



**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**

**ANÁLISE VIA MODELAGEM FÍSICA DOS EFEITOS DE  
ALTERAÇÕES EM ALGUNS PARÂMETROS OPERACIONAIS  
SOBRE A TURBULÊNCIA SUPERFICIAL NUM MOLDE DE  
LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE PLACAS**

**Felipe Alves Guedes**

**Ouro Preto, dezembro de 2023**

**Felipe Alves Guedes**

**Análise via Modelagem Física dos Efeitos de Alterações em Alguns  
Parâmetros Operacionais sobre a Turbulência Superficial num Molde  
de Lingotamento Contínuo de Placas**

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 Metalúrgico.

**Orientador: Prof. DSc. Johne Jesus Mol Peixoto**

**Ouro Preto, dezembro de 2023**



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Felipe Alves Guedes**

### **Análise via Modelagem Física dos Efeitos de Alterações em Alguns Parâmetros Operacionais sobre a Turbulência Superficial num Molde de Lingotamento Contínuo de Placas**

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 15 de dezembro de 2023

#### Membros da banca

[Dr.] - Johne Jesus Mol Peixoto - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)  
[PhD.] - Carlos Antônio da Silva - (Universidade Federal de Ouro Preto)  
[MSc.] - José Dimas de Arruda - (FUPAC Lafaiete)

Johne Jesus 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 23/02/2024.



Documento assinado eletronicamente por **Johne Jesus Mol Peixoto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/02/2024, às 20:10, 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](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0673992** e o código CRC **A46339F0**.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, expresso minha gratidão a Deus, a força maior que me inspira e sustenta em todos os momentos.

Quero estender meus agradecimentos a todos os meus familiares pela compreensão nos momentos de minha ausência e pelo apoio incondicional, mesmo à distância. Um agradecimento especial para meus pais, Janeide e Valdomiro, pela constante inspiração e incentivo a continuar buscando conhecimento.

Sou imensamente grato aos professores Dr. Carlos Antônio da Silva e Johnes Jesus Mol Peixoto pelas orientações e apoio, que foram fundamentais para a conclusão deste estudo.

Agradeço também aos meus colegas, futuros profissionais na área, pelas experiências compartilhadas, com destaque para Ana Laura, Geovane e Igor. Sua contribuição foi de suma importância.

Aos meus irmãos de período do 18.2, a todos os moradores e ex-alunos da República Serigy, à UFOP e à Gloriosa Escola de Minas, deixo meu reconhecimento e apreço.

A todas as pessoas que, porventura, não tiveram seus nomes mencionados em meu trabalho, quero que saibam que estão em minha memória e agradeço a cada um por sua contribuição. Obrigado a todos.

## RESUMO

O lingotamento contínuo é o principal processo de solidificação do aço líquido, responsável por produzir produtos semiacabados. No entanto, certos fatores relacionados ao fluxo no interior do molde de lingotamento, conduzem à formação de inclusões e defeitos, impactando diretamente o rendimento das peças. Este trabalho avaliou a influência de alguns parâmetros operacionais sobre a distribuição de bolhas no interior do molde, e sobre a turbulência superficial. Foram avaliados os efeitos de parâmetros como a geometria bem como a profundidade de imersão da válvula submersa, além de efeitos oriundos de diferentes vazões de aço e de argônio. Os dados foram coletados em um modelo construído em escala 1:0,6, por meio de filmagens com câmera de alta velocidade e sensores de nível ultrassônicos, e operado em condições de semelhança definidas pelos adimensionais de Froude e Weber. Considerando as presentes condições experimentais, se encontra que a distribuição de tamanho de bolhas no molde é praticamente independente da vazão de gás. Vazões crescentes de ar e/ou de líquido fazem aumentar o nível de turbulência interfacial. Maior a profundidade de imersão menor a intensidade de flutuação. Maior a profundidade do copo, maior a intensidade de turbulência. Estes efeitos foram estatisticamente parametrizados.

**Palavras-chave:** Distribuição de Bolhas. Lingotamento Contínuo. Profundidade de Imersão. Turbulência Na Interface Aço-Escória. Válvula Submersa.

## ABSTRACT

Continuous casting is the main solidification process for liquid steel, responsible for producing semi-finished products. However, certain factors related to the flow inside the casting mold lead to the formation of inclusions and defects, directly impacting the yield of the parts. This work evaluated the influence of some operational parameters on the distribution of bubbles inside the mold, and on surface turbulence. The effects of parameters such as geometry as well as the immersion depth of the submerged valve were evaluated, in addition to effects arising from different flow rates of steel and argon. Data were collected in a model built at 1:0.6 scale, through filming with a high-speed camera and ultrasonic level sensors and operated under similarity conditions defined by Froude and Weber's dimensions. Considering the present experimental conditions, it is found that the size distribution of bubbles in the mold is practically independent of the gas flow rate. Increasing air and/or liquid flow rates increase the level of interfacial turbulence. The greater the immersion depth, the lower the fluctuation intensity. The greater the depth of the cup, the greater the intensity of turbulence. These effects were statistically parameterized.

**Keywords:** Bubble Distribution. Continuous casting. Immersion Depth. Turbulence At The Steel-Slag Interface. Submerged Valve.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Esquema do processo de lingotamento contínuo de placas de aço .....	13
Figura 3.1 – Formatos típicos de produtos semiacabados do lingotamento contínuo ....	16
Figura 3.2 – Desenho esquemático da máquina de lingotamento contínuo .....	17
Figura 3.3 – Visão esquemática das camadas formadas no topo do molde .....	18
Figura 3.4 – Fenômenos típicos de escoamento do aço líquido em moldes de Lingotamento Contínuo .....	19
Figura 3.5 – Tipos de válvulas submersas utilizadas em lingotamento contínuo de placas .....	20
Figura 3.6 – Padrões de escoamento encontrados em molde de Lingotamento Contínuo .....	20
Figura 3.7 – Desenho esquemático mostrando o fluxo de aço em um molde .....	22
Figura 3.8 – Padrão de fluxo para injeção de $1,67 \times 10^{-3} m^3/s$ com velocidade de lingotamento (a) de 0,8m/min (fluxo estruturalmente ajustado) e (b) 1,8 m/min (fluxo estruturalmente ajustado) .....	24
Figura 3.9 – (a) Montagem do experimento e aparato de medição e (b) Imagem da pluma de bolhas obtido pela câmera à esquerda e tratamento realizado pelo ImageJ à direita	24
Figura 3.10 – Distribuição e tamanho das bolhas do experimento com modelo de água. Vazão de gás: a) 1,7L/min, b) 2,5Lmin .....	25
Figura 3.11 – Similaridade geométrica em uma panela de aciaria .....	26
Figura 4.1 – a) Modelo do molde de lingotamento contínuo de placas, b) Válvula submersa.....	29
Figura 4.2 – a) Formação de bolhas na região da válvula submersa com 3L/min de ar, b) Formação de bolhas na região da válvula submersa com 6L/min de ar .....	30
Figura 4.3 – Frames dos vídeos em regiões diferentes .....	31
Figura 4.4 – Imagens binárias feitas manualmente utilizando os frames originais .....	31
Figura 4.5 – A) Sensor ultrassônico UM30-21_118; B) Representação dos sensores no molde.....	32
Figura 4.6 – Intervalo de confiança plotado com dados obtidos por ajuste senoidal ....	33
Figura 4.7 – Formação de bolhas na região da <i>SEN</i> original, 3L/min de ar, vazão de 200L/min de água e com profundidade de imersão de 11cm.....	34

Figura 4.8 – Formação de bolhas na região da <i>SEN</i> com copo mais profundo, 3L/min de ar, vazão de 220L/min de água e com profundidade de imersão de 11cm .....	34
Figura 4.9 – Formação de bolhas na região da <i>SEN</i> original com 3L/min de ar e vazão de 220L/min de água e com profundidade de imersão de 11cm.....	35
Figura 4.10 – Espalhamento de tinta dentro do molde com 3L/min de gás, tempo em segundos .....	35
Figura 5.1 – Distribuições de bolhas no molde, para vazões de 3L/min e 6L/min, com profundidade de imersão de 16cm da <i>SEN</i> original e com vazão de água de 185L/min	36
Figura 5.2 – Flutuação de nível com imersão de 11cm, válvula <i>SEN</i> original, vazão de água de 185L/min, em três condições de vazão de ar: sem ar, 3L/min e 6L/min .....	38
Figura 5.3 – Flutuação de nível com imersão de 16cm, válvula <i>SEN</i> original, vazão de água de 185L/min, em três condições de vazão de ar: sem ar, 3L/min e 6L/min .....	39
Figura 5.4 – Flutuação de nível com vazão de 220L/min, imersão da <i>SEN</i> original de 11cm e vazão de ar em três condições: sem ar, 3L/min e 6L/min.....	41
Figura 5.5 – Flutuação de nível com vazão de 220L/min, imersão da <i>SEN</i> original de 16cm e vazão de ar em três condições: sem ar, 3L/min e 6L/min.....	42
Figura 5.6 – Fluxo turbulento na região da <i>SEN</i> com copo mais profundo, imersão de 16cm, 6L/min de ar e vazão de 185L/min de água.....	43
Figura 5.7 – Fluxo turbulento na região da <i>SEN</i> com copo mais profundo, imersão de 16cm, 6L/min de ar e vazão de 220L/min de água.....	43
Figura 5.8 – Flutuação de nível com vazão de 185L/min, imersão da <i>SEN</i> com copo mais profundo de 11cm e vazão de ar em três condições: sem ar, 3L/min e 6L/min .....	45
Figura 5.9 – Flutuação de nível com vazão de 185L/min, imersão da <i>SEN</i> com copo mais profundo de 16cm e vazão de ar em três condições: sem ar, 3L/min e 6L/min .....	46
Figura 5.10 – Flutuação de nível com vazão de 220L/min, imersão da <i>SEN</i> com copo mais profundo de 11cm e vazão de ar em três condições: sem ar, 3L/min e 6L/min .....	48
Figura 5.11 – Flutuação de nível com vazão de 220L/min, imersão da <i>SEN</i> com copo mais profundo de 16cm e vazão de ar em três condições: sem ar, 3L/min e 6L/min .....	49
Figura 5.12 – Rolo Duplo.....	54
Figura 5.13 – Dispersão de corante ao longo do tempo dentro do molde utilizando a imersão de 16cm, válvula <i>SEN</i> original, vazão de água de 185L/min e sem vazão de ar .....	54



## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Propriedades da água e do aço .....	28
Tabela 5.1 - Média e Desvio Padrão das distribuições de tamanho de bolha no molde, obtidas para vazões de 3L/min e 6L/min, com profundidade de imersão de 16cm da SEN original e com vazão de água de 185L/min.....	36
Tabela 5.2 - Flutuação de nível média dos sensores de nível para a SEN original para vazões de 3L/min e 6L/min, com vazão de água de 185L/min e profundidade de imersão de 11cm e 16cm.....	37
Tabela 5.3 - Desvio Padrão ( $\sigma$ ) dos sensores com vazão de 185L/min, com imersão da SEN original de 11cm e 16cm e vazão de ar em três condições: sem ar, 3L/min e 6L/min .....	37
Tabela 5.4 - Flutuação de nível média dos sensores de nível para a SEN original para vazões de 3L/min e 6L/min, com vazão de água de 220L/min e profundidade de imersão de 11cm e 16cm.....	40
Tabela 5.5 - Desvio Padrão ( $\sigma$ ) dos sensores com vazão de 220L/min, com imersão da SEN original de 11cm e 16cm e vazão de ar em três condições: sem ar, 3L/min e 6L/min .....	40
Tabela 5.6 - Flutuação de nível média dos sensores de nível para a SEN com copo mais profundo para vazões de 0L/min, 3L/min e 6L/min, com vazão de água de 185L/min e profundidade de imersão de 11cm e 16cm.....	44
Tabela 5.7 - Desvio Padrão ( $\sigma$ ) dos sensores com vazão de água de 185L/min, SEN com copo mais profundo, imersão de 11cm e 16cm, em três condições de vazão de ar: sem ar, 3L/min e 6L/min .....	44
Tabela 5.8 - Flutuação de nível média dos sensores de nível para a SEN com copo mais profundo para vazões de 0L/min, 3L/min e 6 L/min, com vazão de água de 220L/min e profundidade de imersão de 11cm e 16cm.....	47
Tabela 5.9 - Desvio Padrão ( $\sigma$ ) dos sensores com vazão de água de 220L/min, SEN com copo mais profundo, imersão de 11cm e 16cm, em três condições de vazão de ar: sem ar, 3L/min e 6L/min .....	47

Tabela 5.10 - Desvio Padrão ( $\sigma$ ) dos sensores com vazão de água de 185L/min e 220L/min, SEN com copo mais profundo, imersão de 11cm e 16cm, em três condições de vazão de ar: sem ar, 3L/min e 6L/min.....	50
Tabela 5.11 - Variação do Desvio Padrão ( $\sigma$ ) dos sensores com vazão de água de 185L/min, SEN original e com copo mais profundo, imersão de 11cm e 16cm, em três condições de vazão de ar: sem ar, 3L/min e 6L/min.....	50
Tabela 5.12 - Variação do Desvio Padrão ( $\sigma$ ) dos sensores com vazão de água de 220L/min, SEN original e com copo mais profundo, imersão de 11cm e 16cm, em três condições de vazão de ar: sem ar, 3L/min e 6L/min.....	51
Tabela 5.13 - Valores de nível de turbulência interfacial em função dos parâmetros: PC (Profundidade do copo), Q (Vazão de água), PI (profundidade de imersão da SEN), Gás (Ar); Sx (Desvio Padrão do sensor).....	52
Tabela 5.14 - Equação de Regressão sobre as variáveis que influenciam a turbulência dentro do molde .....	53

## LISTA DE SÍMBOLOS

$D_{mod}$  – Diâmetro do Modelo

$D_{prot}$  – Diâmetro do Protótipo

$Fr$  – Número de Froude

$K$  – Constante de Calibração

$L$  – Dimensão Característica

$L_{mod}$  – Comprimento no Modelo

$L_{prot}$  – Comprimento no Protótipo

$L/min$  – Litros por Minuto

$n^\circ$  – Número

$PC$  – Profundidade do Copo

$PI$  – Imersão da Válvula

$Q$  – Vazão de água

$Re$  – Número de Reynolds

$V$  – Velocidade média do fluido (m/s)

$\lambda$  – Fator de Escala

$\rho$  - Densidade ( $g/cm^3$ )

$\mu$  – Viscosidade Dinâmica (Pa s)

$\sigma$  – Desvio Padrão

## **LISTA DE SIGLAS**

*PLC* - Programable Logic Controller

*SEN* - Submerged Entry Nozzle (Válvula Submersa)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
2.1	<i>Objetivo Geral</i> .....	15
2.2	<i>Objetivos Específicos</i> .....	15
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
3.1	<i>Lingotamento Contínuo</i> .....	16
3.2	<i>Escoamento</i> .....	18
3.3	<i>Turbulência e Entranhamento da Escória</i> .....	21
3.4	<i>Formação de Vórtice/Emulsificação no Molde</i> .....	21
3.5	<i>Estudos de Caracterização de Bolhas</i> .....	22
3.6	<i>Modelamento Físico</i> .....	25
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>29</b>
4.1	<i>Materiais e Equipamentos</i> .....	29
4.2	<i>Distribuição de Tamanhos de Bolhas</i> .....	30
4.3	<i>Turbulência Interfacial</i> .....	31
4.4	<i>Turbulência como Fator de Influência na Formação das Bolhas de Ar</i> .....	34
4.5	<i>Dispersão de Traçador-anilina</i> .....	35
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>36</b>
5.1	<i>Distribuição de Tamanhos de Bolhas</i> .....	36
5.2	<i>Turbulência Interfacial</i> .....	36
5.3	<i>Efeitos Específicos da Profundidade do Copo e de Imersão da SEN</i> .....	50
5.4	<i>Análise de Correlação</i> .....	52
5.5	<i>Dispersão de Traçador-anilina</i> .....	53
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>55</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>56</b>



# 1 INTRODUÇÃO

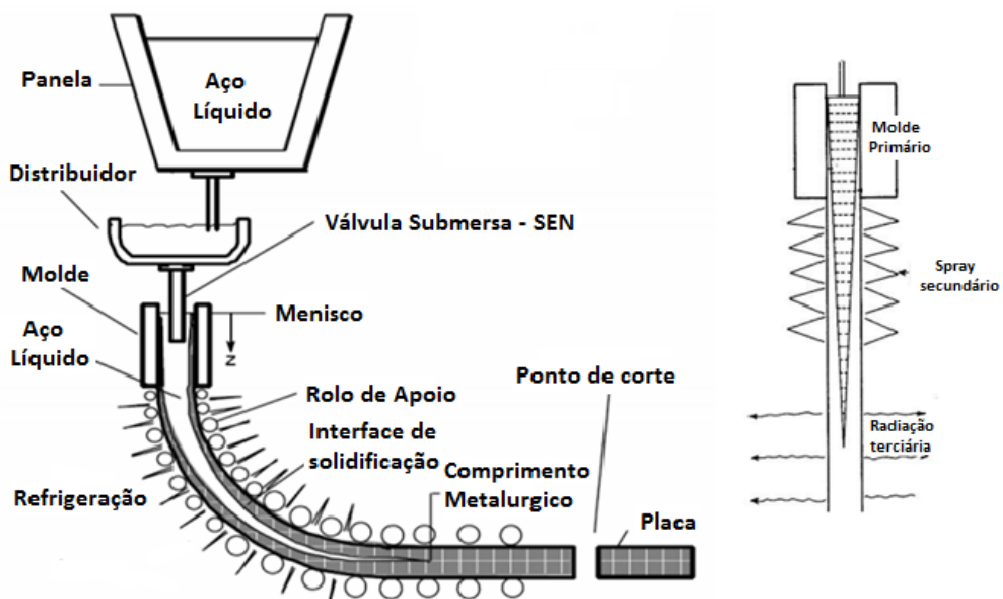
O mercado nacional e internacional, cada vez mais, busca a maior eficiência e qualidade do aço, desde os processos iniciais da siderurgia até os processos finais de produção do aço.

