	Ótimo	Ótimo – Bom	Ótimo
Impacto ambiental	Regular	Ótimo	Ótimo	Ótimo

Tabela 3: Parâmetros de comparação dos tipos estruturais de fluxantes.

Fonte: Adaptada de (LAVINIAS *et al.*, 1998).

O processo em que se usa o *Spray Dryer* para a fabricação de fluxantes para o lingotamento contínuo tem uma configuração padrão (figuras abaixo). A configuração mais comum do *spray dryer* consiste em na combinação das matérias primas com a água, efetuada em um tanque de agitação através de pás, formando a suspensão de partículas, que é a barbotina.

Após uma homogeneização completa, a barbotina é movida para os tanques intermediários para que haja um controle da quantidade bombeada para o atomizador. No atomizador a barbotina atravessa por bicos pulverizadores, contra corrente ao ar quente, que se localiza na parte superior. As gotas de barbotina perdem a água de forma instantânea, no interno do atomizador, dando formato a esferas ocas, pelo fato da alta tensão superficial, se encontra ilustrado o produto na figura 16. Para se realizar a classificação da granulometria, as esferas ocas caem, por gravidade, em uma peneira vibratória.

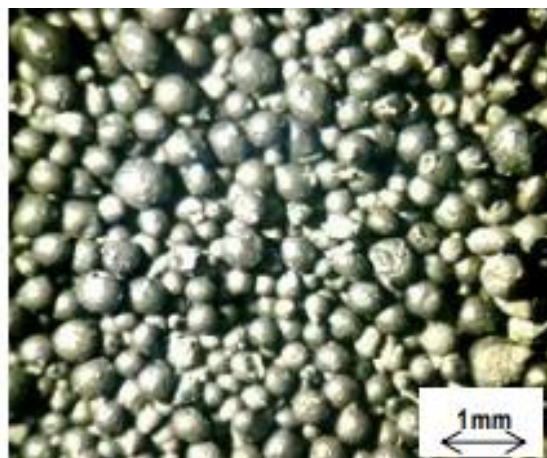


Figura 16: Barbotina.

Fonte: Fluxantes para lingotamento contínuo – Carbox 2006.

Através de uma correia as esferas ocas são transportadas até o elevador de canecas e posteriormente ao silo de armazenagem, para por último serem embaladas. No geral, os testes que são realizados para se verificar a qualidade, são feitos nas etapas preparatórias da barbotina e com o produto já finalizado. Com a barbotina são feitos os ensaios de tempo de escoamento (*Cup Ford*), e a massa específica aparente (MEA). Com a finalização do produto são feitos os ensaios de granulometria, MEA, ensaios de umidade, navículas e análise química.

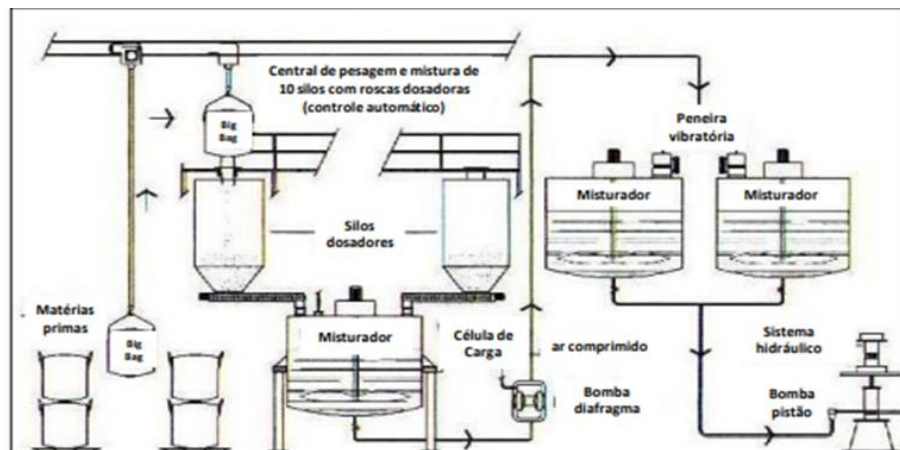


Figura 17: Mostrando um esquema de fabricação da suspensão para a granulação via *Spray Dryer* na Carbox, do abastecimento dos silos até a transferência de carga através da bomba pistão.

Fonte: Fluxantes para lingotamento contínuo – Carbox 2006.

2.5.3. Funções dos fluxantes

O fluxante é uma escória sintética utilizada no lingotamento contínuo de aço, e uma das suas principais características é a de lubrificação. Ele é sustentado na superfície do aço em estado líquido. Formando uma camada que desce pelas paredes do molde. Segundo *Branion* (1986), o fluxante além de lubrificante, possui outras 4 funções que são mostradas na figura 18:

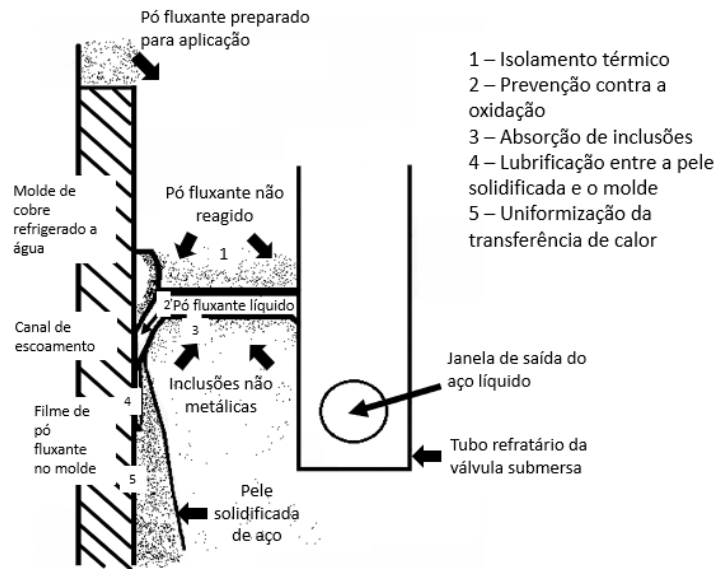


Figura 18: Principais funções do pó fluxante no lingotamento contínuo.

Fonte: *Branion* (1986)

O aço líquido e o fluxante são imisturáveis. Devido à menor densidade do pó, ele fica sobre o aço líquido no molde. E quando a alimentação do aço líquido é feita através da válvula submersa, o lubrificante é acrescentado na camada superficial livre do metal. O movimento do aço líquido que ocorre na parte interna do molde é capaz, em relação a viscosidade dos dois materiais, são capazes de causar o deslocamento do pó, conforme é mostrado na figura que segue:

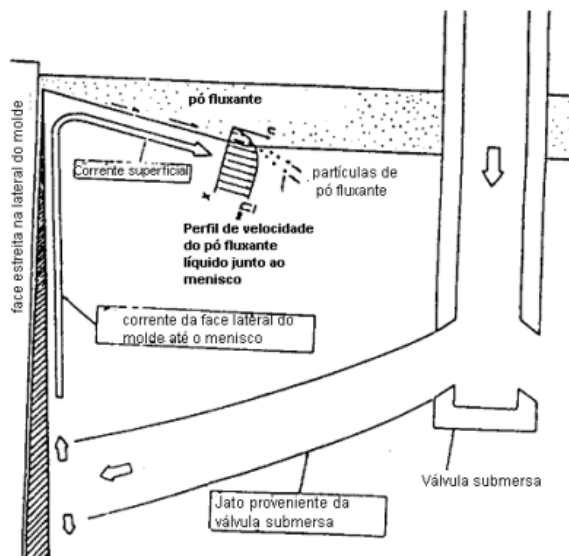


Figura 19: Ilustração esquemática mostrando o efeito do escoamento do aço líquido no escoamento do pó fluxante.

Fonte: segundo *Kubota et al* (1990).

A figura 19 demonstra o perfil de velocidades na interface do aço-pó. Nesse tipo de interface, a velocidades das divergentes fases é a mesma, assim, a velocidade do aço líquido dentro do molde constitui uma velocidade no pó fluxante líquido através da força de arraste entre essas fases, gerando uma força cisalhante no pó. Quando há a superação dessa força relacionada a tensão superficial do fluxante líquido, partículas dele se soltam (fenômeno de emulsificação), pode haver um aumento das inclusões não metálicas no aço.

O estudo em cima do escoamento bifásico no molde é de suma importância para pode realizar uma avaliação da possibilidade da incorporação de partículas não metálicas provenientes do lubrificante ao aço. As características dos mesmos têm grande influência sobre o desprendimento destas partículas.

2.5.3.1. Isolação da superfície do aço líquido

Todas as superfícies sólidas por mais polidas que sejam, contém partes ásperas e irregularidades. A forma como as superfícies se relaciona definem os mecanismos de atrito.

A solidificação parcial na superfície do aço quando está no molde deve ser prevenida pelo fluxante, especialmente na região próximo a superfície do aço no molde. Um isolamento térmico eficiente permite o aumento da temperatura no meio e colabora para a diminuição das marcas de oscilação e reduz a formação de defeitos superficiais como por exemplo marcas de bolhas e evitando a solidificação prematura protegendo assim da radiação térmica.



Figura 20: Representação do isolamento térmico pelo fluxante.

Fonte: Carbox 2006.

A diminuição da formação dessas marcas de bolhas, conhecidas como pinholes, com o melhor isolamento térmico acontece devido a diminuição da solidificação do aço no molde, provocada pela elevação da temperatura do aço líquido na região do menisco.

Para que aconteça o isolamento térmico, é de grande importância a adaptação da taxa de fusão de cada processo. A velocidade necessária para o lingotamento de placas é superior ao de blocos e tarugos, devido a diferença de dimensões do molde, pois a fricção dele é maior.

O procedimento para a análise da temperatura via calorímetro exploratório diferencial, ajudando na interpretação do comportamento do fluxante em elevadas temperaturas. Pode-se observar no gráfico 2 da análise de fluxo de calor de um agente que irá evidenciar as temperaturas relacionadas a perda de água, oxidação do carbono, decomposição de carbonatos e fusão, que serão representados por reações endotérmicas e exotérmicas.

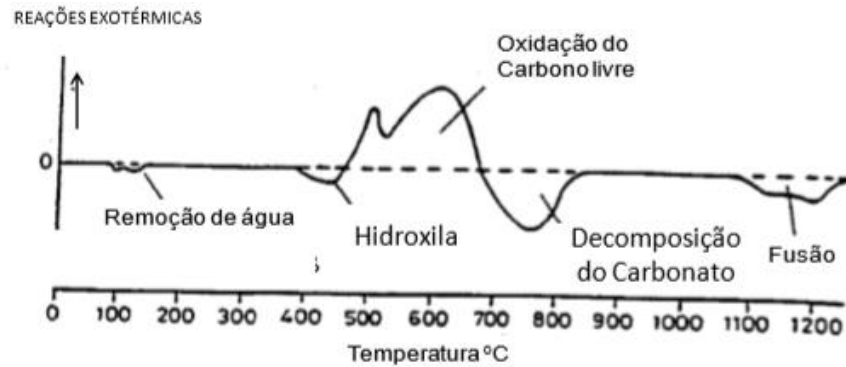


Gráfico 2: Gráfico da análise de fluxo de calor.

Fonte: Adaptado de *MILLS*, 2010.

2.5.3.2. Proteção contra a oxidação pela atmosfera

A camada de escória líquida que é formada sob a superfície do aço líquido e as partículas de carbono na faixa do material *in natura* e sinterizado, protege contra a oxidação da camada superficial do aço pela atmosfera, evitando contato do aço líquido e absorvendo os gases pelo aço, é de suma importância que a escória líquida deve possuir uma espessura que estejam atendendo a cobertura do líquido para que mesmo em condições adversas de lingotamento, como por exemplo a alteração de nível do molde e temperatura do aço mais alta.

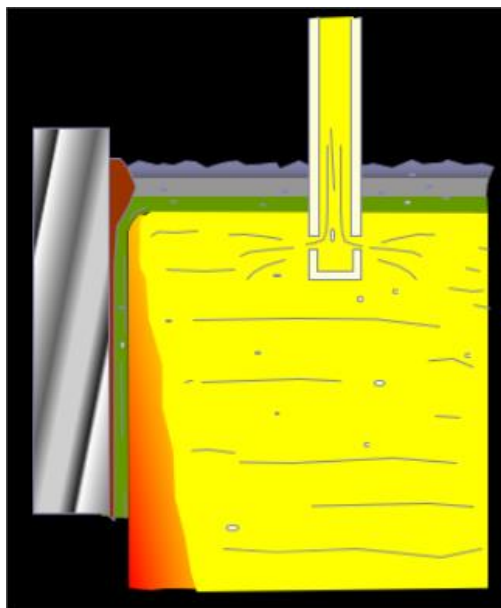


Figura 21: Prevenção da reoxidação do banho.

Fonte: Fluxantes no Lingotamento contínuo - Carbox, 2006

2.5.3.3. Formação do filme lubrificante na interface placa e molde

A função mais importante do fluxante é de lubrificante. A escória líquida preenche o intervalo que existe entre o filme de escória sólido produzido contra o molde que já está resfriado com água e promove a lubrificação para a camada de aço que está se solidificando. É interessante que essa camada de escória permaneça por todo o comprimento do molde, pois o atrito gerado do sólido lido pode provocar fissuras na parte inferior do molde. A baixa temperatura e viscosidade de solidificação do fluxante proporciona uma melhor lubrificação da interface placa-molde, e protege agarramentos.

Caso não seja feita a lubrificação correta e necessária, é possível a ocorrência de uma variedade de problemas na formação das placas como *breakouts* ou trincas estrela, quando não é eficiente na saída do molde. A força de fricção pode ser calculada com as informações necessárias, sendo elas a velocidade do lingotamento (V_c), a velocidade do molde no movimento de estripamento negativo (V_m) e a espessura da camada líquida (d_l) onde n designa-se viscosidade do fluxante.

$$F_l = \frac{n V_c - V_m}{d_l}$$

Equação 1: Força de fricção

Sendo assim a força de fricção vai aumentando de acordo com a velocidade do lingotamento. Em contra partida, desta forma reduz o aumento da espessura que é diretamente referente ao consumo específico. Esta taxa de consumo é calculada pelas condições do lingotamento e pelas próprias propriedades da escória. Se porventura ocorra o aumento na velocidade consequentemente resultará no aumento da força de fricção e redução do consumo de fluxante por tonelada de aço. A lubrificação eficiente garante a atenuação de defeitos na superfície das placas de aço, e diminuindo também a possibilidade do *breakout*.

A habilidade da lubrificação está relacionada com a viscosidade e temperatura de solidificação, com o tipo de aço, velocidade do lingotamento, amplitude e frequência de oscilação do molde.

