



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* OURO BRANCO

BACHARELADO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

Luély de Moura Santana Cruz

**ESTADO DA ARTE NA REDUÇÃO DE OBSTRUÇÕES DE VÁLVULAS
SUBMERSAS EM LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE AÇOS**

Ouro Branco

2024

LUÉLY DE MOURA SANTANA CRUZ

**ESTADO DA ARTE NA REDUÇÃO DE OBSTRUÇÕES DE VÁLVULAS
SUBMERSAS EM LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE AÇOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso Bacharelado em Engenharia Metalúrgica do Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* Ouro Branco para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Me. Heric Henrique Souza e Silva

Ouro Branco

2024

C957e Cruz, Luély de Moura Santana.

Estado da arte na redução de obstruções de válvulas submersas em lingotamento contínuo de aços / Luély de Moura Santana Cruz. – 2024.

42f.: il.col.

Orientador: Heric Henrique Souza e Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado) – Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Ouro Branco, 2024.

1. Lingotamento contínuo. 2. Válvula submersa. 3. Obstrução. 4. Aciaria. I. Cruz, Luély de Moura Santana. II. Silva, Heric Henrique Souza. III. Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Ouro Branco. IV. Título.

CDU: 669.18



INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

DOCUMENTO ÚNICO DE DEFESA DE TCC (ANEXO IV)

ATA DA DEFESA DE TCC

No dia 24 / 08 / 2024, às 10 : 15 horas, a aluna Luely de Moura Santana Cruz do curso de Bacharelado em Engenharia Metalúrgica turma 2015.1 do IFMG – Campus Ouro Branco defendeu o () TCC I (X) TCC II e foi Aprovada (aprovado/reprovado) com a nota 100%, que está condicionada ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa do TCC. Caso seja aprovado, deverá apresentar o trabalho com as devidas modificações e no formato solicitado em 06 / 09 / 2024. O aluno está ciente de que, caso não cumpra os procedimentos pós-defesa de TCC até a data estipulada, sua nota será considerada **zero e a sua defesa será anulada**. Também está ciente de que o trabalho de conclusão de seu curso poderá ser divulgado pela Instituição através dos seus meios de comunicação. Observações pertinentes da defesa:

DECLARAÇÃO ANTI-PLÁGIO

Eu, Luely de Moura Santana Cruz, estudante do curso de Bacharelado em Engenharia Metalúrgica do IFMG — Campus Ouro Branco, declaro, para os devidos fins e efeitos, e para fazer prova junto ao IFMG — Campus Ouro Branco, que, **sob as penalidades previstas no art. 299 do Código Penal Brasileiro**, que é de minha criação o trabalho de conclusão de curso que ora apresento.

Art. 299 do Código Penal Brasileiro, que dispõe sobre o crime de Falsidade Ideológica:

"Omitir, em documento público ou particular, declaração que dele devia constar, ou nele inserir ou fazer inserir declaração falsa ou diversa da que devia estar escrita, com o fim de prejudicar direito, criar obrigação ou alterar verdade sobre fato juridicamente relevante: Pena — reclusão, de 1 (um) a 5 (cinco) anos, e multa, se o documento é público, e reclusão de 1 (um) a 3 (três) anos, e multa, se o documento é particular.

Parágrafo único. Se o agente é funcionário público, e comete o crime prevalectendo-se do cargo, ou se a falsificação ou alteração é de assentamento de registro civil, aumenta-se a pena de sexta parte." Este crime engloba plágio e compra fraudulenta de documentos científicos.

Por ser verdade, e por ter ciência do referido artigo, firmo a presente declaração.

Assinatura do aluno: Luely de Moura Santana Cruz

NOME COMPLETO E ASSINATURA DOS COMPONENTES DA BANCA E DO ORIENTADO

Orientador(a): Nome: Heric Henrique Souza e Silva

Membro 2: Nome: Guilherme Liziero Ruggio da Silva

Membro 3: Nome: Marivaldo Junior Monteiro de Oliveira

Aluno: Nome: Luely de Moura Santana Cruz

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais e irmão, que sempre foram minha fonte de inspiração e apoio constante.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por iluminar o meu caminhar até aqui. A minha fé, e crença na evolução, sem dúvidas, me ajudaram a continuar determinada para conquistar os meus objetivos.

À minha família, que sempre me motivou e incentivou os meus sonhos, em especial minha querida mãe Fabrina Moura, ao meu pai Ernane Cruz minha referência e exemplo na Siderurgia e meu amado irmão, Luky Cruz.

Ao meu orientador, professor Heric Silva, que muito contribuiu para a realização deste trabalho.

Ao Instituto Federal de Minas Gerais que me proporcionou a chance de expandir os meus horizontes e aos meus professores e colegas de curso.

RESUMO

Para obter um aço com boa qualidade, as variáveis no processo devem ser controladas e otimizadas no intuito de mitigar falhas. Uma variável importante no processo de solidificação do aço em aciaria na operação de máquinas de lingotamento contínuo foi estudada neste trabalho, o controle do fluxo de metal líquido do distribuidor para o molde, destacando a função crucial das válvulas submersas. Tal estudo foi conduzido por meio de uma revisão bibliográfica abrangente. O desempenho ruim da válvula submersa, principalmente com a sua obstrução, impacta na qualidade do aço e prejudica a produtividade por afetar o sequenciamento de corridas da aciaria. É uma falha presente em muitas máquinas de lingotamento contínuo e embora os estudos dos fenômenos que afetam esse componente refratário ainda não sejam totalmente compreendidos, diversos fatores são associados as falhas. Foram formuladas recomendações práticas com as principais técnicas para reduzir as obstruções, entre as quais destacam-se a modificação da geometria da válvula submersa, visando aumentar a área efetiva e obter um perfil de velocidade uniforme, além da injeção eficiente de argônio, que atua na minimização de inclusões não metálicas e na melhoria do fluxo do aço.

Palavras-chave: Lingotamento Contínuo. Válvula Submersa. Obstrução. Aciaria.

ABSTRACT

To obtain high-quality steel, the variables in the process must be controlled and optimized to mitigate flaws. An important variable in the steel solidification process in steelmaking during continuous casting machine operation was studied in this work, the control of the liquid metal flow from the tundish to the mold, highlighting the crucial function of submerged entry nozzle. This study was conducted through a comprehensive literature review. The poor performance of the submerged entry nozzle, especially with obstruction, impacts the quality of steel and hinders productivity by affecting the sequencing of heats in the steelmaking. It is a common flaw in many continuous casting machines although the studies on phenomena affecting this refractory component are not yet fully understood, several factors are associated with failures. Practical recommendations have been formulated with the main techniques to reduce blockages, among which the modification of the submerged nozzle geometry stands out, aiming to increase the effective area and achieve a uniform velocity profile. Additionally, efficient argon injection plays a crucial role in minimizing non-metallic inclusions and improving steel flow.

Keywords: Continuous Casting. Submerged Entry Nozzle. Clogging. Steel Making

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação esquemática de uma máquina de lingotamento contínuo .	1
Figura 2 – Representação esquemática dos tipos de máquinas de lingotamento contínuo	5
Figura 3 – Desenho de distribuidor de lingotamento contínuo	6
Figura 4 – Distribuidor em preparação dos refratários	7
Figura 5 – Esquema do fluxo de vazão entre distribuidor, válvula e molde.....	8
Figura 6 – Região de escoamento no colo do distribuidor e elementos de controle de vazão.....	9
Figura 7 – Emprego de injeção de gás inerte pelo (a) tampão (b) válvula gaveta.....	10
Figura 8 – Superfície da válvula submersa nova (a) vista completa (b) vista porta de saída.	10
Figura 9 – Modelos de válvula submersa	11
Figura 10 – Simulação matemática com média temporal do campo de velocidade [m/s].	13
Figura 11 – Comparação da dispersão de corante entre modelo (a) físico (b) matemático.....	14
Figura 12 – Clogging de alumina em válvula submersa.....	15
Figura 13 – Atuação do pó fluxante no molde: vista da face larga, fora de escala....	20
Figura 14 – Principais publicações consultadas.....	21
Figura 15 – Referências bibliográficas por período de publicação	22
Figura 16 – Esquema com os parâmetros geométricos da SEN.....	23
Figura 17 – Velocidades na vizinhança da porta para uma SEN de +15 graus: (a) Hp=90mm (b) Hp =45mm.....	24

Figura 18 – Geometrias das válvulas: (a) válvula A (b) válvula B	25
Figura 19 – Visão da velocidade do líquido dentro das válvulas a partir de vistas paralelas e perpendiculares: (a) plano longitudinal da válvula A (b) válvula A a 90° (c) plano longitudinal da válvula B (d) válvula B a 90°	26
Figura 20 – Tensões de cisalhamento na parede da válvula A: (a) região sem entupimento (b) região propensa ao entupimento	27
Figura 21 – Tensões de cisalhamento na parede da válvula B: (a) região sem entupimento (b) região propensa ao entupimento	27
Figura 22 – Esquema do processo de lingotamento contínuo mostrando quatro possíveis locais de injeção de argônio.	28
Figura 23 – Tubo submerso apresentando (a) obstrução prematura (b) deposição de alumina sem restrição do fluxo de aço.	30
Figura 24 – Representação esquemática da modificação de inclusões de Al_2O_3	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de volume de produção em Aciaria e Lingotamento	4
Tabela 2 – Inclusões típicas de válvulas submersas.....	18
Tabela 3 – Resumo das técnicas para eliminação de obstruções em válvulas submersas em LC	34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo geral	3
2.2 Objetivos específicos	3
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	4
3.1 Cenário nacional em lingotamento contínuo	4
3.2 Máquinas de lingotamento contínuo.....	4
3.2.1 <i>Distribuidor</i>	6
3.2.2 <i>Controle de vazão</i>	7
3.2.3 <i>Válvulas submersas</i>	10
3.2.4 <i>Molde</i>	12
3.3 Problemas operacionais.....	14
3.3.1 <i>Breakout</i>	14
3.3.2 <i>Obstrução de válvula submersa</i>	15
3.3.3 <i>Inclusões</i>	17
3.4 Aditivos em lingotamento contínuo	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS	21
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
5.1 Geometria da válvula submersa.....	23
5.2 Injeção de gases inertes na válvula	28

5.3 Tratamentos anteriores ao fluxo do distribuidor para o molde.....	31
5.4 Tratamentos anteriores ao lingotamento contínuo	32
5.5 Recomendações práticas	33
6. CONCLUSÕES.....	35
7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	37
REFERÊNCIAS.....	38

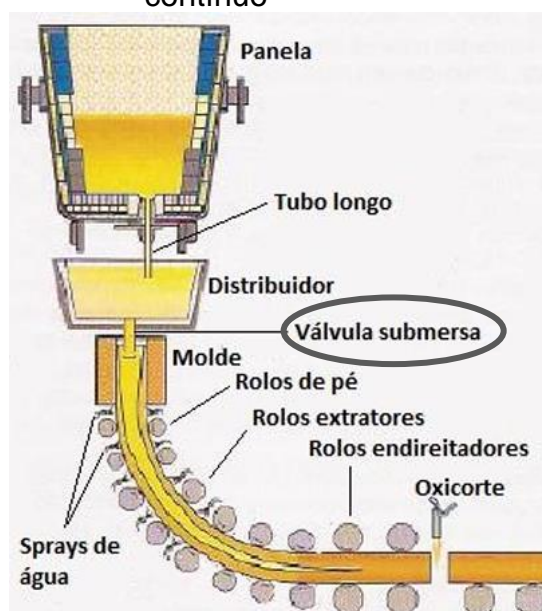
1. INTRODUÇÃO

Na produção do aço, a qualidade é um dos parâmetros centrais, por meio do acompanhamento dos processos em diversas formas e âmbitos, é possível alcançar bons resultados, mitigando falhas e promovendo melhorias. Na rotina do engenheiro metalurgista atuante no setor siderúrgico, além da segurança, custo e produtividade, a preocupação com a qualidade deve estar presente.

