Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

"INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA VÁLVULA SUBMERSA NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE BLOCOS: UMA REVISÃO DA LITERATURA"

Autor: Fabio Oliveira Costa

Orientador: Prof.DSc.Johne Jesus Mol Peixoto (DEMET/UFOP)

Ouro Preto, Junho de 2022

Fabio Oliveira Costa

"INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA VÁLVULA SUBMERSA NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE BLOCOS: UMA REVISÃO DA LITERATURA"

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalurgista.

Ouro Preto, Junho de 2022

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALURGICA E DE MATERIAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

Fabio Oliveira Costa

Influência da geometria da válvula submersa no lingotamento contínuo de blocos: uma revisão da literatura

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico

Aprovada em 27 de junho de 2022

Membros da banca

DSc. - Johne Jesus do Mol Peixoto - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)
PhD. - Carlos Antônio da Silva - (Universidade Federal de Ouro Preto)
MSc. - Antônio Marlon Barros Silva - (Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais/Campus Ouro Branco)

Johne Jesus do Mol Peixoto, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 12/07/2022

Documento assinado eletronicamente por **Johne Jesus Mol Peixoto**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/06/2022, às 19:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 , informando o código verificador **0352564** e o código CRC **47465BC7**.

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: 3135591561 - www.ufop.br

RESUMO

O processo de Lingotamento Contínuo tem se ajustado cada vez mais à demanda mundial por lingotes de aço com alto grau de limpidez e elevada qualidade superficial. Neste sentido, o padrão de escoamento no molde, principalmente na região do menisco, possui um impacto direto na qualidade do produto lingotado. Além das condições operacionais, a geometria da válvula submersa (SEN) é uma das variáveis que influencia consideravelmente o controle do escoamento nesta região. Neste trabalho foi realizada uma revisão da literatura para verificar quais foram as principais modificações geométricas da válvula submersa que resultaram em melhoria no processo de lingotamento contínuo de blocos. Dentro deste contexto para a linha de produtos longos, especialmente para o lingotamento de tarugos e blocos, geralmente utiliza-se uma SEN conhecida como válvula tubular reta, devido a sua simplicidade. Entretanto, à medida que cresce a procura por um aço de alta qualidade este tipo de SEN não é a mais adequada para cumprir todos os requisitos. Por isso, nos últimos anos vários estudos foram feitos com relação à geometria da SEN apoiados pela utilização de campos eletromagnéticos, tais como agitadores eletromagnéticos no molde (M-EMS) a fim de aumentar a capacidade de remover inclusões não metálicas no molde e melhorar o padrão de fluxo no menisco. A partir dos resultados obtidos em simulações físicas e numéricas verificou-se que a utilização de válvulas com múltiplas portas é a mais recomendada quando se deseja produzir blocos de alta qualidade, sendo que boa parte destes resultados alcançados se deve também a participação da agitação eletromagnética, comprovando a forte influência do fluxo de aço líquido no molde sobre a obtenção de blocos de aço com propriedades metalúrgicas melhores.

Palavras-chave: Lingotamento contínuo. Válvula Submersa. Fluxo. Molde de blocos.

SUMÁRIO

RESUMO II

1 INTRODUÇÃO 1

2 OBJETIVOS 4

2.1 Objetivo Geral 4

2.2 Objetivos Específicos 4

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5

3.1 Lingotamento Contínuo de Aços 5

3.2 O Molde de Lingotamento Contínuo 6

3.2.1 Geometria do Molde 9

3.2.2 Uso de Pó Fluxantes 10

3.2.3 Uso de Agitação Eletromagnética no Molde 12

3.3 Ferramentas para Análise de Fluxo em Molde 15

3.3.1 Modelamento Físico 15

3.3.2 Modelamento Matemático 17

3.4 A Válvula Submersa 19

3.4.1 Condições operacionais da Válvula Submersa 21

3.4.2 Injeção de argônio 22

3.4.3 Geometria da Válvula Submersa 23

4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS 35

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 37

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Máquina de Lingotamento Contínuo. _____ 5
Figura 3.2. Típico revestimento utilizado em placas de molde. _____ 7
Figura 3.3. Ilustração do molde de lingotamento contínuo. _____ 11
Figura 3.4. Representação esquemática de um agitador eletromagnético. _____ 13
Figura 3.5. Agitação eletromagnética no molde (M-EMS). À esquerda sem M-EMS e a direita com M-EMS. _____ 14
Figura 3.6. Esquema típico de válvula submersa. _____ 20
Figura 3.7. Ilustração esquemática apontando os elementos que constituem a geometria da válvula submersa. _____ 23
Figura 3.8. Ilustração do perfil de velocidade e linhas de fluxo. À esquerda SEN de uma porta, à direita SEN de quatro portas. _____ 27
Figura 3.9. Morfologia da seção transversal após o lingotamento para cada tipo de SEN. Sendo (a) SEN reta e (b) SFN. _____ 29
Figura 3.10. Ilustração da extremidade de uma válvula rotativa. _____ 31
Figura 3.11. Vista superior da malha das válvulas nos quatro casos. _____ 32
Figura 3.12. Comportamento do fluxo de aço líquido no molde sob quatro tipos de SEN. __ 33

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Principais melhorias observadas. 36

LISTA DE SÍMBOLOS/SIGLAS

SEN – *Submerged Entry Nozzle*

LC – Lingotamento Contínuo

EMS - *Electromagnetic Stirring*

M-EMS – *Mould Electromagnetic Stirring*

S-EMS - *Secondary Electromagnetic Stirring*

F-SEM – *Final Electromagnetic Stirring*

CFD − *Computational Fluid Dynamics*

SFN – *Swirling Flow Nozzle*

QCN – *Quad-furcated Curved Nozzle*

RTD - *Residence Time Distribution*

PIV - *Particle Image Velocimetry*

LPM – Litros por minuto

C – Carbono

S – Enxofre

UDV- *Ultrasound Doppler Velocimetry*

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que a máquina de lingotamento contínuo para aços foi idealizada em 1856 por Henry Bessemer, porém, foi em 1933 que Siegfried Junghans patenteou um sistema de oscilação do molde que viabilizou a efetivação do lingotamento contínuo na siderurgia, e consequentemente, a produção de aço em escala industrial (SILVA e SHIBATA, 2013). Segundo dados da *World Steel Association* (2020) o aço produzido por meio do lingotamento contínuo representa aproximadamente 98% da produção mundial.

Dessa forma, existe uma grande preocupação com relação aos defeitos oriundos deste modelo de fabricação, que por sua vez, estão associados às condições de escoamento do aço dentro do molde. Assim, há necessidade de se conhecer a fundo os fenômenos relacionados com a fluidodinâmica no processo de lingotamento contínuo, com o objetivo de compreender e regular o padrão de escoamento no interior do molde, para se obter produtos semiacabados com melhor qualidade metalúrgica.

Neste contexto, a ocorrência de muitos destes defeitos é acentuada devido às flutuações no nível de aço no molde, e tais flutuações estão associadas com o padrão de escoamento do aço na região do menisco. Assim sendo, o escoamento do aço na região do menisco pode ser controlado por vários parâmetros e condições operacionais da máquina de lingotamento contínuo como, por exemplo, velocidade de lingotamento, dimensões do molde, injeção de argônio, geometria da válvula submersa, dentre outros (DIAS, 2019).

No entanto, segundo Thomas (2005) uma das condições operacionais mais relevantes, que altera significativamente o escoamento do aço na região do menisco, é a geometria da válvula submersa como, profundidade de imersão, ângulo, altura, espessura e formato da porta de saída. Deste modo, configurada uma condição de trabalho (velocidade de lingotamento, vazão de argônio e dimensões do molde), a geometria da válvula submersa pode ser ajustada com o intuito de se obter um padrão de escoamento do aço na região do menisco ideal.

Dependendo do tipo do lingote de aço, diferentes estratégias têm sido adotadas sobre o projeto da válvula submersa, conhecida como *submerged entry nozzle* (SEN), para atender a necessidades específicas dos mesmos. Por exemplo, na produção de produtos longos como tarugos e blocos, geralmente são utilizadas válvulas do tipo porta única, por conta da sua simplicidade. Entretanto, pela demanda de aços com uma limpidez cada vez maior, estudos indicam que este tipo de SEN pode não ser a mais adequada para atender tais requisitos (HACKL *et al*., 2018).

Neste sentido, conforme Wang *et al*. (2019) as válvulas tubulares de passagem retas juntamente com o sistema de agitação eletromagnética do molde, *mold electromagnetic stirring* (M-EMS), têm sido amplamente utilizados no lingotamento de blocos. Além disso, foi descoberto que uma válvula de fluxo circular quadrifurcado, *quad-furcated swirling flow nozzle* (SFN), é capaz de gerar um fluxo circular horizontal de aço líquido no molde e obter efeito metalúrgico similar a M-EMS.

Destaca-se que a maioria destes estudos sobre a influência da geometria da válvula submersa no escoamento do aço dentro do molde, têm sido realizados por meio de simulações físicas e/ou computacionais. Conforme apontaram Brighton *et al*. (2014) uma das ferramentas tem sido os modelos físicos utilizando água para simular o comportamento do fluxo de aço líquido induzido por diferentes formatos de SEN em moldes de lingotamento contínuo de vários produtos semiacabados (placas, placas finas, blocos, *beam blank* e tarugos). Já no caso da simulação computacional, o modelamento matemático, através do método de volumes finitos, deve ser validado. Desta maneira, experimentos em modelos físicos também são necessários, por exemplo, para através de métodos de avaliação de velocidades próximos à região do menisco no modelo físico, que podem ser comparadas com as previstas pelo modelo matemático (DIAS, 2019). Portanto, ambas as metodologias andam juntas com o objetivo de prever o comportamento fluidodinâmico no molde de LC para cada modificação feita na concepção da válvula submersa.

Neste sentido, ao longo deste trabalho será apresentada uma pesquisa bibliográfica sobre os diferentes formatos de válvulas submersas existentes e os respectivos efeitos

no escoamento de aço no interior do molde. Além disso, será levantado um panorama geral sobre o processo de lingotamento contínuo, das ferramentas de análise de fluxo, bem como das principais características da válvula submersa, notadamente da influência da geometria da SEN no lingotamento contínuo de blocos.

2 OBJETIVOS

São objetivos deste trabalho:

2.1 Objetivo Geral

Realizar uma revisão da literatura, sobre a influência da geometria da válvula submersa (SEN) no lingotamento contínuo de blocos.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos consistem em:

I. Realizar uma revisão bibliográfica sobre o lingotamento contínuo de blocos com foco nos parâmetros geométricos da válvula submersa e sua influência sobre o fluxo de aço líquido no molde;

II. Apresentar e discutir os resultados de artigos que abordam o tema realizando uma análise crítica;

III. Verificar quais são as principais modificações geométricas da válvula submersa que resultaram em melhoria operacional no lingotamento contínuo de blocos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

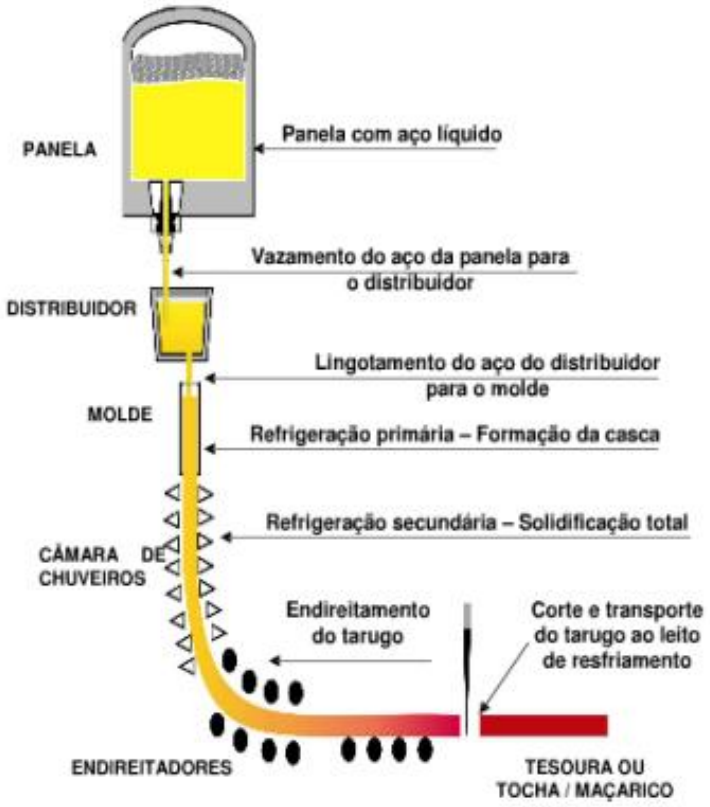
Neste capítulo foi elencado o conteúdo teórico presente na literatura que fundamentou a base científica do presente estudo. Esta revisão bibliográfica teve como objetivo abordar algumas temáticas que serviram de suporte para o entendimento do funcionamento da válvula submersa e as respectivas variáveis envolvidas. Diante disso, foi realizado um levantamento do que já foi estudado e o que ainda está em andamento em relação à geometria da válvula submersa no processo de lingotamento contínuo de blocos de aço.

