



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia de Metalúrgica e de Materiais



Igor Corneau Soares

**ANÁLISE DO EFEITO DO CLOGGING DA VÁLVULA SUBMERSA SOBRE O
FLUXO NO INTERIOR DE UM MOLDE DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE
BLOCOS: MODELAMENTO FÍSICO E MATEMÁTICO.**

Ouro Preto

2025

Igor Corneau Soares

**Análise do Efeito do Clogging da Válvula Submersa Sobre o Fluxo no Interior de um Molde de
Lingotamento Contínuo de Blocos: Modelamento Físico e Matemático**

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

Orientador Prof. DSc. Johnne Jesus do Mol
Peixoto

Ouro Preto

2025



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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Igor Corneau Soares

Análise do Efeito do Clogging da Válvula Submersa sobre o Fluxo no Interior de um Molde de Lingotamento Contínuo de Blocos: Modelamento Físico e Matemático

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 5 de setembro de 2025

Membros da banca

Doutor - Johnne Jesus do Mol Peixoto - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Mestre - Heric Henrique Souza e Silva - Membro (Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Ouro Branco)
Doutor - Paulo Luiz Santos Junior - Membro (Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Ouro Branco)

Johnne 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 05/03/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Johnne Jesus Mol Peixoto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/03/2026, às 15:16, 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 **1070041** e o código CRC **B1AEDCF1**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família — meu pai Rondon, minha mãe Jussara e meus irmãos Ana Clara e Ian — por todo amor, apoio e incentivo ao longo dessa caminhada. Ao meu orientador, Johnne, pela paciência, sabedoria e direcionamento fundamentais para a realização deste trabalho. À minha companheira Ana Beatriz, pela presença constante, carinho e compreensão. E à minha república em Ouro Preto, Acasa dos Porcos, pelos momentos de leveza, amizade e aprendizado coletivo. A todos, minha eterna gratidão.

RESUMO

Um dos desafios críticos enfrentados no processo de lingotamento contínuo de blocos é o fenômeno conhecido como *clogging* ou obstrução, que se refere ao entupimento do tubo de onde escoia o aço líquido. O *clogging* pode afetar significativamente o fluxo do metal líquido no interior do molde, resultando em variações indesejadas na qualidade do produto final acarretando em paradas não programadas e no aumento de custos operacionais. A compreensão desse fenômeno é de grande importância para auxiliar no aumento da eficiência do processo de lingotamento contínuo. Foram realizados experimentos em um modelo físico de molde de blocos, utilizando água em temperatura ambiente para simular o aço líquido. Foi desenvolvido também simulações de fluidodinâmica computacional utilizando CFX, para avaliar o efeito da ocorrência de *clogging* a cerca de 30cm da saída da válvula submersa. O estudo demonstrou que a presença de *clogging* na válvula afeta significativamente o comportamento do jato no molde, especialmente em altas vazões, o jato é direcionado para uma das paredes do molde de blocos. As simulações computacionais (CFD) mostraram forte correlação com os dados experimentais obtidos por PIV (Velocimetria de imagem de partícula), validando os modelos utilizados. Observou-se ainda que, dependendo do tamanho da obstrução, a direção do jato pode variar de acordo com a sua vazão, e quanto maior mais provável do desvio ocorrer.

Palavras Chaves: Clogging; Lingotamento Contínuo; Válvula Submersa; Computational Fluid Dynamic (CFD); Modelamento Físico.

ABSTRACT

One of the critical challenges faced in the continuous casting process of steel billets is the phenomenon known as clogging, which refers to the blockage of the nozzle through which the liquid steel flows. Clogging can significantly affect the flow of molten metal inside the mold, leading to undesirable variations in product quality, unplanned shutdowns, and increased operational costs. Understanding this phenomenon is essential to improve the efficiency of the continuous casting process. Physical model tests were conducted using an acrylic mold and room-temperature water to simulate liquid steel. This physical model was complemented by computational simulations. The study demonstrated that the presence of clogging in the nozzle significantly affects the jet behavior inside the mold, especially at high flow rates. Computational simulations (CFD) showed strong correlation with experimental data obtained through PIV, validating the models used. When analyzing different obstruction conditions, the results indicated that depending on the degree of clogging, the jet direction may vary according to the flow rate — the higher the flow, the greater the likelihood of deviation.

Keywords: Clogging; Continuous Casting; Submerged Entry Nozzle; Computational Fluid Dynamics (CFD); Physical Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Apresentação do fenômeno estudado: o clogging. Tubo submerso com depósito de alumina (clogging) no diâmetro.....	10
Figura 3.1 – Formatos nos quais o aço comumente é consolidado	12
Figura 3.2 – Esquema de uma máquina de Lingotamento Contínuo.	13
Figura 3.3 - Válvula Submersa com presença de clogging e uma válvula submersa	15
Figura 3.4 – Simulação computacional da evolução do clogging com o passar do tempo.	16
Figura 3.5 – Ensaio de traçador de corante.	19
Figura 3.6 – Esquema da configuração do ensaio.	20
Figura 3.7 – Perfil de velocidades para vazão de 100L/min e imersão da SEN 100mm: a) seção BB– CFD e b) seção BB - PIV.	21
Figura 3.8– Vista superior das malhas do modelo das válvulas submersas.	22
Figura 3.9 - Comportamento do fluxo do aço líquido no molde utilizando 4 tipos de válvulas.	23
Figura 3.10 – Resultado obtido por Peixoto (2016) em simulação computacional: a) e b) vista frontal; c) e d) vistas laterais.....	24
Figura 4.1 – Válvula do modelo A.....	26
Figura 4.2 - Posicionamento da válvula na parte superior do molde de acrílico.	26
Figura 4.3 – Válvula do modelo B.....	26
Figura 4.4 – Molde de acrílico e fluxo de água do modelo físico.....	27
Figura 4.5 – Ensaio de penetração do jato via injeção de corante.	28
Figura 4.6 – Disposição das áreas analisadas.	29
Figura 4.7 – Linhas analisadas dentro da área 1	30
Figura 4.8 – Linhas analisadas dentro da área 2.	30
Figura 5.1– Dispersão de tinta utilizando válvula sem clogging. SEN A, imersão 10cm.	33
Figura 5.2 – Sequência de imagens do ensaio de penetração via injeção de corante. Válvula B, imersão 10cm.....	34
Figura 5.3 – Progressão de imagens do ensaio de penetração via injeção de corante, Válvula B, imersão 15cm.....	35
Figura 5.4 – Imagens de dispersão de traçador a 60 l/min referentes à modelagem computacional simulando efeito de clogging.	36
Figura 5.5 – Imagens de dispersão de traçador a 80 l/min referentes à modelagem computacional simulando efeito de clogging.	37
Figura 5.17 – Gráficos Posição x Velocidade obtidos da simulação computacional para o ensaio com obstrução de 60% com vazões de 60, 80 e 100 l/min.	48
Figura 5.21 – Gráfico Posição x Velocidade obtidas da simulação computacional para válvula com obstruções de 40%, 60% e 0%, vazão de 80 l/min.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Produção de Lingotamento Contínuo em todo mundo.....	9
Tabela 4.1 – Parâmetros experimentais analisados em modelo físico	25
Tabela 4.2 – Simulações realizados através do modelamento computacional	32
Tabela 6.1 – Resultados de Injeção de Corante.....	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVO.....	11
2.1	Objetivo Geral	11
2.2	Objetivos Específicos	11
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	12
3.1	Lingotamento Contínuo	12
3.1.1	Lingotamento Contínuo de Blocos.....	14
3.1.2	O Fenômeno Clogging.....	14
3.2	Modelo Físico	17
3.3	Simulação Computacional	21
4	METODOLOGIA.....	25
4.1	Modelo Físico de Acrílico	27
4.2	Penetração do Jato Via Injeção de Corante	28
4.3	Análise quantitativa do fluxo utilizando a técnica PIV	28
4.4	Simulação Computacional	30
5	RESULTADOS	33
5.1	Análise de Profundidade de Penetração do Jato	33
5.1.1	Modelo físico utilizando válvula sem obstrução	33
5.1.2	Válvula com obstrução de 60% (SEN B)	34
5.1.3	Profundidade penetração do jato via simulação computacional	35
5.2	Análise quantitativa do fluxo utilizando a técnica PIV	38
5.2.1	Análise quantitativa do fluxo utilizando a válvula sem obstrução.....	38
5.2.2	Análise quantitativa do fluxo utilizando a SEN com obstrução.....	41
5.3	Análise quantitativa do fluxo via simulação computacional	44
5.4	Comparação da Simulação Computacional X Modelo Físico	52
6	CONCLUSÕES.....	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1 INTRODUÇÃO

O processo de lingotamento contínuo é uma técnica revolucionária na indústria metalúrgica, responsável por transformar a produção de aços. Desenvolvido em meados do século XX, esse processo permitiu a evolução da produção de aço através da substituição dos métodos tradicionais de solidificação do aço refinado. Atualmente, estima-se que esse processo representa mais de 90% da produção global, como abordam os dados do World Steel apresentados na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Produção de Lingotamento Contínuo em todo mundo.

Produção de Lingotamento Contínuo 2021 a 2023						
	Milhões de Toneladas			% Produção de aço bruto		
	2021	2022	2023	2021	2022	2023
União Europeia (27)	148,6	132,6	112,9	97,3	97,2	97,3
Outra Europa	52,2	45,8	43,5	99,9	100,0	99,9
Rússia & outros CIS + Ucrânia	72,7	60,4	60,8	67,7	70,0	67,2
América do Norte	114,8	110,2	108,8	97,4	98,7	98,7
América do Sul	44,8	43,2	41,0	98,2	98,1	98,7
África	22,8	23,0	24,2	100,0	100,0	100,0
Orient Médio	49,7	54,2	54,5	99,9	100,0	100,0
Ásia	1380,7	1356,4	1367,7	98,1	98,1	98,0
Total	1892,9	1831,9	1829,6	96,9	96,9	96,7

Fonte: (www.worldsteel.org)

A eficiência do lingotamento contínuo não só reduz os custos de produção, mas também minimiza o desperdício de material e o consumo de energia, o que explica sua utilização crescente em todo o mundo.

Mediante ao cenário atual, uma das formas de se manter competitivo no mercado siderúrgico é trabalhar em melhorias de processos aumentando a capacidade produtiva junto a qualidade de seu produto. A fim de alcançar esse resultado é necessário investir em estudos dos processos para minimizar, problemas que impactam o processo de lingotamento contínuo.

Um dos desafios críticos enfrentados durante essa etapa de produção é o fenômeno conhecido como *clogging*, que se refere obstrução parcial ou total da válvula submersa (SEN – Submerged Entry Nozzle), onde escoar o aço líquido, esse fenômeno pode existir quatro tipos segundo Singh (1974), são eles: Reação química entre o aço e o refratário, difusão do oxigênio através dos poros do refratário, acúmulo de inclusões de óxidos presente no aço e precipitação de óxidos, devido à queda de temperatura. O entupimento desse canal pode afetar significativamente o fluxo do metal

líquido, resultando em variações indesejadas na qualidade do produto final, paradas não programadas e no aumento de custos operacionais. A compreensão desse fenômeno é de grande importância visto que é algo que auxiliará a aumentar a eficiência do processo de lingotamento contínuo.

A motivação deste trabalho é estudar a mudança do comportamento do fluxo de aço líquido com a presença de *clogging*, em um lingotamento contínuo de blocos, realizando os ensaios de modelo físico e matemático, utilizando uma válvula submersa de jato reto. Esse tipo de entupimento reduz em cerca de 60% a área do tubo e ocorre 20cm acima da região do menisco, como exemplificado na Figura 1.1 a seguir.

Figura 1.1 - Apresentação do fenômeno estudado: o *clogging*. Tubo submerso com depósito de alumina (*clogging*) no diâmetro



Fonte: Gomes (2008)

Para investigar o efeito *clogging* sobre o fluxo no molde, este trabalho utilizou simulação computacional e modelo físico utilizando água. A aplicação de modelo físico com água permite a visualização prática das dinâmicas de fluxo, fornecendo uma visão clara de como é este comportamento com entupimento e/ou sem entupimento. Em adição à utilização do modelo de simulação computacional, o modelo físico fornece uma análise detalhada da situação usando a base de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), o que permite avaliar resultados do comportamento do fluxo, possibilitando prever o comportamento do fluxo em diferentes cenários.

Este trabalho abordou os efeitos do fenômeno *clogging* no lingotamento contínuo de blocos utilizando uma válvula submersa de jato reto, com a utilização do modelo físico e modelo simulação computacional.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Analisar o efeito do fenômeno de *clogging* da SEN do lingotamento contínuo de blocos sobre o escoamento do líquido no interior do molde utilizando modelamento físico e simulações computacionais.

2.2 Objetivos Específicos

1. Realizar experimentos em modelo físico de molde de blocos em escala 1:1 para condições de *clogging* da SEN a cerca de 100 e 150 mm do menisco, considerando obstrução de 60% da seção interna da SEN;
2. Estudar o efeito da vazão de fluido sobre o fluxo no interior do molde;
3. Determinar o campo de velocidade: Por meio da técnica do Particle Image Velocimetry (PIV), é possível quantificar o módulo de velocidade;
4. Implementar simulações computacionais: Utilizar o software Ansys CFX® para modelar o fluxo do modelo físico, comparando os resultados da simulação computacional;
5. Discutir a relevância do tema: Contextualizar a importância do estudo do *clogging* nos dias atuais no cenário das siderúrgicas;

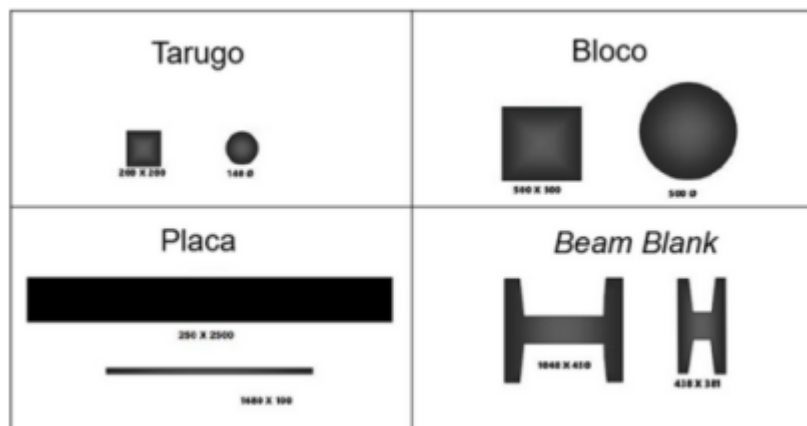
3 REVISÃO DA LITERATURA

Esse capítulo dedica-se a uma breve apresentação do processo de lingotamento contínuo, comentar sobre o lingotamento contínuo de blocos, explicar sobre a formação do clogging e como esse fenômeno afeta a qualidade do produto final bem como discutir como o modelo físico e a simulação computacional podem, em conjunto, auxiliar no estudo do problema.

3.1 Lingotamento Contínuo

Após as etapas de refino do aço, o refino primário e secundário, o metal é encaminhado para a etapa de lingotamento contínuo. O processo é a última fase na qual o metal se encontra em estado líquido. O objetivo dessa fase é solidificar o aço em uma geometria desejável, como por exemplo no formato de blocos (retangulares), tarugos (quadrangulares), redondos (circulares), *beam-blank* (esboço de viga) e placas (retangulares com o comprimento muito maior que a largura), como pode ser observado na Figura 3.1. Esses formatos são escolhidos para que o aço seja utilizado com maior eficiência na etapa seguinte, a laminação.

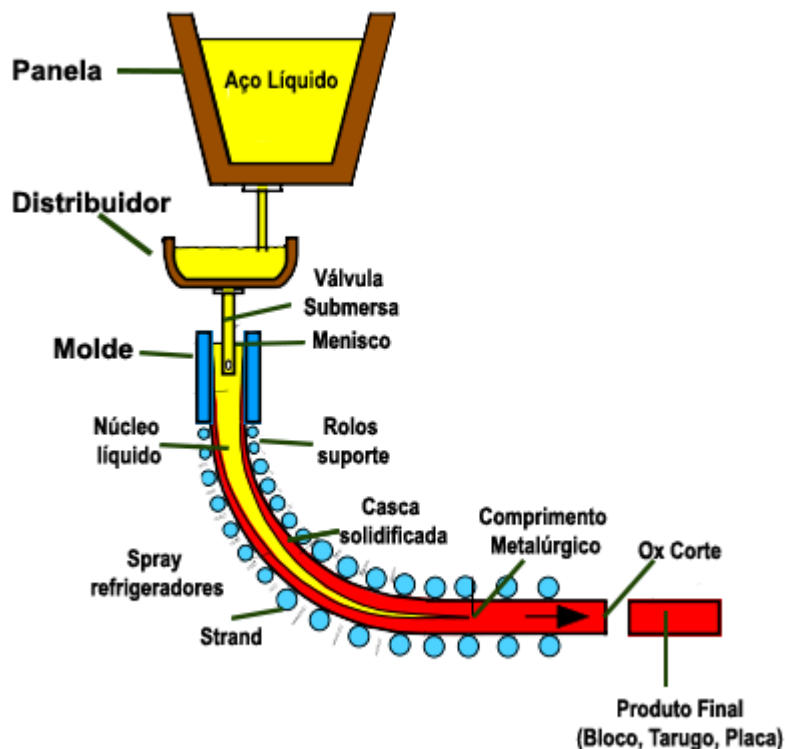
Figura 3.1 – Formatos nos quais o aço comumente é consolidado



Fonte: Conceição (2018)

A máquina de lingotamento contínuo funciona da seguinte forma: o aço líquido é armazenado em uma panela, que é posicionada acima do sistema de lingotamento. Por ação da gravidade, o aço flui da panela para o distribuidor ele regula o fluxo e distribui o aço para o molde, também por gravidade. Como pode ser observado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Esquema de uma máquina de Lingotamento Contínuo.



Fonte: Adaptada de Thomas (2001).

A função do distribuidor é alimentar continuamente o molde com aço líquido, mesmo após as trocas de panelas, que são geradas continuamente na aciaria onde se produz o aço, o que faz com que o processo seja contínuo. O distribuidor também pode ser utilizado para flotar inclusões prejudiciais sólidas na camada de escória. Caso as inclusões passem para o molde do material, a inclusão poderá chegar até o produto final, o que ocasiona na perda de qualidade do produto e pode causar defeitos. Para produzir um produto de qualidade, o aço líquido deve ser protegido do contato do ar através de uma cobertura feita por uma camada de escória. Caso esse processo ocorra sem a proteção, o oxigênio presente no ar reagiria com o metal formando inclusões indesejáveis. Em seguida, ocorre a chegada do aço no molde e o aço fundido se solidifica contra as paredes resfriadas a água de um molde de cobre para formar uma casca sólida de espessura que varia entre de 6mm e 20mm. Como apresenta Thomas (2010), para que a aderência das cascas à parede seja liberada, o molde deve sofrer uma oscilação vertical.

O resultado parcial da solidificação sai do molde a uma taxa de lingotamento que geralmente é medida em m/min. Em seguida, o material é resfriado à base de jato de água até o término da solidificação do aço (Peixoto, 2016).

3.1.1 Lingotamento Contínuo de Blocos

O lingotamento contínuo de blocos se difere dos outros tipos de lingotamento devido a geometria final do produto, visto que a geometria do molde segue o formato da seção reta do produto semiacabado. O exemplo do molde de blocos tem uma geometria retangular.

A conicidade do molde é determinada em função da velocidade de lingotamento e do tipo de aço, que são as principais variáveis que afetam o fluxo de calor e a contração volumétrica do aço. O fenômeno ocorre pois o aço, ao se solidificar, tende a se contrair progressivamente no molde devido ao resfriamento. Para evitar esse fenômeno o ideal é que a seção do molde seja devidamente reduzido, com o foco de compensar a contração, mantendo um fluxo de calor uniforme ao longo do seu comprimento (Oliveira, 2009).

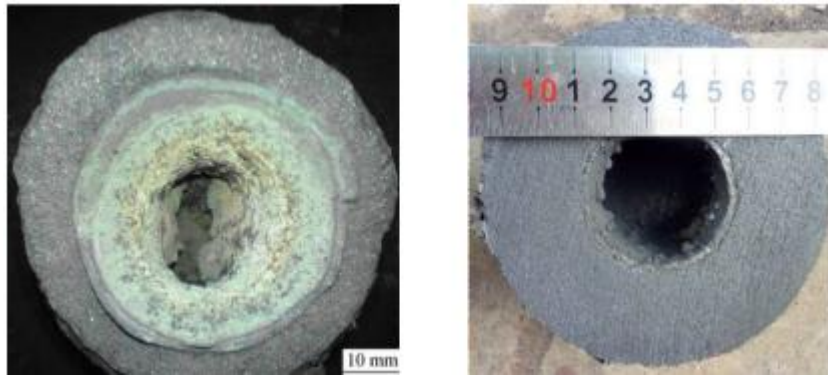
Dessa forma, alterar as dimensões do molde afeta diretamente o comportamento do escoamento em seu interior. Em seu trabalho, Liu et al. (2011) relataram que com o aumento da área do molde é mais provável que ocorra um aumento na vazão de aço, logo, ocorre também um aumento da vazão na saída da válvula submersa. Pereira et al. (2004) afirma que o comprimento mínimo que um molde deve ter é o que possibilita a formação de uma pele solidificada com uma boa resistência mecânica suficiente para que não ocorra o rompimento. Neste sentido, quanto maior a velocidade de lingotamento maior deve ser o comprimento do molde.