A aciaria de uma usina siderúrgica possui como função elementar transformar o gusa líquido ou sólido e a sucata em aço. Após a transformação de refino, o aço solidifica-se em uma máquina de lingotamento contínuo (LC), um processo que tem influência direta na qualidade do aço. Neste processo, muitas são as variáveis a serem controladas, dentre elas estão as temperaturas, velocidade de lingotamento, condições de manutenção geral da máquina, refratários, entre outros.

A máquina de lingotamento contínuo possui diversos componentes, conforme demonstrado na Figura 1. A válvula submersa tem como função básica alimentar o aço no molde, controlando seu fluxo. Algo comum nas máquinas de lingotamento, mas indesejável, é a ocorrência de obstruções nesta válvula, que podem reduzir ou bloquear o fluxo de aço.

Figura 1 – Representação esquemática de uma máquina de lingotamento contínuo



Fonte: Adaptado de RIZZO, 2005.

Obstruções podem ocorrer em variados tipos de máquinas de lingotamento contínuo, dependendo de diversos fatores, como a qualidade do aço, o controle do processo e a tecnologia utilizada. Independentemente disso, é crucial que todas as aciarias implementem técnicas para minimizar o risco de obstruções. Isso é essencial para evitar paradas não programadas, reduzir defeitos nos lingotes e controlar o aumento dos custos operacionais.

No presente estudo, por meio de pesquisas bibliográficas, foram abordadas as principais características das válvulas submersas e seus impactos na qualidade do aço, rastreando os principais fatores que podem ocasionar obstruções.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Investigar as causas das obstruções das válvulas submersas em máquinas de lingotamento contínuo de aços, visando compreender os fatores que contribuem para esse problema e desenvolver estratégias preventivas.

2.2 Objetivos específicos

Analisar válvulas submersas no lingotamento contínuo de aços, com referência nos seguintes parâmetros:

- Estudar o controle de fluxo e vazão de alimentação de aço para o molde;
- Examinar as variações de modelos de válvulas submersas;
- Avaliar o efeito de adições no lingotamento contínuo, a fim de evitar obstruções nas válvulas.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Cenário nacional em lingotamento contínuo

O Instituto Aço Brasil (2024), reuniu dados de suas empresas associadas, dos últimos cinco anos de produção de aço bruto em aciarias, nos processos de refino com oxigênio (BOF e EOF) e elétrico (FEA), em lingotamentos convencionais, contínuos ou fundições, conforme está representado na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de volume de produção em Aciaria e Lingotamento

Produção de aço bruto por processo de Aciaria e Lingotamento (10³t)					
Processo	2019	2020	2021	2022	2023
Aciaria					
<i>Oxigênio (LD) / BOF</i>	24764	23417	27253	25608	24327
<i>Elétrica</i>	7272	7550	8375	8107	7290
<i>EOF</i>	533	448	443	374	413
TOTAL	32569	31415	36071	34089	32030
Lingotamento					
<i>Convencional</i>	598	561	744	790	548
<i>Contínuo</i>	31917	30813	35284	33255	31455
Aço para fundição	54	41	43	44	27

Fonte: Aço Brasil, Indústria do aço em números, 2024.

Pode-se observar que, no Brasil, o processo com o uso de conversores a oxigênio e lingotamento contínuo são os responsáveis pela maior parte da produção de aço. O objeto do estudo, válvulas submersas, são componentes da máquina de lingotamento contínuo.

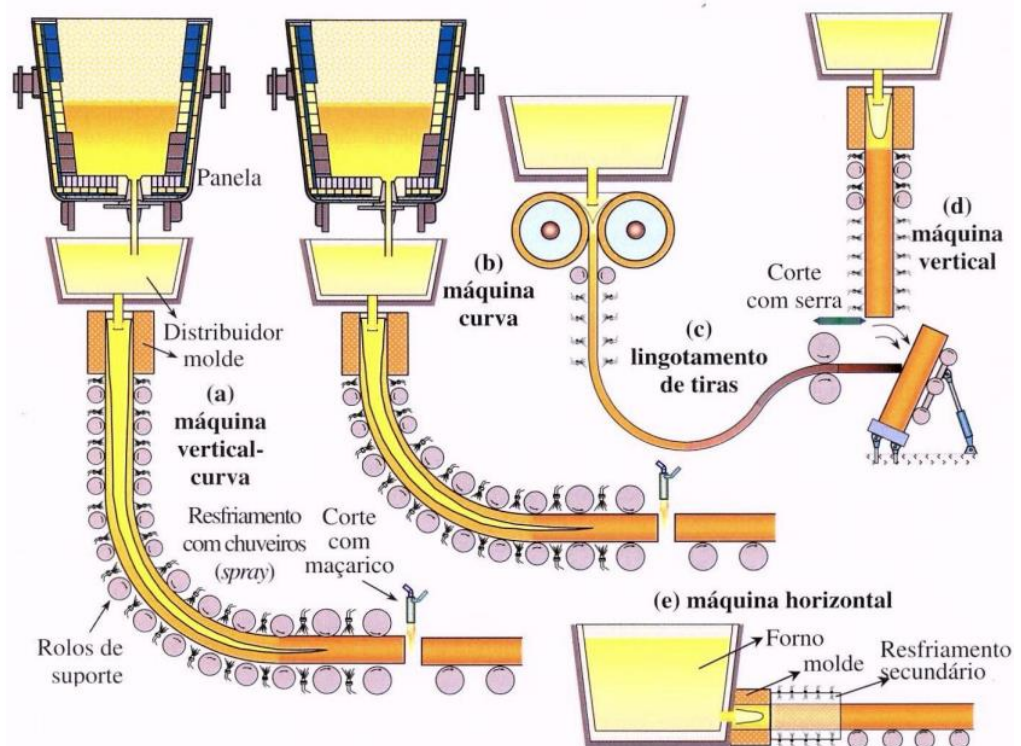
3.2 Máquinas de lingotamento contínuo

Na aciaria após os processos de refino primário e refino secundário, a panela com o aço líquido é posicionada na torre giratória para dar início ao lingotamento, com temperatura próxima a temperatura *liquidus* mais um acréscimo (*superheat*). Antecedendo a abertura da panela o tubo longo é posicionado, para então começar o transporte do aço para o distribuidor, onde o aço líquido é distribuído

para as válvulas submersas, seguido do molde, e do sistema de rolos e sprays de resfriamento em que o aço é solidificado até uma temperatura que possibilite o corte.

As máquinas de lingotamento contínuo têm diferentes configurações, sendo projetadas de acordo com as necessidades do produto e *layout* de cada planta, visando uma boa qualidade do aço solidificado, e segurança da operação. Como Rizzo (2005) afirma elas podem ser dos tipos vertical-curva, curva, de tiras, vertical, horizontal, conforme representadas na Figura 2, as máquinas (a) e (b) são as mais encontradas. Os produtos obtidos mais comuns são blocos, tarugos e placas, que dispõem de diversas dimensões podendo ser reduzidas nos processos seguintes de conformação, como a laminação, extrusão e forjaria.

Figura 2 – Representação esquemática dos tipos de máquinas de lingotamento contínuo



Fonte: Rizzo, 2005.

3.2.1 Distribuidor

O distribuidor é responsável por receber o metal líquido e distribuí-lo até os veios, representado na Figura 3. Diante disso, é um equipamento essencial na troca de panelas, pois armazena aço líquido e assegura um fluxo contínuo da máquina, desempenhando um papel importante na limpeza do aço.

Figura 3 – Desenho de distribuidor de lingotamento contínuo



Fonte: Vesuvius Group S.A., 2024.

Os distribuidores podem assumir diferentes dimensões e formatos, com ou sem acessórios, como os inibidores de turbulência, diques, barragens, inibidor de vórtice, cortinas com gás inerte, entre outros. Como assente Barcellos (2011), utilizando modelamentos, matemáticos, e físicos, em escala laboratorial ou experimentais em plantas industriais, o melhor *layout* pode ser estudado para cada caso.

No distribuidor, o posicionamento da válvula submersa é de extrema relevância para que haja um bom fluxo de aço, capacitando a flotação das inclusões para a escória. Além disso, idealmente a preparação do distribuidor deve ser feita de forma criteriosa, seguindo gabaritos e padrões adequados conforme o projeto e as recomendações de fornecedores das válvulas, na Figura 4 está representado o posicionamento de válvulas em distribuidor durante o seu preparo.

Figura 4 – Distribuidor em preparação dos refratários



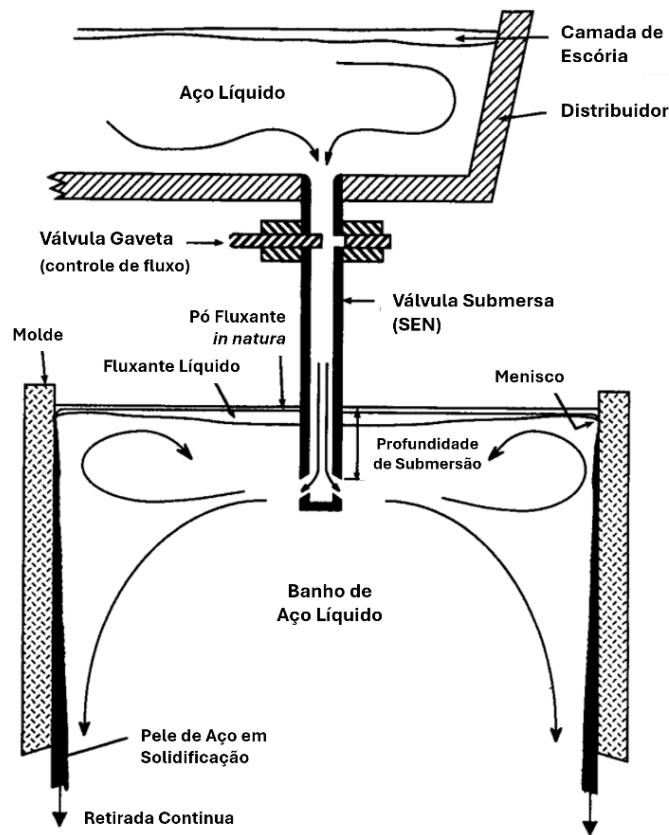
Fonte: Acervo pessoal, 2022.

Segundo Gallo (2000), a permeabilidade do refratário e a vedação na montagem das peças do distribuidor tem relação direta com os depósitos de alumina em válvulas submersas, já que os gases que oxidam a alumina podem infiltrar as paredes dos refratários.

3.2.2 Controle de vazão

Durante o lingotamento contínuo, o aço líquido flui do distribuidor para a válvula submersa e, em seguida, para o molde, conforme ilustrado na Figura 5. O fluxo de aço através da válvula submersa (SEN) é impulsionado pela diferença de gravidade e pressão entre a quantidade de aço no distribuidor e as superfícies livres no topo do molde. Dessa forma, a vazão está diretamente ligada à quantidade de aço no distribuidor e ao fluxo na válvula submersa. A vazão é controlada para manter um nível constante de aço no molde (NAJJAR; THOMAS; HERSHEY, 1995).

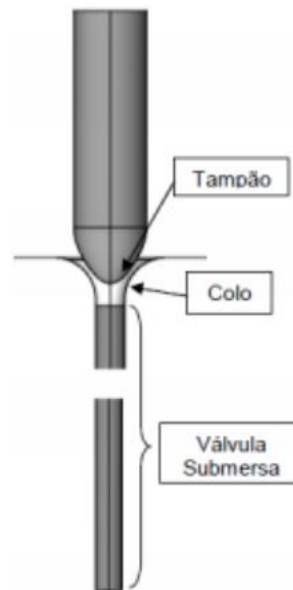
Figura 5 – Esquema do fluxo de vazão entre distribuidor, válvula e molde.