3.1 Lingotamento Contínuo de Aços

O processo de lingotamento contínuo representa um importante elo entre a produção de aço e a laminação. Foi em 1856, que Henry Bessemer propôs um método de lingotamento contínuo (LC), mas somente durante as décadas de 1930 e 1940 o processo de LC se afirmou como um método industrial de produção para metais não ferrosos e, com o passar dos anos, a partir da década de 60 para os aços (SEETHARAMAN *et al*., 2014). A técnica do lingotamento contínuo oferece vantagens em relação ao lingotamento convencional nas quais se destacam: maior produtividade, melhor qualidade do produto semiacabado, redução no consumo de energia e de mão-de-obra (SILVA e SHIBATA, 2013).

Um resumo breve do processo de lingotamento é o seguinte: de uma panela contendo aço líquido emana um fluxo de metal líquido através de um tubo refratário, chamado tubo longo, para um distribuidor, que atua como reservatório intermediário entre a panela e o molde. Do distribuidor, o aço é vazado através de outro tubo refratário (válvula submersa ou SEN) para alimentar o molde, no molde em cobre refrigerado a água ocorre à formação de uma casca de aço solidificado, após a refrigeração primária, a casca é extraída de forma contínua por meio dos rolos extratores, então o calor do veio é removido por meio de chuveiros (*sprays*) de água de resfriamento, em sequência a remoção de calor do veio é realizada apenas por convecção natural e radiação, por fim é feito o corte no comprimento desejado e remoção das peças (ARAUJO, 1997 *apud* PEREIRA, 2004). Um esquema da máquina de LC pode ser observado na Figura 3.1.

Figura 3.1. Máquina de Lingotamento Contínuo.



Fonte: SILVA e SHIBATA, 2013.

Conforme dito no resumo do processo e ilustrado na Figura 3.1, da panela o aço é transferido para o distribuidor, através de uma peça refratária denominada tubo longo. Desta forma, as principais funções do distribuidor são: atuar como um reservatório para permitir a troca das panelas e distribuir o aço para o molde. Por fim, quando o volume de aço atinge uma altura pré-determinada, abre-se a válvula reguladora de vazão do distribuidor (válvula gaveta e/ou tampão), partindo o enchimento do molde, por meio de um tubo refratário denominado válvula submersa (ALVES, 2014).

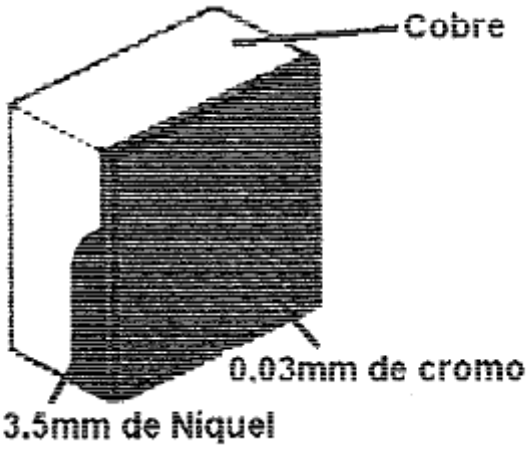
Além disso, segundo Dias (2019) argônio pode ser injetado na válvula interna do distribuidor com a finalidade de prevenir a formação de "*clogging*" na válvula submersa e também a reoxidação do aço. No entanto, esta injeção induz a formação de bolhas, afetando significativamente as condições de escoamento no molde.

3.2 O Molde de Lingotamento Contínuo

Um dos principais reatores metalúrgicos do processo de lingotamento contínuo é o molde, cuja principal função consiste em conter o aço líquido, iniciar sua solidificação e promover a formação de uma primeira casca que dá forma ao produto semiacabado (lingote) na aciaria.

O molde geralmente é feito de cobre eletrolítico, devido à necessidade de uma rápida extração de calor do veio, uma vez que o cobre possui uma alta condutividade térmica. Assim sendo, o molde pode ser um usinado de um bloco inteiriço (para tarugos) ou constituído de um conjunto de placas mantidas firmemente juntas (para placas). Dentro de suas paredes há circulação de água para sua refrigeração. Além disso, na confecção dos moldes são também utilizadas ligas metálicas a base de cobre e também o molde pode ainda ter suas paredes internas revestidas de cromo ou níquel (BRIMACOMBE, HAWBOLT e WEINBERG, 1984 *apud* PEREIRA, 2004). Um esquema deste revestimento pode ser visto na Figura 3.2.

Figura 3.2. Típico revestimento utilizado em placas de molde.



Fonte: MOURÃO *et al*., 2007.

No lingotamento contínuo o molde exerce um papel fundamental, ao ponto de ser considerado o coração da máquina de LC. Grande parte das características finais dos produtos de lingotamento está ligada à solidificação inicial da casca no molde. Por isso, é muito importante que a transferência de calor entre o molde e aço líquido (molde-metal) seja bem parametrizada durante o processo de lingotamento contínuo, porque existe uma espessura crítica (mínima) de pele solidificada, medida na saída do molde, acima da qual a

pele consegue resistir à pressão ferrostática associada aos esforços de dobramento-desdobramento (SILVA e SILVA, 2020).

Neste sentido, são realizadas diversas avaliações do fluxo de calor para se controlar a solidificação no molde de lingotamento contínuo. Tais avaliações são base para o cálculo da espessura da pele solidificada, temperatura superficial da pele, previsão e análise da qualidade superficial dos blocos, dentre outras. Todavia, os dados operacionais demonstram uma significativa dispersão nos valores do fluxo de calor, que é devida ao grande número de variáveis envolvidas no sistema. Desta forma, tem-se que as principais variáveis que interferem no fluxo de calor no molde são: velocidade de lingotamento, padrão de oscilação do molde, dimensões do molde, tipo de pó fluxante, velocidade da água de refrigeração, superaquecimento do aço (*superheat*), formato da válvula submersa, injeção de argônio no molde, composição química do aço, além de outras (VALADARES, 2006 *apud* OLIVEIRA, 2009).

Tendo em vista que o aço sofre contração à medida que se vai se solidificando, os moldes são tipicamente afunilados ou multifacetados para compensarem a contração do veio e para assegurar um contato mais efetivo entre o molde e a casca, a fim de alcançar uma transferência de calor mais eficiente da casca para o molde. Para evitar a elevado atrito entre o molde e o metal, é adicionado ao sistema um pó fluxante (ou óleo) que atua como um lubrificante. O pó fluxante é muito eficaz para reduzir a fricção do molde e aumentar a qualidade superficial do lingote. O pó fluxante pode ser adicionado na superfície do aço manualmente ou utilizando alimentadores automáticos. É importante ter uma camada estável de pó fluxante no topo do molde para garantir uma alimentação constante durante a fusão do pó fluxante na interface molde-metal (SEETHARAMAN *et al*., 2014).

Além disso, a fim de se evitar a “colagem” do veio à parede interna do molde, o mesmo é submetido a um movimento oscilatório na direção de lingotamento. Essa adesão deve ser evitada, pois o aparecimento de esforços de tração na fina camada solidificada poderia provocar o rompimento desta pele (*breakout*). Assim, o movimento de oscilação do molde, que geralmente segue um padrão senoidal, faz com que o molde se desloque durante um período no mesmo sentido do veio e no período seguinte no sentido contrário ao do veio. Isto permite que se tenha o estripamento negativo ("negative stripping"), isto é, um período

em que o molde tem um movimento descendente mais rápido que o veio, proporcionando um ligeiro esforço de compressão na casca solidificada, que permite o fechamento de trincas, e aumenta a resistência da casca solidificada (BRIMACOMBE, HAWBOLT e WEINBERG, 1984 *apud* PEREIRA, 2004).

3.2.1 Geometria do Molde

A geometria do molde de LC está condicionada ao formato e as dimensões do lingote, sendo assim a geometria do molde segue o formato da seção reta do produto semiacabado, por exemplo, blocos (retangular), tarugos (quadrada), redondos (circular), *beam-blank* (esboço de viga), placas (retangular, comprimento muito maior que a largura) e etc.

Segundo Oliveira (2009) como o aço sólido tende a se contrair progressivamente, no molde, devido ao resfriamento, tem-se que a dimensão do molde deve ser devidamente reduzida (formato de cone), buscando compensar a contração, mantendo um fluxo de calor regular ao longo do molde. A conicidade é determinada em função da velocidade de lingotamento e do tipo de aço, que são as duas variáveis principais que afetam o fluxo de calor e a contração volumétrica do aço.

Neste sentido, alterações nas dimensões do molde afetam diretamente o padrão de escoamento no interior do molde. LIU *et al*. (2011) relatam que o aumento da largura do molde em geral vem acompanhado de um aumento na vazão de aço, e consequentemente, a um aumento da velocidade na porta de saída da válvula submersa. Já no caso do comprimento, o comprimento mínimo que um molde deve ter é aquele que possibilite a formação de uma pele solidificada com uma resistência mecânica suficiente para que não haja o rompimento do veio. Desta forma, quanto maior a velocidade de lingotamento, maior deve ser o comprimento do molde (PEREIRA, 2004).

Portanto, é necessário conhecer o padrão de escoamento para cada dimensão do molde e atuar nas demais variáveis (velocidade de lingotamento, vazão de argônio, profundidade da válvula, geometria da válvula, etc.), para sempre buscar padrões de escoamento mais favoráveis à estabilidade do processo (DIAS, 2019).

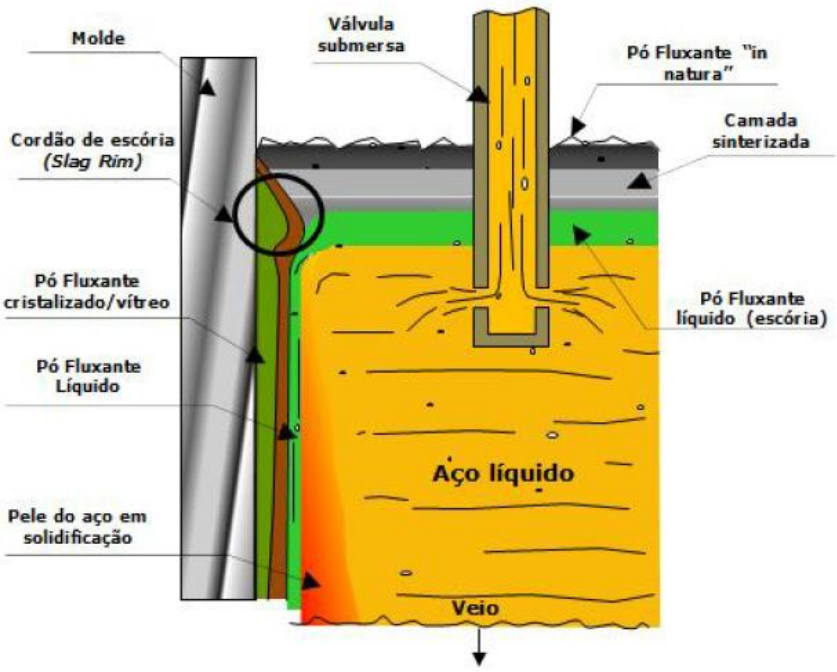
3.2.2 Uso de Pós Fluxantes

O sucesso do processo de lingotamento contínuo está associado à combinação do movimento oscilatório do molde e o emprego de lubrificante, estes dois procedimentos tornam possível a técnica do LC. Logo, para evitar que exista um atrito elevado entre o molde e o metal são utilizados um óleo lubrificante ou um pó fluxante (SEETHARAMAN *et al*., 2014).