Assim, conhecer o comportamento de escoamento para cada dimensão do molde se torna essencial para controlar as demais variáveis do processo de lingotamento contínuo, como a velocidade de lingotamento, a imersão da válvula submersa, a geometria da válvula, entre outras, a fim de buscar estabilidade no processo (Dias, 2019).

3.1.2 O Fenômeno Clogging

O acúmulo de material na passagem do fluxo durante o lingotamento contínuo é conhecido como clogging, devido ao fechamento da área útil de passagem do fluido que poderá ocasionar uma mudança de fluxo. Este é um problema que afeta o ritmo de produtividade e a qualidade final do produto, além de aumentar o tempo de paradas para manutenção (Contini, 2011). Por consequência, o custo final do produto também sofre um aumento já que o processo terá menor produtividade e precisará de paradas para troca da tubulação, o que também terá como consequência maior gasto de materiais, que são trocados sem sua utilização máxima de números de corridas. Tudo isso poderá afetar negativamente a qualidade final do produto. Na Figura 3.3 pode observar uma válvula submersa que apresentou o fenômeno clogging e outra uma válvula submersa sem o clogging.

Figura 3.3 - Válvula Submersa com presença de clogging e uma válvula submersa



Fonte: Yang et al. (2024).

De acordo com Singh (1974), podem existir quatro tipos gerais de formação do clogging, sendo que cada tipo tem uma origem diferente. São eles: reação química entre o aço e o refratário, difusão do oxigênio através dos poros do refratário, acúmulo de inclusões de alumina que estão presentes no aço e precipitação de óxido de alumínio (Al_2O_3) devido à queda de temperatura. Entretanto, na prática, o entupimento gerado na válvula pode ser causado por uma combinação desses fatores.

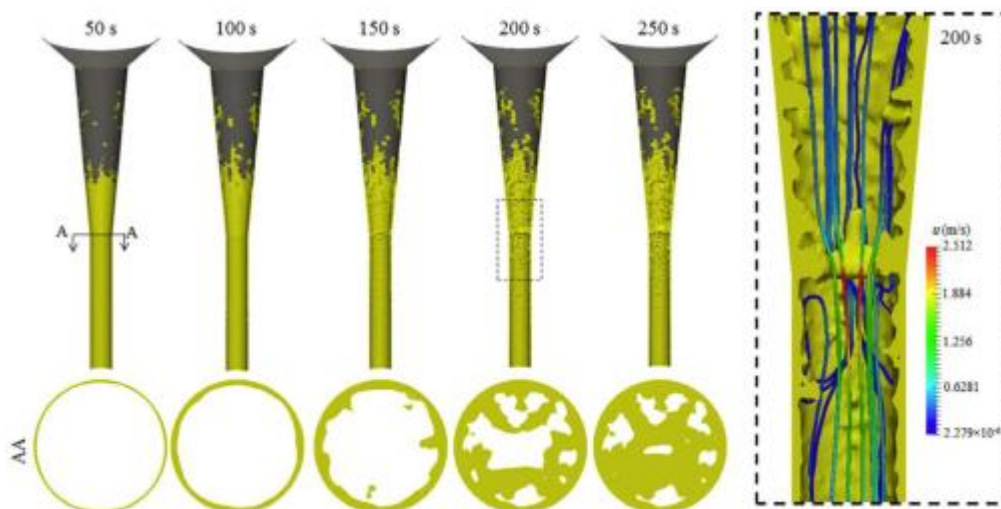
O escoamento do aço líquido no lingotamento contínuo é considerado turbulento. As inclusões formadas pelos produtos de desoxidação, são facilmente transportadas através do fluxo turbulento. Contudo, o fluxo nesta camada é predominantemente paralelo à parede uma vez que pouca força motriz está presente para promover a deposição de inclusão (Rackers & Thomas, 1995). Para explicar o transporte suficiente de inclusões para ocasionar o clogging algumas teorias foram propostas:

- Zona de recirculação turbulenta - teoria proposta por Dawson (1990), diz que: O interior de uma zona de recirculação ou deslocamento da camada limite é mais favorável ao acúmulo de inclusões.
- Fluxo turbulento - alguns autores como Wilson et al. (1987), sustentam que: O fluxo turbulento promove a formação de vortex e, mesmo na ausência de uma zona de recirculação, uma quantidade significativa de inclusões é transportada através da camada limite até a parede da SEN.
- Paredes Ásperas - Segundo Fix et al. (1993), devido a superfície irregular ou a erosão, à medida que o lingotamento ocorre a parede aumenta sua rugosidade, o que também aumenta a probabilidade de interceptação de particular arrastada.

Além dessas teorias citadas anteriormente, há um estudo realizado por Yang et al. (2024) que diz que a formação do *clogging* pode ser decorrente da perda de temperatura devido a composição da válvula submersa, que é feita de alumina Al_2O_3-C , material que apresenta boa condutividade térmica. É natural que ocorra a perda de temperatura na parede da válvula submersa onde há contato com o ar, o que favorece a precipitação de alumina no equilíbrio químico. Além disso, o estudo de Yang et al. (2024) abordou que uma grande flutuação de temperatura do aço fundido durante o processo de lingotamento poderá ocasionar a solidificação do aço em alguns pontos, levando a mais precipitação de inclusões sólidas.

Outras formas de explicar o fenômeno do *clogging* e entender como ocorre a deposição desse material é através da utilização da ferramenta Computacional Fluido Dinâmico (CFD), como apresentado no trabalho de Wilson et al. (1987) e Yang et al. (2024), onde mais uma vez a relevância do problema é explicitada e como pode ser observado na Figura 3.4, sobre o trabalho de Yang et al. (2024).

Figura 3.4 – Simulação computacional da evolução do *clogging* com o passar do tempo.



Fonte: Yang et al. (2024)

A melhor forma de evitar o *clogging* é garantir a baixa concentração de produtos de desoxidação e a formação de produtos de reoxidação, os meios para buscar este aumento da limpeza do aço são: refino em panela, prevenção de oxidação, remoção de inclusão e controle das taxas de vazão e temperatura do processo. Essas técnicas se baseiam na composição do refratário para evitar uma reação indesejada, o que faz com que seja necessário realizar uma melhor limpeza do aço para inibir a formação do fenômeno de *clogging* posteriormente. Além disso, também é necessário pensar em novas formações de comportamento de fluxo, bem como no uso de campo

magnético ou campo elétrico externo, e mudança de geometria da saída da válvula submersa para produzir um novo comportamento do fluxo do aço dentro do molde.

3.2 Modelo Físico

O modelamento físico e matemático são ferramentas de extrema importância no estudo de processos metalúrgicos (Peixoto, 2016) e, combinados, têm a finalidade de sempre melhorar tais processos e otimizar as condições de trabalho sem afetar o custo de produção. Estes métodos são utilizados para analisar a influência de variáveis do processo sem comprometer a rotina operacional. Os modelos físicos feitos para simular os principais reatores metalúrgicos são construídos com parede de acrílico e a água é usada como fluido de simulação devido a simplicidade de manuseio. Wollmann (1999) afirma que o uso da água representa de maneira fidedigna o comportamento do aço líquido e facilita as medições de fluxo.

O aço líquido é representado pela água em temperatura ambiente nas simulações em modelos físicos devido a sua viscosidade cinemática que é da mesma ordem de grandeza da viscosidade cinemática do aço, quando o aço está em temperatura próxima de 1600°C (Sato, 2007). Essa característica foi comprovada no trabalho de Elias (2010) onde o autor compara os valores da viscosidade cinemática da água em 20°C, que é de $0,86 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$, enquanto o valor para o aço próximo a 1600 °C é de $0,9 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$. Portanto, essa aproximação utilizada nos modelos físicos é satisfatória para os processos metalúrgicos.

A importância da similaridade geométrica, por sua vez, refere-se a apresentar um fator de escala consistente pois as dimensões geométricas do processo metalúrgico estudado devem ter suas razões dimensionais correspondentes a uma constante e o molde físico deve apresentar esse mesmo valor de constante (Silva, 2018), assim o critério de similaridade deve ser respeitado.

Para a simulação de lingotamento contínuo utiliza-se a igualdade dos números de Reynolds e Froude com o sistema real para representar o critério de similaridade (Mazumdar, 2009). Independente da simulação ocorrer no regime de escoamento laminar ou turbulento é necessário que o número de Reynolds seja utilizado como critério. Seu cálculo é feito de acordo com a equação 3.1:

$$Re = V L \rho / \mu$$

Equação 3.1

Onde: Re = número de Reynolds; L = dimensão característica (definida de acordo com a configuração do sistema); V = velocidade média do fluido; ρ = densidade do fluido; μ = viscosidade dinâmica do fluido.

O número de Froude também é um número adimensional, obtido pela Equação 3.2 :

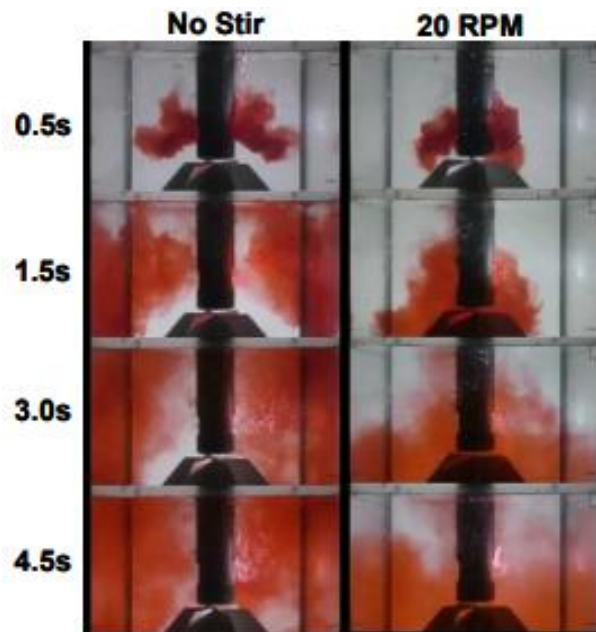
$$Fr = V^2 / (gL) \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde: Fr = número de Froude; V = velocidade média do fluido; g = aceleração da gravidade; L = dimensão característica (definida de acordo com a configuração do sistema).

Nos estudos realizados por Brighton et al. (2014) foi utilizado o modelamento físico para analisar uma nova geometria de válvula submersa com e sem um agitador magnético para desenvolver o estudo do fluxo de aço no molde de lingotamento contínuo de blocos. Foram realizados testes em molde construído de acrílico em tamanho real, de altura de 1,6 metros, mas com dimensões diferentes. O molde maior apresenta tamanho 2,3 vezes maior do que o molde menor. O controle de lingotamento foi realizado através de controle de vazão de água na entrada e na saída, mantendo os níveis operacionais. A análise da visualização do comportamento do fluxo foi realizada. Além disso, também foi feito experimentos de traçador de corante, como pode ser visto na Figura 3.5 que apresenta uma série de quadros de vídeo em ordem de tempo decorridos desde a primeira saída de corante das portas SEN. É possível ainda visualizar a injeção de corante de fluxo no molde.

Brighton et al. (2014) analisaram o tempo em que o corante preenchia toda a zona do menisco, pois a relação entre o tempo de preenchimento da área do menisco e a temperatura da região analisada é de proporcionalidade inversa. Esse estudo foi realizado separando os lados direito e esquerdo, com intuito de comparar a diferença entre os dois. Os autores concluíram que o tempo de preenchimento na região do menisco aumenta com o tamanho do molde através do ensaio de injeção de corante.

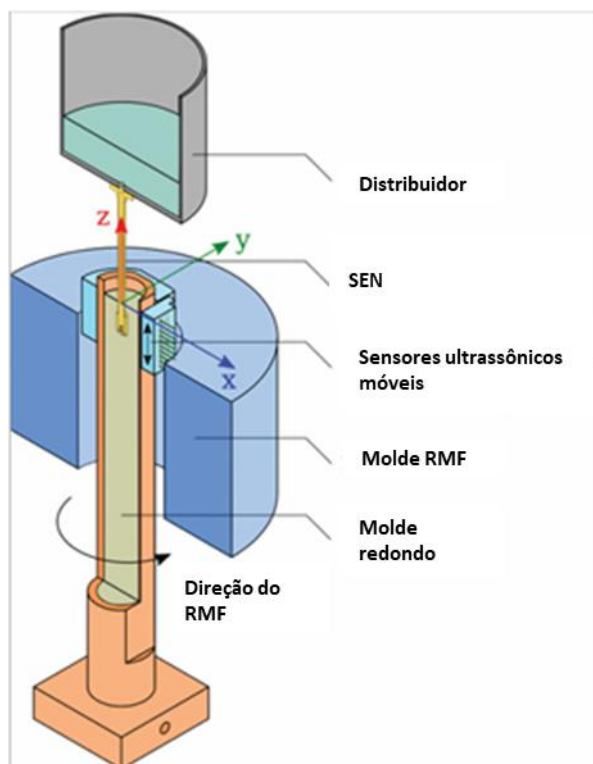
Figura 3.5 – Ensaio de traçador de corante.



Fonte: Brighton et al. (2014)

No trabalho apresentado por Hackl et al. (2019) foi utilizado o modelamento físico para analisar uma nova geometria de válvula submersa utilizando um agitador magnético para desenvolver o estudo do fluxo de aço no molde de lingotamento contínuo de blocos. Foram realizados testes em molde com o uso de metal líquido em temperatura ambiente. O objetivo do estudo foi analisar o comportamento do fluxo com a nova geometria da válvula submersa. O controle de lingotamento foi realizado mantendo as variáveis do comportamento do fluxo como a de um lingotamento contínuo em escala industrial. O modelo físico utilizado foi o sistema eletromagnético contendo 12 bobinas que geram um campo magnético rotativo com uma densidade de fluxo máxima de $B_0 = 20 \text{ mT}$. É possível observar uma visão esquemática da configuração experimental, bem como as dimensões principais na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Esquema da configuração do ensaio.



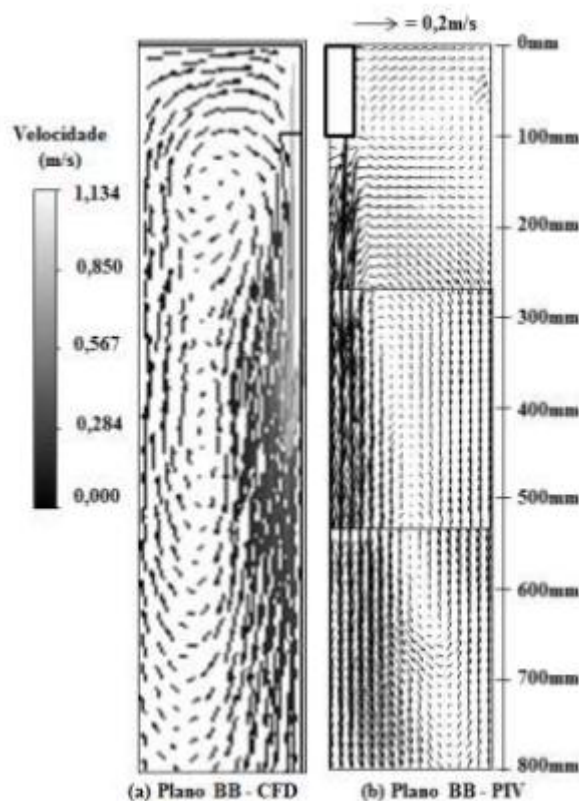
Fonte: Hackl et al. (2019) e alterada pelo autor.

O modelo é operado em um fator de escala de 1:3. O molde, que é feito de vidro acrílico, tem um diâmetro interno de 80 mm e um comprimento total de 800 mm. O diâmetro interno e externo do modelo Gyro SEN são 10 mm e 20 mm, respectivamente. A profundidade de imersão, que é considerada a partir da parte inferior do produto até o menisco, é de 35 mm. O centro do agitador está localizado 225 mm abaixo do menisco. A velocidade do fluido no molde foi medida por meio de velocimetria Doppler de ultrassom (UDV). Este método é baseado na técnica de eco de pulso e fornece perfis instantâneos do componente de velocidade projetado na direção de propagação do feixe de ultrassom. Um conjunto de 10 sensores, que estavam alinhados verticalmente, foi aplicado ao molde. As medições foram realizadas em duas posições, a saber, 15 mm e 30 mm de distância do centro. E esse trabalho concluiu que pela melhor dissipação de energia a velocidade de lingotamento contínuo e a qualidade da superfície foi melhorada. poderia ser aumentada

No trabalho de Peixoto (2016) foi realizado uma análise do fluxo no molde de lingotamento contínuo de um Beam blank, a simulação física foi realizada com o molde de acrílico. O trabalho tinha como objetivo verificar a influência da velocidade de lingotamento e do diâmetro de válvulas submersas do tipo tubulares sobre o fluxo no interior do molde. O trabalho utilizou a técnica de análise PIV (*Particle Image Velocimetry*) através do aparelho DANTEC®, como pode

ser observado na Figura 3.7. O autor conseguiu observar que o fluxo passava pelo centro de um dos vórtices laterais do flange.

Figura 3.7 – Perfil de velocidades para vazão de 100L/min e imersão da SEN 100mm: a) seção BB– CFD e b) seção BB - PIV.



Fonte: Peixoto (2016)

3.3 Simulação Computacional

O modelo matemático é formado por um sistema de equações algébricas e diferenciais que tem como objetivo reproduzir quantitativamente o processo estudado. Para se alcançar um bom modelo matemático é de suma importância saber as leis que governam o sistema estudado, bem como ter capacidade de síntese para expressar matematicamente o caso estudado. De acordo com Alves (2014) o foco da utilização do modelo matemático deve ser buscar a melhor solução em diversos cenários criados e encontrados em práticas.

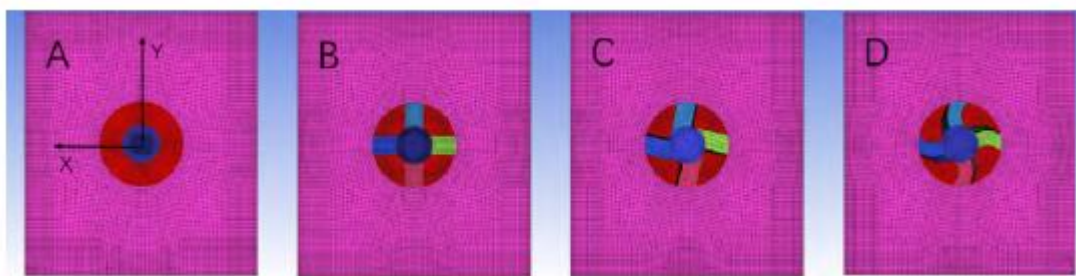
A ferramenta utilizada para o modelamento matemático dos processos industriais é o CFD - *Computational Fluid Dynamics*, que pode ser utilizada para análise de problemas físicos, matemáticos, computacionais e escoamento de fluidos (Blazek, 2001). O CFD pode ainda ser empregado em simulações computacionais que envolvem comportamento do fluido, transferência de calor e outros processos que se correlacionam.

Atualmente, diversos autores têm procurado estudar o lingotamento contínuo utilizando modelamentos matemáticos e os softwares mais utilizados nesses processos são o ANSYS CFX e o FLUENT. O objetivo desse tipo de estudo geralmente é caracterizar o fluxo de aço, de calor e os campos de tensão aos quais o processo é submetido (Peixoto, 2016). Esse estudo busca entender com mais riquezas de dados os processos que ocorrem no interior do molde na tentativa de prever possíveis problemas bem como trazer soluções para que o processo e o produto final tenham qualidade.

Quando se encontram resultados semelhantes e satisfatórios entre o modelo matemático e o modelo físico é possível tomar decisões a partir das previsões geradas pelo o modelo matemático sem a necessidade de realização de experimentos (Elias, 2010).

Wang et al. (2019) utilizaram o modelamento matemático para analisar e comparar novas geometrias de válvulas submersas, como pode ser observado na Figura 3.8, para desenvolver o estudo do fluxo de aço no molde e entender o crescimento da casca em um molde de lingotamento contínuo de blocos. Em seu trabalho, o autor procurou evidenciar novas tendências no comportamento do fluxo e como essa mudança pode apresentar uma melhor em relação à distribuição de temperatura. Como resultado, foi apresentado um modelo matemático de turbulência que pode ser visto na Figura 3.9.

