

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
E DE MATERIAIS

CARINA STAHNKE

ANÁLISE DO ESCOAMENTO ÁGUA, ÓLEO E GÁS EM PADRÃO
DISPERSO

TESE

CURITIBA

2021

CARINA STAHNKE

**ANÁLISE DO ESCOAMENTO ÁGUA, ÓLEO E GÁS EM PADRÃO
DISPERSO**

Analysis of water, oil and gas flow in dispersed pattern

Tese apresentada como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR.

Orientador: Prof. Dr. Rigoberto Eleazar Melgarejo Morales

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Dias dos Santos

CURITIBA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba



CARINA STAHNKE

ANÁLISE DO ESCOAMENTO ÁGUA, ÓLEO E GÁS EM PADRÃO DISPERSO

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutora Em Engenharia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia Térmica.

Data de aprovação: 02 de Julho de 2021

Prof Rigoberto Eleazar Melgarejo Morales, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Dalton Bertoldi, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Utfpr)

Prof Luis Mauro Moura, Doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Paraná (Pucpr)

Prof.a Maria Jose Jeronimo De Santana Ponte, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Prof Moises Alves Marcelino Neto, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 09/08/2021.

RESUMO

STAHNKE, Carina. **Análise do Escoamento Água, Óleo e Gás em Padrão Disperso**. Tese - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 184 p., 2021.

O efeito da inserção de população de bolhas na separação de gotas de óleo finamente dispersas em escoamento de líquido foi investigado experimentalmente e numericamente. A geração de bolhas e gotas de óleo em um escoamento de líquido permitiu a análise da eficiência dos processos de separação offshore (separadores gravitacionais – processamento primário de petróleo), que se mostraram fortemente dependentes das forças hidrodinâmicas e das interações físicas das fases dispersas em escoamentos conduzidos por dissipação viscosa assim como efeitos hidrodinâmicos quando as forças de inércia dominam. Neste contexto, é importante notar que a eficiência do equipamento de flotação pode ser melhorada por uma melhor compreensão das interações entre bolhas e gotas, que também dependem de muitos fatores, ou seja, tamanhos de bolhas e gotas, população e campos de velocidade ao longo do escoamento. Apesar de sua importância, os estudos nesta área são escassos e persiste a falta de informações sobre a física do problema. O objetivo deste estudo é verificar quais desses fenômenos regem a cinemática de separação. Para atingir este objetivo, a técnica de shadowgraph de alta velocidade permitiu a determinação das trajetórias das fases dispersas, diâmetros equivalentes e sua distribuição de velocidades. A simulação numérica permitiu a obtenção de forma complementar ao experimental, a análise de detalhes do escoamento não acessíveis em experimentos físicos, como o escoamento secundário da fase contínua, entre outros. Os experimentos, em contrapartida com as simulações, sugeriram que a presença da população de bolhas aumenta a separação das gotas de óleo do líquido devido ao aumento dos efeitos gravitacionais associados ao escoamento induzido pelo líquido. Além disso, a inserção das bolhas reduziu a circulação aleatória das gotas dentro da coluna de bolhas. Os efeitos de flutuabilidade foram aumentados, levando a um menor tempo de retenção das gotas. Assim, as interações hidrodinâmicas promovidas pela inserção das bolhas governam a separação das gotículas da corrente líquida, levando a um processo de separação aprimorado.

Palavras-chave: Separador gravitacional. Flotador. Interação. Experimentação física. Simulação numérica.

ABSTRACT

STAHNKE, Carina. **Analysis of Water, Oil and Gas Flow in Dispersed Pattern**. Thesis - Postgraduate Program in Mechanical and Materials Engineering, Federal University of Technology - Parana. Curitiba, 190 pages, 2021.

The effect of the insertion of a bubble swarm on the separation of finely dispersed oil droplets in a liquid flow was investigated experimentally and numerically. The generation of gas bubbles and oil droplets in a liquid flow allowed the analysis on the efficiency of offshore separation processes (gravitational separators - primary oil processing). Those processes have shown to be strongly dependent on hydrodynamic forces and on the physical interactions of the dispersed phases in flows governed by viscous dissipation as well as hydrodynamic effects when inertia forces dominate. In this context, it is noteworthy that the efficiency of the flotation equipment can be improved by a better understanding of the interactions between bubbles and droplets, which depend on factors such as the bubble and droplet sizes, the population, and velocity fields along runoff. Despite their importance, studies in this field are scarce and a lack of information about the physics of the problem persists. The goal of this study is to ascertain which of these phenomena govern the separation kinematics. To achieve this objective, the high-speed shadowgraph technique was used to determine the trajectories of the dispersed phases, equivalent diameters, and their rising velocity. The numerical simulation, by its turn, complemented the experimental work, allowing the analysis of flow details not supplied by the lab experiments, such as the secondary flow of the continuous phase, among others. The experiments, in contrast to the simulations, suggested that the presence of the bubble swarm enhances the separation of the oil droplets from the liquid because of the increased gravitational effects associated to the liquid-induced flow. Furthermore, the insertion of the bubbles reduced the random circulation of the droplets inside the bubble column. Buoyancy effects were increased, leading to a smaller retention time of the droplets. Thence, the hydrodynamic interactions promoted by the insertion of the bubbles govern the separation of droplets from the liquid stream, leading to an enhanced separation process.

Keywords: Gravitational separator. Flotation. Interaction. Physical experimentation. Numerical analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema do equipamento utilizado no estudo experimental	19
Figura 2 – Esquema de um sistema integrado de separação.....	23
Figura 3 – Esquema ilustrativo de um processo genérico de flotação.....	24
Figura 4 – Linhas de corrente para representar trajetória de gota e bolha.....	28
Figura 5 – Formação do rastro e efeitos secundários no escoamento (a) – (e). Rastros observados em escoamentos borbulhantes (f)-(j)	30
Figura 6 - Relação entre o formato das bolhas e grupos adimensionais.....	31
Figura 7 – Processo de formação do aglomerado após a colisão de bolha e gota.....	38
Figura 8 – Sequência de etapas da interação bolha gota no processo de flotação.....	42
Figura 9 – Forças envolvidas no escoamento ascendente de bolhas e gotas.....	44
Figura 10 – Trajetória de bolhas subindo em meio líquido, (a) bolha com diâmetro de 2,49 mm fluindo em água com 20% de glicerol; (b) bolha com diâmetro de 4,68 mm fluindo em água com 30% de glicerol.....	47
Figura 11 – Coalescência de duas bolhas experimentalmente e numericamente	49
Figura 12- Trajetória de uma bolha experimental (a) com diâmetro igual a 5mm e $E_o = 10$ e (b) com diâmetro igual a 1mm $E_o = 4$, e (c) bolha numérica utilizando o método VOF, com distâncias do centro de gravidade	50
Figura 13 – Representação de superfície em (a) e a evolução da bolha com distâncias do centro de gravidade em (b)	51
Figura 14 – Resultados da simulação do processo de formação de bolhas iniciando em (a) sua formação e progredindo até a forma completa em (e).....	52
Figura 15 – Simulação da trajetória de bolhas com variação de diâmetro de 4mm e $E_o = 2.2$ (a), 5mm e $E_o = 3.4$ (b), 7 mm e $E_o = 6.7$ (c), 9mm e $E_o = 11$ (d), 12mm e $E_o = 19.6$ (e) e 20mm e $E_o = 54.5$ (f).....	53
Figura 16 – Trajetória e deformação da bolha, diâmetro de 2 mm (a), diâmetro de 3 mm (b) e (c) e diâmetro de 4 mm (d).....	54
Figura 17 – Equipamento experimental para análise de escoamento água, óleo, ar em padrão disperso.....	58
Figura 18 – Aparato experimental completo	59
Figura 19 – Escoamento das bolhas formadas durante os experimentos	61
Figura 20 – Escoamento bolhas e gotas, sem uso do defletor e vazão baixa	62
Figura 21 – Esquema da trajetória das gotículas de óleo representativas cujas posições dentro da câmara são exibidas. O caso analisado é o da inserção da população de bolhas. Marcadores preenchidos: gotas de óleo. Marcadores vazios: bolhas	63
Figura 22 – Tempo de residência x vazão de entrada.....	65
Figura 23 – Equilíbrio de forças em uma bolha da primeira agulha, considerando empuxo, peso e força de arrasto	67
Figura 24 – Modelos aplicados nos casos simulados	83
Figura 25 – Domínio numérico de solução	84
Figura 26 – Malhas numéricas com diferentes níveis de refinamento, utilizadas para a determinação do GCI.....	87
Figura 27 – Curva assintótica dos resultados de pressão para as malhas analisadas e para a extrapolação do método GCI.....	90
Figura 28 – Curva assintótica dos resultados da fração de volume do líquido para as malhas analisadas e para a extrapolação do método GCI.....	91
Figura 29 – Resultado da fração de volume do ar ao longo do eixo horizontal da câmara para as três malhas além da extrapolada analisadas pelo método GCI	92

Figura 30 – Valores do GCI para a malha refinada, calculados com base nos resultados para a fração de volume do ar ao longo do eixo horizontal da câmara	92
Figura 31 – Valores do GCI para a malha intermediária, calculados com base nos resultados para a fração de volume do ar ao longo do eixo horizontal da câmara	93
Figura 32 – Coordenadas de referência no aparato experimental, u representa a velocidade na coordenada x, v representa a velocidade na coordenada y e u' a velocidade em z	95
Figura 33 – Trajetórias das bolhas ascendentes (em x e y) sem defletor (a) e com defletor (b) para a vazão de 125 l/h	96
Figura 34 – Localização da bolha escolhida para acompanhamento da trajetória	97
Figura 35 – Trajetória individual de bolha nos experimentos sem defletor, com vazão de entrada de 16l/h (a), 34l/h (b), 54l/h (c), 74l/h (d), 94 l/h (e) e Vazão máxima 125l/h (f) para o sistema de menor fração de gás	98
Figura 36 – Trajetória individual de bolha nos experimentos com defletor, com vazão de entrada de 16l/h (a), 34l/h (b), 54l/h (c), 74l/h (d), 94 l/h (e) e Vazão máxima 125l/h (f) para o sistema de menor fração de gás	99
Figura 37 - Velocidade em y (ascendência) individual da bolha nos experimentos com bolhas com defletor, com vazão de entrada de 16l/h (a), 34l/h (b), 54l/h (c), 74l/h (d), 94 l/h (e) e Vazão máxima 125l/h (f)	101
Figura 38 – Trajetória individual de bolha nos experimentos com defletor, com vazão de entrada de 54l/h (a), 74l/h (b), 94 l/h (c) e Vazão máxima 125l/h (d) para o sistema de maior fração de gás.....	103
Figura 39 - Velocidade em y (ascendência) individual da bolha nos experimentos com bolhas com defletor com maior fração de gás, com vazão de entrada de 54l/h (a), 74l/h (b), 94 l/h (c) e Vazão máxima 125l/h (d).....	104
Figura 40 - Velocidade relativa da bolha ascendente em função de sua posição vertical. As medidas experimentais são comparadas com os resultados obtidos pela correlação de Garnier et al. (2002) (Garnier et al., 2002) – Equação (3.15)	105
Figura 41 - Comparação do coeficiente de arrasto em condições transitórias nos dois sistemas (sem e com escoamento de água de 54 l/h) entre o equilíbrio de forças e as correlações selecionadas	107
Figura 42 - Comparação do coeficiente de arrasto em condições transitórias nos dois sistemas (sem e com escoamento de água de 74 l/h) entre o equilíbrio de forças e as correlações	108
Figura 43 - Comparação do coeficiente de arrasto em condições transitórias nos dois sistemas (sem e com escoamento de água de 94 l/h) entre o equilíbrio de forças e as correlações selecionadas	108
Figura 44 - Comparação do coeficiente de arrasto em condições transitórias nos dois sistemas (sem e com escoamento de água de 125 l/h) entre o equilíbrio de forças e as correlações selecionadas	109
Figura 45 - Comparação do coeficiente de arrasto em condições transitórias nos dois sistemas (sem e com escoamento de água de 54 l/h) entre o equilíbrio de forças e as correlações selecionadas	110
Figura 46 - Comparação do coeficiente de arrasto em condições transitórias nos dois sistemas (sem e com escoamento de água de 74 l/h) entre o equilíbrio de forças e as correlações selecionadas	110
Figura 47 - Comparação do coeficiente de arrasto em condições transitórias nos dois sistemas (sem e com escoamento de água de 94 l/h) entre o equilíbrio de forças e as correlações selecionadas	111

Figura 48 - Comparação do coeficiente de arrasto em condições transitórias nos dois sistemas (sem e com escoamento de água de 125 l/h) entre o equilíbrio de forças e as correlações selecionadas	111
Figura 49 - Linhas de corrente da fase contínua com uma população de bolhas	113
Figura 50 - Comparação da força de arrasto transiente ao longo da trajetória da bolha (posição) e com Reynolds	115
Figura 51 – Número de Strouhal em função do número de Reynolds (medições no sistema de menor fração de gás).....	116
Figura 52 – Número de Strouhal em função do número de Reynolds (medições no sistema de maior fração de gás)	116
Figura 53 – Trajetória de todas as bolhas (a), trajetória de todas as gotas (b) e trajetória de todas as gotas no experimento gotas + bolhas (c), na maior vazão de líquido (125 l/h)	118
Figura 54 – Histogramas da variação do diâmetro nos experimentos com bolhas e gotas com defletor com vazão de 16l/h (a), 34l/h (b), 54l/h (c), 74l/h (d), 94 l/h (e) e Vazão máxima 125l/h (f).....	120
Figura 55 - Gotas e bolhas ao longo do escoamento na vazão mínima (16l/h) com defletor.	121
Figura 56 – PDF da variação da velocidade em y nos experimentos com bolhas e gotas com defletor com vazão de 16l/h (a), 34l/h (b), 54l/h (c), 74l/h (d), 94 l/h (e) e Vazão máxima 125l/h (f).....	123
Figura 57 – Marcação de posição inicial das gotas no experimento	125
Figura 58 – Trajetória ascendente das gotas representativas sem bolhas (a-c), trajetória das gotas nos experimentos com menor quantidade de bolhas (d-f) e trajetória das gotas nos experimentos com maior quantidade de bolhas inseridas (g-i), na vazão de líquido de 54 l/h.....	126
Figura 59 – Trajetória ascendente das gotas representativas sem bolhas (a - c), trajetória das gotas nos experimentos com menor quantidade de bolhas (d- f) e trajetória das gotas nos experimentos com maior quantidade de bolhas inseridas (g-i), na vazão de líquido de 74 l/h.....	127
Figura 60 – Trajetória ascendente das gotas representativas sem bolhas (a - c), trajetória das gotas nos experimentos com menor quantidade de bolhas (d- f) e trajetória das gotas nos experimentos com maior quantidade de bolhas inseridas (g-i), na vazão de líquido de 94 l/h.....	128
Figura 61 – Trajetória ascendente das gotas representativas sem bolhas (a - c), trajetória das gotas nos experimentos com menor quantidade de bolhas (d- f) e trajetória das gotas nos experimentos com maior quantidade de bolhas inseridas (g-i), na vazão de líquido de 125 l/h.....	129
Figura 62 – Tempo de retenção das trajetórias das três gotas nas cinco posições diferentes, para experimento somente com gotas, gotas e bolhas com menor fração de gás e gotas e bolhas com maior fração de gás, com vazão de líquido de 54 l/h	132
Figura 63 – Tempo de retenção das trajetórias das três gotas nas cinco posições diferentes, para experimento somente com gotas, gotas e bolhas com menor fração de gás e gotas e bolhas com maior fração de gás, com vazão de líquido de 74 l/h	133
Figura 64 – Tempo de retenção das trajetórias das três gotas nas cinco posições diferentes, para experimento somente com gotas, gotas e bolhas com menor fração de gás e gotas e bolhas com maior fração de gás, com vazão de líquido de 94 l/h	134
Figura 65 – Tempo de retenção das trajetórias das três gotas nas cinco posições diferentes, para experimento somente com gotas, gotas e bolhas com menor fração de gás e gotas e bolhas com maior fração de gás, com vazão de líquido de 125 l/h	135
Figura 66 – Esquema representativo da colisão entre uma bolha e uma gota	137