Neste contexto, tem-se que a taxa de extração de calor com óleo é muito maior, o que possibilita maiores velocidades de lingotamento, entretanto além de atuarem como lubrificantes, os pós fluxantes permitem controlar o fluxo térmico (nas direções transversais e longitudinais), reter inclusões e servir de isolante químico protegendo o metal de contaminantes atmosféricos (SILVA e SILVA, 2020).

O pó fluxante consiste em uma mistura (multicomponente) de minerais e óxidos (naturais ou sintéticos) com adição de carbono. Na técnica do lingotamento contínuo, o pó fluxante é adicionado na superfície do aço no interior do molde e, ao entrar em contato com o aço líquido, deve se fundir e se infiltrar na interface metal/molde durante todo o processo de lingotamento (MARTINS, 2019). Pela Figura 3.3 é possível ver um desenho esquemático do molde especificando as diferentes camadas do pó fluxante durante o seu uso no processo.

Figura 3.3. Ilustração do molde de lingotamento contínuo.



Fonte: SRIDHAR *et al*., 2002 *apud* MARTINS, 2019.

Assim, o pó fluxante adicionado no molde, logo acima do menisco de aço, é constituído de três camadas, como pode ser visto na Figura 3.3: porção não-fundida (pó); porção sinterizada e uma porção líquida. Já na região do "*gap*", região entre a pele solidificada e a parede do molde podem ser identificadas duas camadas de escória, uma camada sólida adjacente ao molde e outra líquida próxima à pele. Estas porções de pó fluxante, ou de escória (advinda da fusão do pó), apresentam características específicas, que controlam vários fenômenos no molde (SILVA e SILVA, 2020).

Segundo Oliveira (2009) outros dois aspectos importantes a respeito dos pós fluxantes são a temperatura de solidificação e a temperatura de cristalização. Sendo que, a temperatura de solidificação interfere diretamente tanto na espessura da camada de pó fluxante líquido quanto na espessura da camada de pó fluxante sólido no interior do "*gap*". Já a temperatura de cristalização está relacionada com a formação de fases cristalinas, na sua maioria, opacas que inibem a transferência de calor por radiação.

Dessa forma, conforme cita Pereira (2004) as principais propriedades consideradas ao se determinar qual tipo de pó fluxante utilizar são o ponto de fusão e a viscosidade. A

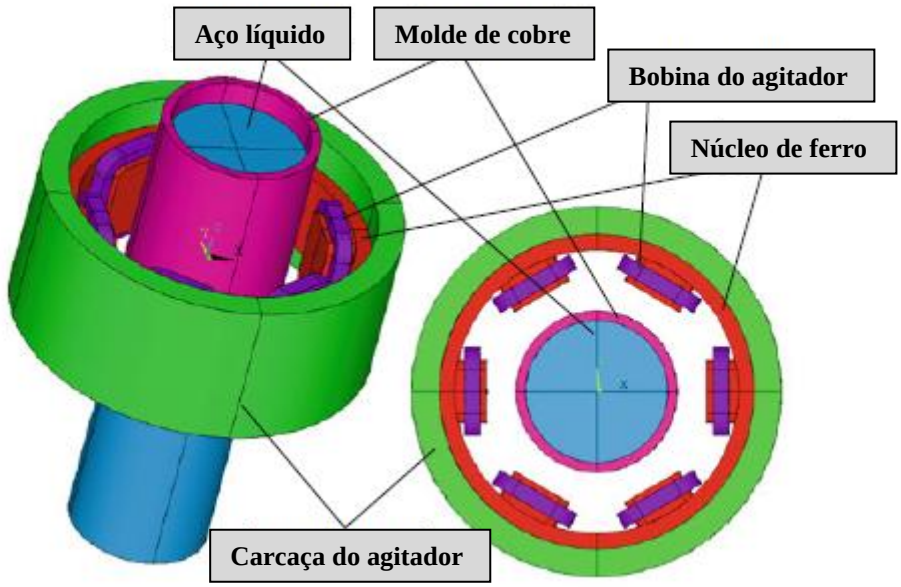
justificativa para isso vem do fato de que menores pontos de fusão e menores viscosidades permitem uma maior extração de calor do veio. Além disso, o pó fluxante deve possuir uma alta capacidade de absorver as inclusões sem que suas propriedades físicas sejam substancialmente alteradas.

Ademais, o pó fluxante do molde é responsável pelo controle da qualidade superficial e interna do lingote. Deste modo, a qualidade do produto semiacabado é mantida quando a escória gerada pela fusão do pó fluxante consegue: proteger o menisco de aço contra a oxidação; promover o isolamento térmico da poça líquida de modo a evitar o congelamento do menisco; lubrificar as paredes do molde; potencializar a transferência de calor horizontal entre as paredes do molde e o veio e absorver as inclusões não metálicas dispersas na poça de aço (FELDBAUER *et al*.,1995 *apud* SILVA e SILVA, 2020).

3.2.3 Uso de Agitação Eletromagnética no Molde

Na prática do lingotamento contínuo também podem ser utilizados agitadores eletromagnéticos com o intuito de melhorar a limpidez do aço, reduzir a porosidade e ainda contribuir para o aumento da estrutura equiaxial no lingote solidificado. A tecnologia de agitação eletromagnética, *electromagnetic stirring* (EMS), tem sido muito utilizada no molde na segunda zona de arrefecimento e também na zona final da solidificação durante o processo de lingotamento contínuo, tanto para melhorar a qualidade metalúrgica dos produtos quanto para expandir a variedade de produtos via rota LC (CHEN e WANG, 2011 *apud* JI *et al*., 2021). A Figura 3.4 exemplifica um modelo de agitadores magnéticos no lingotamento de blocos redondos (*Round Bloom*).

Figura 3.4. Representação esquemática de um agitador eletromagnético.

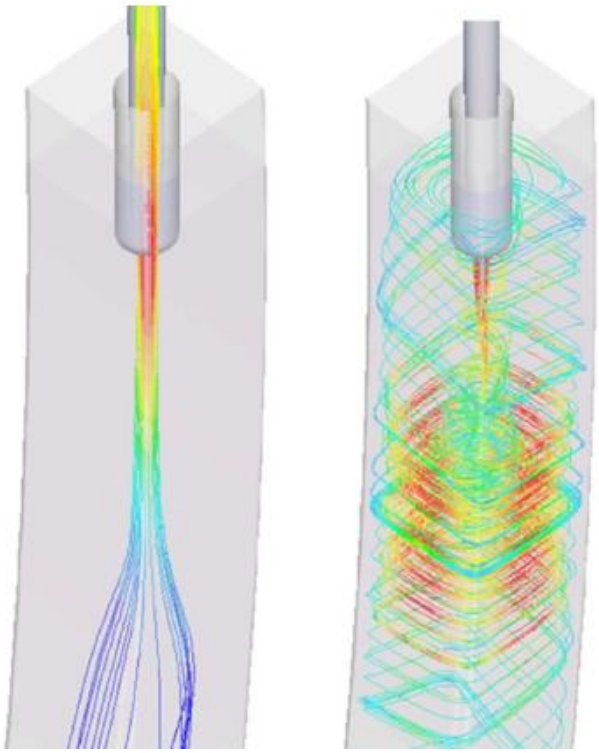


Fonte: Adaptado de LIU *et al*., 2012.

O uso da agitação eletromagnética no molde, *mould electromagnetic stirring* (M-EMS), exerce grande efeito sobre os fenômenos relacionados ao fluxo de aço interior do molde, assim como o borbulhamento de gás (argônio) que vem da válvula submersa. A M-EMS é tipicamente empregada no lingotamento de blocos e tarugos, no qual a presença do campo eletromagnético provoca uma forte rotação no fluxo de aço líquido no interior do molde e abaixo dele (WANG e LOUHENKILPI, 2011 *apud* SEETHARAMAN *et al*., 2014).

Uma das vantagens da aplicação da agitação eletromagnética é que em razão do movimento de rotação gerado, como pode ser visto na Figura 3.5, inclusões não-metálicas (menos densas que o aço) são centrifugadas em direção ao centro do molde, purificando a frente de solidificação, com isso as inclusões não se depositam na primeira pele solidificada e a limpidez da superfície é aumentada (SILVA e SILVA, 2020). Além disso, a qualidade metalúrgica do produto semiacabado é maior, uma vez que a porção da zona equiaxial é significativamente maior devido à redução dos gradientes térmicos na poça de metal líquido aumentando a interação com as pontas das dendritas e a redistribuição de solutos, fazendo com que a macrosegregação central diminua (SEETHARAMAN *et al*., 2014).

Figura 3.5. Agitação eletromagnética no molde (M-EMS). À esquerda sem M-EMS e a direita com M-EMS.



Fonte: SEETHARAMAN *et al*., 2014.

Logo, nos processos de lingotamento contínuo em que a EMS é adotada há uma alteração do fluxo de aço líquido. Esta alteração é caracterizada por um movimento de rotação dominante nas secções transversais, acoplado com os fluxos de recirculação no sentido axial. Uma zona de recirculação superior e uma zona de recirculação inferior e outra zona de recirculação são formadas devido à interferência do fluxo induzido com o jato da SEN. Com o aumento da corrente de agitação e a diminuição da frequência, a magnitude do fluxo magnético aumenta. Há uma frequência exata para se obter a magnitude máxima da força eletromagnética e a velocidade tangencial máxima (LIU *et al*.,2012).

Na indústria, existem dois tipos mais populares de agitadores eletromagnéticos no que se refere à disposição das bobinas e a geometria do núcleo de ferro que são utilizados para gerar fluxos rotativos no lingotamento de blocos redondos. Um deles é o núcleo de ferro composto por seis bobinas em torno de pólos de ferro (TALLBÄCK *et al*., 2004 *apud* LIU *et al*, 2012) e o segundo uma bobina enrolada em anel com um núcleo de ferro toroidal (TRINDADE *et al*., 2002 *apud* LIU *et al*., 2012). No entanto, dependendo das exigências sobre as qualidades metalúrgicas do produto a ser lingotado, o agitador eletromagnético

pode ser instalado ao redor do molde (M-EMS), na zona de arrefecimento secundário (S-EMS), ou perto do ponto final de solidificação do veio (F-EMS) ou quaisquer combinações das mesmas. Portanto, o sucesso no uso da agitação eletromagnética depende fortemente do conhecimento profundo das características técnicas dos sistemas EMS, da sua disposição ao longo da máquina de lingotamento e também da interação entre os fenômenos eletromagnéticos e os fenômenos de transporte (LIU *et al*., 2012).

Por fim, as tecnologias EMS, incluindo agitação no molde (M-EMS), agitação no veio (S-EMS), e agitação final (F-EMS) localizado próximo da zona final de solidificação do veio, estão sendo popularmente utilizadas para se obter indiretamente baixo superaquecimento da poça de aço líquido, gerando um fluxo horizontal ou vertical na região especificada do veio. Entretanto, além do valor investimento para instalação do agitador eletromagnético também devem ser incluídos os enormes custos de manutenção do equipamento na operação diária. Além disso, devido à frequente instabilidade do EMS no processo de lingotamento, um possível efeito negativo do uso do equipamento é a chamada segregação em faixa branca se houver agitação inadequada em relação aos parâmetros ou localizações (SUN e ZHANG, 2014).

3.3 Ferramentas para Análise de Fluxo em Molde

Para realização de uma análise dos processos metalúrgicos, em questão o lingotamento contínuo, com a finalidade de gerar diagnósticos de problemas operacionais ou de simular alterações no projeto dos reatores para aprimorar e simplificar o processo, são utilizados os modelos matemáticos e/ou físicos dos processos em estudo.

3.3.1 Modelamento Físico

Modelos físicos dos principais reatores metalúrgicos (distribuidor e molde) envolvidos no processo de lingotamento contínuo vêm sendo utilizados desde os anos 70 como uma ferramenta prática, eficaz e de baixo custo para simular o comportamento fluidodinâmico no interior destes reatores. Geralmente, os modelos físicos são produzidos com paredes de acrílico e utilizam a água como fluido de simulação. Utiliza-se a água devido ao seu fácil manuseio, por representar de maneira fidedigna o comportamento do aço líquido e facilitar as medições de fluxo com um custo baixo (WOLLMANN, 1999).

