



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais



Lucas Neto da Costa

Utilização de Técnicas Automáticas para Medição de Bolhas
Em Modelo Físico De Reatores Metalúrgicos

Ouro Preto
Agosto de 2025

Lucas Neto da Costa

**Utilização de Técnicas Automáticas para Medição de Bolhas
Em Modelo Físico De Reatores Metalúrgicos**

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. Dr. Johnne Jesus Mol Peixoto

**Ouro Preto
Agosto de 2025**



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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Lucas Neto da Costa

Utilização de Técnicas Automáticas para Medição de Bolhas em Modelo Físico de Reatores Metalúrgicos

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

Aprovada em 19 de Agosto 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 04/03/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Johnne Jesus Mol Peixoto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/02/2026, às 16:35, 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 **0964561** e o código CRC **D775D035**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.010552/2025-80

SEI nº 0964561

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: 3135591561 - www.ufop.br

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é uma homenagem a você, familiar ou amigo, cujo apoio foi essencial em minha jornada. Sem vocês, nada disso teria sido possível.

Agradeço a gloriosa Escola de Minas e a UFOP pelo ensino gratuito e de qualidade.

Um agradecimento especial ao meu orientador, John Peixoto, pela dedicação, paciência, valiosas sugestões e críticas construtivas que foram essenciais durante minha graduação e que irei levar por toda minha vida.

Agradeço ao Professor Carlos Antônio da Silva (KOJAK), por incentivar e por todo ensinamento repassado. Agradeço aos amigos que fiz no LaPSim, onde compartilhei grandes momentos durante a iniciação científica e aos amigos da Samarco.

Aos amigos, engenheiros e futuros engenheiros, pelas experiências compartilhadas, com destaque para: Gabriel, Geovane, Hedpo, Humberto, João Rodolfo, Mylla, Pablo Campos, Paulo e Paulo Victor.

"O importante é não parar de questionar. A curiosidade tem sua própria razão de existir."

(Albert Einstein)

RESUMO

Utilizando aparato experimental retangular de acrílico foram empregados dois tipos de refratários porosos nos quais se injetou gás inerte em diferentes vazões. Esses refratários são comumente utilizados para a injeção de gás inerte em válvulas e plugs de lingotamento contínuo e panela, respectivamente. O objetivo do estudo foi caracterizar o tamanho e a velocidade das bolhas formadas a partir da injeção do gás através do refratário. As bolhas foram caracterizadas em um recipiente contendo um volume constante de água. A caracterização das bolhas foi realizada por meio do método *Shadow Sizing* (medição por sombras). Além disso, um dos principais focos deste estudo foi determinar a melhor configuração do sistema *Shadow Sizing* visando possibilitar a caracterização de um maior número de bolhas por imagem, reduzindo ou evitando a medição de bolhas sobrepostas ou fragmentadas. Os resultados demonstraram que a técnica *Shadow Sizing* foi significativamente mais eficiente, detectando até 3.119 bolhas em uma única condição de teste, contra 992 bolhas medidas com o *ImageJ*®. O *Shadow* também identificou uma distribuição mais ampla de tamanhos, com alta concentração de bolhas entre 1,0 mm e 2,0 mm. Já o *ImageJ*® apresentou limitações na detecção de bolhas pequenas, registrando diâmetros médios maiores devido à dificuldade em medir corretamente essas bolhas, resultando em valores maiores em comparação ao *Shadow Sizing*, além de menor precisão em cenários com alta densidade de partículas.

Palavras-chave: Bolhas; Gás Inerte; Shadow Sizing; Refratário, Lingotamento Contínuo.

ABSTRACT

Using a rectangular acrylic experimental apparatus, two types of porous refractories were employed, into which inert gas was injected at different flow rates. These refractories are commonly used for inert gas injection in continuous casting valves and ladle plugs, respectively. The aim of the study was to characterize the size and velocity of the bubbles formed from gas injection through the refractory. The bubbles were characterized in a container filled with a constant volume of water. Bubble characterization was carried out using the Shadow Sizing method. Furthermore, one of the main focuses of this study was to determine the best configuration of the Shadow Sizing system in order to enable the characterization of a larger number of bubbles per image, reducing or avoiding the measurement of overlapped or fragmented bubbles. The results showed that the Shadow Sizing technique was significantly more efficient, detecting up to 3,119 bubbles in a single test condition, compared to 992 bubbles measured with ImageJ®. Shadow Sizing also identified a wider size distribution, with a high concentration of bubbles between 1.0 mm and 2.0 mm. ImageJ®, on the other hand, showed limitations in detecting small bubbles, recording larger average diameters due to the difficulty in accurately measuring these bubbles, resulting in higher values compared to Shadow Sizing, in addition to lower accuracy in scenarios with high particle density.

Keywords: Bubbles; Inert Gas; Shadow Sizing; Refractory; Continuous Casting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1- Aparato experimental	24
Figura 4.2 - Montagem com peças de material refratários porosos utilizados para injeção de gás.....	25
Figura 4.3 - Vista superior do sistema com caixa acrílica para aquisição de imagens das bolhas formadas pela injeção de gás no refratário	25
Figura 4.4 - Esquema <i>Shadow Sizing</i>	27
Figura 4.5- Imagem de calibração do método <i>Shadow</i>	27
Figura 4.6 - Configuração do Sistema de Medição de Sombras (<i>Shadow</i>).....	29
Figura 4.7- a) Exemplo de escala para calibração do programa <i>ImageJ</i> ®; b) Imagem original das bolhas	31
Figura 5.1 – Medição das bolhas <i>shadow</i> vazão 1 L/min	33
Figura 5.2 – Medição das bolhas <i>shadow</i> vazão de 3 L/min	33
Figura 5.3 – Medição das bolhas <i>ImageJ</i> ® vazão 1 L/min	34
Figura 5.4 – Medição das bolhas <i>ImageJ</i> ® vazão 3 L/min	35
Figura 5.5 – Comparativo <i>Shadow</i> e <i>ImageJ</i>	36
Figura 5.6 - Histograma vazão 1 L/min refratário A	38
Figura 5.7 - Histograma vazão 3 L/min refratário A	38
Figura 5.8 - Histograma vazão 5 L/min refratário A	39
Figura 5.9 - Histograma vazão 1 L/min refratário B	41
Figura 5.10 - Histograma vazão 3 L/min refratário B	41
Figura 5.11 - Histograma vazão 5 L/min refratário B	42
Figura 5.12 – Imagens processadas refratário A.....	48
Figura 5.13 – Imagens processadas refratário B	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Diâmetro das Bolhas refratário A.....	44
Tabela 5.2 – Diâmetro das Bolhas refratário B.....	45
Tabela 5.3 – Quantidade bolhas medidas	45

LISTA DE SIGLAS

BOF – Basic Oxygen Furnace;

CTRL – Control;

LaPSim – Laboratório de Pirometalurgia e Simulação;

LED – *light-emiting diode* – Diodo Emissor de Luz;

PIV – Particle Image Velocimetry;

SEN – *submerged entry nozzle* – válvula submersa.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivo Específico	14
3	REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1	Refino Secundário	15
3.2	Injeção de Gás	16
3.2.1	Efeito da injeção de gás	16
3.2.2	Tamanho e distribuição de bolhas.....	17
3.3	Técnica PIV e <i>Shadow Sizing</i>	18
3.3.1	Aplicações método <i>Shadow PIV</i>	20
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
4.1	Aparato Experimental	24
4.2	Método <i>Shadow Sizing</i>	26
4.2.1	Calibração do Sistema de Medição de Sombras (<i>Shadow</i>).....	27
4.2.2	Configuração do Sistema de Medição de Sombras (<i>Shadow</i>)	28
4.3	Medição Manual (<i>ImageJ</i> ®).....	29
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
5.1	Medição das bolhas.....	32
5.1.1	<i>Shadow Sizing</i>	32
5.1.2	<i>ImageJ</i> ®.....	34
5.1.3	Comparativo entre <i>Shadow Sizing</i> e <i>ImageJ</i> ®.....	35
5.2	Análise da distribuição e diâmetros das bolhas.....	37
5.2.1	Distribuição das Bolhas Medidas	37
5.2.2	Diâmetros das bolhas.....	44
5.3	Efeito da vazão de gás no diâmetro das bolhas	48

6	CONCLUSÃO.....	51
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	52
	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	53

1 INTRODUÇÃO

No processo de fabricação do aço é comum o uso da injeção de gás, seja durante o processo de refino secundário, em que o aço líquido será agitado com gás inerte para favorecer a remoção de inclusões, nas panelas para intensificar a homogeneização, ou no lingotamento contínuo para evitar deposição de alumina no sistema de válvulas. A injeção de gás tem como principal benefício estimular a remoção de inclusões e intensificar a homogeneização de temperatura e composição química (Pereira, 2011).

Os reatores metalúrgicos podem ser conceituados como colunas de bolhas formadas a partir da injeção de gás em seu interior. De maneira simplificada, pode-se entender que o reator está preenchido com aço líquido, no qual o gás é introduzido, gerando bolhas que se dispersam pelo líquido, promovendo fenômenos de mistura, homogeneização e transferência de massa (Lopes, 2012).

Para a caracterização das bolhas, novos modelos matemáticos e físicos vêm sendo criados para que se possa utilizar novos métodos para a realização das medidas de uma bolha presente dentro do reator metalúrgico. Métodos utilizando análise visual ou técnicas automáticas de correlação de imagens são empregadas para determinar a velocidade, tamanho e dimensão de uma bolha (Bröder e Sommerfeld, 2007). Conforme for o tamanho do reator se tem a preferência para qual tipo de método será utilizado, consequentemente se tem a existência de diferentes métodos que tem sido escolhido e aplicados para a realização de caracterização de bolhas (Forero, 2012).

O modelamento físico é uma técnica experimental que é utilizada para simular em escala fenômenos complexos, permitindo a visualização e análise de variáveis de difícil acesso em escala real. Nesses casos, o modelamento físico proporciona dados confiáveis para validação de hipóteses, desenvolvimento de equipamentos e otimização de processos, essa abordagem é essencial para

compreender e otimizar processos metalúrgicos de forma segura e econômica (Pereira, 2011).

Assim, o principal objetivo desse trabalho é estudar a formação, tamanho e dimensão das bolhas formadas através da injeção de gás inerte em um modelo acrílico contendo dois tipos de refratários utilizados em válvulas submersas de lingotamento contínuo. É importante frisar que materiais porosos com variadas distribuições de tamanho de poro irão permitir alterar o tamanho da bolha. Busca-se aplicar a técnica de medição *Shadow Sizing* e definir os melhores parâmetros de tratamento de imagens para obter bons resultados com esse método.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Determinar a configuração de sistema *Shadow Sizing* e explorar as possibilidades fornecidas pelo programa para caracterização de bolhas em sistema água/ar em modelos físicos de reatores metalúrgicos.

2.2 Objetivo Específico

- Realizar a revisão da literatura sobre aplicações do sistema *Shadow Sizing*.
- Realizar medições em um sistema com injeção de gás no refratário poroso e comparar com medições manuais utilizando o software *ImageJ*®.
- Identificar a melhor configuração do programa quanto a:
 - Percentual de linearização da imagem
 - Definir parâmetros para medição de partículas,
 - Bolhas com contornos abertos ou com sobreposição.
- Elaborar roteiros para orientar a operação e realização de medição de bolhas em modelos físicos de reatores metalúrgicos com injeção de gás.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Refino Secundário

A indústria siderúrgica tem como característica produzir vários insumos para diversos segmentos industriais, como o uso na indústria automotiva, na construção civil, entre outros. E sempre se busca melhorias para esses processos para que o aço venha a ser o mais refinado possível (Barral, 2016).

É nessa parte do processo conhecido como refino secundário que se tem a última oportunidade de se fazer alterações na composição química do aço (Irons, Senguttuvan e Krishnapisharody, 2015). Após o refino secundário, o aço líquido é conduzido para o lingotamento contínuo, etapa em que o metal é solidificado de forma controlada em lingotes ou placas, garantindo a formação de uma microestrutura uniforme e minimizando defeitos, como inclusões e trincas, que possam comprometer a qualidade do produto.

É durante o processamento de refino do aço que ocorre o ajuste de composição química e da sua temperatura e onde também ocorre a eliminação das impurezas presentes no aço (Araújo, 1997). Para este processo é utilizado dois equipamentos fundamentais para o refino: o forno e a panela (Finardi, 1979 apud Hartmann, 2012).

O desgaseificador a vácuo RH é um equipamento amplamente utilizado na produção de aço, integrando o processo de refino secundário. Sua função principal é remover gases dissolvidos no aço, como hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, em concentrações que não poderiam ser alcançadas por métodos convencionais sem a aplicação de vácuo. Esse processo de desgaseificação contribui diretamente para a melhoria da qualidade do aço, reduzindo a formação de porosidade, inclusões gasosas e defeitos internos, além de favorecer a homogeneização da composição química do metal (Barral, 2016).