Figura 67 – Instantâneos da colisão de gotas de bolha. (a - b) movimento de gotículas individuais; (c - d) aparecimento de uma bolha de gás e sua aproximação em direção às gotas; (e) colisão de gota-bolha; (f) quicando; (g - h) restabelecimento da trajetória individual; e (i) trajetórias individuais de bolha (azul) e gota (vermelho) antes e depois da colisão	138
Figura 68 – Esquema representativo do arraste da gota pelo rastro da bolha	139
Figura 69 – Instantâneos da interação hidrodinâmica bolha-gota. (a) abordagem; (b - d) superposição da camada limite; (e - g) captura da gota pela esteira da bolha; (h) restabelecimento do movimento individual; e (i) adquiriu trajetórias individuais de bolha (azul) e gota (vermelho) antes e depois da colisão. Os diâmetros equivalentes de bolha e gota são de aproximadamente 2,5 e 0,8 mm, respectivamente.....	141
Figura 70 - Esquema das possíveis interações bolha-gota. (a) abordagem; (b) superposição de camadas limite; (c) colisão e choque; e d) captura da gota pela esteira da bolha	142
Figura 71 - Corpo de líquido obtido na simulação contendo apenas água	143
Figura 72 - Vista frontal das linhas de corrente da água para a simulação contendo apenas água (a) vazão 54 l/h, (b) vazão 74 l/h, (c) vazão 94 l/h e (d) vazão 125 l/h	144
Figura 73 - Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação contendo apenas água na vazão 54l/h	146
Figura 74 - Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação contendo apenas água na vazão 74 l/h	146
Figura 75 - Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação contendo apenas água na vazão 94 l/h	147
Figura 76 - Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação contendo apenas água na vazão 125 l/h	147
Figura 77 – Simulação com a vazão de entrada de líquido (54 l/h). Vista frontal das linhas de corrente do óleo em (a). Vista frontal das linhas de corrente da água em (b). Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação em (c).....	149
Figura 78 – Simulação com a vazão de entrada de líquido (74 l/h). Vista frontal das linhas de corrente do óleo em (a). Vista frontal das linhas de corrente da água em (b). Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação em (c).....	150
Figura 79 – Simulação com a vazão de entrada de líquido (94 l/h). Vista frontal das linhas de corrente do óleo em (a). Vista frontal das linhas de corrente da água em (b). Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação em (c).....	151
Figura 80 – Simulação com a vazão de entrada de líquido (125 l/h). Vista frontal das linhas de corrente do óleo em (a). Vista frontal das linhas de corrente da água em (b). Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação em (c).....	152
Figura 81 – Simulação com a vazão de entrada de água (54 l/h). Vista frontal das linhas de corrente da água em (a). Planos do escoamento secundário da água (b). Vista frontal das linhas de corrente do ar em (c)	154
Figura 82 – Simulação com a vazão de entrada de água (74 l/h). Vista frontal das linhas de corrente da água em (a). Planos do escoamento secundário da água (b). Vista frontal das linhas de corrente do ar em (c)	155
Figura 83 – Simulação com a vazão de entrada de água (94 l/h). Vista frontal das linhas de corrente da água em (a). Planos do escoamento secundário da água (b). Vista frontal das linhas de corrente do ar em (c)	156
Figura 84 – Simulação com a vazão de entrada de água (125 l/h). Vista frontal das linhas de corrente da água em (a). Planos do escoamento secundário da água (b). Vista frontal das linhas de corrente do ar em (c)	157

Figura 85 – Simulação com a vazão de entrada 54 l/h. Vista frontal das linhas de corrente do óleo em (a). Vista frontal das linhas de corrente da água em (b). Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação em (c).....	159
Figura 86 – Simulação com a vazão de entrada 74 l/h. Vista frontal das linhas de corrente do óleo em (a). Vista frontal das linhas de corrente da água em (b). Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação em (c).....	160
Figura 87 – Simulação com a vazão de entrada 94 l/h. Vista frontal das linhas de corrente do óleo em (a). Vista frontal das linhas de corrente da água em (b). Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação em (c).....	161
Figura 88 – Simulação com a vazão de entrada 125 l/h. Vista frontal das linhas de corrente do óleo em (a). Vista frontal das linhas de corrente da água em (b). Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação em (c).....	162
Figura 89 – Localização da linha de corrente de ar, conforme experimento realizado	164
Figura 90 – Comparação experimental e numérica da velocidade de ascensão da bolha para a vazão de líquido de 54 l/h.....	164
Figura 91 – Comparação experimental e numérica da velocidade de ascensão da bolha para a vazão de líquido de 74 l/h.....	165
Figura 92 – Comparação experimental e numérica da velocidade de ascensão da bolha para a vazão de líquido de 94 l/h.....	165
Figura 93 – Comparação experimental e numérica da velocidade de ascensão da bolha para a vazão de líquido de 125 l/h.....	166

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições operacionais para a grade de experimentos, para casos com e sem defletor para sistema com 10 e com defletor para sistema com 20 agulhas.....	60
Tabela 2 – Números adimensionais para grade de teste experimental para casos com menor fração de gás (sistema com 10 agulhas)	65
Tabela 3 – Números adimensionais para grade de teste experimental para casos com maior fração de gás (sistema com 20 agulhas)	66
Tabela 4 – Correlações para coeficiente de arrasto (C_D) na literatura.....	68
Tabela 5 – Informações das malhas.....	86
Tabela 6 – Comparação dos tempos de permanência da gota nos três tipos de experimentos realizados, realizados em triplicata (3 medições), vazão de líquido de 54 l/h	132
Tabela 7 – Comparação dos tempos de permanência da gota nos três tipos de experimentos realizados, realizados em triplicata (3 medições), vazão de líquido de 74 l/h	133
Tabela 8 – Comparação dos tempos de permanência da gota nos três tipos de experimentos realizados, realizados em triplicata (3 medições), vazão de líquido de 94 l/h	134
Tabela 9 – Comparação dos tempos de permanência da gota nos três tipos de experimentos realizados, realizados em triplicata (3 medições), caso de maior vazão de líquido (125 l/h).....	135
Tabela 10 – Tempo médio de permanência das gotas na câmara.....	167
Tabela 11 – Tempo médio de permanência das gotas na câmara.....	167

LISTA DE NOMENCLATURA

A	Área [m ²]
A _a	Área seção transversal [m ²]
Ar	Número de Arquimedes
b	Raio da bolha [m]
B	Força de empuxo [N]
d	Diâmetro da partícula [m]
C _d	Coefficiente de arrasto
C _{Do}	Coefficiente de arrasto de uma bolha isolada
C _ω	Termo de difusão cruzada, resultante da combinação dos modelos k – e k – ω
	padrão para a geração do modelo k – ω SST [kg/(s ²)]
D	Força de Arrasto [N/kg]
d _b	Diâmetro da bolha [m]
D _ω	Termo de dissipação de ω devido à turbulência [kg/(s ²)]
D _k	Termo de dissipação de k devido à turbulência [kg/(ms ³)]
Eö	Número de Eötvos
F ₁	Parâmetro do modelo de turbulência (k – ω SST)
F _B	Força de empuxo [N]
F _d	Força de arraste por unidade de massa da partícula [N/kg]
F _S	Força superficial ou de tensão superficial [N]
F _{lift}	Força de sustentação [N]
f _w	Frequência de oscilação da bolha [Hz]
g	Vetor aceleração gravitacional [m/s ²]
G _k	Termo de geração de k [kg/(ms ³)]
G _ω	Termo de geração de ω [kg/(s ²)]
k	Energia cinética turbulenta [m ² /s ²]
L _{eff}	Comprimento efetivo [m]
M	Número de Morton
m _d	Massa da gota [kg]
m _{H2O}	Vazão mássica água [kg/s]
m _{oleo}	Vazão mássica óleo [kg/s]
m _{gas}	Vazão mássica do gás [kg/s]
N _i	Número de elementos da malha numérica
p	Pressão [kg/ms ²]
Q _{H2Oinlet}	Vazão de entrada de água [l/h]
Q _{H2Ooutlet}	Vazão de saída de água [l/h]
R	Incerteza relativa
Re	Número de Reynolds
ref_mm	Incerteza de referência
S	Magnitude de tensor taxa de deformação [1/(s)]
St	Número de Strouhal
t	Tempo [s]
t _r	Tempo de residência [s]
U	Vetor velocidade [m/s]
U _b	Vetor velocidade da bolha [m/s]
U _{l,i}	Velocidade vetorial do líquido [m/s]
U _{g,i}	Velocidade vetorial do gás [m/s]

v	Vetor velocidade [m/s]
V_b	Velocidade da bolha [m/s]
v_c	Velocidade da fase contínua [m/s]
v_d	Velocidade da fase dispersa [m/s]
V_t	Velocidade terminal [m/s]
V_{rel}	Velocidade relativa [m/s]
V_{v}	Velocidade componente vertical de uma bolha isolada [m/s]
u	Volume da bolha [m ³]
W	Força peso [N]
We	Número de Weber
y	Distância até superfície mais próxima, considerada no modelo de turbulência (k
$-\omega$ SST)	

Letras Gregas

α	Fração de gás
α_d	Fração de volume da fase dispersa
α_{loc}	Fração de gás local
α_{ω}	Fator de amortecimento para a transferência das tensões de cisalhamento
turbulentas	
Γ_k	Difusividade efetiva de k [kg/(ms)]
Γ_{ω}	Difusividade efetiva de ω [kg/(ms)]
$\epsilon_{i,j}$	Diferença entre soluções numéricas com malhas com distintos graus
de refinamento	
μ	Viscosidade do gás [kg/(ms)]
μ_{eff}	Viscosidade efetiva do gás [kg/(ms)]
μ_t	Viscosidade turbulenta [kg/(ms)]
ν	Viscosidade cinemática [m ² /(s)]
ρ	Massa específica [kg/(m ³)]
ρ_l	Massa específica do líquido [kg/(m ³)]
ρ_g	Massa específica do gás [kg/(m ³)]
ρ_w	Massa específica da fase contínua [kg/(m ³)]
σ	Tensão superficial [kg/s ²]
ω	Taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta [1/(s)]
∇	Operador Nabla [1/(m)]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1	PROCESSO DE SEPARAÇÃO.....	22
2.2	FLOTAÇÃO	24
2.2.1	<i>Parâmetros do processo de flotação</i>	<i>25</i>
2.2.1.1	Regime de Escoamento	26
2.3	CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE A DINÂMICA DE BOLHAS E GOTAS 27	
2.3.1	<i>Hidrodinâmica da bolha e gota.....</i>	<i>27</i>
2.3.2	<i>Características da Fase Dispersa</i>	<i>29</i>
2.3.3	<i>Números adimensionais.....</i>	<i>32</i>
2.3.4	<i>Movimento e velocidade</i>	<i>35</i>
2.3.5	<i>Fenômenos de coalescência e quebra</i>	<i>37</i>
2.3.6	<i>Fenômenos superficiais e interfaciais</i>	<i>40</i>
2.3.6.1	Fenômenos de tensão superficial contínua (CSF)	40
2.3.6.2	Fenômenos interfaciais	41
2.3.6.2.1	Força de Arrasto	44
2.4	ESTUDOS EXISTENTES SOBRE A DINÂMICA DE BOLHAS E GOTAS	46
2.4.1	<i>Estudos experimentais</i>	<i>46</i>
2.4.2	<i>Estudos numéricos.....</i>	<i>48</i>
2.5	FECHAMENTO DO CAPÍTULO	55
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	57
3.1	BANCADA EXPERIMENTAL	57
3.1.1	<i>Procedimento Experimental</i>	<i>60</i>
3.1.2	<i>Metodologia de Análise de Dados.....</i>	<i>61</i>
3.1.3	<i>Cálculos dos parâmetros</i>	<i>64</i>
3.1.4	<i>Avaliação da incerteza dos parâmetros no processamento manual</i>	<i>69</i>
3.2	FECHAMENTO DO CAPÍTULO	71
4	MODELAGEM MATEMÁTICA E MÉTODO NUMÉRICO	73
4.1	MODELO MATEMÁTICO PARA ESCOAMENTO MULTIFÁSICO	73
4.1.1	<i>Modelo Euleriano-Euleriano Não-Homogêneo (Modelo de Dois Fluidos).....</i>	<i>74</i>
4.1.2	<i>Modelo Euleriano-Lagrangeano (Rastreamento de Partículas).....</i>	<i>77</i>
4.1.3	<i>Modelo de Turbulência.....</i>	<i>79</i>
4.2	SOLUÇÃO NUMÉRICA	80
4.3	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	82
4.3.1	<i>Domínio de Solução e Condições de Contorno.....</i>	<i>83</i>
4.3.2	<i>Malha e Geometria.....</i>	<i>85</i>
4.3.3	<i>Determinação da Incerteza Numérica – Teste de Malha</i>	<i>85</i>
4.3.3.1	Quantificação da Incerteza Numérica.....	89
4.4	FECHAMENTO DO CAPÍTULO	93
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	94
5.1	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	94
5.1.1	<i>Cinemática da população de bolhas</i>	<i>95</i>
5.1.2	<i>Cinemática de gotas dispersas em uma população de bolhas</i>	<i>117</i>

5.1.2.1	Análise global do diâmetro das bolhas e gotas.....	119
5.1.2.2	Análise global da distribuição da velocidade das bolhas e gotas nos experimentos com defletor	122
5.1.2.3	Rastreamento individual das gotas	124
5.1.2.4	Análise da interação entre bolhas e gotas	136
5.2	RESULTADOS NUMÉRICOS	143
5.2.1	<i>Simulação do escoamento de água.....</i>	<i>144</i>
5.2.2	<i>Comportamento das gotas no líquido.....</i>	<i>148</i>
5.2.3	<i>Comportamento das bolhas no líquido.....</i>	<i>153</i>
5.2.4	<i>Comportamento das gotas e bolhas no líquido</i>	<i>158</i>
5.2.5	<i>Validação das simulações numéricas.....</i>	<i>163</i>
5.3	FECHAMENTO DO CAPÍTULO	168
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	169
	REFERÊNCIAS	172

1 INTRODUÇÃO

O movimento de bolhas e gotas em líquido pode ser encontrado em diversas atividades industriais, como estabilidade de emulsões, farmacêutica, cosmética e extração de óleo e gás. Em tais situações de escoamento trifásico, as fases de fluido disperso afetam a cinemática do movimento. Além disso, em muitos processos, a fase contínua não é estacionária, afetando a hidrodinâmica do sistema. Compreender os fenômenos hidrodinâmicos que emergem de escoamentos multifásicos complexos é essencial para determinar suas características (MANICA; KLASEBOER; CHAN, 2012).