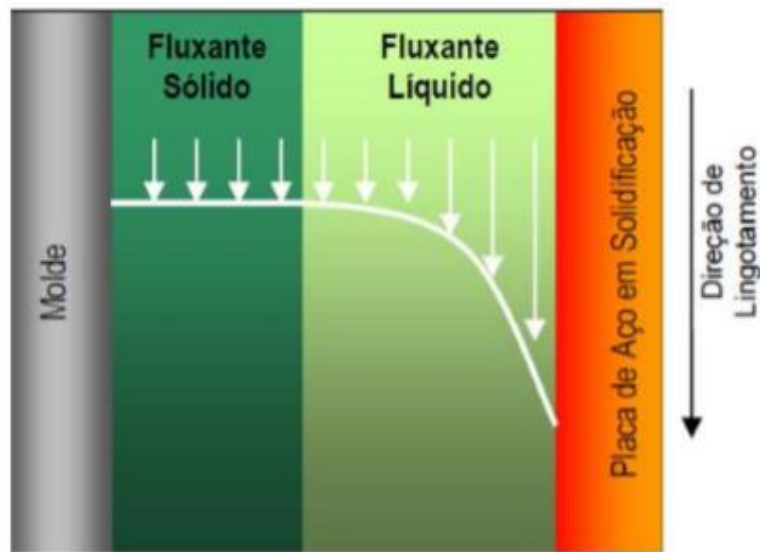


Figura 22: Fricção entre o veio, lubrificante e o molde do lingotamento contínuo.

Fonte: EMI, 1991.

2.5.3.4. Absorção de inclusões

As inclusões que existem no aço líquido são absorvidas pela escória líquida do fluxante. A principal dessas inclusões não metálica estabelecida no processo de lingotamento contínuo é a Al_2O_3 e em escala menor o TiO_2 nos aços que contêm Ti. A formação da alumina se dá especialmente pela oxidação pelo oxigênio do aço acalmado ao Al. As inclusões formadas também podem ser nas paredes internas das válvulas submersas, diminuindo de forma relevante o fluxo de aço líquido ou produzindo de forma desigual o aço do distribuidor para o molde, forçando a diminuição da velocidade de lingotamento ou até a parada da máquina. Pode ocorrer ainda pouca lubrificação, levando a um rompimento da pele solidificada.

Para redução desses problemas, a alumina pode ser absorvida pelos materiais de cobertura e pelos lubrificantes, em relação à redução de SiO_2 do fluxante pelo Al do aço. A principal inclusão formada é Al_2O_3 e em menor escala TiO_2 .



Figura 23: Absorção das inclusões pelo fluxante.

Fonte: Fluxantes no Lingotamento contínuo - Carbox, 2006

Um fluxo muito grande em direção à camada de escória pode resultar no cisalhamento da camada de escória e inclusões. O efeito de cisalhamento é mais comum em escórias de baixas viscosidade. Casualmente a cinética da reação de dissolução, que acontece na área de interação inclusão-líquido, pode ser atingida pela composição química, como explica a figura abaixo:

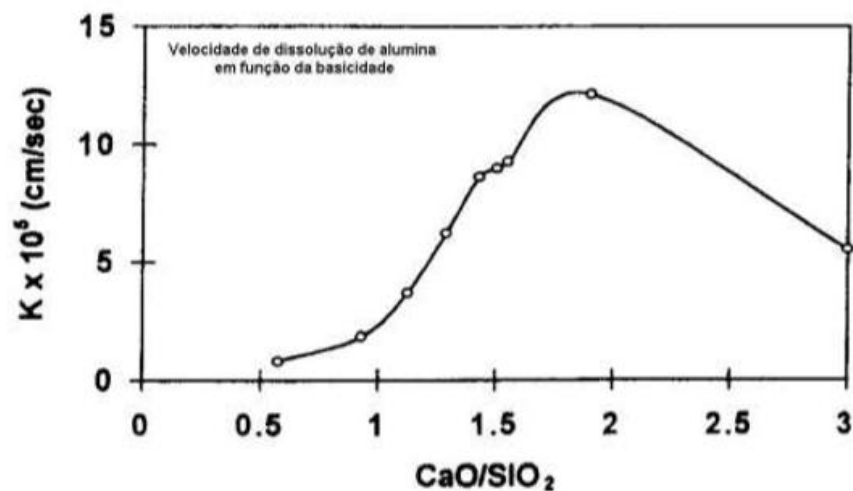


Figura 24: Cinética da dissolução de alumina em função da basicidade.

Fonte: Tópicos em lingotamento contínuo, 2020.

A figura 25 mostra, através de um diagrama de fases, as regiões que proporcionam o pó com baixa temperatura de fusão. Os fluxantes da região B teriam alto teor de alumina e com isso, seriam menos capazes de absorver inclusões de alumina. Para produção do mesmo em geral, o material base utilizado seria a *Wollastonita*, Bauxita, com $0,6 < \text{CaO}/\text{SiO}_2 < 1,5$; $\% \text{Al}_2\text{O}_3 < 20\%$.

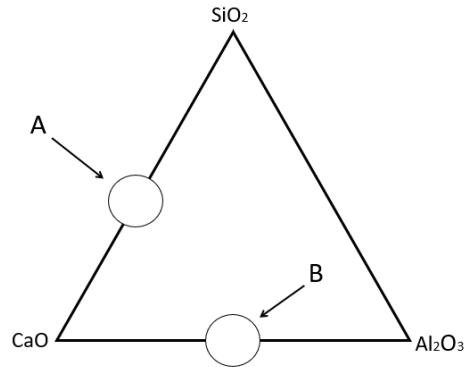


Figura 25: Material base para confecção de pós fluxantes.

Fonte: Tópicos em lingotamento contínuo, 2020.

2.5.3.5. Controle da taxa de transferência de calor

Dentre os tipos de lubrificantes, existem o óleo e a graxa, que terá um tópico específico mais à frente. A prevenção de trincas no produto lingotado pode surgir caso não haja a prevenção da solidificação não uniforme da placa de aço. Por isso o fluxante contribui para a uniformidade da taxa de transferência de calor.

Eles possuem elevada temperatura de solidificação e formam uma camada cristalina e sólida mais grossa no filme de escória que fica entre a placa de aço em solidificação e o molde, diminuindo a taxa de transferência de calor. Para atender as características específicas de cada tipo de aço no processo do lingotamento o perfil de solidificação do fluxante deve ser ajustado.

São fatores relevantes a viscosidade e a temperatura de solidificação na interface placa e molde.

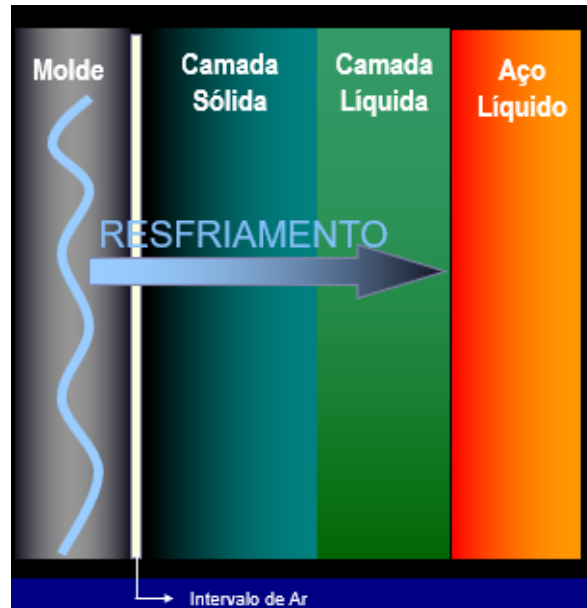


Figura 26: Controle da taxa de transferência de calor.

Fonte: Fluxantes no Lingotamento contínuo - Carboox, 2006

As duas maneiras que ocorrem a transferência de calor entre a interface e as paredes do molde são classificadas como condução e radiação. A condução térmica ou difusão térmica é a transferência de energia térmica entre átomos e/ou moléculas vizinhas em uma substância devido a um gradiente de temperatura, isto é, um modo do fenômeno de transferência térmica que foi causado por uma dissemelhança de temperatura entre duas regiões, já a radiação é obtida pelo movimento térmico de partículas carregadas na matéria. Este movimento resulta em aceleração de carga ou oscilação de dipolo que produz radiação eletromagnética. Porém se a transferência de calor não for bem sucedida poderá causar uma pele de aço muito fina que acabará contribuindo para ocorrência de abaulamento e *breakout*. O fluxo de calor presente nesta operação é facilmente obtido através de avaliação de variação da temperatura da água que é utilizada no resfriamento da placa.

O fluxante no momento que lubrifica o molde na interface molde e pele do aço no estado de solidificação, molda um filme de escória sólida que é capaz de conter as fases cristalinas Wollastonita ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), Fluorita (CaF_2) e Cuspidina ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{CaF}_2$), que difratam a radiação, fazendo com que a transferência de calor na interface molde e veio seja reduzida.

2.6. Composição química

A especificação da composição química se dá através do tipo de aço que será fabricado, das condições de contorno de lingotamento contínuo e do fornecedor. Segundo Barral (2006), ela impacta diretamente na taxa de fusão, temperatura de cristalização e solidificação, viscosidade e taxa de absorção de alumina.

Em sua essência, os fluxantes retratam sua composição química em porcentagem mássica, composta aproximadamente de:

Constituinte	Composição química (% em massa)
CaO	25 ~ 45
SiO ₂	20 ~ 50
Al ₂ O ₃	0 ~ 10
TiO ₂	0 ~ 5
C	1 ~ 25
Na ₂ O	1 ~ 20
K ₂ O	0 ~ 5
FeO	0 ~ 5
MgO	0 ~ 10
MnO	0 ~ 10
BaO	0 ~ 10
Li ₂ O	0 ~ 4
B ₂ O ₃	0 ~ 10
F	4 ~ 10

Tabela 4: Teores dos componentes presentes na composição química dos pós fluxantes comerciais.

Fonte: Adaptado de Vieira, 2002 citado em Barral, 2006

A típica composição microestrutural possui os seguintes constituintes: CaO, SiO₂, Al₂O₃, Na₂O e CaF₂. Este se encontra dentro da área chamada pseudo-*Wollastonita* dentro de um diagrama ternário de CaO, Al₂O₃ e SiO₂ (figura 27). Além da composição química, a constituição mineralógica é de suma importância, pois é ela que desempenha influência sobre a taxa de fusão. Fluxantes com as mesmas composições químicas, podem possuir taxa de fusão divergentes devido a constituição mineralógica dos componentes.

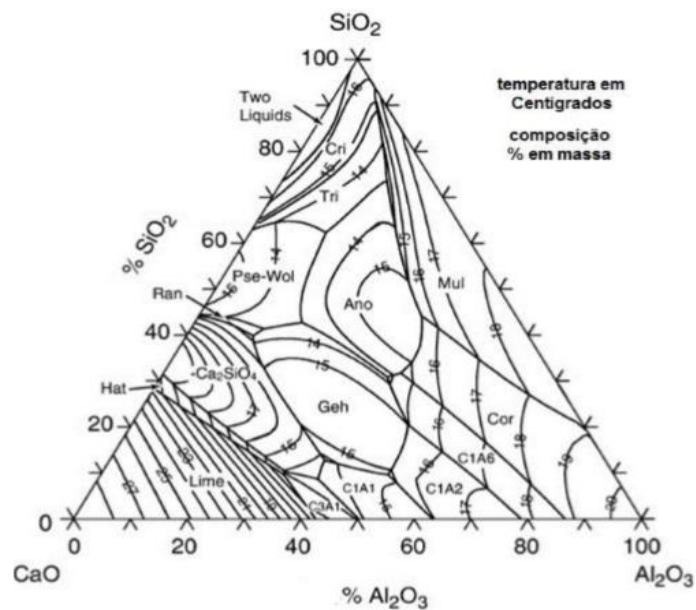


Figura 27: Superfícies Líquidas no ternário SiO₂ – CaO – Al₂O₃.

Fonte: Tópicos em lingotamento contínuo, 2020.

Os fluxantes para lingotamento contínuo, normalmente estão à disposição nas seguintes formas: pós sintéticos, granulados e pós à base de cinzas volantes.

2.7. Parâmetros de desempenho do fluxante do molde

2.7.1. Infiltração de escória líquida – consumo específico

A camada de escória líquida ao longo da interface placa e molde é a etapa mais importante no lingotamento contínuo, pois assegura a lubrificação.

Os fatores que influenciam na infiltração são os a seguir:

- Características de oscilação;
- Temperatura de solidificação da escória líquida;
- Viscosidade da escória líquida;
- Fluxo de calor entre o aço em solidificação e o molde;

2.7.2. Temperatura de fusão e cristalização

A temperatura de fusão influencia na interface da poça líquida de escória e a região intermediária sem fusão completa, ocorre na camada superficial do aço líquido na região do molde de lingotamento contínuo.

A temperatura de cristalização é um item de suma importância para o pó fluxante, ela influencia na espessura da faixa de escória sólida e a faixa de escória líquida entre o veio e o molde.

2.7.3. Consumo de fluxante

É a determinação da taxa de escória que flui na interface da placa molde. O consumo pode ser referido em dimensões de área lingotada: Kg/m² ou quantidade de fluxante por tonelada de aço: Kg/t.

Para esse cálculo, podemos adotar as seguintes fórmulas:

- Para Kg/m²

$$Q_s = \frac{q}{(2 \cdot (w + t)) \cdot l}$$

Equação 2: Consumo específico para quantidade de fluxante em Kg/m²

- Para Kg/t

$$Q_t = \frac{q}{(w \cdot t \cdot 7,6) \cdot l}$$

Equação 3: Consumo específico para quantidade de fluxante em Kg/t

Onde:

- Q_s = Consumo Específico
- q = quantidade de fluxante utilizada (kg)
- w = largura do molde (m)
- t = espessura do molde (m)
- l = comprimento da placa lingotada (m)

O consumo específico de fluxante para lingotamento de tarugo, no geral fica em torno de 0,2 a 0,4 Kg/t.

Diversos defeitos como fissuras longitudinais, rompimentos de veio, depressões nas placas, são reportadas devido ao consumo específico inadequado.

Fatores que influenciam no consumo:

- Velocidade de lingotamento - Velocidade de lingotamento – Com o aumento da velocidade de lingotamento o consumo de fluxante diminui.

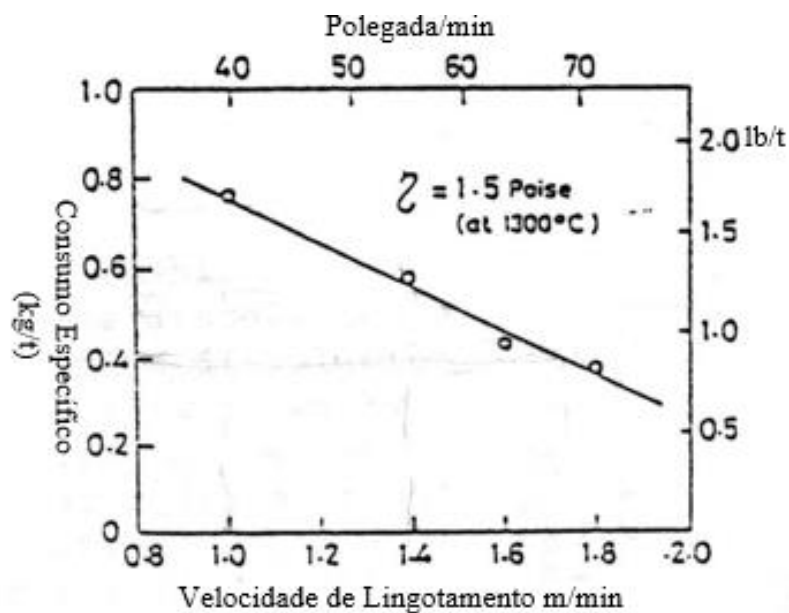


Figura 28: Relação da velocidade de lingotamento e consumo de fluxante.