Nas etapas de siderurgia que tratam do aço líquido, preocupa-se com a limpeza e com a diminuição da presença de inclusões não-metálicas, pois acarretam defeitos que deterioram as suas propriedades (ARRUDA, 2015).

Por ser a última etapa em que se trabalha com o aço ainda no estado líquido, o lingotamento contínuo vem ganhando cada vez mais espaço, pois é um processo sem interrupções, em que o aço é vazado em moldes refrigerados e é solidificado para seguir para o processo de conformação. Os três principais reatores desse processo são a panela, o distribuidor e o molde (BARRAL, 2006).

Desta forma, vários estudos estão sendo realizados buscando evitar fenômenos que possam prejudicar a limpeza do aço; estes estudos incluem a melhoria de captura de inclusões e mitigação da turbulência dos escoamentos. A Figura 1.1 mostra um esquema do processo de lingotamento contínuo de placas de aço.

Figura 1.1 - Esquema do processo de lingotamento contínuo de placas de aço



Fonte: Arruda (2015).

Diversos parâmetros podem influenciar a qualidade do aço, tais como as dimensões do molde e a geometria da válvula, a profundidade de imersão da válvula, a

vazão do aço e do argônio. O perfil de fluxo no lingotamento pode ser alterado por estes parâmetros, mas sem prejudicar o transporte convectivo de calor do aço para a região do menisco e para o topo do banho de aço.

O objetivo desse estudo foi investigar a influência desses parâmetros, sobre a distribuição de bolhas no interior do molde, bem como sobre a intensidade de turbulência interfacial. Estes fatores estão relacionados à qualidade do aço e à produtividade da máquina.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Estudar, por meio de modelagem física, efeitos de alguns parâmetros operacionais sobre o campo de velocidades e turbulência da interface aço-escória num molde de lingotamento contínuo de placas.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Determinar a influência sobre o fluxo de líquido no molde de lingotamento, de parâmetros como Vazão de líquido; Vazão de gás; Geometria e Imersão da válvula submersa (*SEN*);
- Determinar o estado de turbulência interfacial;
- Determinar a distribuição espacial e de tamanho das bolhas.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

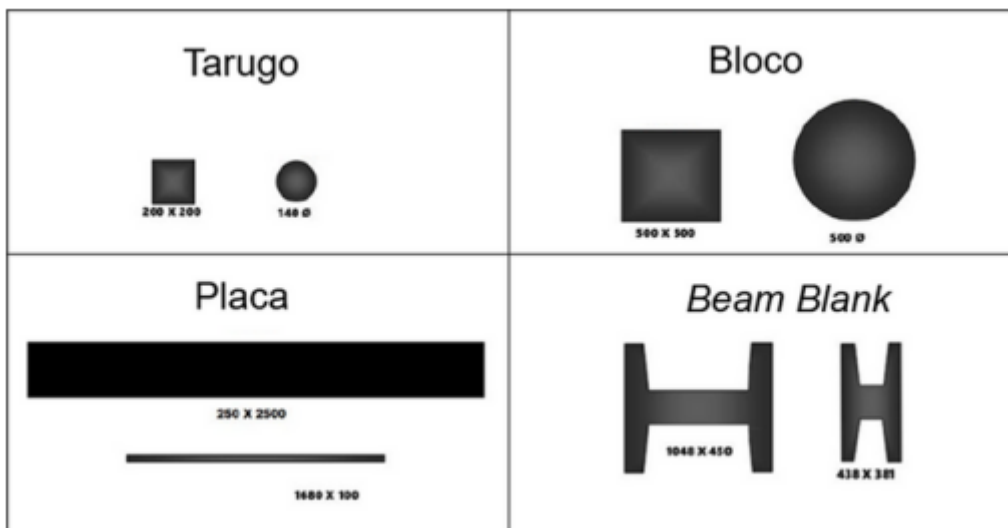
#### 3.1 Lingotamento Contínuo

O lingotamento contínuo é um processo cuja concepção inicial ocorreu na metade do século XIX. A primeira patente registrada para este tipo de processo foi feita por Henry Bessemer em 1846. Contudo, a tecnologia da época não viabilizou a aplicação industrial do processo imediatamente (BARBOSA, 2002).

Atualmente, o lingotamento contínuo é o principal processo de solidificação do aço líquido, por ser capaz de gerar um produto semiacabado sem interrupções, por possuir alto rendimento, alta produtividade e por possibilitar a obtenção de um aço de maior qualidade superficial e interna do produto (BARRAL, 2006).

Os produtos semiacabados mais comuns do lingotamento contínuo são o Tarugo, Bloco, Placa e o Beam Blank (CONCEIÇÃO, 2018). Quanto mais próximo o produto semiacabado se aproxime da geometria final, menores serão os custos com conformação mecânica (HIBBELER, 2014).

Figura 3.1 - Formatos típicos de produtos semiacabados do lingotamento contínuo

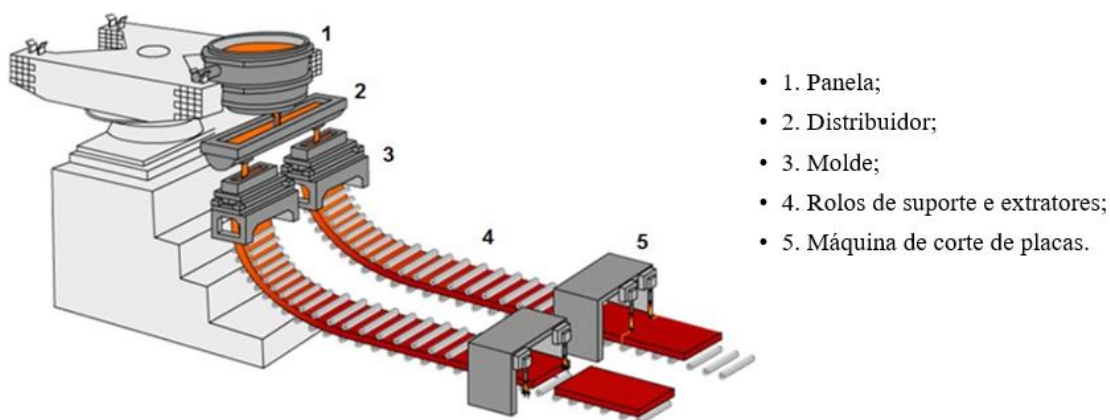


Fonte: Conceição (2018).

Contudo, alguns fatores interferem no rendimento do produto lingotado, podendo ser destacados, como: a ocorrência de inclusões e defeitos (internos e/ou superficiais). Tais fatores implicam no aumento dos custos operacionais.

Uma instalação de lingotamento contínuo é basicamente constituída de três reatores, sendo eles a panela, o distribuidor e o molde (BARRAL, 2006). Na Figura 3.2 mostra um desenho esquemático da máquina de lingotamento contínuo.

Figura 3.2 - Desenho esquemático da máquina de lingotamento contínuo



Fonte: Adaptado de Mendonça (2018).

A panela tem as funções de receber o aço proveniente do refino primário, agir como reservatório e transportar o aço até a instalação de lingotamento contínuo. Além disso, pode ter a função de refino secundário, alguns desses processos de refino secundário incluem o acerto de composição e de elementos de liga, a desoxidação, a dessulfuração e a descarburagem (OLIVEIRA, 2009). Após tais processos o aço líquido contido na panela é vazado para o distribuidor.

O segundo equipamento é o distribuidor, sendo ele um reator intermediário entre a panela e o molde. Segundo Peixoto (2016), sua principal função é servir como um reservatório de aço e manter a continuidade do lingotamento durante a troca de panelas. Além disso, o distribuidor tem a finalidade de realizar ajustes na composição química e na promoção de condições de escoamento para flotação e consequente remoção de inclusões do aço líquido.

Após o distribuidor, o aço líquido é transportado para o molde, por uma válvula submersa, chamada de *SEN (Submerged Entry Nozzle)*. Os moldes são construídos normalmente em cobre de alta pureza devido à excelente condutividade térmica deste metal e são refrigeradas à água (CRAVO, 2006).

No molde é onde a solidificação é iniciada através do contato do aço líquido com as paredes do molde, e onde a geometria da peça a ser produzida é definida. Para uma operação adequada, as características do molde, tipo de material e dimensões, as

características do pó fluxante, a profundidade e geometria da válvula submersa, além dos parâmetros de oscilação, frequência e amplitude, e a intensidade da agitação eletromagnética, são os principais parâmetros que devem ser controlados (COSTA, 2003). O pó fluxante é adicionado no topo do molde e durante sua fusão forma uma camada sinterizada e uma camada líquida de escória, conforme mostra a Figura 3.3.

Figura 3.3 – Visão esquemática das camadas formadas no topo do molde



Fonte: Mills (2014).

A pele de aço sólido é formada em contato com o molde refrigerado a água. A presença de pó fluxante reduz as forças de fricção entre a placa do molde e a pele de aço solidificada, além de proteger a superfície livre na região do menisco com a atmosfera e ajudar a reter a escória e inclusões que flutuam no molde (MILLS, 2014).

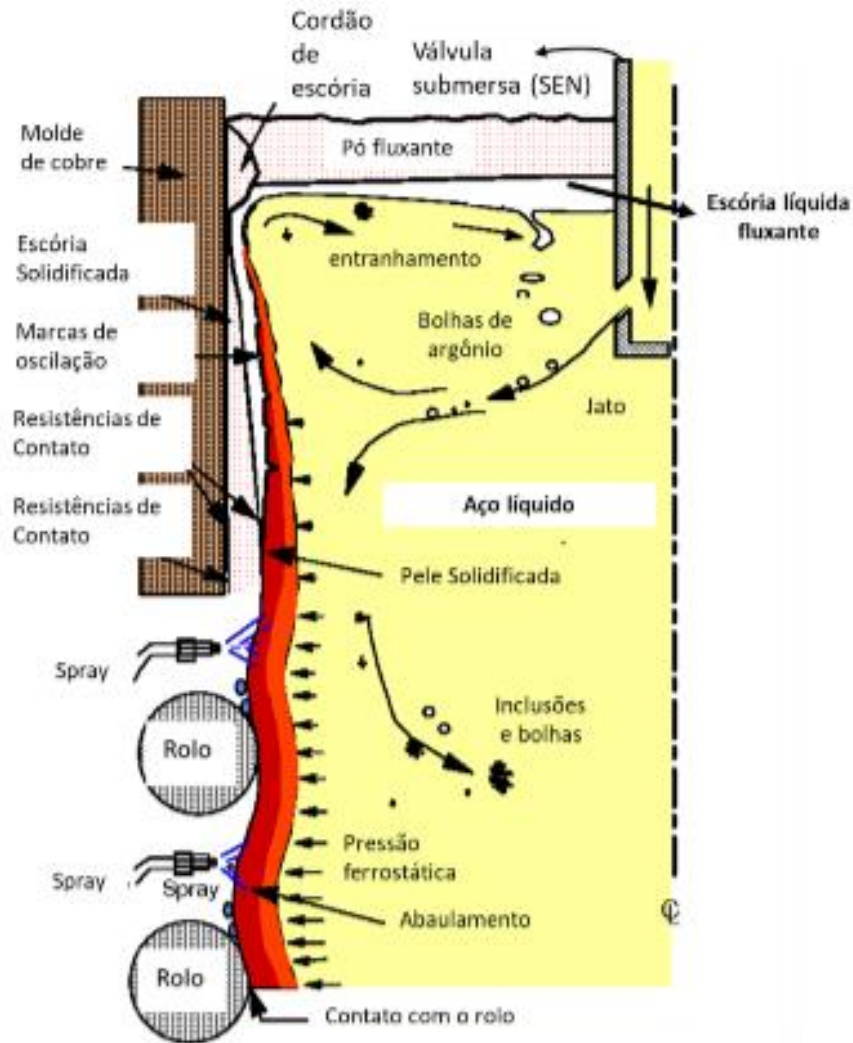
## 3.2 Escoamento

O processo de lingotamento contínuo busca a melhor qualidade do aço, evitando inclusões e defeitos. Estudos realizados nessa área mostram que o escoamento turbulento provoca fenômenos de natureza transiente que ocorrem nas regiões da válvula e interface metal/escória.

O jato de aço líquido que entra no molde pela *SEN* pode carregar bolhas de

argônio e inclusões, gerando defeitos no produto final (DIAS, 2019). A força de inércia deste jato, além de promover instabilidade superficial, dá origem a outros defeitos, como o entranhamento da escória e formação de trincas (YUAN *et al.*, 2003). A Figura 3.4 esquematiza alguns dos fenômenos associados ao escoamento do aço em moldes de Lingotamento Contínuo.

Figura 3.4 – Fenômenos típicos de escoamento do aço líquido em moldes de Lingotamento Contínuo

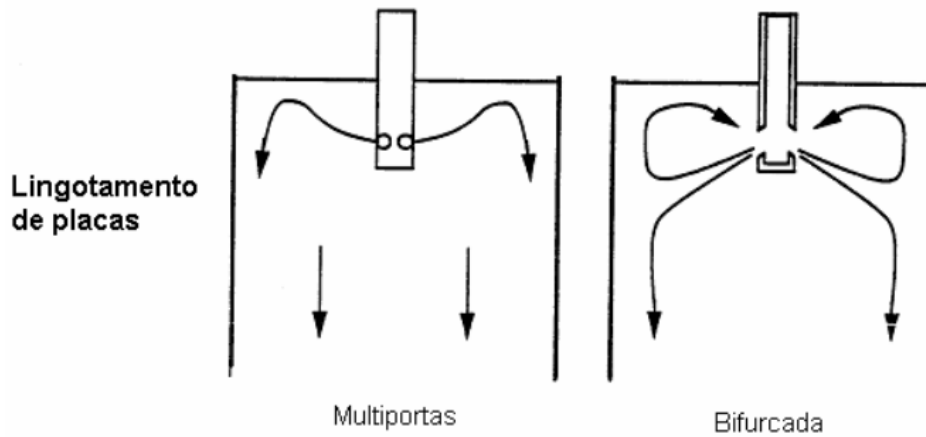


Fonte: Yuan (2003).

Segundo Thomas (1997), uma boa válvula submersa (*SEN*) deve resultar em um bom padrão de escoamento na cavidade do molde, ter resistência ao desgaste, a entupimentos e a choque térmicos, possuir baixa porosidade e um custo razoável. Na Figura 3.5 mostra os dois tipos de *SEN* mais utilizadas, sendo as “bifurcadas” e “multiportas”. Essas válvulas apresentam certas propriedades que requerem ajustes, uma vez que o fluxo do aço está intrinsecamente ligado às suas configurações. Algumas dessas variáveis incluem a profundidade da *SEN* e a forma das aberturas de saída da válvula. A velocidade de lingotamento e a largura da placa a ser lingotada também influenciam

diretamente o fluxo, tornando-os, assim, parâmetros cruciais a serem considerados ao selecionar a válvula submersa.

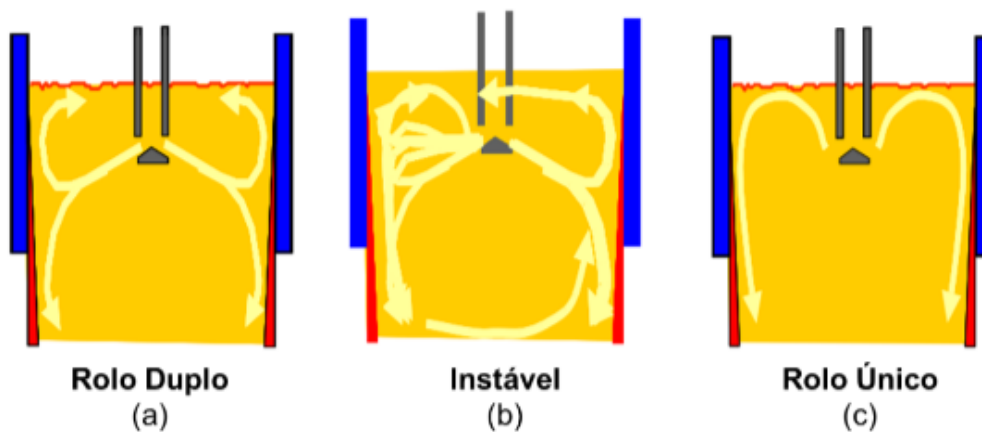
Figura 3.5 - Tipos de válvulas submersas utilizadas em lingotamento contínuo de placas



Fonte: Thomas (1997).

Existem três padrões típicos de escoamento em moldes de placas: Rolo Duplo, Instável e Rolo Único. Todos os três sendo dependentes da geometria e profundidade do *SEN*, da vazão de argônio, velocidade de lingotamento e das dimensões da placa. Segundo Dauby (2012), o ideal para o processo seria o Rolo Duplo, por possuir uma intensidade intermediária entre o Rolo Único e o Instável, evitando assim possíveis defeitos no produto final, como mostrado na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Padrões de escoamento encontrados em molde de Lingotamento Contínuo



Fonte: Dauby (2012).

### 3.3 Turbulência e Entranhamento da Escória

Segundo Zhang (2007) e Barral (2006), os mecanismos principais para a entranhamento de escória estão associados a:

- Partículas de escória podem ser captadas, se o jato da *SEN* gera um alto nível de flutuações próximo ao menisco;
- Oscilação periódica do nível de aço no molde induzida pelo escoamento não estacionário causado por problemas de variação de vazão do aço líquido, proveniente da *SEN*;
- Vórtice formado por vazão assimétrica no molde;
- Emulsificação na interface metal/escória, causada por ruptura de bolhas flotando para esta interface;
- Sucção causada pelo jato da válvula submersa. A escória é captada pela baixa pressão na porta de saída da válvula submersa e, se atingir o jato, pode causar sérios problemas de inclusão de escória;
- Incidência do jato na interface metal-escória, induzido por injeção excessiva de gás.