Na indústria do petróleo, os sistemas trifásicos óleo-água-gás são encontrados em muitas aplicações e dependem da cinemática do escoamento multifásico. Por exemplo, a primeira etapa da separação de fases, também conhecida como processamento primário, é realizada em vasos gravitacionais horizontais, conhecidos como separadores trifásicos (FIGUEIREDO; OSCAR A. Z. SOTOMAYOR, 2009; SILVA, 2013). As dimensões desses separadores podem ser de até 3 m de diâmetro e 25 m de comprimento e apresentam alto custo de compra e instalação, principalmente nos cenários da produção no mar, onde existem limitações de espaço e peso nas plataformas (SIMMONS; WILSON; AZZOPARDI, 2002). Essa separação ocorre em uma plataforma de produção e tem como objetivo dividir as fases produzidas pelo reservatório (óleo, água e gás) em escoamentos distintos antes de serem transportadas por longas distâncias economizando os altos custos com bombeamento. Os escoamentos de óleo e gás são normalmente redirecionados para processos de separação secundária, cujo objetivo é melhorar a separação de fases, enquanto a água produzida é descartada. Nesse cenário, a técnica de flotação é responsável pelo tratamento secundário da água produzida, baixando o teor de óleo para valores abaixo de 20 ppm, reduzindo os efeitos nocivos de seu descarte e cumprindo rigorosas regulamentações ambientais. As águas residuais contendo óleo apresentam grandes riscos ambientais se forem descartadas de maneira inadequada, portanto, as regulamentações ambientais exigem que o óleo seja removido antes que a água seja descartada (JAWORSKI; MENG, 2009).

A técnica de flotação consiste na inserção de bolhas no sistema, promovendo uma fixação de gota-bolha, o que aumenta a eficiência da separação (EFTEKHARDADKHAH et al., 2015; LIM; LAU; POH, 2016; MOOSAI; DAWE, 2003; OLIVEIRA; GONZALEZ; OLIVEIRA, 1998; SATHTHASIVAM; LOGANATHAN; SARP, 2016; YASUDA;

HANEDA, 2015). No entanto, as condições específicas que permitem a fixação da gota-bolha devem ser atendidas. Com este objetivo, os fenômenos hidrodinâmicos associados ao movimento de bolhas dispersas em uma coluna de flotação, como formação de bolhas, trajetória ascendente, velocidade ascendente, velocidade terminal e diâmetro equivalente, devem ser analisados para que a eficiência de separação possa ser descrita. O fenômeno de hetero coalescência só pode ocorrer por meio do contato entre bolhas e gotas de óleo (MOOSAI; DAWE, 2003; STRICKLAND, 1980; TABOR et al., 2011). A caracterização hidrodinâmica do comportamento das bolhas prevendo sua aplicação em colunas de bolhas foi estudada por Sheikhi et al. (2013).

Jaworski e Meng (2009), afirmam que os processos de separação água-óleo são dominados por dois mecanismos: estabilização das fases e coalescência. Quanto menor a gota da fase dispersa, maior será a separação das fases (estabilização), compreendido pela lei de Stokes. Sendo a coalescência impulsionada pelas interações que acontecem nas interfaces das gotas dispersas, e não é garantida com o contato de duas gotas, e devido à complexidade o fenômeno é menos compreendido até o momento.

A flotação depende de forças hidrodinâmicas (por exemplo, os movimentos das bolhas, gotas e fase contínua e interações interfaciais) e aspectos físico-químicos (por exemplo, interações químicas que afetam as interações interfaciais). Neste contexto, é importante destacar que a eficiência da separação com o flotor está relacionada com as forças provenientes da ascensão das bolhas injetadas no equipamento. As interações entre bolhas e gotas são aleatórias, apresentam comportamento estocástico, adicionando assim complexidade ao movimento dentro do equipamento de flotação. Além disso, o caminho oscilatório de uma bolha ascendente geralmente cria vórtices estáveis em sua parte traseira que, por sua vez, perturbam o escoamento contínuo promovendo uma esteira, influenciando assim o movimento da gota, mesmo sem colidir diretamente com ela. Assim, as forças que atuam sobre as bolhas e gotas desempenham um papel essencial na estimativa do comportamento dinâmico do movimento e, conseqüentemente, na previsão da interação entre as fases. A compreensão desses fenômenos depende da análise da força de arrasto e do coeficiente de arrasto, necessária para melhor compreender a cinemática do escoamento das bolhas, uma vez que, para partículas fluidas, a magnitude da velocidade terminal costuma ser controlada pela força de arrasto.

A partir dos fundamentos descritos acima, conclui-se que o comportamento dinâmico de bolhas e gotas dispersas em um escoamento de líquido depende de vários fatores fundamentais que determinam a cinemática do sistema. Esses aspectos fundamentais, que se relacionam ao uso da técnica de flotação para remoção de gotas de óleo de águas residuais no

processamento primário, são o foco deste trabalho. Apesar de sua importância na indústria do petróleo, estudos sobre escoamentos multifásicos de água, óleo e gás em padrão disperso ainda são escassos. Esta tese aborda a influência das bolhas no escoamento de gotas de óleo, com experimentos realizados com uma população de bolhas e gotas em um líquido em escoamento (fase contínua). Além disso, são analisadas as condições para as quais as forças de inércia são dominantes, permitindo estimar as interações hidrodinâmicas, bem como seu papel no comportamento dinâmico das gotas. Este fator estende a análise típica de fixação de gota-bolha na qual a maioria dos estudos se baseia. Os efeitos dos parâmetros do processo são avaliados e os resultados são usados para discutir os mecanismos físicos. Compreender os processos físicos envolvidos ajuda a estabelecer condições operacionais e financeiramente ideais e viáveis, ao mesmo tempo que reduz o teor de óleo nas águas residuais. Portanto, a eficiência operacional pode ser aumentada e os custos minimizados.

As técnicas visuais são a forma mais simples de estimar o regime de escoamento em uma coluna de flotação (Prakash et al., 2018). Para o tratamento dos dados experimentais, aplicou-se o processamento de imagem pelo método de análise de imagem de partículas que também foi aplicado em Besagni e Inzoli (2016); Colombet et al. (2018) e Yan et al. (2018).

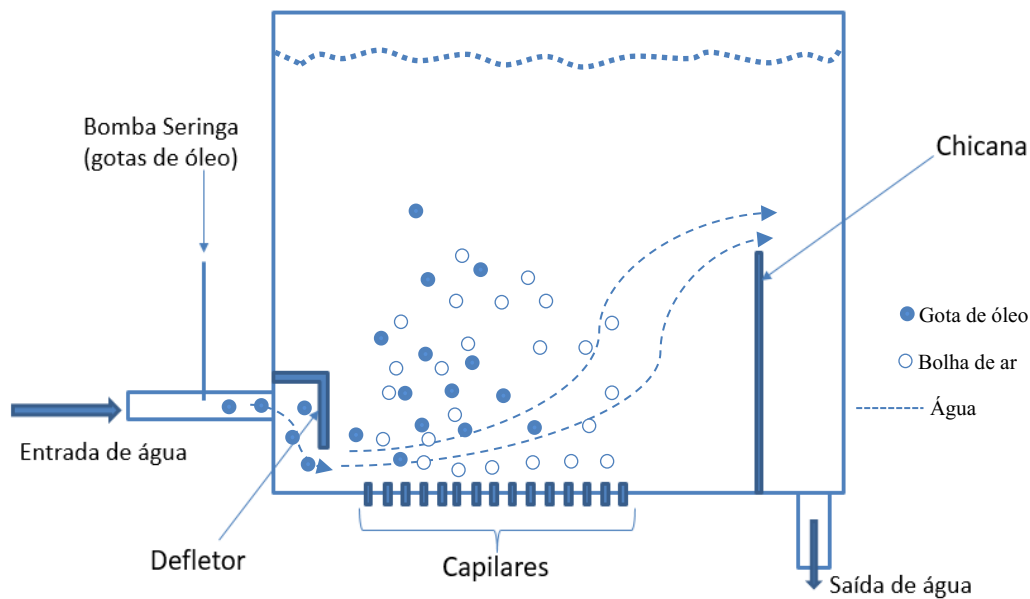
Como forma de buscar novos instrumentos para auxiliar o projeto de flotadores, onde se encontra o escoamento de gotas de óleo e bolhas junto com o escoamento de água são necessários estudos, experimentais e numéricos, que permitam extrair detalhes do campo do escoamento. Acredita-se que o estudo do escoamento em geometrias modelo, onde se tenha acesso visual para a realização das medidas experimentais, aliados à realização de simulações numéricas, podem trazer informações importantes sobre os fenômenos envolvidos na interação de bolhas e gotas no escoamento de água para o dimensionamento/projeto de flotadores.

OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo estudar o escoamento água, óleo e gás em padrão disperso visando entender a interação entre as fases em flotadores, mediante realização de experimentos e simulações numéricas utilizando a técnica da Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC).

Para a realização do estudo experimental, foi projetada e construída uma bancada experimental, similar ao desenho esquemático mostrado na Figura 1, que permite promover o escoamento de bolhas, gotas de óleo e escoamento de água com acesso visual para a captura de imagens do escoamento.

Figura 1 – Esquema do equipamento utilizado no estudo experimental



Fonte: Autoria própria

A etapa relativa ao estudo numérico, foi realizada utilizando o modelo Euleriano-Euleriano não homogêneo (modelo de dois fluidos) e o Modelo Euleriano-Lagrangeano para o rastreamento de partículas. O sistema de equações foi resolvido utilizando o programa computacional comercial ANSYS – CFX.

Na posse das medidas experimentais (imagens) e dos resultados numéricos foram avaliados em detalhes a interação de bolhas e gotas no escoamento. Serão apresentadas as condições para as trajetórias das bolhas, os campos de velocidade e forças interfaciais. Os resultados serão apresentados em função de números adimensionais de tal forma que possam ser aplicados à dinâmica do escoamento em flotores.

JUSTIFICATIVA

Em uma planta de processamento primário se utilizam equipamentos que se complementam com a finalidade de separar as fases (água, óleo e gás), seja para fins comerciais ou para descarte. O primeiro equipamento de separação de fases que recebe a produção oriunda diretamente dos poços é o separador gravitacional. Após a separação inicial das fases óleo, água e gás, estas são enviadas para as respectivas correntes, atendendo aos requisitos exigidos.

A água removida do separador gravitacional é transportada para hidrociclones, que removem grande parte do óleo restante, porém ainda não atingindo o requisito de água para descarte. Por isso, a limpeza final das gotas de óleo do escoamento de água, é realizada utilizando flutuadores, que enquadram a água para o descarte com o mínimo de contaminação de óleo.

O flutuador é um vaso onde a água produzida (oriunda dos processos de separação a montante) é recebida e tratada a partir da inserção de microbolhas que tendem a separar as gotas de óleo da corrente de água produzida.

Do ponto de vista fundamental, o presente trabalho, como foi esquematizado na Figura 1, envolve o escoamento de gotas de óleo e bolhas no escoamento de água. Que abrangem fenômenos complexos e pouco explorados na literatura.

Neste contexto no presente trabalho, busca-se investigar e entender os fundamentos da dinâmica do escoamento com as interações hidrodinâmicas promovidas pela inserção das bolhas que governam a separação das gotas da corrente líquida, levando a um processo de separação aprimorado. E para isso, construiu-se uma bancada experimental que foi capaz de reproduzir o escoamento de água com inserção de bolhas e gotas de óleo, prevendo assim interações entre bolhas e gotas. A simulação numérica, por sua vez, representa um estudo complementar para a literatura da área e auxilia ainda mais no entendimento dos complexos fenômenos associados ao escoamento, principalmente na determinação das características que não foram possíveis de se obter experimentalmente, contribuindo assim com o desenvolvimento do conhecimento pouco explorado até o momento.

APRESENTAÇÃO DO DOCUMENTO

Esta tese está organizada em seis capítulos, conforme breve síntese a seguir:

- Capítulo I – Apresentam-se a introdução ao tema, objetivos seguidos da justificativa.
- Capítulo II – É apresentada uma breve contextualização do processo de separação e flotação para fins de entendimento dos principais aspectos, fatores e fenômenos associados. E a revisão bibliográfica contemplando os conceitos fundamentais sobre a dinâmica de bolhas e gotas e estudos experimentais e numéricos existentes.

- Capítulo III – Demonstra a metodologia experimental adotada para a extração de parâmetros, técnicas de captura de imagens, processamento e procedimento experimental.
- Capítulo IV – Apresenta a metodologia numérica adotada nas simulações. São detalhadas as equações, hipóteses, condições de contorno, método de captura de interface.
- Capítulo V – Exibe os resultados obtidos com as metodologias experimental e numérica, e discussão sobre esses resultados.
- Capítulo VI – Apresenta considerações finais desta tese.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a revisão da literatura para o entendimento do escoamento de água, óleo e gás em padrão disperso, para posterior aplicação da flotação no processo industrial. Faz-se, também, uma avaliação das principais características operacionais e experimentais necessárias para a realização da simulação numérica mediante o emprego das técnicas da fluidodinâmica computacional.