Fonte: Fluxantes CSN, Carbox 2006.

- Viscosidade - Há um intervalo ideal para a viscosidade com a relação à velocidade de lingotamento, de acordo com o mínimo de transferência de calor, atrito e defeitos na superfície

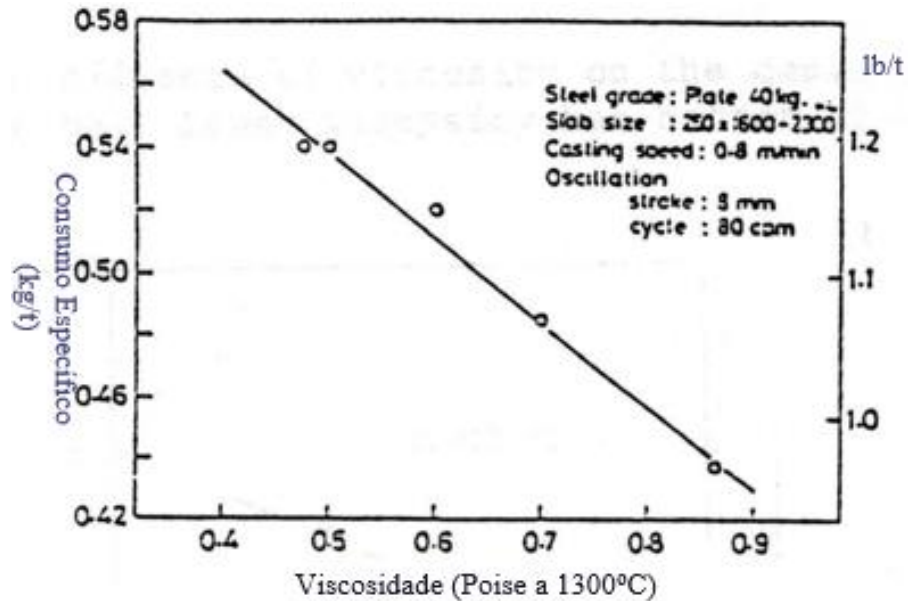


Figura 29: Relação da viscosidade e consumo de fluxantes.

Fonte: Fluxantes CSN, Carbox 2006.

- Temperatura de solidificação – O aumento da temperatura gera um aumento do consumo específico;
- Frequência e amplitude de oscilação – O consumo específico tem um aumento com a redução da frequência e amplitude de oscilação;
- Espessura da poça de escória líquida – Essa espessura garante a lubrificação ideal da placa e molde. Para o lingotamento o valor desejado da espessura é de 10 a 20mm.

2.8. Constituição mineralógica

A mineralogia e a composição têm grande influência nos tipos de aços a serem fabricados e nas condições de lingotamento. A formação das fases mineralógicas no decorrer da solidificação dos pós fluxantes, têm um grande papel na transferência de calor do lingote para o molde. Entretanto, o comportamento de fusão é de certa forma mais impactante sobre a estabilidade da qualidade do aço fabricado e das condições de lingotamento. Foi observado por *Riboud* e *Roux* que as taxas de fusão deles que possuem a mesma composição química podem ser diferentes em relação a sua matéria-prima.

Basicamente a composição química é composto de CaO, SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, CaF₂. Alguns casos podem conter MgO, K₂O, e Li₂O e em outros, B₂O₃. É frequente encontrarmos também grafites em quantidades de 3-6%, para controle do comportamento de fusão dos fluxantes, que é dependente da composição química e constituição mineralógica.

Marshall et al, fizeram um estudo de investigação a respeito do comportamento de fusão de 4 dos lubrificantes comerciais. E nesse estudo foi realizada a investigação através de raio X da composição mineralógica antes e depois do tratamento térmico. Foram detectadas em ambas as matérias primas para a fabricação e minerais formados no processo do aquecimento, dependendo da origem e composição mineral: calcita(CaCO₃), magnesita(MgCO₃), sílica (SiO₂), silicatos sintéticos, carbonato de sódio(Na₂CO₃), fluorita(CaF₂), criolita(NaAlF₃), carbonato de potássio(K₂CO₃), boratos e diversos tipos de carbono, que pode ser grafite, negro de fumo, finos de coque são usados como matérias primas principais[28]. A formação de wollastonita (CaSiO₃), anortita (CaAl₂Si₂O₈), cuspidina (Ca₄Si₂O₇F₂), gelenita (CaAl₂SiO₇), entre outros, a combustão do carbono no período do seu aquecimento e sua influência sobre a temperatura de fusão foram apontados.

2.9. Interações químicas entre o aço e os fluxantes

A absorção das inclusões é muito observada ao longo do lingotamento contínuo. Essas inclusões podem mudar o comportamento das escórias líquidas de pó em relação a viscosidade e cristalização. Separar a contribuição de compostos que se sobressaem na escória devido as inclusões e pelas reações químicas é bem dificultoso e exige grande experiência profissional da operação.

Alguns aços, especialmente os micros ligados de alta resistência, tem teores elevados de elementos químicos como Al, Si, Ti, e Mn, que alteram as propriedades. Durante a fabricação desses tipos de aço, uma abordagem consistente para a separação do tipo de fluxante deve ser levada em consideração.

2.10. Temperatura de solidificação

Designa-se quando há um aumento extremo na temperatura durante o resfriamento, causando pelo início da solidificação da escória líquida com a formação de cristais. A camada de escória líquida formada pelo início da solidificação, forma uma camada sólida que pode ou não cristalizar. Esta espessura tem um grande efeito na taxa de transferência de calor pois o mecanismo envolve condução e irradiação. Porém quando possuem esta camada cristalina, tende a diminuir a transferência de calor.

2.11. Efeitos dos parâmetros na geração de defeitos superficiais

Assim que o processo de lingotamento da placa é encerrado, elas são direcionadas para o setor de laminação a quente. Porém podem ser identificados alguns defeitos vindos do lingotamento contínuo, entre eles podemos citar as marcas de oscilação provenientes de 04 (quatro) pontos:

- A profundidade das marcas de oscilação, a posição (se as marcas estão paralelas ou não), as marcas de oscilação isentas de materiais não metálicos e o rompimento de pele por agarramento.
- No ponto sobre rompimento da pele, é notável que a pele solidificada das regiões do menisco de 20 a 30 mm será menor que 05 mm das faces opostas, observados nas regiões A e C da figura abaixo.

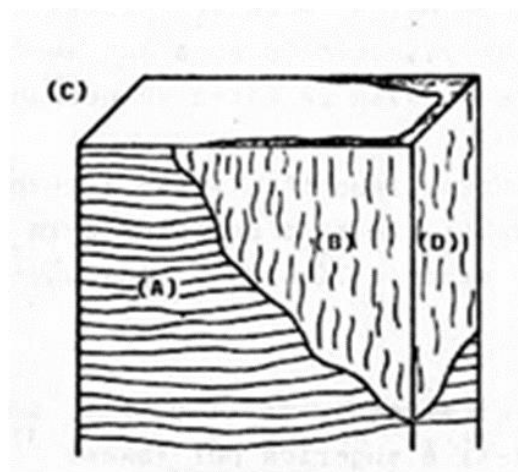


Figura 30: Representação da carcaça da placa de aço aos o rompimento.

Fonte: Fluxantes para lingotamento contínuo Carbox, 2006

As regiões representadas pelas letras B e D mostram as marcas irregulares e com estrias verticais. O rompimento de pele acontece na face D do molde, como pode ser observado abaixo.

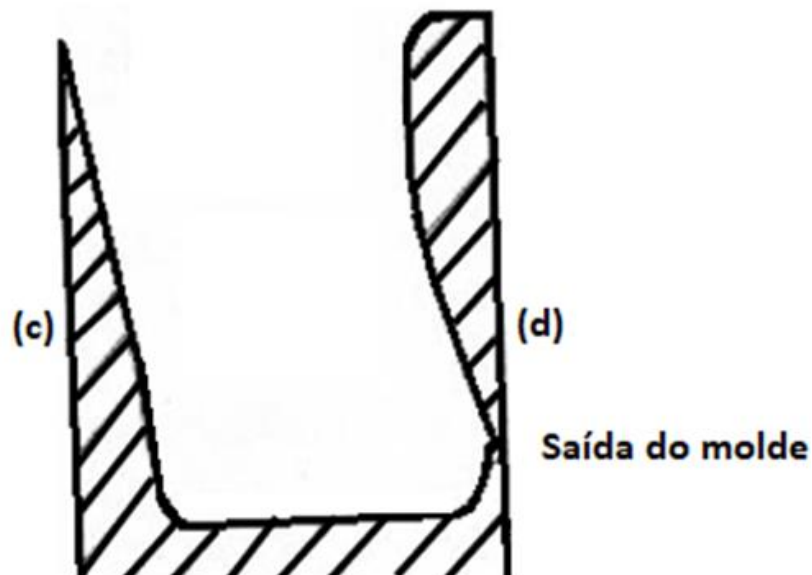


Figura 31: Perfil de solidificação das faces estreitas do molde.

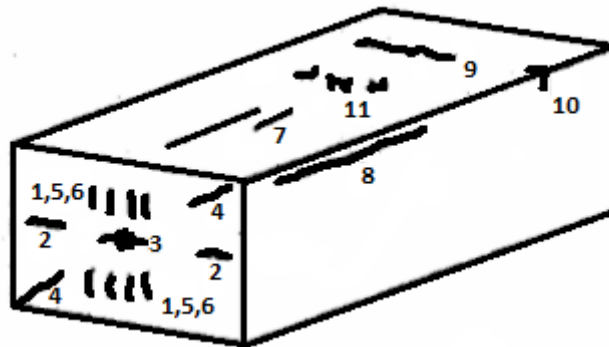
Fonte: Fluxantes para lingotamento contínuo Carbox, 2006

Para que não ocorra este defeito existem formas de prevenção, entre eles a utilização de fluxante que mantenha uma camada de escória líquida na interface placa e molde suficiente para que ocorra a lubrificação da interface. Outra característica importante é a velocidade adequada da fusão, observando as alterações das propriedades.

2.11.1. Defeitos superficiais e substanciais

No lingotamento contínuo, uma das dificuldades mais sérias com relação à qualidade do produto final, é com referência a formação de trincas (defeitos), que podem surgir em qualquer lugar da camada superficial do tarugo ou interior. Essas trincas superficiais normalmente simbolizam um problema maior do que as trincas internas, porque as superfícies ficam expostas no ar, oxidam e não possibilitam o caldeamento no decorrer do processo de laminação.

A figura abaixo representa esquematicamente os defeitos encontrados no lingotamento contínuo, tanto superficiais quanto internos.



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/Descurvamento
- 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 32: Tipos de trincas produzidas no lingotamento contínuo.

Fonte: BRIMACOMBRE, 1984.

Embora existam muitos tipos de trincas, é possível elaborar medidas para a prevenção delas. Nesse trabalho serão abordadas as trincas superficiais, longitudinais e transversais.

2.11.1.1. Trincas longitudinais

As trincas longitudinais são um exemplo claro dos defeitos superficiais, apresentando no caso de um aço peritético ($C > 0,08\%$; $C < 0,14\%$) relacionado não só ao resfriamento, mas como também uma camada vítrea não uniforme, podendo apresentar controle do nível do molde deficiente. Alto desgaste das faces do molde e má qualidade artificial. O movimento de oscilação é irregular com suporte ineficiente

abaixo do molde ou desalinhamento dos rolos. Conicidade insuficiente do molde, não atendendo as expectativas.

Para a condição de correntes abertas, esta oferece dificuldades, devido a exposição ao ambiente contendo partículas que se unem ao filme lubrificante. Neste tipo, utiliza-se um óleo de menor valor, por ser um processo em que se perde o lubrificante totalmente.

2.11.1.2. Trincas transversais

São defeitos que aparecem de forma mais desenvolvida nas quinas dos tarugos, com profundidade de aproximadamente de 1 a 15 mm. A origem dessas trincas se dá na região dos rolos de endireitamento ou se dão nas câmaras de refrigeração, segundo Pereira (2011). No caso do endireitamento, são criadas às baixas temperaturas, entre 700 a 900°C e no local de refrigeração por *sprays*, quando se tem grandes gradientes térmicos no sentido longitudinal. Essas trincas têm relação com a precipitação de nitretos principalmente o nitreto de alumínio. As trincas são acrescidas pela precipitação ativa de carbo-nitretos no decorrer do endireitamento do aço, no período de temperatura em que se nota uma diminuição enérgica na coesão dos grãos contidos em sua estrutura.

Na região do endireitamento tem a possibilidade da geração de trincas transversais e para isso, se faz necessário que as marcas provenientes das oscilações que são formadas durante o processo de lingotamento sejam muito acentuadas. Uma provável minimização do aparecimento dessas trincas é reduzir a concentração de elementos como o alumínio, vanádio, nitrogênio e o nióbio dentro de especificações do aço, segundo o mesmo autor.

Visando a minimização da profundidade dessas marcas de oscilação para valores inferiores a 0.2 mm, foram adotadas estratégias para se reduzir as trincas transversais nos produtos do lingotamento, como a otimização da viscosidade do fluxante e a oscilação do molde. Esta otimização está vinculada à manutenção apropriada da máquina de lingotamento, abrangendo o alinhamento dos rolos e o comando dos *sprays* para a refrigeração.

3. METODOLOGIA

Foi utilizado o fluxograma abaixo, a fim de otimização e organização das etapas do projeto, além de indicar os principais pontos do estudo.

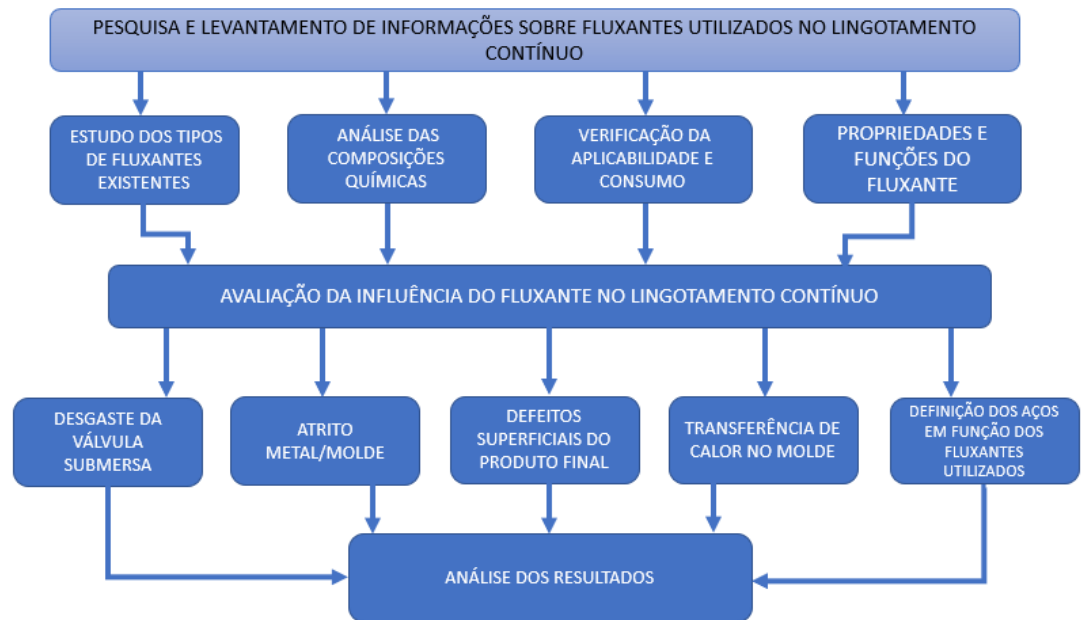


Figura 33: Fluxograma do processo de desenvolvimento do projeto.