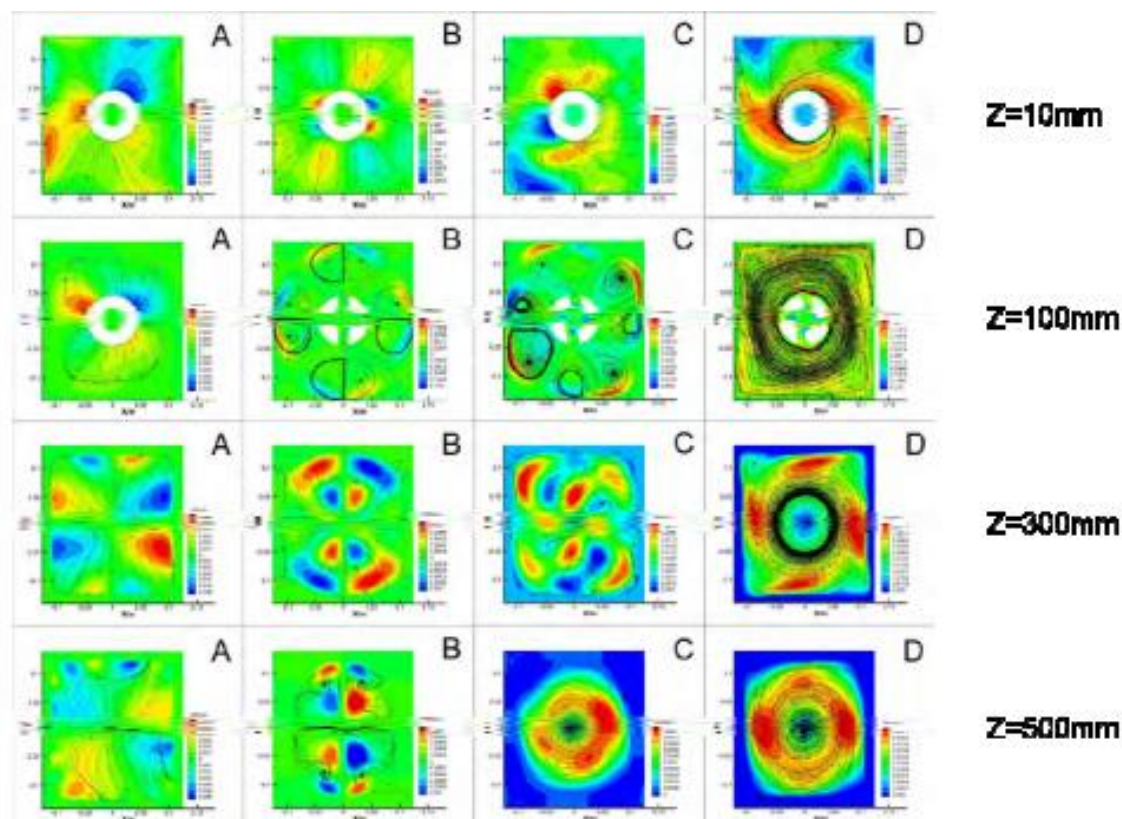
Figura 3.8– Vista superior das malhas do modelo das válvulas submersas.



Fonte: Wang et al. (2019)

Wang et al. (2019) concluíram que o fluxo rotativo distribui melhor o calor e pode ser benéfico para o processo de lingotamento contínuo.

Figura 3.9 - Comportamento do fluxo do aço líquido no molde utilizando 4 tipos de válvulas.



Fonte: Wang et al. (2019)

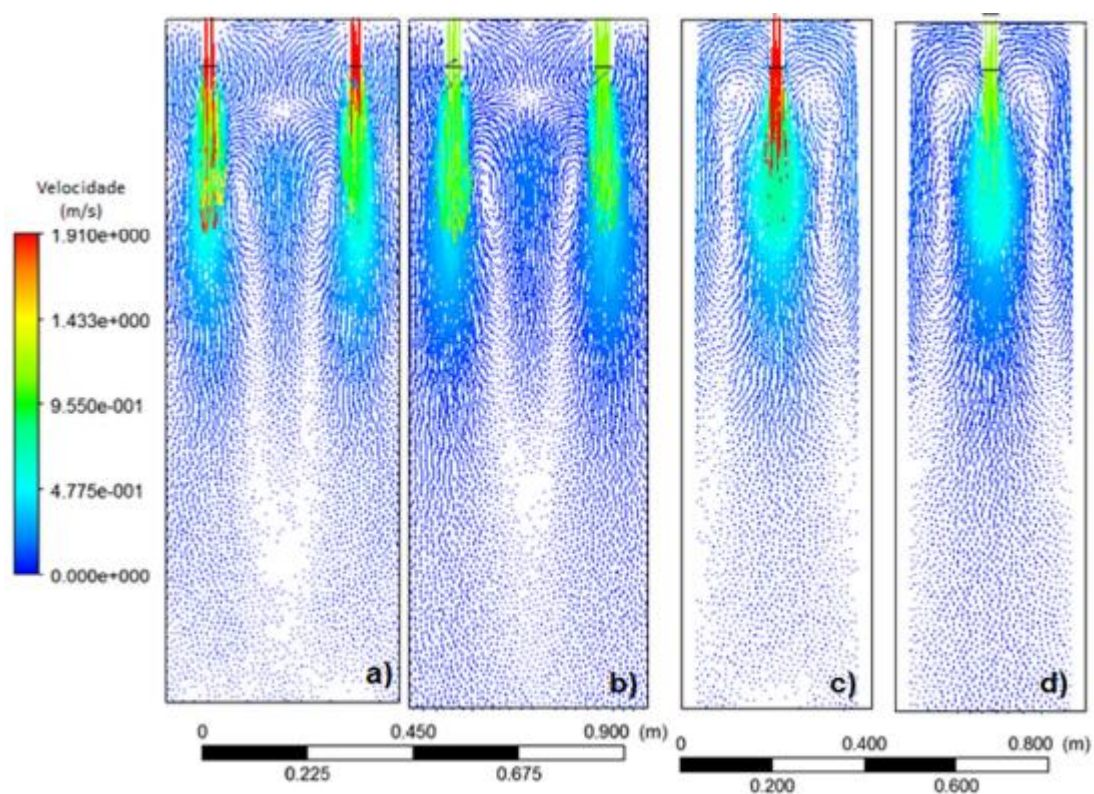
No estudo realizado por Peixoto (2016) foram realizadas simulações computacionais em regime permanente utilizando o software Ansys® CFX 15.0 de versão acadêmica, considerando a água um fluido Newtoniano, com temperatura constante igual a 25°C. As condições de contorno aplicadas a este problema foram:

- Condição de não deslizamento nas paredes do molde;
- Condição de livre deslizamento no menisco;
- Vazão mássica na entrada - 1,667kg/s; 2,083kg/s e 2,5 kg/s para as

velocidades de lingotamento equivalentes a 0,78m/min; 0,98 m/min e 1,2 m/min respectivamente.

O resultado obtido pela simulação computacional do autor Peixoto (2016) pode ser observado na Figura 3.10. Nas Figuras a e b são representadas as vistas frontal do molde, evidenciando a distribuição do escoamento com as duas válvulas submersas funcionando, nas imagens c e d observam-se as vistas laterais, permitindo analisar o escoamento com o foco de um dos lados do flange, cortando apenas uma das válvulas.

Figura 3.10 – Resultado obtido por Peixoto (2016) em simulação computacional: a) e b) vista frontal; c) e d) vistas laterais.



Fonte: Peixoto (2016)

É possível observar nas imagens resultantes da simulação computacional e física o surgimento de seis vórtices no molde: dois na região da alma e dois em cada flange. O campo de velocidade vertical obtido pela simulação apresentou valores compatíveis com o obtido via técnica PIV no modelo físico.

4 METODOLOGIA

O fluxo no interior de um molde de lingotamento contínuo de blocos foi analisado através de modelamento físico e matemático. Os testes foram realizados utilizando dois modelos distintos de válvula submersa. O primeiro, denominado modelo A, pode ser visto na Figura 4.1 e apresenta diâmetro interno de 32 mm e diâmetro externo de 75 mm. A válvula foi posicionada no centro da parte superior do molde de acrílico conforme pode ser observado na Figura 4.2. O segundo modelo de válvula foi denominado modelo B, possui as mesmas dimensões do modelo A na saída e apresenta um trecho de 30 centímetros de seção reduzida a fim de simular o efeito do fenômeno *clogging* como pode ser vista na Figura 4.3. Para restringir a seção foi utilizada uma peça de filamento PLA impressa em uma impressora 3D observado na Figura 4.3, que foi posicionada a 30 cm da extremidade da válvula e o diâmetro dessa seção restringida passou a ser aproximadamente 20,22 mm, uma redução de área de 60%. As vazões trabalhadas foram de 60 l/min e 80 l/min, que correspondem a uma velocidade de lingotamento de 0.45 m/min e 0.57 m/min.

Tabela 4.1 – Parâmetros experimentais analisados em modelo físico

Injeção de Tinta	Vazão (l/min)	Velocidade de Lingotamento (m/min)	Imersão (cm)	Quantidade Ensaio
Modelo A	60	0,45	10	1
Modelo A	80	0,57	10	1
Modelo B	60	0,45	15	1
Modelo B	80	0,57	15	1
Modelo B	60	0,45	10	1
Modelo B	80	0,57	10	1
Técnica PIV	Vazão (l/min)	Velocidade de Lingotamento (m/min)	Imersão (cm)	Quantidade Ensaio
Modelo A	60	0,45	10	1
Modelo A	80	0,57	10	1
Modelo B	60	0,45	10	1
Modelo B	80	0,57	10	1

Fonte: Autor.

Figura 4.1 – Válvula do modelo A.



Fonte: Autor.

Figura 4.2 - Posicionamento da válvula na parte superior do molde de acrílico.



Fonte: Autor.

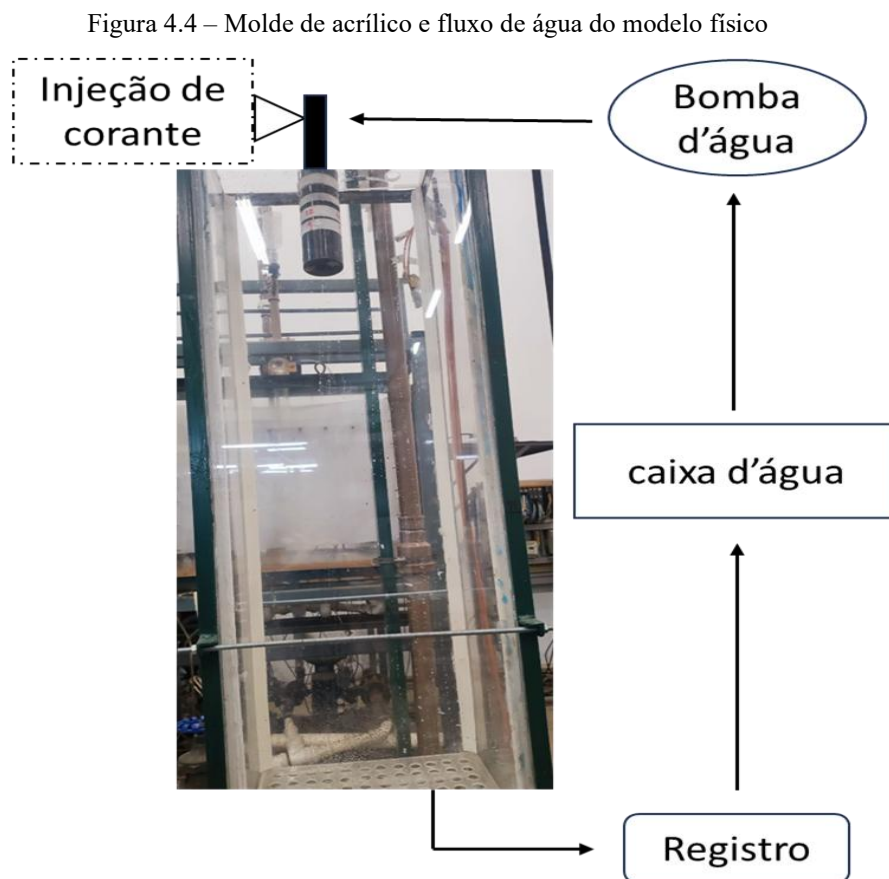
Figura 4.3 – Válvula do modelo B.



Fonte: Autor.

4.1 Modelo Físico de Acrílico

Foi utilizado um modelo de molde de blocos em acrílico construído em escala 1:1, com as dimensões de 430 mm de largura, 320 mm de comprimento e 1500 mm de altura. A altura utilizada é maior que o comprimento do molde a fim de garantir um fluxo completamente desenvolvido em seu interior para assegurar que a região de saída do fluxo não influencia seu comportamento geral. O modelo físico é alimentado com uma bomba que possibilita o controle da vazão de água no molde. Do molde a água retorna por gravidade para caixa d'água, sendo reutilizada durante todo o processo, exceto quando há injeção de corante. O ponto de injeção de corante é localizado acima da válvula submersa como pode ser visto na imagem Figura 4.4.



Fonte: Autor.

As diversas combinações de variáveis a serem analisadas incluem a imersão da válvula submersa, a vazão de líquido e a mudança de geometria (redução de área). Os ensaios realizados foram: Análise do jato pela injeção de corante, determinação de velocidade através de velocimetria PIV

(*Particle Image Velocimetry*) e o comportamento do fluxo. A relação de todas essas variáveis pode ser analisada na Tabela 4.1.

4.2 Penetração do Jato Via Injeção de Corante

Uma das metodologias aplicada no modelamento físico é a caracterização do jato através da injeção de corante. Esse ensaio é feito a partir da aplicação de uma injeção de corante na tubulação de entrada de água. A partir disso, é feita uma filmagem do caminho percorrido pelo jato no interior do molde até todo corante preenchê-lo. O intuito desse método é estimar o tempo necessário para o espalhamento do líquido e visualizar seu fluxo ao longo do molde para observar o quão profunda é a penetração do jato. É possível observar como esse ensaio é realizado na Figura 4.5. O ensaio foi realizado utilizando metodologia semelhante à empregada por Peixoto (2016), e foram comparadas as imagens referentes ao mesmo tempo após o lançamento do corante tanto do modelo físico quanto do modelo computacional.

Figura 4.5 – Ensaio de penetração do jato via injeção de corante.



Fonte: Autor.

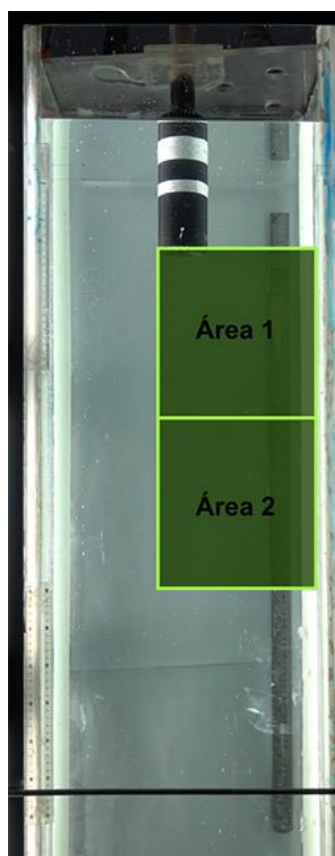
4.3 Análise quantitativa do fluxo utilizando a técnica PIV

Para realizar a análise quantitativa do fluxo de líquido por meio de modelamento físico foi utilizada a técnica PIV através do aparelho fornecido pela DANTEC® existente no laboratório de Pirometalurgia do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Ouro Preto (DEMET/UFOP). Os ensaios foram realizados através da montagem de um sistema da DANTEC - 2D, o qual utiliza um laser *Dual Power* - 65/ 15 400 mJ com duração de pulsos de 4 ns, possui faixa de comprimento de onda entre 1064nm e 532nm e uma câmera

CCD *Flow-Sense* 2ME ligada a um computador para análise de imagens via software *Dynamics Studio*.

A distância da câmera disposta no sistema PIV foi definida de modo que a área analisada conseguisse capturar a saída do jato até um dos lados da parede, resultando em uma área aproximada de 810 cm² (27 cm x 30 cm), tendo como foco a análise do perfil de saída do jato e sua vizinhança. Foram analisadas duas áreas distintas apresentadas na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Disposição das áreas analisadas.

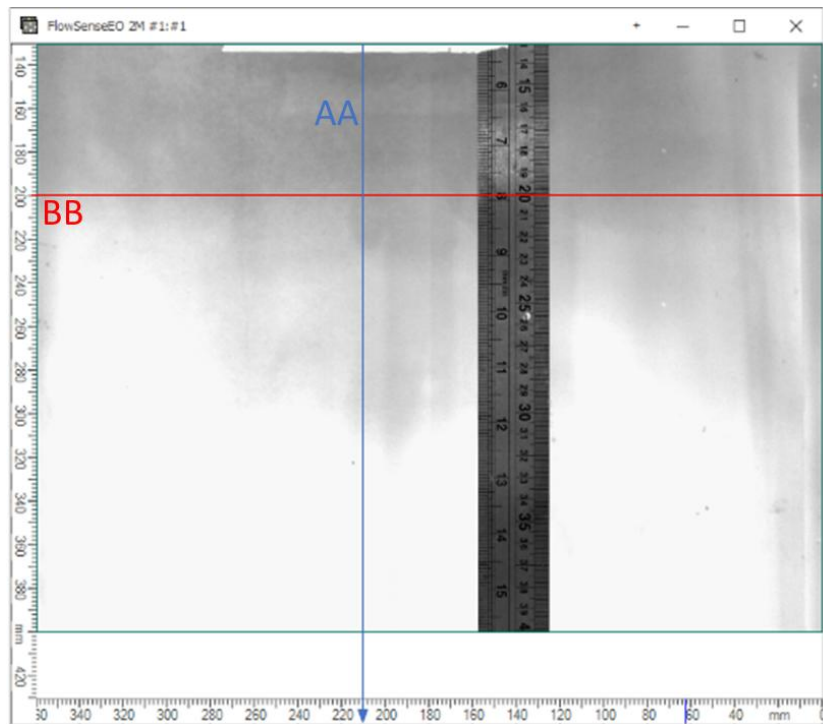


Fonte: Autor.

Na área 1 foram analisadas duas linhas distintas: Linha AA - vertical, permite analisar o perfil de velocidade do fluxo desde a saída da válvula até a região de termino da área 1; linha horizontal posicionada 20 cm abaixo do menisco, denominada de Linha BB; do centro do molde até as paredes de acrílico. As linhas da área 1 estão apresentadas na Figura 4.7.

Na área 2 foram analisadas duas linhas distintas, a primeira horizontal posicionada a 49 cm abaixo do menisco, denominada de linha CC, e a segunda também horizontal a 57 cm abaixo do menisco, denominada de linha DD, e sua análise permite estudar o comportamento do fluxo do centro do molde até as paredes de acrílico. As linhas da área 2 estão apresentadas na Figura 4.8.

Figura 4.7 – Linhas analisadas dentro da área 1



Fonte: Autor.

Figura 4.8 – Linhas analisadas dentro da área 2.



Fonte: Autor.

4.4 Simulação Computacional

Foram realizadas simulações fluidodinâmicas utilizando o software CFX (Ansys Students® 24R2). Considerando o regime permanente, as equações a serem resolvidas foram:

- Equação de Continuidade;

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

Onde: operador divergente, que mede o fluxo de saída de massa por unidade de volume; ρ : densidade do fluido (kg/m^3); $\mathbf{u}$: vetor velocidade do fluido (m/s).

Essa equação garante a conservação de massa, ou seja, o que entra em um volume de controle deve sair, sem acúmulo de massa.

- Equação de Navier Stokes;

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_{\text{ef}} \nabla \mathbf{u}) + \rho \mathbf{g}$$

Onde: $\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}$: termo convectivo, representa o transporte de quantidade de movimento; ∇p : gradiente de pressão, força que impulsiona o fluido; $\mu_{\text{ef}} \nabla \mathbf{u}$: termo viscoso, representa a difusão da quantidade de movimento devido à viscosidade; $\rho \mathbf{g}$: força de corpo, como a gravidade.

Essa equação representa a conservação da quantidade de movimento, ou seja, como as forças atuam sobre o fluido e influenciam seu movimento.

- Equação da viscosidade efetiva.

$$\mu_{\text{ef}} = \mu + \mu_t$$

Onde: μ - viscosidade dinâmica do fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), relacionada ao atrito interno do fluido; μ_t : viscosidade turbulenta, modela os efeitos da turbulência no escoamento

A viscosidade efetiva é usada para considerar tanto os efeitos laminares quanto turbulentos no modelo. O modelo de turbulência empregado foi o Generalized K- Omega.

As condições de contorno aplicadas foram:

- Condição de não deslizamento, aplicada em todas as paredes da válvula e do molde, regiões onde o fluido possui velocidade zero.
- Condição da superfície superior do molde (menisco), onde se assume uma superfície de livre deslizamento e velocidade igual a zero na direção normal à superfície.
- Condição de entrada do fluido, onde é especificado a vazão em kg/s .
- Condição de saída do molde: *opening pressure*, com pressão igual à pressão da coluna de água no molde (1,5m).

A geometria foi construída no software *Ansys Design Modeler*, representando o modelo do molde de acrílico. A malha foi construída com elementos predominantemente tetraédricos

utilizando o software *Meshing Modeler*. A malha possui uma região de maior refino situada na região de Clogging que se estende até a metade do molde. Por utilizar a versão estudantil do CFX (Ansys Students ®), a malha foi limitada a possuir 500 mil nós.