3.2 Injeção de Gás

3.2.1 Efeito da injeção de gás

A homogeneização do aço líquido ocorre no final do processo, é nessa etapa que um gás inerte, normalmente gás argônio é injetado através da válvula submersa no lingotamento contínuo, cria-se então uma atmosfera desoxidante na carga metálica (Betega, 2022). No lingotamento contínuo, o borbulhamento de gás se torna essencial no tratamento cinético das reações, fazendo com que ocorra uma restrição das zonas mortas e a retirada de inclusões presentes (Silva *et al.*, 2017). Nesse borbulhamento de gás, utiliza-se em geral argônio ou nitrogênio (Krishnapisharody e Irons, 2010).

Com a injeção de gás no aço líquido pode se notar benefícios, sendo um deles a homogeneização térmica e química do banho metálico, a flotação de inclusões e a melhoria de refino (Krishnapisharody e Irons, 2010; Krishnapisharody e Irons, 2013). Porém se o gás não for bem utilizado no borbulhamento podem aparecer malefícios, como a reoxidação do aço trazendo prejuízos ao produto final (Silva *et al.*, 2017).

As bolhas presentes na agitação do banho metálico para a formação do aço têm grande influência tanto no tempo da mistura quanto na capacidade de flotar as inclusões que aparecerão no reator, esse fluxo de gás está presente no lingotamento contínuo, panela de aciaria e no desgaseificador RH que é caracterizado pela turbulência, tamanho de bolhas presentes (Barral, 2016).

A remoção das inclusões presentes no lingotamento contínuo se dá através da injeção de gás na válvula submersa, isso ocorre, pois, as partículas presentes na liberação do gás interagem com a frente de solidificação do aço, o gás é injetado através da válvula submersa, acarretando a formação de bolhas, para que aconteça a remoção das inclusões presentes por método de flotação, dessa forma é possível obter um aço livre de inclusões com a limpidez necessária. Porém, as grandes bolhas formadas, após saírem da SEN, acabam escapando para a camada de escória presente próxima à válvula, ocasionando

grandes defeitos, como trincas e inclusões na parte superior do produto. Esse fenômeno está associado ao fato de que bolhas maiores têm maior empuxo e menor tempo de permanência no banho, o que reduz sua eficiência na remoção de inclusões e aumenta a probabilidade de aprisionamento na superfície do aço. Além disso, a interação entre essas bolhas e a escória pode gerar instabilidades no menisco, favorecendo a entrada de escória para dentro do aço líquido e, consequentemente, prejudicando a qualidade superficial e interna do produto (Santos Junior, 2020).

3.2.2 Tamanho e distribuição de bolhas

As bolhas formadas a partir do borbulhamento de gás nos reatores metalúrgico possuem papel importante nos processos industriais principalmente na siderurgia. O tamanho da bolha irá interferir diretamente no refino do aço, quanto menor for o tamanho dessa bolha melhor será a eficiência do refino e, portanto, as condições dinâmicas serão satisfatórias. Porém, o comportamento das bolhas quando se identifica o seu crescimento e desprendimento após a injeção do gás, ainda não está completamente esclarecida (Gu *et al.*, 2023). Isso ocorre pelo fato de faltar técnicas de medição que identifique corretamente o diâmetro das bolhas em ascensão nos processos (Barral, 2016).

A presença de bolhas em processos industriais é um fenômeno comum e, nas últimas décadas, microbolhas e nano-bolhas vêm sendo amplamente estudadas e aplicadas em diferentes contextos. Essas bolhas desempenham papel fundamental na formação de nanoestruturas, influenciando propriedades físicas e químicas dos materiais processados (Tong, Liu e Guan, 2014). Em outras áreas da indústria, como na flotação de minérios, a formação de bolhas também apresenta grande relevância, sendo que o tamanho dessas bolhas exerce influência direta sobre o desempenho do processo. Bolhas menores, por exemplo, aumentam a eficiência de separação e afetam variáveis físicas cruciais, como a taxa de captura de partículas, a estabilidade da espuma e a seletividade do processo (Rodrigues, 2004).

A existência de diferentes processos para a formação das bolhas acarreta seu tamanho, ou seja, dependendo do método de produção utilizado esse definirá o tamanho da bolha (Gu *et al.*, 2023). Partindo do princípio de que as bolhas majoritariamente no processo siderúrgico são formadas a partir da injeção do gás, esse tamanho corresponderá em escala milimétrica (Lou e Zhu, 2013). A partir da precipitação do gás dissolvido no líquido a formação de bolhas também estará presente, levando em conta a queda de pressão e o aumento proveniente de temperatura o tamanho da bolha será de microescala ou nanoescala (Gu *et al.*, 2023).

Na maior parte dos casos em que o ocorre o processamento de geração de bolhas, pela injeção de gás a partir do sopro artificial e de alguma reação interna, estará presente na superfície externa da bolha algumas forças que são consideradas como flutuabilidade, a força de cisalhamento e algumas forças de tensão superficial (Gupta, Sharma e Lakhera, 2016). Apesar disso, quando as bolhas são formadas pela injeção de gás o seu tamanho será maior e outras forças estarão presentes, portanto se considera a força de inércia do gás e a força de inércia aplicada (GU *et al.*, 2023).

Desse modo, a formação de bolhas envolve algum tipo de escoamento. Na indústria metalurgia é muito presente os escoamentos multifásicos (Barral, 2016). Esse tipo de escoamento se caracteriza pela liberação simultânea de dois ou mais fluidos (Gavioli, 2017).

Com o crescimento e desprendimento das bolhas geradas após a injeção de gás nos reatores, o método de imagem de sombra (*Shadow Sizing*) começa a ser utilizado para a medição dessas partículas.

3.3 Técnica PIV e *Shadow Sizing*

Com o passar dos tempos foram criando técnicas para que se pudesse ter uma ótima performance e obtenção de resultados em caracterização de bolhas. Atualmente pode-se contar com grandes recursos computacionais que estão disponíveis para a compreensão de problemas industriais e acadêmicos

de maneira mais detalhada possível (Barbi, 2016). Problemas para a caracterização de partículas como bolhas na indústria siderúrgica estão cada vez mais recorrentes, portanto, se dá necessário a utilização de técnicas automáticas para a caracterização dessas partículas, a técnica empregada é restrita a fluxo transparentes, essas técnicas podem fornecer informações confiáveis e dados seguros para a resolução de diversos problemas, fazendo com que o processo de trabalho seja otimizado.

Ferramentas para análises visuais e para correlação de imagens de escoamento multifásico em colunas de bolhas vem sendo utilizadas para se determinar a velocidade e o tamanho da partícula (Broder e Somerfeld, 2007). Conforme se define a forma de trabalho é necessário que se faça a escolha da melhor técnica possível, atualmente diferentes técnicas estão sendo aplicadas para a medição de partículas, como é o caso da velocimetria por imagem de partícula (PIV) e a técnica *Shadow* (Forero, 2012).

Mecanismos que habitualmente vem sendo utilizados para se medir a velocidade de uma bolha integram fotografia que são feitas em alta resolução e dispositivos intrusivos e não intrusivos (Kulkarni e Joshi, 2005).

As técnicas não intrusivas são caracterizadas por se utilizar um traçador e conceber um indicador, sendo inserido no escoamento e transformando o fluxo visível de um aparelho de detecção que está fixado fora do campo de fluxo. O uso desse método possibilita calcular a turbulência das bolhas, a sua medida (tamanho) e a velocidade (Kulkarni e Joshi, 2005). Em medidas que se utiliza métodos intrusivos um material é introduzido na parte do escoamento (Soares, 2005).

Os métodos não intrusivos têm como características representar apenas uma fase em sua propriedade, dessa maneira é inevitável a combinação das técnicas para a medição (Bröder e Somerfeld, 2002).

3.3.1 Aplicações método *Shadow* PIV

Em seu trabalho Forero (2012) utilizou a técnica não intrusiva PIV e a técnica de sombras *Shadow*, como ferramentas para obter os dados necessários do escoamento para uma coluna de bolhas. Van Hout, Barnea e Shemer (2002) realizaram um estudo de comparação para medir a velocidade de transferência que a bolha irá atingir em escoamento pistonados para dissemelhantes inclinações, usando o método de sombras e o método de tratamento onde se obtém imagens em altas definições. A solução obtida pelos dois métodos indica resultados idênticos. Avaliaram ainda a velocidade da bolha utilizando a sua localização e a quantidade de imagens multiplicadas pelo tempo de captura.

No trabalho de Mayor *et al.* (2007) foi utilizado o método de captura de imagem para avaliar a velocidade e dimensão das bolhas. Subsequentemente, utilizou um programa computacional para verificar as imagens e realizar o tratamento. Matamoros (2013, p.64), “segue esta linha, onde as imagens capturadas a altas frequências são tratadas para obter o contorno, volume, área seca, área molhada, área interfacial e comprimento das bolhas no escoamento pistonado horizontal”.

A técnica mais praticada para que se obtenha dados do campo de velocidade de escoamento é conhecida por *Velocimetria* por Imagem de Partículas (*Particle Image Velocimetry* – PIV), nessa técnica a velocidade das partículas presentes no escoamento é estabelecida pela varredura de deslocamento das partículas, em determinado período (Gavioli, 2017). Determinados sistemas dispõem de desvantagens pela baixa frequência de obtenção de dados, isso ocorre, pois, a análise é feita em um campo específico e não em um único ponto (Galliani, 2011).

Os benefícios desse método para a medição de velocidade de partículas, é a possibilidade de se capturar o ordenamento da velocidade espacial em um campo em alta resolução, ao contrário dos métodos clássicos onde se tem a medição por anemometria de fio quente ou a laser. Outra aplicabilidade

importante dessa técnica que ela não é intrusiva, logo a sua medição não será atrapalhada por sensores internos. Tais benefícios tem feito do PIV um método bastante útil na determinação de fluxo instável e turbulento (Matamoros, 2013).

Em seu estudo Raffel *et al.* (2007) citam características desse método, como principais temos que: i) a medida de velocidade é não intrusiva; ii) ocorre também a medição indireta da velocidade de escoamento a partir da velocidade de partículas; iii) as medições são feitas em uma região não em um ponto específico do escoamento, iv) a capacidade para se determinar o vetor das velocidades no escoamento pode ser realizada em três dimensões utilizando planos de iluminação e o sistema de captura das imagens.

Entretanto, tem se uma objeção para a utilização desse método no estudo da quantidade de bolhas, isso deve se a alta absorção dos penetrantes feixes de luz que são gerados pela dispersão da superfície, com isso a realização da técnica limita-se a uma dimensão pequena na seção do fluxo e para pequenos volumes de gás (Bröder e Somerfeld, 2002).

Com os métodos computacionais existentes nos dias de hoje permitem que a engenharia sempre siga avançando, isso não seria diferente na indústria siderúrgica. Utilizando esses métodos é possível o estudo minucioso do comportamento das bolhas em reatores metalúrgicos. Além do método de Velocimetria por Imagem de Partículas (*Particle Image Velocimetry – PIV*) temos também a técnica *Shadow Sizing*, um aprimoramento do método de medição de partículas por imagem.

A técnica de *Shadow Sizing* tem como principal objetivo a medição óptica de partículas, utilizado por meio de uma câmera de alta velocidade e com alta resolução, onde fornece resultados como a dimensão e velocidade das partículas. Geralmente é utilizado para se ter um aprimoramento nas colunas de bolhas, essas bolhas de ar são geradas a partir da injeção de um determinado gás e logo após ocorre a obtenção das imagens, onde um feixe de luz é direcionado para a coluna de estudo e imagens são captadas pela utilização das

câmeras de alta velocidade. Após a captação das imagens começa o seu processamento, onde com o auxílio de um algoritmo se obtém as dimensões das partículas, definindo também a velocidade e o seu contorno (Oliveira, 2009).

Esse método também é utilizado para detectar partículas e se fundamenta na diferença que os contrastes entre a partícula e o meio ocorrem, a técnica atua como um refletor nas partículas (Forero, 2012). O método, porém, independe da forma e do material em que a partícula se encontra, com isso pode se estudar partículas menores que 5 μm . A eficácia desse método está atribuída a sua simplicidade prática relacionada com a percepção completa do processo que está sendo estudado (Constantin, 2002).

Esse processamento das imagens permite a quantificação do tamanho das partículas, as bolhas que são tratadas através desse método obrigatoriamente devem ser colocadas entre a fonte de luz difusiva e câmera digital de alta definição. Os objetos identificados por esse método têm como principais características: “posição”, “velocidade”, “diâmetro equivalente”, “orientação”, “excentricidade”, “fator de forma”, “perímetro” e “momentos de inércia” (Oliveira, 2009).

O propósito que o algoritmo tem no processamento das imagens é identificar as partículas individuais nas imagens e estabelecer seus contornos. Em seguida ao reconhecimento do contorno da partícula, as fotografias são processadas para que se possa então realizar a identificação das propriedades intrínsecas (Oliveira, 2009).

No estudo de Deen, Hjertager e Solberg (2000), foram equiparados os mecanismos de medição multifásica utilizando a técnica PIV, com a finalidade de obter bons resultados a serem utilizados em simulações multifásicas.

Certos autores determinam os resultados a partir da conexão do método de sombras (*Shadow*) e o método PIV. Já Nogueira *et al.* (2003) combinou ao mesmo tempo esses dois métodos de caracterização para definir a forma da

bolha. Nos estudos de Sathe *et al.* (2010), foi mostrado observações sobre a “forma”, “tamanho”, “velocidade” e “aceleração das bolhas” combinando o método *Shadow* e o método PIV.