Fonte: Adaptado de: Najjar; Thomas; Hershey, 1995.

A vazão de aço do distribuidor para o molde é controlada principalmente por dois componentes a válvula gaveta ou o tampão, que podem ser utilizados juntos ou separados no distribuidor, com controle de forma manual ou automatizada. Conforme Rizzo (2006), a válvula gaveta é formada por placas refratárias, montada com duas ou três placas, que alinhadas, placa móvel e placa fixa, abrem o fluxo de aço para o molde. Para aumentar a segurança é ideal que quando houver a válvula hidráulica, exista também a válvula manual para casos de emergência em que seja necessária a vedação do fluxo. Já o tampão é um componente que controla o fluxo de aço, direcionando de maneira eficiente no sistema, está em contato com o colo do distribuidor, podendo fazer conexão com válvula submersa, quando está presente no distribuidor, conforme representado na Figura 6.

Figura 6 – Região de escoamento no colo do distribuidor e elementos de controle de vazão

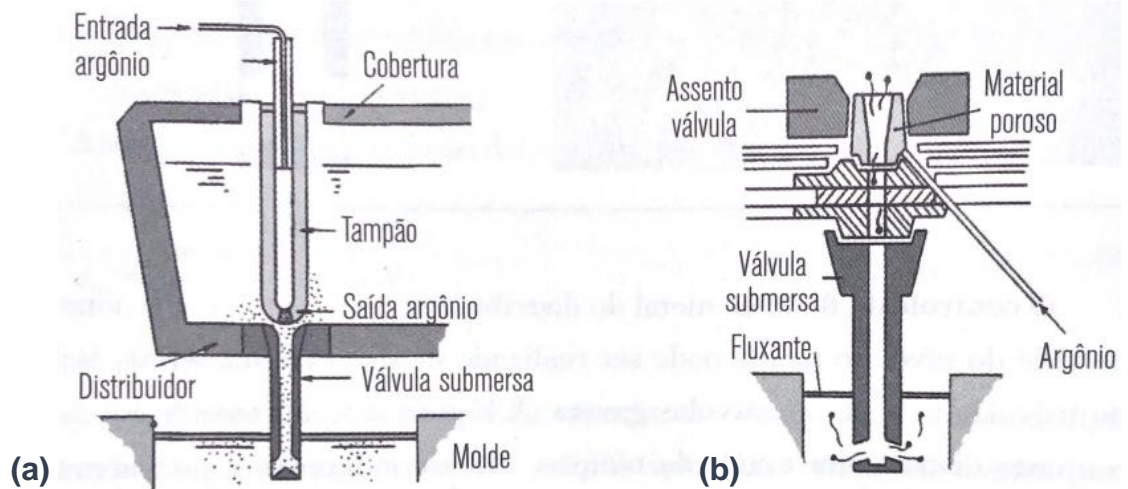


Fonte: Ferreira, 2022.

Rizzo (2006) discute que o tampão, quando comparado à válvula gaveta, tem por desvantagem um maior desgaste, menor precisão de controle de fluxo e menor vedação. Visto que durante o lingotamento ocorre pequenas variações no deslocamento vertical do tampão, mas por outro lado é considerado de utilização mais simples já que não existe a necessidade de refrigeração da peça com ar comprimido.

Como afirma Garcia *et al.* (2006), é comum o emprego de injeção de gases inertes nestes mecanismos de controle de fluxo, a fim de beneficiar a limpidez do aço, arrastando inclusões para a superfície do banho, e reduzindo os depósitos de alumina na válvula submersa, a Figura 7 demonstra dois esquemas dessa injeção, no exemplo com o uso do gás inerte argônio.

Figura 7 – Emprego de injeção de gás inerte pelo (a) tampão (b) válvula gaveta

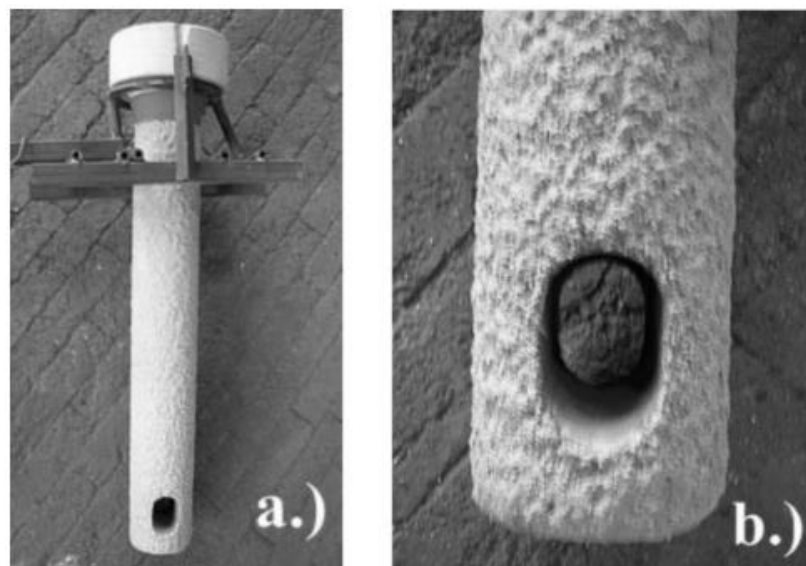


Fonte: Garcia *et al.*, 2006.

3.2.3 Válvulas submersas

De acordo com Garcia *et al.* (2006), a válvula submersa, Figura 8, é uma peça refratária, também conhecida como tubo de imersão de metal líquido, e tem por principal função transportar o aço do distribuidor para o molde evitando turbulências no seu interior e o contato do banho direto com o ar, para que não ocorra a reoxidação do aço.

Figura 8 – Superfície da válvula submersa nova (a) vista completa (b) vista porta de saída.



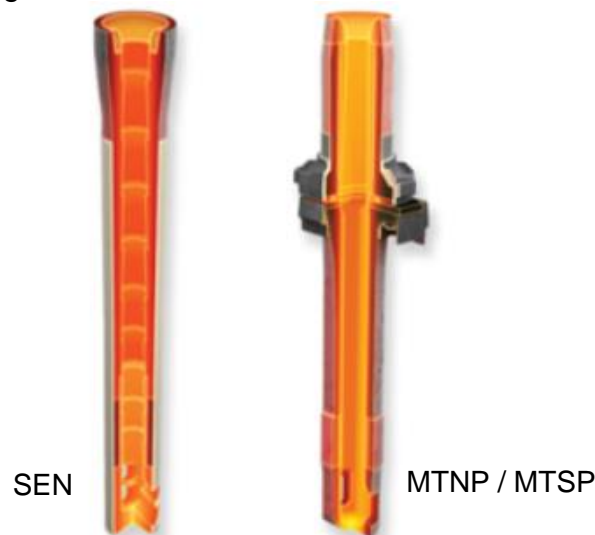
Fonte: Adaptado de: Harcsik; Karoly, 2013, p.132.

Conforme Gallo (2000) as válvulas submersas são em geral compostas por alumina-grafite, matéria-prima que fornece alta condutividade térmica e boa resistência a corrosão, mas podem ser fabricadas a base de sílicas, zircônio, entre outros materiais, tendo também a possibilidade de variar sua composição na linha de escória.

Na válvula submersa há a possibilidade de ser feito ou não o pré-aquecimento antes da partida da máquina de lingotamento contínuo, variando de acordo com a peça. Segundo Rizzo (2006), os valores de aquecimento são acima de 1000°C para evitar choque térmico, e na partida do lingotamento acima de 750°C, evitando um aquecimento longo para não ocorrer oxidação excessiva da peça.

As válvulas são compostas por orifícios de saída que geram um fluxo de aço ideal no molde, evitando a turbulência, e são reforçadas na linha da escória devido ao desgaste mais elevado nessa região. Os desenhos desse componente podem variar conforme a solução desejada para cada produto. De acordo com Vesuvius Group S.A. (2024), o modelo mais tradicional é a SEN (*Submerged Entry Nozzle*), uma peça inteiriça que pode ser usada para variadas dimensões de molde. Quando se deseja elevar os sequenciais de corridas do distribuidor, possibilitando a troca de válvula durante o lingotamento, o conjunto MTPN (*Monoblock Tundish Nozzle Plate*), parte fixa no distribuidor, e MTSP (*Monoblock Tundish Shroud Plate*), peça a ser trocada, são boas alternativas. Os modelos de válvula SEN, MTPN e MTSP são representados na Figura 9.

Figura 9 – Modelos de válvula submersa



Fonte: Adaptado de: Vesuvius, 2024.

As válvulas submersas devem apresentar, idealmente, algumas condições básicas, como: não aumentar o diâmetro do furo no contato contínuo com o aço, minimizar a obstrução pelo depósito de óxidos e de aço, evitar irregularidades no fluxo devido a deformações, trincas ou quebras, e ter uma forma que favoreça a flutuação de inclusões (GALLO, 2000). Além disso, alguns parâmetros devem ser observados, conforme mencionado por Garcia *et al.* (2006), como a profundidade de imersão do tubo, sua forma, angulação e diâmetros de entrada e saída.

Nos estudos de Gallo (2000), percebeu-se que a adição de zircônia na produção das válvulas submersas de alumina-grafita proporcionou maior resistência à erosão pelo aço e reduziu o entupimento por alumina. O autor ainda afirma que a composição química das válvulas deve apresentar características que ofereçam resistência ao choque térmico, à erosão e à corrosão, além de um elevado ponto de fusão. Além disso, as válvulas não devem reagir com o aço e o pó fluxante, devem possuir baixa molhabilidade e ter um bom custo-benefício.

3.2.4 Molde

Na região do molde de lingotamento contínuo, o aço inicia sua solidificação de forma idealmente uniforme e capaz de suportar o aço líquido em seu interior até as próximas etapas de resfriamento e passagem pelos rolos. Em máquinas do tipo curvas, a curvatura pode ser iniciada nesta etapa.

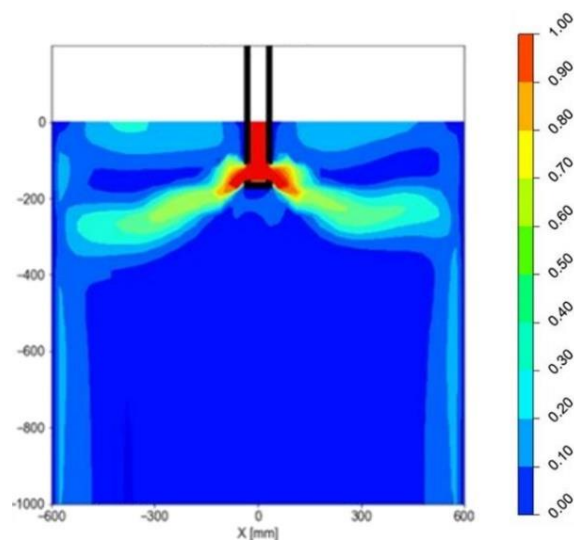
O molde desempenha um papel fundamental, definindo a forma, largura e espessura do produto final. De acordo com Garcia *et al.* (2006), vários parâmetros são essenciais para o controle adequado do processo, como o nível de aço, a composição química do molde, a espessura da parede do aço, a conicidade, os suportes, a lubrificação do molde e as condições de oscilação e resfriamento. Esses parâmetros precisam ser ajustados com precisão para garantir a qualidade do lingote.

As paredes do molde são geralmente feitas de cobre, material que favorece a condutividade térmica, e são refrigeradas com água. O contato do aço com a parede propicia a formação de uma casca solidificada, cuja espessura aumenta à medida que o lingote avança durante o resfriamento primário e secundário (RIBEIRO, 2022).