Apresenta-se um breve contexto sobre o processo de separação, seguido da técnica de flotação aplicada a separação de gotas de óleo com injeção de bolhas em meio líquido. Apresentam-se os conceitos fundamentais sobre a dinâmica de bolhas e gotas abordando os fenômenos e forças interfaciais e superficiais, números adimensionais e estudos existentes sobre o escoamento de bolhas e gotas em caráter experimental e numérico.

E por fim, apresenta-se o fechamento da fundamentação teórica, para determinar a abrangência desta presente pesquisa em função de pontos relevantes que já são discutidos na literatura e tópicos que necessitam ser investigados.

2.1 PROCESSO DE SEPARAÇÃO

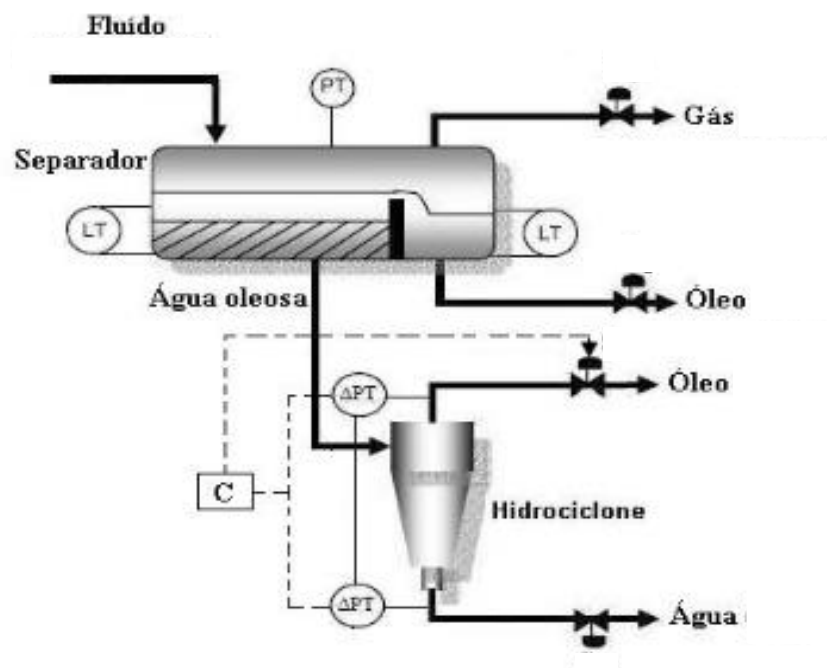
A operação do processo de separação de petróleo é extremamente complexa devido as características e fortes restrições ambientais, e está inserida na primeira etapa da fase de produção que é o processamento primário de petróleo. Sendo assim, o primeiro equipamento que recebe o petróleo, ou seja, a mistura composta basicamente por água, óleo e gás é o separador gravitacional.

O separador gravitacional é um vaso cilíndrico horizontal constituído por duas divisões denominadas câmara de separação e câmara de óleo, que são separadas por um vertedouro. Por ação da força da gravidade acontece a segregação das fases na câmara de separação, obtendo três fases: uma fase rica em água, uma fase rica em óleo e uma fase rica em gás. A fase rica em óleo é enviada até os tratadores, que fazem o processamento para retirada de sais e resíduos de água e, em seguida, é encaminhada para o oleoduto. O gás é transportado para compressores e encaminhado a uma planta de tratamento, para retirada da umidade e posterior envio para o continente por gasoduto. A fase rica em água é encaminhada à unidade de tratamento, para redução de resíduos de óleo nos padrões especificados para seu descarte ou re-injeção (FIGUEIREDO; SOTOMAYOR, 2009).

O processo de separação é complexo devido às características de escoamentos multifásicos, deficiência nas variáveis de controle, dinâmica do escoamento e das exigências ambientais impostas por legislação, principalmente do descarte da água residual. A água oleosa residual pode conter concentração limite de 20 mg/l conforme legislação CONAMA 357/2005 e CONAMA 430/2011. Segundo Tomasoni e Dos Santos (2016), em média, para cada barril de petróleo produzido são gerados de três a sete barris de água produzida.

Figueiredo e Sotomayor (2009), mostram um diagrama esquemático que representa o processo de separação que consiste no processamento primário do petróleo, disposto na Figura 2. Este sistema integrado é composto por um hidrociclone utilizado para fazer o tratamento da corrente de água, a qual apresenta gotas de óleo. O processo de separação consiste na entrada da corrente de água, óleo e gás no separador, sendo que o gás é retirado pelo topo, o óleo é coletado pelo fundo após a chicana e a água residual oleosa é coletada pelo fundo antes da chicana e encaminhada ao hidrociclone, cuja função é remover as gotas de óleo da água.

Figura 2 – Esquema de um sistema integrado de separação



Fonte: adaptado de Figueiredo e Sotomayor (2009)

A corrente de água, que contém gotas de óleo necessita de tratamento para descarte da água, para isso após os hidrociclones, o uso de flutuadores garante eficiência na separação das gotas de óleo na água. Conforme Figueiredo e Sotomayor (2009), em modernas plataformas de petróleo, o tratamento da corrente de água é feito primeiramente em hidrociclones, no qual

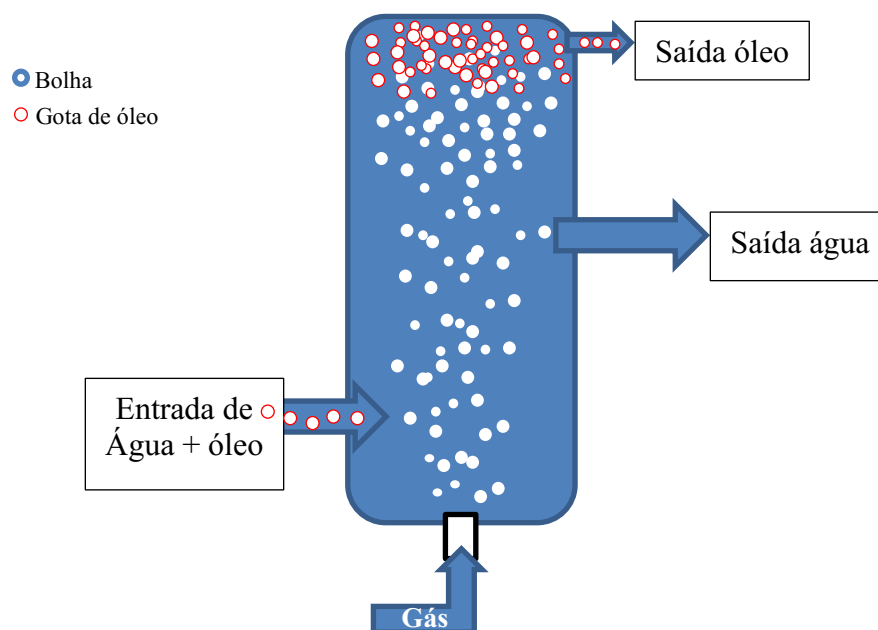
atingem-se níveis de aproximadamente 200 ppm e seguido do tratamento em flotadores, atingindo valores abaixo de 20 ppm de teor de óleo graxo.

2.2 FLOTAÇÃO

A técnica de flotação consiste na inserção de bolhas no sistema, promovendo uma fixação de gota-bolha, o que aumenta a eficiência da separação. Os sistemas de flotação são geralmente preferidos a outros métodos devido a configuração apresentar vantagens significativas no menor tempo de retenção e maior taxa de carregamento, sistema compacto e menor e por oferecer melhor eficiência de separação na remoção de partículas menores e mais leves (MOOSAI; DAWE, 2003; SATHTHASIVAM; LOGANATHAN; SARP, 2016a; YASUDA; HANEDA, 2015).

Segundo Moosai e Dawe (2003), a flotação com gás é uma técnica de separação gravitacional acelerada na qual são injetadas finas bolhas em uma fase aquosa contendo gotas de líquido imiscíveis (óleo) ou partículas oleosas sólidas de modo que as bolhas se fixem às gotas. O óleo parece mais leve porque a diferença de massa específica entre o aglomerado de óleo e a água é aumentada, consequentemente, o óleo sobe mais rápido, permitindo uma separação mais rápida e eficaz da fase aquosa. Um esquema que representa o processo de flotação pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Esquema ilustrativo de um processo genérico de flotação



Fonte: Autoria própria

A Figura 3 mostra que as bolhas são injetadas pelo fundo e escoam pelo equipamento, entrando em contato e interagindo com as gotas de óleo, com o objetivo de aumentar a velocidade terminal para promover a separação das gotas de óleo dispersas no meio líquido.

Segundo Strickland (1980), a eficácia da flotação de águas residuais com a presença de óleo não depende apenas dos parâmetros tradicionais de separação por gravidade inseridos na equação de Stokes, como por exemplo a diferença de massa específica do líquido, tamanho e distribuição das gotas de óleo, temperatura e viscosidade; mas dependem também do tamanho da bolha de gás e grau de distribuição de dispersão, concentração de entrada de óleo e sua variabilidade, conteúdo químico da água residual e do óleo, pH e viscosidade da fase aquosa e propriedades interfaciais entre o óleo, gás e, particularmente tensões interfaciais, molhabilidade e coeficientes de dispersão.

No entanto, as condições específicas que permitem a fixação da gota-bolha devem ser atendidas. A fixação é controlada principalmente pelas tensões interfaciais entre a bolha de gás e a gota de óleo na água. A diferença das tensões interfaciais é usada para calcular o coeficiente de espalhamento. Este coeficiente indica a força da fixação da gota-bolha conforme abordado em Lim, Lau e Poh (2016) e Saththasivam, Loganathan e Sarp (2016). Semelhante à massa específica e à viscosidade, as tensões interfaciais entre os fluidos também são afetadas pela temperatura e pelo conteúdo do sólido dissolvido. O incremento da temperatura diminui a tensão interfacial, promovendo assim a coalescência, enquanto o oposto é verdadeiro para a variação da salinidade (RAWLINS, 2011).

Os fenômenos hidrodinâmicos associados ao movimento de bolhas dispersas em uma coluna de flotação, como formação de bolhas, trajetória ascendente, velocidade ascendente, velocidade terminal e diâmetro equivalente, devem ser analisados para que a eficiência de separação possa ser descrita. O fenômeno de hetero coalescência só pode ocorrer por meio do contato entre bolhas e gotas de óleo (MOOSAI; DAWE, 2003; STRICKLAND, 1980; TABOR et al., 2011). A caracterização hidrodinâmica do comportamento das bolhas prevendo sua aplicação em colunas de bolhas foi estudada por Sheikhi et al. (2013).

2.2.1 Parâmetros do processo de flotação

O conhecimento do regime de escoamento é um dos parâmetros mais importantes no projeto, operação, controle, análise e aumento de escala do equipamento de flotação ou separação. O escoamento multifásico pode ser denominado como o escoamento interagente de duas ou mais fases, onde a interface entre as fases é influenciada pelo seu movimento.

2.2.1.1 Regime de Escoamento

Segundo Prakash, Majumder e Singh (2018), existem basicamente dois tipos de regimes de escoamento nas colunas de flotação: borbulhante (homogêneo) e turbulento (heterogêneo). Escoamento borbulhante ocorre em baixa a moderada velocidade superficial do gás na fase líquida contínua e gás como uma fase dispersa na coluna. No escoamento borbulhante, o tamanho das bolhas formadas é aproximadamente uniforme. O regime de escoamento homogêneo é observado na velocidade do gás superficial menor que 5 cm/s na coluna semi-descontínua.

Existem vários métodos disponíveis para observar o regime de escoamento e sua transição, como: observação visual, análise de escoamento de movimento, velocimetria por imagem de partículas (PIV), tomografia de capacitância elétrica (ECT), anemometria Doppler a Laser (LDA), tomografia computadorizada de raios γ (tomografia computadorizada), sonda de condutividade, variação de temperatura usando uma sonda de transferência de calor e rede neural (PRAKASH; MAJUMDER; SINGH, 2018).

Segundo Prakash, Majumder e Singh (2018), a técnica de observação visual é uma das técnicas mais simples para estimar o padrão de escoamento, mas somente para colunas transparentes. No regime de escoamento homogêneo, observa-se o movimento lento da bolha, mas no regime heterogêneo, a circulação grosseira e a intensidade de interação das bolhas são muito altas, sendo necessário utilizar o processamento de imagens para interpretar o regime de escoamento. Uma imagem monocromática pode ser definida como uma função que representa os resultados da interação entre iluminância - quantidade de luz que atinge um objeto - e refletância do objeto, ou seja, a fração de luz que o objeto reflete ou transmite (MARQUES; VIEIRA, 1999).

O processamento pelo método de análise de imagem de bolha também foi muito aplicado e pode ser visto nos trabalhos de Besagni e Inzoli (2016); Colombet et al. (2018) e Yan et al. (2018). Uma imagem monocromática pode ser definida como uma função que representa os resultados da interação entre iluminância - quantidade de luz que atinge um objeto - e refletância do objeto, ou seja, a fração de luz que o objeto reflete ou transmite (MARQUES; VIEIRA, 1999).

Com a teoria do escoamento de movimento, sugerida por Wallis em 1969, é possível prever o regime de escoamento e sua transição para o sistema de duas fases. Prakash, Majumder e Singh (2018), demonstram em seu trabalho o escoamento de movimento (j_{gl}) com o gás

holdup, denotando o ponto de transição pela mudança repentina na inclinação. O escoamento de movimento (j_{gl}) é calculado conforme demonstrado em Shaikh e Al-Dahhan (2007).

2.3 CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE A DINÂMICA DE BOLHAS E GOTAS

Ter conhecimento dos conceitos fundamentais sobre a dinâmica de bolhas em sistemas multifásicos desempenha uma função essencial na determinação das características de escoamento que representa todo o processo. No entanto, as escalas de comprimento caracterizam os sistemas, e consistem nas dificuldades significativas na interpretação dos resultados experimentais e no uso dos métodos numéricos utilizados na simulação. Por exemplo, para bolhas e gotas com tamanho em torno de 100 μm , as colisões que podem levar à coalescência são afetadas em parte por forças de superfície (por exemplo, Van der Waals) que operam em escalas de nanômetros e, portanto, são muito difíceis de serem quantificadas experimentalmente.

Além disso, é importante conhecer os conceitos fundamentais sobre as deformações da superfície que são da ordem de nanômetros em bolhas e gotas, que estão diretamente associadas às condições de escoamento e à magnitude das forças de superfície. Segundo Manica, Klaseboer e Chan (2012), para a interação bolha-gota também existe a contribuição dos fatores como a natureza da condição de contorno hidrodinâmica na superfície. Portanto, é importante conhecer e avaliar a natureza dinâmica das interações, tais como a dependência das forças de colisão entre bolhas e gotas para poder determinar se as colisões são estáveis ou levam à coalescência.