Fonte: Elaborado pelos autores.

3.1. Desenvolvimento

- 1) O levantamento de dados referentes aos fluxantes aplicados no lingotamento contínuo de aços. Neste item, foi pesquisado e estudado como funciona o processo de lingotamento, como ocorre a solidificação do aço, ou seja, quando o ferro gusa é transformado da fase sólida para fase líquida. É citada a origem, que através de uma mistura de matérias primas e minerais, originam-se o lubrificante propriamente dito e suas principais funcionalidades.
- 2) No estudo, foi realizada uma pesquisa sobre os tipos de existentes como o pó, esférico e granulado. Análises baseadas em vantagens e desvantagens, e expondo que o pó é o tipo mais utilizado nas indústrias de lingotamento contínuo de placas.
- 3) Através dos estudos e pesquisas realizadas foi examinado a composição química que compõe os fluxantes. Foi tabelada, analisada cada elemento

químico adicionado a mistura do pó e a sua influência do teor de cada uma no produto final.

Composição Química	Quantidade (%)	Efeitos no comportamento do processo do lingotamento
SiO ₂	17 - 56%	Formadores de vidro
Al ₂ O ₃	0 - 13%	
B ₂ O ₃	0 - 19%	
Fe ₂ O ₃	0 - 6%	
CaO	22 - 45%	Óxidos ou modificadores básicos
MgO	0 - 10%	
BaO	0 - 10%	
SrO	0 - 5%	
Na ₂ O	0 - 25%	Alkalis
Li ₂ O	0 - 5%	
K ₂ O	0 - 2%	
F	2 - 15 %	Fluidização
MnO	0 - 5%	
C	2 - 20%	Controle de derretimento

Tabela 5: Composição dos elementos adicionados ao pó.

Fonte: Elaboração dos autores

- 4) O consumo do fluxante no molde pode nos informar se houver infiltrações de escória entre o molde e a chamada carcaça de aço, estimando a potencialização da lubrificação. O consumo depende principalmente das condições de processo e as particularidades dos materiais. Quando a velocidade de fundição aumenta, o consumo diminui. Este fato deve-se sobre a influência da velocidade em relação ao consumo. Foi realizada a análise da aplicação do lubrificante (escória sintética) e do momento que ele se funde na camada superficial do aço.

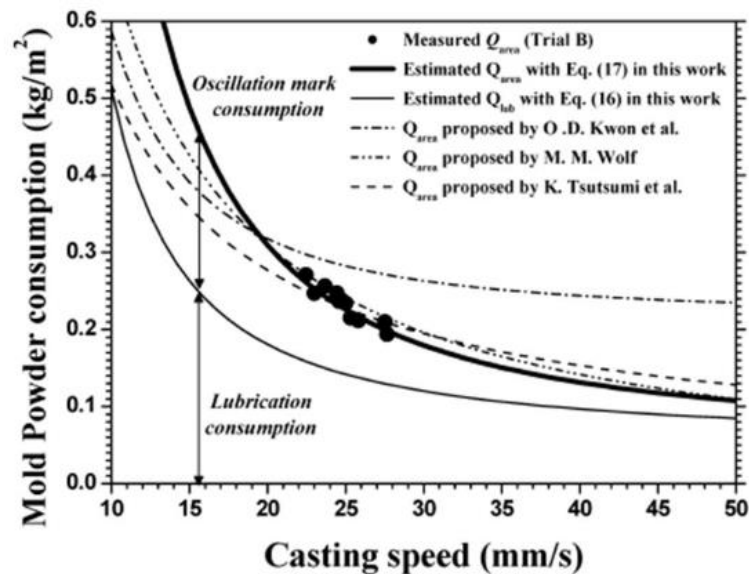


Figura 34: Influência da velocidade de fundição e o consumo do pó fluxante.

Fonte: *Mould Fluxes in the Steel Continuous Casting Process*, 2012.

5) As principais propriedades e funções dos fluxantes foram analisadas e sua influência direta na máquina de lingotamento e seus componentes. As propriedades que foram analisadas foram:

- Viscosidade;
- Taxa de fusão;
- Temperatura de cristalização;

As cinco principais funções que foram estudadas foram:

- Isolação da superfície do aço líquido
- Proteção contra a oxidação pela atmosfera
- Formação do filme lubrificante na interface placa e molde
- Absorção das inclusões
- Controle da taxa e transferência de calor

6) A avaliação da influência do fluxante no lingotamento contínuo foi feita após esse estudo dos itens anteriores. Dessa forma, foi possível fazer a análise dos elementos químicos que em alto teor como o alumínio (Al), silício (Si), titânio (Ti) e manganês (Mn) podem alterar as características destes.

7) Em função do tipo de lubrificante foi verificado o desgaste da válvula submersa após a aplicação do mesmo durante o lingotamento.

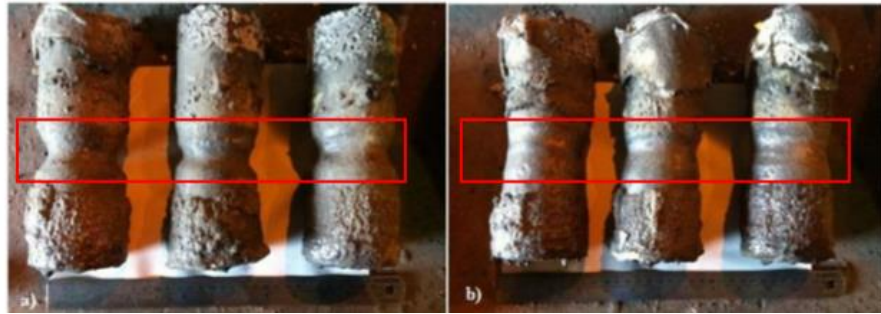


Figura 35: Válvula submersa após contato com o fluxante

Fonte: Adaptado de Silva, 2012.

- 8) O atrito que ocorre entre o metal e as paredes do molde.
- 9) Nesta etapa podemos observar os defeitos oriundos na camada superficial das placas depois que passam do lingotamento contínuo. Essas imperfeições se originam no molde, ainda no seu processo de solidificação da placa, ocorrendo pela falta ou excesso de lubrificação na interface placa do equipamento ou sendo originada pela camada vítrea não uniforme, ou movimento de oscilação do equipamento.



Figura 36: Superfície do tarugo com trinca transversal de canto.

Fonte: Adaptado de Silva, 2012.

- 10) A transferência de calor que ocorre no processo de solidificação da placa responsável da formação de uma camada vítrea, dependendo diretamente da velocidade e quantidade de lubrificante que é adicionado no molde. Em virtude dos fatos apresentados não podemos deixar de citar a oscilação do equipamento agindo diretamente na distribuição de pó fluxante para que não aconteça a ausência de lubrificação ou intervalos vazios, mais conhecidos como gap. Desta forma evitando o surgimento de falhas e defeitos na qualidade final do produto.
- 11) A análise dos resultados levando em consideração o teor de cada elemento adicionado ao pó, suas características e o resultado final da placa baseando originalmente em sua microestrutura e a influência que possui em cada tipo de aplicação das chapas de aço.

4. RESULTADO E DISCUSSÕES

4.1. Informações Iniciais

Estudos realizados nos mostram que a partir da adição do teor de elementos químicos pode-se originar um fluxante com propriedades designadas para atender as características do produto final. Os critérios utilizados para a seleção no processo de lingotamento podem ser constituídos quimicamente falando a partir de misturas feitas com outros elementos químicos. Na aciaria existe um processo conhecido como refino do aço, onde acontece a redução do teor de carbono que é dissolvido no ferro gusa no conversor e com isso o banho acaba ficando com excesso de oxigênio. O oxigênio em excesso pode caracterizar em um grande problema, pois ele pode ser detido no interior do aço resultando assim em defeitos como pequenas cavidades prejudicando suas propriedades mecânicas. Para que este problema não aconteça são adicionados elementos químicos com maior afinidade com o oxigênio do que o ferro, sendo designados desoxidantes, como exemplo o alumínio e silício. A combinação destes elementos formará óxidos denominados Al_2O_3 e SiO_2 . Estas fontes de inclusões possuem tamanhos microns. A quantidade adicionada precisa ser bem especificada e mínima pois elas possuem maior dureza que o aço, sendo que o surgimento das trincas é dada na vizinhança das inclusões e devido a este fato a presença das inclusões podem piorar as propriedades mecânicas. As etapas de refino do aço são classificadas na seguinte ordem:

- Desoxidação;
- Dessulfuração;
- Adições controladas de elementos de liga;
- Modificações de inclusões.

Dentro destas categorias de aços desoxidados em função do oxigênio, podemos citar três categorias que se deseja obter no produto final.

Classe	Tipo de inclusão	Descrição
1	Al ₂ O ₃	Inclusão de alumina
2	CA	Aluminato de cálcio
3	CA-CaS	Aluminato de cálcio com sulfeto de cálcio
4	CA-(Ca,Mn)S	Aluminato de cálcio com sulfeto de cálcio-manganês
5	MgO.Al ₂ O ₃	Espinélio de magnésio
6	MnO.Al ₂ O ₃	Espinélio de manganês (galaxita)
7	Mn-Silicato	Silicato de manganês
8	Al-Silicato	Silicato de alumínio ¹
9	Mn-Al-Silicato	Silicato de manganês e alumínio
10	CaO-CaS	Óxido de cálcio ou óxido de cálcio com sulfeto de cálcio
11	(Mn,Fe)S	Sulfeto de manganês e ferro
12	TiS	Sulfeto de titânio
13	(Mn,Fe,Ti)S	Sulfeto de manganês-ferro-titânio
14	CaS	Sulfeto de cálcio
15	(Mn,Fe,Ca,Ti,Mg)S	Sulfeto de manganês-ferro-cálcio-titânio-magnésio
16	OS	Oxissulfeto (óxido endógeno com sulfeto)
17	OCN	Oxicarbonitreto
18	OCN-S	Oxicarbonitreto com sulfeto
19	CN	Carbonitreto
20	CN-S	Carbonitreto com sulfeto
21	Exógena+Na	Inclusão exógena contendo sódio
22	Exógena	Inclusão exógena
23	Desconhecida	Partícula não classificada

Tabela 6: Classificação química dos tipos de inclusões que estão presentes em aços.

Fonte: *Qualitative and quantitative determination of micro-inclusions by automated SEM/EDX analysis*, 2004.

Neste item serão mostradas e discutidas as análises feitas da influência do fluxante no lingotamento contínuo e sua relação com os tipos de aços produzidos. Os resultados serão apresentados nos subitens a seguir:

- Viscosidade
- Taxa de fusão
- Velocidade de lingotamento
- Transferência de calor
- Desgaste da válvula submersa
- Atrito molde/metálico
- Defeitos superficiais nos produtos finais

4.1.1. Viscosidade

A viscosidade do fluxante é uma característica importante. Em uma breve definição, a viscosidade se caracteriza por resistência encontrada por um fluido em escoamento, quando este é sujeito a uma força externa. A viscosidade da escória líquida pode ser determinada a partir da sua temperatura e composição química.

A tabela abaixo mostra o efeito de parte dos constituintes em relação a sua viscosidade:

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

Tabela 7: Efeito da composição química do pó fluxante na sua viscosidade.

Fonte: Adaptado de *KROMHOUT*, 2011.

A unidade de medida para a viscosidade é o poise (P), sendo que 1 P é igual a 0,1N.s.m⁻². A viscosidade do fluxante é uma das características para boa operação e qualidade no lingotamento contínuo.

Conforme *Mills*, a viscosidade é um parâmetro de suma importância, pois:

- Define o consumo, que seria a quantidade que é adicionado por tonelada de aço lingotado. É o padrão de lubrificação que da interface entre a camada superficial do aço em solidificação e o molde, é fundamental para garantir a boa operação do lingotamento contínuo;
- Com o aumento da viscosidade, a retenção de escória no aço líquido normalmente é minimizada, prevenindo problemas de qualidade do aço;

A região do menisco interfere na espessura de oscilação em placas de aço, que podem diminuir com a seleção da viscosidade do fluxante;

A seguir, uma tabela comparativa do efeito dos componentes químicos na viscosidade e temperatura de fusão:

Acrescentando	A viscosidade	Temperatura de Fusão
CaO	Diminui	Aumenta
SiO ₂	Aumenta	Diminui
CaO / SiO ₂	Diminui	Aumenta
Al ₂ O ₃	Aumenta	Aumenta
Na ₂ O	Diminui	Diminui
F	Diminui	Diminui
Fe ₂ O ₃	Diminui	Diminui
MnO	Diminui	Diminui
MgO	Diminui	Diminui
B ₂ O ₃	Diminui	Diminui
BaO	Diminui	Diminui
Li ₂ O	Diminui	Diminui
TiO ₂	Não Altera	Aumenta
K ₂ O	Diminui	Diminui

Tabela 8: Efeito dos componentes químicos.

Fonte: Fluxantes CSN

A viscosidade inicial para aços baixo carbono acalmados ao alumínio precisa ser levada em consideração de acordo com a função do teor de alumina (Al₂O₃) a ser absorvido pela camada de escória. Para uma absorção de alumina entre os percentuais de 2 e 4%, é utilizado um fluxante inicialmente de 1,0 a 1,1 poise. Portanto é preciso que a viscosidade final esteja entre 2.0 até 3.0 poise. Se a capacidade de escoamento do líquido inicial se encontrar em um baixo percentual há grandes

chances de ocorrer um defeito superficial na parte central da face larga sendo mais conhecida como trincas longitudinais.

Considerando altas velocidades, entre 1.6 até 2.0 m/min, a necessidade de um lubrificante que atenda as características de temperatura de fusão baixas será direcionada de forma que permita uma transferência de calor maior.

Em vista dos argumentos apresentados para o tipo de elemento apresentado, no caso a alumina (Al_2O_3) a velocidade que atenderia de forma ideal este coeficiente estaria entre 1.0 e 1.4 m/min com o fluxante a uma temperatura significativa entre 1030 e 1070°C, tendo uma viscosidade entre 1.1 e 1.6 poise a 1300°C.

Quando falamos em viscosidade relacionadas a características em aços peritéticos médio carbono acalmados ao alumínio ou alumínio-silício é recomendada a utilização deles em uma temperatura elevada de cristalização cerca de 1140°C. A viscosidade apresentada em questão podem estar entre 0,9 e 2,5 a uma faixa de 1300°C, porém não é um fato generalizado, visto que cada caso é considerado de uma forma distinta. O grau de reoxidação do aço é fortemente considerado pois os altos teores de Al_2O_3 e SiO_2 podem fazer a alteração da viscosidade final e conseqüentemente alterando a transferência de calor.