Alguns exemplos de modelagem física abrangem a modelagem dos sistemas panela/distribuidor e distribuidor/molde do lingotamento contínuo. Em suma, na maioria destes casos, o aço líquido é representado pela água à temperatura ambiente, pois a sua viscosidade cinemática é da mesma ordem de grandeza do aço na temperatura no qual ele é processado (SATO, 2007). Isto se justifica, a viscosidade cinemática da água a 20ºC ($v=10^{-6}m^2/s$) é similar à viscosidade do aço a 1600ºC ($v=0{,}913x10^{-6}m^2/s$), assim os modelos físicos que utilizam água são bem realistas para simular o escoamento em processos siderúrgicos. Entretanto, para a aplicação da modelagem física é necessário que se instituam critérios de similaridade (geométrica, cinemática, dinâmica, térmica e química) para que o modelo represente o reator industrial em laboratório (MACHADO, FRANÇOIS e VILELA, 2014).

Assim, temos que a similaridade geométrica corresponde à similaridade das formas, ou seja, a razão de qualquer dimensão do reator é correspondente à do modelo. Esta razão é denominada fator de escala; já a similaridade dinâmica significa a paridade de forças (de inércia, pressão, viscosas, gravitacionais, tensão superficial, elásticas e eletromagnéticas) entre os sistemas. Geralmente elas são determinadas a partir da igualdade de números adimensionais como, por exemplo, o número de Froude (Fr), o número de Reynolds (Re) e o número de Weber (We); no caso da similaridade térmica constitui a similaridade entre as taxas de transferência de calor do reator e do modelo e por fim, a similaridade química que estabelece as condições necessárias para que a taxa das reações químicas em qualquer parte do modelo seja proporcional à taxa da mesma reação, no mesmo tempo e no mesmo local do reator industrial (VILELA, 2002 *apud* SATO, 2007).

A visualização do fluxo nos modelos físicos que utilizam a água pode facilmente estudada pela observação da movimentação do corante que foi adicionado na água. Neste cenário, os corantes mais utilizados na prática são o permanganato de potássio (coloração violeta a vermelho) e o azul de metileno (coloração azul). Basicamente a movimentação do corante no modelo é registrada por meio de filmagens ou sequência de fotografias, possibilitando uma avaliação do fluxo gerado durante os ensaios (WOLLMANN, 1999). Entretanto, é importante ressaltar que o modelo físico não necessita, obrigatoriamente, duplicar o sistema industrial totalmente, mas somente os aspectos relevantes que serão estudados (ELIAS, 2010).

Alguns exemplos de trabalhos que usaram de modelamento físico para simular o comportamento fluidodinâmico no molde são estudos feitos por Torres-Alonso *et al.* (2008), Brighton *et al*. (2014), Hackl *et al*. (2018), Schurmann *et al*. (2019). Estes trabalhos serão comentados posteriormente no último subtópico da revisão bibliográfica.

As principais vantagens do uso desta ferramenta para análise de fluxo quando se utiliza água como fluido de simulação são a facilidade de transporte da água, baixo custo, elevada similaridade com o processo real (aço líquido), grande disponibilidade de equipamentos hidráulicos no mercado (bombas hidráulicas, medidores de vazão e etc.), simplicidade na visualização do fluxo no modelo e a redução dos riscos a segurança dos operadores do ensaio já que o fluido de trabalho está na temperatura ambiente e não utiliza agentes corrosivos ou tóxicos. Já no tocante as desvantagens desta ferramenta se destacam a necessidade de um espaço físico considerável (laboratório) para montagem e locação dos modelos físicos, gastos com a aquisição e manutenção dos equipamentos de filmagem para visualização do comportamento do fluxo e o tempo gasto para elaboração dos modelos em acrílico que atendam a similaridade geométrica.

3.3.2 Modelamento Matemático

Modelos matemáticos são geralmente formados de um sistema de equações algébricas e diferenciais que reproduzem quantitativamente o processo ou algumas das suas características. Para se criar um modelo é necessário que se tenha conhecimento das leis que governam este processo/sistema, da habilidade de expressa-las matematicamente e a perícia matemática para solucionar tais equações. Em suma, os modelos matemáticos têm como intuito ajudar a determinar os melhores cenários de operação, nas variadas situações encontradas na pratica (ALVES, 2014).

Um modelo matemático precisa ser validado. Logo, simulações físicas e/ou medições experimentais são necessárias. Uma maneira de se validar o modelo matemático é por meio da avaliação de velocidades próximo à região do menisco no modelo físico, comparando as velocidades obtidas experimentalmente com as previstas no modelo matemático. Além disso, podem ser feitas observações visuais dos estados de escoamento no modelo físico e

no modelo matemático a fim de se enxergar uma tendência e validação qualitativa (DIAS, 2019).

Uma importante ferramenta utilizada para o modelamento matemático dos fenômenos físicos envolvidos nos processos industriais é a fluidodinâmica computacional (CFD − *Computational Fluid Dynamics*). A simulação computacional realizada por meio da CFD é realizada desde a década de 70, na qual esta ferramenta computacional era utilizada para análise de problemas físicos, matemáticos e, em alguns casos, empregado na ciência da computação também para simular o escoamento dos fluidos (BLAZEK, 2001). Assim, a CFD é uma técnica empregada na simulação computacional do comportamento de sistemas que envolvem o escoamento de fluidos, transferência de calor e demais processos físicos correlacionados. Tem sua origem oriunda de diferentes disciplinas da mecânica dos fluidos e transferência de calor e, atualmente, está relacionada com a ciência da computação também (ALVES, 2014).

No lingotamento contínuo os modelos matemáticos que representam o escoamento de fluidos, transferência de calor e a solidificação no lingotamento contínuo empregam modelos tridimensionais de escoamento turbulento por meio de modelos de turbulência do tipo k-ε que incluem as seguintes equações: equação de conservação de quantidade de movimento, equação de conservação de energia, equação de conservação de massa e equações para os parâmetros de turbulência de k e ε (PEREIRA, 2004). Sendo que o parâmetro k, energia cinética de turbulência, é uma função das flutuações dos componentes da velocidade. Já o parâmetro ε representa a taxa de dissipação da energia cinética de turbulência (GARDE, 1994 *apud* PEREIRA, 2004).

Portanto, conforme Elias (2010) em decorrência de uma satisfatória conformidade entre os resultados obtidos no modelamento matemático com os da modelagem física é possível tomar decisões a partir das previsões geradas pelo modelo matemático, sem a necessidade de realização de experimentos.

Alguns exemplos de trabalhos que usaram de modelamento matemático por meio da simulação computacional a fim de prever o padrão o escoamento no interior do molde são: Zhang *et al*. (2007), Ray *et al*. (2005), Wang *et al*. (2019), Sun e Zhang (2011), Liu et al.

(2012), Sun e Zhang (2013). Todos estes estudos também serão comentados posteriormente no último subtópico da revisão bibliográfica.

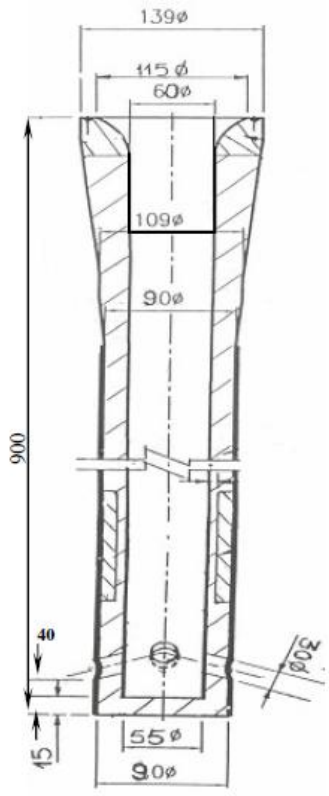
No modelamento matemático as vantagens que se destacam são a velocidade de resposta das análises fluidodinâmicas mais rápida se comparada aos modelos físicos, possibilidade de investigar várias configurações ao mesmo tempo a fim de se determinar as melhores condições, obtenção de informações detalhadas chegando a fornecer os valores de todas as variáveis mais expressivas do processo, ausência de limitações quanto às dimensões e/ou a temperatura real de trabalho do reator metalúrgico em estudo, maior segurança na execução das análises, pois, não há manipulação de substâncias tóxicas ou inflamáveis. Em relação às desvantagens as mais relevantes são o elevado custo dos equipamentos (supercomputadores) para simulações mais completas, erro na predição dos resultados pela inserção de valores (variáveis e unidades de medida) incoerentes com a situação real gerando análises super/subestimadas do processo.

3.4 A Válvula Submersa

O dispositivo que realiza a transferência do aço líquido armazenado no distribuidor para o molde no lingotamento contínuo é a válvula submersa também conhecida como, *submerged entry nozzle* (SEN), ou tubo submerso. Corresponde a um aparelho cilíndrico de material refratário composto, principalmente, por alumina, zircônia e carbono, no qual possui a função de conduzir o aço líquido proveniente do distribuidor para o molde (MOURÃO *et al*., 2007).

A presença da válvula submersa permite que a transferência de metal líquido para o molde seja realizada de modo a minimizar a reoxidação do metal e incorporação de inclusões pelo lingote solidificado, porque não há o contato do metal com o ar atmosférico, e a turbulência gerada na interface entre o pó fluxante e o metal líquido é reduzida, proporcionando uma menor incorporação de elementos da escória pelo metal líquido (PEREIRA, 2004). Um esboço da válvula submersa é apresentado na Figura 3.6 destacando o formato característico da mesma.

Figura 3.6. Esquema típico de válvula submersa.



Fonte: RAY *et al*., 2005.

Segundo Alves (2008) a utilização do termo “submerso” se justifica pelo fato de que essa válvula fica imersa no aço líquido, no interior do molde. A válvula submersa é um dos dispositivos refratários de maior importância no lingotamento contínuo, interferindo fortemente tanto a parte operacional do processo de LC quanto à qualidade do produto lingotado. O projeto das primeiras válvulas submersas tinha um orifício de saída na posição vertical e por conta disso a movimentação de aço na superfície do molde era muito reduzida durante o lingotamento, ocasionando a solidificação do aço na superfície formando o conhecido “*ice-berg*”. Então, a fim de evitar esse fenômeno, as válvulas submersas são projetadas com orifícios de saída em suas laterais para melhorar o fluxo de aço líquido no molde.

Assim, geralmente, na parte final da válvula submersa encontram-se aberturas laterais, posicionados paralelamente as paredes principais do molde, que têm o papel de direcionar o fluxo de aço líquido na direção das demais paredes do molde. As dimensões e o formato das SEN são muito diversificados, dependendo da geometria do molde e estão

condicionadas ao projeto elaborado pelo usuário, porém é relativamente comum encontrar válvula submersa com comprimento de 900mm e diâmetros das aberturas laterais de 70mm (MOURÃO *et al*., 2007).

3.4.1 Condições operacionais da Válvula Submersa

A utilização da válvula submersa no lingotamento contínuo deve seguir algumas condições operacionais para que o processo seja produtivo e seguro. Desta forma, a válvula submersa deve ser pré-aquecida antes do início do lingotamento a níveis superiores a 1000°C, durante um definido período de tempo, para evitar tais problemas como o choque térmico, em virtude do gradiente térmico entre o aço líquido e a própria válvula e a obstrução total do canal, em função do resfriamento acelerado do aço no início do lingotamento, em que se tem baixa vazão de aço do distribuidor para o molde no interior da válvula (ALVES, 2008).

Diante dos problemas citados anteriormente, o tempo transcorrido entre o fim do aquecimento da válvula submersa e o início do lingotamento, precisa ser o menor possível, com o propósito de reduzir a perda de temperatura para a atmosfera por radiação. Por isso, antes de iniciar o processo de lingotamento contínuo a válvula submersa deve estar com uma temperatura acima de 750°C, porém o tempo de aquecimento da válvula não deve ser longo para que não ocorra a oxidação excessiva do carbono (grafite) que a compõe (ALVES, 2008).