Foram analisadas o comportamento do interno do fluxo do molde com três modelos distintos de válvulas sendo eles com o modelo A em que a área da válvula não apresenta obstrução tendo 32mm de diâmetro, O modelo B que representa uma válvula com uma obstrução de 60% de sua área com um diâmetro de 20,20 mm e modelo C que representa uma válvula que tem uma obstrução de 40% de sua área com um diâmetro de 24,78 mm. A relação de simulações computacionais pode ser observada na Tabela 4.2 apresentada abaixo.

Tabela 4.2 – Simulações realizados através do modelamento computacional

Fluxo no interior do molde				
Modelo	Vazão (l/min)	Velocidade de Lingotamento (m/min)	Obstrução	Imersão (cm)
A	100	0,75	0	10
A	80	0,57	0	10
A	60	0,45	0	10
B	100	0,75	0,6	10
B	80	0,57	0,6	10
B	60	0,45	0,6	10
C	100	0,75	0,4	10
C	80	0,57	0,4	10
C	60	0,45	0,4	10
Simulação de Traçador				
Modelo	vazão (l/min)	Velocidade de Lingotamento (m/min)	Obstrução	Imersão (cm)
B	60	0,45	0,6	10
B	80	0,57	0,6	10
B	100	0,75	0,6	10

Fonte: Autor.

Para a análise da dispersão de corante no molde, foi realizada uma simulação transiente utilizando o software CFX (Ansys®). A abordagem adotada envolveu a introdução de uma variável adicional volumétrica, denominada anilina (simulando a tinta), representando a concentração do corante. A injeção da anilina foi modelada como uma condição de contorno, com valor fixo de concentração, permitindo acompanhar sua dispersão ao longo do tempo. A simulação foi conduzida em regime transiente, com o objetivo de prever a evolução temporal da distribuição do corante no escoamento. Manteve-se as equações de conservação de massa, como realizado no trabalho de Peixoto (2016).

5 RESULTADOS

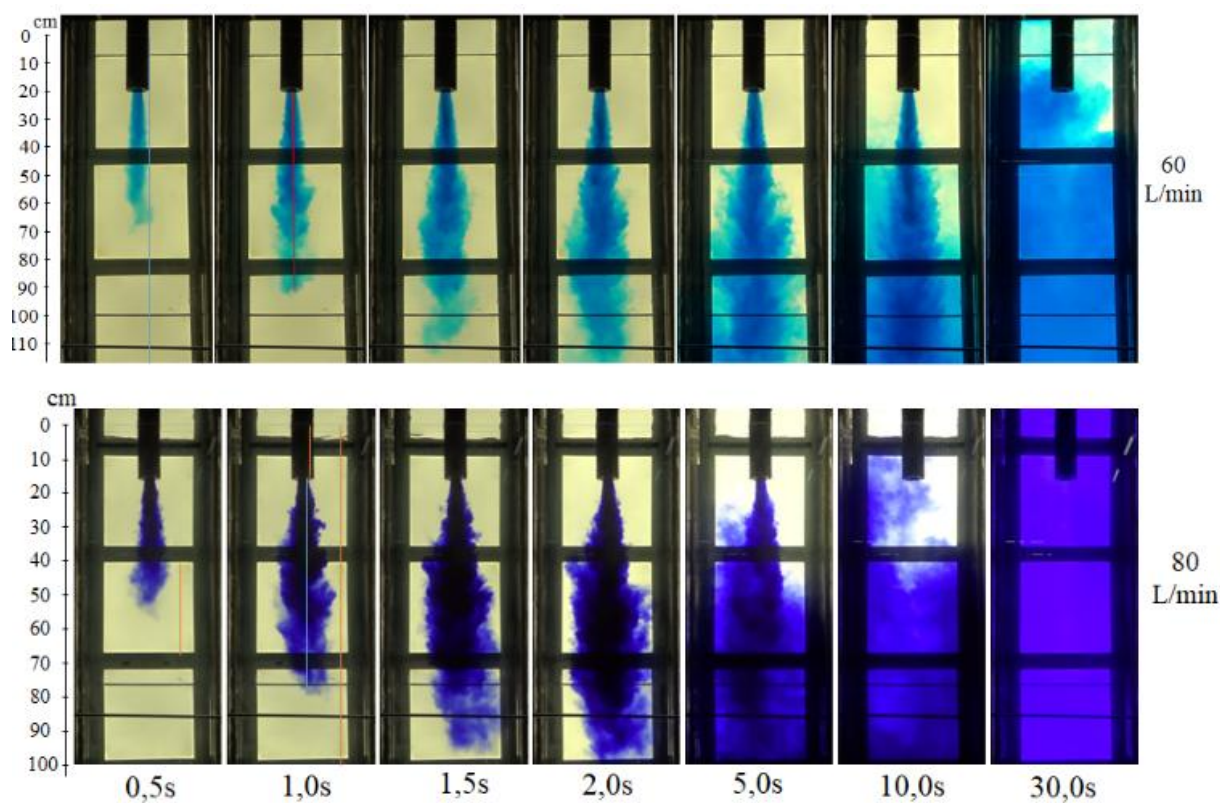
A fim de melhor analisar e discutir os resultados, esse tópico foi dividido em quatro seções para tratar separadamente de cada ensaio realizado para cada modelo de válvula, sendo eles o ensaio de penetração do jato via injeção de corante, análise quantitativa do fluxo utilizando a técnica PIV e a análise via simulação computacional.

5.1 Análise de Profundidade de Penetração do Jato

5.1.1 Modelo físico utilizando válvula sem obstrução

Como pode ser observado na Figura 5.1, os testes de injeção de corante para analisar a profundidade de penetração do jato com a válvula do modelo A (sem obstrução), o menisco está posicionado a 10 cm da extremidade da válvula, e as vazões analisadas foram de 60 L/min e 80 L/min. Verifica-se que, tanto para a vazão de 60 L/min quanto para a de 80 L/min, após 1 segundo do início do jato, o jato atingiu profundidades de 71 cm e 79 cm, respectivamente. Em ambas as vazões, observa-se que grande parte do molde já estava preenchida, com exceção da região do menisco. Após 30 segundos do início da injeção, o molde encontrava-se completamente preenchido em ambas as situações.

Figura 5.1– Dispersão de tinta utilizando válvula sem clogging. SEN A, imersão 10cm.



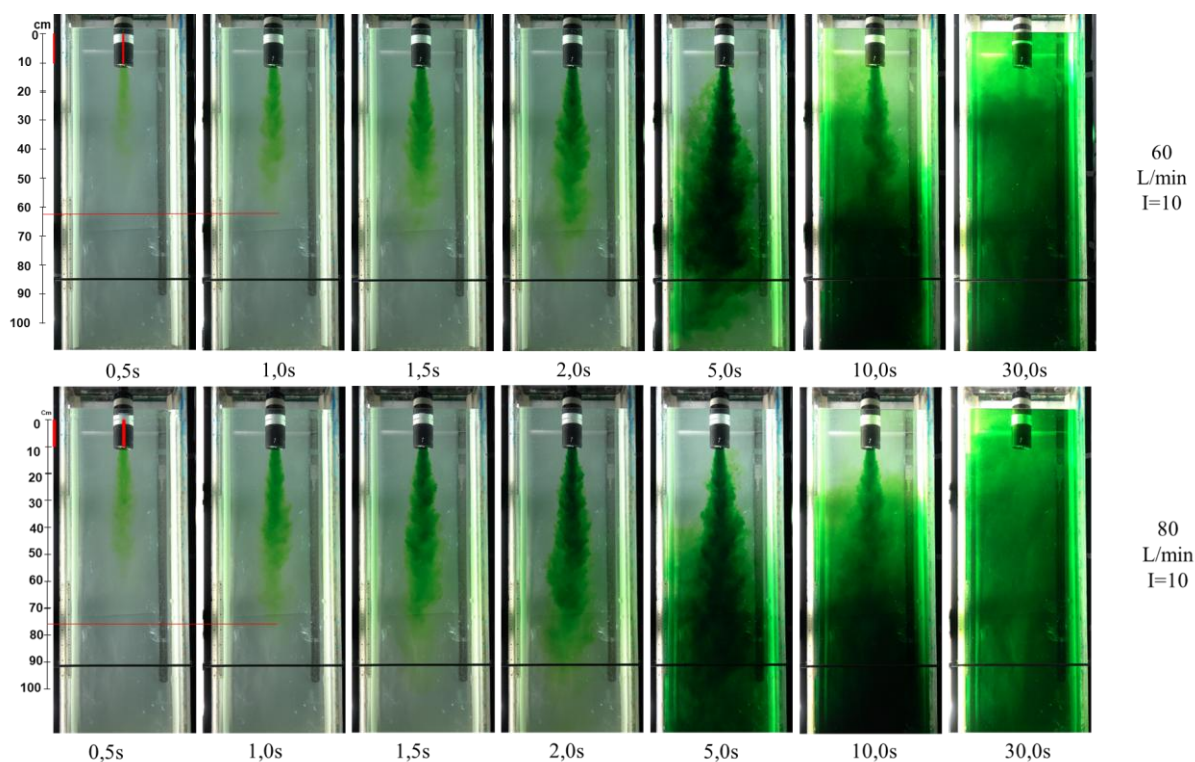
Fonte: Autor.

5.1.2 Válvula com obstrução de 60% (SEN B)

Conforme ilustrado na Figura 5.2, utilizando a válvula do modelo B — que simula o efeito do fenômeno de *Clogging* — observa-se que o menisco está posicionado a 10 cm da extremidade da válvula. As vazões analisadas foram de 60 l/min e 80 l/min. No instante inicial ($t = 1$ s), a profundidade de penetração do jato foi de 62 cm para a vazão de 60 l/min e de 77 cm para a vazão de 80 l/min. Além da penetração, nota-se que o jato apresenta uma leve inclinação ao longo do tempo, direcionando-se preferencialmente para a parede esquerda do molde de acrílico.

Aos 2 segundos do início do jato, a vazão de 80 l/min atinge uma profundidade de 100 cm. Após 10 segundos, observa-se que a tinta já preenche a maior parte do molde, embora a região do menisco ainda não esteja completamente preenchida. Finalmente, aos 30 segundos, verifica-se que o molde se encontra totalmente preenchido.

Figura 5.2 – Sequência de imagens do ensaio de penetração via injeção de corante. Válvula B, imersão 10cm.



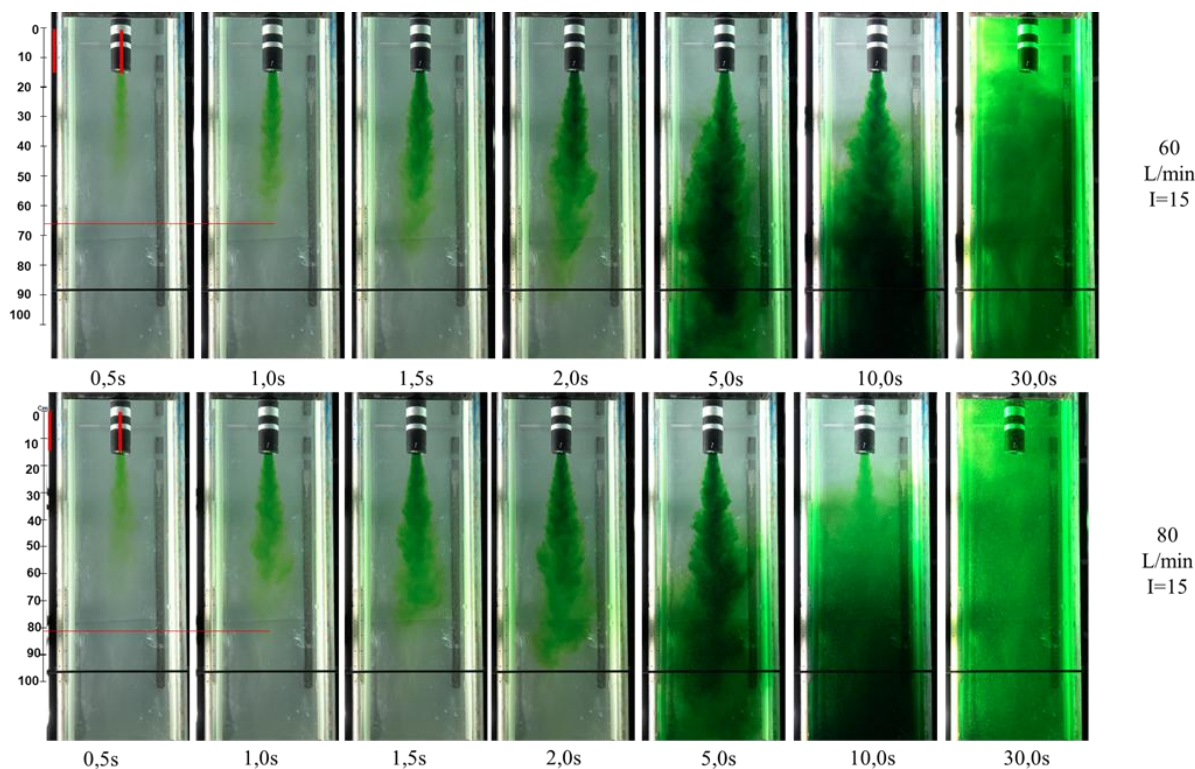
Fonte: Autor.

A Figura 5.3 apresenta os resultados do modelo físico realizado com a válvula B, porém com o menisco posicionado a 15 cm da extremidade da válvula. As vazões analisadas

permaneceram em 60 l/min e 80 l/min. No instante inicial ($t = 1$ s), observa-se que a profundidade de penetração do jato foi de 68 cm para a vazão de 60 l/min e de 81 cm para a vazão de 80 l/min.

Além disso, verifica-se a mesma tendência observada anteriormente quanto à variação da direção do jato, que se inclina ao longo do tempo em direção à parede do molde.

Figura 5.3 – Progressão de imagens do ensaio de penetração via injeção de corante, Válvula B, imersão 15cm.



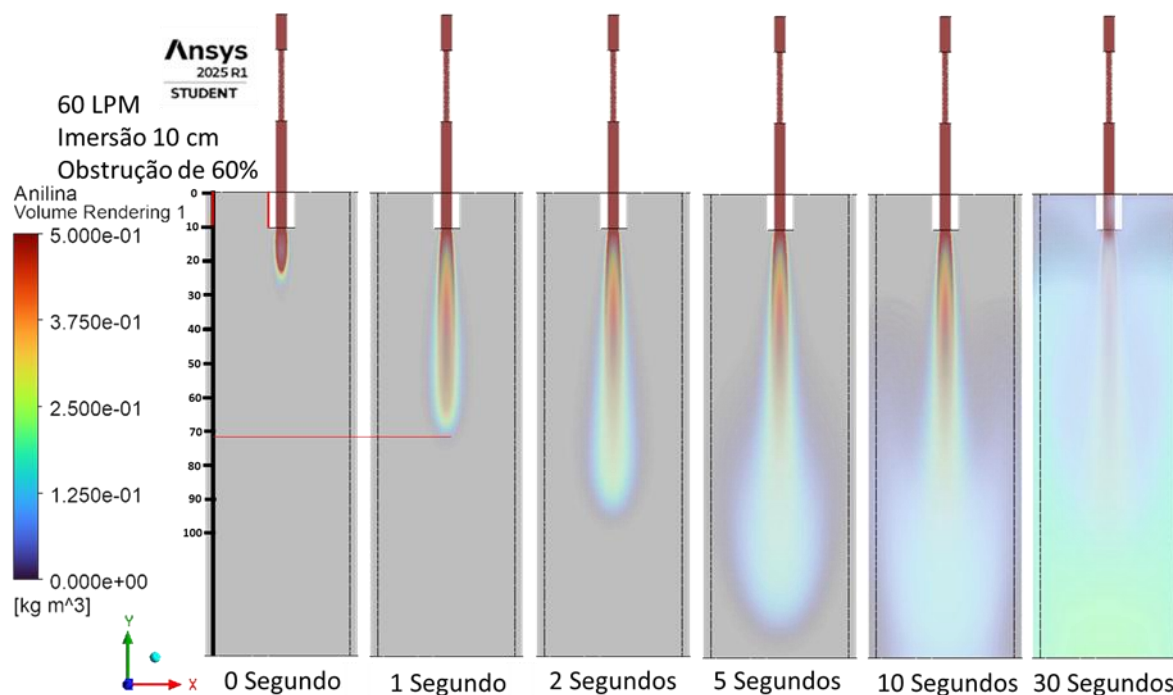
Fonte: Autor.

5.1.3 Profundidade penetração do jato via simulação computacional

As imagens obtidas por meio da simulação computacional, apresentadas na Figura 5.4, referem-se à vazão de 60 l/min com o menisco posicionado a 10 cm da extremidade da válvula do modelo B, que simula o fenômeno de Clogging. Os resultados demonstram similaridade com os testes físicos realizados, sendo possível observar que, aos 10 segundos, grande parte do molde já está preenchida, exceto pela região do menisco, comportamento também verificado no modelo físico.

Após 30 segundos do início da injeção, observa-se que o molde se encontra completamente preenchido, com penetração do jato atingindo 71 cm de profundidade no tempo de 1 Segundo.

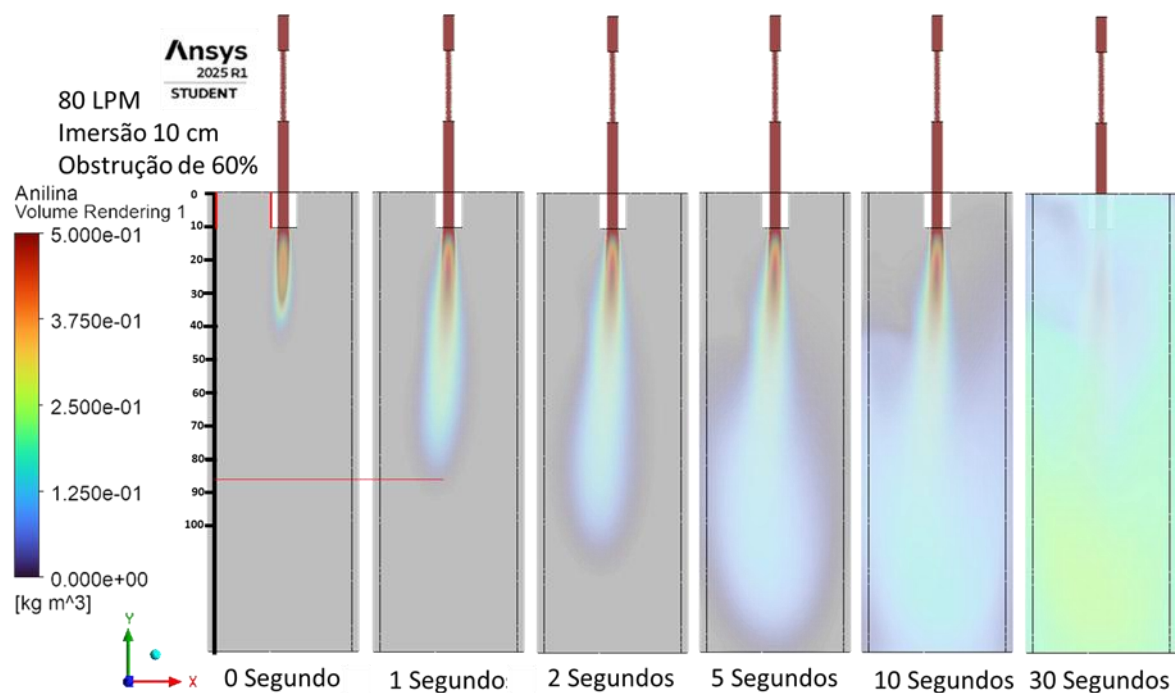
Figura 5.4 – Imagens de dispersão de traçador a 60 l/min referentes à modelagem computacional simulando efeito de clogging.



Fonte: Autor.

Na imagem obtida por meio da simulação computacional, apresentada na Figura 5.5, é possível observar os resultados referentes à vazão de 80 L/min, com a Válvula do modelo B, que apresenta a simulação do fenômeno de *clogging* 60%, posicionado semelhante a vazão anterior. Os resultados apresentam o mesmo comportamento do modelo físico em 80 L/min, sendo possível verificar que, aos 10 segundos, o molde estava bem preenchido, exceto na região do menisco, assim como observado no modelo físico. Além disso, após 30 segundos do início da entrada do traçador no modelo computacional, o molde já se encontrava totalmente preenchido. A penetração do jato foi de 86 cm e o comportamento do jato apresentou uma inclinação direcionando o jato para uma das paredes, evidenciando semelhança no comportamento do fluxo.