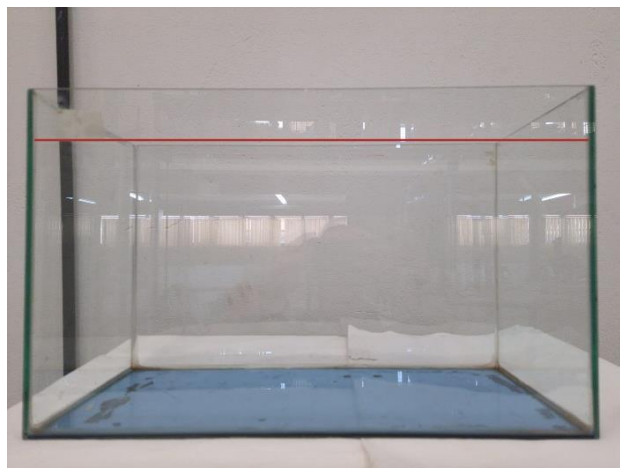
4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa seção serão apresentados os materiais e os respectivos métodos utilizados para se obter a caracterização de bolhas em modelo físico.

4.1 Aparato Experimental

Foi utilizado um aparato experimental retangular de acrílico com dimensões de 48 x 28cm, onde foi adicionado um volume de água a partir de sua base com altura de 23 cm indicado na linha vermelha conforme a Figura 4.1.

Figura 4.1- Aparato experimental



Para a avaliação do comportamento das bolhas, foram utilizados duas peças refratárias com características distintas, conforme ilustrado na Figura 4.2. O Refratário A é constituído integralmente por material poroso, o que permite a passagem uniforme do ar em toda a superfície da base, favorecendo uma distribuição homogênea das bolhas. Já o Refratário B apresenta uma configuração segmentada, composta por duas regiões porosas separadas por um inserto central de material denso, que bloqueia o fluxo de ar nessa faixa intermediária. Os refratários foram cortados em espessura de 23 mm e depois montadas em uma caixa de acrílico. Estas caixas foram colocadas separadamente no interior do reservatório retangular com água em temperatura

ambiente. Na parte inferior das caixas em acrílico se conecta o tubo por onde é injetado o gás (ar comprimido) como demonstrado na Figura 4.3a. Após a realização da montagem de todos os materiais e o posicionamento correto se tem o esquema de montagem final do processo representado pela Figura 4.3b. Foram empregadas as seguintes vazões de ar: 1, 3 e 5 L/min.

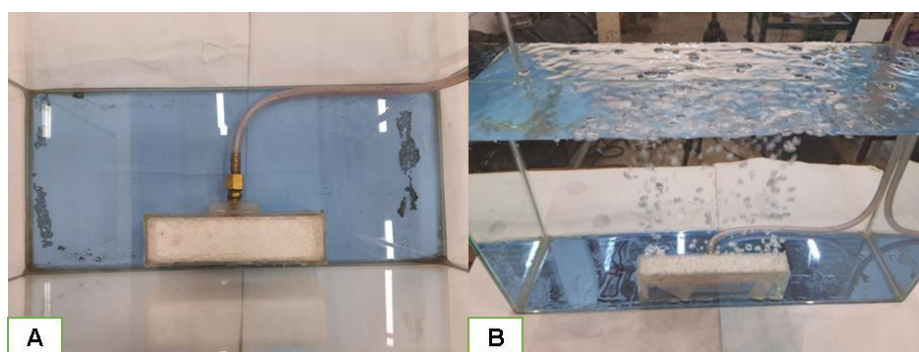
Figura 4.2 - Montagem com peças de material refratários porosos utilizados para injeção de gás.

a) Refratário A; b) Refratário B



Figura 4.3 - Vista superior do sistema com caixa acrílica para aquisição de imagens das bolhas formadas pela injeção de gás no refratário.

a) Conexão do tubo no refratário para injeção do gás; b) Montagem final



4.2 Método *Shadow Sizing*

Para análise do tamanho de bolha foi utilizado o método *Shadow Sizer* a partir do aparelho fabricado pela DANTEC presente no LaPSim DEMET/UFOP. Os testes foram realizados de acordo com esquema apresentado na Figura 4.4 através da montagem de um sistema DANTEC-2D no qual é composto por um laser *Dual power*- 65/15 400mJ sendo o laser ligado ao estrobo produzindo um plano circular duração de pulsos de 4ns, faixa de comprimento de onda entre 1064nm e 532nm, uma câmera CCD *Flow-sense* 2ME. A técnica de medição de sombra (*Shadow*) requer uma boa fonte de iluminação para se obter imagens com alta qualidade, o uso dos pulsos de luz muito curtos permitem que o movimento das partículas seja congelado, garantindo assim um bom contraste na imagem. O posicionamento alinhado permite que o tamanho da área iluminada seja ajustado para corresponder ao campo de visão da câmera e, assim, se beneficiar de toda energia do *ShadowStrobe*, a distância ideal entre câmera e o *Strobe* é de 70cm.

Para todos os experimentos foram adquiridas 100 imagens, com intervalos de pulsos do laser de 3000 μ s e frequência de captura de 10 Hz. O tratamento das imagens foi realizado em software específico (Dantec Dynamics), sendo inicialmente conduzida a busca pela melhor configuração do método *Shadow Sizer*. Embora esse conjunto completo de imagens estivesse disponível, para análise no ImageJ, foram selecionadas aleatoriamente 10 imagens para cada vazão de gás, as quais foram utilizadas na etapa de avaliação, de forma a garantir representatividade e evitar viés na análise.

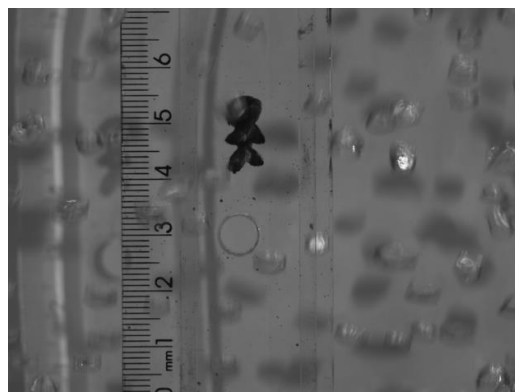
Figura 4.4 - Esquema *Shadow Sizing*



4.2.1 Calibração do Sistema de Medição de Sombras (*Shadow*)

A calibração do sistema de medição *Shadow* tem como objetivo associar a imagem capturada com uma escala em tamanho real. A partir do *software Dynamic Studio* instalado no computador presente no laboratório de Pirometalurgia do DEMET/UFOP, foi feita a calibração da imagem. Em um primeiro momento com a câmera e laser já posicionados foi inserido uma régua no interior do reservatório, como demonstrado na Figura 4.5. Após a realização da calibração foi utilizado o mesmo software para o processamento das imagens, como demonstrado na Figura 4.6, onde se buscou identificar a melhor configuração do sistema.

Figura 4.5- Imagem de calibração do método *Shadow*.



4.2.2 Configuração do Sistema de Medição de Sombras (*Shadow*)

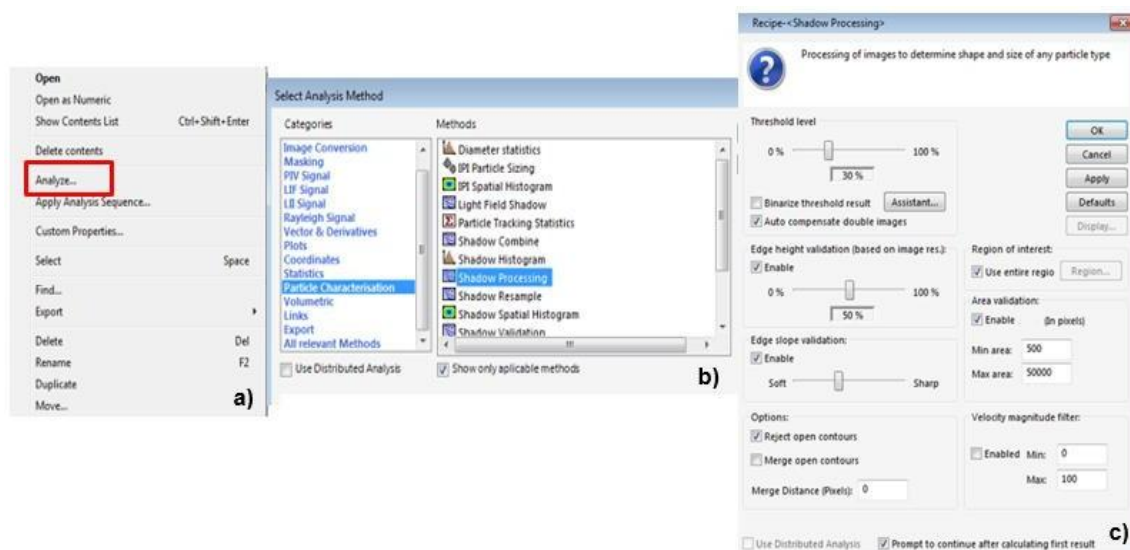
As imagens capturadas foram processadas utilizando o método *Shadow Processing* com o auxílio do software de análise. Primeiramente, clicou-se com o botão direito sobre o conjunto de imagens desejado, o que abriu uma janela de opções. Nessa janela, selecionou-se a opção *Analyze*, conforme mostrado na Figura 4.6a). Em seguida, uma nova caixa de diálogo foi exibida como demonstrado na Figura 4.6b), intitulada *Select Analysis Method*. Nela, navegou-se até a categoria *Particle Characterisation*, localizada na lista lateral esquerda. Após selecionar essa categoria, diversas opções de métodos de caracterização de partículas foram exibidas à direita, entre as quais foi escolhida a opção *Shadow Processing*.

Ao clicar em *Shadow Processing*, foi aberta a janela de configuração do método conhecida como *Recipe - Shadow Processing*. Nesta etapa, as configurações foram realizadas conforme apresentado na Figura 4.6c), respeitando os seguintes parâmetros:

- a) O nível de limiar (*Threshold level*) foi ajustado de forma a permitir a correta diferenciação entre bolhas e fundo;
- b) A opção *Edge height validation* foi ativada, com o valor ajustado para 50%;
- c) A função *Edge type validation* também foi habilitada, com o controle deslizante configurado na posição mediana entre *Smooth* e *Sharp*;
- d) Nas opções adicionais, marcou-se *Reject open contours* para eliminar contornos abertos, e a opção *Merge open contours* foi desmarcada;
- e) O filtro de área foi configurado com valores mínimo e máximo de 500 e 50000, respectivamente;
- f) Em seguida, a opção *Use entire region* foi selecionada na aba *Region of interest*, assegurando que todo o campo de imagem fosse considerado na análise.

g) Por fim, os dados foram extraídos e exportados para uma planilha do Excel.

Figura 4.6 - Configuração do Sistema de Medição de Sombras (*Shadow*)



4.3 Medição Manual (*ImageJ*®)

Para analisar o tamanho das bolhas formadas pela injeção de gás no refratário, as imagens capturadas foram tratadas utilizando o programa livre *ImageJ*®. Através de uma rápida calibração, utilizando uma imagem com escala, o programa permitiu calcular a área de várias partículas em uma mesma imagem. As imagens passaram por um tratamento prévio para melhorar o contraste, permitindo a identificação dos diâmetros das bolhas mais facilmente. Para cada vazão de gás, foram analisadas 10 imagens selecionadas de forma aleatória, de modo a garantir a representatividade e reduzir possíveis vieses na avaliação.

A calibração do *ImageJ*® consiste em fornecer ao programa uma distância conhecida de modo a determinar a relação m/pixels na imagem. Para cada imagem, o processo de medição foi resumido em: a, b, c, d, e, f.

a) Inicialmente se fez a calibração do *ImageJ*® utilizando uma régua como demonstrado na Figura 4.7a.

b) Após a realização da calibração a imagem está preparada para que se possa realizar as medidas das bolhas, na Figura 4.7b é mostrado a imagem preparada para as medições.