2.3.1 Hidrodinâmica da bolha e gota

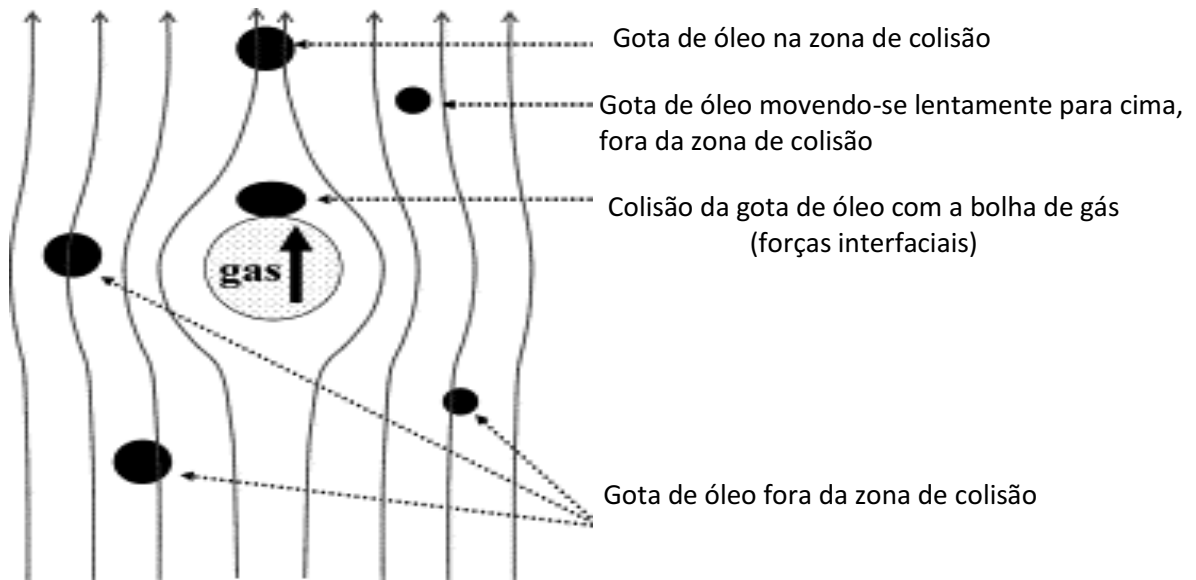
Dentro do flutador, o escoamento é complexo, com complexas linhas de correntes de gotas e bolhas, sendo que muitas gotas de óleo defletem das bolhas ao invés de colidirem ou coalescerem. Segundo Moosai e Dawe (2003), a frequência de colisão é difícil de estimar, pois as bolhas crescem à medida que sobem devido a uma redução da pressão hidrostática durante a elevação da bolha (cerca de 0,3% para um aumento de 100 mm), pois o gás pode se difundir, se a água é supersaturada com gás.

Alguns fatores, segundo Bahadori et al. (2013); Lim, Lau e Poh (2016) e Saththasivam, Loganathan e Sarp (2016), influenciam diretamente na probabilidade de colisão, como a

concentração de gotas de óleo e bolhas, área de projeção das gotas e bolhas. Os autores constataram que concentrações e área de superfície maior oferecem taxa de colisão mais alta.

Para ocorrer a colisão, a bolha e a gota precisam estar muito próximas, na Figura 4, é possível observar com as linhas de corrente do escoamento que não é tão simples acontecer uma colisão entre bolhas e gotas, uma vez que é grande a chance de gotas estarem fora das zonas de possíveis colisões.

Figura 4 – Linhas de corrente para representar trajetória de gota e bolha



Fonte: adaptado de Moosai e Dawe (2003)

Teorias hidrodinâmicas satisfatórias foram desenvolvidas por Strickland (1980), Kitchener (1984), Sylvester e Byeseda (1980) e Reay e Ratclift (1973). Sendo que, mostraram que a flotação é mais eficaz quando as gotas de óleo têm diâmetros entre 3 e 100 μm e é significativamente afetada pela densidade do número de bolhas. Os autores sugerem que é melhor ter gotas de óleo tão grandes quanto possível (área de colisão maior) e tamanho de bolha menor possível (tempos de residência mais longos).

Portanto, a remoção eficiente de óleo durante a flotação depende da frequência de colisão e/ou coalescência entre as bolhas e gotas para formação dos agregados e da estabilidade destes agregados. Sendo que a frequência de colisão entre bolhas e gotas depende da hidrodinâmica, uma vez que a primeira condição necessária para sua eficácia é que as trajetórias mútuas levem a um estágio de colisão. A colisão deve ocorrer de forma a diluir e romper o líquido/filme intersticial entre a gota e a bolha. Este é o principal requisito para um mecanismo de adesão, que ocorre quando uma espessura de filme de 0,1 μm é atingida. Nesse ponto, o

filme se rompe devido a uma força intermolecular mais forte entre a gota e a bolha, que eventualmente forma um agregado gota-bolha (EFTEKHARDADKHAH et al., 2015; LIM; LAU; POH, 2016; OLIVEIRA; GONZALEZ; OLIVEIRA, 1998; SATHTHASIVAM; LOGANATHAN; SARP, 2016).

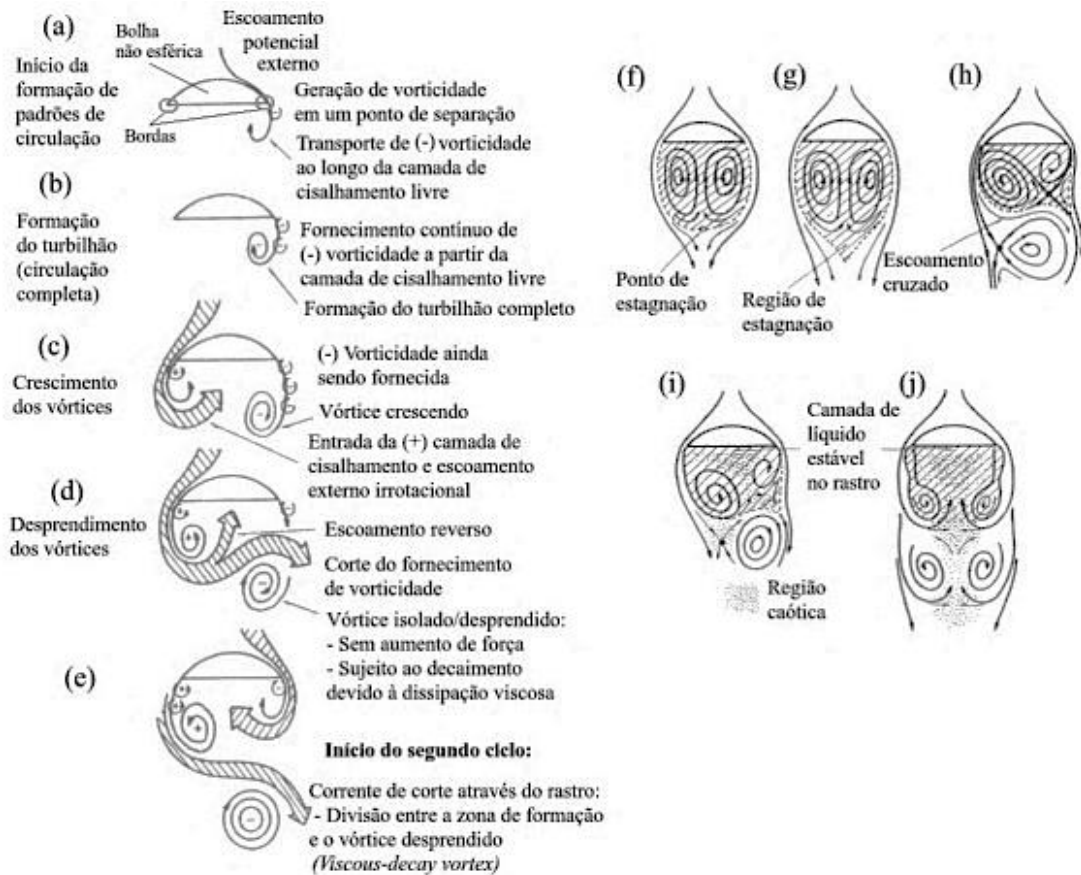
2.3.2 Características da Fase Dispersa

O óleo presente nas águas residuais do processamento primário do petróleo trata-se de uma emulsão de óleo em água, com gotas com diâmetros que variam de 3 a 20 μm de acordo com utilizado em Strickland (1980), Finbourd, Faucher e Sellman (1999), Zande, Broek (1996) e Zande, Janssen e Broek (2001).

Quando o sistema trifásico opera em velocidades mais altas, pode-se ressaltar que, além das interações entre as bolhas, as quais podem causar coalescência e quebra, este último pode ser reforçado pelo efeito da vorticidade gerada pelo rastro das bolhas grandes. Portanto, destaca-se que para uma predição mais correta da distribuição final do tamanho das bolhas em sistemas trifásicos, deve-se considerar além das interações entre as bolhas, os fenômenos relacionados a turbulência induzida pela fase dispersa deformável.

Da Silva Júnior (2011) avaliou os fenômenos de coalescência e quebra minuciosamente. Doraiswamy e Mujumbar (1989) observaram os tipos de rastros em escoamento com bolhas, mostrados e descritos na Figura 5, (a)-(e) mostra o mecanismo de formação do rastro e dos efeitos secundários no escoamento, em (f)-(j) mostram-se rastros observados em escoamentos borbulhantes. Os autores observam que a formação do rastro das bolhas é dividida pela região imediatamente posterior à bolha, apresentando velocidade próxima à da bolha (onde aparecem recirculações irregulares) e pelo segundo ciclo onde os turbilhões formados na região anterior se desprendem e inclui uma camada de cisalhamento livre, conforme observado na Figura 5 (e). Os autores também concluem que onde o rastro do segundo ciclo induz o efeito de deslizamento, pode promover um arraste adicional de particulado no caso de sistemas trifásicos. Segundo Júnior (2015), dentre as características fluidodinâmicas do rastro, uma das mais importantes é sua instabilidade. Inicialmente, o rastro possui estrutura simétrica, composta por uma região laminar fechada, uma zona vorticial toroidal (principal porção) e uma cauda estreita. Com a aceleração da bolha, a região do rastro aumenta, e pode perder a simetria por eventuais perturbações devido a turbulência, causando o desprendimento de turbilhões.

Figura 5 – Formação do rastro e efeitos secundários no escoamento (a) – (e). Rastros observados em escoamentos borbulhantes (f)-(j)



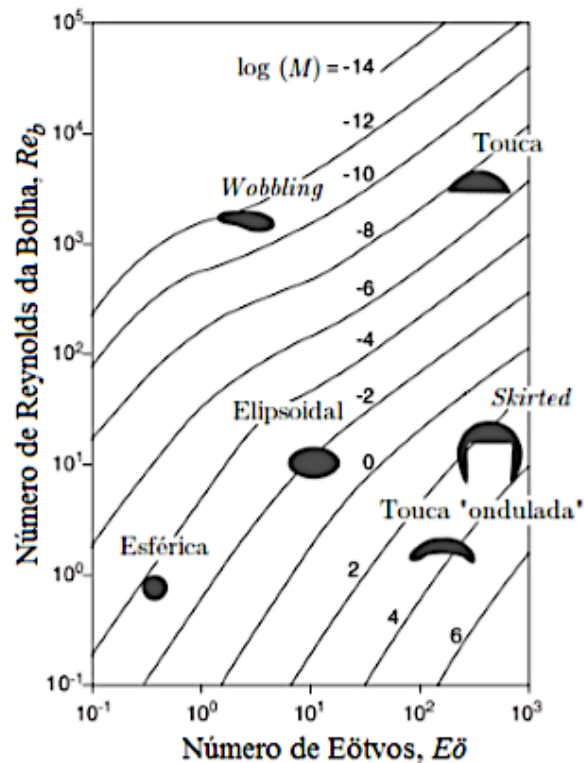
Fonte: adaptado de Doraiswamy e Mujumbar (1989)

Knesebeck e Guardani (2004) também observaram que o perfil de velocidades de um rastro é bastante complicado, pois o mesmo pode apresentar formas variadas e a formação e deslocamento contínuo de vórtices. As características do rastro dependem das características dos fluidos, perfis de velocidade (como a ascensão da bolha), forma da partícula, entre outras propriedades do sistema. Sendo que ao redor de bolhas esféricas o escoamento de líquido é laminar, e, conseqüentemente, o volume do rastro torna-se desprezível. Os autores justificam que para bolhas elipsoidais, calotas elipsoidais e calotas esféricas, os rastros podem ou não serem fechados. E ainda conseguiram identificar que para certos valores de número de Reynolds (Re), devido ao movimento toroidal do rastro fechado, ocorre uma pequena concavidade na base da bolha. Para bolhas pequenas ou líquidos viscosos, o rastro é fechado, e não se separa da bolha durante sua ascensão (não há o desprendimento de vórtices). Os autores afirmam ainda que o mesmo pode ocorrer para elipsoidais, calotas elipsoidais e calotas esféricas. A partir de certo ponto de transição (analisando o Re), o rastro abre-se, e os vórtices surgem e se

desprendem em cada lado da base da bolha, fazendo com que a bolha faça sua subida em ziguezague. Contudo, o rastro aberto vai surgindo e se desprendendo ao longo da trajetória da bolha. Chama-se massa aderida a massa que está aderida às bolhas ou aos rastros. Mais especificamente para os rastros, essa massa aderida também pode receber o nome de massa virtual.

Clift, Grace e Weber (1978), propuseram uma relação para promover a determinação do formato das bolhas, por meio da relação de três grupos adimensionais ($E\ddot{o}$ – número de Eötvös, Re – número de Reynolds e M – número de Morton), conforme gráfico da Figura 6, que representa a predição do formato de uma bolha ou gota escoando em meio líquido (água).

Figura 6 - Relação entre o formato das bolhas e grupos adimensionais



Fonte: adaptado de Krishna, Van Baten e Urseanu (2000)

Na Figura 6 é possível observar que o aumento nos números de Reynolds da bolha (Re) e de Eötvös ($E\ddot{o}$) ocasiona a deformação das bolhas. Ambos os parâmetros são importantes na predição do formato da bolha ou gota que escoam. Em particular é essencial analisar a deformação para as bolhas, pois são elas que apresentam grande deformação no formato e na trajetória durante o escoamento, apresentando movimento ziguezague ou helicoidal.