Além disso, é comum encontrar um agitador eletromagnético (EMS) no molde, que induz um campo magnético, que beneficia a dissipação do superaquecimento, promove a nucleação dos grãos, resultando na formação de grãos equiaxiais e facilita a flotação de inclusões durante a solidificação. O EMS cria uma corrente de agitação que promove movimentos no banho de aço, tornando uma mistura mais homogênea e reduzindo a formação de defeitos (YANG *et al.*, 2024).

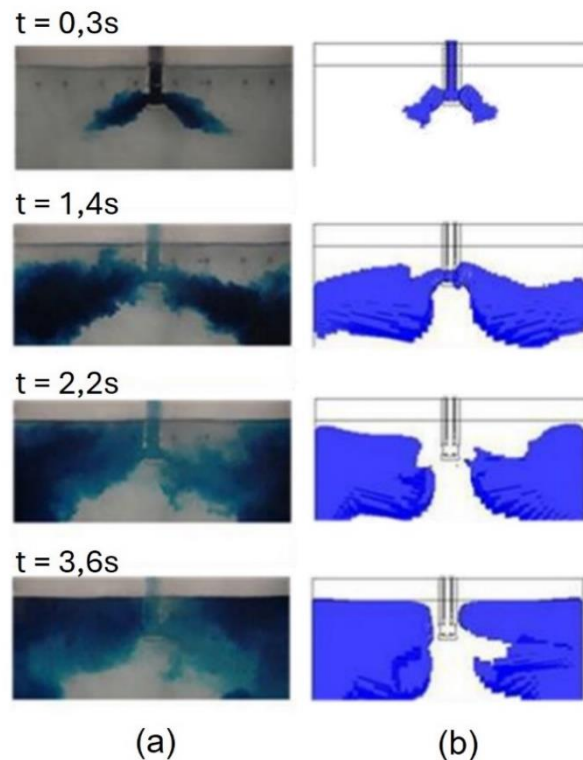
Conforme apontado por Ribeiro (2022), a válvula submersa exerce influência na turbulência superficial dos moldes. Essa influência pode ser observada tanto no modelo físico quanto nas simulações matemáticas. Na Figura 10, é apresentada uma simulação que compara os campos de velocidade médios dos jatos da válvula. Já na Figura 11, a simulação foi realizada com dispersão de corante em água e modelagem matemática, permitindo visualizar indiretamente o campo de velocidades.

Figura 10 – Simulação matemática com média temporal do campo de velocidade [m/s].



Fonte: Ribeiro, 2022.

Figura 11 – Comparação da dispersão de corante entre modelo (a) físico (b) matemático



Fonte: Ribeiro, 2022.

3.3 Problemas operacionais

3.3.1 *Breakout*

Conforme Garcia *et al.* (2006), o *Breakout* é uma das falhas operacionais de maior impacto na máquina de lingotamento contínuo, que consiste no rompimento da pele que começou a ser solidificada no aço líquido, gerando a indisponibilidade no veio do vazamento, e ainda para efetuar a limpeza e reparos é necessário aguardar o resfriamento do aço.

Alguns fatores são conhecidos por ocasionar tal problema, como a falta de lubrificação que leva o aço a aderir nas paredes do molde, superaquecimento do aço, velocidade de lingotamento impropria e mau funcionamento dos bicos *spray* de resfriamento. Além disso, segundo Borba (2011), pontas formadas dentro molde também podem provocar o corte da pele solidificada no aço.

Conforme Rizzo (2006), a oscilação do molde tem como finalidade principal evitar o colamento da pele de aço solidificada na parede do molde, para isso ele trabalha na redução da fricção entre o metal e o molde, a fim de evitar um possível rompimento de pele.

De acordo com Mendonça (2020), são utilizados sistemas para diagnosticar a ocorrência desse evento, como o Sistema de Detecção de Rompimento de Pele (SDRP) ou *Breakout Detection System* (BDS), pois quando bem dimensionados e ajustados possuem êxito. Ademais Borba (2011) afirma que a detecção pode basear-se através de termogramas, estatística multivariável, redes neurais e lógica *fuzzy*.

3.3.2 **Obstrução de válvula submersa**

A obstrução da válvula submersa pode levar à interrupção do fluxo de aço, além de causar variações na geometria da válvula, prejudicando a distribuição do aço para o molde e reduzindo a velocidade de lingotamento.

As válvulas são usualmente produzidas em alumina-grafite, que, devido à sua similaridade química, tem grande formação de depósitos de Al_2O_3 . Segundo Machado (2014), inclusões de alumina, provenientes da desoxidação do aço, podem gerar obstruções na válvula submersa, fenômeno denominado *clogging*, como apresentado na Figura 12.

Figura 12 – *Clogging* de alumina em válvula submersa.



O uso de elementos de terras raras (ETR) no processo de produção de aço tem demonstrado benefícios significativos, como a desoxidação do banho, a remoção de impurezas e a melhoria da qualidade do aço, esses aços estão sendo cada vez mais pesquisados e desenvolvidos. No entanto, com a implementação de ETR na produção de aços com propriedades fotoelétricas e magnéticas, a lingotabilidade do aço tem sido afetada, resultando em obstruções nas válvulas submersas devido a inclusões não metálicas, além das inclusões de alumina, que são as mais comuns (WANG *et al.*, 2023). Truschner *et al.* (2024) demonstraram a presença de inclusões de alumina com titânio, alumina com cério e lantânio em aços intersticiais livres estabilizados com Ti, ETR e desoxidados, as quais contribuem para a obstrução das válvulas. Adicionalmente, Roos, Karasev e Jönsson (2015) identificaram inclusões de cério (Ce) na válvula utilizada para fundir aços inoxidáveis com a adição de silício.

Em relação ao entupimento das válvulas submersas, Poirier (2015) relata que, durante os últimos vinte anos o fenômeno é estudado, entretanto não é totalmente compreendido. Porém são conhecidos alguns fatores que possuem impacto, como o grau do aço, a limpidez do banho, as condições de fluxo no lingotamento, o controle do tampão ou válvula gaveta e a composição do refratário.

Araújo (2005) afirma que temperaturas muito abaixo de *liquidus* podem causar dificuldades na lingotabilidade do aço. De forma semelhante, Garcia *et al.* (2006) destacam que, além das deposições de alumina, a solidificação do aço no interior da válvula também pode causar obstruções quando não há um bom controle de temperatura no distribuidor. Esse tipo de ocorrência é mais comum em válvulas submersas para o lingotamento de tarugos, onde o diâmetro da válvula é menor.

Quanto à composição do refratário, Gallo (2000) observa que em válvulas à base de sílica fundida (SiO_2), que possuem baixa expansão térmica e elevada resistência térmica, para aços com teor de manganês acima de 0,71%, ocorre a formação de silicatos de manganês de baixo ponto de fusão que evitam o *Clogging*. Contudo, em tais válvulas, um teor elevado de manganês (acima de 0,50%) no aço gera um desgaste elevado. Ademais, Trueba Junior *et al.* (2006) concluíram que não há diferença significativa na probabilidade de entupimento entre válvulas de lingotamento feitas de alumina, magnésia ou zircônia-grafite. A correlação com

apenas uma causa exata para a obstrução não é pertinente, sendo diversos os motivos que podem ocasionar o *clogging*.

3.3.3 Inclusões

As inclusões podem afetar a qualidade do aço, impactando as suas propriedades mecânicas e metalúrgicas, o processo de lingotamento contínuo pode impactar na retirada ou maior aglomeração destas inclusões no aço líquido.

Um estudo sistemático sobre remoções de inclusões em aços apresentou que o tratamento em panela reduziu cerca de 65-75% das inclusões, no distribuidor foram removidas entre 20-25%, embora ocorressem alguns casos de reoxidação, e no molde entre 5-10% (ZHANG; THOMAS, 2003). O que demonstra o impacto do lingotamento contínuo em relação as inclusões.

No refino secundário, a necessidade de aços com níveis de oxigênio especificados cada vez menores, trazem a necessidade de desoxidação sem silício e adição principalmente do alumínio. Porém o alumínio gera uma quantidade considerável de alumina durante a desoxidação, que permanece solida na temperatura de fundição do aço devido seu alto ponto de fusão, 2050°C. Essa alumina torna-se inclusões não metálicas, que podem obstruir as válvulas submersas no lingotamento contínuo (HARCSIK; KAROLY, 2013).

Além disso, algumas outras condições do processo podem ocasionar o surgimento das inclusões não metálicas no LC. Entre essas condições estão a abertura da panela com o uso da lança de oxigênio, que pode oxidar as primeiras toneladas de aço para o distribuidor, assim como o jato aberto. Outro fator é a primeira corrida do distribuidor com refratário novo, além da pressão e fluxo das válvulas. Machado (2014) apresentou em seu estudo que o aumento da velocidade de lingotamento leva ao aumento do teor de inclusões passantes para o veio, dado que tais inclusões não possuem tempo suficiente para a flotação. Na Tabela 2, são demonstradas as inclusões típicas e suas causas mais prováveis, com base em Rizzo (2006).

Tabela 2 – Inclusões típicas de válvulas submersas

Composição	Causas prováveis
Al_2O_3	Aglomeração, precipitação ou reação entre o aço/válvula, ou aspiração de ar. Presente em aços acalmados ao alumínio
$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Ti}_2\text{O}_3$	Reoxidação do banho. Presente em aços acalmados ao alumínio com subsequente tratamento com titânio.
$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$	Advento das práticas de metalurgia de panela, cada vez mais frequente seu aparecimento.
TiN	Normalmente ocorre no lingotamento de aços inoxidáveis.
$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$	Tratamento com Ca insuficiente ou existe a reoxidação após a adição de Ca.
$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{CaS}$	Típico em aços tratados com Ca e com teores elevados de enxofre.
$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{MgO}$	Típico em aços tratados com Ca quando teor de Mg solúvel no aço é muito alto.

Fonte: Adaptado de Rizzo, 2006.

Segundo o estudo de Ferreira (2022), as inclusões de sulfeto de cálcio (CaS), normalmente são notadas ao redor de inclusões globulares de cálcio-aluminatos. Estas inclusões podem causar problemas de obstrução de válvulas submersas, assim como ocorre com inclusões de alumina (Al_2O_3) e espinélio ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$).

Assim como Pereira *et al.* (2020) experienciaram que o teor máximo de MgO nas inclusões aumenta com o aumento da basicidade binária ($\% \text{CaO} / \% \text{Al}_2\text{O}_3$ e $\% \text{CaO} / \% \text{SiO}_2$) e com a redução de óxido de ferro ($\% \text{FeO}$) na escória. Além disso a formação de inclusões de alumina pode ocorrer com a diminuição de basicidade da escória, tornando o alumínio um agente de desoxidação mais ativo, a sílica aumenta na escória e maiores serão as perdas de alumínio na fase metálica.

Por outro lado, Araujo (2005) argumenta que o tratamento com cálcio no banho de aço pode ser vantajoso no processo de modificação de inclusões de alumina e espinélios em cálcio-aluminatos líquidos, reduzindo o entupimento das válvulas submersas. O *clogging*, causado por presença de inclusões, pode ser um indicativo direto da limpidez do aço lingotado.