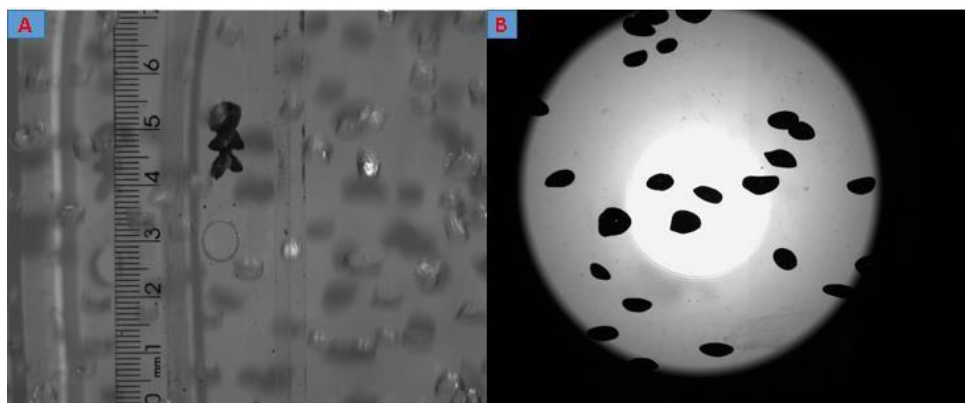
c) Para a realização das medições das bolhas, foi necessário acessar o menu *Image > Type* e converter a imagem para o formato 16-bit. Em seguida, procedeu-se à remoção do plano de fundo por meio do menu *Process > Subtract Background*. Na janela aberta, a opção *Preview* foi marcada, e o parâmetro *Rolling Ball Radius* foi ajustado entre 50 e 500 pixels, de modo a melhorar o contraste da imagem. Após essa etapa, acessou-se o menu *Image > Adjust > Threshold* para aplicar a limiarização. Caso a imagem apresentasse regiões borradas, a etapa de subtração do plano de fundo foi refeita com um valor mais elevado do parâmetro *Rolling Ball Radius*.

d) As marcações nas bolhas foram avaliadas utilizando a ferramenta *Wand (tracing) tool*. Para isso, foi necessário segurar a tecla *Shift* e clicar sobre cada uma das bolhas passíveis de medição. Recomenda-se que essa seleção tenha sido comparada visualmente com a imagem original, especialmente nos casos em que bolhas defeituosas ou contornos irregulares não tenham sido completamente removidos durante o tratamento da imagem.

e) No menu *Analyze > Analyze Particles*, foi aberta uma caixa de diálogo na qual foi definido um tamanho mínimo de 4 mm² (correspondente a 1 mm de diâmetro). A escolha pela medição de bolhas maiores que 1mm se dá pela dificuldade de medidas em bolhas muito pequenas. Na opção *Show*, selecionou-se *Outlines*, permitindo a visualização dos contornos das bolhas identificadas.

f) O resultado foi apresentado em uma tabela, acompanhada por uma imagem contendo os contornos das regiões analisadas. Em seguida, os dados foram extraídos e exportados para uma planilha do excel.

Figura 4.7- a) Exemplo de escala para calibração do programa *ImageJ*®; b) Imagem original das bolhas



5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Medição das bolhas

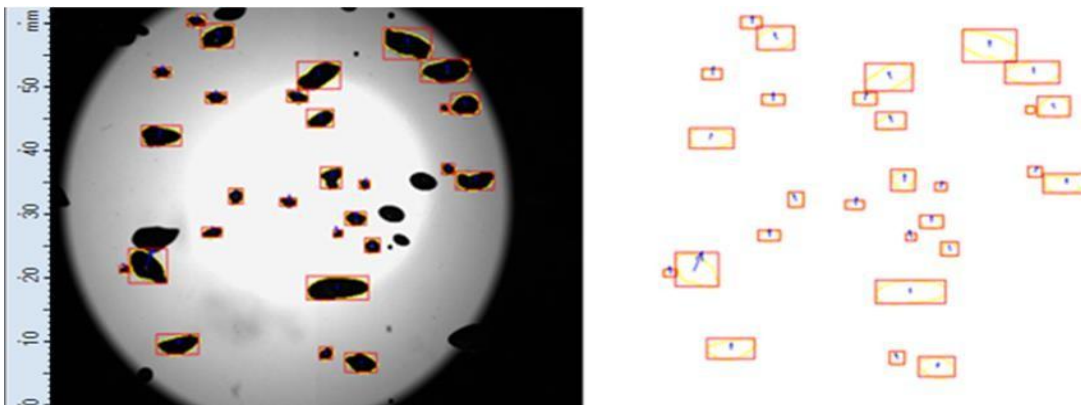
5.1.1 *Shadow Sizing*

A técnica de medição Shadow foi utilizada nesse trabalho para se fazer a medição do tamanho de bolha, essa técnica automática baseia-se nos contrastes entre partícula e meio. Esse sistema atua como um projetor na bolha, eliminando outros fatores, como observado por Constantin (2002) a vantagem dessa técnica acontece pela simplicidade experimental com a percepção do processo.

A Figura 5.1 ilustra uma medição do diâmetro das bolhas, utilizando a técnica de processamento de imagens. É importante destacar que nem todas as bolhas presentes no campo visual foram identificadas pela técnica, sendo estimado que, para a vazão de 1 L/min, aproximadamente 85% das bolhas foram corretamente detectadas e medidas.

De acordo com Carneiro (2021), um dos principais desafios na identificação automatizada de bolhas está relacionado à presença de contornos aglomerados, o que dificulta a segmentação individual dos objetos. Por essa razão, foi necessária a validação manual dos resultados obtidos. O mesmo autor também observou que o software utilizado não foi capaz de distinguir de forma eficiente o contorno individual das bolhas em certas regiões, especialmente em áreas de alta densidade, levando à consideração de aglomerados como uma única entidade durante a análise.

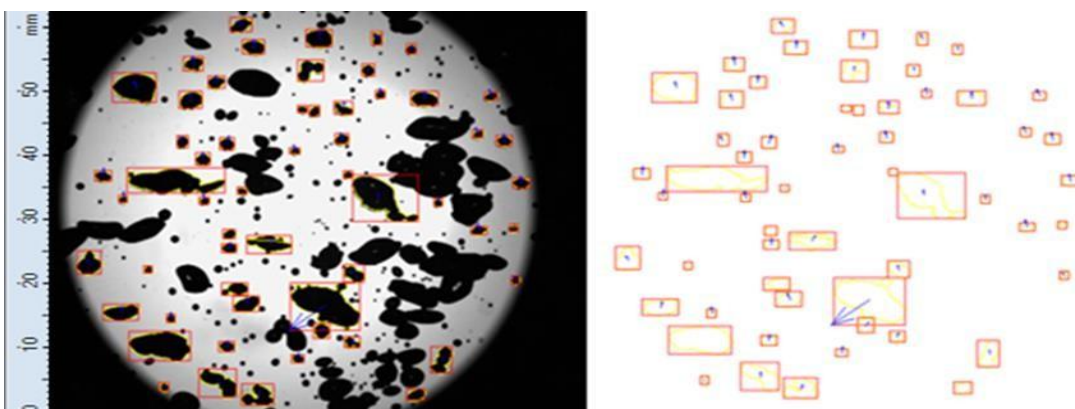
Figura 5.1 – Medição das bolhas *shadow* vazão 1 L/min



Com o aumento da vazão de gás, observa-se um consequente incremento na quantidade de bolhas formadas. Para vazões mais elevadas, conforme apresentado na Figura 5.2, a técnica automática de medição por sombra (*shadow sizing*) foi capaz de identificar um número significativamente maior de bolhas, porém grande parte das bolhas maiores não foram medidas devido a sobreposição.

Além disso, esse aumento no número de bolhas permitiu à técnica registrar diferentes comportamentos dinâmicos, dentre os quais se destacam: colisão seguida de rebote e colisão com coalescência. A identificação desses fenômenos reforça a sensibilidade da técnica automática para captar não apenas a quantidade, mas também aspectos qualitativos relacionados à interação entre as bolhas em escoamentos com maior complexidade.

Figura 5.2 – Medição das bolhas *shadow* vazão de 3 L/min



Em estudo realizado por Sathe *et al.* (2010), foram obtidos dados referentes à forma, tamanho, velocidade e aceleração de bolhas por meio da

técnica de sombra (*shadow sizing*), aplicada em uma coluna volumétrica. Os resultados apresentados por Sathe et al. (2010) demonstram que a técnica de medição por sombra é adequada para a caracterização de partículas em modelos físicos. No entanto, o estudo também ressalta a necessidade de se considerar a sensibilidade do método em relação ao movimento das bolhas, uma vez que flutuações dinâmicas podem interferir na precisão das medições.

5.1.2 *ImageJ*®

Neste trabalho, também foi utilizado o software *ImageJ*® para o processamento das imagens capturadas. O *ImageJ*® é uma ferramenta amplamente empregada em análises de imagens científicas, sendo capaz de realizar diversas operações, tais como o cálculo de áreas, medições lineares, determinação de diâmetros e avaliação de ângulos.

Por se tratar de uma técnica de medição manual, observou-se uma limitação quanto à identificação completa das bolhas, especialmente nas condições de maior vazão de gás. Tal dificuldade está associada, principalmente, ao fato de muitas bolhas apresentarem diâmetros reduzidos ou estarem sobrepostas, o que compromete a precisão da segmentação e torna a medição mais trabalhosa. A Figura 5.3 ilustra detalhadamente o procedimento de processamento realizado com o *ImageJ*®.

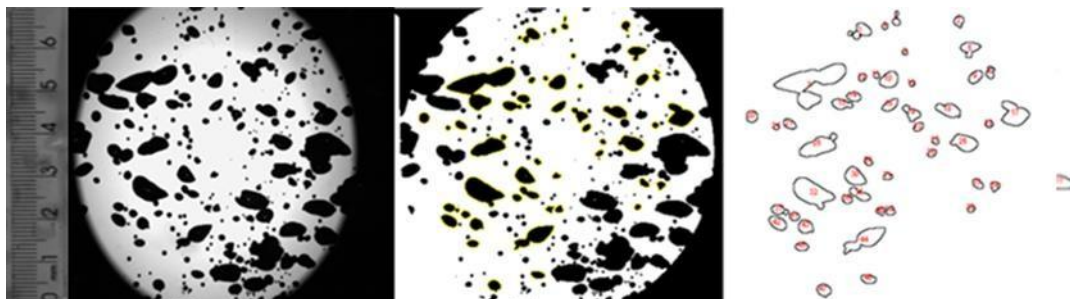
Figura 5.3 – Medição das bolhas *ImageJ*® vazão 1 L/min



Observa-se que, com o aumento da vazão de gás, há uma maior dificuldade na realização da medição das bolhas. Esse efeito está diretamente relacionado ao incremento da velocidade do fluxo, que favorece a formação de um número maior de bolhas, muitas delas com diâmetro reduzido. Essa

combinação de fatores compromete a eficiência da identificação e medição, especialmente em técnicas manuais, como evidenciado na Figura 5.4

Figura 5.4 – Medição das bolhas *ImageJ*® vazão 3 L/min



A diferença pode ser atribuída à dificuldade de realizar medições precisas em bolhas de diâmetro reduzido, especialmente em condições de alta densidade de bolhas. Em seu estudo, Santos (2023) realizou uma comparação entre duas técnicas de medição de bolhas e, apesar das limitações, o *ImageJ*® demonstrou ser mais vantajoso em termos de reprodutibilidade e praticidade.

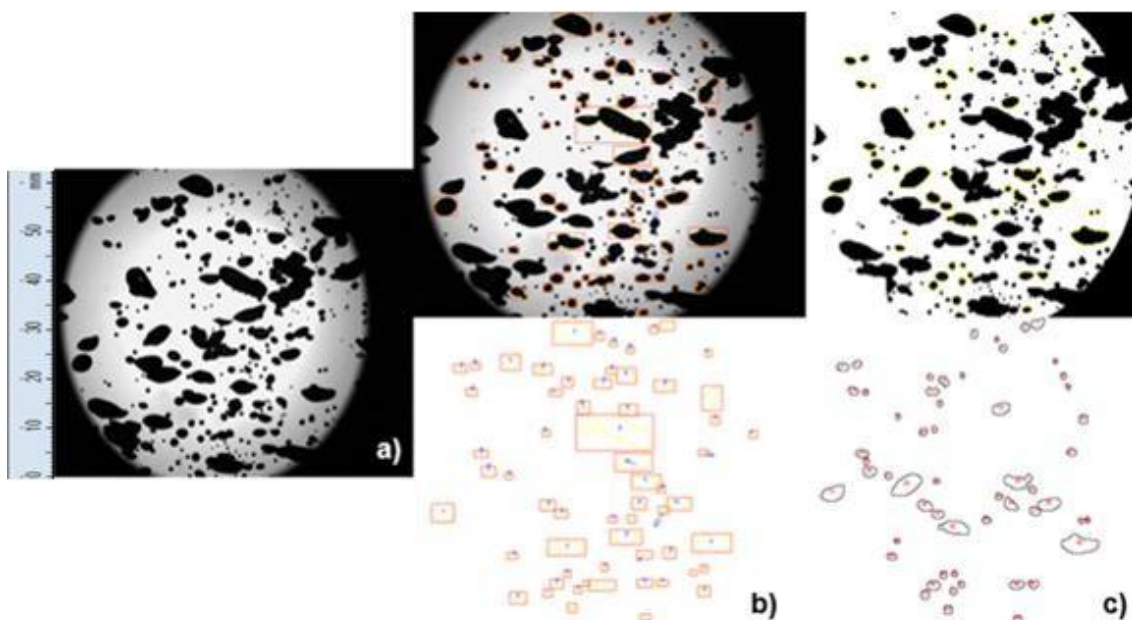
De forma semelhante, Almeida (2019) observou que a técnica de medição manual utilizando o *ImageJ*® tendia a apresentar valores ligeiramente superiores para o diâmetro das bolhas, quando comparada a métodos automatizados. Ambos os trabalhos evidenciam a importância de um controle rigoroso na etapa de processamento das imagens, uma vez que falhas nesta fase podem comprometer a fidelidade dos resultados obtidos.