### 3.4 Formação de Vórtice/Emulsificação no Molde

Segundo He (1993), a ocorrência de vórtices é um fenômeno potencial em moldes de lingotamento contínuo, podendo ter um impacto significativo na emulsificação do pó fluxante, resultando na redução da limpidez do aço.

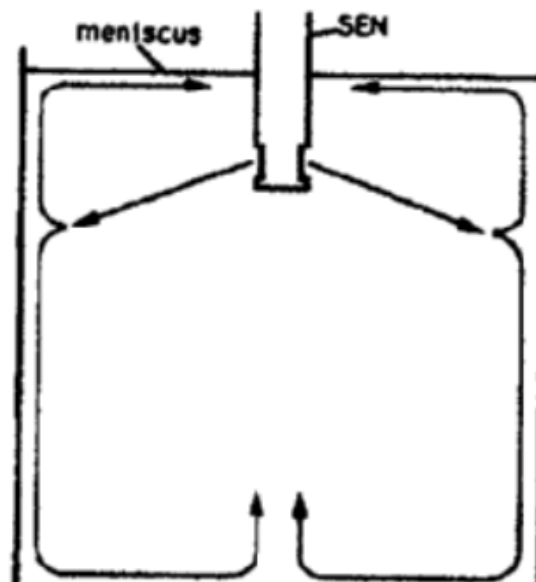
A formação de vórtices pode estar associada ao escoamento do aço no reator. A observação direta do escoamento do aço em um molde real durante o processo de lingotamento é praticamente inviável (BARRAL, 2006). Por essa razão, He (1993) conduziu experimentos empregando modelagem física a frio em escala plena, o que possibilitou a satisfação simultânea dos critérios de similaridade de Reynolds e Froude.

A formação do vórtice requer a presença de um componente de velocidade rotacional. Portanto, a ocorrência do vórtice no molde de lingotamento contínuo deve ser concentrada na área onde existe um fluxo rotacional, resultando na criação de uma força

de cisalhamento na interface entre o metal líquido e o pó fluxante (BARRAL, 2006). A Figura 3.7 ilustra o padrão típico de fluxo em um molde de lingotamento contínuo de placas. Ao examinar essa figura, é evidente que dois fluxos, em direções opostas, interagem nas proximidades da *SEN*, o que pode gerar um componente de velocidade rotacional e, por conseguinte, uma força de cisalhamento, podendo haver a formação de vórtice nesta região.

De acordo com Tsukihashi (2005), o fluxo do aço líquido no molde de lingotamento contínuo é caracterizado por instabilidade, manifestando diferentes padrões de escoamento, especialmente em velocidades de lingotamento elevadas. A formação de vórtices pode ser atribuída a fatores como a localização descentralizada da *SEN*, oscilações periódicas e aleatórias no nível, turbulência no menisco, entre outros.

Figura 3.7 – Desenho esquemático mostrando o fluxo de aço em um molde



Fonte: He (1993).

### 3.5 Estudos de Caracterização de Bolhas

As bolhas levadas pela *SEN* ao molde são de grande importância, pois ajudam a flotar inclusões que se aderem às mesmas, quando ascendem no líquido. Como indicado por Fruehan (2009), bolhas de menor tamanho são individualmente sujeitas a menor empuxo.



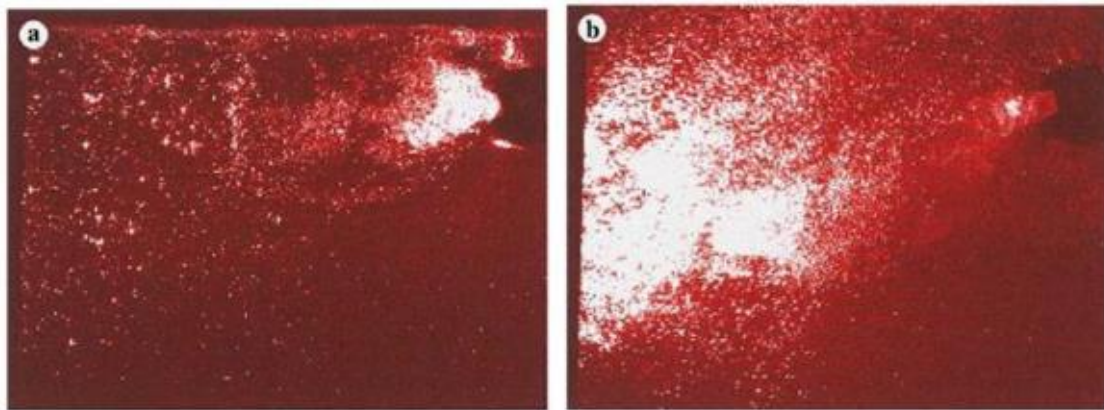
Segundo Banderas (2005) o tamanho das bolhas é similar desde a saída da válvula até a face estreita do molde. Em vazões mais elevadas de gás, observa-se um acoplamento estrutural do fluxo. O aumento na quantidade de bolhas pode ser atribuído à condição de ruptura dessas bolhas durante seu deslocamento. Assim, em situações de baixa velocidade de lingotamento e elevadas vazões de gás, ocorre um acoplamento mais pronunciado do fluxo, resultando em um aumento na quantidade de bolhas. Por outro lado, em situações de baixas vazões de gás, o fluxo se torna desacoplado, mantendo a quantidade de bolhas praticamente constante.

Em situações de altas velocidades e baixas taxas de injeção de gás, a mistura de água e gás é expelida da válvula em um jato intermitente de duas fases, como pode ser observado na Figura 3.8-a. Ao se aproximar das paredes estreitas do molde, a concentração de bolhas diminui, resultando em uma redução na interação entre elas e cessando o mecanismo de coalescimento (Banderas, 2005).

No entanto, em altas velocidades de lingotamento com taxas elevadas de injeção de gás, a mistura é expelida da válvula em um jato contínuo de duas fases, conforme a Figura 3.8-b. Nesse cenário, é observado um processo contínuo de coalescência das bolhas desde a saída da válvula até a face estreita do molde. Isso ocorre devido ao aumento significativo na concentração de bolhas no molde, promovendo uma interação intensa entre elas e favorecendo esse processo (Banderas, 2005).

Para velocidades de lingotamento elevadas e taxas de injeção de gás também elevadas, a população de bolhas no molde apresenta um pequeno diâmetro próximo à saída da válvula, onde a interação entre as bolhas é menos frequente. O crescimento inicial das bolhas é reduzido, mas aumenta substancialmente desde a saída da válvula até a face estreita do molde, resultando em uma população de bolhas com diâmetros maiores (Banderas, 2005).

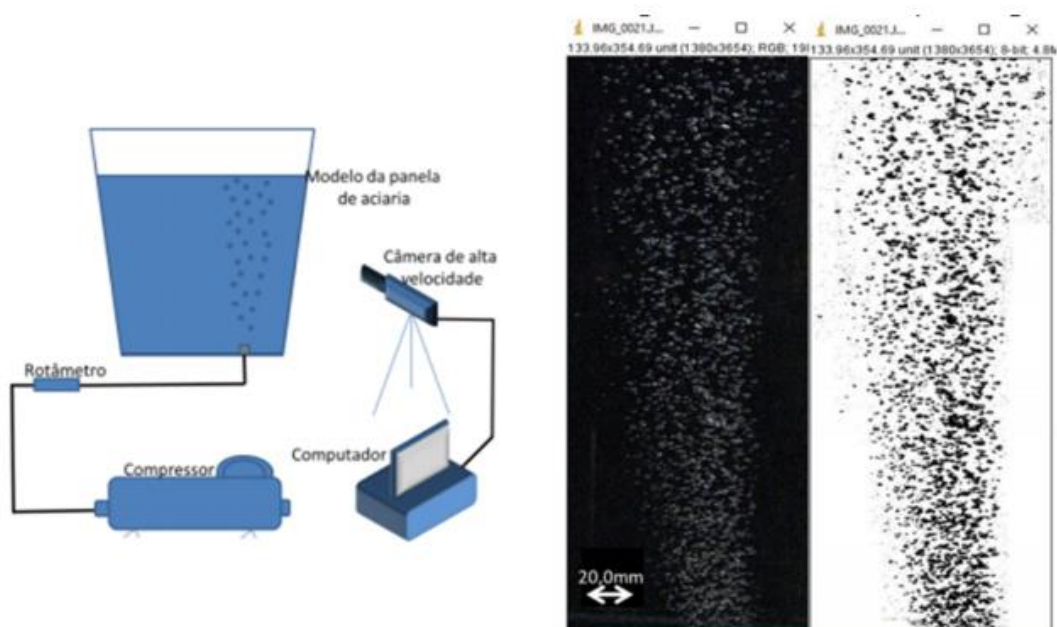
Figura 3.8 – Padrão de fluxo para injeção de  $1,67 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  com velocidade de lingotamento (a) de 0,8m/min (fluxo estruturalmente ajustado) e (b) 1,8 m/min (fluxo estruturalmente ajustado)



Fonte: Banderas (2005).

Silva (2018) buscou medir a área superficial e diâmetro das bolhas, em um modelo físico de panela de aciaria utilizando água e ar, como fluidos de trabalho. Com uma câmera de alta velocidade foram obtidas imagens da formação das bolhas de ar injetadas pelo plugue, sendo que o *software ImageJ* foi utilizado para medir o tamanho das bolhas. A descrição esquemática dos experimentos de Silva (2018) é mostrada na Figura 3.9.

Figura 3.9 – (a) Montagem do experimento e aparato de medição e (b) Imagem da pluma de bolhas obtido pela câmera à esquerda e tratamento realizado pelo *ImageJ* à direita

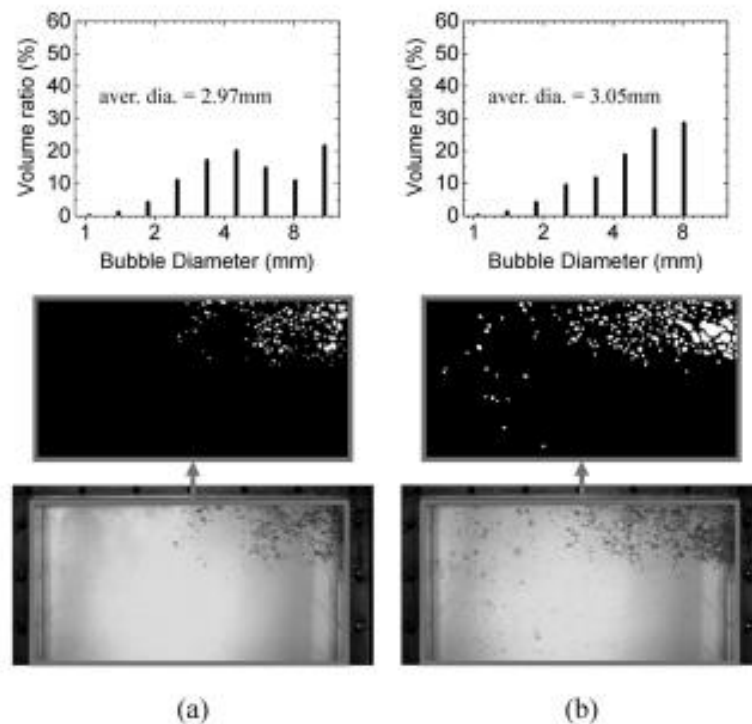


Fonte: Silva (2018).

Um estudo semelhante foi conduzido por Kwon (2006) com o objetivo de avaliar as distribuições e tamanhos das bolhas de gás em um modelo físico com água. Nesse

estudo, uma câmera de alta velocidade foi utilizada para registrar imagens do fluxo de bolhas, com uma taxa de aquisição de 1000 frames por segundo. A janela de observação foi posicionada a 3,5cm abaixo do menisco. Para a medição precisa das distribuições e tamanhos das bolhas, empregou-se o método de análise de imagem, conforme representado na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Distribuição e tamanho das bolhas do experimento com modelo de água. Vazão de gás: a) 1,7L/min, b) 2,5L/min



Fonte: Kwon (2006).

### 3.6 Modelamento Físico

Os métodos físicos e matemáticos são as ferramentas mais importantes no estudo dos processos metalúrgicos (PEIXOTO, 2016). Em um esforço para melhorar esses processos, para melhorar as condições de trabalho sem aumentar os custos de produção, esses métodos são utilizados para garantir o impacto da flexibilidade do processo sem comprometer o sistema operacional, reduzindo assim os custos de testes e perdas por inconsistências.

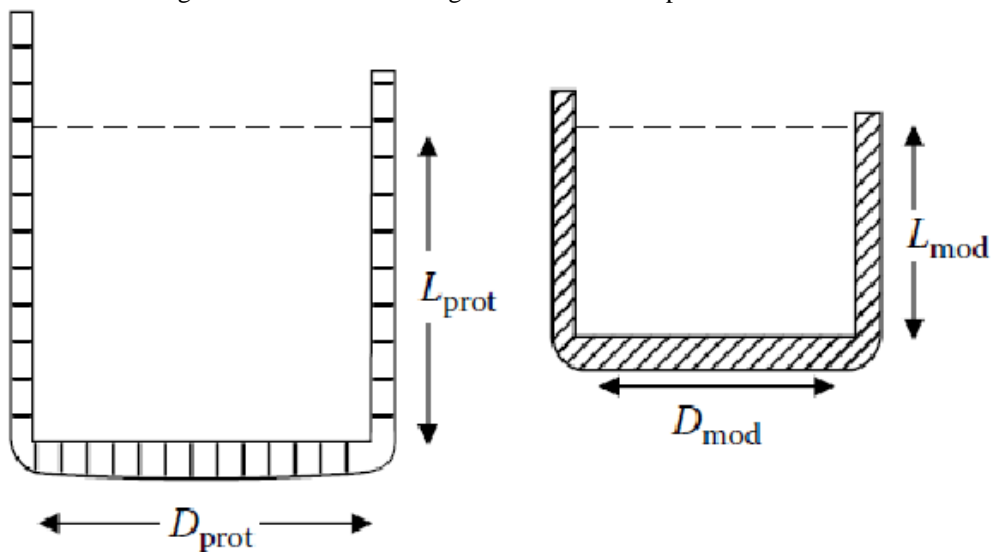
O modelo matemático é ideal para descrever por completo um determinado processo metalúrgico, entretanto nem os computadores mais sofisticados conseguem

processar tantos dados, ficando claro que diversas aproximações e simplificações são necessárias para se chegar a uma solução razoável do problema. Por outro lado, a modelagem física é uma alternativa valiosa que permite simular tal processo em condições ambientes e avaliar diversas de suas características (PEIXOTO, 2016).

Os modelos físicos de processos industriais são construídos e operados seguindo os princípios da similaridade. O modelamento físico é uma importante ferramenta por apresentar custo baixo e permitir obter dados com grande precisão. No modelo isotérmico, três critérios de similaridade são observados: similaridade geométrica, similaridade cinemática e similaridade dinâmica (GUTHRIE, 1993).

A similaridade geométrica é baseada nas formas, exigindo que as razões entre dimensões correspondentes sejam sempre constantes. Se elas são geométricas também são estaticamente similares (SILVA, 2018). A Figura 3.11 mostra um esquema da similaridade em uma panela de aciaria.

Figura 3.11 – Similaridade geométrica em uma panela de aciaria



Fonte: Mazumdar (2009).

Os modelos em escala reduzida, ou seja, menor que seu protótipo, devem seguir uma proporção dada por  $\lambda$  da Equação 3.1.

$$\frac{D_{mod}}{D_{prot}} = \frac{L_{mod}}{L_{prot}} = \lambda \quad (3.1)$$

Onde:

$D_{mod}$  = diâmetro do modelo

$D_{prot}$  = diâmetro do protótipo

$L_{mod}$  = comprimento no modelo

$L_{prot}$  = comprimento no protótipo

$\lambda$  = Fator de escala

A similaridade mecânica tem relação com a similaridade das forças, momentum e velocidades. Ela se subdivide em outras três similaridades: estática, dinâmica e cinemática (MAZUMDAR, 2009).

A similaridade cinemática existe quando em um mesmo intervalo de tempo partículas correspondentes traçam trajetórias geometricamente similares. Já a similaridade dinâmica é relacionada às forças que aceleram e retardam massas que se movimentam (MAZUMDAR, 2009).

Para os estudos em modelos físicos no lingotamento contínuo utiliza-se a igualdade dos números de Reynolds e Froude com o sistema real para representar o critério de similaridade (MAZUMDAR, 2009). No regime de escoamento laminar ou turbulento o número de Reynolds é utilizado como critério, sendo que ele é calculado pela Equação 3.2:

$$Re = \frac{V L \rho}{\mu} \quad (3.2)$$

Onde:

Re= número de Reynolds;

L= dimensão característica (definida de acordo com a configuração do sistema);

V= velocidade média do fluido;

$\rho$ = densidade do fluido;

$\mu$ = viscosidade dinâmica do fluido.

O número de Froude é também um número adimensional, definido pela Equação 3.3:

$$Fr = \frac{V^2}{gL} \quad (3.3)$$

Fr= número de Froude;

V= velocidade média do fluido;

g= aceleração da gravidade;

L= dimensão característica (definida de acordo com a configuração do sistema).

Em estudos sobre fluxo em sistemas de lingotamento contínuo a água é utilizada como a representação do aço, por possuir aproximadamente a mesma viscosidade cinemática do aço a 1600°C, como mostrado na Tabela 3.1 por Elias (2010).