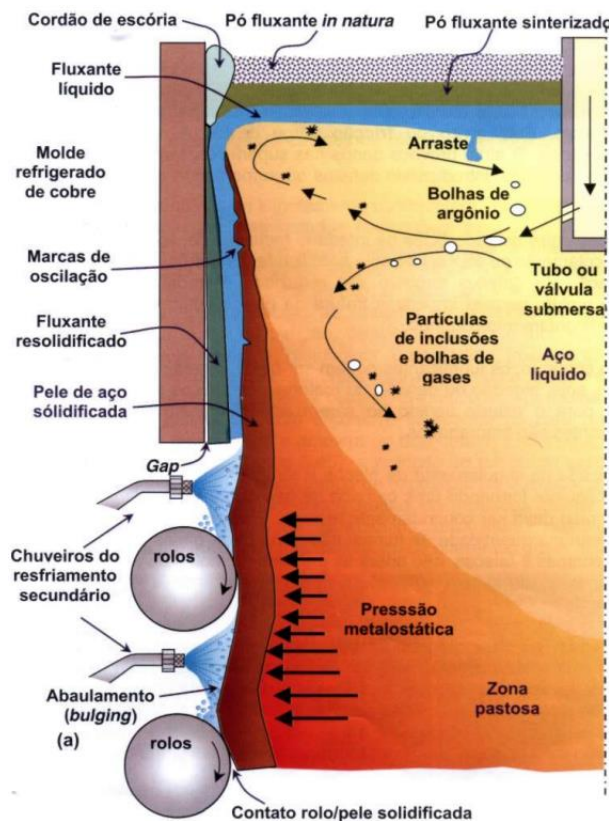
3.4 Aditivos em lingotamento contínuo

O uso de pó fluxante, também conhecidos como escórias sintéticas, no fluxo de aço do distribuidor para o molde tem papel importante como lubrificação, isolante térmico e de proteção da oxidação no contato entre ambiente e superfície do metal líquido, assim como na remoção de inclusões que podem flotar até a superfície.

Durante o lingotamento contínuo, o pó fluxante se dissolve na superfície do aço, formando uma camada de escória líquida. Posteriormente, essa escória infiltra-se entre a casca de aço em solidificação e o molde, criando uma fina película que se solidifica em fases vítreas e cristalinas. As propriedades dessa película de escória são determinantes para a lubrificação e controle de transferência de calor no molde. A formação de cristais é benéfica, pois proporciona uma transferência de calor homogênea e controlada durante o processo de fundição, sendo essencial para evitar a formação de trincas superficiais no aço e controlar o desgaste térmico das placas de cobre do molde (KROMHOUT; SCHIMMEL, 2018).

A Figura 13 esquemática, por Rizzo, 2006, demonstra o mecanismo de atuação dos pós fluxante no processo de lingotamento contínuo. Pode-se observar sobre a superfície do aço líquido o pó fluxante *in natura* uma camada não fundida, escura, logo abaixo uma camada sinterizada, enriquecida em carbono, e por último uma camada de fluxante líquido.

Figura 13 – Atuação do pó fluxante no molde: vista da face larga, fora de escala.



Fonte: Rizzo, 2006.

Rizzo (2006) aponta que, no lingotamento contínuo, os lubrificantes podem ser óleos vegetais desidratados, como óleos de soja, colza, amendoim, soja, algodão ou dendê, ou materiais cerâmicos, denominados de pó fluxante. Garcia *et al.* (2006) acrescenta que esses lubrificantes podem ser alimentados manualmente ou por dosadores automáticos. As principais composições dos pós fluxantes incluem CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , LiO_2 e CaF_2 .

Outro aditivo utilizado no lingotamento contínuo é o pó de cobertura, adicionado ao banho de aço no distribuidor. O pó de cobertura permite o controle da temperatura e da composição química, pois absorve a alumina do banho e previne a reoxidação. Esses pós podem ser classificados como ácidos, com aproximadamente 90% de SiO_2 , neutros, à base de alumina-silicatos ou cálcio-aluminatos, e básicos, à base de magnesita ou dolomita. A cobertura mais eficiente para o isolamento térmico é a palha de arroz, com 90% de SiO_2 . Para aços de ultrabaixo carbono, são recomendados pós do tipo alumina-silicatos, enquanto para melhor limpidez do aço, são indicados pós com baixo teor de SiO_2 (GARCIA *et al.*, 2006).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A condução de uma pesquisa bibliográfica detalhada foi essencial para compreender o tema de válvulas submersas em máquinas de lingotamento contínuo de aços, com foco na redução de obstruções e otimização do processo, no contexto da engenharia metalúrgica.

Para fundamentar a pesquisa, foi feito um extenso levantamento bibliográfico em bases de dados científicas, tais como o repositório Lume da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, repositório RIUFOP da Universidade Federal de Ouro Preto, repositório Universidade Federal de Minas Gerais, a Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, as revistas *Steel Research*, *Ironmaking & Steelmaking* e *ISIJ International*. A busca compreendeu artigos, livros, revistas, teses e dissertações relevantes ao tema, oriundos de diversos países como Brasil, Estados Unidos, Alemanha, México, Hungria, França, Reino Unido, China e Áustria, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Principais publicações consultadas

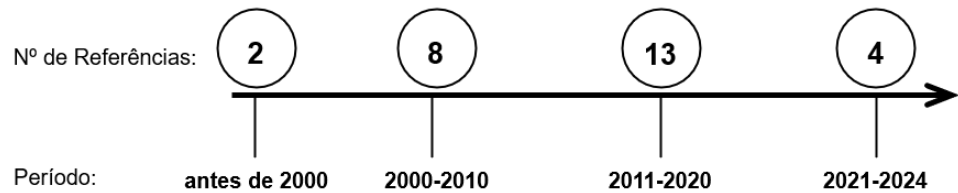


Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A seleção criteriosa das fontes bibliográficas foi pautada pela relevância, atualidade e confiabilidade. Foram priorizadas publicações que abordam os desafios associados a obstruções de válvulas em máquinas de lingotamento contínuo e as potenciais otimizações do processo de solidificação do aço em Aciaria. O maior número de publicações consultadas é concentrado nos anos mais recentes (2010-2024), o que evidencia a relevância e atualidade da área de pesquisa em diferentes

países. A distribuição temporal das referências utilizadas neste trabalho pode ser visualizada na Figura 15.

Figura 15 – Referências bibliográficas por período de publicação



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

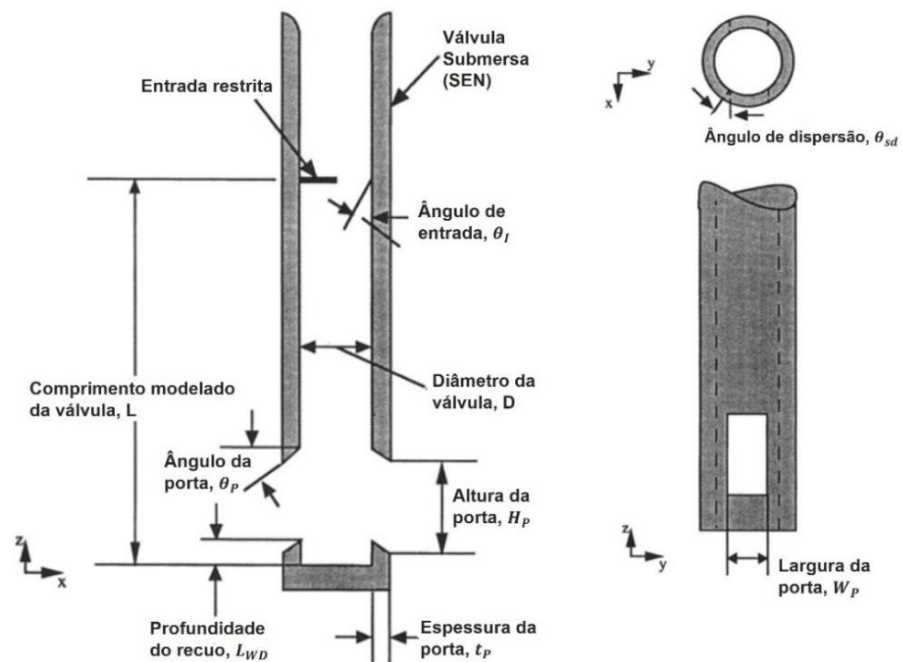
Os resultados provenientes da revisão bibliográfica foram organizados de forma a oferecer uma visão abrangente das abordagens adotadas por vários pesquisadores e engenheiros. Essa organização, feita a partir de estudos aprofundados, permitiu a formulação de conclusões ponderadas, apresentadas neste trabalho de conclusão de curso.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Geometria da válvula submersa

A geometria da SEN é uma das variáveis no lingotamento contínuo que tem uma influência importante na produtividade e na qualidade do produto. Foi estudado por Najjar, Thomas e Hershey (1995) o fluxo em válvulas submersas bifurcadas para a produção de placas de aço, através de um modelo de elementos finitos, usando FIDAP (*Fluid Dynamics Analysis Program*). Os parâmetros investigados incluíram ângulo da porta, a altura da porta, a largura da porta, o ângulo de dispersão da porta, a espessura da parede do bico, a curvatura da porta e o formato do fundo, Figura 16.

Figura 16 – Esquema com os parâmetros geométricos da SEN



Fonte: Adaptado de: Najjar; Thomas; Hershey, 1995.

Dentre os parâmetros, está o ângulo da porta na válvula submersa, cujo a principal função é direcionar o fluxo de aço para a cavidade do molde. No estudo, foi observado que o fluxo que sai do bocal possui um ângulo descendente maior que as bordas da porta, devido a região de recirculação na parte superior da porta, que possui um fluxo mais lento. Foi evidenciado que, com a diminuição do ângulo da porta, a velocidade média do jato diminui e a fração de área efetiva aumenta, enquanto a intensidade média da turbulência permanece quase constante. Esse aumento de área efetiva é relevante, pois a área ineficaz na porta é significativamente mais suscetível

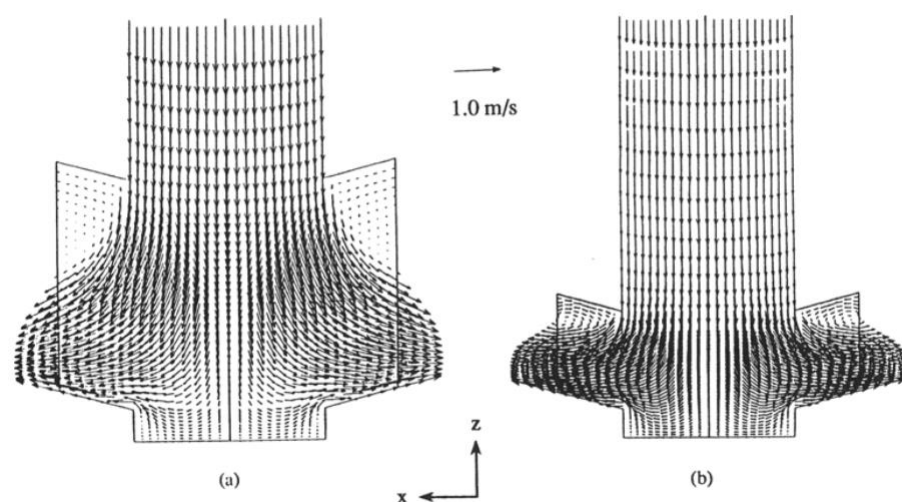
ao acúmulo prejudicial de inclusões e ao *clogging* (NAJJAR; THOMAS; HERSHEY, 1995).

Ademais a altura da porta também possui relação com fração de área efetiva, que é aumentada com uma altura de porta menor. Segundo, Najjar, Thomas e Hershey (1995), isso ocorre devido as velocidades médias dos jatos e as intensidades de turbulência ficarem maiores, visto que é imposta uma restrição ao fluxo ao se deparar com uma altura menor da porta.

Najjar, Thomas e Hershey (1995), trazem sobre a existência de válvulas submersas projetadas com a área combinada das portas sendo maior que a área do furo. Isto é feito para reduzir a restrição de fluxo causada pelas portas e para acomodar algum acúmulo de inclusão na porta sem afetar o fluxo de aço fundido no molde. No entanto, o presente estudo mostrou que portas desta forma diminuem a fração de área efetiva(β) e causam a formação de uma zona de recirculação prejudicial de baixa velocidade (Figura 17). Isto pode contribuir para o acúmulo de inclusão na borda superior da porta. Quando o acúmulo de inclusão ocorre em uma taxa mais rápida em uma porta do que na outra, a área de saída efetiva das duas portas é diferente. Para evitar o *clogging* é ideal seguir a razão apresentada na equação 1:

$$\frac{\text{Área da porta}}{\text{Área do furo}} < 1, \quad \text{dessa forma } \beta = 1 \quad (1)$$

Figura 17 – Velocidades na vizinhança da porta para uma SEN de +15 graus: (a) Hp=90mm (b) Hp =45mm.