5.1.3 Comparativo entre *Shadow Sizing* e *ImageJ*

Para ilustrar essa diferença entre os métodos de análise do tamanho de bolhas, utilizou-se um comparativo na vazão intermediária de 3 L/min. Na Figura 5.5 são apresentadas as imagens que demonstram as etapas principais da análise visual: a) mostra a imagem original capturada pela câmera, sem qualquer tipo de processamento; b) apresenta o resultado do processamento automático realizado por meio da técnica *Shadow Sizing*; c) mostra a imagem processada manualmente com o software *ImageJ*. A apresentação conjunta dessas imagens

permite uma comparação direta entre as abordagens e mostra, visualmente, como cada método responde às diferentes condições operacionais.

Figura 5.5 – Comparativo *Shadow* e *ImageJ*
a) Imagem original; b) *Shadow Sizing*; c) *ImageJ*



A Figura 5.5a) mostra a imagem original, sem qualquer tipo de processamento. Nela, observa-se um ambiente com elevada densidade de bolhas e significativa sobreposição, o que dificulta a identificação individual dos contornos. De acordo com Sathe *et al.* (2010), esse tipo de configuração é típico em sistemas com altas taxas de aeração, onde a formação intensa de bolhas leva à perda de nitidez e ao agrupamento visual, tornando a análise direta bastante limitada.

Na Figura 5.5b) é apresentado o resultado da análise realizada por meio do método automático *Shadow Sizing*. Como demonstrado por Carneiro (2021), essa técnica é capaz de detectar rapidamente bolhas pequenas e bem definidas, mesmo em condições dinâmicas. No entanto, o método apresenta limitações quando há sobreposição, já que o algoritmo tende a excluir bolhas grandes ou deformadas, priorizando formas regulares e isoladas.

A Figura 5.5c) representa a medição manual feita *no ImageJ*, na qual realiza a identificação e o contorno individual de cada bolha após o tratamento da imagem. Embora esse método permita certo controle visual, ele se torna problemático em imagens com sobreposição significativa. Como apontado por Almeida (2019), a segmentação manual em condições de alta densidade pode resultar em imprecisão, pois muitas bolhas acabam sendo agrupadas como uma só ou ignoradas devido à dificuldade de separação visual.

É possível concluir que o método automático é mais eficiente na contagem de bolhas pequenas, especialmente em ambientes com alta geração e agitação. Por outro lado, a análise manual, apesar de permitir intervenções mais detalhadas, é limitada em termos de confiabilidade e reprodutibilidade em condições de escoamento intenso, reforçando a importância de escolher o método de análise adequado conforme o regime de operação.

5.2 Análise da distribuição e diâmetros das bolhas

5.2.1 Distribuição das Bolhas Medidas

Como mencionado ao longo deste trabalho, foram utilizados dois tipos de refratários porosos: Refratário A e Refratário B. Nesse contexto, o tamanho das bolhas torna-se um fator relevante, considerando a importância dos equipamentos de escoamento gás-líquido, nos quais a transferência de massa está diretamente relacionada à área superficial das bolhas. Segundo Lage *and* Espósito (1999), tanto a velocidade quanto à forma das bolhas varia conforme o seu diâmetro.

A análise da distribuição do tamanho das bolhas foi realizada por meio da construção de histogramas, uma ferramenta estatística que permite visualizar a frequência com que diferentes tamanhos de bolhas ocorrem. No eixo horizontal (eixo X), são representadas as classes de diâmetro das bolhas, organizadas em intervalos regulares de 1 mm. Já o eixo vertical (eixo Y) expressa a frequência em porcentagem, ou seja, o percentual de bolhas que foram medidas dentro de cada intervalo de diâmetro. Assim, quanto mais alta a barra no histograma, maior a quantidade de bolhas que apresentaram diâmetros dentro daquela faixa específica. Para esta análise, foram consideradas três diferentes condições de

vazão de ar: 1 L/min, 3 L/min e 5 L/min. Em cada uma dessas condições, a geração de bolhas foi registrada pelos dois métodos: o método automático *Shadow Sizing*, e o método *ImageJ*. Ambos os métodos foram aplicados nos dois tipos de refratários, permitindo uma comparação direta da distribuição do tamanho das bolhas em função da técnica empregada.

As Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 apresentam a distribuição do tamanho das bolhas, comparando a medição por *Shadow Sizing* e por *ImageJ* para o refratário A nas vazões de 1 L/min, 3 L/min e 5 L/min, respectivamente.

Figura 5.6 - Histograma vazão 1 L/min refratário A

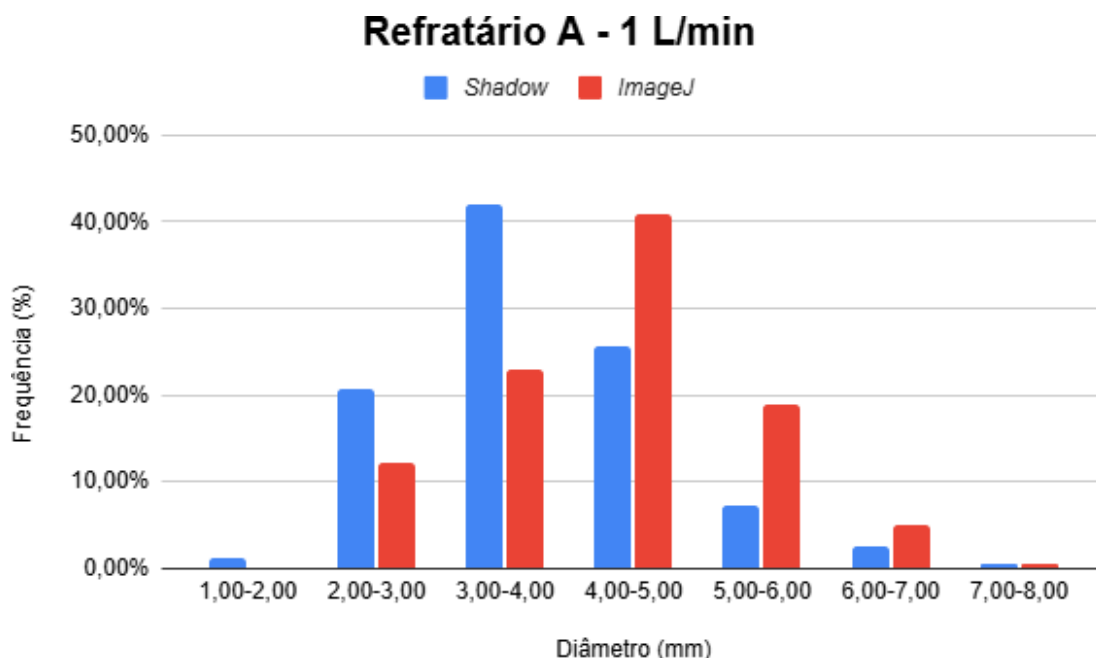


Figura 5.7 - Histograma vazão 3 L/min refratário A

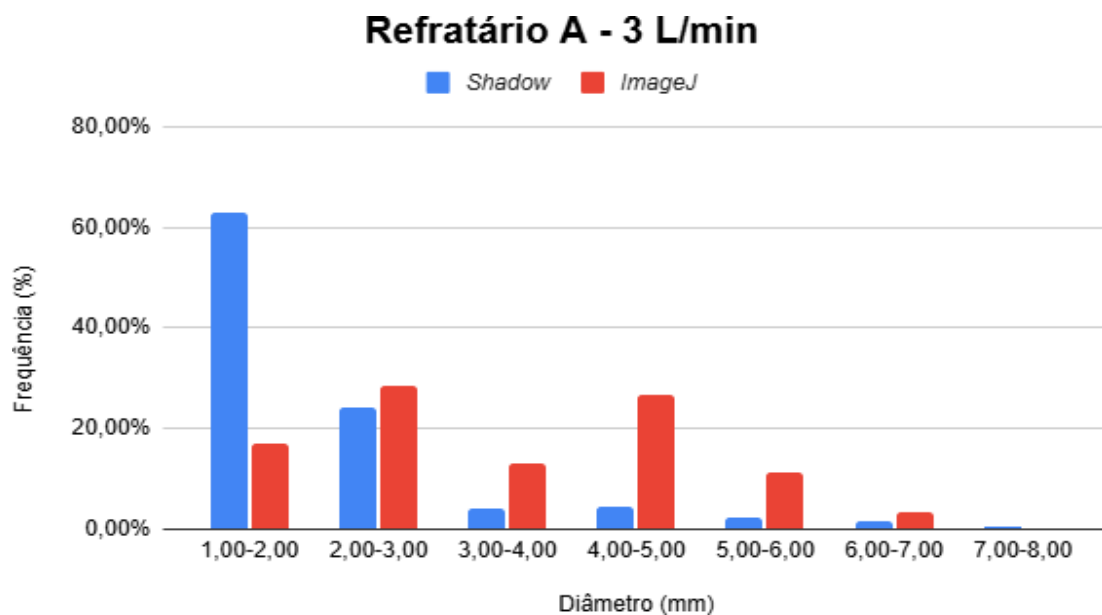
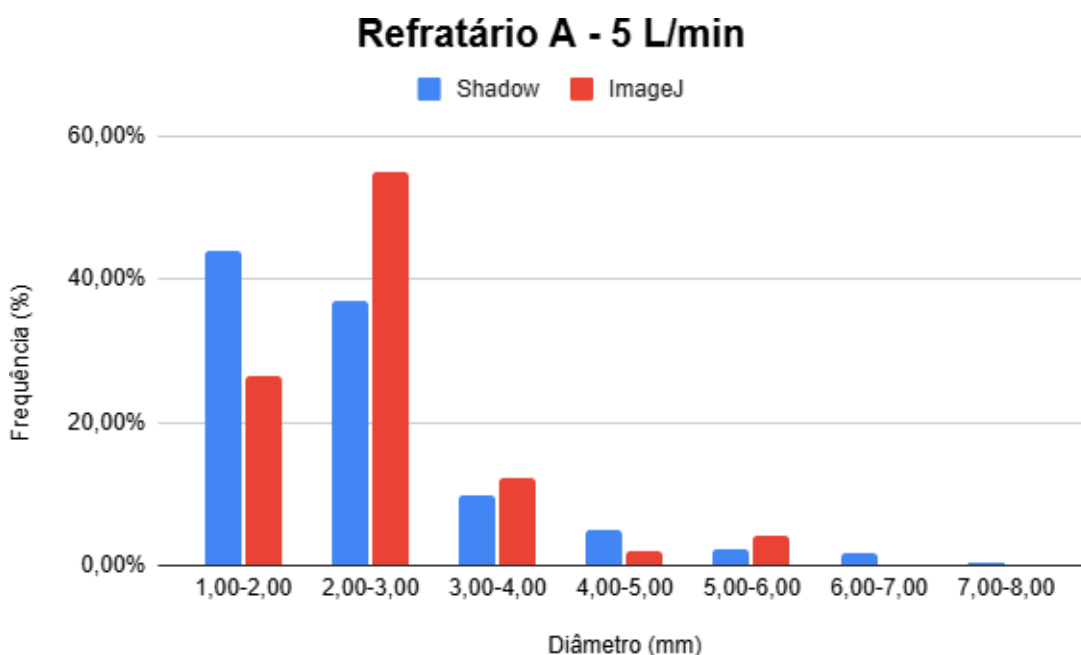


Figura 5.8 - Histograma vazão 5 L/min refratário A



A análise dos histogramas obtidos para o refratário A nas vazões de 1, 3 e 5 L/min permitiu identificar o efeito da vazão sobre a distribuição dos diâmetros das bolhas e também as diferenças de sensibilidade e precisão entre o método automático (*Shadow Sizing*) e o método manual (*ImageJ*).

Na Figura 5.6 observa-se que o *Shadow Sizing* apresentou predominância de bolhas na faixa de 3,00–4,00 mm com 42%, seguida pela classe 2,00–3,00

mm com 20%. Já o *ImageJ* concentrou a maior parte das ocorrências em 4,00–5,00 mm com 40%, com participação relevante na faixa de 5,00–6,00 mm. Esse deslocamento para classes de maior diâmetro no método manual evidencia que bolhas com menores diâmetros não foram contabilizadas, devido à dificuldade em distinguir visualmente bolhas pequenas.

A Figura 5.7 apresenta a vazão de 3 L/min, a diferença entre os métodos tornou-se ainda mais evidente. No *Shadow Sizing* observa-se a concentração na menor classe analisada 1,00–2,00 mm, que representou mais de 62% das ocorrências, com queda acentuada nas classes de maior diâmetro. O *ImageJ*, por sua vez, apresentou distribuição mais espalhada, com dois picos de frequência, em 2,00–3,00 mm e 4,00–5,00 mm, representando 29% e 27% respectivamente, evidenciando que a técnica manual não capturou com a mesma intensidade a redução do diâmetro predominante, devido à dificuldade de separar visualmente bolhas muito próximas em regiões de maior densidade. Além disso, para a vazão de 3 L/min foram observados desvios na distribuição, uma vez que os picos não formaram uma curva contínua como esperado, indicando maior irregularidade no comportamento das bolhas.