Neste contexto, de acordo com Alves (2008) os aspectos primordiais que uma válvula submersa deve apresentar em operação são: manter o diâmetro interno do orifício constante diante do fenômeno de erosão; apresentar uma obstrução mínima do diâmetro da válvula pelo depósito de óxidos e aço; não gerar irregularidade no fluxo de aço por conta de uma deformação estrutural, trincas ou demais defeitos de fabricação; o formato da válvula deve resultar em um modelo de fluxo que promova a flutuação das inclusões, evite a lavagem da pele solidificada e a queda de temperatura. Além disso, o material refratário que constitui a válvula submersa deve possuir também propriedades adequadas às solicitações de operação por longos períodos de lingotamento, tais como: resistência à erosão e corrosão; resistência

ao choque térmico; elevado ponto de fusão; baixa condutividade térmica e alta refratariedade; baixa aderência ao deposito de alumina.

3.4.2 Injeção de argônio

Durante o vazamento de aço líquido do distribuidor para o molde pode ocorrer a injeção de argônio nas válvulas submersas. A injeção de argônio pode ser feita em diferentes lugares da válvula, e tem como finalidade evitar que as inclusões fiquem aderidas às paredes internas da SEN, uma vez que essa adesão propicia o entupimento da válvula e, consequentemente, pode levar a interrupção do processo de LC. Além disso, a injeção de argônio influencia no nível de turbulência no molde, dado que as bolhas são arrastadas pelo fluxo de metal para o molde e a ascensão destas bolhas pelo fluxo de metal líquido altera o escoamento do aço no interior do molde (THOMAS, DENNISOV e BAI, 1997).

Entretanto, conforme Seetharaman *et al.* (2014) controlar a vazão de argônio é muito importante, pois excesso de gás pode mudar o padrão de escoamento no molde de duplo rolo (*Double Roll*) para rolo simples (*Single Roll*) ou tornar o fluxo de saída do bocal muito instável e assimétrico. Baixos níveis de injeção de argônio também não previnem o entupimento (*clogging*) do bocal. É importante também verificar regularmente a contrapressão no sistema de alimentação com argônio, baixa contrapressão significa que o ar pode chegar a SEN com a alimentação de argônio. O perfil de pressão na SEN afeta a entrada de ar e, portanto, a reoxidação do aço e o entupimento da mesma. Se o orifício de saída da válvula não estiver totalmente aberto, isto gera subpressão e passagem de ar. Tipicamente, a subpressão é mais expressiva logo abaixo da haste de bloqueio ou válvula gaveta.

Como mencionado anteriormente a injeção de gás argônio ajuda a prevenir a formação do "*clogging*" na válvula submersa e também evita que a reoxidação do aço aconteça. Assim, este processo leva a formação de bolhas dentro do reator, afetando consideravelmente as condições de escoamento no molde. Desta maneira, percebe-se que a injeção de argônio influencia significativamente as condições de escoamento no molde, sendo capaz de causar problemas ligados á qualidade do produto, dependendo do tamanho da bolha e/ou fração de volume de gás. (DIAS, 2019).

De acordo com estudo realizado por Prenazzi, Nascimento e Resende (2013) dentre as tecnologias *anti-clogging* (material livre de carbono, denominado *carbon less*, e a injeção de argônio através de massa porosa) testadas a injeção de argônio foi a que mostrou resultados mais expressivos na redução da deposição de partículas não metálicas nas paredes refratárias da válvula.

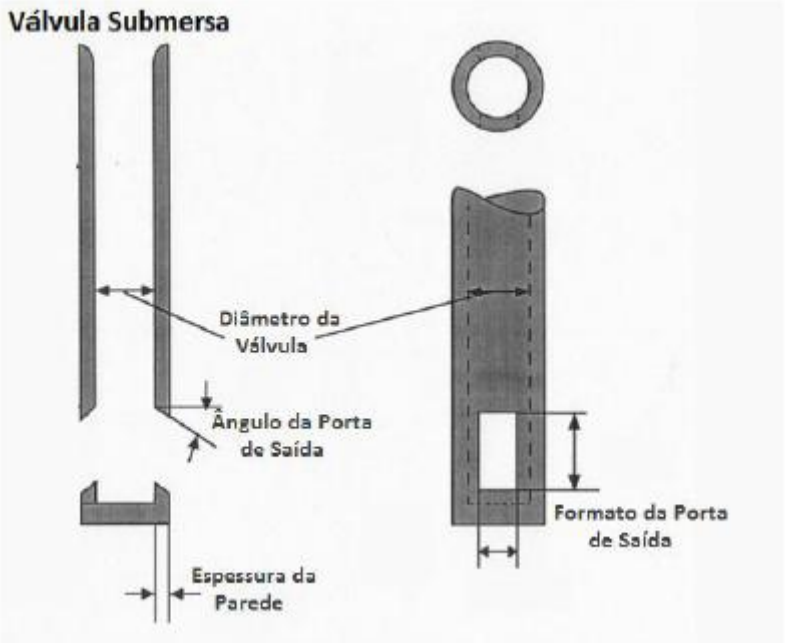
Logo, mudanças na vazão de argônio devem ser acompanhadas de outras mudanças operacionais dentro do processo de lingotamento contínuo a fim de que o padrão de fluxo não seja modificado a ponto de afetar a qualidade superficial do produto semiacabado.

3.4.3 Geometria da Válvula Submersa

A configuração da válvula é muito importante para o processo de lingotamento continuo. Sabe-se que ela influencia tanto na parte operacional quanto na qualidade do produto. Estudos têm sido realizados com o intuito de se relacionar a geometria da válvula submersa com o padrão de escoamento no molde e mecanismos de flotação de inclusões (OLIVEIRA, 2003).

A geometria da válvula submersa exerce grande influência sobre as condições de escoamento no molde e de que são necessários poucos recursos para ser arquitetada e também testada a fim de se determinar a melhor condição de escoamento para o processo. Dentre os elementos que compõem esta geometria os mais importantes são: diâmetro da válvula, espessura da parede, formato e o ângulo da porta de saída (DIAS, 2019). Uma representação destes elementos que compõem a geometria da válvula submersa pode ser vista na Figura 3.7.

Figura 3.7. Ilustração esquemática apontando os elementos que constituem a geometria da válvula submersa.



Fonte: NAJJAR, THOMAS e HERSHEY, 1995.

No que se refere ao diâmetro da válvula submersa, a primeira consideração a ser feita é sobre a capacidade de transporte da mesma. Dado que o fluxo é movido apenas pela ação da gravidade, a seção transversal da válvula deve ser suficientemente grande para acondicionar o fluxo que satisfaça as exigências de produtividade. Desta forma, válvulas de maior diâmetro são certamente necessárias para situações de maior velocidade de lingotamento. Entretanto, deve se atentar quanto ao dimensionamento destas válvulas, visto que válvulas superdimensionadas ao mesmo tempo em que podem absorver alguma acumulação de alumina, também podem acentuar as variações de fluxo e os problemas de pressão negativa (THOMAS, 2003).

A respeito da espessura da parede da válvula, Najjar, Thomas e Hershey (1995) afirmam que quanto menos espessa é a parede da válvula, mais íngreme é o ângulo com que o jato de aço líquido deixa a válvula. Neste mesmo sentido, Thomas (2003) relata que o aumento da espessura da parede da válvula torna as extremidades das portas de saída mais eficientes para controlar a direção do jato. Além disso, conforme o autor a espessura da parede influencia no tamanho do espaço da região crítica entre a válvula e o menisco, a resistência ao choque térmico dos refratários e a resistência à erosão na linha da escória.

Em relação à forma da porta de saída (redonda, oval, quadrada) tem-se que para portas de válvulas superdimensionadas com a mesma área de saída (e outros parâmetros geométricos constantes), portas longas e estreitas induzem a um jato com ângulo mais inclinado para baixo do que portas curtas e largas. As portas circulares geram maior agitação do fluxo e têm um ângulo de propagação maior do que as portas retangulares com a mesma largura. Contudo, todas as portas tendem a tornar-se menores e arredondadas com o passar do tempo em operação devido ao entupimento por deposição de inclusões (*clogging*). O formato da porta de saída é menos relevante do que o tamanho e o ângulo da porta no controle do fluxo de aço líquido no molde (THOMAS, 2003).

No tocante ao ângulo da porta de saída nota-se que, geralmente, as válvulas são projetadas com ângulos direcionados para baixo (inclinação negativa) ou para cima (inclinação positiva) (DIAS, 2019). Todavia, Najjar, Thomas e Hershey (1995) apontam que a influência do ângulo é mais expressiva quando a área na porta de saída é inferior à área interna da válvula, pois o fluxo é forçado a se posicionar mais próximo à região situada às bordas da porta de saída, onde está localizado o ângulo direcionador. Desta maneira, os autores observaram que ângulos com inclinações negativas são preferenciais aos ângulos com inclinações positivas, tendo em vista que ângulos com inclinações positivas têm tendência a gerar maior turbulência na região do menisco.

Segundo Alves (2008) o ângulo da porta de saída da válvula submersa pode variar em um intervalo de -15° a + 25°. Sendo que ângulos negativos tendem a direcionar o fluxo de aço líquido para baixo, em contrapartida, ângulos positivos tendem a direcionar o fluxo para cima, reduzindo a probabilidade de solidificação do aço que fica na região do menisco (formação dos "*icebergs*"), o que poderia impedir a fusão da camada de pó fluxante adicionada nesta região e aumentar o risco de rompimento do veio durante o lingotamento. No entanto, por conta do ângulo da porta de saída, pode-se gerar turbulência na camada de pó fluxante, levando a incorporação de inclusões no aço líquido, gerando o aparecimento de trincas superficiais, e podendo até mesmo provocar um rompimento da pele conhecido como *breakout* ou furo de veio.

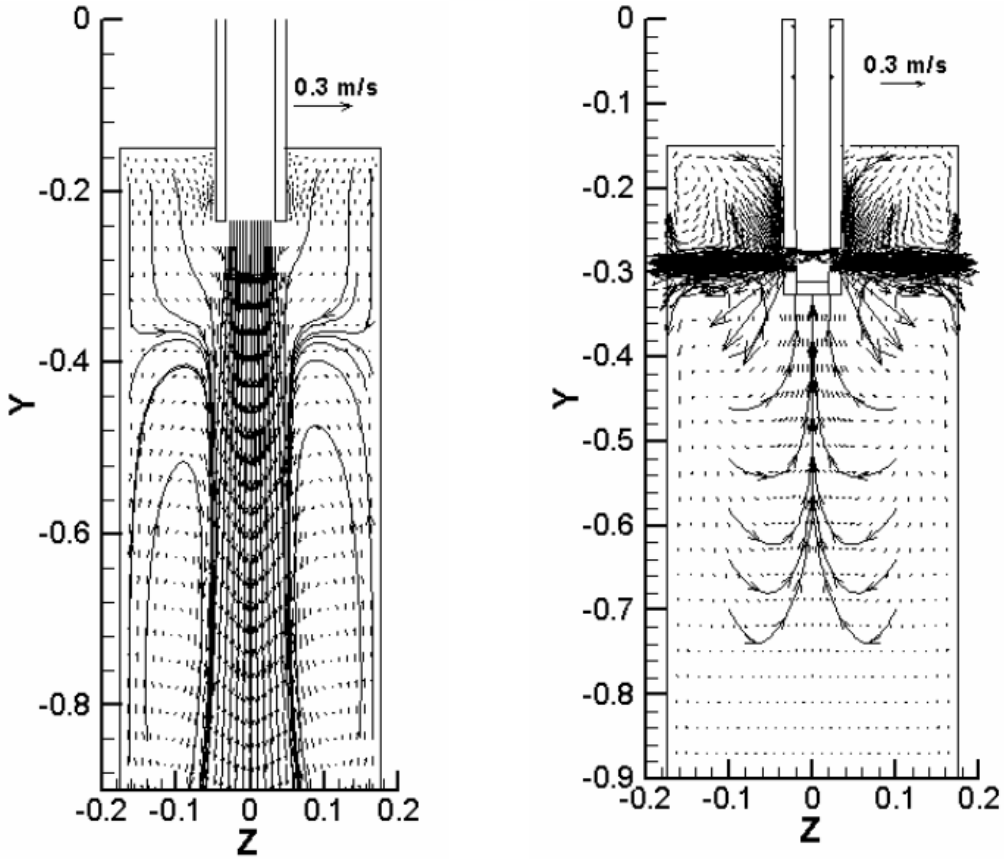
Num estudo feito por Ray *et al.* (2005) mediante simulações matemáticas, foi avaliado o impacto da variação do ângulo de -10º a +15º em uma válvula submersa com 4 portas de

saída. Resumidamente, nota-se, que o aumento da inclinação positiva a velocidade de fluxo próximo das paredes do molde aumenta gerando maior turbulência na região do menisco. Já no estudo realizado por Zang *et al.* (2007) por meio de simulações físicas, matemáticas e medições industriais, chega-se à conclusão de que a condição ótima de trabalho para o ângulo da porta de saída está no intervalo de -5° a -15°. Segundo os autores a justificativa para este intervalo se deve ao fato de que quando o ângulo aumenta no sentido positivo, o comportamento do fluxo tende a ser do tipo rolo simples, que sua vez tende a gerar maior flutuação de nível, em contrapartida quando o ângulo aumenta no sentido negativo (para baixo), o comportamento do fluxo muda e tende a ficar instável gerando também flutuação de nível na região do menisco.