Tabela 3.1 – Propriedades da água e do aço

<b>Propriedade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Água (20°C)</b>	<b>Aço (1600°C)</b>
<b>Viscosidade Dinâmica</b>	kg/m.s	0,855x10 <sup>-3</sup>	6,4x10 <sup>-3</sup>
<b>Massa específica</b>	kg/m <sup>3</sup>	0,988x10 <sup>3</sup>	7,08x10 <sup>3</sup>
<b>Viscosidade Cinemática</b>	m <sup>2</sup> /s	0,86x10 <sup>-6</sup>	0,9x10 <sup>-6</sup>

Fonte: Elias (2010).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

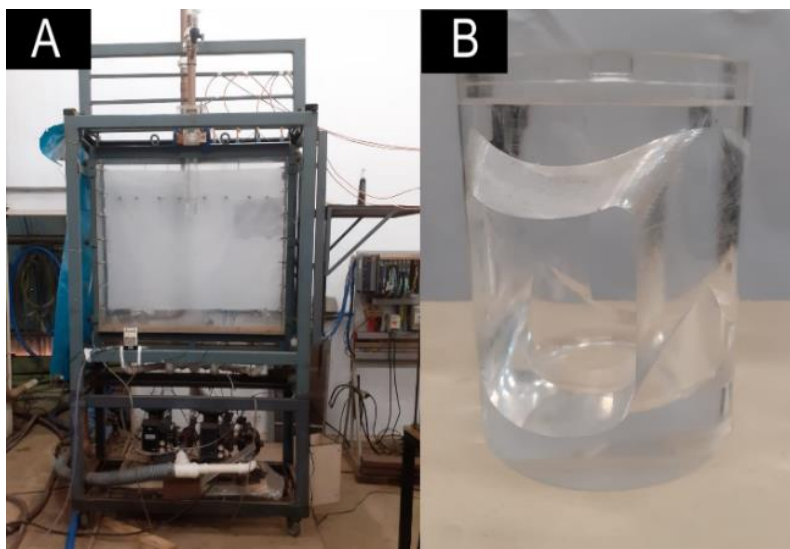
Neste capítulo são descritos os materiais e consumíveis utilizados, bem como todos os métodos aplicados para determinar e garantir a repetibilidade dos ensaios.

### 4.1 Materiais e Equipamentos

O molde da Figura 4.1-a é feito de acrílico e de formato retangular, de forma representativa do modelo industrial. As dimensões são 143mm x 1200mm de secção retangular e 1000mm de altura. O fator de escala ( $\lambda$ ) é igual a 0,56 e atende ao critério de similaridade determinado pelos adimensionais de Froude e de Weber.

A água é bombeada com vazão de 185L/min e 220L/min, através de um modelo em acrílico da válvula submersa, conforme mostrado na Figura 4.1-b. A inclinação das portas na saída da válvula é de  $-15^\circ$ . O ar é injetado por meio de um anel poroso de material polimérico, situado na válvula submersa. As vazões de ar utilizadas nos experimentos foram de 0L/min, 3L/min e 6L/min. O copo (fundo) da *SEN* foi adaptado de forma a permitir a utilização de duas geometrias, distintas quando à profundidade do mesmo.

Figura 4.1 – a) Modelo do molde de lingotamento contínuo de placas, b) Válvula submersa



Fonte: O autor (2023).

Vazão de água e nível de água no molde foram controlados por meio de software especializado, e um PLC (*Programable Logic Controller*). A vazão de ar foi

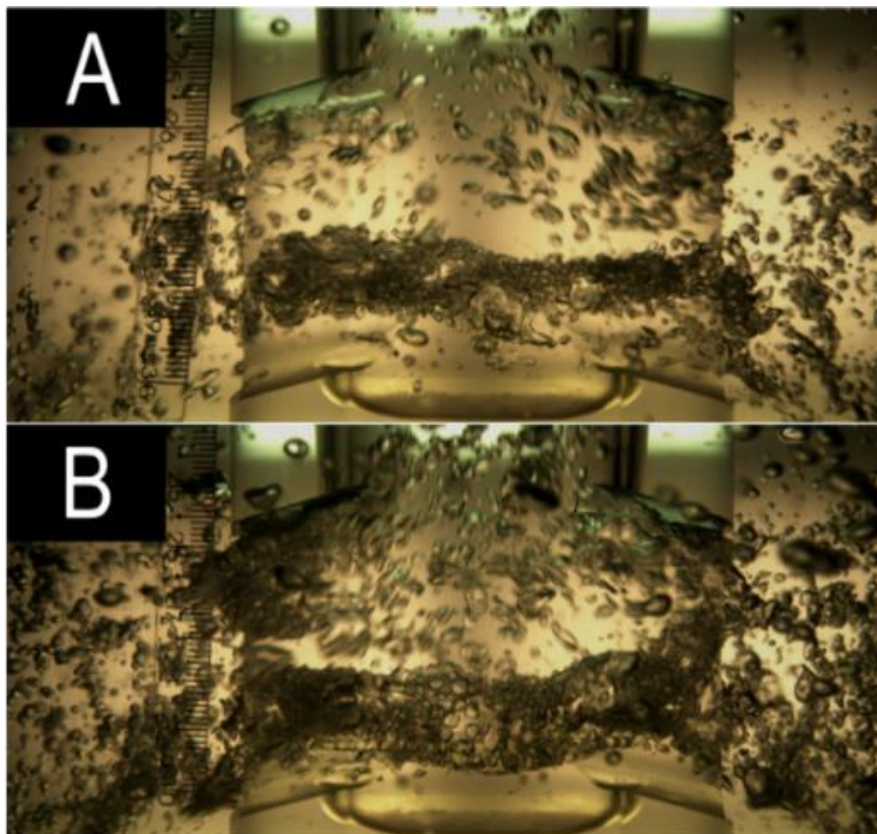


continuamente medida por meio de um medidor de vazão mássica da Omega, modelo FMA-5611.

#### 4.2 Distribuição de Tamanhos de Bolhas

A medição da distribuição de tamanhos e quantidades de bolhas criadas dentro do tanque foi obtida utilizando uma câmera de alta velocidade modelo S-PRI F2, do fabricante AOS TECHNOLOGIES AG. Foi utilizado o programa *Adobe Premiere Pro CC 2014* para obter os frames dos vídeos. Um exemplo da distribuição de bolhas na extremidade da *SEN*, junto às portas de saída, é mostrado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – a) Formação de bolhas na região da válvula submersa com 3L/min de ar, b) Formação de bolhas na região da válvula submersa com 6L/min de ar

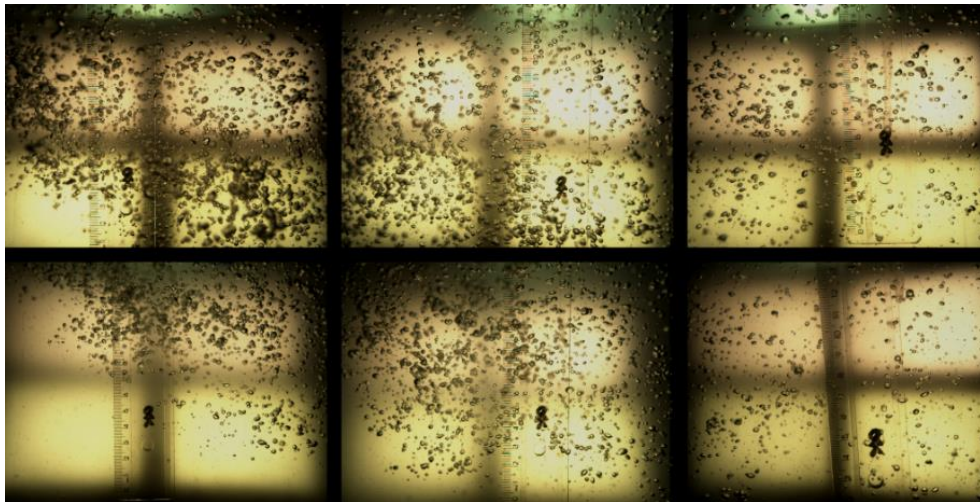


Fonte: O autor (2023).

A Figura 4.3 mostra os frames de algumas regiões do molde, com a injeção de 3L/min de ar, e a Figura 4.4 representa a projeção binária, em tons de preto e branco, a qual é utilizada para medição de tamanhos das bolhas no *software ImageJ*.

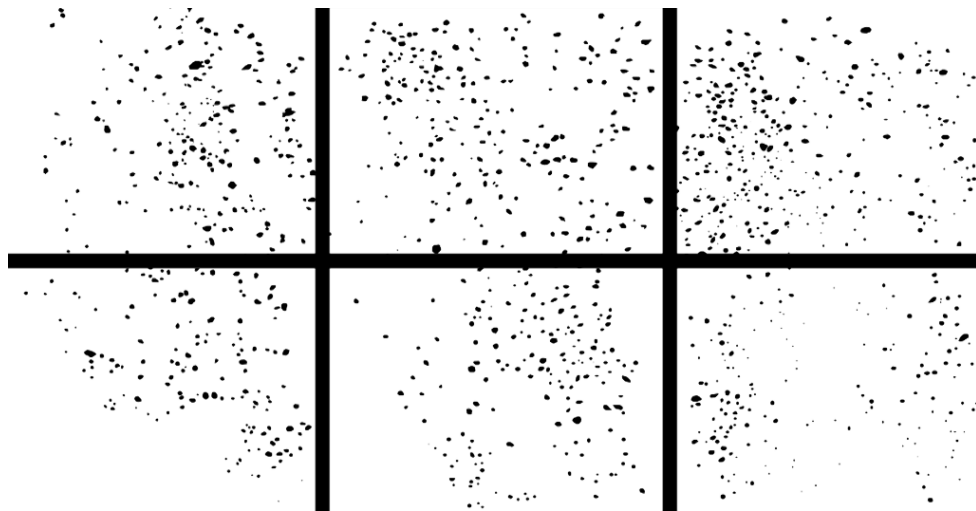


Figura 4.3 – Frames dos vídeos em regiões diferentes



Fonte: O autor (2023).

Figura 4.4 – Imagens binárias feitas manualmente utilizando os frames originais

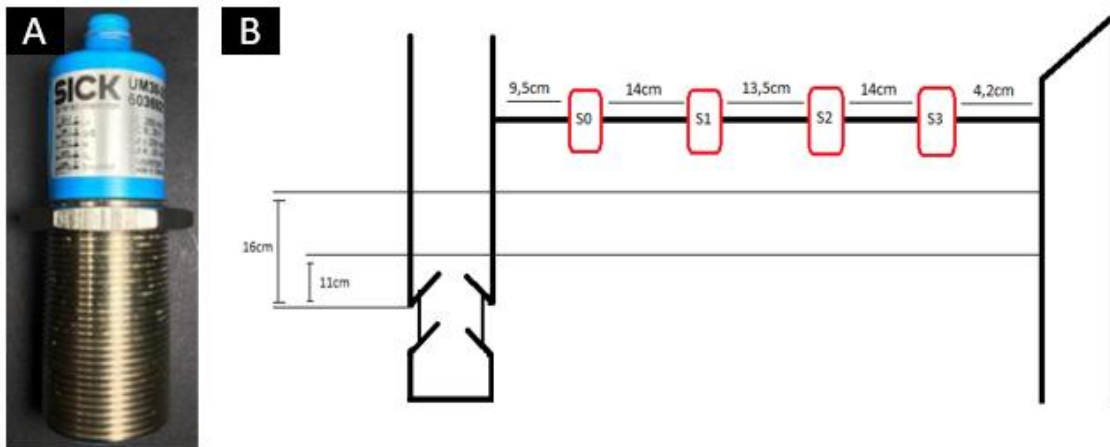


Fonte: O autor (2023).

### 4.3 Turbulência Interfacial

Para a análise da turbulência dentro do molde em diferentes regiões, foram utilizados 4 sensores de ultrassom modelo UM30-21\_118 da marca SICK, sendo eles representados como S0, S1, S2 e S3, sendo o S0 mais próximo da válvula, como mostrado na Figura 4.5. As profundidades de imersão da *SEN* foram de 11cm e 16cm e vazão de água entre 185L/min e 220L/min.

Figura 4.5 – A) Sensor ultrassônico UM30-21\_118; B) Representação da posição dos sensores no molde



Fonte: O autor (2023).

Cada sensor capta uma onda de ultrassom que é refletida na superfície do líquido. O sensor gera uma *fem* que é proporcional ao tempo de tráfego da onda de ultrassom, isto é, a distância emissor – líquido, definida pela Equação 4.1. Após prévia calibração para se obter as constantes de calibração K0, K1, K2 e K3.

$$K = \left( \frac{\text{Altura de teste em mm}}{\text{volts}} \right) \quad (4.1)$$

As distâncias são simplesmente determinadas pela Equação 4.2:

$$\text{Altura} = Kx(\text{Volts}) \quad (4.2)$$

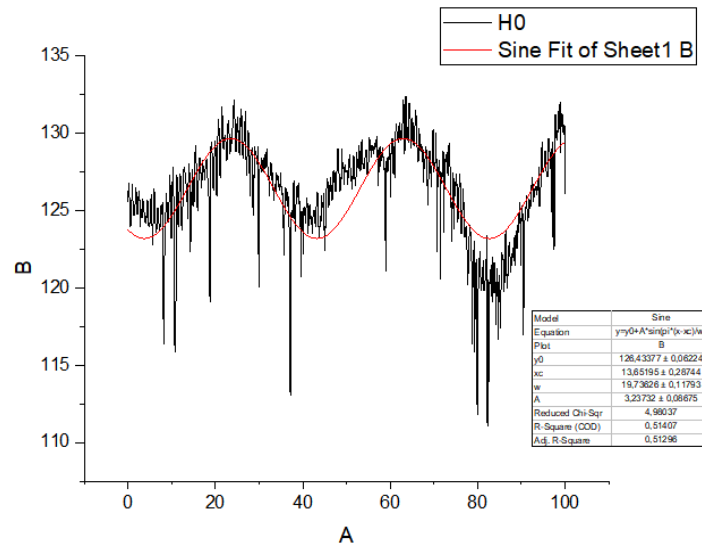
As condições experimentais foram identificadas como:

- A11SG – 11cm de profundidade de imersão da válvula, sem entrada de ar;
- A11G3 – 11cm de profundidade de imersão da válvula, com 3L/min de ar;
- A11G6 - 11cm de profundidade de imersão da válvula, com 6L/min de ar;
- A16SG – 16cm de profundidade de imersão da válvula, sem entrada de ar;
- A16G3 – 16cm de profundidade de imersão da válvula, com 3L/min de ar;
- A16G6 - 16cm de profundidade de imersão da válvula, com 6L/min de ar.

Nestes experimentos a flutuação de nível inclui, além dos efeitos de turbulência, a flutuação advinda do sistema de controle de nível, que produz uma onda quase senoidal. Esta flutuação de controle de nível precisa ser separada da flutuação devido aos processos turbulentos de fluxo. Em primeira análise foi utilizado o programa *Origin* para plotar uma

curva senoidal representativa da flutuação advinda do sistema de controle de nível: a flutuação devida à turbulência seria obtida por diferença. A Figura 4.6, mostra que o ajuste senoidal não foi satisfatório, produzindo flutuações turbulentas irrealistas.

Figura 4.6 – Intervalo de confiança plotado com dados obtidos por ajuste senoidal



Fonte: O autor (2023).

Desta forma a flutuação devido ao processo de turbulência foi então obtida como na técnica de *Reynolds Averaging*, mostrada na Equação 4.3.

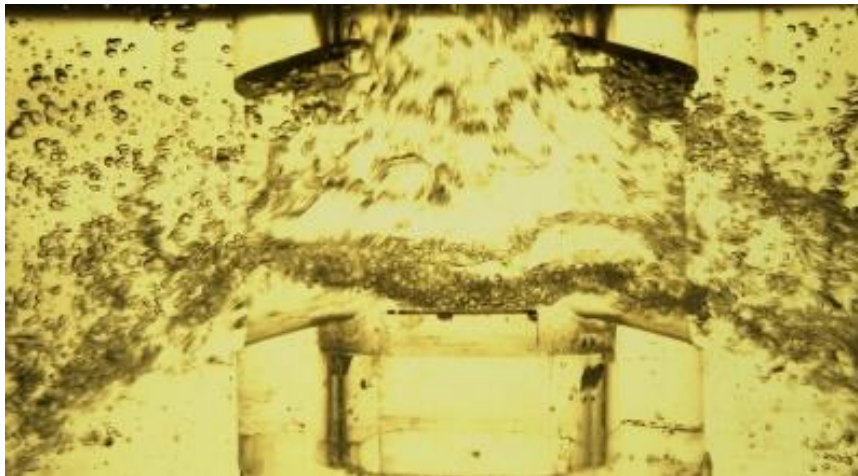
$$A' = A - \bar{A} \quad (4.3)$$

Onde A é o valor instantâneo de distância e  $\bar{A}$  um valor médio, obtido de 5, 7 ou 11 vizinhos mais próximos.

Para à análise dos efeitos de diferentes vazões de água sobre a turbulência superficial foram utilizadas vazões entre 185L/min e 220L/min, sendo a profundidade de imersão da válvula fixada em 11cm e 16cm. Também foram utilizados dois modelos de *SEN*, como se descreve a seguir.