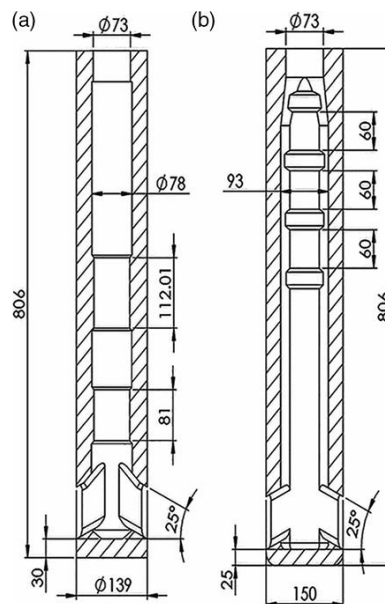


Fonte: Adaptado de: Najjar; Thomas; Hershey, 1995.

Também foi analisado válvulas submersas de quatro portas, e observou-se que ela produz ângulos de jato mais rasos, velocidades de pico mais baixas e uma fração de área efetiva maior, em comparação com o bocal bifurcado padrão. Os dados foram: velocidade de pico na saída da porta de $1,6\text{m/s}^{-1}$ (duas portas padrão) para $1,2\text{m/s}^{-1}$ (quatro portas superiores) e $1,3\text{m/s}^{-1}$ (quatro portas inferiores). Nessas velocidades mais baixas, pode ser atribuído, maior tempo de flotação de inclusões e bolhas no molde (NAJJAR; THOMAS; HERSHEY, 1995).

O estudo conduzido por González-Solórzano e Morales (2022), investiga o desempenho de duas válvulas submersas de projetos distintos, Figura 18: válvula A, com uma expansão e contração internas, e válvula B, projetada com defletores internos de fluxo. Utilizando um modelo físico em escala real e simulações numéricas com o modelo de simulação adaptativa de escala (SAS), os autores avaliaram as intensidades de fluxo turbulento no molde de placas por cada válvula e sua relação com *clogging*.

Figura 18 – Geometrias das válvulas: (a) válvula A (b) válvula B

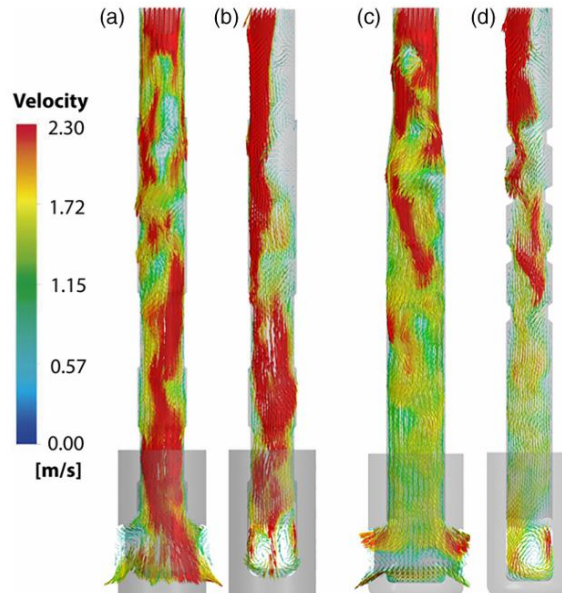


Fonte: Adaptado de: González-Solórzano e Morales, 2022.

Os resultados mostram que o design da válvula influencia significativamente as estruturas de fluxo no molde. A válvula B apresentou uma maior dissipação da energia turbulenta, com uma faixa de ciclos de fluxo mais estreita e menos intensa, devido às maiores taxas de dissipação da energia cinética causadas pela presença dos defletores, resultando em menor propensão ao entupimento

comparada à válvula A. Conforme observado na comparação da Figura 19, na válvula B o líquido flui com um perfil de velocidade uniforme.

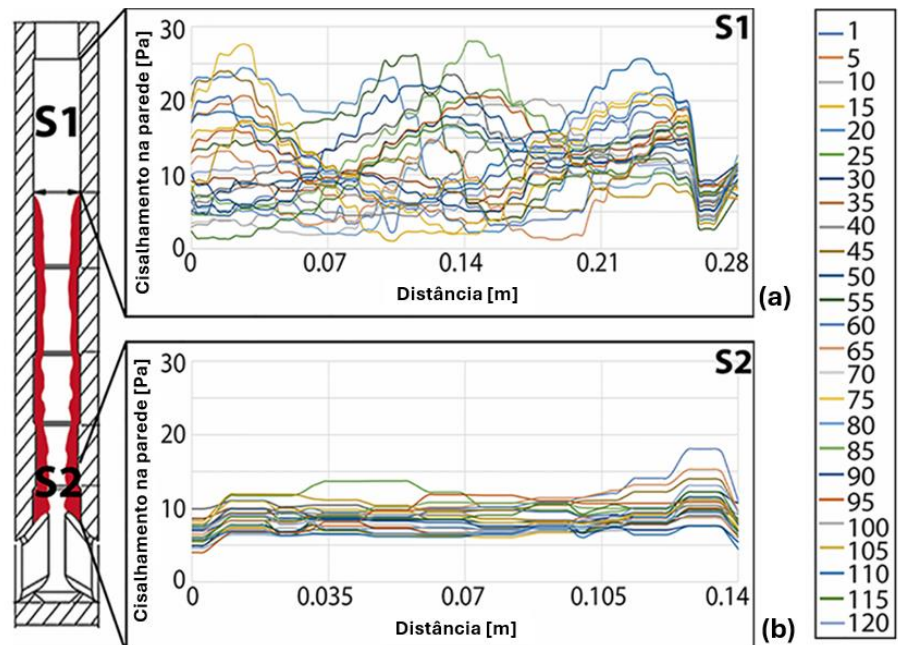
Figura 19 – Visão da velocidade do líquido dentro das válvulas a partir de vistas paralelas e perpendiculares: (a) plano longitudinal da válvula A (b) válvula A a 90° (c) plano longitudinal da válvula B (d) válvula B a 90°



Fonte: Adaptado de: González-Solórzano e Morales, 2022.

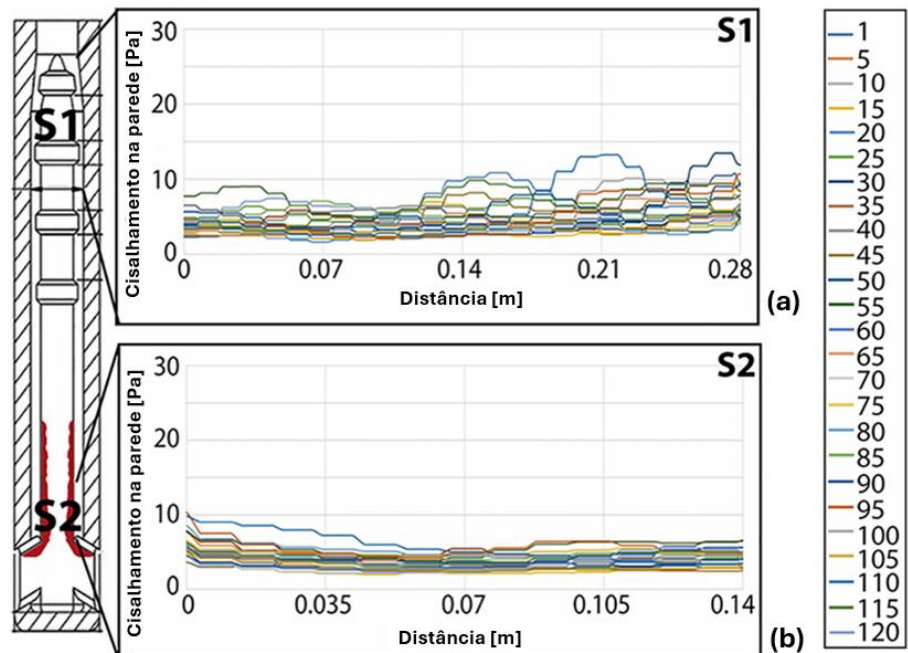
Além disso, a análise revelou uma influência das tensões de cisalhamento na parede interna da válvula, regiões com menores tensões de cisalhamento podem ser mais propensas ao entupimento. A Figura 20 mostra as variações das tensões de cisalhamento na parede da válvula A, na região sem *clogging*, a tensão de cisalhamento na parede varia de 1 a 27 Pa, com um espectro de frequências de vórtices que mudam rapidamente com o tempo. Dessa forma, as varreduras e ejeções de partículas são mais frequentes, resultando em menores probabilidades de adesão de partículas à parede interna. Por outro lado, na região mais propensa ao *clogging*, destacada em vermelho na figura, a tensão de cisalhamento diminui consideravelmente. A Figura 21 apresenta as tensões de cisalhamento instantâneas na parede da válvula B, os defletores de fluxo afetam as magnitudes da tensão de cisalhamento e sua distribuição na parede da válvula, a tendência dessa válvula sofrer entupimento é consideravelmente menor do que a observada na válvula A (GONZÁLEZ-SOLÓRZANO E MORALES, 2022).

Figura 20 – Tensões de cisalhamento na parede da válvula A: (a) região sem entupimento (b) região propensa ao entupimento



Fonte: Adaptado de: González-Solórzano e Morales, 2022.

Figura 21 – Tensões de cisalhamento na parede da válvula B: (a) região sem entupimento (b) região propensa ao entupimento

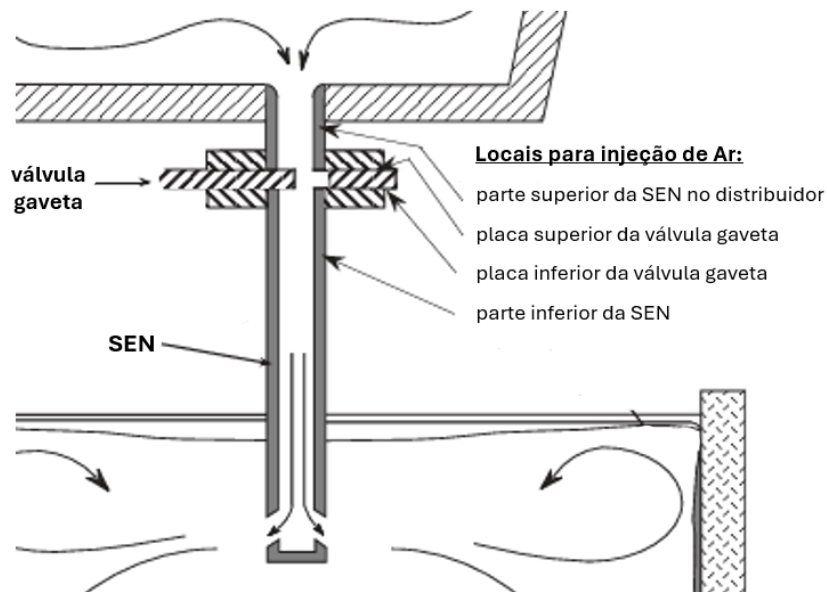


Fonte: Adaptado de: González-Solórzano e Morales, 2022.