O caminho de uma bolha ao realizar um movimento em ziguezague ou espiral está relacionado com a estrutura da esteira atrás da bolha conforme visualizado por Brunn e Roden (1985), De Vries, Biesheuvel e Van Wijngaarden (2003) e Saththasivam e Loganathan e Sarp (2016). No estudo de flotação, Oliveira, Gonzales e Oliveira (1998) identificaram que as interações entre bolhas e gotas que ocorrem em uma unidade de flotação são de natureza aleatória e são avaliadas de forma mais adequada em termos de probabilidade. Este comportamento estocástico adiciona complexidade ao movimento dentro do equipamento de flotação, conforme discutido por Eftekhardakhah et al. (2015) e Moosai e Dawe (2003). Além disso, o caminho oscilatório de uma bolha ascendente geralmente cria vórtices estáveis em sua parte traseira que, por sua vez, perturbam o escoamento contínuo promovendo uma esteira conforme investigado por Ellingsen e Risso (2001). Nessa circunstância, os autores ainda relatam que a trajetória da bolha influencia o movimento da gota, mesmo sem colidir diretamente com ela.

2.3.3 Números adimensionais

O número de parâmetros, a não linearidade e a natureza tridimensional caracterizam o problema da dinâmica de bolhas e gotas. E para descrever são utilizados os parâmetros adimensionais a fim de caracterizar o escoamento.

Ishii e Zuber (1979) durante a investigação e desenvolvimento de correlações de movimento relativo para escoamentos bifásicos dispersos de bolhas, gotas e partículas observaram que a capacidade de prever o arrasto interfacial ou a velocidade relativa entre as fases é extremamente importante tanto para a análise de uma bolha dispersa ou em um sistema de gotículas sob condições de regime de escoamento transiente ou em regime permanente.

Legendre, Zenit e Velez-Cordero (2012), durante a investigação sobre a deformação de bolhas em meio líquido, destacam que a parametrização das variáveis (d , ρ , σ , μ) envolvidas no escoamento das bolhas na fase líquida, depende apenas de números adimensionais. Bozzano e Dente (2000), investigaram as características do movimento da bolha, e confirmou que os números adimensionais da bolha mais úteis são: números de Reynolds, Eötvös, Morton, Archimedes e Weber, confirmando assim as tendências já observadas por Wesselingh (1987). Números de Reynolds altos indicam que as forças inerciais prevalecem e que o coeficiente de arrasto é menor. Além disso, com o aumento de Re , ocorre a separação do escoamento, formando vórtices atrás da bolha conforme mencionado por Crowe et al. (2012). Na investigação da influência das condições operacionais e propriedades físicas das fases Schäfer,

Merten e Eigenberger (2002), verificaram que a energia dos redemoinhos atrás das bolhas diminui com o aumento da viscosidade do líquido, reduzindo assim a turbulência na fase líquida.

O número de Eötvös representa a razão entre as forças gravitacionais e tensão superficial, conforme Equação (2.1). É empregado para o escoamento de bolhas, e, com esse parâmetro é possível comparar a influência das forças inerciais com as interfaciais, que dependem das propriedades das fases dispersa e contínua (FENG et al., 2016).

$$E\ddot{o} = \frac{g(\rho_l - \rho_g)d_b^2}{\sigma} \quad (2.1)$$

Onde o d_b é o diâmetro da bolha, ρ_g e ρ_l correspondem a massa específica do gás e do líquido, σ é a tensão superficial e g é a gravidade.

Para representar a relação entre as forças viscosas e inerciais que atuam no escoamento utiliza-se a fórmula do número de Reynolds conforme Equação (2.2). Quando as forças viscosas predominam, o escoamento é laminar, correspondente aos pequenos números de Reynolds, por exemplo. Ou seja, o número de Reynolds relaciona as forças de inércia com as forças viscosas caracterizando o escoamento como laminar ou turbulento.

$$Re = \frac{\rho_l |U_{g,i} - U_{l,i}| d_b}{\mu_l} \quad (2.2)$$

Onde μ_l é a viscosidade dinâmica do líquido, $U_{g,i}$ e $U_{l,i}$ são as velocidades vetoriais do gás e do líquido ($i=x,y,z$).

O número de Morton relaciona apenas as propriedades dos fluidos, conforme Equação (2.3). E, quando muito alto refere-se a um fluido altamente viscoso, quando apresenta valor médio existe uma relação entre massa específica e tensão superficial, e quando o valor é pequeno a tensão superficial é o fator dominante. Parâmetro importante na contribuição das forças inerciais e interfaciais, propriedades como: a viscosidade da fase contínua e tensão interfacial entre as fases, influenciam no escoamento.

$$M = \frac{g\mu_l^4(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2\sigma^3} \quad (2.3)$$

Cada interação entre pares de gotas colidindo pode ser caracterizada com o número de Weber, Equação (2.4), que é a razão entre as forças interfaciais e forças de tensão (JONES; SOUTHERN, 2017), sendo determinado utilizando a velocidade relativa entre duas partículas.

$$We = \frac{2\rho_l r_j \|V_{Rel}\|^2}{\sigma} \quad (2.4)$$

Onde V_{rel} é a velocidade relativa, ρ é a massa específica do líquido, e σ é o coeficiente de tensão superficial.

Os parâmetros mencionados Re , Eo e Mo são agrupados no número de Weber. Jones e Southern (2017) destacam que o número de Weber é a característica que define uma colisão, representando as energias relativas, com número alto de Weber as colisões favorecem a separação e quebra devido as energias cinéticas.

Portanto, o número de Weber quantifica o tamanho das bolhas pelo balanço entre as forças de tensão superficial, que definem um tamanho máximo de bolhas e as forças de inércia da fase líquida que agem no sentido de quebrar as bolhas em tamanhos menores, representado pela (2.4).

Para descrever o mecanismo de escoamento oscilante utiliza-se o número de Strouhal como parâmetro conforme Equação (2.5), com maiores detalhes em Lindt e Groot (1974) e Mougín e Magnaudet (2002).

$$St = \frac{f_w d_b}{U_{g,i}} \quad (2.5)$$

Onde f_w é a frequência de oscilação da bolha e $U_{g,i}$ é a velocidade vetoriais do gás ($i=x,y,z$).

Segundo Da Silva Júnior (2011), na sua investigação de escoamento bifásico gás-líquido em coluna de bolhas identificou que as propriedades morfológicas influenciam profundamente no escoamento, uma vez que, forças interfaciais são dependentes de parâmetros como área superficial das bolhas, distribuição de pressão na superfície destas, entre outros.

Liu et al. (2014) estudaram numericamente a quebra e coalescência de bolhas e identificaram que o número de Reynolds e o número de Eötvos podem avaliar as seguintes variáveis que têm um impacto significativo na coalescência e ruptura da bolha: o tamanho da bolha, as velocidades ascendentes e as propriedades reológicas do fluido.

Mais tarde, Tripathi, Sahu e Govindarajan (2015), no estudo da dinâmica de bolha, demonstraram que a ascensão (subida) de uma bolha pode não mostrar uma velocidade terminal constante e até mesmo não é possível conhecer a velocidade terminal, sendo que para descrever a dinâmica de ascendência de uma bolha nestas condições deve-se fazer uso do número de Eötvos, que é mais adequado do que o número de Reynolds e número de Weber (TRIPATHI; SAHU; GOVINDARAJAN, 2015).

2.3.4 Movimento e velocidade

Moosai e Dawe (2003) investigaram os estágios de fixação da bolha à gota de óleo e evidenciaram que na técnica de flotação a velocidade de subida das gotas e bolhas é um fator importante. Para a velocidade de subida terminal (V_t), com a solução da equação de Navier Stokes, sob as condições relevantes para flotação (escoamento laminar) resulta-se na Equação (2.6) (equação de Stokes).

$$V_t = d^2 g \rho_w - \rho_o / 18 \mu_l \quad (2.6)$$

Onde, V , velocidade de elutriação/decantação (subida/descida) de gotas/bolhas; d é o diâmetro de gota/bolha; g é aceleração gravitacional; $\rho_w - \rho_o$ é a diferença na massa específica entre fase contínua e fase de gota ou bolha (óleo ou gás); μ_l é a viscosidade dinâmica de fase contínua.

Moosai e Dawe (2003), enfatizam ainda que o regime de movimento da bolha varia consideravelmente com o número de Reynolds, conforme Equação (2.7).

$$Re = \frac{Ub}{\gamma} \quad (2.7)$$

Onde U é a velocidade, b é o raio da bolha e γ é a viscosidade cinemática do fluido.

Para $Re < 1$ e $b < 0,01\text{cm}$, as bolhas sobem verticalmente sem oscilar, e aplica-se o regime da lei de Stokes, com a Equação (2.8).

$$U = \frac{1}{3} \left(\frac{gb^2}{\gamma} \right) \quad (2.8)$$

Para a faixa de $1 < Re < 800$ e com bolhas de raio (b) entre $0,01\text{cm}$ e $0,1\text{cm}$, as bolhas movimentam-se de forma helicoidal, aplicando-se a Equação (2.9).

$$U \sim 2 \sqrt{\frac{gb}{0.9}} \quad (2.9)$$

Para $Re \leq 800$ e raio da bolha (b) $> 0,1\text{cm}$, as bolhas têm formato elipsoidal, apresentam movimento irregular e a velocidade é independente do diâmetro da bolha (para bolhas com raio de até $0,75\text{cm}$). Para bolhas maiores, sua velocidade tende a aumentar, mas como são estáveis a tendência é ocorrer divisão das bolhas.

Os parâmetros $Eö$ e Re são importantes para a predição do formato da bolha e da gota, sendo que para escoamentos com $Re < 1$, a bolha é esférica, o que ocorre para bolhas menores e de baixa velocidade terminal. E com o aumento de Re do escoamento, a partícula até pode se

manter esférica desde que o $E\ddot{o}$ seja muito baixo, isso quer dizer que as forças interfaciais são dominantes em relação as inerciais.

Haberman e Morton (1954), detalham o estudo da velocidade terminal de subida de bolhas em função do diâmetro para vários tipos de líquidos e chegaram à conclusão que para água como meio contínuo com bolhas de diâmetro entre $2\text{ mm} < d < 10\text{ mm}$ a velocidade terminal de subida de bolhas varia entre $0,2\text{ m/s} < v < 0,3\text{ m/s}$.

A relação entre o diâmetro da bolha e a sua velocidade terminal de subida pode ser explicada por uma divisão entre 4 regiões de estudo como proposto por Treybal (1980), conforme:

➤ Região 1: $d_p < 0,7\text{ mm}$, onde as bolhas são consideradas como esféricas e rígidas, sendo que a velocidade terminal é calculada pela lei de Stokes, Equação (2.10):

$$V_t = \frac{gd_p^2\Delta\rho}{18\mu_L} \quad (2.10)$$

➤ Região 2: $0,7\text{ mm} < d_p < 1,4\text{ mm}$, a velocidade interfacial (superficial) não é zero. As bolhas que apresentam diâmetro na faixa especificada sobem mais rápido do que as esferas rígidas de mesmo diâmetro.

➤ Região 3: $1,4\text{ mm} < d_p < 6\text{ mm}$ e Região 4: $d_p > 6\text{ mm}$. As bolhas já não são mais esféricas e a subida pode ser em movimento zig-zag ou trajetória helicoidal, sendo que a Região 4 a bolha não tem formato achatado. Para essas regiões e líquidos de baixa viscosidade aplica-se a Equação (2.11) de Treybal (1980).

$$V_t = \sqrt{\frac{2\sigma g_c}{d_b\rho_L} + \frac{gd_b}{2}} \quad (2.11)$$

Onde d_p é o diâmetro da partícula (bolha), σ é a tensão superficial, g é a gravidade, ρ_L é a massa específica do líquido.

A Equação (2.11) pode ser aplicada quando a razão do diâmetro da bolha/diâmetro da coluna é menor do que 0,125, o que caracteriza que a influência do diâmetro da coluna sobre a velocidade de ascensão é negligenciável (MENDELSON, 1967). Sendo que se o valor maior que 0,125 ocorre redução na velocidade devido ao efeito de parede.

Talaia (2007), realizou um extenso trabalho para investigar a velocidade terminal da bolha em diferentes viscosidades. E o autor afirma que a velocidade de ascensão de uma bolha em meio líquido depende dos parâmetros: gravidade, diâmetro da bolha, diferença de massa específica, massa específica do líquido, viscosidade do líquido, e tensão superficial do líquido

no gás. Ainda no trabalho de Moosai e Dawe (2003), os autores evidenciam que as bolhas são geralmente maiores que as gotas de óleo, sendo geralmente maiores que 50 μm . Os autores justificam que devido a este tamanho maior das bolhas, maior é a diferença de massa específica entre o gás e a água ($\sim 0,9 \text{ g/cm}^3$ comparado a óleo, e, água de $\sim 0,1 \text{ g/cm}^3$, ou menor para óleo pesado onde $\rho_o \approx \rho_w$). Os autores também confirmam a tendência de que bolhas geralmente tendem a subir cerca de 10 a 100 vezes mais rápido em comparação com gotas de óleo de diâmetros semelhantes, se subir de uma maneira vertical real e seguindo a equação de Stokes, e assim ultrapassar as gotas de óleo, isso pode levar ao contato bolha-gota.

Contudo, pode-se destacar que para as gotas de óleo, quanto menor as gotas, menor será a velocidade de subida. Porém, ao interligar a bolha de gás com a gota de óleo gera-se uma redução na massa específica do óleo, aumentando assim a diferença de massa específica entre os aglomerados de óleo e água, aumentando o diâmetro do aglomerado e causando uma taxa de subida maior.

Finborud, Faucher e Sellman (1999), na investigação de método eficiente de separação e abordagens de novas tecnologias, concluíram que para meio aquoso com diferença de massa específica de óleo/água de 0,1 g/cc e aumento em 10mm (altura de subida) com a equação de Stokes é previsto que o tempo de subida levará aproximadamente 50 s para gotas de 70 μm , 600 s para gotas de 20 μm e 3000 s para gotas de 10 μm de diâmetro. Considerando uma unidade de flotação com 2 metros de altura, é necessário que o diâmetro médio do aglomerado de gás e óleo seja maior que 60 μm para um tempo de residência de 30 minutos.

2.3.5 Fenômenos de coalescência e quebra

O encontro entre pares de bolhas pode resultar em coalescência. A coalescência e quebra das bolhas são de suma importância na modelagem de sistemas gás-líquido e gás-líquido-sólido, pois afetam diretamente o tamanho das bolhas presentes e como consequência a área específica entre as fases e os coeficientes de transferência de massa, momentum e energia (DA SILVA JÚNIOR, 2011).