Sendo assim, vários estudos envolvendo simulações físicas e matemáticas foram realizadas avaliando a alteração de um ou mais elementos geométricos da válvula submersa com a intenção de encontrar a melhor configuração para a SEN no lingotamento contínuo de blocos. Desta forma, serão expostos a seguir alguns destes estudos e os respectivos resultados encontrados pela modificação na geometria (*design*) da válvula no lingotamento de blocos.

Ray *et al* (2005) avaliaram matematicamente o desempenho de uma válvula submersa com quatro portas de saída em relação a uma válvula com apenas uma porta no lingotamento de blocos. Os diferentes ângulos das portas de saída da válvula também foram avaliados com base na análise no escoamento do fluxo e na distribuição do tempo de residência (RTD). Desta maneira, notou-se que a SEN de 4 portas apresentou melhores perfis de mistura do que a válvula de 1 porta; o padrão de escoamento da válvula de 4 portas melhora a dissipação do superaquecimento levando a uma maior fração da zona equiaxal nos blocos lingotados (aumento de 10%); a flutuação de inclusões é otimizada; a profundidade de penetração do jato é reduzida; o transporte de calor para o menisco é favorecido, o que ajuda na fusão do pó fluxante. Isto pode ser observado pelo perfil de velocidade e pelas linhas de fluxo da Figura 3.8. Contudo, foi visto também que o jato de aço líquido que emana da SEN multi-portas atinge a parede lateral do molde e com isso pode ocorrer a refusão da pele solidificada. Logo para evitar isso a profundidade de penetração deve ser aumentada de modo que o jato encontre uma pele mais espessa, assim como, a eficiência de arrefecimento do molde.

Figura 3.8. Ilustração do perfil de velocidade e linhas de fluxo. À esquerda SEN de uma porta, à direita SEN de quatro portas.



Fonte: RAY *et al*., 2005.

Torres-Alonso *et al*. (2008) fizeram um estudo sobre um molde de tarugos contendo duas válvulas submersas retas (uma com raio externo de 60mm, S60, e outra com 73mm, S73, ambas com o mesmo raio interno de 36mm) por meio de modelamento matemático e simulações físicas envolvendo técnicas experimentais de velocimetria por imagem de partículas (PIV), injeção de marcador e modelagem por sistema água-óleo (aço-escória) com o intuito de mostrar a influência das válvulas submersas (simples) no escoamento dentro do molde e na qualidade dos tarugos. Assim, ao término dos ensaios os resultados foram: ao utilizar a válvula S73, a posição rasa, menor submersão, deve ser evitada, as simulações demonstraram que a submersão mínima para evitar o arrastamento de pó fluxante deve ser de 100 mm; a desvantagem da válvula S60 é que por ter uma parede mais fina suporta sequências de lingotamento mais curtas, e naturalmente a válvula S73, devido a uma maior espessura de parede, suporta sequências de lingotamento mais longas; a

válvula S60 pode ser utilizada entre as posições de submersões de 90 a 135 mm em segurança sem qualquer perigo de arrastamento de partículas de fluxante durante a operação no molde.

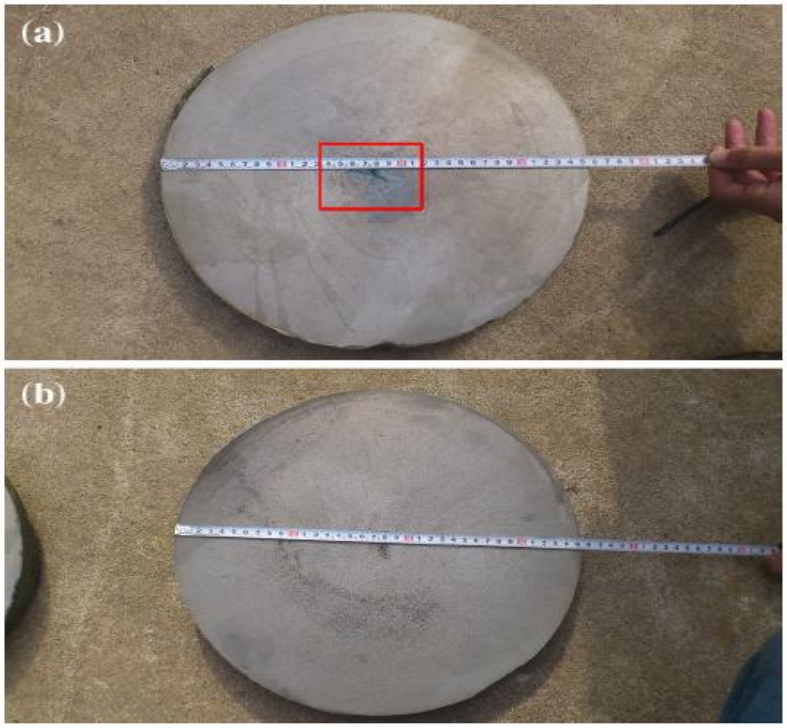
Sun e Zhang (2011) comparam numericamente o comportamento entre uma SEN tubular simples, SEN quadrifurcada com saídas na direção radial e uma SEN quadrifurcada com saídas na direção tangencial. Foi observado que este último modelo de SEN gerou uma redução na profundidade de impacto do aço líquido inibindo a flutuação do nível do molde e criando um fluxo de massa ativo abaixo do menisco, o que levou a movimentação do ponto quente para cima e promoveu a dissipação do superaquecimento do aço líquido. Além disso, a pele na saída do molde sob o novo tipo de SEN atingiu 1,2mm a mais de espessura se comparada com a SEN quadrifurcada com saídas em radial, o que possibilita o aumento na velocidade de lingotamento de blocos.

Liu *et al*. (2012) utilizaram um modelo numérico para descrever a distribuição do campo eletromagnético tridimensional e a sua influência nas características do fluxo em um molde de blocos redondos com um agitador eletromagnético de baixa frequência. Dessa forma, foi investigada a interação entre o fluxo induzido pelo agitador e o jato de impacto inercial de uma válvula submersa (SEN) reta no molde com o intuito de se obter uma estratégia para aperfeiçoar os parâmetros de agitação. Ao final dos ensaios verificou-se a interferência do fluxo induzido com o jato da SEN gera mais uma zona de recirculação, estas zonas de recirculação têm um efeito evidente sobre o desempenho metalúrgico da SEN; o fluxo no menisco se deve essencialmente a velocidade de rotação e o nível na superfície do menisco é convexo perto da face do molde e côncavo em volta da parede da SEN. Portanto, para um sistema EMS rotativo no molde, a fim de minimizar o efeito de agitação excessiva no menisco, mas mantendo o menisco ativo e uma grande velocidade tangencial, deve ser selecionando a corrente e frequência de agitação adequadas para satisfazer a exigência das práticas de lingotamento.

Sun e Zhang (2013) a partir de um modelo matemático avaliaram e compararam os desempenhos metalúrgicos de uma válvula submersa convencional (reta), válvula de fluxo circular (SFN), e um sistema de agitação eletromagnética do molde (M-EMS). Sendo que o foco do trabalho foi comparar a utilização da SFN com a válvula reta convencional

com/sem o mecanismo de M-EMS, com foco na mitigação do fenômeno de macrosegregação, especialmente a macrosegregação na linha central, no lingotamento de blocos. Sendo assim, os autores notaram que: os perfis de segregação de carbono simulados foram muito próximos dos perfis reais; a adoção da SFN juntamente com a M-EMS chegou a retardar o desenvolvimento da pele em algumas regiões do molde. No entanto, a diminuição da espessura da casca na saída do molde é muito pequena em comparação ao uso da válvula normal; o fluxo de agitação horizontal gerado pelo MEMS e/ou SFN é favorável para a dissipação do superaquecimento do aço líquido na região do molde; em comparação com a válvula comum, a porosidade na linha central foi eliminada juntamente com trinca comum na seção transversal do veio, como pode ser visto na Figura 3.9 que mostra a morfologia do bloco para cada SEN utilizada no processo de LC. O grau máximo de segregação de C e S é reduzido de 1,28 a 1,02 e de 1,32 a 1,06, respectivamente, ao adotar a SFN. A implantação da SFN pode alcançar um efeito metalúrgico semelhante ao uso de M-EMS e aumentou o desempenho da M-EMS no processo de LC de blocos.

Figura 3.9. Morfologia da seção transversal após o lingotamento para cada tipo de SEN. Sendo (a) SEN reta e (b) SFN.



Fonte: SUN e ZHANG, 2013.

Brighton *et al*. (2014) adaptaram um método de agitação mecânica rotativa de água, combinado com a modelagem geométrica da válvula submersa, simulando o processo de lingotamento em moldes de blocos. Isto porque o comportamento fluido dinâmico é influenciado pelas interações entre o formato da SEN e a intensidade da agitação eletromagnética do molde (M-EMS), para alcançar melhorias metalúrgicas tais como a redução da segregação nos produtos lingotados. Para realização dos ensaios foram projetadas duas válvulas submersas, uma com duas e outra com quatro portas de saída com ângulos -10° (p/baixo) em dois moldes de blocos (um pequeno e um grande).

Verificou-se que tempo gasto entre o aço líquido sair da válvula e chegar a superfície do molde era mais longo no molde grande do que no pequeno, e que era maior ainda quando se aumentava a submersão da SEN, bem como, quando utilizou a agitação do molde. Entretanto, as diferenças empregando a SEN de 2 portas e a de 4 foram pequenas em relação aos tempos de subida ao longo da gama de condições de funcionamento consideradas. Além disso, que a agitação de bolhas de ar pode ser principal influência na redução das perturbações do nível do molde. Análises experimentais encontraram um aumento consistente na flutuação do nível do molde, com taxas de injeção de gás aumentadas de 0 para 5 L/min (BRIGHTON et al., 2014).

Hackl *et al*. (2018) elaboraram simulações físicas de um molde para lingotamento de blocos redondos e quadrados utilizando uma válvula submersa rotativa (*Gyro Nozzle*) da RHI Magnesita (conceito recente) que possui múltiplas portas com formato helicoidal que impõem fluxo rotativo no sistema, mesmo sem a utilização de um dispositivo EMS. Na Figura 3.10, é mostrado o formato típico da extremidade deste tipo de válvula. Nos ensaios foi empregada uma liga metálica de $Ga_{68}In_{20}Sn_{12}$ como fluido, uma vez que, a mesma é liquida em temperatura ambiente. Os resultados obtidos foram utilizados como parâmetro de entrada para a simulação numérica realizada posteriormente por meio de fluidodinâmica computacional (CFD).

Os autores relataram que mesmo sem o uso de um agitador eletromagnético, a válvula rotativa estabelece um fluxo rotacional no molde; quando o campo magnético foi aplicado, o perfil de velocidade no menisco não é severamente afetado; não foram observadas fortes flutuações e a formação de vórtices, tal como detectado com uma SEN padrão; devido a

uma melhor dissipação de energia no molde, a velocidade de lingotamento poderia ser aumentada sem correr o risco de rompimento da pele (*breakouts*); as perdas por erosão poderiam ser significativamente reduzidas; as flutuações do nível no molde foram reduzidas e a qualidade superficial dos lingotes foi melhorada.

Figura 3.10. Ilustração da extremidade de uma válvula rotativa.

Fonte: Hackl *et al*., 2018.