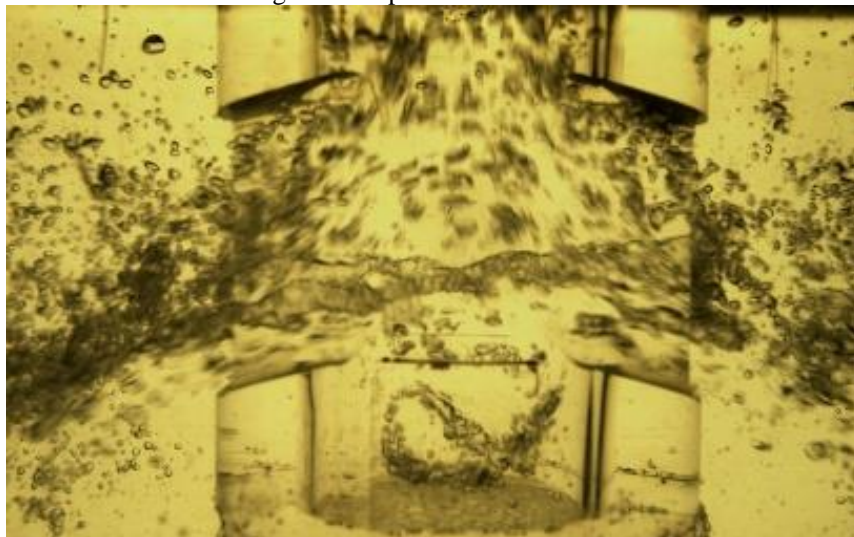
O copo (fundo) da *SEN* foi adaptado de forma a permitir a utilização de duas geometrias, distintas quando à profundidade do mesmo. A Figura 4.7 mostra o copo da válvula original e a Figura 4.8 mostra a válvula com o copo com 2cm adicionais de profundidade.

Figura 4.7 – Formação de bolhas na região da *SEN* original, 3L/min de ar, vazão de 200L/min de água e com profundidade de imersão de 11cm



Fonte: O autor (2023).

Figura 4.8 – Formação de bolhas na região da *SEN* com copo mais profundo, 3L/min de ar, vazão de 220L/min de água e com profundidade de imersão de 11cm



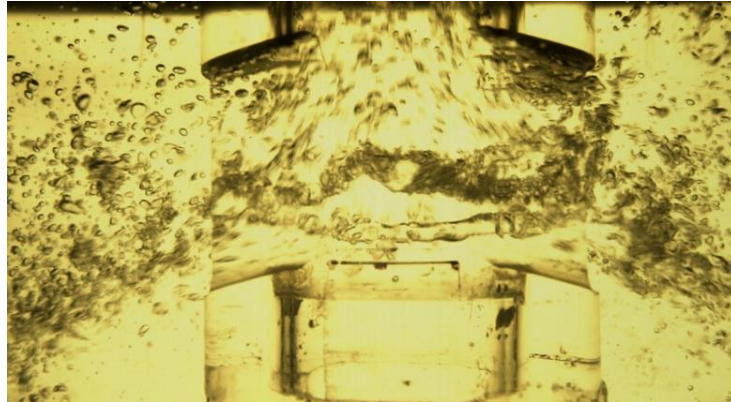
Fonte: O autor (2023).

#### 4.4 Turbulência como Fator de Influência na Formação das Bolhas de Ar

A formação de bolhas em líquidos é um fenômeno complexo e pode ser influenciada por muitos fatores, como a viscosidade do líquido, temperatura, pressão e a presença de outros materiais dissolvidos. A Figura 4.9 exemplifica como a turbulência forma vórtices que ajudam na formação de bolhas de ar.



Figura 4.9 – Formação de bolhas na região da *SEN* original com 3L/min de ar e vazão de 220L/min de água e com profundidade de imersão de 11 cm

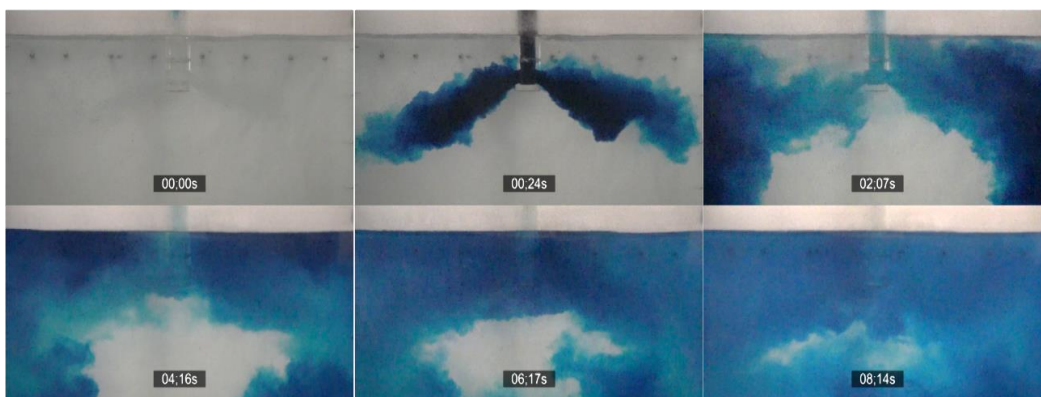


Fonte: O autor (2023).

#### 4.5 Dispersão de Traçador-anilina

A análise do comportamento do escoamento dentro do molde e sua turbulência foi realizada também por meio de experimentos de dispersão de anilina. A dispersão advinda da injeção por pulso foi observada durante período de tempo definido, cerca de 8s, até espalhamento total do corante na água. Um exemplo desta técnica é mostrado na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Espalhamento de tinta dentro do molde com 3L/min de gás, tempo em segundos



Fonte: O autor (2023).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Distribuição de Tamanhos de Bolhas

As medições do tamanho das bolhas foram realizadas utilizando dois frames, selecionados aleatoriamente, como mostrado na Figura 4.4. Os resultados obtidos nesses experimentos sugerem que a distribuição das bolhas no molde não depende da vazão, e que elas aparentam uma forma esférica. A Tabela 5.1 dá suporte a essa afirmação, pela análise da média e do desvio padrão.

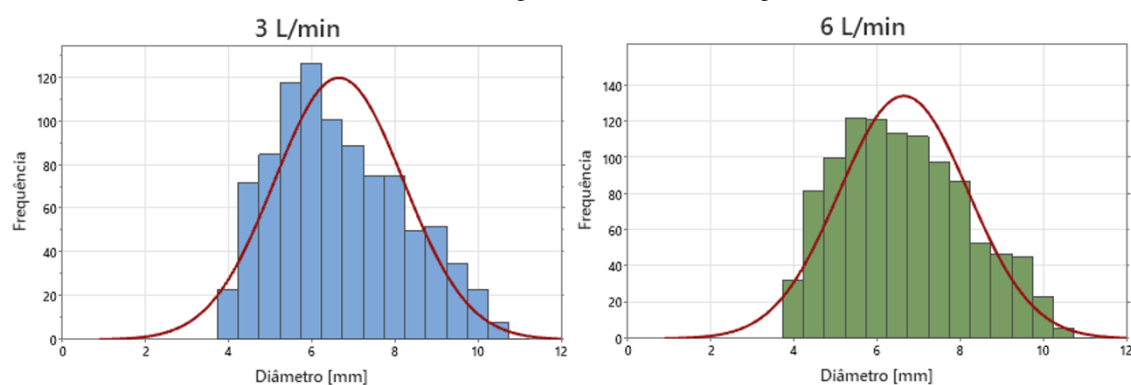
Tabela 5.1 – Média e Desvio Padrão das distribuições de tamanho de bolha no molde, obtidas para vazões de 3L/min e 6L/min, com profundidade de imersão de 16cm da *SEN* original e com vazão de água de 185L/min

Vazão de ar (L/min)	n° de amostras	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)
3	933	6,6684	1,5480
6	1042	6,6580	1,5464

Fonte: O autor (2023).

A Figura 5.1 mostra as distribuições de tamanho das bolhas, representadas por Histograma e Densidade de Probabilidade utilizando a *SEN* original.

Figura 5.1 – Distribuições de bolhas no molde, para vazões de 3L/min e 6L/min, com profundidade de imersão de 16cm da *SEN* original e com vazão de água de 185L/min



Fonte: O autor (2023).

### 5.2 Turbulência Interfacial

A média móvel (*Reynolds Averaging*) dos sensores de nível, com 9 vizinhos mais próximos, levou a resultados satisfatórios. A Tabela 5.2 mostra as flutuações de nível

médias por experimento e a Tabela 5.3 mostra os desvios padrões: os valores de média devem ser próximos de zero se a aplicação do Operador Média alcançou sucesso.

Tabela 5.2 – Flutuação de nível média dos sensores de nível para a *SEN* original para vazões de 3L/min e 6L/min, com vazão de água de 185L/min e profundidade de imersão de 11 cm e 16cm

<b>Imersão (cm)</b>	<b>Ar (L/min)</b>	<b>Flutuação Med-S0</b>	<b>Flutuação Med-S1</b>	<b>Flutuação Med-S2</b>	<b>Flutuação Med-S3</b>
11	0	-0,0003	-0,0002	0,0000	0,0010
11	3	0,0013	-0,0038	-0,0010	-0,0008
11	6	-0,0030	-0,0128	0,0002	0,0007
16	0	-0,0001	0,0002	0,0003	-0,0003
16	3	0,0008	-0,0069	0,0004	0,0001
16	6	0,0013	-0,0008	-0,0002	0,0003

Fonte: O autor (2023).

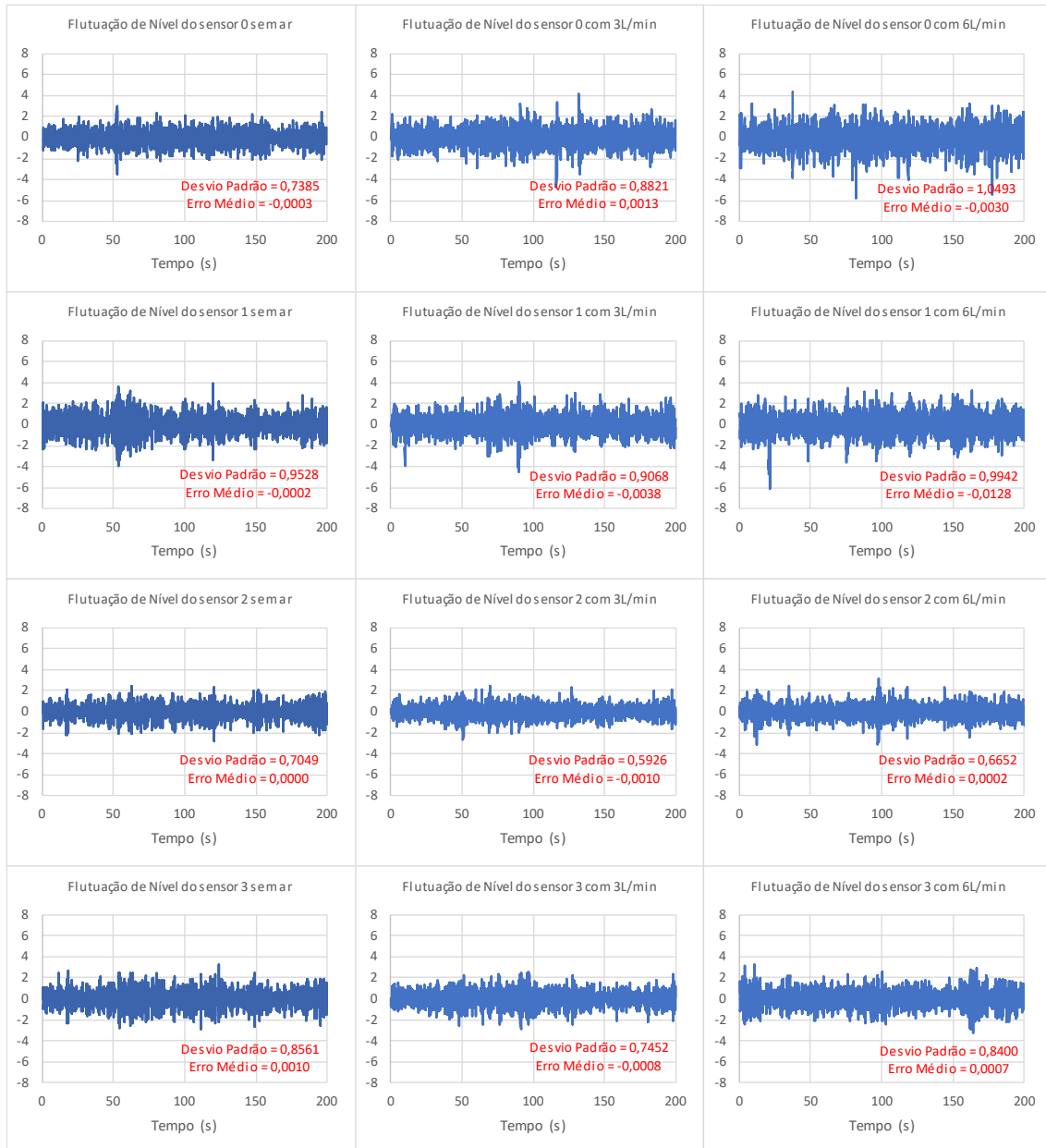
Tabela 5.3 – Desvio Padrão ( $\sigma$ ) dos sensores com vazão de 185L/min, com imersão da *SEN* original de 11cm e 16cm e vazão de ar em três condições: sem ar, 3L/min e 6L/min

<b>Imersão (cm)</b>	<b>Ar (L/min)</b>	<b><math>\sigma</math> S0</b>	<b><math>\sigma</math> S1</b>	<b><math>\sigma</math> S2</b>	<b><math>\sigma</math> S3</b>
11	0	0,7385	0,9528	0,7049	0,8561
11	3	0,8821	0,9068	0,5926	0,7452
11	6	1,0493	0,9942	0,6652	0,8400
16	0	0,5689	0,5050	0,3648	0,5240
16	3	0,8267	0,6273	0,4456	0,6223
16	6	0,8836	0,6804	0,5010	0,6190

Fonte: O autor (2023).

A Figura 5.2 mostra a flutuação de nível devida à turbulência, para o caso de imersão da válvula de 11cm nos quatro sensores e a Figura 5.3 para imersão de 16cm. Nas duas figuras ficam representados os experimentos com *SEN* original, vazão de água de 185L/min, 200s de tempo e em três condições, sendo elas sem ar, com 3 L/m e 6 L/m.

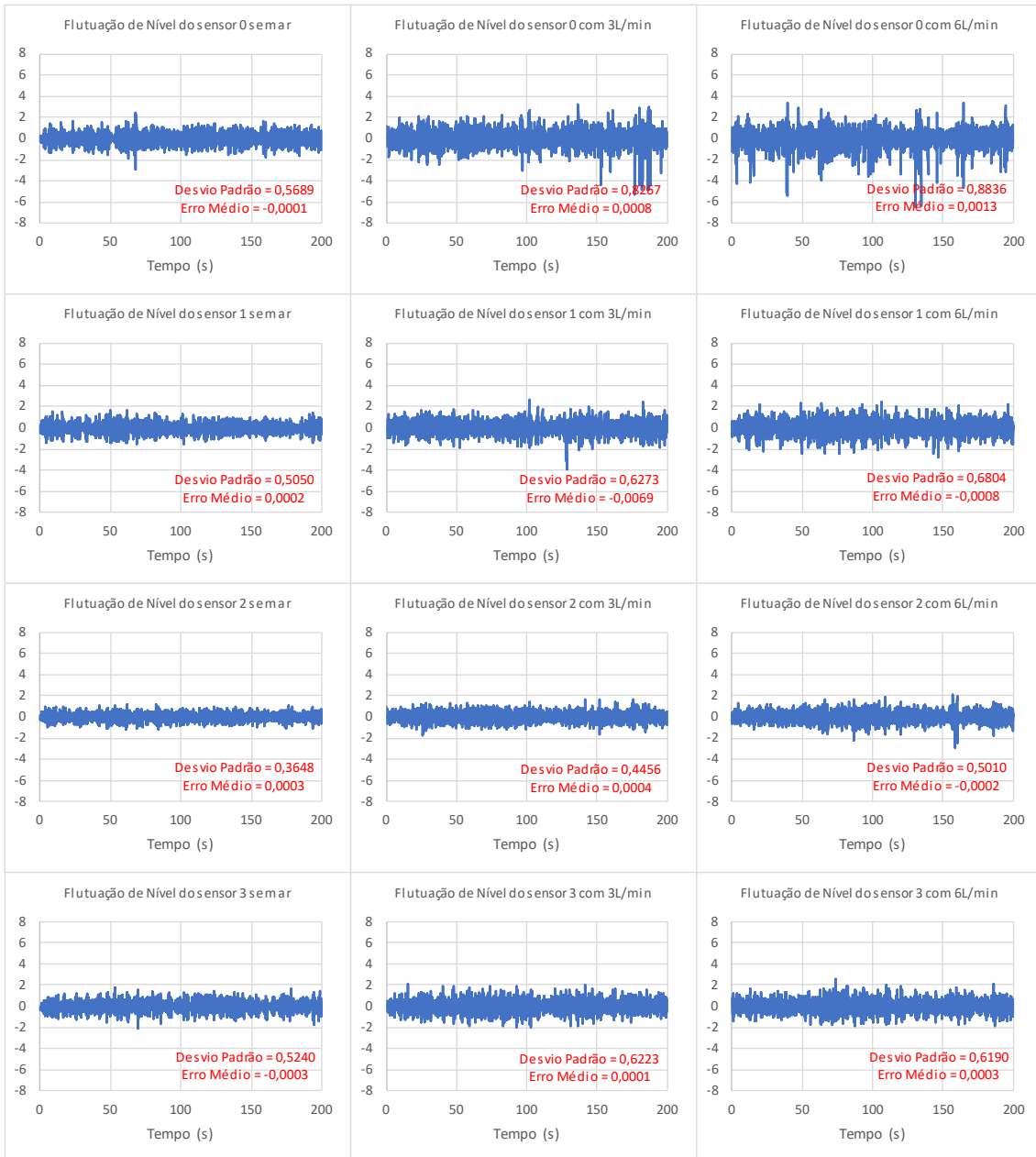
Figura 5.2 – Flutuação de nível com imersão de 11cm, válvula *SEN* original, vazão de água de 185L/min, em três condições de vazão de ar: sem ar, 3L/min e 6L/min



Fonte: O autor (2023).