Na condição de 5 L/min, como demonstrado na Figura 5.8, ambos os métodos apresentaram distribuições mais semelhantes, com predominância nas menores classes de diâmetro, porém com diferenças na intensidade dessa ocorrência. O *Shadow Sizing* apresentou distribuição equilibrada entre 1,00–2,00 mm representando 43% e 2,00–3,00mm com 36%, enquanto o *ImageJ* concentrou cerca de 55% na faixa de 2,00–3,00 mm, mantendo menor frequência na menor classe.

As Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 apresentam a distribuição do tamanho das bolhas, comparando a medição por *Shadow Sizing* e por *ImageJ* para o refratário B nas vazões de 1 L/min, 3 L/min e 5 L/min, respectivamente.

Figura 5.9 - Histograma vazão 1 L/min refratário B

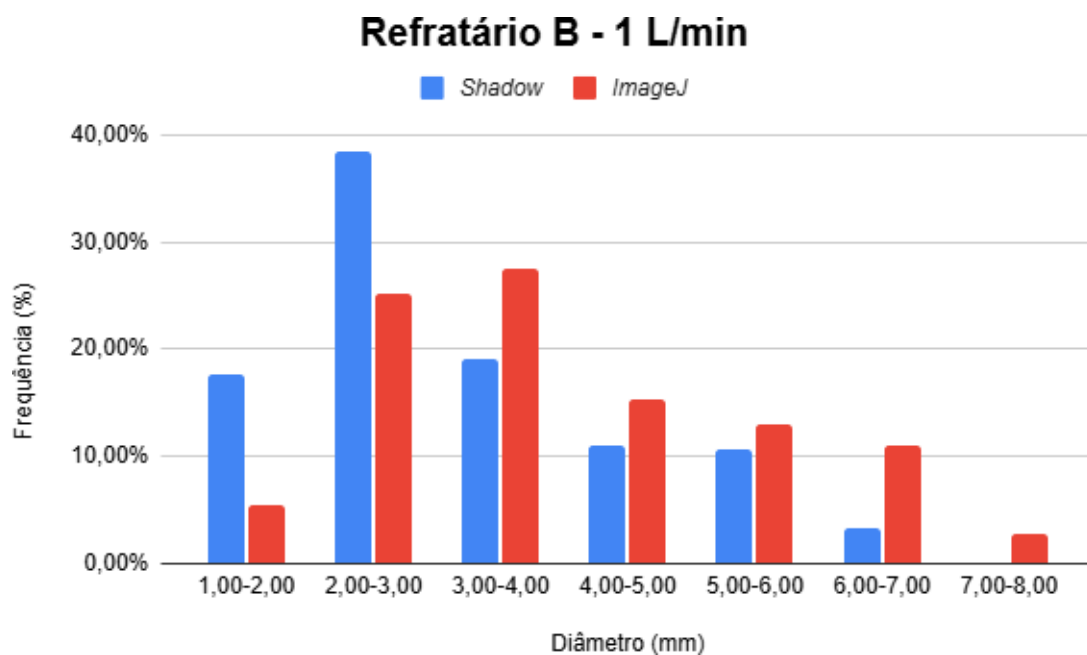


Figura 5.10 - Histograma vazão 3 L/min refratário B

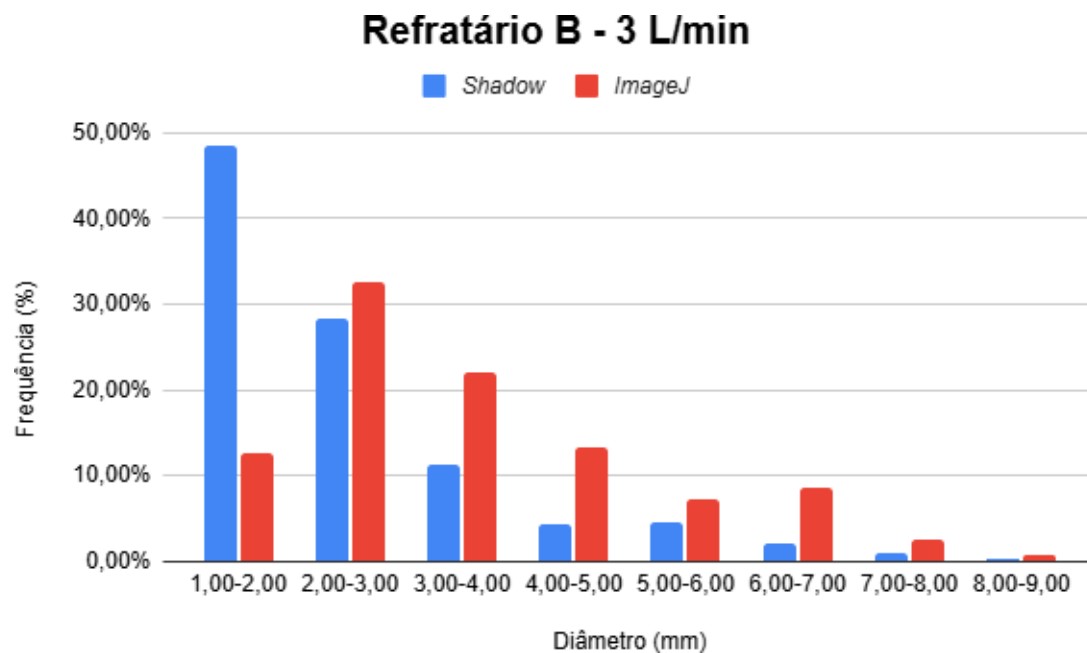
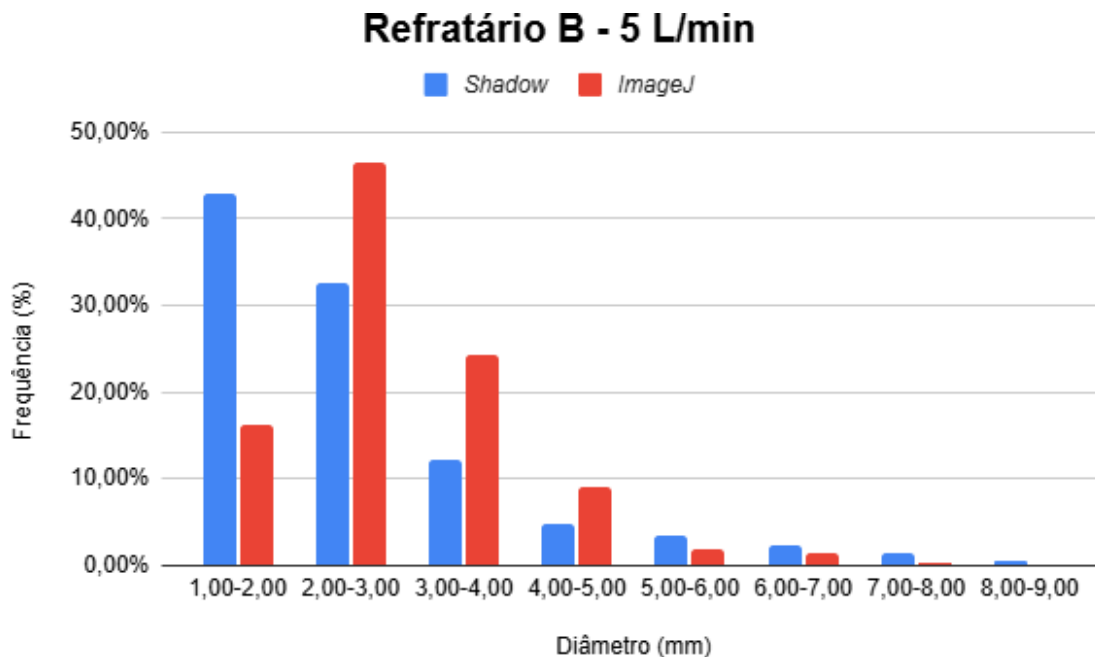


Figura 5.11 - Histograma vazão 5 L/min refratário B



Na Figura 5.9, com vazão de 1 L/min, a distribuição das bolhas se mostrou mais uniforme. O *Shadow* apontou um pico de frequência próximo a 39% na faixa de 2,00-3,00mm, indicando uma alta concentração de bolhas nesse diâmetro, mas com uma distribuição considerável também na faixa de 1,00-2,00 mm. Por outro lado, o *ImageJ* revelou uma distribuição mais espalhada, na faixa de 3,00-4,00 mm, e uma menor proporção de partículas na faixa de 1,00-2,00 mm em comparação com o *Shadow*.

À medida que a vazão foi aumentada para 3 L/min, como demonstrado na Figura 5.10 o padrão de medição dos dois métodos divergiu ainda mais. O método *Shadow* registrou um pico extremamente alto, com quase 50% das bolhas concentradas na faixa de diâmetro de 1,00-2,00 mm. Em contraste, o *ImageJ* apresentou o seu pico de frequência na faixa seguinte, de 2,00-3,00mm com cerca de 33% das partículas. A frequência de partículas na faixa de 1,00-2,00mm para o *ImageJ* foi consideravelmente menor, reforçando a tendência de que este método atribui um tamanho médio de partícula maior ao material.

Na Figura 5.11 a vazão no refratário B sobe para 5 L/min. O método *Shadow* novamente registrou um pico de frequência elevado, acima de 40%, na

faixa de 1,00-2,00mm, enquanto o *ImageJ* manteve seu pico na faixa de 2,00-3,00mm, com quase 47% das bolhas. Esta consistência na diferença de resultados entre os dois métodos, especialmente nas vazões mais altas, sugere que há uma diferença sistemática na forma como o *Shadow* e o *ImageJ* capturam e classificam as bolhas. O *Shadow* é propenso a medir as bolhas de menor diâmetro, devido ao seu sistema de medição. Em contrapartida, o *ImageJ* oferece uma distribuição mais uniforme e com o pico de frequência em uma faixa de diâmetro um pouco maior.

. A ocorrência de bolhas com diâmetro superior a 5 mm é mais comum no Refratário B, mesmo em altas vazões, devido à sua estrutura de dupla camada porosa, que favorece a retenção de gás e a coalescência. Já no Refratário A, com porosidade mais uniforme, essas bolhas são raras e ocorrem apenas em baixa vazão, pois o gás é liberado de forma imediata e dispersa, dificultando o crescimento das bolhas.

De acordo com Forero (2012), o deslocamento da distribuição para a esquerda indica a ausência de bolhas com diâmetros inferiores a 1 mm, no caso da medição realizada pelo *ImageJ*, foi necessário delimitar manualmente um diâmetro mínimo para que as bolhas fossem consideradas na análise, o que restringiu a detecção de bolhas muito pequenas. Em contrapartida, o método automático *Shadow Sizing* não apresentou essa limitação, sendo capaz de identificar bolhas em uma ampla faixa de tamanhos, independentemente do diâmetro. Como observado nos resultados, o *Shadow Sizing* realizou um número significativamente maior de medições em bolhas com diâmetro inferior a 2 mm, evidenciando sua maior sensibilidade na detecção de bolhas pequenas. Além disso, o autor observou que o aumento da velocidade superficial do gás influencia diretamente no comportamento das bolhas. Segundo Azad e Syeda (2006), o tamanho das bolhas, quando em equilíbrio, depende principalmente do volume de gás introduzido no sistema e do balanço entre os fenômenos de quebra e coalescência.

Akita e Yoshida (1974) também destacaram que a distribuição das bolhas varia conforme a região analisada: próximo à saída do refratário, há uma

concentração maior de bolhas, enquanto nas regiões mais afastadas a tendência é de dispersão. Essa maior concentração inicial pode ser explicada pelo fato de que, nesse estágio, as bolhas ainda não passaram por processos de deformação ou quebra. Esse comportamento justifica a presença expressiva de bolhas com diâmetro acima de 2 mm nos dois tipos de refratários, conforme verificado nas medições manuais.

5.2.2 Diâmetros das bolhas

Esta seção apresenta uma análise comparativa da caracterização de bolhas geradas nos refratários A e B, por meio das técnicas de medição *Shadow* e manual *ImageJ*. Foram consideradas as principais características dimensionais das bolhas, incluindo diâmetros mínimo, máximo, médio e desvio padrão.

A Tabela 5.1 apresenta os valores dos diâmetros das bolhas para as três diferentes vazões estudadas nesse trabalho, para o refratário A.

Tabela 5.1 – Diâmetro das Bolhas refratário A

REFRATÁRIO A						
	1L/min		3L/min		5L/min	
	SHADOW	IMAGEJ	SHADOW	IMAGEJ	SHADOW	IMAGEJ
DIÂMETRO MÍNIMO	1.494	2.523	1.269	1.339	1.289	1.012
DIÂMETRO MÁXIMO	7.655	7.18	7.909	6.539	7.346	5.692
DESVIO PADRÃO	0.982	0.961	1.105	1.34	1.125	0.835
DIÂMETRO MÉDIO	3.778	4.339	2.186	3.489	2.424	2.497

A Tabela 5.2 apresenta os valores dos diâmetros das bolhas para as três diferentes vazões estudadas nesse trabalho, para o refratário B.