Quando comparamos a viscosidade dos aços ultra baixo carbono nota-se que consiste na absorção paralela dos elementos Al_2O_3 e TiO_2 considerando grandes alterações na viscosidade final, visto que a composição química Al_2O_3 aumenta e TiO_2 reduz.

Em aços médio carbono (0,091 a 0,16% C), ou chamados também de aços hipo-peritéticos são mais susceptíveis a formação de trincas. Fluxantes para esse tipo de aço devem ser fabricados para a diminuição da taxa de transferência de calor, que tem como objetivo tornar mais fina a pele, de modo que a pressão ferrostática seja capaz de manter a mesma contra as paredes do molde, para garantir sua uniformidade). É recomendado o aumento da temperatura de solidificação afim de aumentar a espessura do filme de escória que se encontra solidificado sobre o molde(o filme sólido conduz menos calor que o líquido lubrificante, principalmente se contiver cristais), em contrapartida deve-se diminuir a viscosidade para garantia da lubrificação.

Para os aços hipoperitéticos, a contração gerada da transformação $\delta \rightarrow \gamma$, gera fortes tensões o que provoca a formação de trincas. Segundo menciona *MYASHITA et al.*,(1983), no lingotamento dos aços hipoperitéticos, a escória que é formada pela

fusão do pó fluxante deve possuir alta basicidade, alta viscosidade e deve ser compatível com as operações de lingotamento, possuir alta temperatura de cristalização afim de reduzir o fluxo térmico.

4.1.2. Taxa de fusão

Responsável pela formação da escória líquida em quantidade considerável entre a interface placa-molde, esta taxa varia da quantidade de carbono adicionada em sua composição e também do tipo de matéria prima em sua estrutura. Caso a velocidade da fusão for muito rápida, a espessura será excessiva, reduzindo assim a camada responsável pelo isolamento térmico consequentemente resfriando a superfície do pó. Agora se a velocidade for demorada irá diminuir a espessura de escória, influenciando diretamente na lubrificação ocasionando flutuações operacionais. Os fatores que influenciam diretamente na taxa de fusão são o teor e tipo de carbono utilizados em sua formação química.

Quando o pó fluxante é adicionado ao molde, passa por aquecimento e posterior fusão, por causa da transferência de calor que vem direto do aço líquido. Ocorre então, 4 camadas diferentes na região do molde:

- A camada de pó em sua condição natural, sem reagir;
- A camada de pó iniciando no processo de sinterização;
- A camada pastosa, onde ocorre a fusão do pó;
- A camada de escória líquida em contato direto com o aço líquido;

A taxa de fusão do fluxante, quando apropriada, proporcionará uma camada líquida adequada para dar continuidade ao processo, segundo Soares (1998). O consumo tem que necessariamente coincidir com a sua taxa de fusão.

Existem diversos tipos de testes que permitem a obtenção da taxa de fusão do fluxante, segue alguns listados abaixo:

- I. Teste do cadinho (Vieira, 2002)
- II. Teste do Cone Seger e teste do botão (Branion, 1986)
- III. Teste do gotejamento de escória (Branion, 1986)

No teste do cadinho, a amostra é posicionada em um forno a aproximadamente 1400°C dentro de um cadinho feito de alumina por prazo indeterminado, após, o cadinho é resfriado e o material é cortado ao meio. O índice da taxa de fusão é determinado a partir da porcentagem de pó que fundiu.

Segundo Bezerra (2005), o teste mais representativo para a indicação da taxa de fusão, consiste em mensurar a profundidade da escória líquida no passar do tempo, no equipamento mostrado por *Kawamoto et al* (1994), representado na figura abaixo. Esse ensaio necessita de 1t de aço líquido, por esse motivo é um teste caro e exige um período grande de preparação.

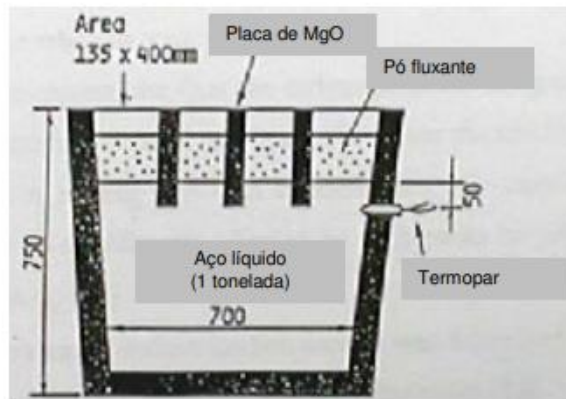


Figura 37: Diagrama esquemático do aparelho que foi elaborado por *Kawamoto et al* (1994).

Fonte: Bezerra (2005).

No teste do *coner Seger* e do botão, a determinação da taxa de fusão é feita através do tempo necessário para ocorrer a fundição da peça de forma característica, conforme mostrado na figura abaixo. Esse ensaio não mostra bem as condições de operação do pó fluxante no molde do lingotamento contínuo.

Método	Forma inicial	Ponto de Amolecimento	Ponto de fusão
Cone Seger	 Cone Seger	 Cone toca superfície do cadinho	 Superfície do cadinho desaparece
Botão	 Amostra cilíndrica	 Amostra cilíndrica arredondada	 Amostra em forma de hemisfério

Tabela 9: Desenho esquemático mostrando alguns testes utilizados para avaliação da taxa de fusão de escórias.

Fonte: Vieira, 2002.

No teste de gotejamento de escória fundida se emprega um equipamento que é semelhante a figura abaixo. É feito o aquecimento das amostras de 1400°C a 1500°C, ocorrendo a fundição do pó fluxante, que em estado líquido goteja em um vasilhame onde a massa é medida de forma contínua. A avaliação da taxa de fusão é feita a partir da variação da massa em função do tempo.

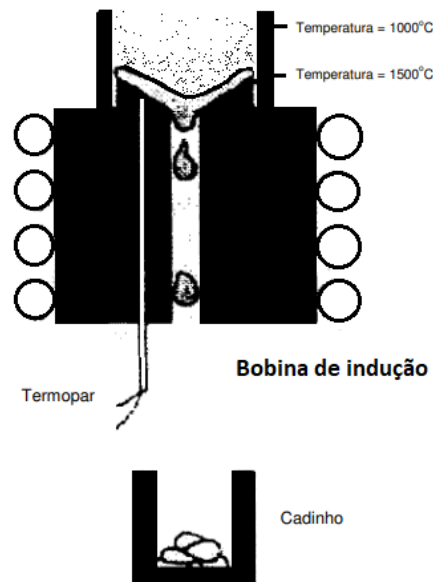


Figura 38: Desenho esquemático mostrando o teste de gotejamento.

Fonte: Vieira, 2002.

Bezerra (2005), apresentou um equipamento que permitisse avaliar comparativa da taxa de fusão de pós fluxantes. Ele possui dois cadinhos, contendo orifícios em sua parte inferior. Pode-se fazer uma análise comparativa de uma determinada escória, posta em um cadinho, utilizando outra de referência, posta em outro, já que as condições são as mesmas para ambos.

A taxa de fusão é totalmente dependente das matérias-primas que constituem o lubrificante e suas temperaturas de fusão, tamanho e formato dos grãos, além de contar com a quantidade de carbono. Este elemento químico adicionado ao fluxante, e quando é adicionado em tipos e quantidade de forma adequada, possui grande influência na velocidade de fusão, tendência a sinterização, propriedades ligadas ao isolamento térmico e a formação de *slag rim*. Tratamento sob vácuo. As partículas de Carbono são os agentes que não se misturam aos outros minerais e são mantidas separadas durante o processo de fusão. Quanto maior for o quantitativo de carbono

em sua microestrutura, maior será o tempo para o mesmo iniciar as reações de fusão, com isso menor será a taxa de fusão deste material.

Sendo estas camadas, fluxante in natura, fluxante sintetizado, fluxante enriquecido com carbono (glóbulos minerais fundidos e partículas de carbono) e a camada líquida.

É observado os glóbulos de matérias primas e partículas de carbono separadas devido a sua composição química.

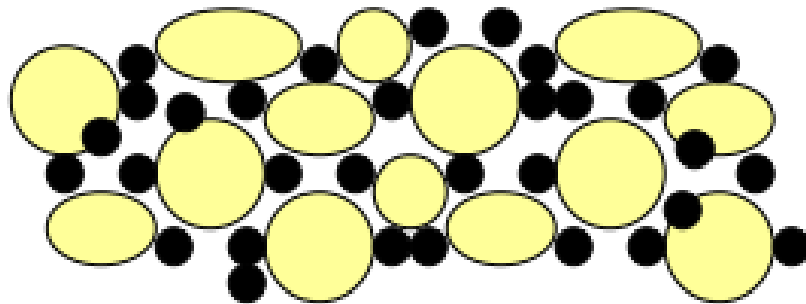


Figura 39: Diagrama esquemático de glóbulos das matérias-primas do fluxante separados por partículas de carbono.

Fonte: *Quantitative and quantitative determination of micro-inclusions by automated SEM/EDX analysis*, 2004.

Existem métodos relacionando a taxa de fusão empiricamente com os teores de carbono presentes no fluxante e temperatura de fusão dele. Um estudo realizado de acordo com Kawamoto et al., foi elaborado um método que se baseia na medida de alteração da espessura do fluxante líquido gerada sobre o aço líquido com uma temperatura inicial de 1550°C. Na superfície com capacidade de 1 tonelada foi efetuada uma separação com placas de MgO em quatro partes, conforme figura abaixo:

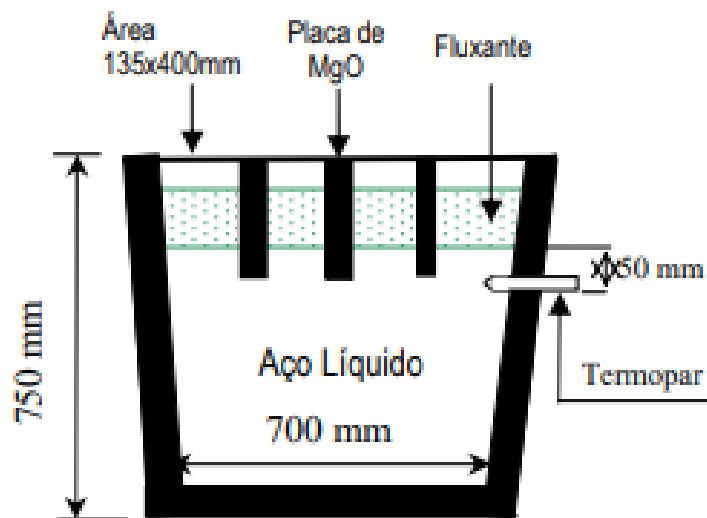


Figura 40: Diagrama esquemático do equipamento utilizado.

Fonte: *Quantitative and quantitative determination of micro-inclusions by automated SEM/EDX analysis*, 2004.

Em cada parte, com uma área de 135 x 400 mm, foi avaliada uma amostra de cada tipo. A variação da escória foi efetuada através da imersão de três arames: ferro, cobre e alumínio. Como a temperatura destes três elementos correspondem aproximadamente a temperatura do aço e fluxante líquidos, a diferença no comprimento dos arames após a imersão estima a espessura do filme líquido e o arame de alumínio corresponde para determinação da espessura do mesmo. Feita a técnica da imersão conforme citado anteriormente, de acordo com o estudo realizado por *Kawamoto*.

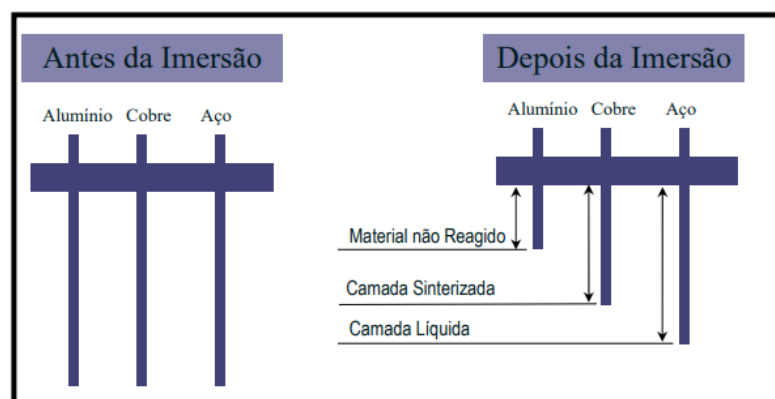


Figura 41: Método dos três arames utilizado para caracterizar as camadas do fluxante sobre o aço líquido.

Fonte: *THOMAS ZHANG*, 2003.

A partir destes experimentos foi notável a taxa de fusão dos fluxantes diminui não só à medida que o teor de carbono aumenta, mas também com o uso de grãos mais finos.

Supradist, 2003 desenvolveu também um modelo matemático para simular resultados obtidos em laboratórios experimentais, onde foi possível verificar as diferenças de teores de carbono que são originadas na camada de fluxante sobre o aço líquido no molde com regiões de conteúdo mínimo de carbono, em uma região moderada de 500°C, causada pela combustão com oxigênio e outra em temperatura mais elevada podendo ultrapassar 750°C, devido a combustão com dióxido de carbono. É interessante ressaltar que a camada enriquecida com carbono entre as regiões com teores mais reduzidos dele, quando entra em contato com o aço líquido em situação de oscilação no molde, pode gerar contaminação de carbono, principalmente me aços ultra baixo carbono.

4.1.3. Velocidade de lingotamento

Podemos observar na figura abaixo, a ilustração da faixa de temperatura de solidificação que apresenta ótimas condições para que aconteça o lingotamento contínuo de placas de aços acalmados ao alumínio, a velocidade de lingotamento precisa estar entre 1,0 até 1,7 m/min.

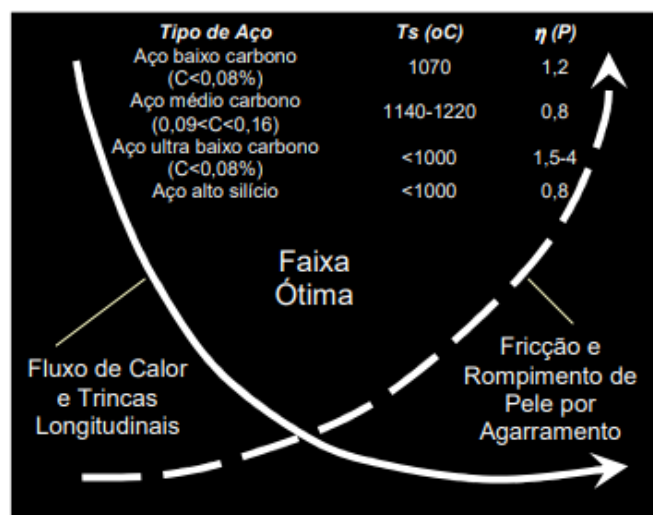


Figura 42: Características da faixa de temperatura da solidificação e da viscosidade para aços acalmados a alumínio com velocidades de 1,0 a 1,7 m/min.

Fonte: Adaptada de tópicos de lingotamento, 2020.