Figura 5.3 – Flutuação de nível com imersão de 16cm, válvula *SEN* original, vazão de água de 185L/min, em três condições de vazão de ar: sem ar, 3L/min e 6L/min



Fonte: O autor (2023).

A intensidade de flutuação pode ser quantificada pelo Desvio Padrão das flutuações de nível, ver Tabela 5.3. Então se nota que a intensidade de flutuação diminui, como esperado, com a profundidade de imersão da *SEN*, que a intensidade de flutuação aumenta com a injeção de ar, mas que os resultados relativos destas modificações são dependentes da posição do sensor.

Os mesmos experimentos foram realizados com vazão de 220L/min. A Tabela 5.4 mostra as flutuações de nível médias e a Tabela 5.5 mostra os desvios padrões para tal vazão.

Tabela 5.4 – Flutuação de nível média dos sensores de nível para a *SEN* original para vazões de 3L/min e 6L/min, com vazão de água de 220L/min e profundidade de imersão de 11 cm e 16cm

<b>Imersão (cm)</b>	<b>Ar (L/min)</b>	<b>Flutuação Med-S0</b>	<b>Flutuação Med-S1</b>	<b>Flutuação Med-S2</b>	<b>Flutuação Med-S3</b>
11	0	0,0003	-0,0004	0,0000	-0,0176
11	3	-0,0113	-0,0098	0,0009	0,0008
11	6	0,0007	-0,0012	-0,0004	-0,0008
16	0	0,0005	0,0002	-0,0001	0,0000
16	3	0,0004	0,0005	0,0001	-0,0001
16	6	-0,0200	-0,0006	0,0000	0,0001

Fonte: O autor (2023).

Tabela 5.5 – Desvio Padrão ( $\sigma$ ) dos sensores com vazão de 220L/min, com imersão da *SEN* original de 11cm e 16cm e vazão de ar em três condições: sem ar, 3L/min e 6L/min

<b>Imersão (cm)</b>	<b>Ar (L/min)</b>	<b><math>\sigma</math> S0</b>	<b><math>\sigma</math> S1</b>	<b><math>\sigma</math> S2</b>	<b><math>\sigma</math> S3</b>
11	0	0,9245	1,0880	0,7977	0,9709
11	3	1,0396	1,1906	0,7346	0,8392
11	6	1,1538	1,1395	0,7327	0,8351
16	0	0,7719	0,7038	0,4791	0,7033
16	3	0,8888	0,7074	0,5168	0,6465
16	6	1,0234	0,7330	0,5717	0,6684

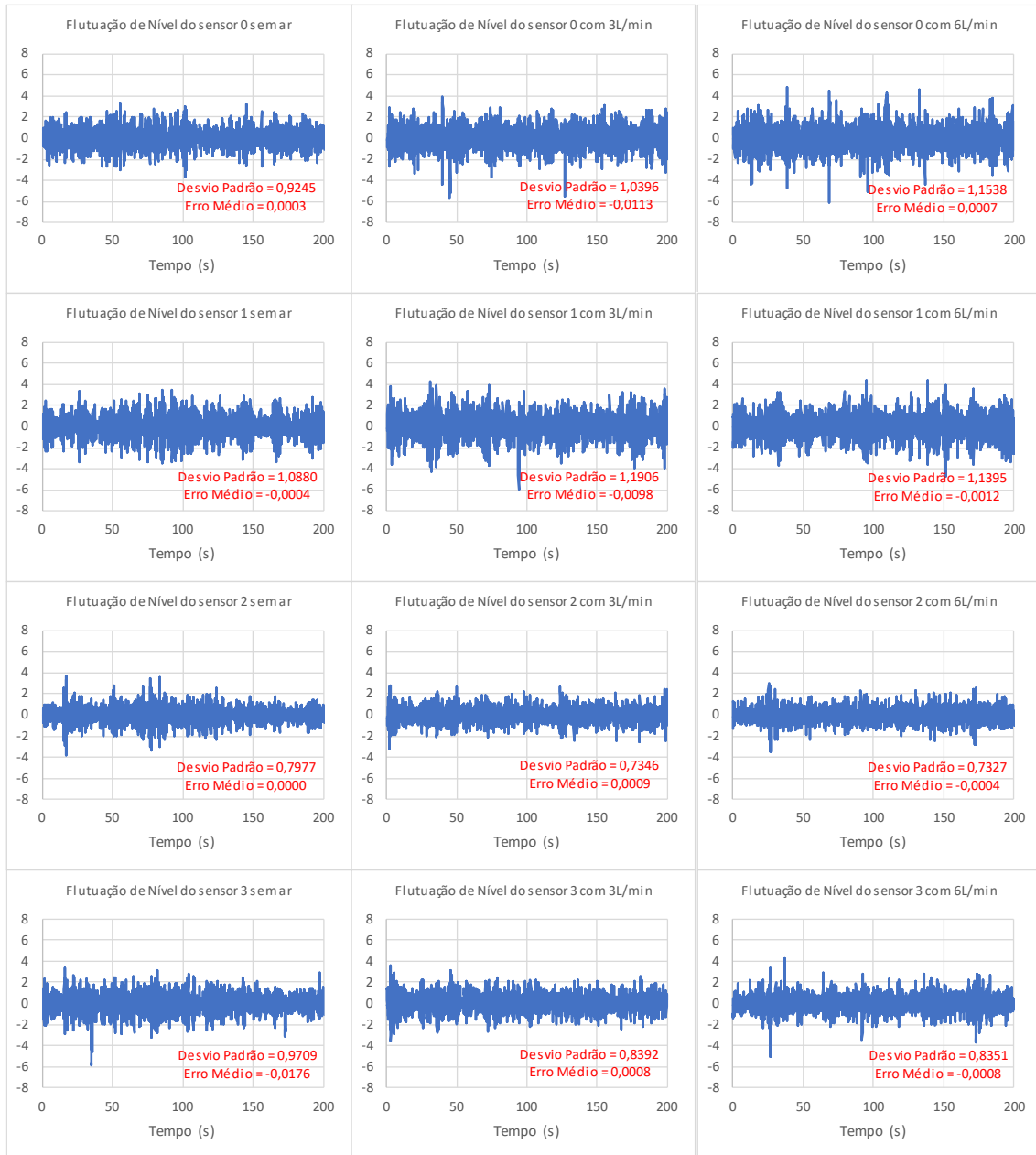
Fonte: O autor (2023).

Pode-se perceber diferenças entre valores do desvio padrão, Tabelas 5.3 e 5.5 principalmente quanto ao sensor S0, sendo devidas à natureza turbulenta na região próxima à *SEN*.

As Figuras 5.4 e 5.5 exemplificam o efeito da profundidade de imersão da *SEN* de 11cm e 16cm, e da vazão de água de 220L/min, sobre a turbulência superficial.

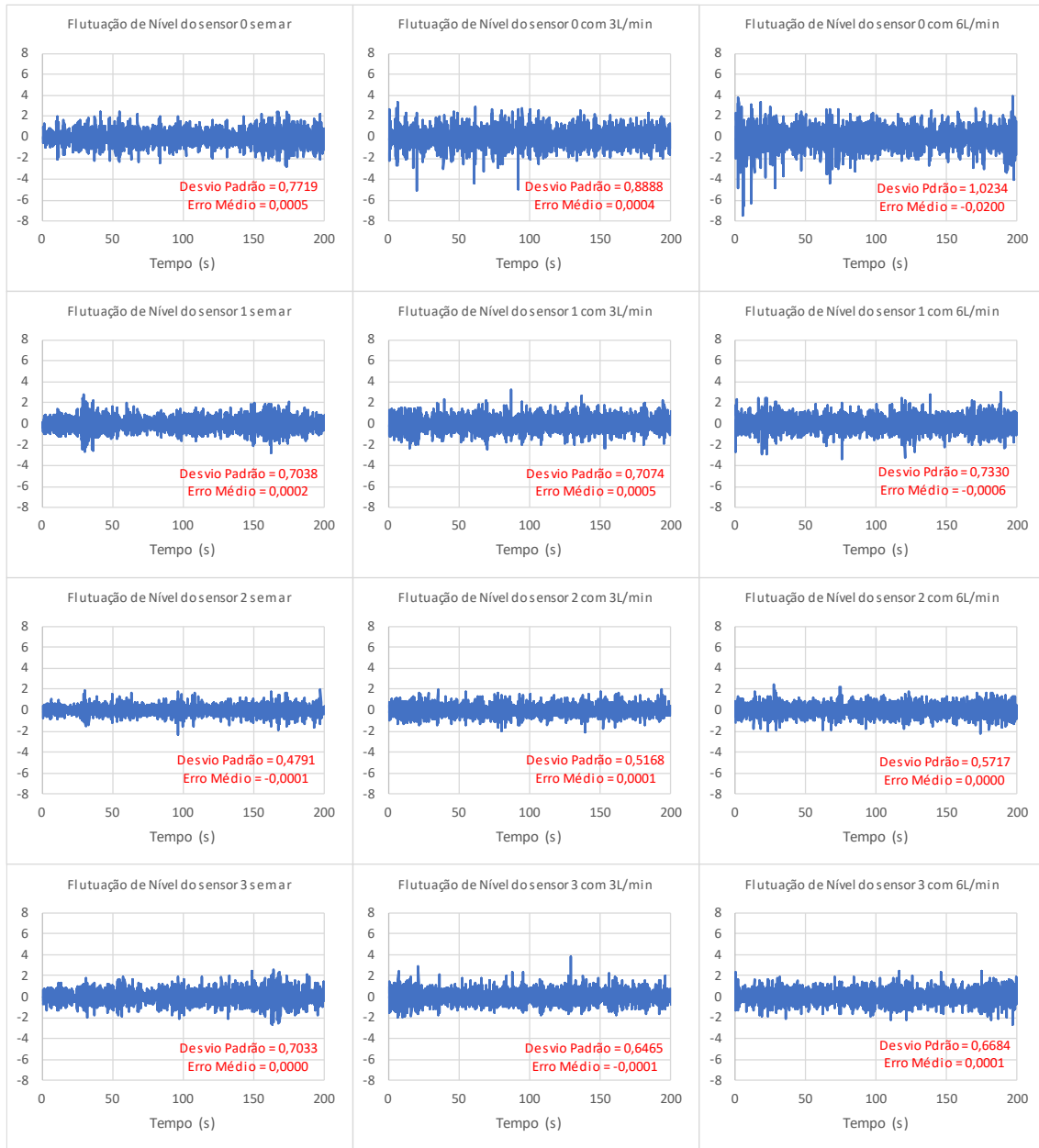
Os valores médios de flutuação de nível obtidos nos experimentos da Figura 5.4 e 5.5 são nulos, em todos os sensores, como mostra a Tabela 5.4.

Figura 5.4 – Flutuação de nível com vazão de 220L/min, imersão da *SEN* original de 11cm e vazão de ar em três condições: sem ar, 3L/min e 6L/min



Fonte: O autor (2023).

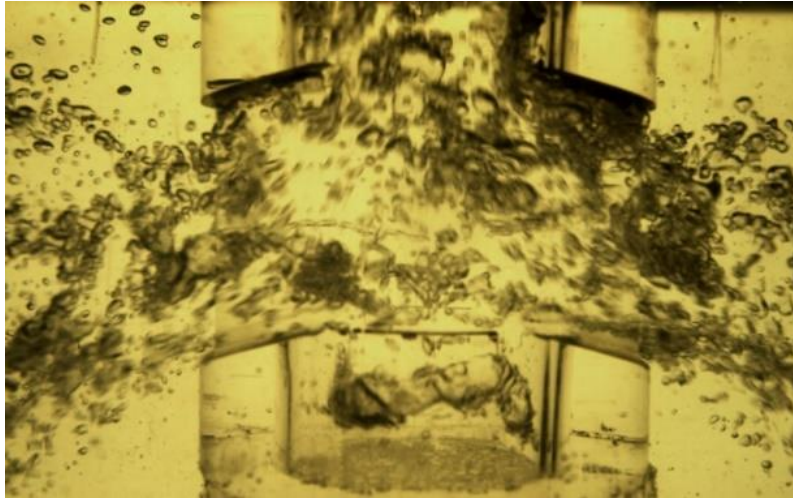
Figura 5.5 – Flutuação de nível com vazão de 220L/min, imersão da *SEN* original de 16cm e vazão de ar em três condições: sem ar, 3L/min e 6L/min



Fonte: O autor (2023).

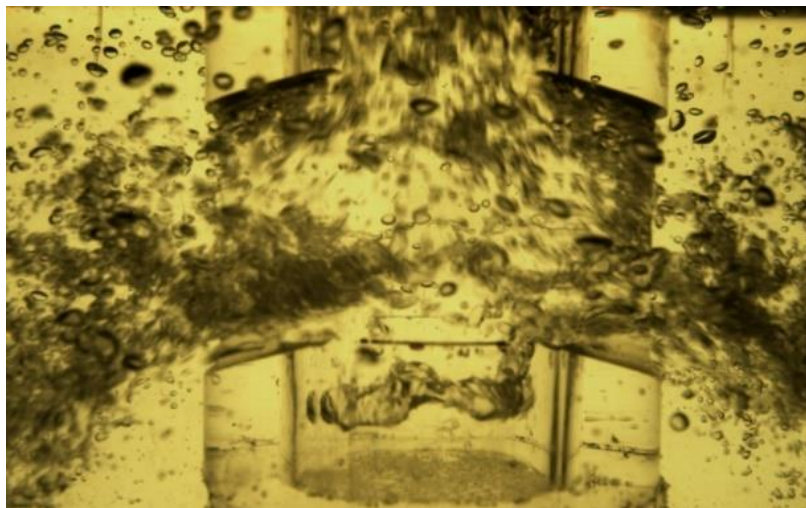
As imagens das Figuras 5.6 e 5.7 mostram como a válvula com copo mais profundo cria vórtices adicionais dentro da *SEN*.

Figura 5.6 – Fluxo turbulento na região da *SEN* com copo mais profundo, imersão de 16cm, 6L/min de ar e vazão de 185L/min de água



Fonte: O autor (2023).

Figura 5.7 – Fluxo turbulento na região da *SEN* com copo mais profundo, imersão de 16cm, 6L/min de ar e vazão de 220L/min de água



Fonte: O autor (2023).

As Figuras 5.8 e 5.9 mostram a flutuação de nível devida à turbulência, para vazão de 185L/min, imersão da válvula de 11cm e de 16cm, considerando a válvula de copo mais profundo. As flutuações de nível médias nestes experimentos são representados na Tabela 5.6 e os valores do desvio padrão na Tabela 5.7.

Tabela 5.6 – Flutuação de nível média dos sensores de nível para a *SEN* com copo mais profundo para vazões de 0L/min, 3L/min e 6L/min, com vazão de água de 185L/min e profundidade de imersão de 11cm e 16cm

<b>Imersão (cm)</b>	<b>Ar (L/min)</b>	<b>Flutuação Med-S0</b>	<b>Flutuação Med-S1</b>	<b>Flutuação Med-S2</b>	<b>Flutuação Med-S3</b>
11	0	-0,0001	0,0001	-0,0003	0,0004
11	3	0,0041	0,0010	-0,0006	0,0004
11	6	0,0022	0,0002	-0,0006	-0,0006
16	0	-0,0002	0,0007	0,0000	-0,0003
16	3	-0,0114	-0,0018	0,0005	-0,0052
16	6	0,0003	-0,0005	-0,0001	-0,0009

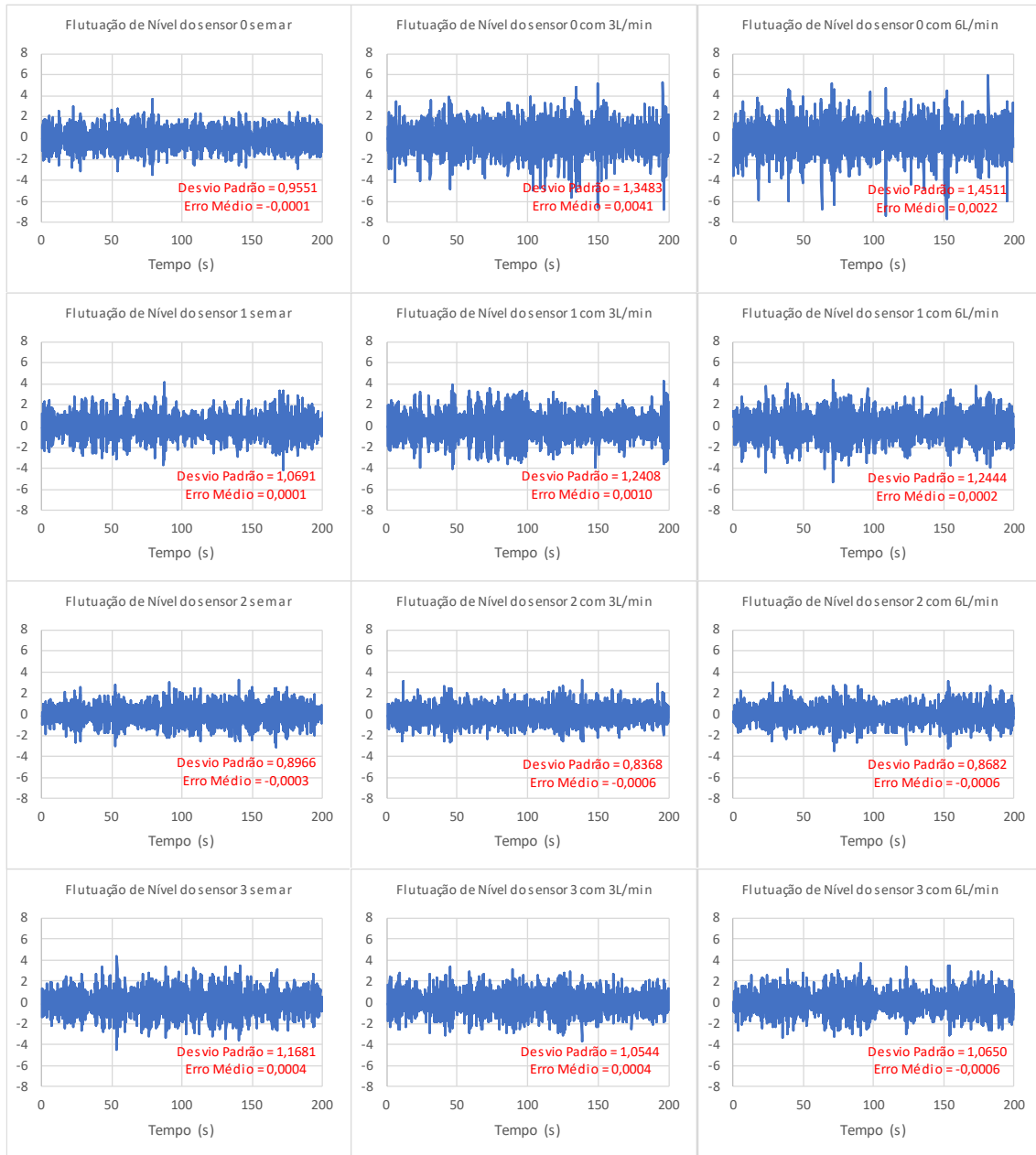
Fonte: O autor (2023).