Tabela 5.2 – Diâmetro das Bolhas refratário B

REFRATÁRIO B						
	1L/min		3L/min		5L/min	
	SHADOW	IMAGEJ	SHADOW	IMAGEJ	SHADOW	IMAGEJ
DIÂMETRO MÍNIMO	1.329	1.595	1.271	1.173	1.249	1.139
DIÂMETRO MÁXIMO	6.762	7.449	8.589	8.751	8.883	8.008
DESVIO PADRÃO	1.352	1.468	1.331	1.591	1.352	1.003
DIÂMETRO MÉDIO	3.135	4.008	2.497	3.611	2.597	2.909

Tabela 5.3 – Quantidade bolhas medidas

QUANTIDADE MEDIDA						
	1L/min		3L/min		5L/min	
	SHADOW	IMAGEJ	SHADOW	IMAGEJ	SHADOW	IMAGEJ
REFRATÁRIO A	787	434	2976	824	1657	452
REFRATÁRIO B	966	356	3119	992	2688	846

As Tabelas 5.1 e 5.2 apresenta a distribuição dos diâmetros das bolhas obtidas para os Refratários A e B e evidenciam diferenças consistentes entre as técnicas *Shadow* e *ImageJ*. Observou-se que a medição manual apresentou diâmetros médios sistematicamente maiores em ambos os refratários, na maioria das condições de vazão analisadas. Segundo Carneiro (2021), estudos que comparam análises manuais com métodos automatizados frequentemente apontam para discrepâncias devido à variabilidade humana e à interpretação de limites de bolhas.

As diferenças entre as técnicas também se manifestaram nos diâmetros mínimo e máximo apresentados. Para o Refratário A, o *ImageJ* identificou diâmetros mínimos maiores nas vazões de 1 L/min e 3 L/min, mas registrou o menor valor mínimo em 5 L/min. Por outro lado, o *Shadow* apresentou valores máximos de diâmetro em todas as condições para esse refratário. No Refratário B, o *ImageJ* apresentou diâmetro mínimo menor nas vazões de 3 L/min e 5 L/min, mas apresentou diâmetro máximo maior nas condições de 1 L/min e 3 L/min.

Além disso, as diferenças observadas nos valores de desvio padrão também são relevantes. Segundo Zhang *et al.* (2013), as diferenças nos valores de desvio padrão também são significativas, com o *ImageJ* apresentando maiores desvios. Isso indica uma maior variabilidade nas medições e menor reprodutibilidade, atribuída à natureza manual da técnica.

Ambos os refratários exibiram uma tendência geral de diminuição do diâmetro médio das bolhas com o aumento da vazão de 1 L/min para 3 L/min, para ambas as técnicas avaliadas. Segundo Wu *et al.* (2021) o aumento da vazão intensifica as forças de cisalhamento no ponto de injeção, favorecendo a fragmentação das bolhas. Esse comportamento justifica a tendência observada, na qual ambos os refratários apresentaram redução do diâmetro médio das bolhas ao se elevar a vazão de 1 L/min para 3 L/min, independentemente da técnica de medição utilizada. Contudo, a 5 L/min, as tendências passaram a divergir. No Refratário B, a técnica *Shadow* indicou um leve aumento no diâmetro médio das bolhas, enquanto o *ImageJ* manteve a tendência de redução. Já no Refratário A, ambas as técnicas apresentaram um leve aumento no diâmetro médio entre 3 L/min e 5 L/min, com os valores convergindo significativamente nessa última condição de vazão.

A Tabela 5.3 apresenta a quantidade de bolhas medidas sendo fundamental para avaliar a eficiência das técnicas de detecção de bolhas aplicadas. De maneira consistente, a técnica *Shadow* demonstrou ser significativamente mais sensível, registrando um número muito maior de bolhas detectadas em todas as condições de vazão e para ambos os tipos de refratário, quando comparada ao *ImageJ*. Essa disparidade torna-se ainda mais evidente nas maiores vazões (3 L/min e 5 L/min), o que pode estar relacionado ao aumento da densidade de bolhas e à maior capacidade da técnica *Shadow* de discriminar objetos em ambientes com maior complexidade visual. Por exemplo, na vazão de 3 L/min, foram contabilizadas 2.976 bolhas no Refratário A pela técnica *Shadow*, em contraste com apenas 824 bolhas detectadas pelo *ImageJ*. No Refratário B, o padrão se repete, com 3.119 bolhas registradas pelo *Shadow* contra 992 pelo *ImageJ*.

Segundo Schneider et al. (2012), o *ImageJ*, por ser um método manual, limita a quantidade de bolhas que podem ser processadas em um determinado intervalo de tempo. Além disso, apresenta dificuldades na identificação e contagem de bolhas em ambientes com alta densidade ou movimento rápido, o que pode levar à subestimação da população real de bolhas. Já segundo Carneiro (2021), a capacidade da técnica *Shadow* de processar um volume maior de dados em menos tempo não apenas aumenta a robustez estatística dos resultados, mas também a torna mais viável para aplicações de monitoramento contínuo em ambientes industriais, onde a velocidade e a automação são essenciais.

Outro ponto relevante é que o refratário A apresentou diâmetros médios menores das bolhas em comparação ao refratário B, sugerindo que sua porosidade e distribuição dos canais de injeção favorecem a formação de bolhas mais finas e homogêneas. Nos estudos de Santos Junior (2020), também foi observada diferença significativa entre os tipos de refratário, reforçando a ideia de que o material e a configuração do refratário influenciam diretamente o tamanho das bolhas formadas. Essa diferença é relevante porque bolhas menores tendem a permanecer mais tempo no banho metálico, aumentando a eficiência na remoção de inclusões e melhorando a homogeneização da temperatura e da composição química do aço. Por outro lado, bolhas maiores podem escapar mais rapidamente para a superfície ou se agrupar, reduzindo a eficácia da injeção de gás e potencialmente contribuindo para a formação de defeitos superficiais ou inclusões. Dessa forma, a escolha do refratário adequado não apenas impacta o tamanho das bolhas, mas também tem implicações diretas na qualidade do produto, no controle de inclusões e na eficiência do processo de lingotamento contínuo.

Assim, com base na análise das condições experimentais, verifica-se que não há discrepâncias expressivas entre os diâmetros medidos, e os resultados obtidos estão em consonância com o esperado, especialmente considerando a maior densidade de dados proporcionada pela medição automática. Vale destacar que o diâmetro das bolhas é um parâmetro essencial em sistemas gás-líquido, como enfatizado por Santos Junior (2012), e discutido por Suzuki (2003)

e Thomas (1997), que o diâmetro das bolhas se torna maior com o aumento do poro do material, ou seja, o refratário com dupla camada apresenta diâmetro médio maior que o refratário poroso.

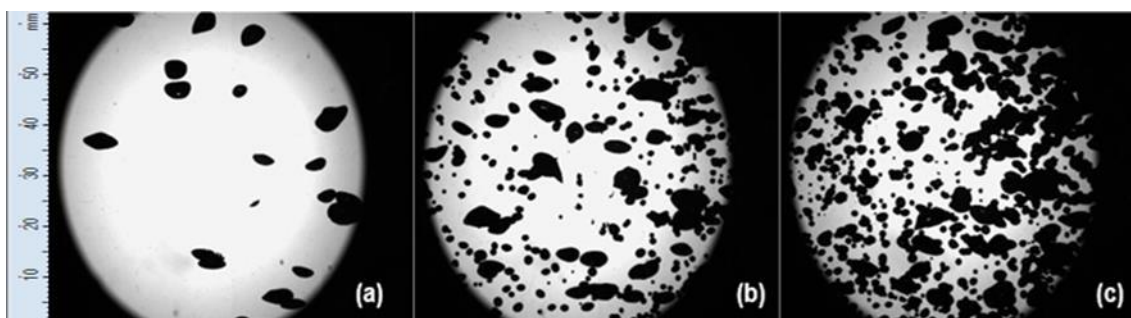
5.3 Efeito da vazão de gás no diâmetro das bolhas

O gás injetado forma muitas bolhas ao atravessar a parede do refratário e entrar em contato com a água. No entanto, esse efeito está diretamente relacionado à vazão do gás: quanto maior for a vazão, maior será a quantidade de bolhas geradas na interface gás-líquido. Wu et al. (2021) destacam que esse fenômeno pode ser explicado, principalmente, pela ação combinada da força de flutuabilidade e do efeito de arrasto do fluxo, os quais influenciam significativamente a formação e o comportamento das bolhas após sua liberação no meio líquido.

A Figura 5.12 representa as imagens após o seu processamento, indicam o comportamento das bolhas: (a) vazão de 1 L/min, (b) vazão de 3 L/min e (c) vazão de 5 L/min, para o refratário A.

Figura 5-12 – Imagens processadas refratário A

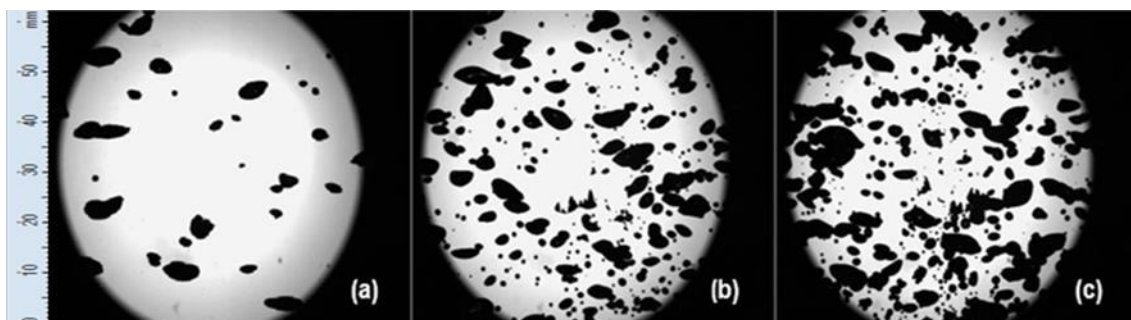
a) Vazão 1 L/min; b) Vazão 3 L/min; c) Vazão 5 L/min



A Figura 5.13 representa as imagens após o seu processamento, indicam o comportamento das bolhas: (a) vazão de 1 L/min, (b) vazão de 3 L/min e (c) vazão de 5 L/min, para o refratário B.

Figura 5-13 – Imagens processadas refratário B

a) Vazão 1 L/min; b) Vazão 3 L/min; c) Vazão 5 L/min



Nas Figuras 5.12 e 5.13, é possível observar o efeito da vazão de gás sobre as trajetórias das bolhas. Verifica-se que, com o aumento da vazão, há um acréscimo significativo na quantidade de bolhas geradas. Além disso, esse incremento na vazão promove, de forma geral, a redução do diâmetro médio das bolhas, ao mesmo tempo em que suas trajetórias se tornam mais alongadas, em virtude do aumento da velocidade de ascensão.

Wu et al. (2021) atribuem esse comportamento ao aumento do número de bolhas fluentes formadas logo após a saída do gás pelos poros do refratário, o que também intensifica a velocidade do jato gasoso. De modo complementar, Yang, He e Zhai (2014) destacam que alterações nas trajetórias e na quantidade de bolhas podem resultar em um escoamento mais denso na região de saída do refratário.

Ressalta-se que os estudos voltados à investigação do comportamento inicial das bolhas, por meio de modelos físicos utilizando água como meio simulador, têm se tornado cada vez mais frequentes. Nesse contexto, Lee (2009) conduziu experimentos com amostras revestidas de refratário poroso à base de Alumina e Sílica simulando diferentes ângulos de contato entre o aço e o gás, considerando distintas permeabilidades. De maneira semelhante, Santos Junior (2012) evidenciou que, ao ser injetado por meio do refratário, o ar percorre os poros até alcançar a interface gás-líquido, ponto no qual ocorre sua liberação na forma de bolhas.

A Figura 5.12 apresenta a distribuição das bolhas formadas no refratário A, Thomas (1997) afirma que o diâmetro das bolhas é influenciado por uma combinação de fatores, entre eles a vazão de gás injetada. Observa-se, assim, que em maiores vazões, a presença de bolhas com diâmetros reduzidos é mais frequente, emergindo diretamente da superfície do refratário poroso.

Ainda segundo Thomas (1997), “as bolhas se concentram em regiões de baixa velocidade, as quais inclusive apresentam um fluxo de recirculação”, o que reforça a influência do campo de escoamento sobre o comportamento das bolhas. Complementarmente, Santos Junior (2012) destacou que, no caso de refratários com elevada porosidade, o fenômeno de coalescência entre bolhas é intensificado, o que pode contribuir para a modificação do seu tamanho durante o processo.

De forma semelhante ao observado no refratário B, a Figura 5.13 evidencia que o padrão de fluxo no refratário B é fortemente influenciado pela vazão do gás. De acordo com Santos Junior (2012), o aumento da vazão promove alterações significativas no comportamento das bolhas neste tipo de refratário, comprometendo a uniformidade do escoamento do ar entre as camadas e, conseqüentemente, afetando a formação das bolhas.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho investigou a aplicação de técnicas automáticas para a caracterização de bolhas geradas pela injeção de gás inerte em reatores metalúrgicos, com ênfase na comparação entre o método *Shadow Sizing* e a medição manual via *ImageJ*®. Através da utilização de dois tipos distintos de refratários porosos totalmente poroso e com dupla camada separada por inserto denso e variações de vazão de gás (1, 3 e 5 L/min).