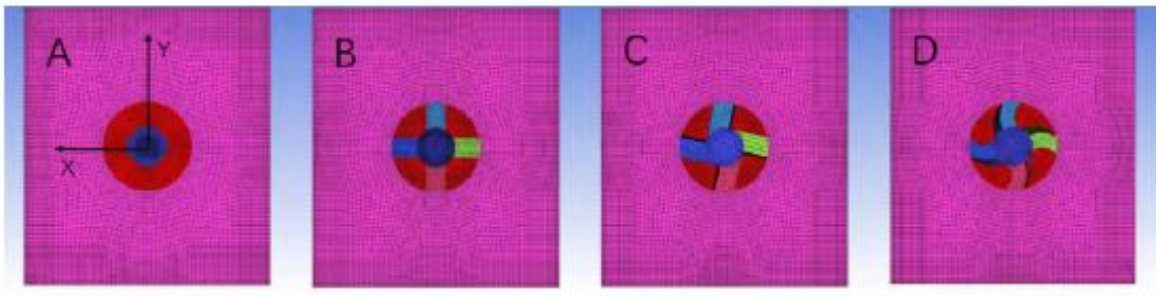
Schurmann *et al.* (2019) também fizeram um estudo com a válvula submersa desenvolvida pela RHI Magnesita chamada *GYRONOZZLE*. Eles realizaram um modelamento matemático por meio da CFD e também operaram modelos físicos com um metal líquido semelhante ao utilizado no trabalho de Hackl *et al*. (2018). O foco deste trabalho foi caracterizar a interação desta válvula helicoidal rotativa com um agitador eletromagnético do molde (M-EMS) e comparar os resultados com uma válvula submersa do tipo reta convencional em um molde com seção transversal circular. Concluíram que a aplicação da *GYRONOZZLE* produz um fluxo rotacional intenso no molde formando três áreas com diferentes estruturas de fluxo; foi identificado um padrão de fluxo helicoidal de duplo rolo, sendo que este padrão de fluxo pode retirar inclusões não metálicas da pele solidificada e transportá-las para a superfície livre, onde podem ser extraídas pela camada de escória; os jatos que emergem da *GYRONOZZLE* causam um fluxo complexo e altamente turbulento que efetivamente impede a transferência do momento angular da zona M-EMS abaixo da válvula em direção à superfície livre, este efeito ajuda a limitar a velocidade de rotação na superfície do molde reduzindo o risco de arrastamento de escória ou gás; o uso combinado

da GYRONOZZLE com a agitação eletromagnética no molde cria um fluxo rotacional intenso na parte inferior do molde e as velocidades de rotação no molde obtidas pela ação da GYRONOZZLE e do campo magnético rotativo estão acima das velocidades geradas por uma SEN de porta única com M-EMS.

Wang *et al*. (2019) por meio de um modelo numérico tridimensional fizeram um estudo comparativo sobre o efeito de diferentes modelos de válvulas na solidificação da pele, transferência de calor e no escoamento do aço líquido em um molde para lingotamento de blocos. Foram simulados neste estudo quatro tipos de válvula: A - reta (convencional), B – quadrifurcada, C - quadrifurcada giratória (SFN) e D – quadrifurcada curva (QCN). O desenho da malha de cada uma destas válvulas está exposto na Figura 3.11.

Figura 3.11. Vista superior da malha das válvulas nos quatro casos.

Condições	**A**	**B**	**C**	**D**
Tipo de Válvula	Reta normal	Quadrifurcada	SFN	QCN

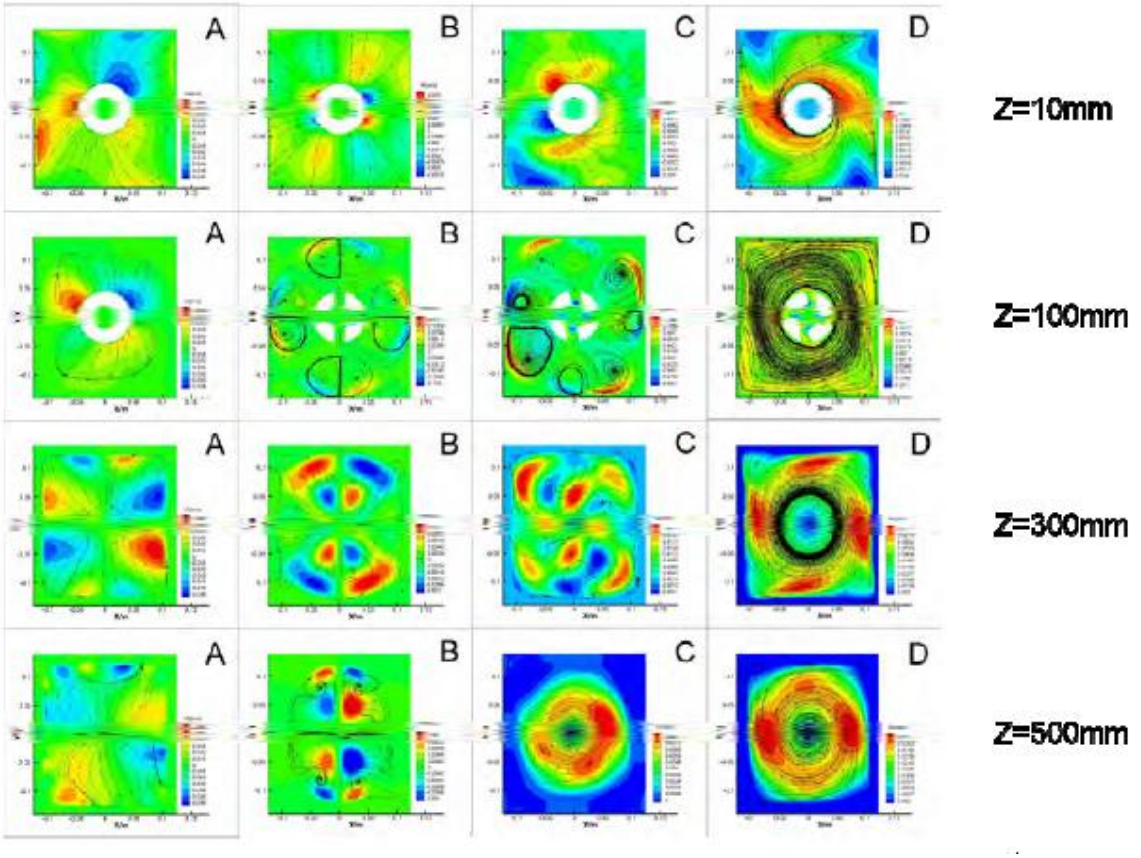


Fonte: Adaptado de Wang *et al*., 2019.

Os autores relataram que o fluxo de redemoinho horizontal gerado no molde foi mais intenso na válvula quadrifurcada curva (D), conforme pode-se observar na Figura 3.12 que mostra os padrões de fluxo do aço líquido nas seções transversais de 10mm, 100mm, 300mm, e 500mm abaixo da superfície do molde (eixo vertical Z) na qual estão incluídos tanto as linhas de fluxo em 2-D como o contorno de velocidade tangencial horizontal. Este fluxo é benéfico tanto para a dissipação de superaquecimento quanto para a fusão do pó fluxante, juntamente com um impacto menor do jato de aço líquido sobre as paredes do molde em comparação com as outras duas válvulas quadrifurcadas. Além disso, para a válvula reta convencional a técnica de agitação eletromagnética do molde (M-EMS) pode mitigar o efeito do superaquecimento sem induzir a geração de vórtice, o que é vantajoso

tanto para a remoção de inclusão quanto para formação de uma melhor estrutura da pele solidificada (WANG *et al*. 2019).

Figura 3.12. Comportamento do fluxo de aço líquido no molde sob quatro tipos de SEN.



Fonte: WANG *et al*., 2019.

Liu, Wang e Qiu (2020) por intermédio de um modelamento matemático 3D propuseram investigar o efeito da agitação eletromagnética no molde e no veio (M-SEM e S-EMS) sobre o escoamento e a solidificação em uma máquina de lingotamento contínuo de blocos redondos. O padrão do fluxo e as características de solidificação do veio nas situações com e sem EMS durante o processo de lingotamento utilizando uma SEN de quatro portas foi analisado e comparado com a mesma situação utilizando uma válvula com uma única porta.

Após uma série de estudos numéricos utilizando este modelo, Liu, Wang e Qiu (2020) observaram que a aplicação de M-EMS em conjunto com a SEN de quatro portas pode diminuir o impacto do jato de aço líquido devido à contribuição de cada uma das portas, dissipar rapidamente o superaquecimento e reduzir a fração líquida no molde. Apesar de

promover um crescimento não homogêneo da pele, a velocidade tangencial no molde obtido por uma válvula de quatro portas com M-EMS e a fração sólida na zona secundária por S-EMS são maiores do que as encontradas por uma SEN de porta única, o que é favorável à formação de mais cristais equiaxiais. Para o S-EMS, a espessura da pele solidificada é o principal fator para determinar a posição de agitador e a velocidade do fluxo rotativo que gere a mesma intensidade de agitação; o aumento da agitação no sistema com a mesma frequência produz uma forte variação na velocidade axial e leva a uma menor fração líquida na região central do veio.

4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo compreender a influência da geometria da válvula submersa sobre o escoamento do aço líquido no molde e, consequentemente, a qualidade do produto no lingotamento de blocos. Sendo assim, foi realizada uma pesquisa bibliográfica com foco nos artigos que correlacionassem à geometria da válvula submersa com as modificações no fluxo e na qualidade do produto. De modo geral, várias simulações físicas e matemáticas foram realizadas apresentando modificações na geometria da válvula submersa, principalmente, no formato e número de portas de saída da SEN associadas ou não com a presença de agitação eletromagnética (EMS) tomando como critério de comparação o processo de LC utilizando uma SEN de porta única (convencional), relatando as principais melhorias no comportamento do fluxo no interior do molde e na qualidade metalúrgica do bloco lingotado.

Em síntese, foi possível perceber que a situação envolvendo uma válvula reta (normal) é a que apresenta as piores condições de escoamento por consequência um lingote de menor qualidade, sendo indicada apenas para o lingotamento de tarugos com baixas exigências metalúrgicas. Por isso, a utilização de válvulas com múltiplas portas (bifurcada, quadrifurcada, SFN, QCN, *GYRONOZZLE*) é a mais recomendada quando se deseja produzir blocos de alta qualidade, visto que todas as simulações que utilizaram este modelo de SEN sugerem melhorias nos resultados, conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Principais melhorias observadas.

	Tipo de Válvula Submersa			
Melhorias	**Bifurcada/Quadrifurcada**	***Swirling Flow Nozzle* (SFN)**	***Quad-furcated Curved Nozzle* (QCN)**	***GYRONOZZLE***
Fonte(s):	Ray *et al* (2005); Sun e Zhang (2011); Brighton *et al.* (2014); Liu, Wang e Qiu (2020)	Sun e Zhang (2011); Sun e Zhang (2013)	Wang *et al.* (2019)	Hackl *et al.* (2018) e Schurmann *et al.* (2019)
Tipo de estudo:	CFD e modelo físico (Água)	CFD	CFD	CFD e modelo físico (liga de Ga68In20Sn12)
Velocidade de lingotamento	Não relatado	Aumentou	Aumentou	Aumentou
Capacidade de remover inclusões	Aumentou	Aumentou	Aumentou	Aumentou
Profundidade de penetração do jato	Reduziu	Reduziu	Reduziu	Reduziu
Flutuações de nível no molde	Não relatado	Reduziu	Não relatado	Aumentou
Fração da zona equiaxal na solidificação	Aumentou	Não relatado	Aumentou	Não relatado
Transporte de calor para o menisco	Aumentou	Aumentou	Aumentou	Aumentou

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ressalta-se que, em todos os estudos nos quais houve a participação da agitação eletromagnética o escoamento no interior do molde e, consequentemente, a qualidade do lingote foi melhorada. No entanto, o investimento adicional em equipamentos de EMS deve ser incluído juntamente com os custos de manutenção e o aumento no consumo de energia durante a operação de LC. Dessa forma, a escolha do tipo de SEN e a adoção ou não dos equipamentos de EMS na prática industrial está condicionada ao atendimento das exigências mecânicas e ao nível de pureza do bloco de aço lingotado pautada pela clássica relação custo-benefício. Portanto, a utilização das válvulas submersas SFN, QCN e *GYRONOZZLE* pode ser uma alternativa mais econômica tendo em vista que os resultados obtidos por elas sem a participação de agitação eletromagnética foram expressivos ao ponto de alcançar efeito metalúrgico semelhante ao alçando pela SEN tubular com M-EMS, sendo que a *GYRONOZZLE* teve o melhor desempenho seguido da QCN, SFN respectivamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. G. **Lingotamento Contínuo - 2008.** Curso de Formação de Aciaristas da Arcelor Mittal Inox Brasil. Apostila técnica. São Paulo: Arcellor Mittal, 2008. 82p.