Análises realizadas comprovaram o perfil de diferença térmica entre os fluxantes postos a prova compostos por diferentes elementos químicos, é verificado através de ensaios onde a amostra A não mostra um pico consequente de uma reação exotérmica indicando tendência para a cristalização. Em contra partida os lubrificantes de aço médio carbono ($0,09 < C < 0,16\%$) proporcionam características de cristalização durante o resfriamento da amostra fundida, identificados graças aos picos exotérmicos. Esta é a maior diferença entre os diferentes tipos de composição para lingotamento de aço baixo ($C < 0,08\%$) e médio carbono, onde o mesmo é desenvolvido para que tenha uma tendência a cristalização em temperaturas mais altas, com isso garante o controle acentuado da transferência de calor da placa de aço em solidificação e o molde, prevenindo assim de defeitos superficiais. Importante lembrar que o fluxante irá apresentar estrutura isomorfa até temperaturas de 950°C para aços com baixo carbono.

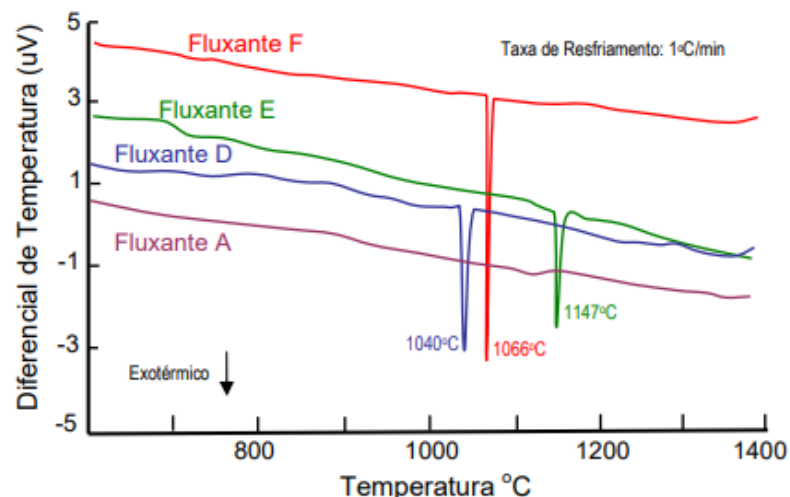


Gráfico 3: Curvas de análise térmica para os fluxantes A, D, E e F.

Fonte: Adaptada de tópicos de lingotamento, 2020.

BARCELLOS, 2008, explica que a homogeneidade térmica para os aços hipoperitéticos, ao longo do lingotamento, pode ter uma restauração pela aplicação de fluxantes que formam um filme de escória mais opaco, de modo a filtrar o calor retirada do aço. Porém, por conta da dificuldade na extração de calor, as velocidades mais baixas contribuem a formação de uma pele mais rígida, capaz de ter resistências a pressões ferrostáticas e termodinâmicas abaixo do molde. Em relação ao consumo específico do pó, tem a diminuição do consumo com o aumento da velocidade de

lingotamento e também com a diminuição da amplitude de oscilação do molde, como sugere o gráfico 4.

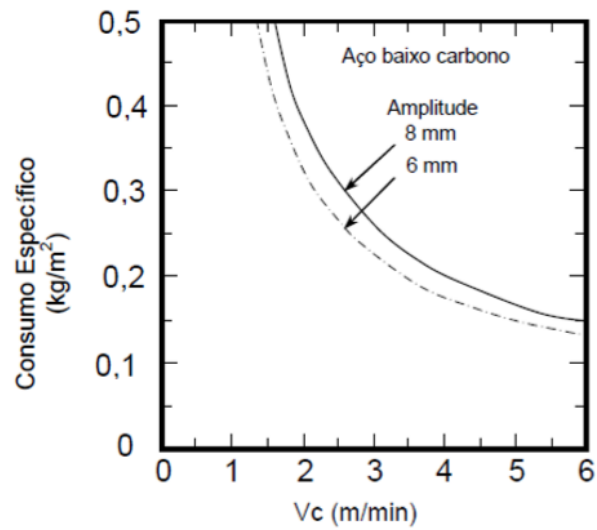


Gráfico 4: Efeito da velocidade de lingotamento e da amplitude de oscilação sobre o consumo específico de fluxante.

Fonte: WOLF, 1984.

Conforme mencionado, com o aumento da velocidade o consumo específico de pó fluxante [Kg de pó/m² de superfície] diminui, o que poderia levar a *breakout* por falta de lubrificação. Para reduzir esta chance, viscosidade e temperatura de fusão devem ser reduzidas, de preferência a manter o consumo específico.

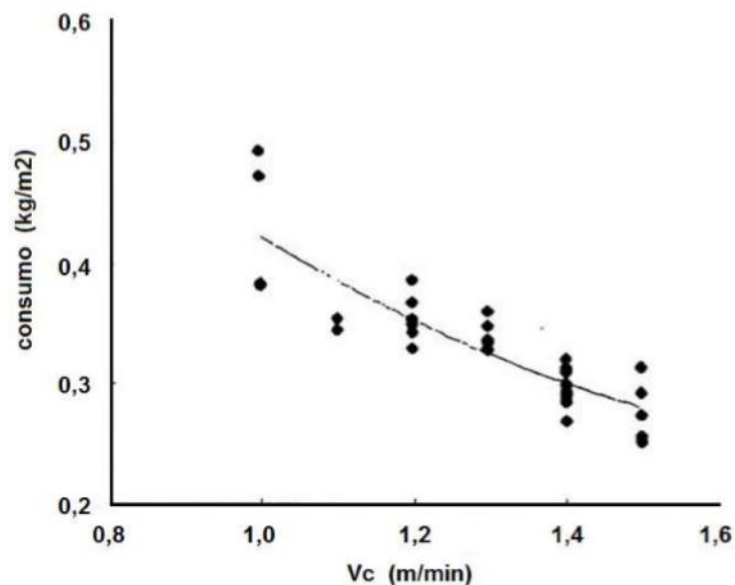


Gráfico 5: Consumo específico de pó em função de velocidade de lingotamento.

Fonte: Tópicos de lingotamento, 2020.

4.1.4. Transferência de calor

Os aços acalmados e desoxidados com Al para poder atingir de 4 a 2 ppm de oxigênio dissolvido. O produto que é resultante deste processo é a alumina. Todavia neste caso com escórias contendo aluminatos de sódio para que desta maneira ocorra a redução do teor de oxigênio não surte efeito.

Do controle de alumina presente no aço como inclusão. O teor que é dissolvido pelo tratamento cálcio modificando as inclusões de alumina para aluminatos de cálcio.

Visto que as inclusões de alumina são resultantes da desoxidação do aço e da contaminação do aço líquido através das partículas originadas dos refratários.

As inclusões podem ter origens em desoxidante como ferroligas (como por exemplo o FeSi) no qual podem ter o alumínio como impureza. Podemos observar na tabela abaixo algumas das propriedades encontradas nesta fórmula.

Nome	Fórmula	P.F (°C)	Densidade (g/cm ³)	Dureza Vickers (HV)
Alumina	Al ₂ O ₃	2050	3,96	3000-4500

Tabela 10: Propriedades físicas da alumina

Fonte: WOLF, 1984.

As formações estruturais deste elemento podem ser: dendríticas, que é formada durante a desoxidação do aço com alto teor de oxigênio; de estrutura em forma de coral, que são formadas através do amadurecimento de *Ostwald* de inclusões dendríticas; também apresentando aglomerados de partículas que é composta por colisões de pequenas esferas de alumina; e de grandes esferas de óxido complexos.

Seguem nas figuras as fotos do formato das microestruturas de inclusões de alumina feitas em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

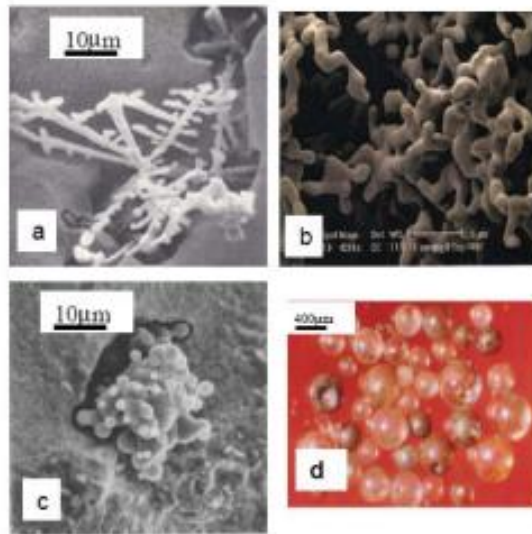


Figura 43: Imagens de microscópio eletrônico de varredura de inclusões de alumina.

Fonte: (a) Estrutura dendrítica, (b) estruturas em forma de coral (c) aglomerados de partículas; (d) grandes esferas de óxidos complexos.

Obs.: Amadurecimento de *OSTWALD* trata-se de um processo a partir de precipitação, sendo que as estruturas menores tendem a dissolução sobre a superfície das estruturas maiores, fazendo com que as estruturas cresçam à custa das menores.

As inclusões de alumina podem ser apresentados sob a forma de alguns aluminatos de ferro globulares ou na seguinte morfologias como esferas, poliedros, placas, dentritas ou clusters (conjunto de pequenas inclusões esféricas ou irregulares), pois segundo *DEKKERS* em função de um teor decrescente de oxigênios dissolvidos no aço são formadas inclusões de aluminatos de ferro, dentritas de alumina e por fim os poliedros de alumina. Ao longo da década foi possível observar que o nível de oxigênio dissolvido no aço tem apresentado uma redução considerável e estas inclusões de aluminato de ferro não são mais observadas e ocasionalmente são observadas as dentritas.

Já os aços peritéticos médio carbono acalmados ao alumínio ou alumínio-silício são os aços cujo teor de carbono situa no intervalo de $0,09 < \% < 0,15$. No grupo de adição de aços peritéticos acalmados ao alumínio e silício, uma parte dessa mistura é tratada via forno panela, processo responsável onde acontece a dessulfuração e é injetada os elementos Ca-Si (cálcio e silício). Habitualmente são aços com aplicações

voltadas para estruturas em geral, dentre elas estampagem média, botijões e tambores. Quanto aos aços peritéticos podemos observar em sua composição química as seguintes quantidades:

TIPO DE AÇO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO (%)									
	C	Mn	P _{máx.}	Si	S	Al	Ti	Nb	Ca _{máx}	N
P	0,14	1,3	0,02	0,27	<0,008	0,026	0,014	0,025	0,006	0,005

Tabela 11: Composição química dos aços do grupo II (Aço peritético).

Fonte: *WOLF*, 1984.

Os aços ultra baixo carbono apresentam carbono menor que 35ppm. Para que aconteça essa especificação total direcionada é a estação de desgaseificação. Geralmente sua aplicabilidade designa-se em estampagem extra profunda, embalagens e eletrodomésticos em geral. Podemos observar na tabela abaixo a composição química relacionada a este grupo em específico e sua quantidade:

TIPO DE AÇO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA DO AÇO (%)							
	C	Mn	P	Si	Smáx	Al	Ti	N
U.B.C	0,0035	0,15	0,013	0,01	0,013	0,050	0,075	0,0035

Tabela 12: Composição química dos aços do grupo III (aço ultra baixo carbono).

Fonte: *WOLF*, 1984.

O aço com médio teor de carbono, contém entre 0,30 e 0,60 % de carbono. Também contém um teor de manganês entre 0,61 e 1,65%. Este tipo de aço proporciona um bom equilíbrio entre resistência e ductilidade, e é comum em muitos tipos de peças de aço, como por exemplo acoplamentos, engrenagens e virabrequins.

O carbono e o teor de manganês do aço carbono médio fazem a têmpera e o revenido o método mais comum de tratamento térmico para este tipo de aço. Este processo envolve geralmente o aquecimento do aço repetidamente para menos de 1333 ° F (cerca de 723 ° C), e arrefecendo rapidamente por têmpera em um líquido tal como óleo ou água. A temperatura e o tempo do presente processo permitem que o fabricante possa controlar com precisão as propriedades finais do aço.

O processo de endurecimento é um método que só afeta o exterior do aço. Isto produz uma superfície dura, resistente à água exterior e com um interior mais dúctil. O aço carbono é frequentemente endurecido porque é difícil de trabalhar uma parte

de aço de espessura grossa. O aço com mais agentes de liga do que o de aço carbono médio tem uma maior capacidade de ser endurecido, facilitando assim o seu manuseio. Vale saber que, apesar da grande variedade de metais existentes em todo o mundo, a maioria não é empregada em estado puro, porém em ligas com propriedades alteradas em relação ao material inicial, no que tange, entre outras coisas, a redução dos custos de produção como um todo.

Os aços baixos carbono possuem, normalmente, baixas resistência, dureza e altas tenacidade e ductilidade. Além disso, são bastante usináveis e soldáveis e apresentam baixo custo de produção. Estes aços normalmente não são tratados termicamente. Entre as suas aplicações típicas estão as chapas automobilísticas, perfis estruturais e placas utilizadas na fabricação de tubos, construção civil e pontes.

De acordo com *Rusnakova et al.*, 2010, a temperatura T_{break} tem um aumento conforme as concentrações de CaO e K₂O e cai com o aumento das dos teores de MgO, MnO Fe₂O₃, TiO₂, Na₂O, Al₂O₃, SiO₂ e fluoretos. A determinação da temperatura, T_{break} , estabelece a espessura da camada de escória sólida. A Figura demonstra um exemplo do efeito do alto teor de B₂O₃ sobre o valor de T_{break} , de escórias feitas a partir de três fluxante diferentes contendo B₂O₃.

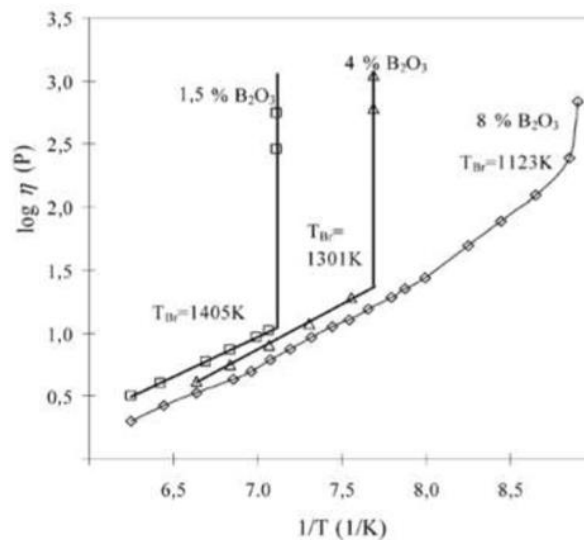


Gráfico 6: Variação da viscosidade como inverso da temperatura para três pós fluxantes contendo B₂O₃.

Fonte: *FOX et al.* 2004.