Os resultados demonstraram que a técnica *Shadow Sizing* se mostrou mais eficiente na identificação e caracterização das bolhas pequenas, apresentando maior representatividade em virtude da sua capacidade de registrar um número superior de partículas por imagem. Isso foi evidenciado, principalmente, nas condições de maior vazão, onde a quantidade de bolhas foram substancialmente elevadas. A técnica manual com o software *ImageJ*®, por sua vez, embora prática e acessível, revelou-se limitada nas condições de alta densidade de bolhas, tanto em termos de resolução quanto de exatidão. Ainda assim, sua aplicação se mostrou válida como complemento ao método automático, principalmente quando associada a um controle rigoroso do tratamento das imagens.

Por fim, este trabalho contribui para a consolidação de metodologias confiáveis no estudo de escoamentos multifásicos e reforça a importância do uso de ferramentas computacionais na Engenharia Metalúrgica. A aplicação correta e calibrada dessa técnica pode contribuir significativamente para a melhoria dos processos de refino secundário e para o desenvolvimento de modelos experimentais, com impactos positivos na previsão de comportamento de bolhas em escala industrial.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Automatização e Inteligência Artificial na Análise de Imagens:

- Integrar algoritmos para melhorar a segmentação de bolhas em imagens complexas, especialmente em situações de alta densidade de partículas ou sobreposição.

Comparação com Outras Técnicas de Software:

- Avaliar outros programas de análise de imagem além do *Shadow Sizing* e *ImageJ*®, como *MATLAB*®, *Python* com *OpenCV* ou softwares proprietários, para medir bolhas com diferentes critérios de precisão, tempo e robustez.

Aplicação em Processos Industriais Reais:

- Aplicar a metodologia desenvolvida em plantas industriais para monitoramento e otimização do processo de injeção de gás em tempo real, visando reduzir defeitos e aumentar a eficiência do refino.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

AKITA, K.;YOSHIDA, F. Bubble size, interfacial area and liquid-phase mass transfer coefficient in bubble columns. **Ind. Eng. Chem. Process**, v. 12, p. 76-80, 1974.

ALMEIDA, R. N. **Avaliação de tamanho de bolhas em coluna de flotação por análise de imagem usando os softwares ImageJ e APBS**. 2019. 8f. Artigo científico. Publicado na revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração – Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM), São Paulo, SP, Brasil, 2019.

AZAD, M., SYEDA, S. A numerical model for bubble size distribution in turbulent gas liquid dispersion. **Journal of Chemical Engineering**, v. 24, p. 25-34, 2006.
BARBI, F. **Experimentação Numérica de Bolhas em Ascensão**. 2016. 215 f. Tese. Doutorado em Engenharia Mecânica - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 2016.

BARRAL, C. E. P. **Efeitos da Incorporação de Modelos de Quebra e Coalescência de Bolhas em Simulações Multifásicas de Processos de Refino de Aços**. 2016. 148f. Tese. Doutorado em Engenharia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2016.

BETEGA, K. **Avaliação da Influência de Injeção de Argônio Sobre a Ocorrência de Inclusões não Metálicas no Refino Secundário do Aço ASTM A148 GRAU 90-60**. 2022. 90f. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharel em Engenharia de Materiais - Universidade Federal de Santa Catarina Campus Blumenau, Blumenau, SC, Brasil, 2022.

BRÖDER, D.; SOMMERFELD, M. An advanced LIF-PLV system for analysing the hydrodynamics in a laboratory bubble column at higher void fractions. **Experiments In Fluids**, v. 33, n. 6, p. 826-837, dez. 2002.

BRÖDER, D.; SOMMERFELD, M. Planar shadow image velocimetry for the analysis of the hydrodynamics in bubbly flows. **Measurement Science And Technology**, v. 18, n. 8, p. 2513-2528, 11 jul. 2007.

CARNEIRO, L.E.M. **Estudo experimental de quebra e coalescência de bolhas em campo centrífugo**. 2021. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2021.

CONSTANTIN, C. **Multiple weak shock waves induced by heavy ion beams in solid matter**. 2002. 87p. Tese. Doutorado em Física - Departamento de Física/Universidade Técnica em Darmsadt, 2002.

DE ARAÚJO, L. A. **Manual de Siderurgia**. São Paulo: Arte & Ciência, 1997.

DEEN, N. G.; HJERTAGER, B. H.; SOLBERG, T, **Comparison of PIV and LDA Measurement Methods Applied to the Gas-Liquid Flow in a Bubble Column**, 10th Int. Symp. on Appl. of Laser Techniques to Fluid Mech., Lisboa, Portugal, 2000.

FINARDI, J. **Técnicas de Refino e Fabricação de Fundidos em Aço**. Máquinas e Metais, São Paulo, p. 12-19, julho 1979 apud HARTMANN, 2012.

FORERO, D. I. S. **Experimentação Física do Escoamento Gás-Líquido em uma Coluna de Bolhas Retangular Utilizando a Técnica PIV e a Técnica de Sombras Shadow**. 2012. 117f. Dissertação. Mestrado em Desenvolvimento de Processos Químicos - Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, 2012.

GALLIANI, A. C. **Desenvolvimento de metodologia experimental para estudo de validação de modelos CFD para o escoamento multifásico em coluna de bolhas.** 2011. 145f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Química – Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, SC, Brasil, 2011.

GAVIOLI, Y. S. **Caracterização Experimental da Separação Gás-Líquido em um Junção do Tipo T.** 2017. 145f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Mecânica - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017.

GU, C; LV, Z; HUA, C; BAO, Y; WU, C; ZHAO, C. Study on CO₂ bubble growth and detachment in liquid steel induced by thermal decomposition reaction with physical modeling. **Journal Of Materials Research And Technology**, v. 22, p. 617-624, jan. 2023.

GUPTA, M.K; SHARMA, D.S; LAKHERA, V.J. Vapor Bubble Formation, Forces, and Induced Vibration. **Applied Mechanics Reviews**, v. 68, n. 3, mai. 2016.
H.L. Yang, P. He, Y.C. Zhai, Removal behavior of inclusions in molten steel by bubble experiment, **Transact. Iron Steel Inst.** Japan (2014) 578–581.

HARTMANN, R. **Estudo do Sistema de Enchimento de Aços ao Carbono em Moldes de Areia Cuca-frio Através de Simulação Numérica.** Sociedade Educacional de Santa Catarina – SOCIESC, Instituto Superior Tupy IST, Joinville, SC, Brasil, 2012.

IRONS, G; SENGUTTUVAN, A; KRISHNAPISHARODY, K. Recent Advances in the Fluid Dynamics of Ladle Metallurgy. **Isij International**, v. 55, n. 1, p. 1-6, 2015.

KRISHNAPISHARODY, K.; IRONS, G. A. A Unified Approach to the Fluid Dynamics of Gas–Liquid Plumes in Ladle Metallurgy. **Isij International**, v. 50, n. 10, p. 1413-1421, 2010.

KRISHNAPISHARODY, K.; IRONS, G. A. A. Critical Review of the Modified Froude Number in Ladle Metallurgy. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 44, n. 6, p. 1486-1498, 24 set. 2013. Springer Science and Business Media LLC.

KRISHNAPISHARODY, K.; IRONS, G. A. An Analysis of Recirculatory Flow in Gas-Stirred Ladles. **Steel Research International**, v. 81, n. 10, p. 880-885, 30 set. 2010.

KULKARNI, A. A.; JOSHI, J. B. Bubble Formation and Bubble Rise Velocity in Gas-Liquid Systems: a review. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 44, n. 16, p. 5873-5931, 4 maio 2005.

LAGE, P.L.C.; ESPÓSITO, R.O. Experimental determination of bubble size distributions in bubble columns: prediction of mean bubble diameter and gas hold up. **Powder Technonology**, v. 101, p.142-150, 1999.

Lee, G. G. Investigation of Refractory Properties on the Initial Buble Behavior in the Water Model of Continuos Casting Process. **Materials Science and Technology Conference**, AIST/ TMS, Pittsburgh, PA, 2009.

LINDKEN, R.; MERZKIRCH, W. A novel PIV technique for measurements in multiphase flows and its application to two-phase bubbly flows. **Experiments In Fluids**, v. 33, n. 6, p. 814-825, dez. 2002.

LOPES, M. F. M. **Simulação Tridimensional de uma Coluna de Bolhas Cilíndrica – Análise em Sistema Bifásico por Técnica de Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV), Shadow Imaging e Simulação**. 2012. 110f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Química - Faculdade de Engenharia Química – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, 2012.

LOU, W; ZHU, M. Numerical Simulation of Gas and Liquid Two-Phase Flow in Gas-Stirred Systems Based on Euler–Euler Approach. **Metallurgical And Materials Transactions B**, v. 44, n. 5, p. 1251-1263, 2 jul. 2013.

MATAMOROS, L. M. C. **Morfologia de Bolhas Isoladas em Escoamentos Pistonados Horizontais**. 2013. 120f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Mecânica - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.

MAYOR, T. S.; PINTO, A. M. F. R.; CAMPOS, J. B. L. M. An image analysis technique for the study of gas–liquid slug flow along vertical pipes — associated uncertainty. **Flow Measurement And Instrumentation**, v. 18, n. 3-4, p. 139-147, jun. 2007.

NOGUEIRA, S.; SOUSA, R. G.; PINTO, A. M. F. R.; RIETHMULLER, M. L.; CAMPOS, J. B. L. M. Simultaneous PIV and pulsed shadow technique in slug flow: a solution for optical problems. **Experiments in Fluids**, v. 35, n. 6, p. 598-609, 1 dez. 2003.

OLIVEIRA, R. P. **Caracterização Experimental das Propriedades Dinâmicas de Escoamentos Pistonados em Tubos Verticais**. 2009. 145f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Mecânica - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

PEREIRA, J. A. M. **Modelamento Físico de uma Panela Siderúrgica Não Cilíndrica Agitada com Gás**. 2011. 120f. Tese. Doutorado em Engenharia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, - PPGE3M, Porto Alegre, RS, Brasil, 2011.

RAFFEL, M., WILLERT, C.E., WERELEY, S.T., KOMPENHANS, J., 2007, **Particle Image Velocimetry – A Practical Guide**, 2 ed. New York, Springer-Verlag.

RODRIGUES, R. T. **Desenvolvimento da técnica LTM-BSizer para a caracterização de bolhas e avaliação de parâmetros no processo de flotação**. 2004. 114f. Tese. Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, - PPGEM/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2004.

SANTOS JUNIOR, P.L. **Influência sobre o refratário da válvula superior no comportamento das bolhas em lingotamento contínuo de placas: modelo físico e matemático**. 2020. 140 f. Tese. Doutorado em Engenharia de Materiais - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, Ouro Preto, MG, Brasil, 2020.

SANTOS JUNIOR, P.L. **Distribuição de gás inerte dentro do sistema de refratário durante o lingotamento contínuo de placas: modelo físico e matemático**. 2012. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, Ouro Preto, MG, Brasil, 2012.

SANTOS, L. F. A. **Estudo de comparação de softwares para processamento de imagens em estudos de distribuição de tamanho de bolha**. 2023. 7f. Trabalho de Iniciação Científica – Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2023. Apresentado na XII Jornada do Programa de Capacitação Institucional – PCI/CETEM.

SATHE, M. J.; THAKER, I. H.; STRAND, T. E.; JOSHI, J. B. Advanced PIV/LIF and shadowgraphy system to visualize flow structure in two-phase bubbly flows. **Chemical Engineering Science**, v. 65, n. 8, p. 2431-2442, abr. 2010.

SCHNEIDER, C. A.; RASBAND, W. S.; ELICEIRI, K. W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. **Nature Methods**, v. 9, n. 7, p. 671-675, jul. 2012.

SILVA, P. H. R.; JESUS, D. A.; CAMARGO, I. G.; ALVES, R.S.; TAVARES, R. P. Caracterização das bolhas na panela de aciaria por modelamento físico. **48º Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos**; 2017, São Paulo. São Paulo: ABM, 2017.

SOARES, C. **Desenvolvimento de uma metodologia para avaliação numérica e experimental do escoamento líquido/vapor em colunas de destilação**. 2005. Tese. Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP, Brasil, 2005.

SUZUKI, H. Structure of Porous Upper Nozzle for Tundish and Gas Bubble Behavior. **Shinagawa Technical Report**, 2003.

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

TONG, G.; LIU, Y.; GUAN, J. In situ gas bubble-assisted one-step synthesis of polymorphic Co₃O₄ nanostructures with improved electrochemical performance for lithium ion batteries. **Journal Of Alloys And Compounds**, v. 601, p. 167-174, jul. 2014.

VAN HOUT, R; BARNEA, D; SHEMER, L. Translational velocities of elongated bubbles in continuous slug flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 28, n. 8, p. 1333-1350, ago. 2002.

WU, Y; LIU, Z; WANG, F; LI, B; GAN, Y. Experimental investigation of trajectories, velocities and size distributions of bubbles in a continuous-casting mold. **Powder Technology**, v. 387, p. 325–335, 2021.

ZHANG, H. Review of gas-liquid two-phase flow measurement techniques and their applications. **Measurement**, Kidlington, v. 46, n. 10, p. 3891-3909, dez. 2013.