ALVES, J. G. **Melhoria no padrão de escoamento do aço líquido no distribuidor do lingotamento contínuo 01 da APERAM Inox América do Sul**. 2014. (79f). Dissertação. Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2014.

ARAÚJO, L. A. **Manual de Siderurgia**. 2.ed. v.1. São Paulo: Arte & Ciência, 1997. 470p. *apud* PEREIRA, 2004

BLAZEK, J. ***Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications***. Oxford: Elsevier Science Ltd, 2001. 435p.

BRIGHTON, A.; GLAWS, P.C.; VALENTINE, N.M.; DORRICOTT, J. D.; HEASLIP, L.J.; MORALES, R.D.; CHALMERS, D.J. Methodology of Water Modeling and Submerged-Entry Nozzle (SEN) Design for Bloom Casting with Mold Electromagnetic Stirring (MEMS). In: THE IRON & STEEL TECHNOLOGY CONFERENCE, 2014, Indianápolis, EUA. **Proceedings[...]**. Warrendale: Association for Iron & Steel Technology, 2014. p.1-8.

BRIMACOMBE, J.K.; HAWBOLT, E.B.; WEINBERG, F. Metallurgical investigation of continuous-casting billet moulds. II. Microstructure, hardness and mechanical properties. In: BRIMACOMBE, J.K.; SAMARASEKERA, I.V.; LAIT, J.E. **Continuous Casting**. Heat Flow, Solidification and Crack Formation. Warrendale: Iron and Steel Society, 1984, v.2. p.258-290. *apud* PEREIRA, 2004

CHEN, W.; WANG, C. J. Hebei Polytech. Univ. Nat. Sci. Edn., v.33. 2011. 39p. *apud* JI *et al*., 2021.

DIAS, R. M. **Influência da geometria da válvula submersa no escoamento do aço no molde de lingotamento contínuo e suas implicações na qualidade superficial de placas**. 2019. (163 f). Dissertação. Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2019.

ELIAS, R. C. A. **Modelamento Físico e Matemático da Formação de Placa de Mistura no Lingotamento Contínuo – Efeitos de Modificadores de Fluxo no Molde**. 2010. (124f). Dissertação. Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas -

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2010.

FELDBAUER, S; JIMBO,I; SHARAN,A; SHIMIZU,K; KING, W; STEPANEK, J.; HARMAN. J e CRAMB, A. W. Mold Slag Properties That are Relevant to Clean Steel Production. In: STEELMAKING CONFERENCE, 78, 1995, Nashville, Tennessee. **Proceedings[...]**. Tennessee, 1995. p.655- 667. *apud* SILVA e SILVA, 2020.

GARDE, R .J. ***Turbulent Flow*.** New Delhi: John Wiley & Sons, 1994. 287p. *apud* PEREIRA, 2004.

HACKL, G.; TANG, Y.; NITZL, G.; SCHURMANN, D.; WILLERS, B.; ECKERT, S. Gyro Nozzle – An Innovative Submerged-Entry Nozzle Design for Billet and Bloom Casting. In: THE IRON & STEEL TECHNOLOGY CONFERENCE, 2018, Filadélfia, Pensilvânia. **Proceedings[...]**. Warrendale: Association for Iron & Steel Technology, 2018. p.85-90.

LIU, H.; WANG, Z.; QIU, H. Numerical Simulation of Fluid Flow and Solidification in a Vertical Round Bloom Caster Using a Four-port SEN with Mold and Strand Electromagnetic Stirring. **The Iron and Steel Institute of Japan (ISIJ)**, v. 60, n. 9, p.1924-1937, 2020.

LIU, H.; XU, M.; QIU, S.; ZHANG, H. Numerical Simulation of Fluid Flow in a Round Bloom Mold with In-Mold Rotary Electromagnetic Stirring. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 43B, p.1657-1675, 2012.

LIU, R.; SENGUPTA, J.; CROSBIE, D.; CHUNG, S.; TRINH, M.; THOMAS, B. G. Measurement of Molten Steel Surface Velocity with SVC and NAIL Dipping During Continuous Casting Process. In: TMS ANNUAL MEETING & EXHIBITION, 2011, San Diego, California. **Proceedings[...]**. Warrendale: Minerals, Metals and Materials Society, 2011. p. 51–58.

MACHADO, F. D.; FRANÇOIS, M. B. G.; VILELA, A. C. F. Modelagem Física de Remoção de Inclusões em Distribuidor de Lingotamento Contínuo de Tarugos. In: SEMINÁRIO DE ACIARIA - INTERNACIONAL, 45, 2014, Porto Alegre, Brasil. Anais[...]. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2014. p.2051-2063.

MOURÃO, M. B.; YOKOJI, A.; MALYNOWSKYJ, A.; LEANDRO, C. A. S.; TAKANO, C.; QUITES, E. E. C.; GENTILE, E. F.; SILVA, G. F. B. L.; BOLOTA, J. R.; GONÇALVES M.; FACO, R. J. **Introdução à siderurgia.** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007. 440p.

NAJJAR, F. M., THOMAS, B. G., HERSHEY, D. E. Turbulent Flow Simulations in Bifurcated Nozzles: Effects of Design and Casting Operation. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 26B, n. 4, p.749-765, 1995.

OLIVEIRA, L. J. S. **Análise do Efeito do Uso de Inibidores de Turbulência e a Configuração da Válvula Submersa no Escoamento do Aço em Máquinas de Lingotamento Contínuo de Placas.** 2003. (49f). Projeto de Iniciação Científica. Curso de graduação em Engenharia Metalúrgica - Relatório Final do Projeto de Iniciação Científica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2003.

OLIVEIRA, L. J. S. **Comportamento dos aços peritéticos durante a solidificação no molde de lingotamento contínuo.** 2009. (135f). Dissertação. Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2009.

PEREIRA, R. O. S. **Modelamento matemático do escoamento turbulento, da transferência de calor e da solidificação no distribuidor e na máquina de lingotamento contínuo**. 2004. (342f). Tese. Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2004.

RAY, A. K.; SINGH, R. K.; PAUL, A.; MAZUMDAR, S. Evaluation of Sub Entry Nozzle Design for Bloom Casting Based on Mathematical Modeling. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON SCIENCE & TECHNOLOGY OF STEELMAKING, 3, 2005, Charlotte, Carolina do Norte. **Proceedings[...]**. Warrendale: Association for Iron & Steel Technology, 2005. p.863-871.

SATO, C. T**. Simulação do comportamento escória /aço durante o esgotamento da panela através de modelagem física.** 2007. (98f). Dissertação. Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2007.

SCHNEIDER,W. **Continuous Casting.** In: MÜLLER, H. R. (Ed.). Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006. 397p.

SCHURMANN, D.; WILLERS, B.; HACKL, G.; TANG, Y.; ECKERT, S. Experimental Study of the Mold Flow Induced by a Swirling Flow Nozzle and Electromagnetic Stirring for Continuous Casting of Round Blooms. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 50B, p.716- 731, 2019.

SEETHARAMAN, S.; MCLEAN, A.; GUTHRIE, R. I. L.; SRIDHAR, S. ***Treatise on process metallurgy: Volume 3*.** Oxford: Elsevier, v.3. 2014. 1745p.

SILVA, C. A.; SILVA, I. A. **Tópicos em lingotamento contínuo**. Notas de Aula da disciplina de Lingotamento Contínuo. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2020. 308p.

SILVA, L. A.; SHIBATA, D. **Lingotamento Contínuo**. Notas de aula. Lorena: Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, SP, 2013. Disponível em: https://docplayer.com.br/24060738-Lingotamento-continuo.html. Acesso em: 20 abr. 2022.

SRIDHAR, S. Pertinent Properties for Metals and Slags in Continuous Casting. **The Making, shaping and treating of steel**. Ed. Pittsburgh: AISE Steel Foundation, 2003. *apud* MARTINS, 2019.

SUN, H.; ZHANG, J. Effect of Feeding Modes of Molten Steel on the Mould Metallurgical Behavior for Round Bloom Casting. **The Iron and Steel Institute of Japan (ISIJ)**, v. 51, p.1657–1663, 2011.

SUN, H.; ZHANG, J. Macrosegregation Improvement by Swirling Flow Nozzle for Bloom Continuous Castings. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 45B, p.936-946, 2013.

SUN, H.; ZHANG, J. Macrosegregation Improvement by Swirling Flow Nozzle for Bloom Continuous Castings. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 45B, p.936-946, 2014.

TALLBÄCK, G. R., LAVERS, J. D., ERRAKI, A., BEITELMAN, L. S. IEEE Trans. Magn., v.40. 2004, p.61-597. *apud* LIU *et al*, 2012.

THOMAS, B. G. Fluid Flow in the Mold. In: CRAMB, A. W. **The Making, Shape and Treating of Stee**l. 11. ed. Warrendale: AIST Iron and Steel Technology, 2003, p.1-41.

THOMAS, B. G. Modeling of Continuous-Casting Defects Related to Mold Fluid Flow. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON SCIENCE & TECHNOLOGY OF STEELMAKING, 3, 2005, Charlotte, Carolina do Norte. **Proceedings[...]**. Warrendale: Association for Iron & Steel Technology, 2005. p.847-865.

THOMAS, B.G.; DENNISOV, A.; BAI, H. Behavior of argon bubbles during continuous casting of steel. In: STEELMAKING CONFERENCE, 80º, 1997, Chicago, EUA. **Proceedings[...].** Warrendale: Iron and Steel Society, 1997. p.375-384.

TORRES-ALONSO, E.; MORALES; R. D.; GARCIA-HERNANDEZ, S.; NAJERA-BASTIDA, A.; SANDOVAL-RAMOS, A. Influence of Straight Nozzles on Fluid Flow in Mold and Billet Quality. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 39B, p.840-852, 2008.

TRINDADE, L. B., VILELA, A. C. F., FILHO, A. F. F., VILHENA, M. T. M. B., SOARES, R. B. IEEE Trans. Magn., v. 38. 2002, N°6, p.58-60. *apud* LIU *et al*, 2012.

VALADARES, C. A. G. **Curso de Lingotamento Contínuo de Placas**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006. *apud* OLIVEIRA, 2009.

VILELA, A. C. F., PEREIRA J. A. M. Modelamento físico no lingotamento contínuo. In: VILELA, A. C. F., SOARES, R. B. **Lingotamento contínuo de blocos e tarugos.** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002, p.146-147. *apud* SATO, 2007.

WANG, P.; LI, S.; TIE, Z.; LIU, H.; TANG, H; LAN, P.; ZHANG, J. Effect of Different Types of Nozzles on Swirling Flow Development and Shell Growth Behavior in a Bloom Casting Mold. In: THE IRON & STEEL TECHNOLOGY CONFERENCE, 2019, Pittsburgh, Pensilvânia. **Proceedings[...]**. Warrendale: Association for Iron & Steel Technology, 2019. p.1363-1371.

WANG, S.; LOUHENKILPI, S. In: STEELSIM CONFERENCE, 2011, Düsseldorf, Alemanha. **Proceedings[...]**. Düsseldorf, 2011. *apud* SEETHARAMAN *et al*., 2014.

WOLLMANN, A. M. **Estudos de fluxo em um distribuidor de lingotamento contínuo**. 1999. (107f). Dissertação. Mestrado em Engenharia Metalúrgica- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RGS, Brasil, 1999.

WSA. **Steel Statistical Yearbook - 2020**. World Steel Association. Bruxelas: 2016, 128p. Disponível em: https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Steel-Statistical-Yearbook-2020-concise-version.pdf. Acesso em: 10 mai. 2022.

ZHANG, L.; YANG, S.; WANG, X.; CAI, K.; LI, J.; WAN, X.; THOMAS, B. G. Investigation of Fluid Flow and Steel Cleanliness in the Continuous Casting Strand. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 38B, n. 1, p.63-83, 2007.