5.2 Injeção de gases inertes na válvula

Thomas, Dennisov e Bai (1997) realizaram experimentos para entender o comportamento das bolhas de argônio durante o lingotamento contínuo de placas. A Figura 22 ilustra quatro possíveis pontos de injeção de argônio na válvula submersa, onde o gás pode ser introduzido através de material poroso ou orifícios na parede. Os estudos indicaram que, em altas taxas de fluxo de gás, o argônio forma um filme na parede da válvula, protegendo contra inclusões sólidas. Observou-se também que, as bolhas de argônio ajudam na flotação das inclusões, facilitando sua remoção. Além disso, ao aumentar a taxa de fluxo de gás e diminuir a taxa de fluxo de aço, o tamanho das bolhas de argônio tende a crescer.

Figura 22 – Esquema do processo de lingotamento contínuo mostrando quatro possíveis locais de injeção de argônio.



Fonte: Adaptado de: Thomas, Dennisov e Bai, 1997.

Em um estudo realizado por Furtado *et al.* (2004), no lingotamento contínuo de placas da ArcelorMittal Tubarão, foram avaliadas várias alternativas para reduzir a ocorrência de *clogging*, independentemente da limpidez do aço líquido lingotado. Foram comparadas as válvulas já presentes no processo com válvulas submersas de CaO-ZrO₂-C, válvulas com refratário isento de carbono, válvulas de dolomita e válvulas com geometria de duplo degrau no seu interior, conhecida como *step*. Além disso, foi avaliada a prática de injeção de argônio na válvula.

As modificações na composição da SEN e na geometria da válvula não demonstraram maior eficiência na redução da camada de deposição de alumina, principalmente em comparação com a injeção de argônio (FURTADO *ET AL.*, 2004).

A injeção de argônio nas válvulas submersas é um método já implementado no processo de lingotamento, e mesmo com a injeção de volumes significativos deste gás, a presença de entupimentos nas válvulas não é incomum. O estudo de Furtado *et al.* (2004), observou que a eficiência do método pode ser prejudicada pela fuga do argônio para fora do aço líquido, através de trincas ou juntas dos refratários. Foi evidenciada uma forte associação da obstrução com a queda da pressão de retorno no início do lingotamento.

Com a modificação do ponto de injeção de argônio para uma região de refratário mais estável, houve uma melhoria significativa na pressão de retorno. Concluiu-se que a injeção de argônio com pressão de retorno elevada e estável durante todo o lingotamento apresentou os resultados mais efetivos para a redução do *clogging* na SEN (FURTADO *ET AL.*, 2004).

Soares *et al.* (2015) em um projeto realizado para reduzir a ocorrência de obstruções em válvulas submersas no lingotamento contínuo de placas da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), também estabeleceu a relação entre a injeção de argônio ineficiente e as obstruções. Foram identificados vazamentos na tubulação de argônio, falhas nos transistores digitais do painel eletrônico, bem como variações entre as contrapressões das câmaras superior e inferior das válvulas.

Após os reparos na estação de injeção de argônio e a eliminação dos vazamentos nas tubulações, foi possível obter um melhor controle do gás inerte durante o sequencial. Além disso, foi realizado um treinamento operacional que aprimorou a perícia dos operadores no controle do veio. Com essas ações, houve uma redução drástica nas ocorrências de obstruções. Na Figura 23, pode-se observar uma válvula (a) antes das ações, com deposição prematura de alumina após 128 minutos de lingotamento, e outra válvula (b) após 535 minutos de lingotamento, sem restrições no fluxo de aço (SOARES *ET AL.*, 2015).

Figura 23 – Tubo submerso apresentando (a) obstrução prematura (b) deposição de alumina sem restrição do fluxo de aço.



Fonte: Soares *et al.*, 2015.

Em um experimento realizado por Prenazzi, Nascimento e Resende (2013) para melhorar a performance das válvulas submersas no lingotamento contínuo de placas, foram testadas algumas alternativas. Uma das alternativas foi o uso de material de baixo carbono na composição interna da válvula, que demonstrou eficiência contra o ataque pela escória do pó fluxante, mas foi ineficaz como anti-*clogging*. Outra abordagem testada foi a injeção de argônio através da válvula, que se mostrou uma boa alternativa contra as obstruções da válvula.

Complementando esses resultados, Wang *et al.* (2023) afirmam que, se a injeção de argônio na parede da válvula submersa for instável, pode levar a obstruções locais, resultando em um fluxo de gás desigual e potencialmente gerando uma obstrução completa da SEN. Além disso, se a pressão da injeção de argônio for baixa, pode prejudicar a passagem do gás entre a parede da válvula e o metal líquido, impedindo sua efetiva passagem. Por outro lado, se a pressão for muito alta, as bolhas podem entrar no banho de aço e comprometer a estabilidade do gás. Bolhas de pequeno diâmetro são adequadas para remover inclusões e prevenir obstruções. No entanto, pequenas bolhas podem entrar em contato com o molde e resultar em defeitos no lingote. Portanto, é muito importante explorar uma taxa de fluxo de gás adequada.

5.3 Tratamentos anteriores ao fluxo do distribuidor para o molde

A obstrução em válvulas submersas pode estar associada à presença de inclusões não metálicas, que formam uma camada em seu interior. Para evitar que tais inclusões cheguem até a válvula, ações podem ser implementadas no distribuidor do lingotamento contínuo.

Uma das alternativas é a implementação de cortinas de gás inerte no distribuidor do lingotamento contínuo. Em um modelamento matemático e físico abordado por Silva (2017), o método demonstrou eficiência na remoção de inclusões, com a modificação do fluxo do líquido. Através das bolhas formadas pela injeção de gás, ocorre a captura das inclusões e a flotação dessas partículas, melhorando a limpidez do banho e homogeneizando o aço quimicamente e termicamente. No estudo, a injeção de gás com melhor desempenho foi realizada através da associação de plugue anelar e barreira porosa no fundo do distribuidor.

Para obstruções causadas por aço solidificado no interior do molde, devido a temperaturas não controladas no processo de lingotamento contínuo, Garcia *et al.* (2006) apresenta métodos empregados para evitar a queda de temperatura do banho líquido. Esses métodos incluem o aquecimento do distribuidor com chamas ou tocha de plasma antes do início do lingotamento, a utilização de tampa refratária na panela e a adição de pó de cobertura na superfície do aço.

Morais (2006) realizou um estudo em planta industrial visando a redução de obstruções no fluxo do distribuidor para o molde devido à baixa temperatura do aço. Os resultados mostraram que o pré-aquecimento deficiente da válvula e, principalmente, o lingotamento com valores muito baixos de *superheats* no aço a ser lingotado são precursores para obstruções da válvula por aço solidificado. Além disso, foi observada uma tendência maior para a solidificação prematura do aço em aços de baixo e ultra baixo carbono, quando comparados a aços de médio carbono.

5.4 Tratamentos anteriores ao lingotamento contínuo

Para evitar o *clogging* na válvula submersa, além dos tratamentos abordados neste trabalho com o enfoque no lingotamento contínuo, existem estratégias nas etapas anteriores do processo. Muitos estudos destacam a importância de tratamentos prévios para evitar obstruções, principalmente visando a redução de inclusões no aço. Essas estratégias serão sucintamente discutidas neste tópico.

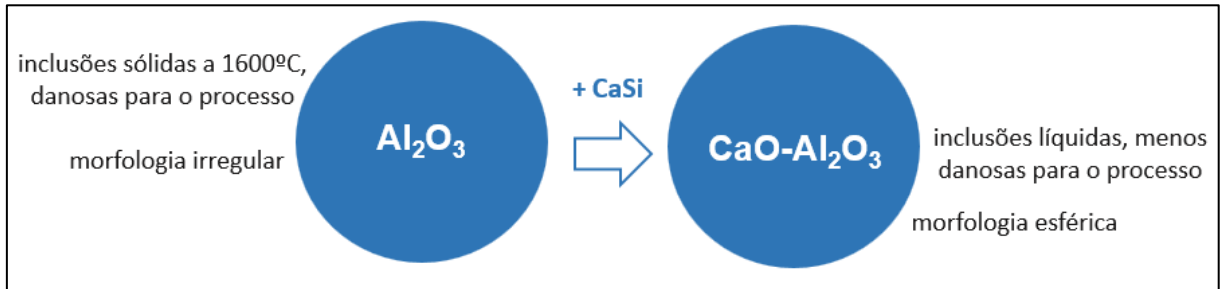
No refino secundário do aço, para a modificação da morfologia das inclusões, é amplamente utilizada a adição de cálcio e suas respectivas ligas ao banho. Em estudo realizado por Bielefeldt, Marcon e Vilela (2008), foi experimentado o tratamento do aço SAE 8620 com adição de CaSi e Al. As inclusões esféricas de MnO-SiO₂ e de Al₂O₃ evoluíram para inclusões do sistema CaO-Al₂O₃, esféricas e quimicamente homogêneas. Desse modo, ocorreu a modificação das inclusões prejudiciais para a lingotabilidade do aço em válvulas submersas, para inclusões de cálcio-aluminatos líquidas ou parcialmente líquidas, menos danosas para o processo.

Berlini Filho (2017), em seu estudo sobre a modificação de inclusões durante o tratamento com cálcio em aços SAE 1020, SAE 1030 e SAE 1045 desoxidados ao alumínio, estabeleceu uma correlação na qual as inclusões que se iniciam a partir da Al₂O₃, predominantemente sólidas a 1600°C, tornam-se líquidas à medida que o cálcio é adicionado. Ocorre a modificação da Al₂O₃ em aluminatos de cálcio, que possuem menor temperatura de fusão. Para aços com o teor mais elevado de enxofre, acredita-se que ocorre a formação de mais inclusões de CaS, limitando a difusão do cálcio e a modificação da alumina em aluminatos líquidos. Além disso, concluiu-se que menores teores de oxigênio total no banho são benéficos para a economia das adições de cálcio. Magalhães (2010), constatou pela caracterização das inclusões a modificação da morfologia das inclusões, que passam de irregulares para esféricas com a adição de CaSi no banho.

A modificação da morfologia das inclusões de alumina, conforme esquematizado na Figura 24, favorece a lingotabilidade e pode reduzir obstruções devido ao seu acúmulo em válvulas submersas. No entanto, como observado neste

trabalho, essa modificação não é o único fator determinante para a solução do problema.

Figura 24 – Representação esquemática da modificação de inclusões de Al_2O_3 .



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

5.5 Recomendações práticas

Com base nos resultados obtidos, algumas recomendações práticas podem ser implementadas para minimizar as obstruções em válvulas submersas no processo de lingotamento contínuo de aços. As técnicas para prevenir o entupimento, mencionadas por diversos autores ao longo deste estudo, foram consolidadas e estão resumidas na Tabela 3.

Tabela 3 – Resumo das técnicas para eliminação de obstruções em válvulas submersas em LC

Autor(es) (ano de publicação)	Método Proposto	Mecanismo de Ação
Najjar, Thomas e Hershey (1995)	Em válvula submersa bifurcada, redução do ângulo da porta.	Aumento da fração de área efetiva.
	Em válvula submersa bifurcada, altura de porta menor.	Aumento da fração de área efetiva, aumento de turbulência do fluxo.
	Válvulas submersas de quatro portas.	Aumento da fração de área efetiva, velocidades de pico mais baixas contribuindo com maior tempo para flotação de inclusões e bolhas no molde.
González-Solórzano e Morales (2022)	Válvula projetada com defletores internos de fluxo.	Maiores taxas de energia cinética, perfil de velocidade uniforme.
Thomas, Dennisov e Bai (1997)	Injeção de argônio na válvula, com altas taxas de fluxo.	O gás forma um filme que protege a parede da SEN e também ajuda a flotar as inclusões.
Furtado <i>et al.</i> (2004)	Injeção de argônio na válvula em uma região de refratário mais estável, com pressão de retorno elevada e estável.	Favorável para flotar inclusões e beneficiar a limpidez do aço.
Soares <i>et al.</i> (2015)	Injeção de argônio na válvula com pressão de retorno estável.	Favorável para flotar inclusões e beneficiar a limpidez do aço.
Prenazzi, Nascimento e Resende (2013)	Injeção de argônio na válvula.	Favorável para flotar inclusões e beneficiar a limpidez do aço.
Wang <i>et al.</i> (2023)	Injeção de argônio na válvula com pressão e fluxo estável.	Favorável para flotar inclusões e beneficiar a limpidez do aço.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

6. CONCLUSÕES

Por meio de uma revisão bibliográfica abrangente e da análise de diferentes abordagens experimentais, verificou-se que a geometria da válvula e a injeção de gases inertes desempenham papéis cruciais na prevenção de entupimentos na válvula submersa, causados principalmente por inclusões de alumina, além de promoverem um fluxo de aço mais homogêneo.