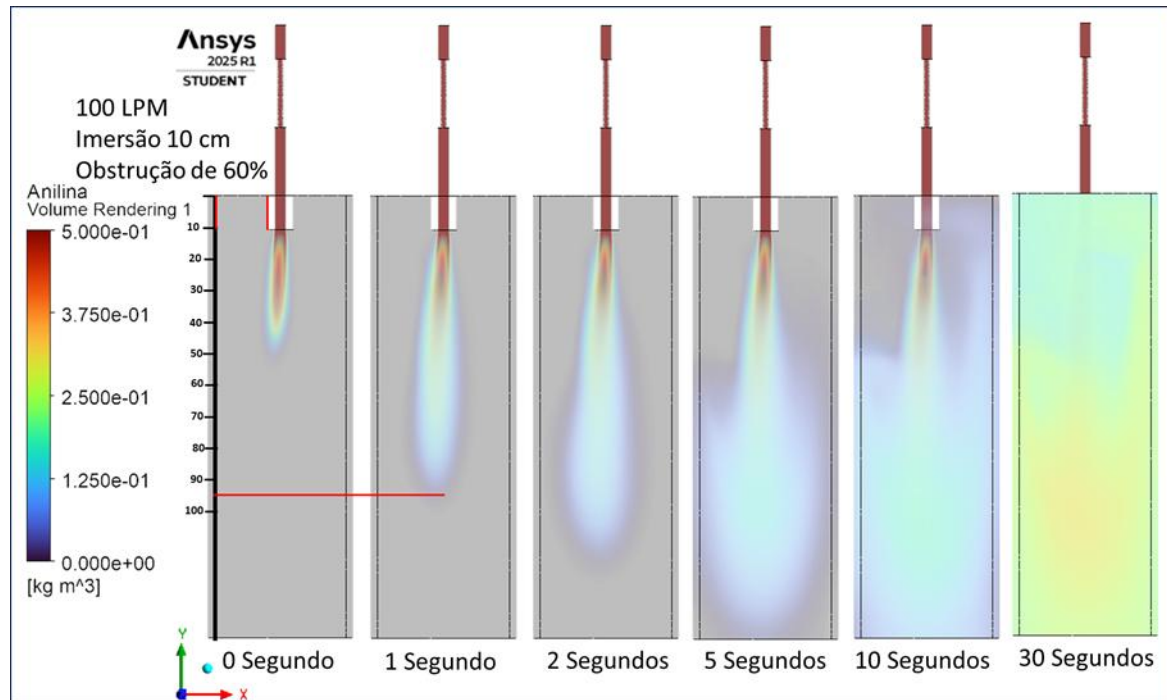
Figura 5.5 – Imagens de dispersão de traçador a 80 l/min referentes à modelagem computacional simulando efeito de clogging.



Fonte: Autor.

Nas imagens apresentadas na Figura 5.6, referentes à vazão de 100 L/min, com a válvula do modelo B, é possível verificar que, aos 10 segundos, o molde estava bem preenchido, exceto na região do menisco. A penetração do jato foi de 95 cm e o jato apresentou um desvio no fluxo direcionado para uma das paredes. Além disso, após 30 segundos do início da entrada do traçador no modelo computacional, o molde já se encontrava totalmente preenchido, evidenciando semelhança no comportamento do fluxo.

Figura 5.6 - Imagens de dispersão de traçador a 100 l/min referentes à modelagem computacional simulando efeito de clogging.



Fonte: Autor.

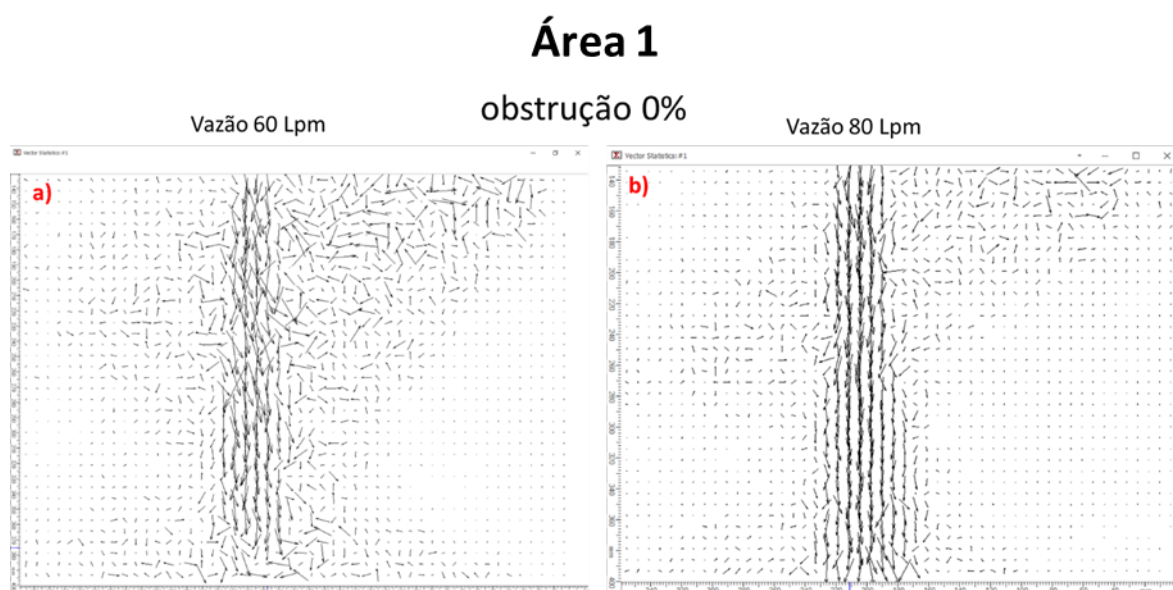
5.2 Análise quantitativa do fluxo utilizando a técnica PIV

Os testes de análise quantitativa do fluxo, utilizando a técnica PIV (*Particle Image Velocimetry*), teve como objetivo determinar o perfil de velocidade das partículas no interior do molde, fornecendo dados essenciais para compreender a dinâmica do fluxo.

5.2.1 Análise quantitativa do fluxo utilizando a válvula sem obstrução

Na Figura 5.7 são apresentadas as imagens obtidas referentes à área 1 do experimento realizado do modelo A, sem a simulação do efeito *clogging*, considerando a vazão de 60 l/min, 80 l/min e imersão da válvula de 10 cm. É possível observar que o fluxo tem o mesmo característica mesmo variando a vazão, o fluxo possui o sentido do lingotamento, seguindo a direção do jato, que, por sua vez, se concentra no centro do molde. porém também é possível observar que não há indício de inclinação do jato, além disso, o fluxo perde intensidade ao se aproximar das paredes do molde.

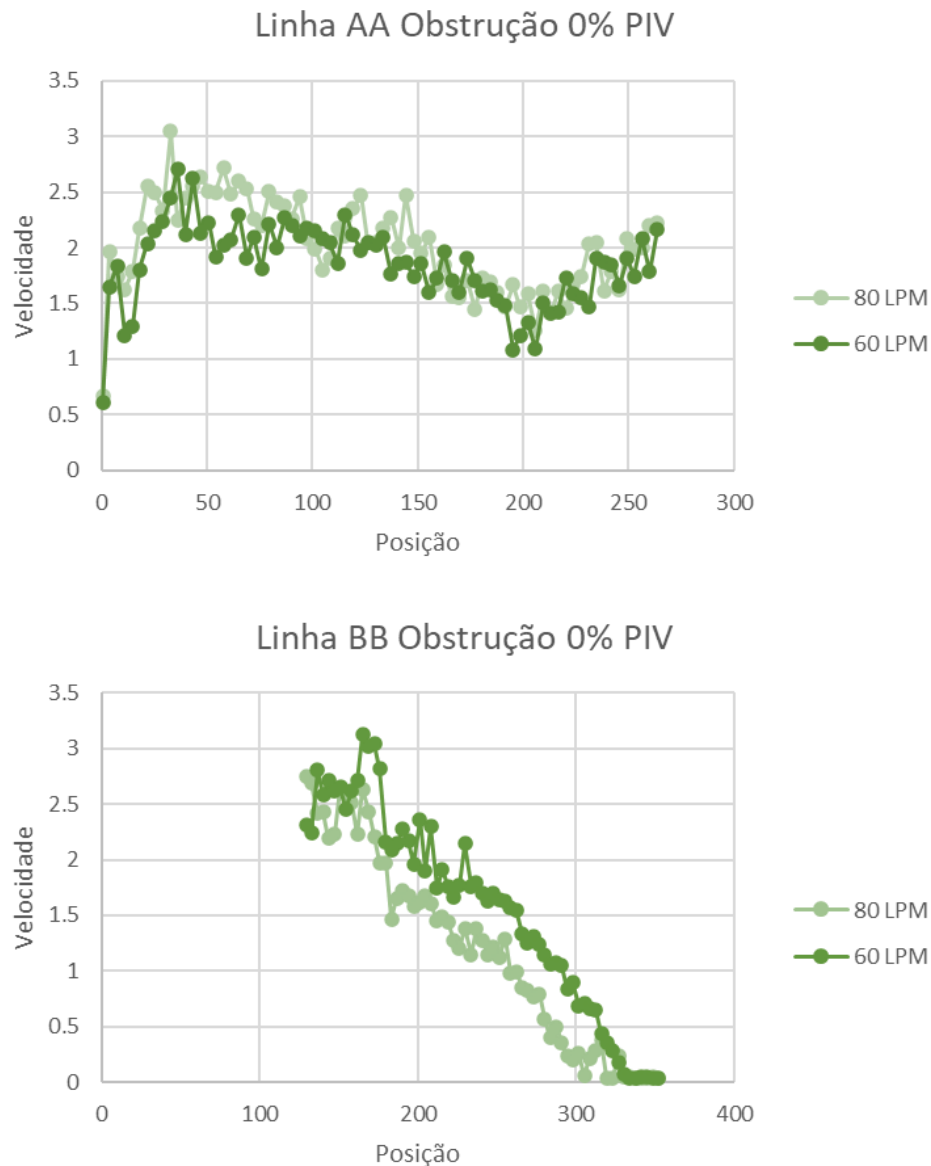
Figura 5.7 – Imagens obtidas da área 1 via PIV para o ensaio sem obstrução.



Fonte: Autor.

Na Figura 5.8 foi gerado o gráfico, de Posição X velocidade, obtidos segundo a técnica PIV referentes a área 1 dos experimentos realizados com a simulação do efeito sem *clogging*. Considerando a vazão de 60 l/min e 80 l/min com uma imersão de 10 cm, é possível notar que o decaimento é mais uniforme e o comportamento do jato é semelhante como mostrado anteriormente.

Figura 5.8 – Imagens obtidas da área 1 via PIV para o experimento sem obstrução.



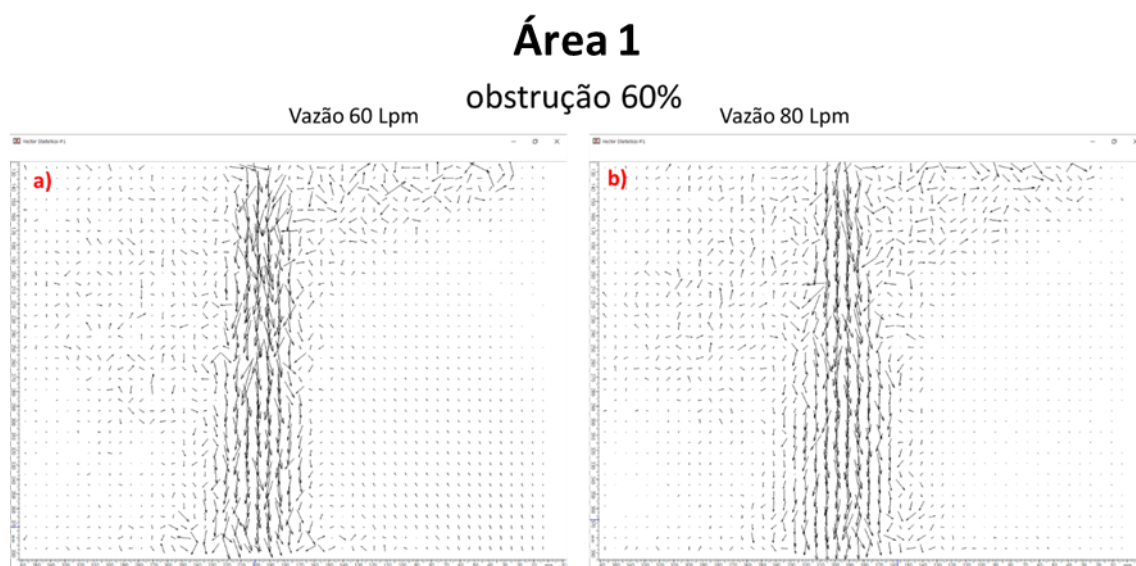
Fonte: Autor.

Em relação aos resultados obtidos, apresentados nas Figura 5.7 e Figura 5.8, considerando o efeito sem *clogging*, considerando ambas as vazões, é possível perceber que nas linhas horizontal BB que o gráfico tem um comportamento de uma reta, mostrando que há uma perda de intensidade quando mais se afasta do centro. O Jato na linha AA é mais uniforme e ele perde intensidade ao longo que mais fundo fica, além da semelhança dos resultados considerando as duas vazões.

5.2.2 Análise quantitativa do fluxo utilizando a SEN com obstrução

Na Figura 5.9 é possível observar as imagens obtidas segundo a técnica PIV referentes à área 1 do ensaio realizado com a simulação do efeito *clogging*. Considerando a vazão de 60 l/min, 80 l/min e imersão da válvula de 10 cm, nota-se um comportamento semelhante ao comportamento apresentado entre as vazões, como, perceber que o fluxo das partículas segue o sentido do lingotamento e a região que possui maior movimentação é majoritariamente no centro do molde, semelhante ao que foi mostrado sem obstrução.

Figura 5.9 - Imagens obtidas na área 1 via PIV para SEN com obstrução, vazão de (a) 60 l/min e (b) 80 l/min.



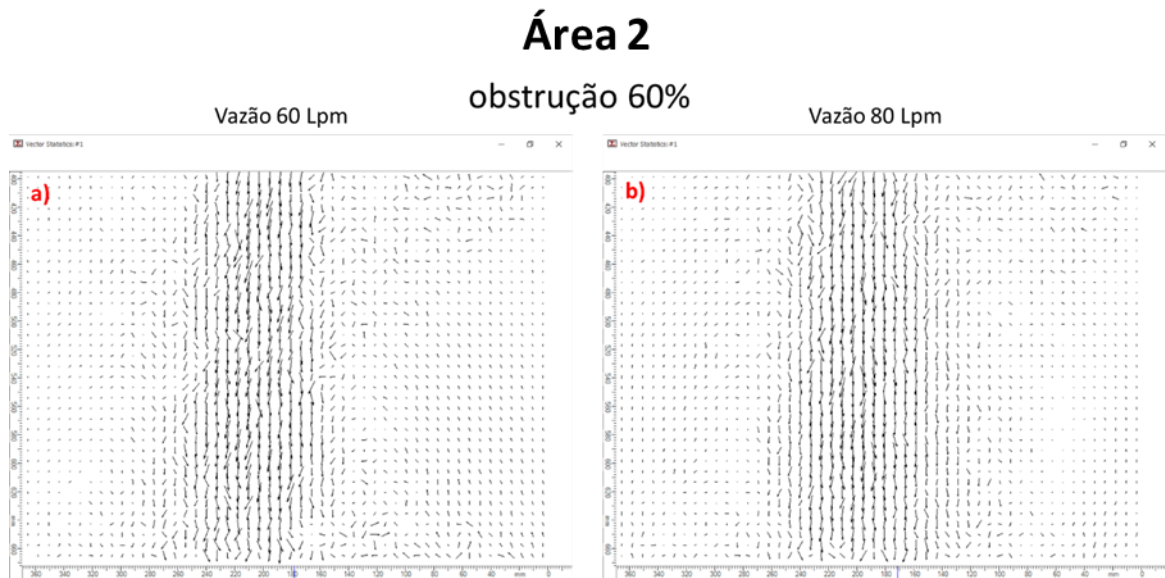
Fonte: Autor.

Ao analisar as imagens obtidas a partir da área 2, é possível ainda observar que as partículas indicam que, próximo às paredes, o fluxo do jato se opõe ao fluxo do lingotamento. É possível observar os resultados para a vazão de 60 l/min e 80 l/min com a imersão da válvula de 10 cm na Figura 5.10.

Na Figura 5.11 é possível observar os gráficos de posição X velocidade obtidos segundo a técnica PIV referentes às duas áreas do ensaio realizado com a simulação do efeito *clogging*. Considerando a vazão de 60 l/min e 80 l/min com uma imersão de 10 cm, é possível perceber nas linhas BB, CC e DD que quanto mais próximo do centro do molde há maior velocidade e chegando perto das paredes o movimento tende a diminuir, porém quando mais profunda a região e combinado com a proximidade da parede esse movimento volta aparecer como foi observado nas imagens de vetores na área 2, gerado um movimento de subida. Na linha AA observa-se a

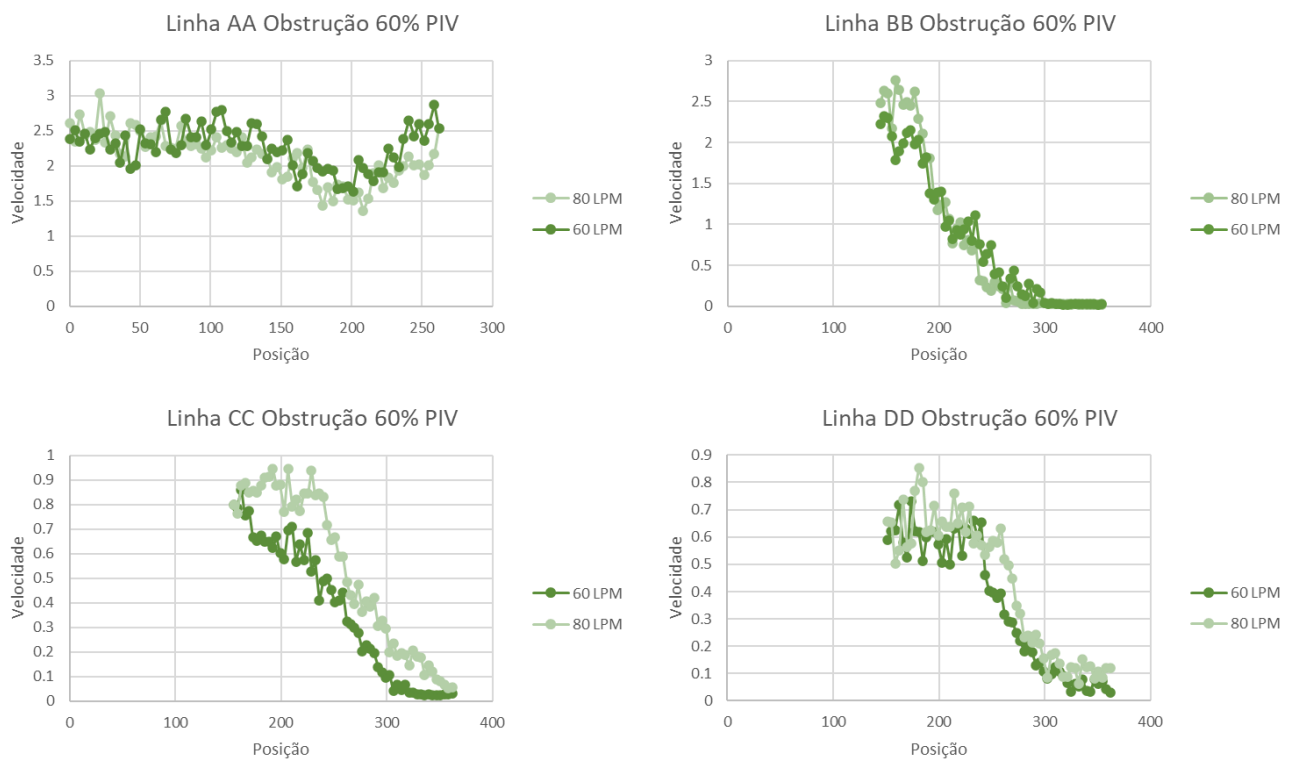
intensidade do jato e percebemos que ele tem oscilações em seu trajeto independente da vazão trabalhada.

Figura 5.10 - Imagens obtidas da área 2 via PIV para o ensaio com obstrução e vazão de (a) 60 l/min e (b) 80 l/min.



Fonte: Autor.