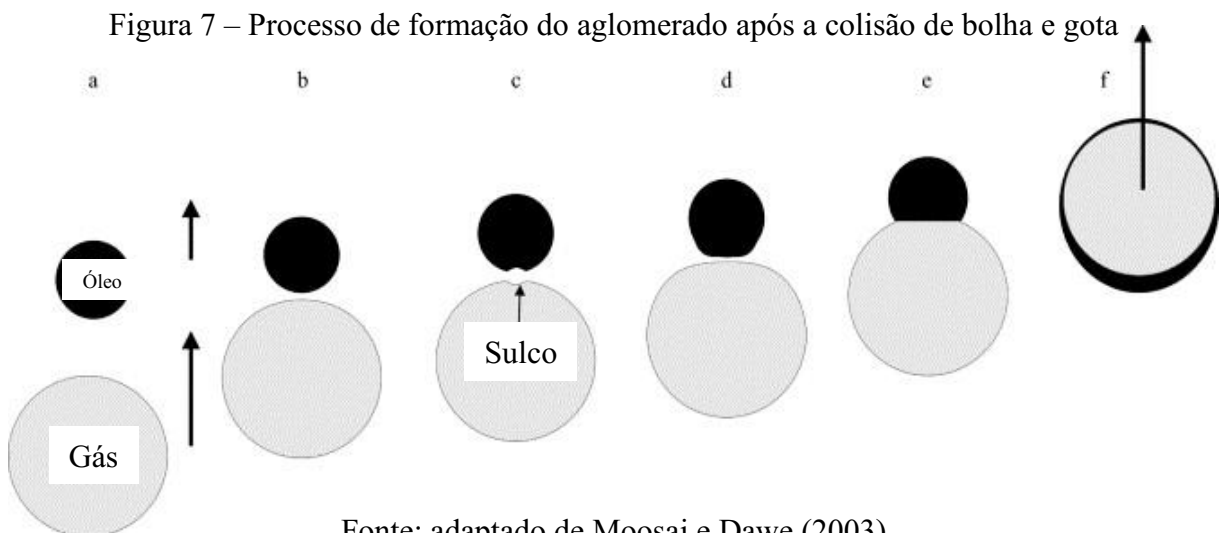
Considera-se que as colisões surgem a partir de fatores relacionados a turbulência, empuxo e cisalhamento e tem sido diretamente relacionada com variáveis físicas como diâmetro da bolha, massa específica das partículas, viscosidade e velocidade relativa entre a bolha e a gota (DA SILVA JÚNIOR, 2011; OLIVEIRA; GONZALEZ; OLIVEIRA, 1998; SATHTHASIVAM; LOGANATHAN; SARP, 2016).

O aumento da tensão superficial beneficia o fenômeno de quebra, ocasionando o aparecimento de bolhas menores. A teoria e fundamentos da hidrodinâmica em sistemas dispersos defendida por Hinze (1955), mostra que a quebra das bolhas é causada pela pressão dinâmica e pelas tensões de cisalhamento na superfície da bolha, efeitos estes induzidos pelos diferentes padrões de escoamento do líquido, por exemplo, devido as flutuações da turbulência.

O fenômeno de quebra das bolhas pode ser causado por dois processos principais: colisões envolvendo as bolhas (bolha-bolha, bolha-partícula ou bolha-vórtice) e a própria instabilidade destas no meio. E a quebra se deve ao fato de que quando a força hidrodinâmica máxima no líquido é maior do que a força de tensão superficial, a bolha quebra, formando bolhas menores (YANG, 2003).

Mais tarde, Krause, Li e Fritsching (2011), simularam numericamente a formação de bolhas e a interação, verificaram que o comportamento das gotas que se aproximam é influenciado pelas forças hidrodinâmicas devido aos efeitos viscosos da fase contínua, bem como pelas forças intermoleculares (van der Waals, eletrostática, etc.) dentro do filme de superfície. Concluíram ainda que o equilíbrio dessas forças determina o resultado do contato de gotículas: rebote das gotículas, coalescência ou gotas restantes nesse estado.

A Figura 7 mostra o momento do processo de formação do aglomerado, em que a hidrodinâmica do sistema favoreceu para a colisão entre a bolha e a gota e posterior processo de formação do aglomerado.



Em (a) tem-se a presença da bolha na zona de colisão com a gota, (b) diminui o filme de água, (c) com a tensão interfacial cria-se um sulco (ondulação), (d) o sulco desaparece a medida que o filme de líquido diminui, (e) o filme de líquido chegou a espessura crítica e

rompe-se e com as condições de espalhamento o óleo se espalha ao redor do gás e (f) formação do aglomerado e subida do mesmo.

Sanada et al. (2009) desenvolveram experimentalmente o estudo do movimento e coalescência de um par de bolhas e observaram que durante e depois da coalescência entre duas bolhas, existe uma diminuição na velocidade de subida da bolha, sendo que o diâmetro da bolha coalescida aumenta, provocando assim aumento na flutuabilidade, e após a coalescência, a bolha sobe com oscilações na sua forma. Os autores, observaram que os padrões das trajetórias de bolhas ascendentes são fortemente dependentes do número de Reynolds. Quando o número de Reynolds está acima da região crítica, duas bolhas aproximam-se e depois colidem. Após a colisão, dois tipos de movimentos são observados: a coalescência e o ressalto.

Luo e Svendsen (1996) com base nas teorias de probabilidade e turbulência desenvolveram um modelo teórico para quantificar a taxa de quebra das bolhas, considerando que este processo deve ocorrer quando uma bolha sofre uma colisão com um turbilhão, que apresente energia cinética turbulenta suficiente para perturbar a superfície da bolha, provocando assim o rompimento desta. A deficiência em estudos básicos e fundamentais sobre a hidrodinâmica de bolhas e gotas é alta, e mais aparente em regime heterogêneo ou turbulento.

Delnoij, Kuipers e Van Swaaij (1998) desenvolveram um modelo de rastreamento de volume numérico para estudar o comportamento do tempo de múltiplas bolhas subindo em meio líquido. E verificaram que no regime heterogêneo ou turbulento a operação industrial é caracterizada por velocidades intermediárias do gás, uma brutal circulação de líquidos e a coexistência de bolhas “grandes” e “pequenas” que diferem consideravelmente na forma. Os autores destacam que as bolhas maiores observadas neste regime são de particular importância devido ao seu impacto significativo no contato gás-líquido.

Quando bolhas pequenas coalescem para formar uma bolha maior, a área interfacial para a colisão da partícula de bolhas reduz, causando redução na probabilidade de inserção da partícula na bolha, diminuindo a eficiência da flutuação (PRAKASH; MAJUMDER; SINGH, 2018).

Ainda no estudo de Moosai e Dawe (2003), é visto de maneira natural que, quanto maior o tempo de residência das bolhas no equipamento de separação ou flotor, maior o número de colisões entre gotas de óleo e bolhas (eficiência de contato), causando uma maior quantidade de óleo a ser removido. Os fenômenos de coalescência e quebra com distribuição do tamanho da bolha e área de contato gás-líquido, têm efeito notável na taxa de transferência de massa e taxa de reação química (LIU et al., 2014).

2.3.6 Fenômenos superficiais e interfaciais

Interações acontecem devido a fenômenos superficiais e interfaciais, devido a tensão superficial, viscosidade, inércia e fluatibilidade (empuxo). Nas interfaces produzem-se fenômenos que não ocorrem no interior das fases. As interações produzem efeitos como diferentes formas de bolhas e trajetórias.

2.3.6.1 *Fenômenos de tensão superficial contínua (CSF)*

Pelo desequilíbrio de forças tem-se os fenômenos superficiais, ou seja, tensão superficial, absorção e detergência, por exemplo. Moléculas presentes em uma superfície líquida livre contra vácuo ou gás tem ligação mais fraca do que moléculas dentro de um volume. Uma área maior de superfície contém maior energia superficial e as forças externas realizam um trabalho positivo contra a força de superfície interna para aumentar a área total da superfície. Matematicamente, as forças da superfície interna são representadas pela tensão superficial (LAUTRUP, 2011).

A tensão superficial é a força de contração por unidade de comprimento ao longo do perímetro de uma superfície, para superfície que separa uma interface gás-líquido ou gás-sólido. Ma et al. (2012), utilizaram o modelo CSF de Brackbill para a tensão superficial na interface, adicionando um termo na equação de momentum, quando investigaram numericamente a dinâmica de coluna de bolhas e a formação de bolhas.

Patel (2010) confirma as evidências teóricas anteriores que a tensão superficial é uma força que atua apenas na superfície, a qual é necessária para manter o equilíbrio. A tensão superficial surge como resultado de forças atraentes entre moléculas em um fluido. Por exemplo, considerando uma bolha de ar na água, dentro da bolha, a força resultante em uma molécula devido a seus vizinhos é zero. Na superfície, a força resultante é radialmente para dentro, e o efeito combinado dos componentes radiais de força através de toda a superfície esférica faz com que a superfície se contraia, aumentando assim a pressão no lado côncavo da superfície. A força atrativa atua para equilibrar o interior intermolecular radialmente com a força de gradiente de pressão radialmente para fora ao longo da superfície. Em regiões onde dois fluidos são separados, mas um deles não está na forma de bolha esférica, a tensão superficial atua para minimizar a energia livre, diminuindo a área da interface.

A tensão superficial atua de forma a diminuir a energia livre de superfície e por isso são observados alguns efeitos como: superfícies curvas, capilaridade, formação de gotas,

coalescências de gotas, pressão interna de bolhas etc. Na formação de gotas, enquanto a gota não for suficientemente grande, a tensão superficial é suficiente para contrabalancear a força gravitacional, impedindo a separação da gota do resto do líquido, sendo que a gota se separa quando o seu peso igualar a força de tensão superficial que a sustenta.

Bourouiba e Bush (2013), em sua revisão dos fundamentos físicos de bolhas e gotas, apresentam que a pressão é uma força isotrópica por área que age em toda a massa de um fluido. Evidenciam que gradientes de pressão correspondem às forças do corpo dentro de um fluido. E por outro lado, justificam que a ação da tensão superficial está confinada à superfície livre.

2.3.6.2 Fenômenos interfaciais

É importante calcular corretamente as forças interfaciais em sistemas de escoamento borbulhante. As forças de arrasto e de sustentação são especialmente importantes quando comparado com as outras forças de interface, devido estas influenciarem na velocidade terminal e na distribuição lateral de bolhas. As interações totais através do filme fino entre duas gotas, duas bolhas, ou uma gota e uma bolha se aproximando é representado pela pressão disjuntora e depende das forças atraentes de van der Waals e forças repulsivas ou forças eletrostáticas. A formação de um filme estável requer que a pressão do sistema equilibre a pressão capilar do menisco do filme de líquido, forçando assim o líquido a sair do filme (ATA; PUGH; JAMESON, 2011; MILLER; LIGGIERI, 2011).

Quando se analisa a interação de bolha e gota, o principal destaque é que as duas interfaces óleo-água e ar-água apresentem tensões interfaciais diferentes, assim à medida que estas interfaces se aproximam, é esperado deformações em diferentes extensões. As forças interfaciais influenciam intensamente os padrões fluidodinâmicos. Surgem a partir da transferência de quantidade de movimento através da interface. Por exemplo, a tensão interfacial é a força de contração por unidade de comprimento ao longo do perímetro de uma superfície (que separa duas fases não gasosas).

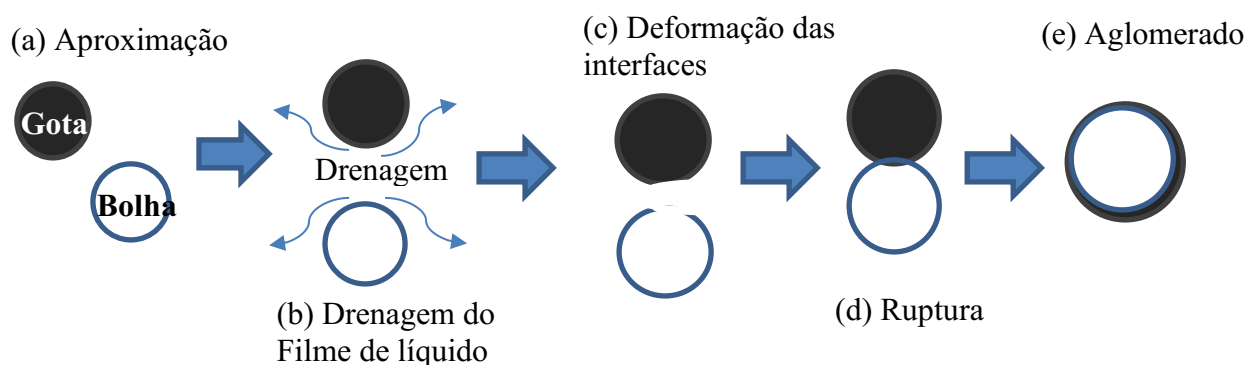
Magnaudet (1997), na investigação das forças que atuam em bolhas, concluiu que a força interfacial que atua entre duas fases pode surgir a partir de vários efeitos físicos como: força de arraste, força de sustentação, lubrificação, força de pressão interfacial, força de massa virtual, força de dispersão turbulenta e força devido a transferência de massa entre as fases. Mais tarde confirmado também por Patel (2010).

Tabor et al. (2011), identificaram no estudo que as colisões entre bolhas e gotas surgem de turbulência, empuxo e efeitos de cisalhamento. Os autores ainda evidenciaram que à medida

que se aproximam, forma-se uma película líquida entre a interface óleo-água e bolha-água, que por sua vez é drenada à medida que se aproximam, fazendo com que uma força repulsiva apareça e deforme a interface. O comportamento das gotas que se aproximam é influenciado por forças hidrodinâmicas devido aos efeitos viscosos da fase contínua e às forças intermoleculares (van der Waals, eletrostática, etc.) dentro do filme de superfície (METTU; BERRY; DAGASTINE, 2017; SHI et al., 2016; YAN et al., 2020).

Conforme apresentado na Figura 8 para um efetivo processo de flotação, espera-se a interação de água e óleo. Mostrando todas as etapas para a formação de um aglomerado, iniciando com (a) o encontro e aproximação da bolha e gota na região de colisão, (b) a drenagem do filme de líquido (camada de líquido formada) entre a bolha e a gota, (c) a deformação das interfaces, (d) a ruptura das duas interfaces e em (e) a formação do aglomerado, ou seja, o espalhamento (processo de adesão da gota na bolha).

Figura 8 – Sequência de etapas da interação bolha gota no processo de flotação



Fonte: Autoria própria

Ainda no estudo de Oliveira, Gonzalez e Oliveira (1998), os autores mostram que a probabilidade global de flotação, atrelada à performance do processo, está relacionada a cada uma das etapas individuais, de forma que a probabilidade de colisão depende basicamente da quantidade de bolhas e gotas presentes, assim como da área interfacial das bolhas.

Pang e Wei (2011), realizaram uma análise comparativa entre as expressões para as forças de arrasto e sustentação. A maioria dos coeficientes de arrasto são dependentes do número de Reynolds da bolha e uma parte muito pequena em função do número de Eötvös, enquanto o coeficiente da força de sustentação também é dependente do número de Reynolds das bolhas além disso da taxa de cisalhamento adimensional.