Tabela 5.7 – Desvio Padrão ( $\sigma$ ) dos sensores com vazão de água de 185L/min, *SEN* com copo mais profundo, imersão de 11cm e 16cm, em três condições de vazão de ar: sem ar, 3L/min e 6L/min

<b>Imersão (cm)</b>	<b>Ar (L/min)</b>	<b><math>\sigma</math> S0</b>	<b><math>\sigma</math> S1</b>	<b><math>\sigma</math> S2</b>	<b><math>\sigma</math> S3</b>
11	0	0,9551	1,0691	0,8966	1,1681
11	3	1,3483	1,2408	0,8368	1,0544
11	6	1,4511	1,2444	0,8682	1,0650
16	0	0,7455	0,6727	0,4871	0,7440
16	3	1,0313	0,8481	0,5640	0,8097
16	6	1,0958	0,8844	0,5917	0,7713

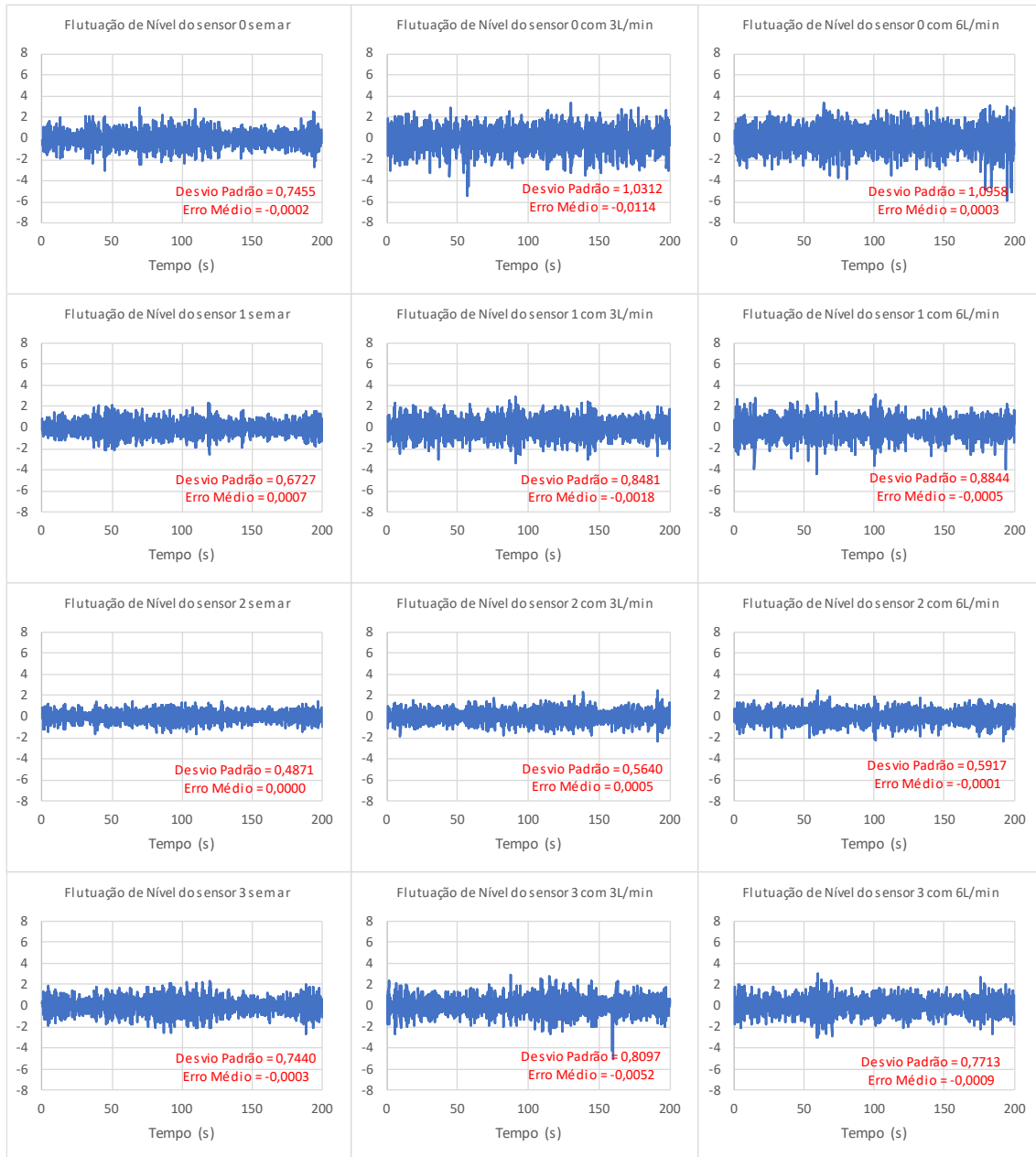
Fonte: O autor (2023).

Figura 5.8 – Flutuação de nível com vazão de 185L/min, imersão da *SEN* com copo mais profundo de 11cm e vazão de ar em três condições: sem ar, 3L/min e 6L/min



Fonte: O autor (2023).

Figura 5.9 – Flutuação de nível com vazão de 185L/min, imersão da *SEN* com copo mais profundo de 16cm e vazão de ar em três condições: sem ar, 3L/min e 6L/min



Fonte: O autor (2023).

As Figuras 5.10 e 5.11 mostram a flutuação de nível devida à turbulência, para vazão de 220L/min, imersão da válvula de 11cm ou de 16cm, considerando a válvula de copo mais profundo. A Tabela 5.8 mostra as flutuações de nível médias e a Tabela 5.9 representa os valores do desvio padrão, todos os experimentos apresentam um período de 200s.



Tabela 5.8 – Flutuação de Nível Média dos sensores de nível para a *SEN* com copo mais profundo para vazões de 0L/min, 3L/min e 6 L/min, com vazão de água de 220L/min e profundidade de imersão de 11cm e 16cm

<b>Imersão (cm)</b>	<b>Ar (L/min)</b>	<b>Flutuação Med-S0</b>	<b>Flutuação Med-S1</b>	<b>Flutuação Med-S2</b>	<b>Flutuação Med-S3</b>
11	0	0,001	0,000	0,001	-0,020
11	3	0,005	-0,001	-0,001	-0,001
11	6	0,007	0,001	0,000	0,002
16	0	0,000	-0,001	0,000	-0,006
16	3	-0,003	-0,019	0,001	-0,006
16	6	-0,007	0,000	0,001	0,001

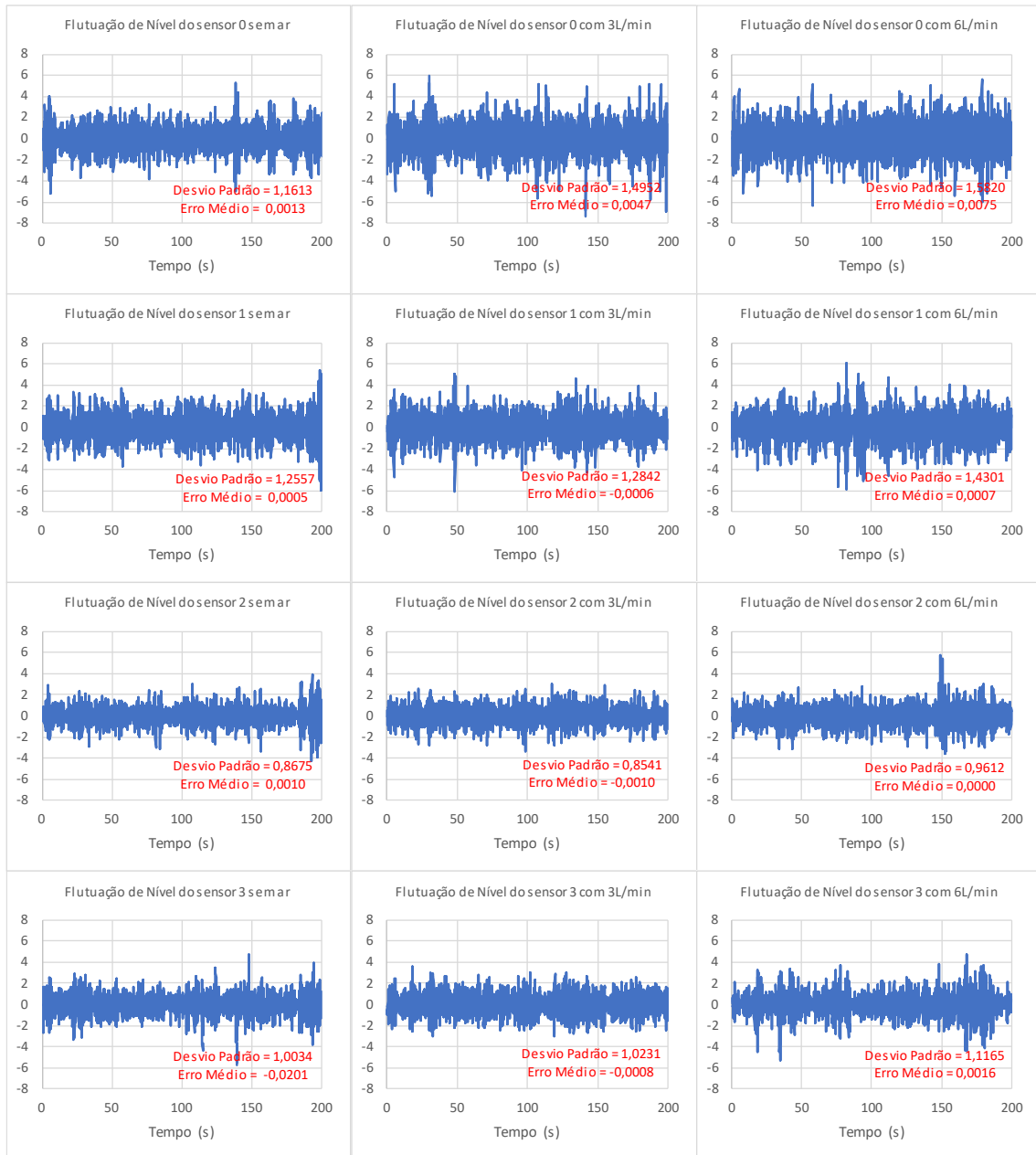
Fonte: O autor (2023).

Tabela 5.9 – Desvio Padrão ( $\sigma$ ) dos sensores com vazão de água de 220L/min, *SEN* com copo mais profundo, imersão de 11cm e 16cm, em três condições de vazão de ar: sem ar, 3L/min e 6L/min

<b>Imersão (cm)</b>	<b>Ar (L/min)</b>	<b><math>\sigma</math> S0</b>	<b><math>\sigma</math> S1</b>	<b><math>\sigma</math> S2</b>	<b><math>\sigma</math> S3</b>
11	0	1,1613	1,2557	0,8675	1,0034
11	3	1,4952	1,2842	0,8541	1,0231
11	6	1,5820	1,4301	0,9612	1,1165
16	0	1,0011	0,8640	0,5840	0,8735
16	3	1,2621	0,9209	0,7466	0,9031
16	6	1,2359	0,9284	0,7103	0,8063

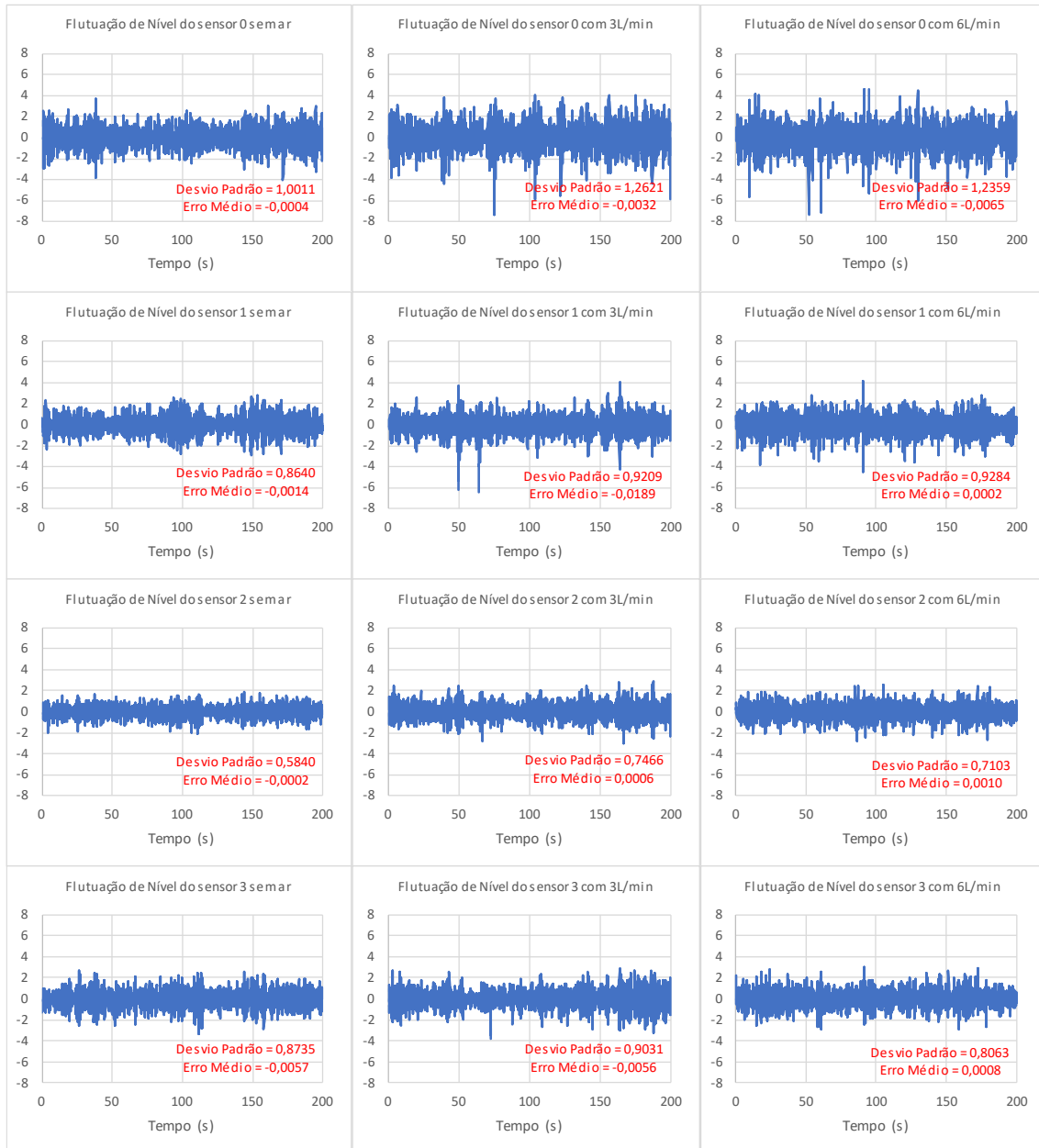
Fonte: O autor (2023).

Figura 5.10 – Flutuação de nível com vazão de 220L/min, imersão da SEN com copo mais profundo de 11cm e vazão de ar em três condições: sem ar, 3L/min e 6L/min



Fonte: O autor (2023).

Figura 5.11 – Flutuação de nível com vazão de 220L/min, imersão da *SEN* com copo mais profundo de 16cm e vazão de ar em três condições: sem ar, 3L/min e 6L/min



Fonte: O autor (2023).

Os resultados obtidos com a válvula com copo mais profundo, sugerem que a *SEN* propicia a formação de vórtices que se propagam para a região do menisco, onde geram turbulências próximas do sensor S0; o que fica evidenciado após comparação das Figuras 5.8 e 5.10 ou das Figuras 5.9 e 5.11, que mostram maior variação do desvio padrão no sensor S0. A Tabela 5.10 reforça tal afirmação.

Tabela 5.10 – Desvio Padrão ( $\sigma$ ) dos sensores com vazão de água de 185L/min e 220L/min, *SEN* com copo mais profundo, imersão de 11cm e 16cm, em três condições de vazão de ar: sem ar, 3L/min e 6L/min

Imersão (cm)	Ar (L/min)	Vazão de água 185L/min				Vazão de água 220L/min			
		$\sigma$ S0	$\sigma$ S1	$\sigma$ S2	$\sigma$ S3	$\sigma$ S0	$\sigma$ S1	$\sigma$ S2	$\sigma$ S3
11	0	0,9551	1,0691	0,8966	1,1681	1,1613	1,2557	0,8675	1,0034
11	3	1,3483	1,2408	0,8368	1,0544	1,4952	1,2842	0,8541	1,0231
11	6	1,4511	1,2444	0,8682	1,0650	1,5820	1,4301	0,9612	1,1165
16	0	0,7455	0,6727	0,4871	0,7440	1,0011	0,8640	0,5840	0,8735
16	3	1,0313	0,8481	0,5640	0,8097	1,2621	0,9209	0,7466	0,9031
16	6	1,0958	0,8844	0,5917	0,7713	1,2359	0,9284	0,7103	0,8063

Fonte: O autor (2023).