Figura 5.11 - Gráficos Posição X Velocidade, gerados com a técnica PIV

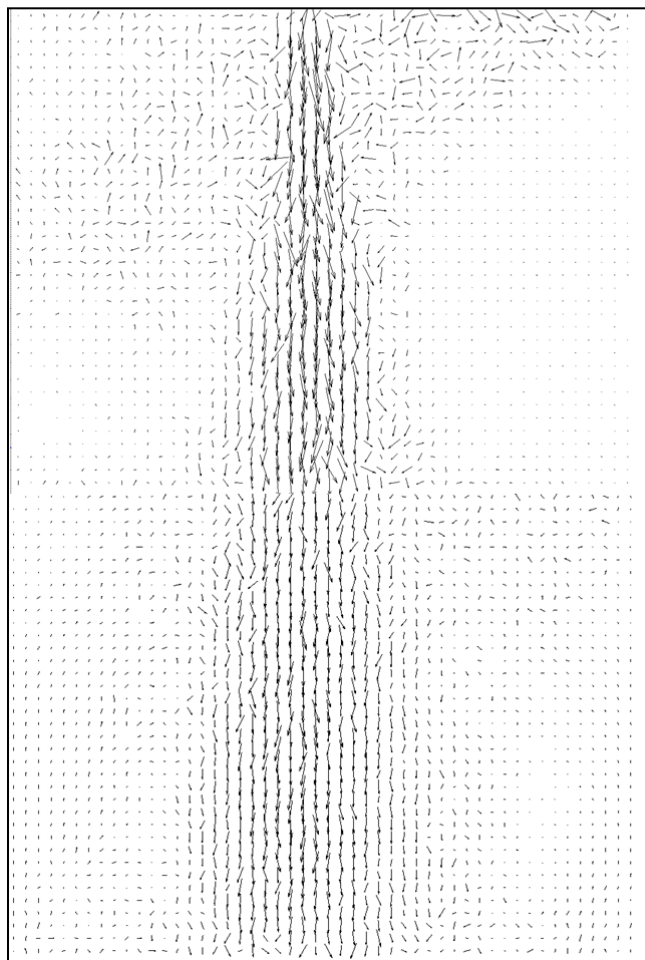


Fonte: Autor.

Na Figura 5.12 é possível notar o perfil do jato ao longo das duas áreas, considerando o efeito do clogging com a vazão de 80 l/min., é possível perceber que o fluxo do jato vai se abrindo quanto mais profundo, formando um efeito cone.

Figura 5.12 – Perfil do jato unindo as duas áreas (1 e 2), vazão 80 l/min e SEN com *clogging*.

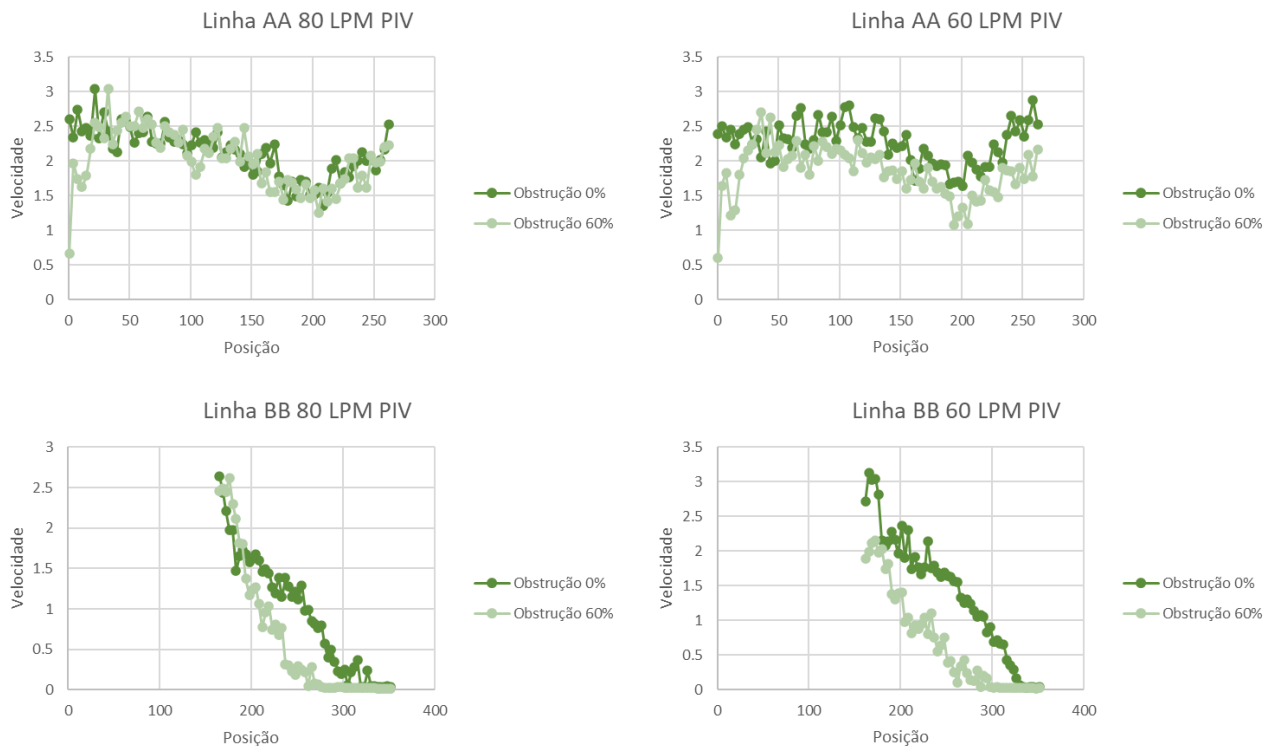
**Perfil do Jato Obtido pela técnica PIV
vazão de 80 LPM com Clogging**



Fonte: Autor

Na Figura 5.13 é possível observar os gráficos correlacionado as diferentes obstruções e vazão, quando possui obstrução o jato tende a perde intensidade, visto esse comportamento nas linhas horizontais. Na linha AA o comportamento com ou sem obstrução é bem semelhante.

Figura 5.13 - Gráficos Posição X Velocidade, obtidos com a técnica PIV, em diferentes condições.



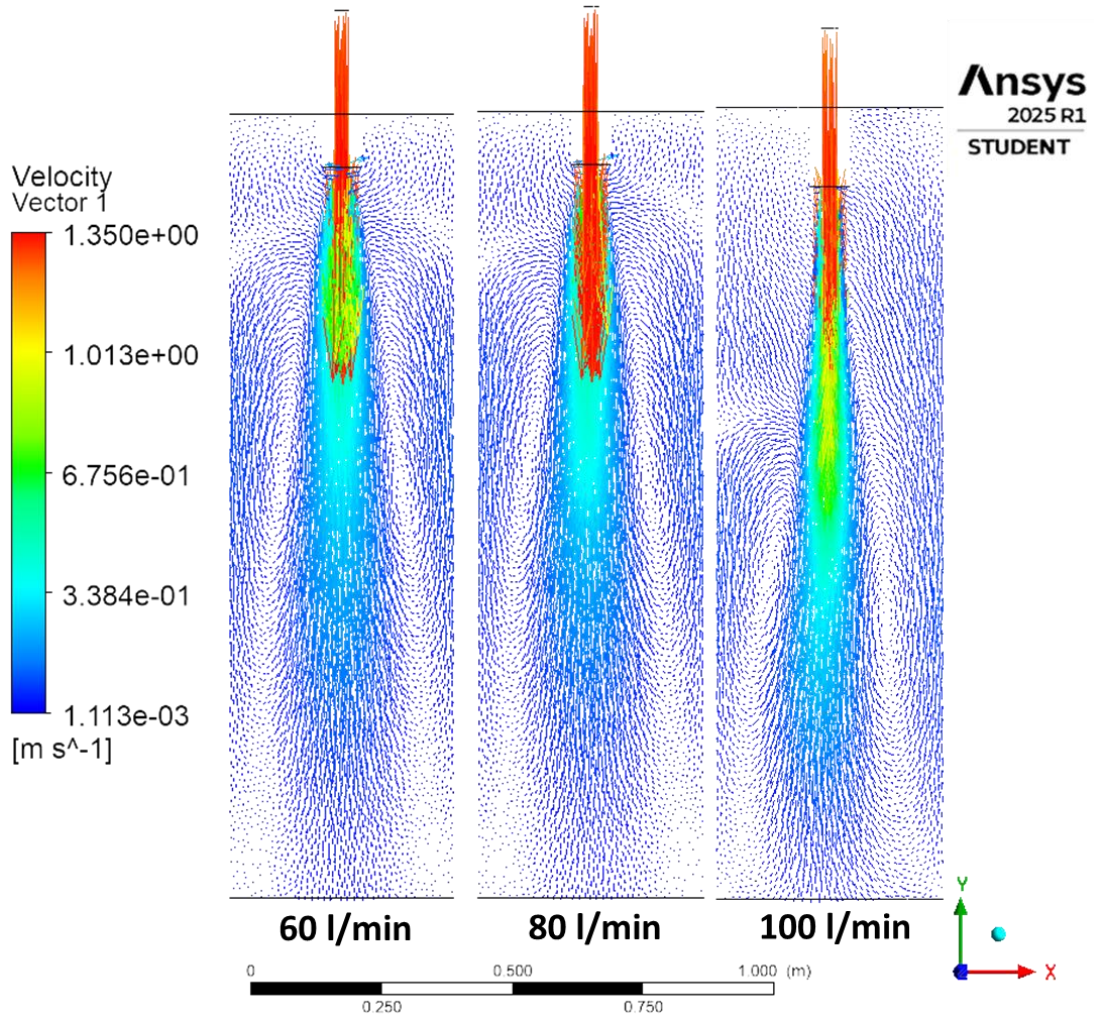
Fonte: Autor

5.3 Análise do perfil de velocidades via simulação computacional

Na simulação sem ocorrência de *clogging*, observa-se na Figura 5.14 que os fluxos com vazões de 60 e 80 L/min apresentam comportamentos bastante semelhantes. Nota-se que na região do menisco há pouca movimentação do fluido, enquanto nas proximidades das paredes ocorre um fluxo contrário ao sentido do lingotamento. Já na região central do molde, identificam-se as maiores intensidades de fluxo, todas direcionadas para baixo.

Para a vazão de 100 L/min, o padrão de escoamento mantém-se semelhante ao observado nas vazões menores. No entanto, há um aumento na intensidade do fluxo, especialmente na região do menisco e no centro do molde. As áreas próximas às paredes continuam apresentando comportamento similar ao das demais vazões.

Figura 5.14 - Imagens obtidas da simulação computacional com SEN sem obstrução com vazões de 60, 80 e 100 l/min.



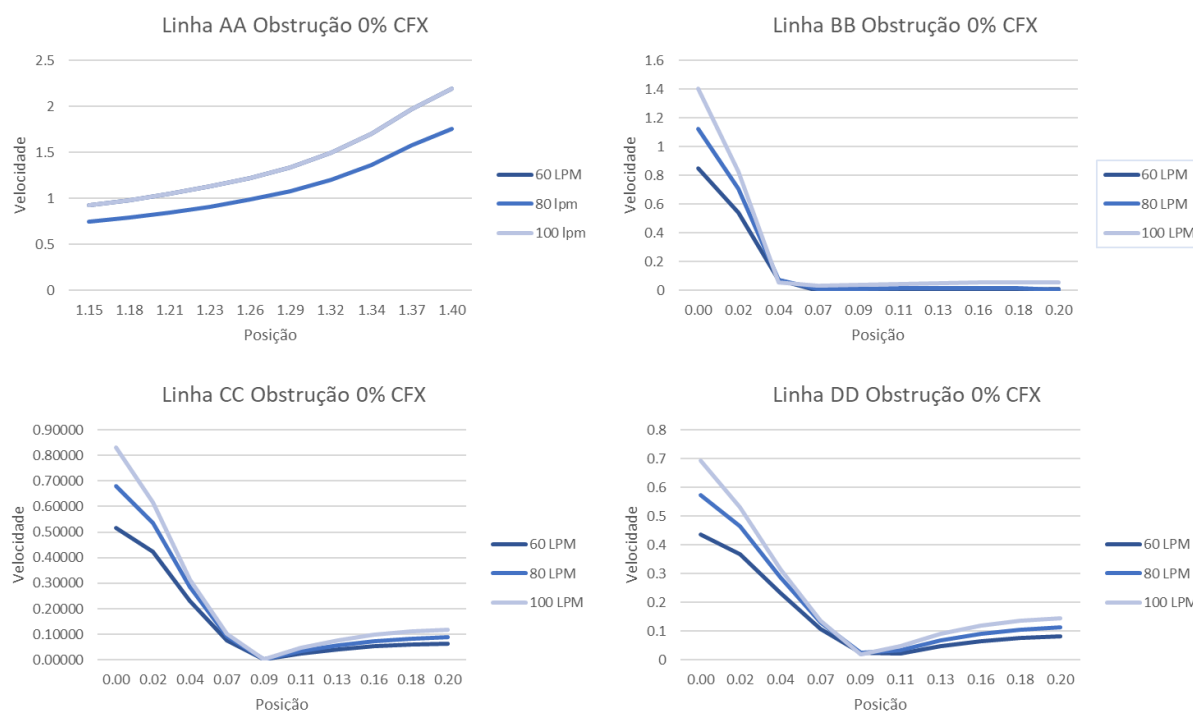
Fonte: Autor.

Ao gerar o gráfico da simulação, apresentado na Figura 5.15, observa-se que o comportamento do fluxo permanece semelhante independentemente da vazão aplicada. Na linha BB, que marca o início da região do menisco, nota-se que, à medida que se aproxima das paredes do molde, a velocidade do fluxo tende a se anular, indicando zonas de baixa movimentação.

Nas linhas CC e DD, o jato apresenta um padrão semelhante, o jato vai perdendo intensidade até se anular, voltando a se intensificar nas proximidades das paredes, com fluxo para cima, sugerindo uma recirculação do fluxo.

Já a linha AA demonstra um comportamento consistente entre todas as vazões analisadas, com intensidades maiores à medida que a vazão aumenta. Observa que a velocidade do jato medido na vazão de 60 e 80 l/min é praticamente a mesma.

Figura 5.15 – Gráficos Posição x Velocidade obtidos da simulação computacional para SEN sem obstrução com vazões de 60, 80 e 100 l/min.

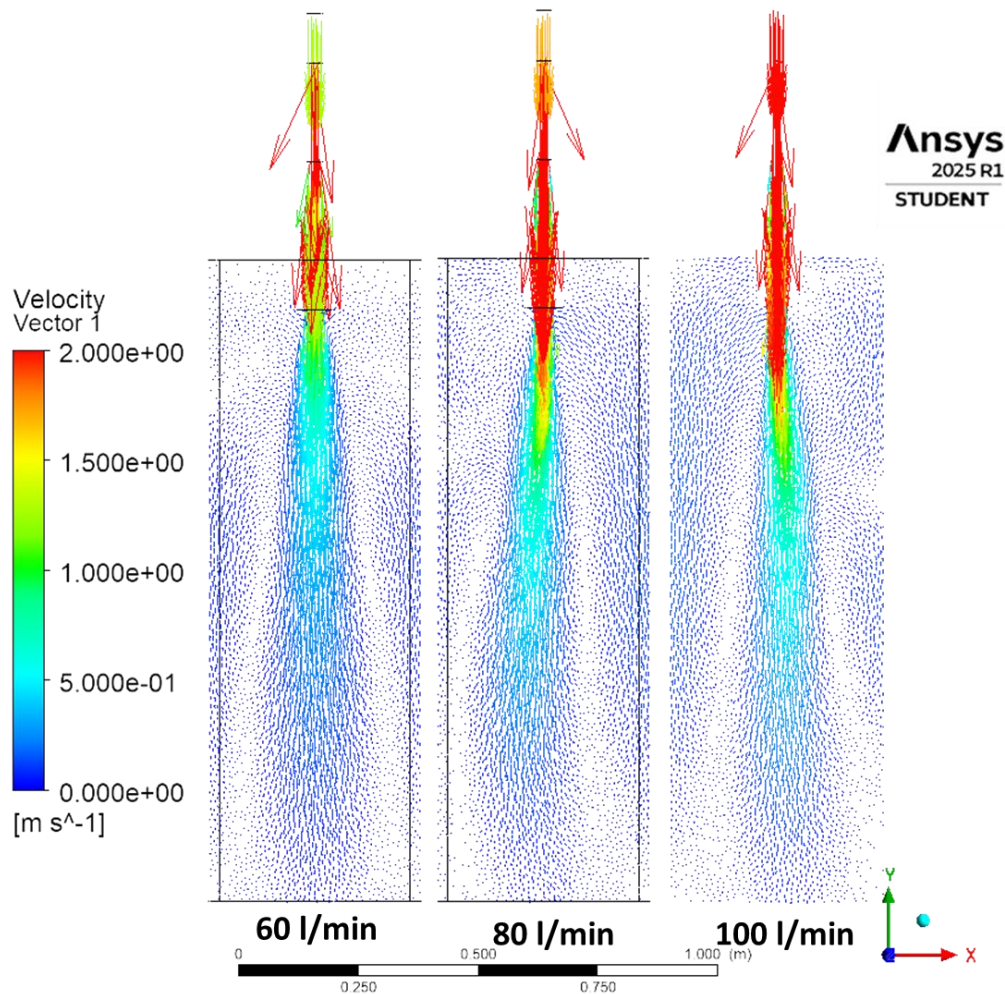


Fonte: Autor.

A Figura 5.16 apresenta a simulação com obstrução de 60%, evidenciando um padrão de escoamento que, à primeira vista, se assemelha ao observado na condição sem *clogging*. No entanto, uma análise mais detalhada e nas vazões maiores que 60 l/min revela alterações significativas na dinâmica do fluxo. A principal diferença está na direção do jato, que sofre um desvio considerável em relação ao eixo central do molde, sendo direcionado preferencialmente para uma das paredes.

Esse comportamento assimétrico indica que a obstrução afeta diretamente a distribuição de velocidades e a trajetória do jato, comprometendo a uniformidade do fluxo. Tal desvio pode aumentar o risco de formação de defeitos no lingotamento, como uma má formação de casca, especialmente nas regiões onde o fluxo se torna turbulento.

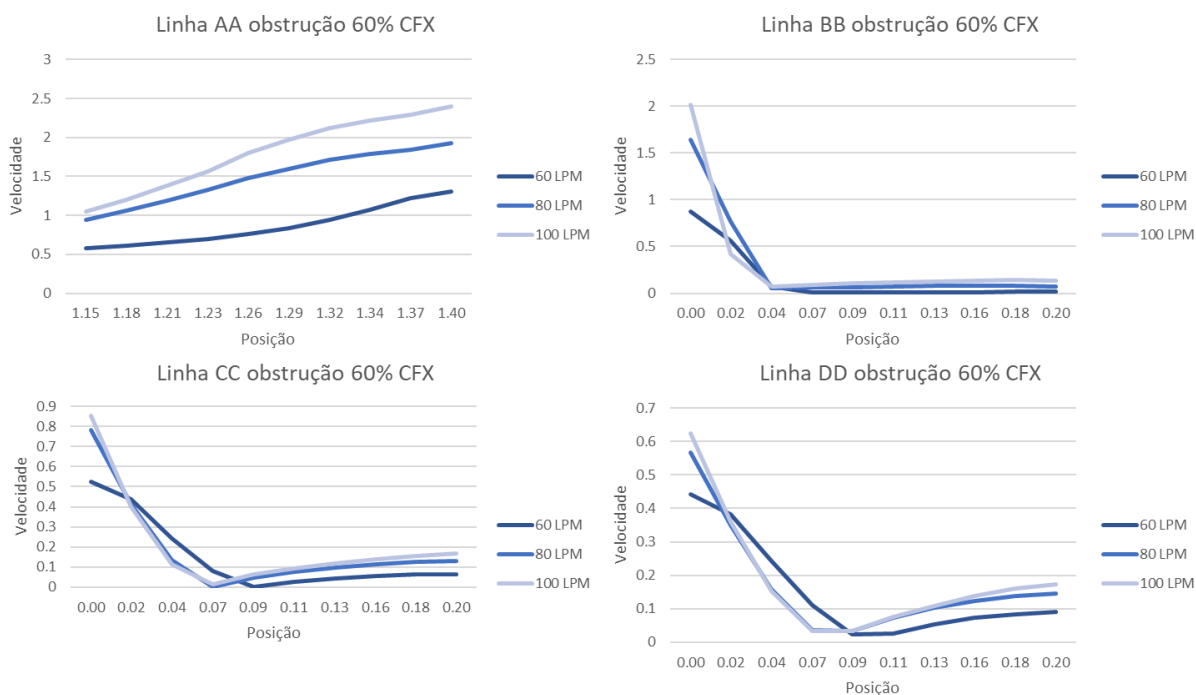
Figura 5.16 - Imagens obtidas da simulação computacional utilizando SEN com obstrução de 60% com vazões de 60, 80 e 100 l/min.



Fonte: Autor.

A análise dos gráficos da obstrução de 60% gerados pela simulação computacional, apresentados na Figura 5.17, indica que o comportamento do fluxo permanece bastante semelhante ao observado na condição sem *clogging*. A distribuição do escoamento mantém sua estrutura geral, agora na linha AA há divergência entres as vazões de 60 e 80 l/min, e nas linhas horizontais o comportamento é semelhante ao que foi visto sem o *clogging*, com o jato central ainda predominante e as regiões de recirculação próximas às paredes do molde.