Além disso, evidenciou-se que, no distribuidor, o controle preciso da temperatura do aço é essencial para evitar a solidificação prematura do metal. Adicionalmente, os estudos indicam que, no refino secundário, o tratamento do aço para a modificação das inclusões, embora amplamente implementado na prática operacional, ainda não se mostra totalmente eficiente.

Conclui-se que a adoção dessas práticas, combinada com o controle rigoroso das condições operacionais, não apenas melhora a eficiência das máquinas de lingotamento contínuo, mas também contribui para a redução de custos e para a obtenção de um produto final com maior limpidez e qualidade. Contudo, ainda não foi possível determinar uma solução única e viável que abranja as particularidades de cada usina. Portanto, antes de aplicar qualquer melhoria e substituir a válvula submersa para otimizar o processo, é essencial realizar estudos experimentais que qualifiquem o desempenho conforme as especificidades da máquina de lingotamento contínuo e da qualidade do aço.

Entre os cerca de 130 trabalhos analisados, identificou-se uma dificuldade em encontrar estudos que tratassem especificamente das obstruções em válvulas durante o processo de lingotamento. Essa lacuna representou um desafio para a elaboração do estado da arte, mas também evidenciou a necessidade de mais pesquisas nessa área. Dessa forma, além da análise de estudos focados no *clogging* durante o lingotamento, foi necessário recorrer a trabalhos sobre materiais de refino secundário, os quais apresentam um volume significativo de publicações, embora o tema do *clogging* seja abordado de forma secundária.

Além disso, um dos objetivos propostos neste trabalho era avaliar o efeito de adições no lingotamento contínuo como forma de prevenir obstruções nas válvulas submersas. No entanto, não foram encontrados estudos que abordassem diretamente

essa questão. A ausência de literatura específica sobre o tema indica a necessidade de futuros estudos sobre o impacto de aditivos no lingotamento, com o objetivo de otimizar a performance das válvulas e reduzir o fenômeno de *clogging*.

7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o desenvolvimento de pesquisas futuras, as seguintes direções são sugeridas:

- a) aditivos no lingotamento contínuo: Explorar o uso de aditivos diretamente no processo de lingotamento contínuo, esta linha de pesquisa pode oferecer novas soluções químicas que, ao interagir com as inclusões não metálicas, minimizem os problemas de entupimento na válvula submersa e melhorem a eficiência do processo.
- b) injeção de gases inertes na válvula: Investigar detalhadamente o processo de injeção de gases inertes, com especial atenção para a determinação do diâmetro ideal das bolhas de gás, bem como a quantidade e a localização exata da injeção;

REFERÊNCIAS

- ARAUJO Luiz Antônio de. **Manual de Siderurgia**: Vol.1 Produção. 2. ed. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 2005.
- BARCELLOS Vinicius Karlinski. **Desenvolvimento de software de simulação da solidificação de aços no processo de lingotamento contínuo de tarugos**. 2011 Tese (Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- BERLINI FILHO Carlos. **Efeito da adição de cálcio na formação de inclusões em aços médio teor de carbono desoxidados ao alumínio**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- BIELEFELDT Wagner Viana; MARCON Leomar; VILELA Antônio Cezar Faria. Estudo experimental do tratamento de inclusões com cálcio em escala laboratorial. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, 2008, v. 5, n. 2, p. 77-82. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/tmm.00502003>. Acesso em: 01 ago. 2024.
- BORBA Daniel Lúcio de Souza. **Sistema de detecção de *Breakout* em máquinas de lingotamento contínuo**. 2011. Dissertação (Programa de pós-graduação de Engenharia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- FERREIRA, Felipe Buboltz. **Limpeza inclusionária em aciaria com vistas a interação de revestimentos refratários e escórias de distribuidor**. 2022. Tese (Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.
- FURTADO Henrique Silva *et al.*. SEMINÁRIO DE FUSÃO, REFINO E SOLIDIFICAÇÃO DOS METAIS & SEMINÁRIO DE FUNDIÇÃO, 35., 2004, Salvador. **Avaliação crítica das ações "anti-clogging" no lingotamento contínuo**. Salvador, BA: ABM, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.5151/2594-5300-0018>. Acesso em: 25 jun. 2024.

GALLO Maurizio. **Refratários para lingotamento contínuo**. 1. ed. Minas Gerais, 2000.

GARCIA Amauri *et al.*. **Lingotamento contínuo de aços**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006.

GONZÁLEZ-SOLÓRZANO María Guadalupe; MORALES Rodolfo Dávila. *Physical modeling and mathematical modeling using the scale-adaptive simulation model of nozzle design effects on the flow structure in a slab mold*. **Steel Research International**, Cidade do México, México v. 93, n. 11, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/srin.202200395>. Acesso em: 27 jul. 2024.

HARCSIK Bela; KAROLY Gyula. *Controlling nozzle clogging by secondary steelmaking without reheating*. **Steel Research International**, Miskolc/Hungary, v. 84, n. 2, p. 129-135, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/srin.201200084>. Acesso em: 21 jun. 2024.

INSTITUTO AÇO BRASIL, **Indústria do aço em números**, Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/publicacoes/>. Acesso em: 20 jun. 2024.

KROMHOUT J. A.; SCHIMMEL R. C.. *Understanding mould powders for high-speed casting*. **Ironmaking & Steelmaking**, Reino Unido, 2018, v. 45, n. 3, p. 249-256. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03019233.2016.1257557>. Acesso em: 03 jul. 2024.

MACHADO, Felipe das Dorês. **Modelagem física de remoção de inclusões em distribuidor de lingotamento contínuo de tarugos**. 2014. Dissertação (Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

MAGALHÃES Humberto Luiz Gama de. **Melhoria da limpidez do aço SAE 1045 desoxidado ao alumínio com aplicação na indústria automobilística, utilizando termodinâmica computacional**. 2010. Dissertação (Programa de pós-graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

MENDONÇA Alexandre de Freitas Gomes de. **Análise estatística do comportamento térmico na região intermediária do molde de uma máquina de lingotamento contínuo de placas para predição de rompimento de pele.** 2020. Monografia (Instituto de Ciências Exatas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

MORAIS Alexandre de Aparecida. **Estudo fenomenológico do mecanismo de obstrução do fluxo de aço do distribuidor para o molde no início do lingotamento contínuo de placas.** 2006. Dissertação (Programa de pós-graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

NAJJAR Fady M.; THOMAS Brian G.; HERSHEY Donald E.. *Numerical study of steady turbulent flow through bifurcated nozzles in continuous casting.* **Metallurgical and Materials Transactions B**, Illinois, v. 26B, p. 749-765, ago. 1995

PEREIRA Julio Aníbal Morales *et al.*. *Analysis of spinel based inclusions during the last stage of the steelmaking process of SAE 52100.* **Materials Research**, Porto Alegre 2019. p. 1-11, março, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0558>. Acesso em: 19 nov. 2023.

POIRIER Jaques. *A review: influence of refractories on steel quality.* **Metallurgical Research & Technology**, França, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/metal/2015028>. Acesso em: 21 nov. 2023.

PRENAZZI Alessandro; NASCIMENTO José Geraldo Ferreira do; RESENDE Ramon Fraga. SEMINÁRIO DE ACIARIA – INTERNACIONAL, 44., 2013, Araxá. **Aumento de performance de válvulas submersas para lingotamento contínuo de placas.** Araxá, MG: ABM, 2013. Disponível em: abmproceedings.com.br/ptbr/article/aumento-de-performance-de-vmvulas-submersas-para-lingotamento-contnuo-de-placas. Acesso em: 15 jul. 2024.

RIZZO Ernandes Marcos da Silveira. **Introdução aos processos de lingotamento dos aços.** 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2006.

RIZZO Ernandes Marcos da Silveira. **Introdução aos processos siderúrgicos**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2005.

ROOS Erik; KARASEV Andrey; JÖNSSON Pär Göran. *Effect of Si and Ce contents on the nozzle clogging in a REM alloyed stainless steel*. **Steel Research International**, Alemanha, 2015, v. 86, n. 11. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/srin.201400344>. Acesso em: 08 jul. 2024.

SILVA Heric Henrique Souza e. **Remoção de inclusões em um distribuidor assistida por injeção de gás inerte**. 2017. Dissertação (Programa de pós-graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

SOARES Camila Lourenço *et al.*. SEMINÁRIO DE ACIARIA – INTERNACIONAL, 46., 2015, Rio de Janeiro. **Redução dos desvios de placas por desobstrução dos veios na MCC 2**. Rio de Janeiro, RJ: ABM, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5151/1982-9345-27208>. Acesso em: 29 jun. 2024.

THOMAS Brian G.; DENISOV Alex; BAI Hua. *Behavior of argon bubbles during continuous casting of steel*. **80^a Steelmaking Conference Proceedings**, Chicago, 1997, p. 375-384. Disponível em: <https://ccc.illinois.edu/publications.html#1997>. Acesso em: 14 ago. 2024.

TRUEBA JUNIOR Luis *et al.*. *Effect of nozzle base material on the rate of clogging during the continuous casting of aluminum-killed steels*. **Steel Research International**, Estados Unidos da América, 2006, v. 77, n. 1, p. 37- 47. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/srin.200606128>. Acesso em: 03 ago. 2024.

TRUSCHNER Christoph *et al.*. *Tracing of deoxidation products in Ti-stabilized interstitial free steels by La and Ce on an industrial and laboratory scale*. **Steel Research International**, Austria, 2024, v. 95, n. 3. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/srin.202300665>. Acesso em: 10 jul. 2024.

VESUVIUS. *Powders and distribution mechanisms*. Desenvolvido por Vesuvius Group S.A., 2024. Disponível em: <https://www.vesuvius.com/en/our-solutions/de-de/iron-and-steel/continuous-casting/tundish/tundish-powders>. Acesso em: 20 jun. 2024.

VESUVIUS. *Tundish to mould solutions for conventional slab casters*. Desenvolvido por Vesuvius Group S.A., 2024. Disponível em: <https://www.vesuvius.com/en/our-solutions/international/iron-and-steel/continuous-casting/tundish-to-mould-for-conventional-slab.html>. Acesso em: 14 ago. 2024.

WANG Yi *et al.*. *Influence factors of SEN clogging of rare-earth steel continuous casting and solve ideas of japanese steel enterprises*. **Steel Research International**, China, 2023, v. 94, n. 9. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/srin.202300078>. Acesso em: 23 jul. 2024.

YANG Yuwei *et al.*. *Multiphase solidification modeling of solidification structure evolution and macrosegregation of round bloom continuous casting process with mold electromagnetic stirring and final electromagnetic stirring*. **Steel Research International**, Liaoning/China, 2024, v. 95, n. 2. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/srin.202300446>. Acesso em: 21 jun. 2024.

ZHANG Lifeng; THOMAS Brian G.. *State of the art in evaluation and control of steel cleanliness*. **ISIJ International**, Estados Unidos da América, 2003, v. 43, n. 3, p. 271-291. Disponível em: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.271>. Acesso em: 03 abr. 2024.