Fluxos de calor menores são aconselhados para aços hipoperitéticos, aços sensíveis à depressão, são indicados pós fluxantes com valor maior de T_{break} , figura abaixo:

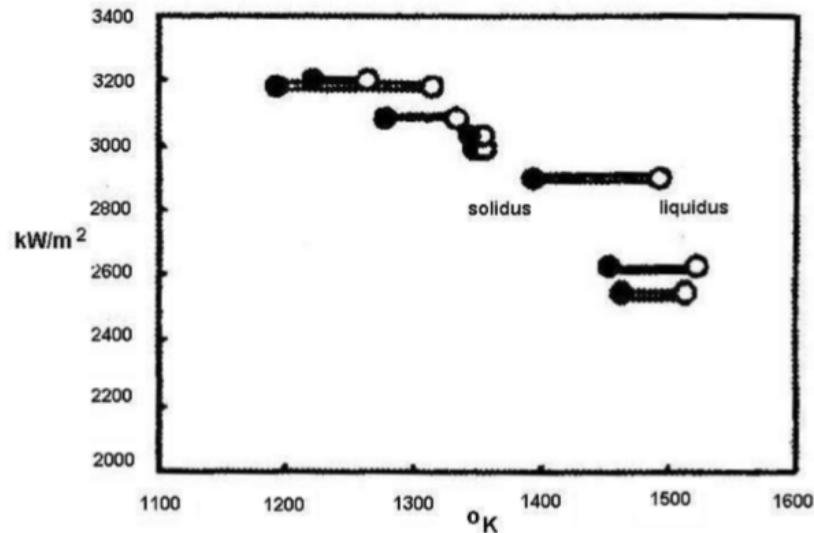


Figura 60: Fluxo de calor versus T_{break}

Gráfico 7: Fluxo de calor versus T_{break} .

Fonte: Tópicos em lingotamento, 2020

4.1.5. Desgaste da válvula submersa

Foi realizado um estudo, dos efeitos de dois fluxantes usados durante o lingotamento contínuo em relação ao desgaste da válvula submersa. Com baixos teores de CaO e altos teores de SiO₂ o desgaste da válvula submersa ficou de forma mais acentuada.

Nesta avaliação, o fluxante com menor teor de CaO e basicamente com o mesmo teor de SiO₂ que o outro utilizado, fez com que a válvula submersa tenha um maior desgaste. Esses resultados estão conforme citados por *Cirilli et al.*, (2008). Segundo eles, a atividade baixa de CaO resulta no aumento da habilidade da escória em dissolver CaO, o que ocasiona a diminuição da vida útil do refratário da válvula submersa, principalmente devido a degradação dos grãos de ZnO₂. De acordo com esse estudo, o fluxante com menor teor de CaO não é apropriado para aplicação em crescimento de sequenciamento.

Durante esses testes, foram consideradas tempos e temperaturas de pré aquecimento das válvulas submersas, para os lubrificantes em questão. Porém caso não tenham sido exatamente iguais para os fluxantes em estudo, pode haver grandes chances de erro, pois segundo *Yingnakorna* (2014), a temperatura tem uma influência direta na vida útil da válvula submersa. Em testes executados por *Devic* (2007), foi notado que teores baixos de wollastonita no fluxante pode frisar a erosão da válvula.

As válvulas submersas utilizadas nos testes, podem ser vistas na figura abaixo, sendo evidenciado de vermelho a região que ficou em contato direto com o mesmo.

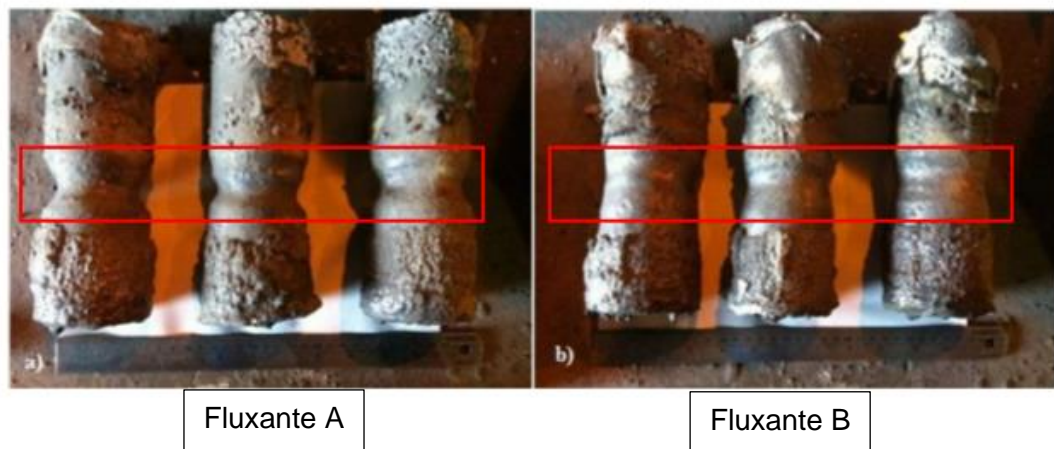


Figura 44: Destaque da região em que houve o contato direto com os fluxantes A e B, após testes durante o lingotamento o aço SAE 1046 Mod.

Fonte: Tópicos em lingotamento, 2020.

4.1.6. Atrito molde x metal

Os parâmetros que interferem no atrito entre pele e molde são representados na figura. O atrito geralmente é dividido entre dois tipos, que são: atrito sólido (que se contra entre a camada sólida de lubrificante e o molde) e líquido (que se situa entre a pele e camada sólida de fluxante). Algumas representações de operações como a viscosidade e temperatura de solidificação se interligam para definição dos valores de atrito.

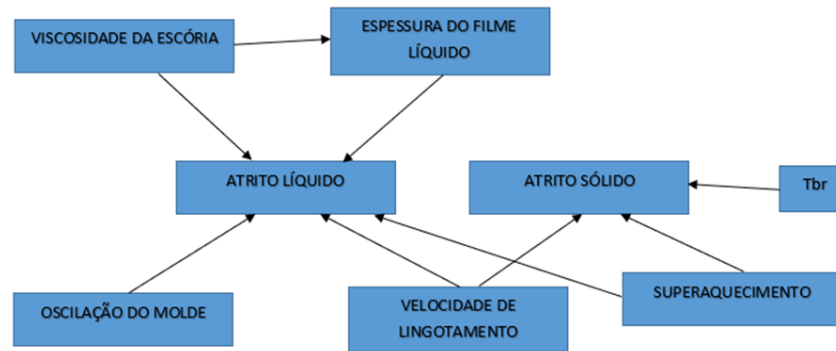


Figura 45: Parâmetros que afetam a força de atrito entre a parede do molde e o veio.

Fonte: Adaptado de *MILLS et al.*, 1995.

Existe uma relação entre a temperatura de solidificação da escória do fluxante e o T_{break} , por isso essas grandezas são utilizadas para avaliação da facilidade de formar o filme de escória líquida, como mostra a figura 46. Esta figura mostra como se poderia avaliar a proporcionalidade entre filme líquido e filme sólido no gap em conformidade da temperatura de solidificação, considerando a variação linear de temperatura e a conhecida abertura do *gap*.

Deste modo os valores progressivos de temperatura de solidificação (ou de T_{break}) nos mostram a formação de filmes líquidos de espessura decrescente e, conseqüentemente, valores crescentes de atrito, com grandes chances de ruptura da pele. Espessuras crescentes de filme sólido procedem em menor fluxo térmico e a diminuição das trincas longitudinais.

O atrito excessivo entre a pele e o molde pode ocasionar defeitos, resultando em formação de trincas, depressões e marcas de oscilação. Depressões e marcas de oscilação são eventualmente ocupadas por escória. Pode ter a diminuição local de fluxo de calor (em função da resistência térmica adicional provida pela escória), com superaquecimento localizado e aumento no crescimento excessivo de grãos. As depressões danificam a qualidade da camada superficial da pele. Em casos de fricção excessiva, pode haver o rompimento da pele, o que leva ao *breakout*.

As forças de atrito podem ser calculadas e medidas. A figura 46 mostra as características de oscilação do molde (senoidal; não senoidal) interferem na força de atrito.



Figura 46: Mecanismos de formação de depressão longitudinal e trincas, em razão de colamento do veio sobre a parede do molde.

Fonte: *BRENDZY*, 1990.

4.1.7. Defeitos superficiais do produto

Na região do menisco, as circunstâncias de turbulência da poça de aço, favorece a carburação do aço pelas partículas de carbono. Este evento é rejeitado para o lingotamento contínuo de aços baixo e ultrabaixo carbono. A figura 47 sugere procedimentos de carburação do aço pelo pó fluxante: pela interface entre a pele e o cordão de escória; pelo afloramento do fluxo de aço por meio da camada de escória líquida. *LEFEVRE* (1997) sugere modificação da substituição do carbono do pó fluxante por nitreto de silício (Si_3N_4) com a finalidade de diminuir a carburação do aço.

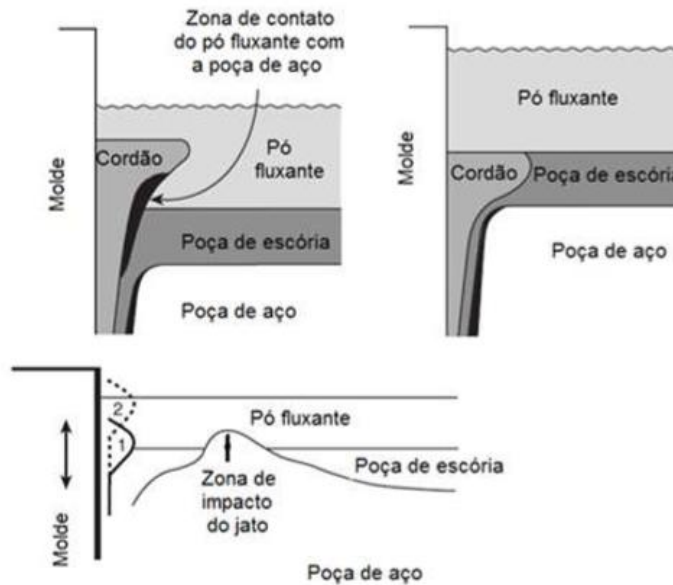


Figura 47: Mecanismo de carburação do aço pelo carbono do pó fluxante.

Fonte: THOMAS, 2003

Um estudo do diagrama de fases Ferro-Carbono evidencia que aços tais que PF ~1 são formados, em seguida da solidificação, de 100% de ferrita δ , com a redução da temperatura da pele, esta ferrita se modifica em austenita e o efeito da contração se destaca. À medida que a composição se encontra na faixa de 0,18 %C (PF ~0,8) menos ferrita se encontra disponível para esta mudança. Então, aços com potencial de ferrita de aproximadamente 1 são mais propícios a constituírem peles com depressões. Saindo desta faixa os aços são ferríticos ou austeníticos na faixa de temperatura de destaque e susceptíveis ao colamento (ao molde).

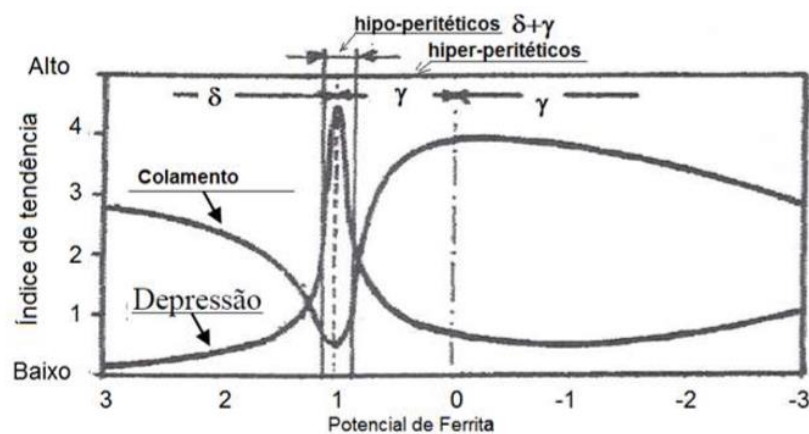


Figura 48: Tendência de depressão ou agarramento do veio sobre a parede do molde em função o potencial ferrítico do aço.

Fonte: WOLF, 1991

Segundo THOMAS (2003) os aços hipoperitéticos são mais propensos a adquirir o desenvolvimento de trincas longitudinais, são mais reduzidas as taxas de extração horizontal de calor em comparação com aços baixo carbono, com as mesmas circunstâncias de lingotamento.

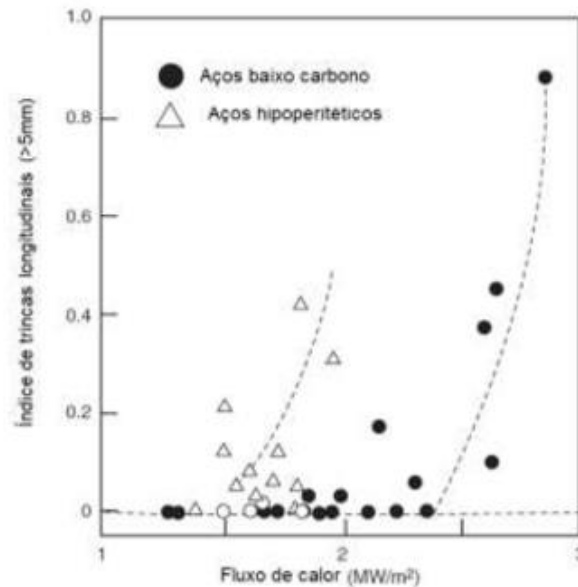


Figura 49: Efeito do fluxo horizontal de calor e da categoria do aço sobre o índice de formação de trincas longitudinais no veio.

Fonte: THOMAS, 2003

Muitos dos defeitos nos produtos são originados nos moldes, portanto trata-se de uma etapa crítica no processo de lingotamento contínuo. Um dos controles de incidências de deformidades superficiais é a adequada lubrificação do molde, que se trata de uma das principais funções dos fluxantes.

Ainda conforme o estudo, o fluxante B teve rejeições menores que o fluxante A. O fluxante A apresentou condições baixas de lubrificação do molde e essas circunstâncias reflete diretamente na formação de defeitos superficiais nos produtos finais.

Alguns defeitos podem ser observados nas figuras seguintes, trata-se de trincas longitudinais e transversais, devido ao agarramento dentro do molde, por consequência da deficiente lubrificação.



Figura 50: Superfície do tarugo com trinca longitudinal de canto.

Fonte: Tópicos em lingotamento, 2020.



Figura 51: Superfície do tarugo com trinca transversal de canto

Fonte: Adaptado de SILVA, 2012.

No ponto de vista de rejeição o fluxante B trouxe melhores de condições ao processo de lingotamento, já que através do estudo se tornou perceptível a redução de defeitos superficiais nos produtos. As trincas das figuras anteriores foram minimizadas através da aplicação do fluxante B. A diminuição desse percentual está ligada diretamente à lubrificação ideal do molde, evitando o atrito no contato metal/molde.

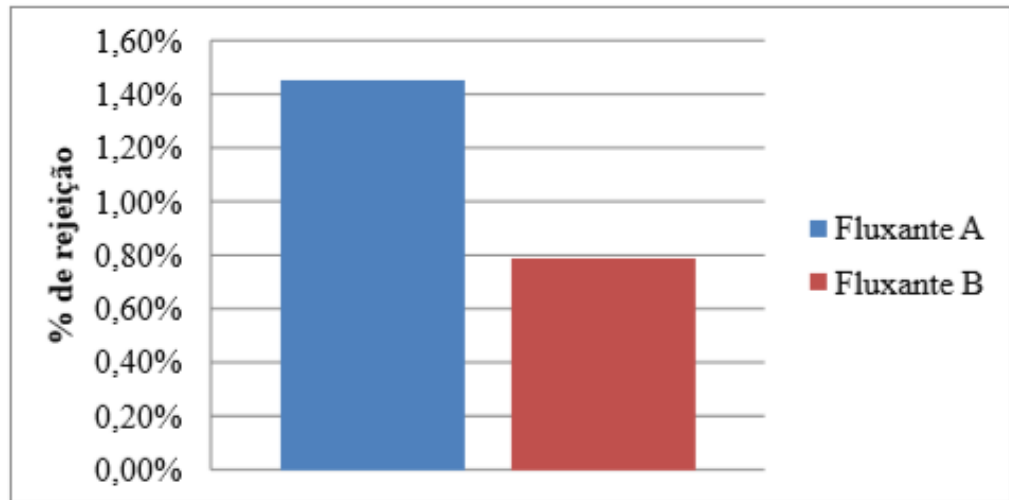


Gráfico 8: Índice de rejeição por defeitos superficiais dos produtos de lingotamento contínuo em função dos fluxantes estudados.