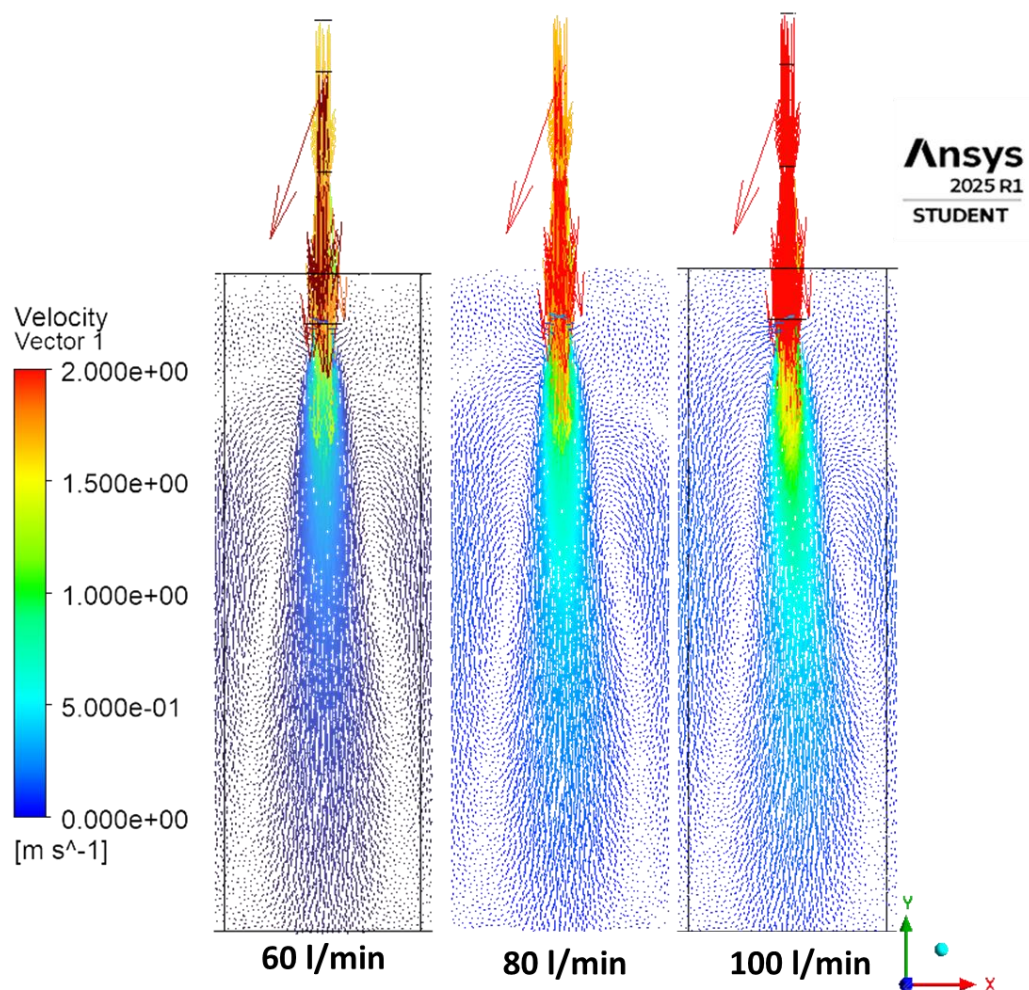
Figura 5.176 – Gráficos Posição x Velocidade obtidos da simulação computacional para o ensaio com obstrução de 60% com vazões de 60, 80 e 100 l/min.



Fonte: Autor.

A simulação com obstrução de 40%, representada na Figura 5.18, apresenta características de semelhantes às observadas nas condições sem *clogging*, especialmente nas vazões menores, 60 l/min e 80 l/min. No entanto, ao se analisar a vazão de 100 L/min, percebe-se um leve desvio na direção do jato, que passa a ser direcionado preferencialmente para uma das paredes do molde. Esse desvio, embora sutil, indica que a obstrução começa a influenciar a simetria do fluxo em vazões mais elevadas, podendo comprometer durante o processo de lingotamento. A alteração na trajetória do jato.

Figura 5.18 - Imagens obtidas da simulação computacional para SEN com obstrução de 40% com vazões de 60, 80 e 100 l/min.

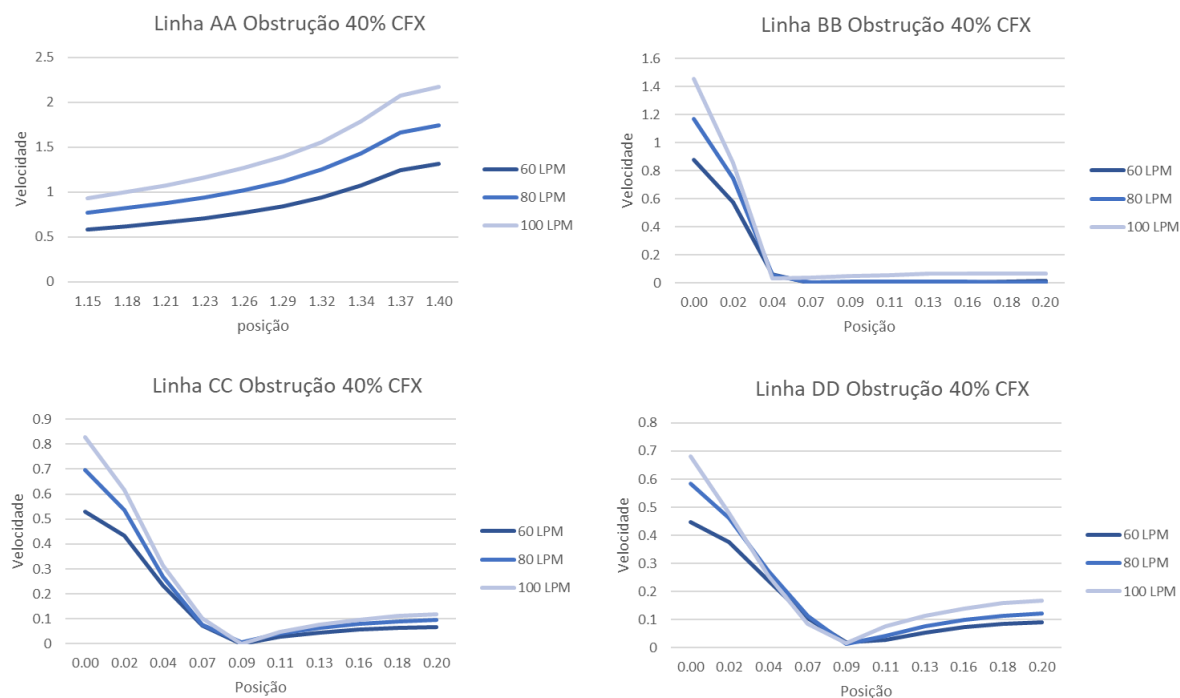


Fonte: Autor.

A análise dos gráficos gerados pela simulação computacional, apresentados na Figura 5.19, demonstra que o comportamento do fluxo permanece consistente em relação ao caso anterior que possui o *clogging*, mesmo sob diferentes condições de obstrução. Essa repetição de padrões indica uma estabilidade no escoamento, porém na imagem gerada na simulação notamos um desvio no sentido do jato.

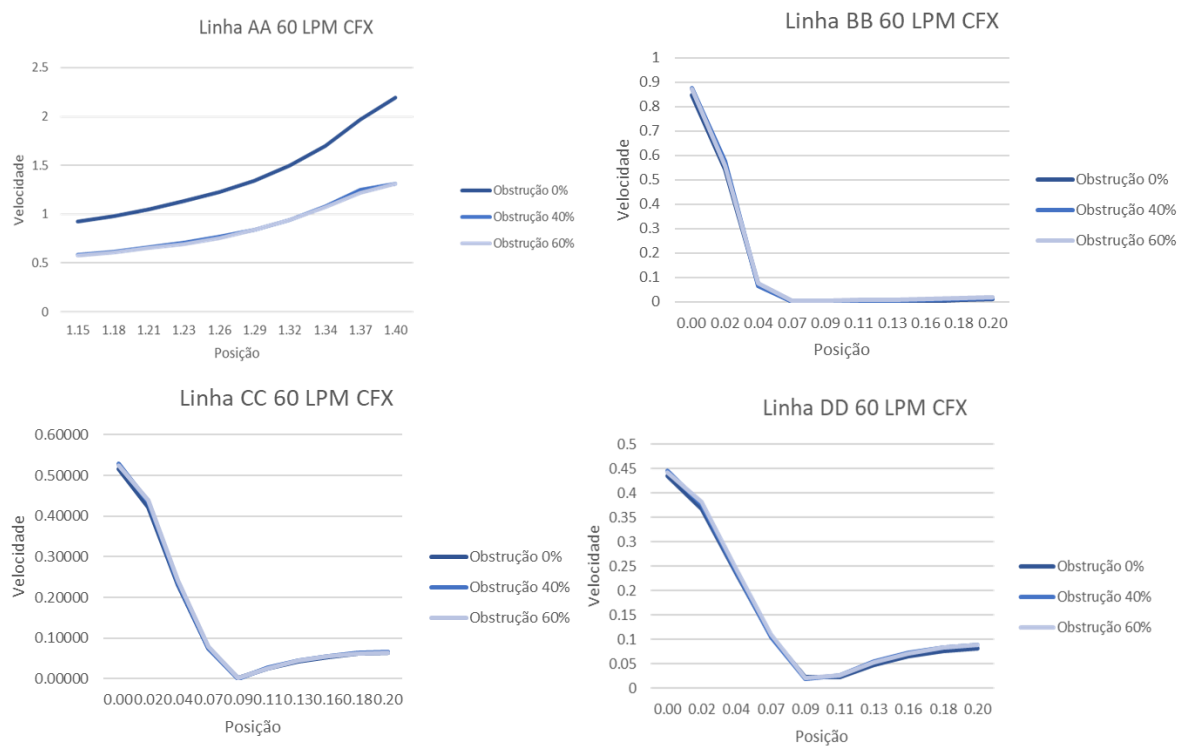
Comprando as obstruções mantendo as vazões percebemos que na vazão de 60 l/min, pode ser observada na Figura 5.20. Na linha AA a condição que menos perde energia é aqui não possui obstruções, a que possui obstrução tem o mesmo comportamento. Nas linhas horizontais o fluxo do fluido é semelhante mesmo com obstruções diferentes.

Figura 5.19 – Gráfico Posição x Velocidade obtidas da simulação computacional para válvula com obstrução de 40% com vazões de 60, 80 e 100 l/min.



Fonte: Autor.

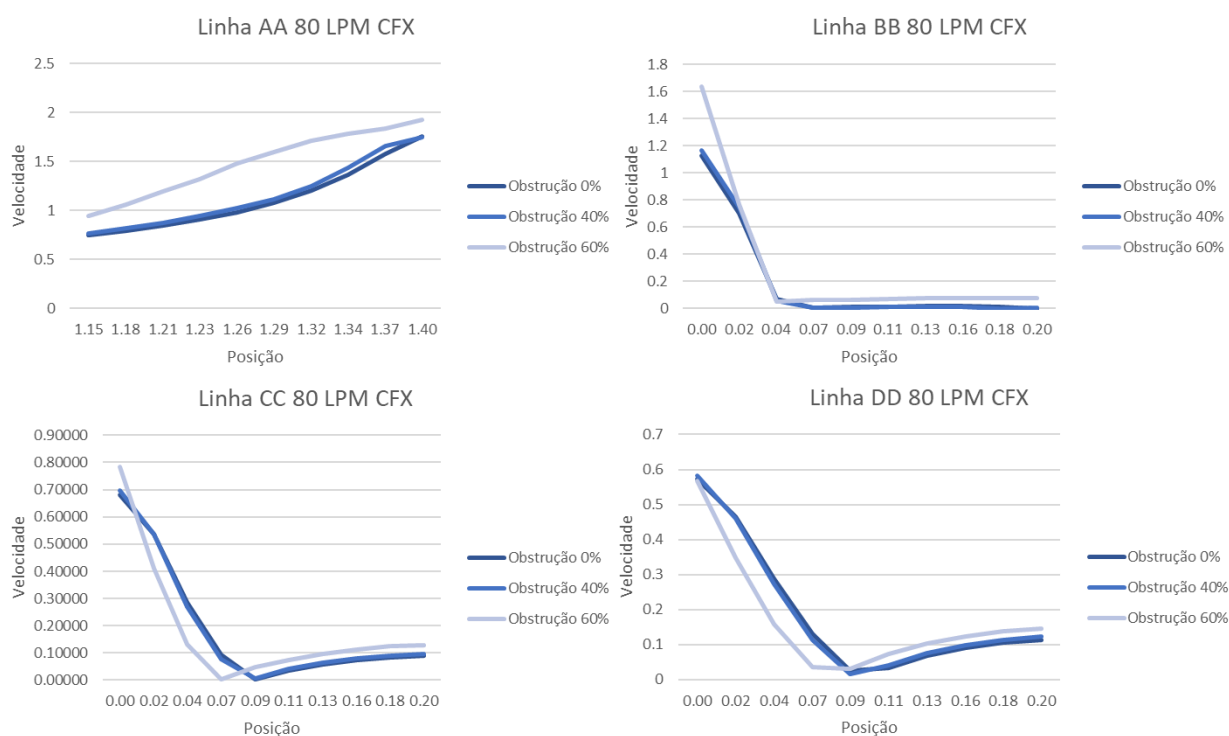
Figura 5.20 – Gráfico Posição x Velocidade obtidas da simulação computacional para válvula com obstruções de 40%, 60% e 0%, vazão de 60 l/min.



Fonte: Autor

Observando agora na Figura 5.21, os gráficos analisam diferentes obstruções para a mesma vazão de 80 l/min. A linha AA tem outro comportamento com a vazão maior a obstrução de 60% agora é a mais intensa e a obstrução de 40% se assemelha sem a obstrução. As linhas horizontais possuem o mesmo comportamento da vazão de 60 l/min, mostrando que dentro do molde tem um fluxo bem definido.

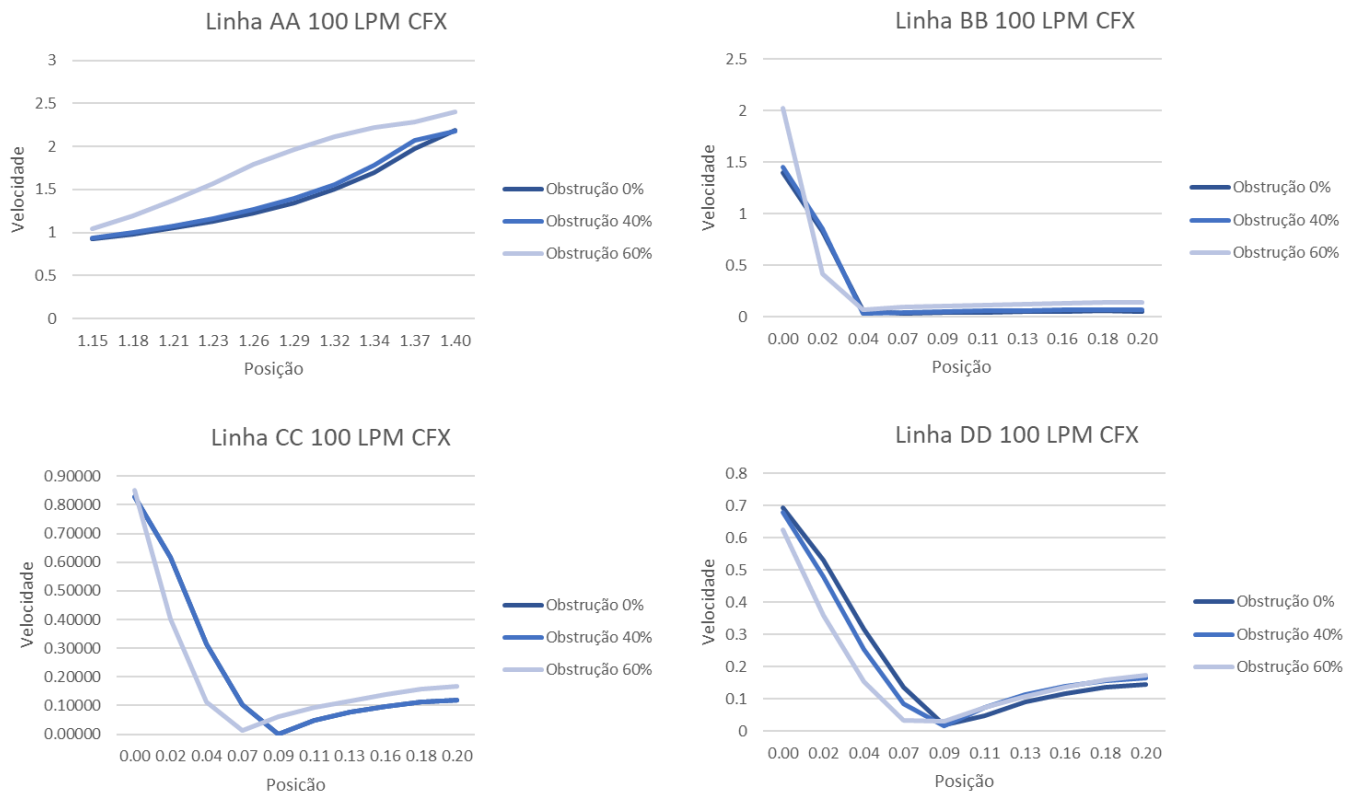
Figura 5.217 – Gráfico Posição x Velocidade obtidas da simulação computacional para válvula com obstruções de 40%, 60% e 0%, vazão de 80 l/min.



Fonte: Autor

Agora para a vazão de 100 l/min, que pode ser observada na Figura 5.22, nota-se o mesmo comportamento em todas as linhas com a vazão de 80 l/min. A partir de uma vazão o comportamento do fluxo na linha AA tem comportamento diferentes.

Figura 5.22 – Gráfico Posição x Velocidade obtidas da simulação computacional para válvula com obstruções de 40%, 60% e 0%, vazão de 100 l/min.



Fonte: Autor

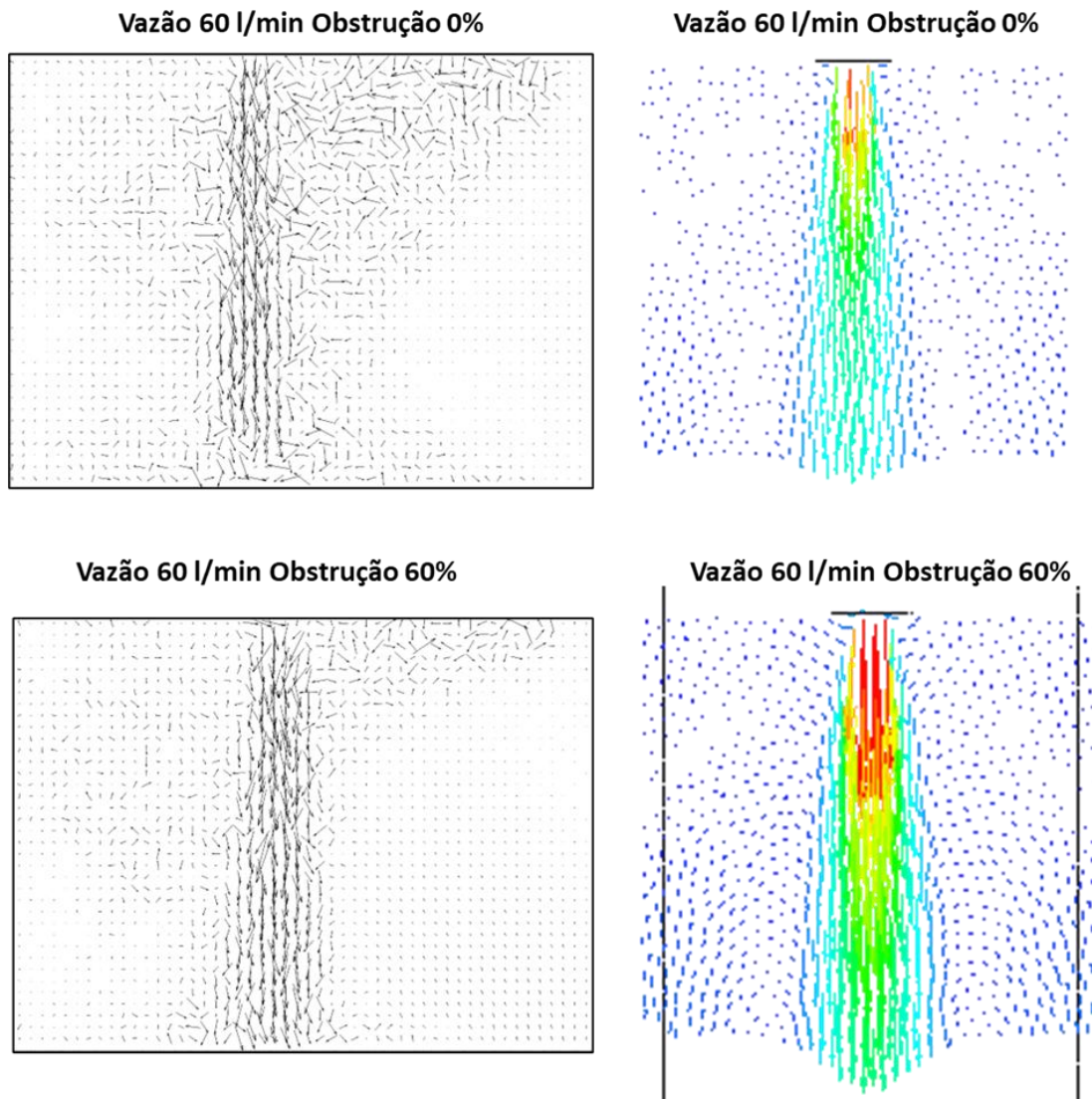
5.4 Comparação da Simulação Computacional X Modelo Físico

Com a ampliação da imagem na área 1 com a vazão de 60 l/min, onde foi realizado a captura de imagens pela técnica PIV, observa-se na Figura 5.23 que a simulação com obstrução de 60% tem um comportamento do fluxo muito parecido com a vazão sem obstrução. O fluxo mantém sua maior intensidade na região central, diminuindo gradativamente à medida que se aproxima das paredes do molde.