### 5.3 Efeitos Específicos da Profundidade do Copo e de Imersão da *SEN*

As Tabelas 5.11 e 5.12 mostram as diferenças, quanto ao nível de turbulência interfacial, entre a *SEN* original e a de copo mais profundo. Fica evidente que a *SEN* de copo mais profundo apresenta um desvio padrão maior que a *SEN* original, o que indica maior grau de flutuação.

Tabela 5.11 – Variação do Desvio Padrão ( $\sigma$ ) dos sensores com vazão de água de 185L/min, *SEN* original e com copo mais profundo, imersão de 11cm e 16cm, em três condições de vazão de ar: sem ar, 3L/min e 6L/min

Imersão (cm)	Ar (L/min)	SEN original				SEN de copo mais profundo				% de variação			
		$\sigma$ S0	$\sigma$ S1	$\sigma$ S2	$\sigma$ S3	$\sigma$ S0	$\sigma$ S1	$\sigma$ S2	$\sigma$ S3	$\sigma$ S0	$\sigma$ S1	$\sigma$ S2	$\sigma$ S3
11	0	0,74	0,95	0,70	0,86	0,96	1,07	0,90	1,17	29%	12%	27%	36%
11	3	0,88	0,91	0,59	0,75	1,35	1,24	0,84	1,05	53%	37%	41%	41%
11	6	1,05	0,99	0,67	0,84	1,45	1,24	0,87	1,06	38%	25%	31%	27%
16	0	0,57	0,50	0,36	0,52	0,75	0,67	0,49	0,74	31%	33%	34%	42%
16	3	0,83	0,63	0,45	0,62	1,03	0,85	0,56	0,81	25%	35%	27%	30%
16	6	0,88	0,68	0,50	0,62	1,10	0,88	0,59	0,77	24%	30%	18%	25%

Fonte: O autor (2023).

Tabela 5.12 – Variação do Desvio Padrão ( $\sigma$ ) dos sensores com vazão de água de 220L/min, *SEN* original e com copo mais profundo, imersão de 11cm e 16cm, em três condições de vazão de ar: sem ar, 3L/min e 6L/min

Imersão (cm)	Ar (L/min)	SEN original				SEN de copo mais profundo				% de variação			
		$\sigma$ S0	$\sigma$ S1	$\sigma$ S2	$\sigma$ S3	$\sigma$ S0	$\sigma$ S1	$\sigma$ S2	$\sigma$ S3	$\sigma$ S0	$\sigma$ S1	$\sigma$ S2	$\sigma$ S3
11	0	0,92	1,09	0,80	0,97	1,16	1,26	0,87	1,00	26%	15%	9%	3%
11	3	1,04	1,19	0,73	0,84	1,50	1,28	0,85	1,02	44%	8%	16%	22%
11	6	1,15	1,14	0,73	0,84	1,58	1,43	0,96	1,12	37%	26%	31%	34%
16	0	0,77	0,70	0,48	0,70	1,00	0,86	0,58	0,87	30%	23%	22%	24%
16	3	0,89	0,71	0,52	0,65	1,26	0,92	0,75	0,90	42%	30%	44%	40%
16	6	1,02	0,73	0,57	0,67	1,24	0,93	0,71	0,81	21%	27%	24%	21%

Fonte: O autor (2023).

De forma geral, as variáveis tipo de válvula, profundidade de imersão, vazão de ar e vazão de água, tendem a modificar o comportamento e o fluxo dentro do molde. As regiões mais afetadas pelos vórtices e turbulência são as regiões dos sensores 0 e 1.

Numa comparação entre as *SEN*'s considerando vazão de água de 185L/min ficam evidenciadas as seguintes informações:

- 1- Sem vazão de ar e com profundidade de 11cm e 16cm, a região que apresenta maior variação em nível de turbulência é a do sensor 3;
- 2- Com vazão de ar de 3L/min, 6L/min e profundidade de imersão de 11cm a região mais afetada é a do sensor 0;
- 3- Com vazão de ar de 3L/min, 6L/min e profundidade de imersão de 16cm a região mais afetada é a do sensor 0.

Já considerando vazão de água de 220L/min, tem-se as seguintes informações:

- 1- A região do sensor 0 é a mais afetada quando a profundidade de imersão da *SEN* é de 11cm;
- 2- Observa-se alta variação entre as regiões mais afetadas quando a imersão da *SEN* é de 16cm.

De maneira geral, é observado que um aumento na vazão tanto do líquido quanto do gás resulta em níveis mais elevados de turbulência interfacial. No entanto, é importante ressaltar que a presença da *SEN* com uma imersão mais profunda tende a atenuar essa turbulência. Nesse contexto, quanto maior a imersão da válvula submersa, menor tende a

ser a agitação e a turbulência na interface metal/escória, apesar do incremento na vazão do fluido.

#### 5.4 Análise de Correlação

Um resumo dos dados de todos os experimentos é mostrado na Tabela 5.13. A Análise de Regressão (*stepwise*) indica quais os fatores mais influem sobre a flutuação, por sensor, como se mostra na Tabela 5.14.

Tabela 5.13 – Valores de nível de turbulência interfacial em função dos parâmetros: PC (Profundidade do copo), Q (Vazão de água), PI (profundidade de imersão da *SEN*), Gás (Ar); Sx (Desvio Padrão do sensor)

PC (mm)	Q (L/min)	PI (cm)	Gás (L/min)	S0	S1	S2	S3
0	185	11	0	0,738	0,953	0,705	0,856
0	185	11	3	0,882	0,907	0,593	0,745
0	185	11	6	1,049	0,994	0,665	0,840
0	185	16	0	0,569	0,505	0,365	0,524
0	185	16	3	0,827	0,627	0,446	0,622
0	185	16	6	0,884	0,680	0,501	0,619
0	220	11	0	0,924	1,088	0,798	0,971
0	220	11	3	1,040	1,191	0,735	0,839
0	220	11	6	1,154	1,140	0,733	0,835
0	220	16	0	0,772	0,704	0,479	0,703
0	220	16	3	0,889	0,707	0,517	0,646
0	220	16	6	1,023	0,733	0,572	0,668
20	185	11	0	0,955	1,069	0,897	1,168
20	185	11	3	1,348	1,241	0,837	1,054
20	185	11	6	1,451	1,244	0,868	1,065
20	185	16	0	0,745	0,673	0,487	0,744
20	185	16	3	1,031	0,848	0,564	0,810
20	185	16	6	1,096	0,884	0,592	0,771
20	220	11	0	1,161	1,256	0,867	1,003
20	220	11	3	1,495	1,284	0,854	1,023
20	220	11	6	1,582	1,430	0,961	1,116
20	220	16	0	1,001	0,864	0,584	0,874
20	220	16	3	1,262	0,921	0,747	0,903
20	220	16	6	1,236	0,928	0,710	0,806

Fonte: O autor (2023).

Tabela 5.14 – Equação de Regressão sobre as variáveis que influenciam a turbulência dentro do molde

Número	Variável	Sensor	R-sq (adj)	Equação
1	<b>SEN original</b>	S0	95,20%	$0,306 + 0,004062 Q - 0,02748 PI + 0,04610 \text{ Gás}$
		S1	95,14%	$0,993 + 0,004266 Q - 0,07717 PI + 0,01239 \text{ Gás}$
		S2	85,92%	$0,661 + 0,002659 Q - 0,04496 PI$
		S3	82,14%	$0,885 + 0,002176 Q - 0,04344 PI$
2	<b>SEN com copo mais profundo</b>	S0	86,39%	$0,668 + 0,00529 Q - 0,0540 PI + 0,0626 \text{ Gás}$
		S1	95,89%	$1,360 + 0,003447 S0 - 0,08020 PI + 0,02608 \text{ Gás}$
		S2	86,54%	$0,969 + 0,002282 Q - 0,05335 PI + 0,01235 \text{ Gás}$
		S3	82,37%	$1,6300 - 0,05075 PI$
3	<b>Com todas as variáveis</b>	S0	90,67%	$0,336 + 0,01506 PC + 0,004676 Q - 0,04076 PI + 0,05434 \text{ Gás}$
		S1	96,03%	$1,076 + 0,010058 PC + 0,003857 Q - 0,07868 PI + 0,01924 \text{ Gás}$
		S2	89,69%	$0,729 + 0,00776 PC + 0,002470 Q - 0,04916 PI + 0,00876 \text{ Gás}$
		S3	88,00%	$1,100 + 0,01029 PC + 0,001358 Q - 0,04709 PI$

Fonte: O autor (2023).

Os dados da Tabela 5.14, ao considerar exclusivamente a *SEN* original, indicam que todos os sensores são influenciados pela vazão de água e pela profundidade de imersão da válvula. No entanto, é importante observar que a vazão de ar não impacta os sensores 2 e 3. Vazões crescentes de ar e/ou de líquido fazem aumentar o nível de turbulência. Maior a profundidade de imersão menor a intensidade de flutuação.

Analisando os dados da *SEN* com o copo mais profundo, torna-se claro que os sensores 0, 1 e 2 são sensíveis às variáveis de profundidade de imersão da *SEN*, bem como às vazões de água e gás. Como antes, vazões crescentes de ar e/ou de líquido fazem aumentar o nível de turbulência. Maior a profundidade de imersão menor a intensidade de flutuação. No entanto, a região do sensor 3 é unicamente afetada pela profundidade de imersão da válvula.

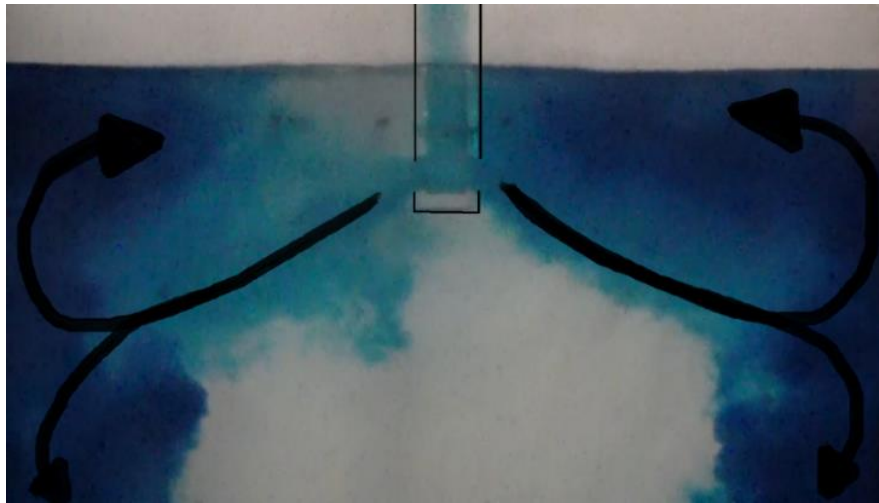
Por último analisando todas as variáveis, o que permite determinar a possível influência da profundidade do copo, se verifica que a maior profundidade deste leva a maiores intensidades de flutuação interfacial.

## 5.5 Dispersão de Traçador-anilina

O padrão de escoamento esperado em um molde de placas, com a utilização de válvula submersa (*SEN*) bifurcada, é o de “Rolo Duplo”, no qual o jato proveniente da *SEN* causa impacto nas paredes estreitas do molde, dividindo-se em dois padrões de

recirculação, sendo um superior e um inferior. É o que mostram os experimentos de dispersão de tinta, ver Figuras 5.12 e 5.13.

Figura 5.12 – Rolo Duplo



Fonte: O autor (2023).

A tinta se espalha rapidamente no molde por conta da turbulência, caracterizada por vórtices que ajudam a transportar matéria e calor para as demais regiões do molde.

Uma sequência de frames, correspondente à dispersão de corante, é mostrada na Figura 5.13. O fluxo é ligeiramente assimétrico, o que pode ser creditado à turbulência e à natureza caótica do fluxo.

Figura 5.13 – Dispersão de corante ao longo do tempo dentro do molde utilizando a imersão de 16cm, válvula *SEN* original, vazão de água de 185L/min e sem vazão de ar



Fonte: O autor (2023).



## 6 CONCLUSÕES

- Sobre a distribuição de tamanhos de bolhas, ao serem comparados os parâmetros estatísticos obtidos nos experimentos com vazão de ar de 3L/min e 6L/min, constatou-se para a vazão de 3L/min uma média de 6,67mm e desvio padrão de 1,55mm, enquanto que para a vazão de 6L/min obteve-se uma média de 6,66mm com um desvio padrão de 1,55mm. Os valores sugerem que a distribuição de tamanho de bolhas no molde é praticamente independente da vazão de gás. Além disso, há uma característica notável na forma das bolhas, que aparentam serem esféricas.
- Nas investigações relativas à turbulência interfacial, os experimentos revelaram padrões bem definidos. Foi constatado que à medida que a profundidade de imersão da *SEN* aumenta, a intensidade da flutuação tende a diminuir, alinhando-se com as expectativas. Por outro lado, a injeção de ar ocasiona um aumento na intensidade da flutuação, principalmente nos sensores mais próximos à *SEN*. Entretanto, é importante ressaltar que os efeitos dessas modificações variam com base na posição do sensor. Uma *SEN* com copo mais profundo resulta na geração de vórtices suplementares dentro da *SEN*. Esses vórtices adicionais desempenham um papel na criação de turbulência adicional na proximidade ao sensor *S0*. Estes efeitos foram parametrizados por meio de regressão *stepwise*.
- O estudo da dispersão do traçador anilina confirma que, a utilização de válvula submersa bifurcada (*SEN*) em um molde de placas, leva a um padrão de fluxo chamado "Rolo Duplo". Nesse padrão, o jato da *SEN* atinge as paredes estreitas do molde, criando duas correntes de recirculação - uma superior e outra inferior - que auxiliam na dispersão das bolhas de ar pelo molde, contribuindo para a captura de inclusões. A rápida dispersão da anilina é resultado da turbulência, com vórtices eficazes no transporte de matéria e calor para várias regiões do molde.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Realizar caracterização de perfil de velocidade com a técnica PIV, utilizando partículas fluorescentes, que permite a leitura de velocidade das partículas na presença de bolhas.
- Avaliar os impactos que a angulação e a geometria do bocal da válvula submersa têm na flutuação de nível dentro do molde de lingotamento contínuo.
- Realizar simulação computacional visando a comparação dos dados do modelo físico com o matemático.

## REFERÊNCIAS

- ARRUDA, J. D. **Análise via modelagem física e matemática da turbulência na interface metal/escória na região do menisco em um molde de lingotamento contínuo de placas.** 2015. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.
- BANDERAS, A. R. Dynamics of two-phase downwards flows in submerged entry nozzle and its influence on the two-phase flow in the mold. **International Journal of Multiphase Flow**, Mexico, v. 31, 643-665p, 2005,
- BARBOSA, F. A. **Modelamento Matemático e Físico do Escoamento do Aço Líquido em Diferentes Projetos de Distribuidor do Lingotamento Contínuo da USIMINAS.** 2002. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.
- BARRAL, C. E. P. **Efeito de parâmetros geométricos e operacionais sobre o comportamento do pó fluxante no molde de lingotamento contínuo de placas.** 2006. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- CONCEIÇÃO, P. V. S. **Rendimento metálico durante vazamento de painéis de aço.** 2018. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.
- COSTA, A. M. **Modelamento matemático da zona de mistura no lingotamento contínuo.** 2003. 52 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
- CRAVO, V. de O. **Modelamento matemático da zona de mistura de aços em lingotamento contínuo.** 2006. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.
- DAUBY, P. H. Continuous casting: make better steel and more of it!. **Metallurgical Research & Technology**, v. 109, n. 2, p. 113-136, 2012.

HE, Q. Observation of Vortex Formation in the Mold of a Continuous Slab Caster. **ISIJ International**, v. 33, n. 2, p.343-345, 1993.

MENDONÇA, A. F. G. Ajuste da lógica de canto do sistema de detecção de rompimento de pele nas máquinas de lingotamento contínuo das aciarias da Usiminas. **49º Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos, ABM**, São Paulo, p.644-655, 2018.

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) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

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

GUTHRIE, R. I. L. Dimensional Analysis and Reactor Design. **Chapter 3 in Engineering in Process Metallurgy**. Oxford: Ed. Clarendon Press, 1993, 151-179p.

HIBBELER, L. C. **Multiphysics modeling of the steel continuous casting process**. 2014. 156 f. Tese (Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering) - University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, 2014.

KWON, Y. Water model and CFD studies of bubble dispersion and inclusions removal in continuous casting mold of steel. **ISIJ international**, v. 46, n. 2, 257-266p, 2006.

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

MILLS, K. C. Looking into continuous casting mold. **Ironmaking and Steelmaking**, London, v. 41, n.4, 242-249p, 2014.

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

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. Behavior of Argon Bubbles during Continuous Casting of Steel - ISS 80th **Steelmaking Conference Proceedings**, Chicago, 375-384p., 1997.

TSUKIHASHI, F. Vortexing Flow Patterns in a Water Model of Slab Continuous Casting Model. **ISIJ International**, v. 45, n. 1, 30-36p., 2005.

YUAN, Q. Turbulent flow and particle motion in continuous slab-casting molds. **Proceedings of the Process Technology ISSTech**, p. 913-927, 2003.

ZHANG, L. Investigation of Fluid Flow and Steel Cleanliness in the Continuous Casting. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 38B, 63-83p., 2007.