Fonte: Tópicos em lingotamento, 2020.

Como observado no gráfico 8, houve a redução de 47% na rejeição de produtos devido a defeitos nas superfícies, reduzindo de 1,49% para 0,79% de rejeições.

5. CONCLUSÃO

Através desse estudo realizado, das composições químicas, das influências do fluxante no processo de lingotamento contínuo, elaboramos uma tabela comparativa com alguns aços em relação a viscosidade, taxa de fusão, velocidade de lingotamento, transferência de calor e temperatura de cristalização.

Tipos de aço	Viscosidade do fluxante	Taxa de fusão	Velocidade de lingotamento	Transferência de calor/Temperatura de cristalização
Aços baixo carbono acalmados ao alumínio	Considerando a absorção de Al_2O_3 entre 2 e 4%, a viscosidade inicial fica entre 1.0 e 1.1 poise e a final entre 2.0 a 3.0 poise	1030 a 1070°C	1.0 a 1.4 m/min	Utiliza-se fluxantes com baixa temperatura de fusão para permitir uma maior transferência de calor.
Aços peritéticos médio carbono acalmados ao alumínio ou alumínio-silício	Viscosidade situada entre 0.9 e 2.5 poise	1300°C	A velocidade de lingotamento pode ser alterada, pois deve-se considerar o grau de reoxidação do aço, pois ele possui altos teores de Al_2O_3 e SiO_2 .	Pode ocorrer a reoxidação do aço, devido ao alto teor de Al_2O_3 e SiO_2 , com isso altera-se a taxa de transferência de calor. Recomenda-se a utilização de fluxantes com Tc acima de 1140°C.
Aços ultra baixo carbono	Utiliza-se fluxantes com alta viscosidade 3.5 a 4.0 poise	1030 a 1070°C	Quanto menor o teor de carbono menor será a velocidade de lingotamento.	Recomenda-se a utilização de fluxantes com baixa temperatura de solidificação afim de aumentar a troca de calor.

Aço baixo carbono	Utiliza-se a viscosidade original de 1.0 poise	1030 a 1070° C	A velocidade de lingotamento se dá em função do teor de carbono e entre outros fatores. Desse modo quanto menor o teor de carbono menor a velocidade de lingotamento.	Tendência a cristalização suprimida.
Aço médio carbono	Utiliza-se a viscosidade original de 0.9 a 2.5 poise	1130 a 1220° C	Certamente taxas de extração menores de calor requerem uma pele menos espessa, de modo que a velocidade de lingotamento precisa ser reduzida.	Temperatura de cristalização (°C) de 1040 a 1180. Fluxantes para este tipo de aço necessitam ser elaborados a fim de reduzir a taxa de transferência de calor (o objetivo desta ação seria tornar mais fina a pele, para que a pressão ferrostática seja capaz de mantê-la contra as paredes do molde o que, e garantir sua uniformidade)

6. REFERÊNCIAS

1. BEZERRA, M.C.C., VALADARES, C.A.G., CAPOCCHI, J.D.T., Avaliação da taxa de fusão de fluxantes para lingotamento contínuo de aços, in XXXVI, seminário de fusão, refino e solidificação dos metais, 2005. Acesso em 04/01/2020, às 13:50.
2. BARCELLOS, M. A. C - Modelo para Predição da Ocorrência de Alarmes de Colamento de Aço no Molde utilizando Lógica Fuzzy - Dissertação de Mestrado, REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, 2008. Acesso em 06/01/2020, às 10:13.
3. SILVA, G.F.B. L – Lingotamento contínuo & defeitos de laminação. DEMET/Escola Politécnica/USP. 2012. Acesso em 10/01/2020, às 13:00.
4. MILLS, K.C – Mould Powder for Continuous Casting. Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, 1995 Acesso em 13/01/2020, às 09:44.
5. MILLS, K.C; YUANI, L & JONES, R.T - Estimating the physical properties of slags - J. S. Afr. Inst. Min. Metall. vol.111 no.10 Johannesburg Oct. 2011. Acesso em 13/01/2020, às 14:00.
6. ASHBURN, R. et al. Lake Erie Steel: Slab Caster Conversion. In: Steel Making Seminar – IAS, p. 323, 1999. Acesso em 13/01/2020, às 13:14.
7. BRIMACOMBE, J.K Brimacombe Contínuos Casting Course. A – Continuous Casting Systems. Vancouver Canadá, 14 – 18 maio 2012. Acesso em 15/01/2020, às 10:23.
8. Karnitsch-Einberger E., Produção Direta de Tiras – Lingotamento Contínuo de Tiras; In ABM, Lingotamento Contínuo de Placas. Acesso em 22/02/2020, às 13:50.
9. VIEIRA, F. B. Desenvolvimento de uma metodologia para seleção de pó fluxante para o lingotamento de placas de aços com comportamento peritético. Belo

Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2002. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica). Acesso em 26/04/2020, às 10:18.

10. FOX, B, VALDEZ, M. E. et al., Dissolution of ZrO_2 , Al_2O_3 , MgO and $MgAl_2O_4$ Particles in a B_2O_3 Containing Commercial Fluoride-free Mould Slag, *ISIJ Intl.*, 44(5): p 836 – 845, 2004. Acesso em 26/03/2020, às 17:23.

11. SHELBY, J. E. *Introduction to Glass Science and Technology*. New York: RSC Paperbacks, 1997. Acesso em 27/03/2020, às 17:00.

12. MILLS, K.C Mould flux how do they work and how do they use? In: *Steelmaking Seminar International ABM*, 41, 23 – 25 de maio 2010. Acesso em 27/03/2020, às 17:35.

13. MILLS, K. C.; ALISTAIR, B.F. The role of mould fluxes in continuous casting – So simple yet so complex. *ISIJ International*, v.10, p1479 – 1486, 2003. Acesso em 27/03/2020, às 20:32.

14. CHO, J. W.; SHIBATA, H. Effect of solidification of mould fluxes on the heat transfer in casting mold. *Journal of non-crystalline solids*, p 110-117, 2001. Acesso em 30/03/2020, às 09:23.

15. CHO, J et al. Thermal resistance at the interface between mould flux film and mould for continuous casting of steels. *ISIJ international*, p. 440-446, 1998. Acesso em 10/01/2020, às 09:38.

16. KINGERY, W. D. *Introduction to Ceramics*. Wiley, 1975. Acesso em 22/04/2020, às 10:38.

17. LAVINAS, A. O. et al. Fluxante granulado por spray dryer Uma Realidade Nacional. In: *Seminário sobre fusão refino e solidificação de metais ABM*, 29, 1998. Acesso em 22/04/2020, às 22:42.

18. WOLF, M. M. Mold oscillation guidelines. Steelmaking Conference Proceedings, p. 51-71, 1991. Acesso em 22/04/2020, às 23:00.

19. 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. Acesso em 03/05/2020, às 08:47.

20. EITEL, H. J. The development and production of casting powder granulate by means of the Spray Drying Process, and its importance for the Steel Industry, EUR 13177, ECSC, Luxemburg, 1990. Acesso em 10/05/2020, às 10:29.

21. WOLF, M. M. Investigations into de relationship between heat flux and shell growth in continuous casting molds. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, v.10, p. 710-717, 1975. Acesso em 11/05/2020, às 11:49.

22. DEVIC, S., MARCETA, L. Erosion of submerged entry nozzles by casting powders, American Ceramic Society Bulletin, v. 86, n.6. 2007. Acesso em 05/05/2020, às 09:55.

23. GALLO, M. Refratários para lingotamento contínuo. Curso Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003. Acesso em 06/05/2020, às 09:38.

24. GARCIA, A. et al. Lingotamento contínuo de aços. Associação de Metalurgia e Materiais, Coleção Metalurgica e Materiais, v.1, 2006. Acesso em 07/05/2020, às 15:23.

25. 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. Acesso em 08/05/2020, às 17:50.

26. OLIVEIRA, L. J. S Comportamento dos aços peritéticos durante a solidificação no molde de lingotamento contínuo. Dissertação. PPGEM: UFMG, 2009. Acesso em 09/05/2020, às 22:15.

27. KAWAMOTO, M.; NAKAJIMA, K.; KANAZAWA, T.; NAKAI, K. Designs principles of mold fluxes for high speed continuous casting. ISIJ International, v. 34, n.7, p. 593598, 1994. Acesso em 15/05/2020, às 18:11.

28. BRANION, R. V. Mold Fluxes for Continuous Casting. I&SM, p.41-50, September 1986. Acesso em 15/05/2020, às 18:53.

29. KUBOTA, J., et al. MECHANISM OF LEVEL FLUCTUATION AND MOLD POWDER CATCHING IN SLAB CONTINUOUS CASTING AT HIGH SPEEDS. In: Proceedings of The Sixth International Iron and Steel Congress, Nagoya, ISIJ, 1990. Acesso em 15/05/2020, às 19:15.

30. THOMAS, B. G. Fluid Flow in the Mold. In: THE MAKING, SHAPING AND STEEL; Casting Volume. AISE Steel Foundation, 11th edition, 2003. Acesso em 16/05/2020, às 07:54.

31. THOMAS, B. G. CONTINUOUS CASTING OF BILLETS, BLOOMS AND SLABS. Vancouver: The Centre for Metallurgical Process Engineering, The University of British Columbia, April, 1993. Volume I. Acesso em 17/05/2020, às 00:03.

32. ZHANG, L. et al. Physical, Numerical and Industrial Investigation of Fluid Flow and Steel Cleanliness in the Continuous Casting Mold at Panzhihua Steel. AISTech 2004 Proceedings, Volume II, p. 879-894. Acesso em 23/05/2020, às 09:34.

33. SOARES, R. B Fluxantes para molde em lingotamento contínuo. Dissertação. PPGEM: UFRGS, 1998. Acesso em 23/05/2020, às 11:20.

34. RHI Group. Submerged entry nozzle. A World Market Leader in Refractories., http://www.rhiag.com/internet_en/products_solution_en/steel_agg_en/steel_agg_c_en/> Acesso em 23/05/2020, às 11:54.

35. SALES, A. A. N. Utilização de calorimetria diferencial para caracterização de escória fluxante CaO-Al₂O₃-B₂O₃. 2017. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso

(Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, 2017. Acesso em 24/05/2020, às 12:38.

36. WOLF, M.M. Estimation method of crack susceptibility for new steel grades. European conference on continuous casting, p2489-2499, 1984. Acesso em 20/05/2020, às 16:57.

37. EMI, M - The Mechanism for Sticking Type Breakouts and New Development in Continuous Casting Mold Fluxes. Steelmaking Conference Proceeding, 1991, p. 639-646. Acesso em 20/05/2020, às 19:38.

38. MIYASHITA, Y; SUZUKI, M; TAGUCHI, K; UCHIDA, S, SATO, H & YAMAMURA, M - Improvement of Surface Quality of Continuously Cast Slabs. Nippon Kokan Technical Report Overseas, no. 36, 1983, p. 55-64. Acesso em 20/05/2020, às 22:23.

39. BRENDZY, J. L -The detection of mould-strand interaction employing load cells in the continuous casting of billets. MSc. Thesis, The University of British Columbia, USA, 1990. Acesso em 21/05/2020, às 08:59.

40. 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. Acesso em 21/05/2020, às 09:51.

41. ZHANG, L. et al. Physical, Numerical and Industrial Investigation of Fluid Flow and Steel Cleanliness in the Continuous Casting Mold at Panzhihua Steel. AISTech 2003 Proceedings. Acesso em 21/05/2020, às 14:18

42. CARBOOX. IT09.04.04 fluxantes para lingotamento contínuo, 2006. Acesso em 22/05/2020, às 15:25.

43. PINHEIRO, C. A.; SAMARASEKERA, I. V.; BRIMACOMBE, J. K. Mould flux for continuous casting of steel. Part I e II. *Iron and Steelmaker*, v. 62, p. 55-6, Oct. 2012. Acesso em 19/05/2020, às 09:31.

44. PEREIRA, M.; NOHARA, E.; FREITAS, S.; FERREIRA, G.; MOREIRA, M.; KLUG, J.; JUNG, D.; F-free mould powders for low carbon steel slab casting technological parameters and industrial trials. 20^a Conferencia del Acero, Rosario, Santa Fe, Argentina, 2011. Acesso em 18/05/2020, às 23:45.

45. KROMHOUT, J. A.; Mould powder development for continuous casting of steel. *Trans Indian Inst Met*, p.587–596, 2011. Acesso em 13/03/2020, às 11:43.

46. NASCIMENTO, TAVARES, A.D.; Influência das variáveis físicas do oscilador do molde nas características das marcas de oscilação das placas de lingotamento contínuo. 2010. 81 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais – REDEMAT/UFOP/ CETEC/UEMG, 2010. Acesso em 14/03/2020, às 10:28.

47. SILVA, D.R. Aços e ligas especiais. Dissertação. PPGEM: UFRGS, 1988. Acesso em 19/03/2020, às 22:47.

48. SILVA, CARLOS., TÓPICOS EM LINGOTAMENTO CONTÍNUO, Escola de Minas, 2020. Acesso em 28/03/2020, às 07:58.

49. CARRETEIRO, Ronald P.; BELMIRO, Pedro Nelson A.. Lubrificantes e lubrificação industrial. Rio de Janeiro: Interciência, 2006. xxviii, 504 p. Acesso em 28/03/2020, às 19:24.

50. LEFEVRE, Y. H. A Study of a Effect of Casting Conditions on Fluid Flow in the Mold Using Water Modelling. *Steelmaking Conference Proceedings*, pp. 473-480, 1997. Acesso em 30/03/2020, às 22:46.

51. SUPRADIST, L. V. TRINCAS DE SOLIDIFICAÇÃO OFF-CORNER NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE TARUGOS, UFMG, 2003. 216p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Acesso em 30/03/2020, às 23:20.

52. BRACKBILL, M. C. C. et al. Curso ABM, tratamento sob vácuo, São Paulo: ABM, 1996. Acesso em 01/04/2020, às 19:03.

53. GEIGER, G. H. POIRIER, D. R. Qualitative and quantitative determination analysis, 2004, 1973, 616 p. Acesso em 23/03/2020, às 12:15.

54. LOURENÇO, P. T. MODELAMENTO FÍSICO DO SISTEMA DE INJEÇÃO DE GÁS INERTE EM PANELA DE AÇO. UFES, 1985. 167p., 2014. Acesso em 23/03/2020, às 13:21.

55. NUCLEMAT, T. Físico-Química de Superfícies. PUCS, 2008. Acesso em 23/03/2020, às 11:11.