Esse comportamento é consistente tanto na simulação computacional quanto no modelo experimental PIV.

Já para a vazão de 80 l/min, observa-se na Figura 5.24 que os experimentos com obstrução de 60% tem um comportamento do jato diferente do modelo sem clogging. O fluxo apresenta um leve desvio junto com uma perda de intensidade na zona central, há semelhanças quando que se aproxima da parede a velocidade diminui. Esses comportamentos são semelhantes tanto no PIV e na CFX.

Figura 5.23 - Imagens comparando os resultados de simulação computacional e de PIV na vazão de 60 l/min.



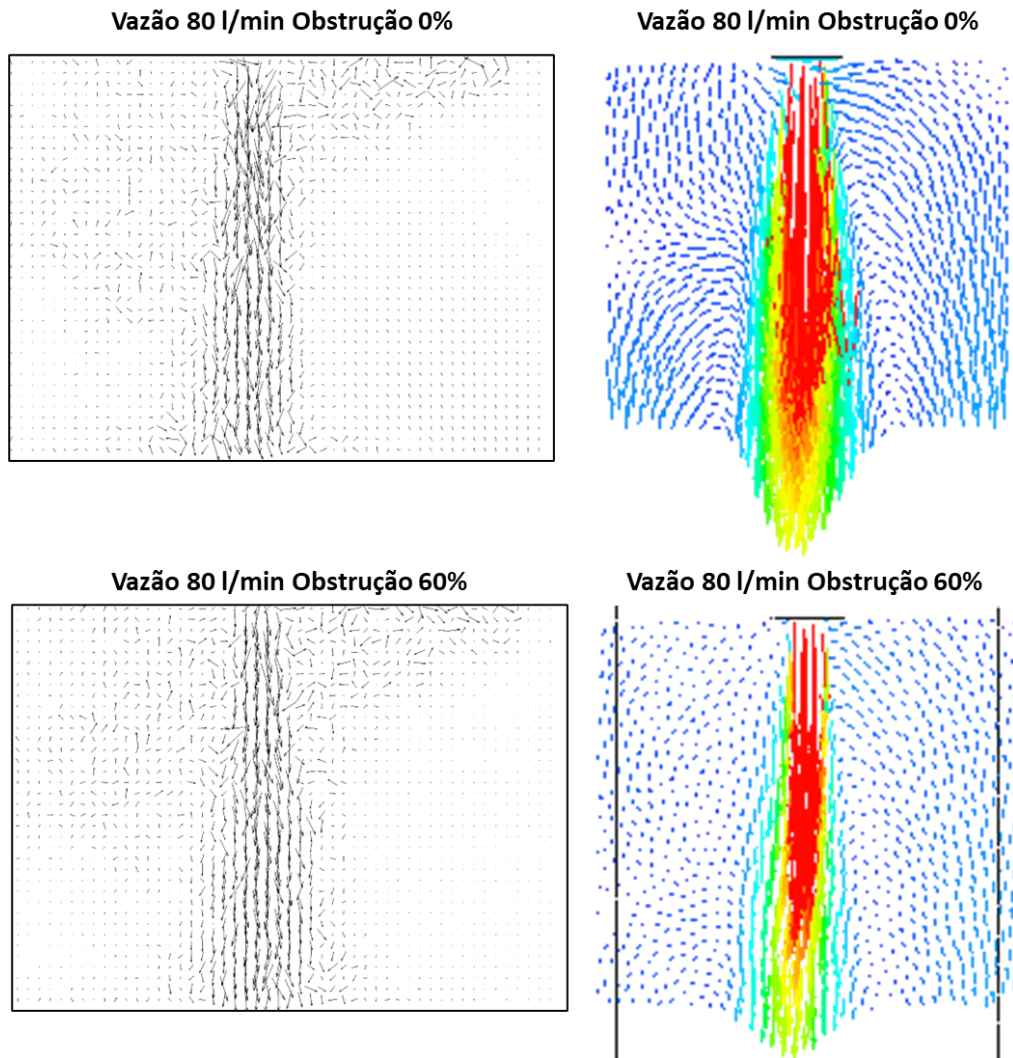
Fonte: Autor.

Na Figura 5.25 observa o perfil do jato considerando as duas áreas e comparando o modelo físico junto com o computacional. A condição foi com a obstrução de 60% junto de uma vazão de 80 l/min, nela é possível perceber a semelhança do experimento PIV com o computacional e como o sentido do jato possui um desvio do seu caminho tradicional.

A análise comparativa entre os gráficos obtidos por meio do experimento PIV e da simulação computacional, apresentados nas Figuras 5.26 e 5.27, demonstra uma forte correlação no comportamento do fluxo ao longo das linhas horizontais BB, CC e DD. Essas linhas

representam cortes transversais em diferentes alturas do molde e revelam padrões de escoamento bastante semelhantes entre o modelo físico e o numérico.

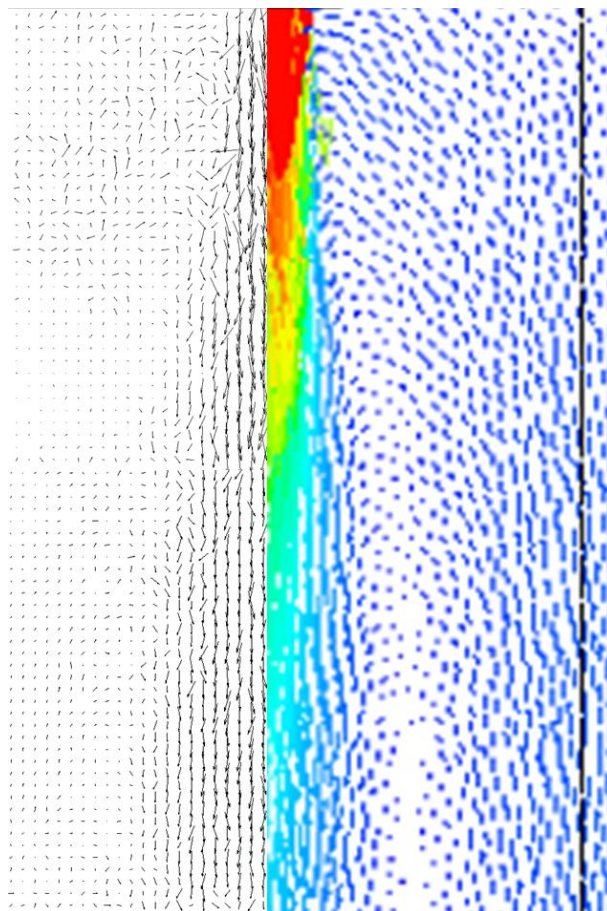
Figura 5.24 – Comparação de perfis de velocidade via PIV e CFD da área 1, na vazão de 80 l/min



Fonte: Autor

Em ambas as abordagens, observa-se que o jato mantém sua trajetória central com maior intensidade, enquanto o fluxo perde força gradualmente à medida que se aproxima das paredes. Além disso, nas regiões mais fundas e próximas às bordas, é possível identificar zonas de recirculação, com fluxo oposto ao sentido do lingotamento.

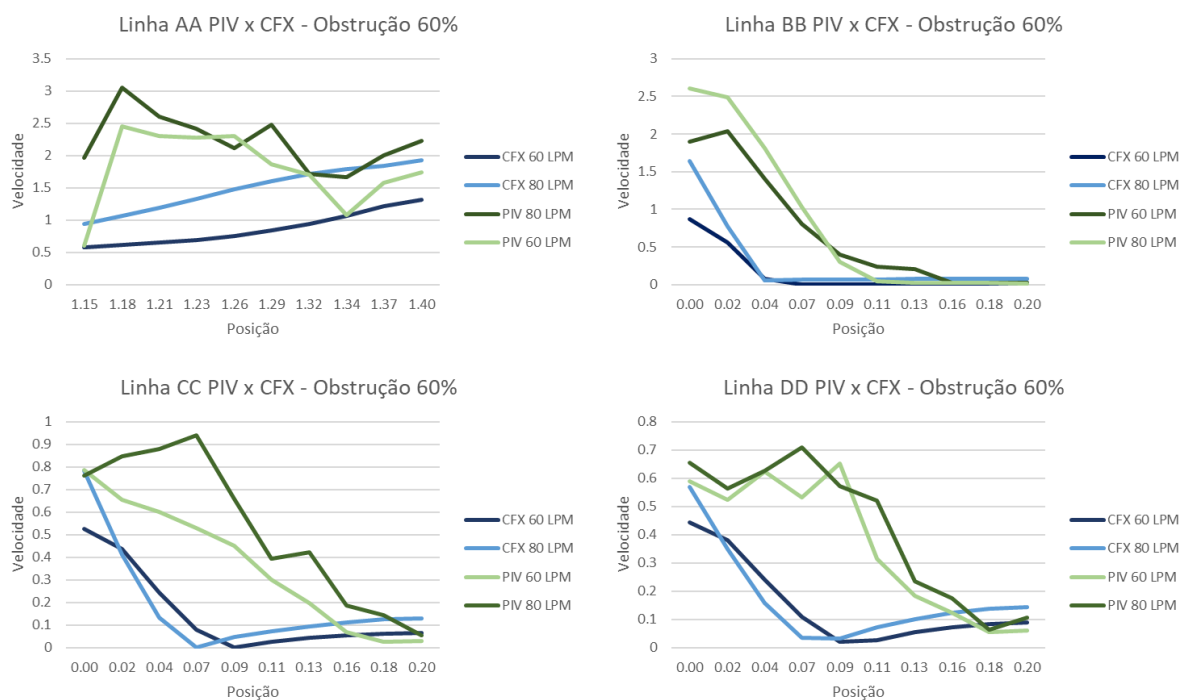
Figura 5.25 - Imagens comparando perfis de velocidade via PIV e CFD, vazão de 80 l/min e clogging de 60%.



Fonte: Autor

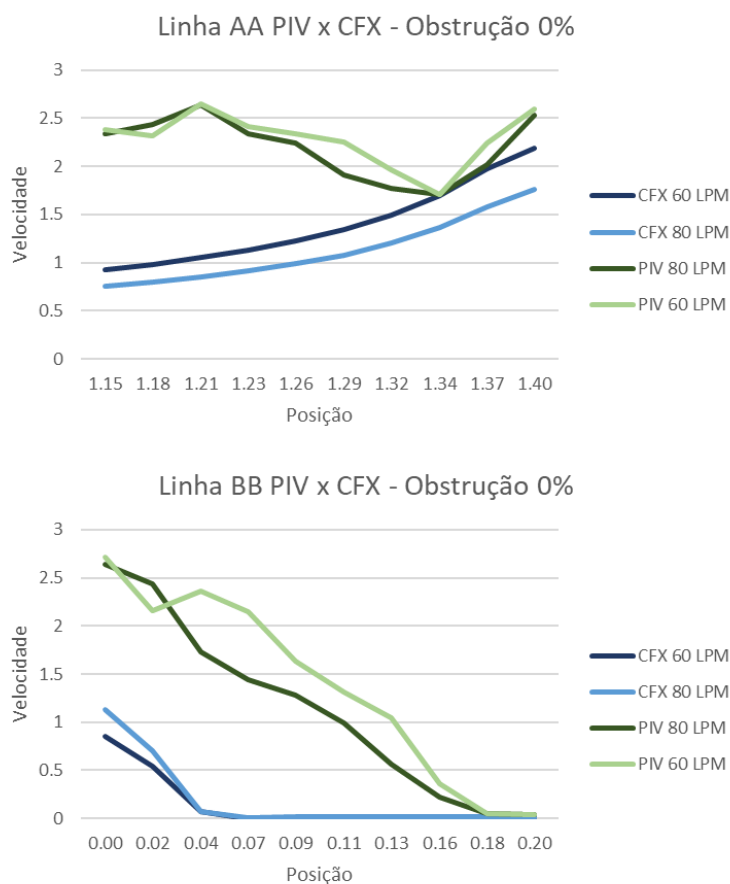
A análise dos resultados obtidos no modelo físico e computacional, nota-se os comportamentos das retas parecido em ambas as linhas e em diferentes momentos envolvendo: Cloggings e vazões. Os resultados demonstram que o *clogging* (obstrução) de 60% influencia significativamente o comportamento do jato em a vazão acima de 80 litros por minuto, na vazão mais baixa não houve um comportamento muito diferente, na obstrução de 40% o jato só apresentou uma mudança de direção quando simulado na vazão de 100 litros por minuto.

Figura 5.26 - Gráficos de velocidade obtidas via PIV e CFD, SEN com obstrução de 60%.



Fonte: Autor.

Figura 5.27 - Gráficos de velocidade obtidas via PIV e CFD, SEN sem obstrução.



Fonte: Autor.

6 CONCLUSÕES

A Tabela 6.1 resume os resultados dos testes de injeção de corante. Nota-se no modelo físico um comportamento estável do menisco em todas as condições, e elevada penetração do jato, e maior vazão, maior a profundidade alcançada pelo jato. Os resultados revelam ainda boa concordância entre a profundidade de penetração obtida nas simulações e no modelo físico, na situação utilizando a SEN com obstrução.

Tabela 6.1 – Resultados de Injeção de Corante

Resultados de Injeção de corante						
Ensaio	Modelo da SEN	Imersão	Vazão l/min	Velocidade de lingotamento m/min	Penetração (cm)	Jato
Físico	A	10	60	0,45	71	Reto
Físico	A	10	80	0,57	79	Reto
Físico	B	10	60	0,45	62	Reto
Físico	B	10	80	0,57	77	Inclinado
Físico	B	15	60	0,45	68	Reto
Físico	B	15	80	0,57	81	Inclinado
Computacional	B	10	60	0,45	71	Reto
Computacional	B	10	80	0,57	86	Inclinado
Computacional	B	10	100	0,75	95	Inclinado

Fonte: Autor

Análise quantitativa do fluxo utilizando a técnica PIV e simulação computacional:

- SEN Modelo A
 - Comportamento macro do jato não sofre variações em ambas as vazões, apenas uma maior intensidade dos vetores com o aumento de vazão;
 - Intensidade do jato maior em seu centro, que diminui ao longo que se aproxima da parede, com sentido de subida próximo a parede;
 - Região próxima ao menisco possui velocidades muito baixas;
- SEN Modelo B - Obstrução 60%
 - Comportamento do jato apresentou variações, mudança de sentido do jato, com vazão de 80 l/min;
 - Intensidade do jato maior no centro do molde, e baixas velocidades à medida que se aproxima da parede;
 - Quanto mais profundo e próximo da parede apresenta um fluxo contrário ao sentido principal do lingotamento.
- SEN Modelo C - Obstrução 40% - apenas CFD

- Comportamento do jato apresenta variações, mudança de sentido do jato, com vazão acima de 100 l/min;
- Menisco estável em ambas as vazões;
- Intensidade do jato maior em seu centro e diminui ao longo que se aproxima da parede;
- Quanto mais profundo e próximo da parede apresenta um fluxo contrário ao do lingotamento.

Os resultados demonstram que a presença de obstrução na válvula, simulando o fenômeno de *clogging*, exerce influência sobre o comportamento do jato interior do molde de blocos, dependendo da vazão trabalhada: na vazão de 60 l/min não foi observado grandes mudanças em diferentes tipos de obstrução, enquanto foi observado que, com a obstrução (modelo B), o jato sofre uma inclinação considerável em direção às paredes do molde, na obstrução de 60% e vazões superiores a 80 l/min. Para obstrução de 40% nota-se esse comportamento na vazão 100 l/min. A inclinação do jato pode prejudicar o processo de lingotamento, pois poderá ocasionar uma má formação de casca, com risco de menor espessura em um dos lados, além de favorecer o depósito os óxidos e fragilizando a mesma.

As análises realizadas por meio de simulações computacionais alcançaram forte correlação com os perfis de velocidade obtidos via técnica. Essa consistência reforça a confiabilidade dos métodos utilizados e corrobora a capacidade das simulações em prever o comportamento do fluxo sob diferentes condições de vazão e obstrução. Em particular, observou-se que, comportamentos muito próximo tanto em gráficos (resultado PIV e CFD), perfis de velocidade (imagens de vetores geradas pelo PIV e CFD) e comportamento do fluido (dispersão de tinta e simulação de traçador).

Portanto, este estudo contribui para a compreensão dos efeitos do *clogging* no lingotamento contínuo e destaca a importância de monitorar e mitigar esse fenômeno. Como proposta futura, recomenda-se simular *clogging* em outras regiões da válvula, por exemplo, perto da saída da válvula, além de condições não uniformes de obstrução (obstrução localizada em metade da área da SEN) e simular com camada de ar na superfície para avaliar influência sobre a superfície.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

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: AISTECH, IRON AND STEEL TECHNOLOGY CONFERENCE AND EXHIBITION, 2014. Warrendale: AIST, 2014. p. 1727–1735.

CONCEIÇÃO, P. V. S. **Rendimento metálico durante vazamento de placas de aço**. 2018. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

CONTINI, André Carlos. **Estudo do fenômeno de Clogging na região da válvula tampão por meio da dinâmica dos fluidos computacional**. 2011.

DAWSON, S. **Tundish nozzle blockage during the continuous casting of aluminum-killed steel**. In: STEELMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS, 73., 1990. Warrendale, PA, 1990, p. 15-31, 1990.

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

Fix, W.; Jacobi, H. and Wunnenberg, K. **Collision-controlled growth of composites in casting nozzles**, Steel Research, 1993, vol. 64 (1), pp.

GOMES, Noraldo Hipolito Guimarães. **Estudo comparativo de tubos submersos anti-clogging no processo de lingotamento contínuo**. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Hackl, G., Tang, Y., Nitzl, G., Schurmann, D., Willers, B., & Eckert, S. (2019). Gyro nozzle—An innovative submerged-entry nozzle design for billet and bloom casting. *Iron and Steel Technology*, 16(7), 84-90.

International Iron and Steel Institute IISI Website: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/> acessado no dia 30/09/2024 as 9:40 am

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.

MAZUMDAR, D. **Modeling of Steelmaking Processes**. 1.ed. Boca Raton: CRC Press, 463p, 2009.

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.

PEIXOTO, J. J. M. **Modelamento Físico e Matemático do Fluxo no Interior de um Molde de Lingotamento Contínuo de Beam Blank Alimentado Com Duas Válvulas Submersas Tubulares**. 2016. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

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.

RACKERS, K.; THOMAS, B.G. **Cloggin in continuos casting nozzles.** In: STEELMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS, 78., 1995, Nashville, Iron and Steel Society, Warrendale, PA, 1995, v. 78, p. 723-734.

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.

SINGH, S.N. **Mechanism of alumina buildup in tundish nozzles during continuos casting of aluminum-killed steels.** Metallurgical Transactions, V. 5, n 10, p.2165 - 2178, 1974.

SILVA, P. H. da R. **Análise da remoção de inclusões do aço durante o esgotamento da panela após injeção de gás inerte através de modelamento físico.** 2018. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas), Universidade Federal De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

Thomas, B.G., **“Continuous Casting,” The Encyclopedia of Materials: Science and Technology**, K.H. J. Buschow, R. Cahn, M. Flemings, B. Ilschner, E. J. Kramer, S. Mahajan, (D. Apelian, subject ed.) Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, Vol. 2, 2001, pp. 1595-1599; and online at <http://www.elsevier.com/mrwclus/15/show/Main.htm>.

YANG, Wen; ZHANG, Lifeng; REN, Ying; CHEN, Wei; LIU, Fenggang. Formation and prevention of nozzle clogging during the continuous casting of steels: a review. ISIJ International, v. 64, n. 1, p. 1–20, 2024. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2023-376>

WANG, Pu; LI, Shaoxiang; TIE, Zhangpeng; LIU, Huasong; TANG, Haiyan; LAN, Peng; ZHANG, Jiaquan. Effect of different types of nozzles on swirling flow development and shell growth behavior in a bloom casting mold. In: AISTECH — IRON & STEEL TECHNOLOGY CONFERENCE, 2019, Pittsburgh, PA, USA. Proceedings... Pittsburgh: AIST, 2019. DOI: <https://doi.org/10.33313/377/138>

WILSON, F.G.; HEEMSOM, M.J.; NICHOLSON, A.; HILLS, A.W.D. **Effect of fluid flow characteristics on nozzle blockage in aluminium-killed steels**. Ironmaking and Steelmaking, v. 14, n. 6, p. 296-309, 1987.

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