A teoria de lubrificação contínua pode representar com precisão o comportamento do filme aquoso entre as interfaces. Em escoamentos gás-líquido, o empuxo é responsável pela

grande aceleração que as bolhas sofrem. O arrasto é atribuído a ação de uma força na mesma direção do escoamento, mas em sentido contrário. É causada por dois fatores principais: atrito entre o corpo e o fluido, devido a velocidade relativa entre estes, relacionado às forças viscosas; e distribuição de pressão na superfície do corpo (*form drag*), o qual se torna mais relevante em altos números de Reynolds.

A força de arraste atua na direção do escoamento de fluido, e a força de elevação/sustentação atua de forma perpendicular ao escoamento. A força de sustentação atua em uma partícula devido a gradientes de velocidade no campo de escoamento de fase contínua. Patel (2010), mostrou que a força de sustentação que age em uma fase dispersa (d) em uma fase contínua (c) é calculado pela Equação (2.12). Sendo a força de sustentação (*lift*) um termo adicionado no lado direito da equação de momentum para duas fases.

$$\vec{F}_{lift} = -0.5\rho_c\alpha_d(\vec{v}_d - \vec{v}_c) \times (\nabla \times \vec{v}_c) \quad (2.12)$$

Onde ρ_c é a massa específica do meio contínuo, v_d e v_c é a velocidade da fase dispersa e contínua respectivamente e α_d é a fração de volume da fase dispersa.

Lucas, Prasser e Manera (2005), investigaram o fundamento da força de sustentação para a estabilização de uma coluna de bolhas, e evidenciaram que a força de sustentação nas bolhas ascendentes age na direção lateral, onde existem gradientes na velocidade do líquido. Explicam ainda que quando se tem coeficientes positivos de sustentação (bolhas pequenas), a estabilização do escoamento é favorecida, enquanto coeficientes negativos (bolhas grandes) induzem à distribuições variantes na fração volumétrica do gás, favorecendo, a transição entre os regimes. Mais tarde, Tabib, Roy e Joshi (2008), confirmaram a teoria anterior e constataram que o movimento lateral da fase dispersa é relacionado pela força de sustentação. A força de sustentação surge devido aos efeitos da pressão e das tensões que atuam na superfície das bolhas. Maiores detalhes da investigação de força de sustentação são encontrados em Lucas, Prasser, Manera, (2005) e Dijkhuizen, Van Sint Annaland e Kuipers (2010) e também nos trabalhos de Pang e Wei (2011).

A turbulência na fase contínua forma vórtices que realiza o transporte da fase dispersa, relacionando assim a dispersão turbulenta. A força de massa virtual, está diretamente relacionada a inércia do movimento relativo entre as fases. O deslocamento das bolhas provoca a aceleração do líquido nas regiões vizinhas a estas. Segundo Joshi (2001), a massa virtual pode ser compreendida pela mudança de energia cinética no fluido nas regiões que sofrem aceleração das partículas que se movimentam. A massa virtual é a inércia adicionada a um sistema porque uma aceleração ou o corpo em desaceleração deve mover algum volume de fluido circundante

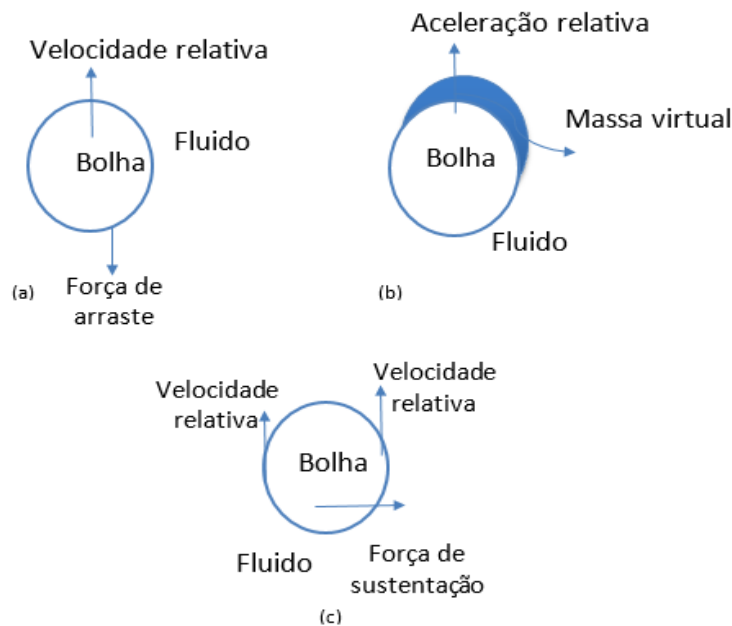
à medida que ele se move, uma vez que a partícula e o fluido não podem ocupar o mesmo espaço físico simultaneamente. Segundo Patel (2010), por simplicidade pode ser modelado pela Equação (2.13) como algum volume de fluido se movendo com a partícula.

$$\vec{F}_{vm} = \frac{\alpha_d \rho_c}{2} \left(\frac{d_c \vec{v}_c}{dt} - \frac{d_d \vec{v}_d}{dt} \right) \quad (2.13)$$

Onde α_d é a fração de volume da fase dispersa, ρ_c é a massa específica da fase contínua, v_c é a velocidade da fase contínua, v_d é a velocidade da fase dispersa, e $\frac{d_c}{dt}$ é forma material de derivada no tempo. O efeito de massa virtual é significativo quando a massa específica de fase discreta é muito menor do que a massa específica de fase contínua (por exemplo, para uma coluna de bolha transiente).

A Figura 9 mostra de maneira esquemática as forças envolvidas no escoamento ascendente de bolhas ou gotas, onde (a) a força de arraste, (b) a força de massa virtual e (c) força de sustentação, descritas anteriormente. Revisões sobre as principais forças interfaciais que atuam em partículas, podem ser encontradas em Clift, Grace e Weber (1978).

Figura 9 – Forças envolvidas no escoamento ascendente de bolhas e gotas



Fonte: Autoria própria

2.3.6.2.1 Força de Arrasto

As forças que atuam sobre as bolhas e gotículas desempenham um papel essencial na estimativa do comportamento dinâmico do movimento e, conseqüentemente, na previsão da

interação entre as fases. A compreensão desses fenômenos depende da análise tanto da força de arrasto quanto do coeficiente de arrasto, necessária para melhor compreender a cinemática do escoamento das bolhas, uma vez que, para partículas fluidas, a magnitude da velocidade terminal costuma ser controlada pela força de arrasto. Na teoria da força de arrasto de Ishii e Zuber (1979), a estimativa do coeficiente de arrasto fora da suposição de escoamento gradual, ou seja, quando as forças inerciais são relevantes, baseia-se em correlações empíricas. Essas correlações podem levar em consideração os efeitos de bolhas múltiplas. A teoria apresentada pelos autores ainda afirma que conforme o número de Reynolds aumenta, as forças viscosas diminuem em relação às forças inerciais. Miller e Liggieri (2011), destacaram que a pressão na região de recirculação é menor que a pressão na região da frente da bolha, causando arrasto. Para Re superiores a 270, os vórtices se formam e se movem na parte traseira da bolha, fenômeno que está associado às pulsações do fluido no escoamento do líquido.

A força de arrasto pode ser significativamente influenciada pela interação mútua entre bolhas em um escoamento (laminar principalmente) (BEHZADI; ISSA; RUSCHE, 2004; BERTOLA et al., 2004; SIMONNET et al., 2007). Quando existem bolhas múltiplas, as distribuições de velocidade do líquido não são mais uniformes, portanto, a força de arrasto para uma população de bolhas é comparativamente menor do que a de uma única bolha (LI et al., 2009). Outras correlações empíricas que demonstram os efeitos vizinhos de bolhas no coeficiente de arrasto foram propostas na literatura Behzadi, Issa e Rusche (2004), Ishii e Zuber (1979), Kannan et al. (2019), Rusche e Issa (2000) e Simonnet et al. (2007).

Na revisão dos mecanismos envolvidos pelo escoamento de partículas realizada por Joshi (2001), para uma bolha isolada, a força de arraste depende de sua forma e tamanho, além das características da interface gás-líquido. Quando se trata de uma população de bolhas segundo o autor, a modelagem da força de arrasto é mais complexa, devido a presença de outras bolhas e a manifestação de diversos fenômenos, tais como, formação da região de rastro, coalescência e quebra. Foi relatado e Crowe et al. (2012), que o coeficiente de arrasto depende fortemente da forma da bolha, orientação em relação ao escoamento, bem como em parâmetros de escoamento, tais como o número de Reynolds da bolha, número de Eötvös, nível turbulento, pureza da superfície da bolha, e confirmado mais tarde por Pang e Wei (2011). Conforme Patel (2010), a força de arraste em uma única gota é expressa em termos da sua área projetada, a velocidade relativa e um coeficiente de arraste adimensional, como Equação (2.14).

$$\bar{F}_d = \frac{1}{2} \rho_c A C_d |\vec{v}_r| \vec{v}_r \quad (2.14)$$

Onde A é a área projetada da bolha, v_r é a velocidade relativa entre a bolha e o fluido, C_d é o coeficiente de arraste, ρ_c é a massa específica do meio contínuo.

As forças que atuam sobre a bolha e a estrutura do escoamento ao seu redor, bem como os detalhes da força de arrasto são bem descritos em Magnaudet e Eames (2000) e Yan et al. (2020). Os coeficientes de arrasto podem ser obtidos por várias relações empíricas (para uma bolha) apresentadas nos estudos de Bozzano e Dente (2000), Brennen (2005), Clift, Grace e Weber (1978); Crowe et al. (2012), Haberman e Morton (1954a), (1954b), Miller e Liggieri (2011), Yan et al. (2017a) e Zhou, Zhao e Bo 2020).

2.4 ESTUDOS EXISTENTES SOBRE A DINÂMICA DE BOLHAS E GOTAS

2.4.1 Estudos experimentais

Talaia (2007), investigou a velocidade terminal em um conjunto de experimentos, onde relatou que a velocidade terminal de subida da bolha depende muito do efeito da viscosidade dinâmica. O estudo do autor oferece expressões gerais para a determinação da velocidade terminal de bolhas isoladas em um intervalo de número de Reynolds e com propriedades físicas do gás e do líquido conhecidas.

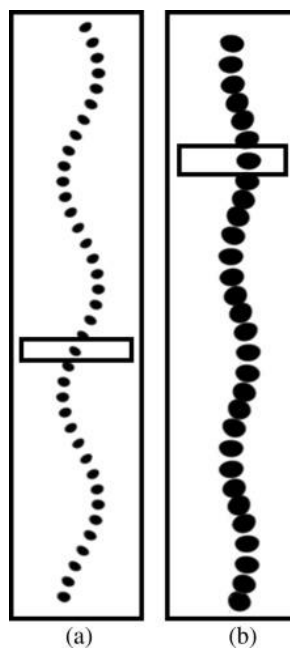
A fim de entender melhor a interação dinâmica entre as interfaces de ar-água e óleo-água, Tabor et al. (2011), investigaram as deformações individuais da gota e da bolha modelando as interfaces durante a colisão, e conseguiram verificar que a gota se deforma mais do que a bolha, isso porque a tensão da óleo-água é menor do que a tensão da interface ar-água.

Mikaelian et al. (2015), investigaram a dinâmica e a morfologia de bolhas elipsoidais isoladas em líquidos. Primeiramente os autores fizeram uma descrição completa da dinâmica de uma bolha elipsoidal subindo em um líquido com trajetória não retilínea, onde precisaram caracterizar a orientação relativa do eixo da menor bolha e o vetor de velocidade do centro de massa da bolha. Também avaliaram experimentalmente os raios de curvatura da interface na frente e na parte de trás da bolha. Além disso, investigaram a pulsação no movimento vertical para bolhas com tamanhos maiores que 2,5 mm. A Figura 10, apresenta a trajetória de bolhas que os autores investigaram, no qual apresentam a trajetória de bolhas com diâmetros diferentes em líquido com viscosidade diferente.

Pode-se ver que, no caso de um movimento em ziguezague da bolha, o centro de massa da projeção de bolha está localizado próximo a um extremo da trajetória (ver exemplo na Figura

10 (b)). No caso de um movimento helicoidal da bolha, o centro de massa da projeção de bolha está localizado próximo a um ponto de inflexão da trajetória do centro de massa da projeção de bolha (ver exemplo na Figura 10 (a)). Uma técnica simples para identificar o tipo de trajetória de uma bolha é, portanto, analisar onde o centro de massa da projeção de bolha está localizado na trajetória.

Figura 10 – Trajetória de bolhas subindo em meio líquido, (a) bolha com diâmetro de 2,49 mm fluindo em água com 20% de glicerol; (b) bolha com diâmetro de 4,68 mm fluindo em água com 30% de glicerol



Fonte: MIKAELIAN et al. (2015)

Eftekharkhah et al. (2015), investigaram a remoção de óleo disperso na água pelo processo de flotação e realizaram experimentos em uma unidade compacta de flotação. Medições prévias das propriedades interfaciais e tempos de indução para os filmes aquosos finos entre gotas e bolhas foram usados para avaliar a remoção de óleo.

Chakibi et al. (2018), investigaram a influência da salinidade da água na eficiência do processo, com uma coluna de flotação, e mostraram que a eficiência de flotação aumenta com a salinidade da água, destacando a importância da repulsão eletrostática entre gotas de óleo e bolhas. Também fizeram o monitoramento da evolução temporal dos finos filmes entre as bolhas e gotas, sendo que a formação do agregado de maneira estável exige que os filmes de água formados entre gotas de óleo e bolhas se quebrem e o óleo se espalhe na superfície da bolha. Os autores concluíram que aumentando a salinidade da solução, diminuiu-se a repulsão

entre as gotas de óleo e as bolhas, que por sua vez diminui a estabilidade do filme de água. Os filmes se rompem mais espontaneamente, aumentando o apego da bolha com a gota, melhorando assim a eficiência de flotação.

Apesar da existência de grandes trabalhos e pesquisas realizadas, ainda não está claro o que rege a parte fundamental da dinâmica de bolhas e gotas. Encontram-se trabalhos no assunto, mas que levam em conta muitas simplificações que por muitas vezes acabam mascarando alguns efeitos. Muitos trabalhos investigaram as propriedades interfaciais de bolhas em meio líquido (água), mas não aplicaram este estudo profundamente nos fenômenos envolvidos.

A flotação para separação de gotas de óleo em águas residuais é um conjunto complexo de vários subprocessos, sendo importante entender os mecanismos de controle para cada um deles. O que se encontra atualmente na literatura é o estudo de alguns subprocessos da flotação, ou seja, algum fenômeno específico, ou então o processo de maneira global com diversas simplificações aplicadas. A literatura carece de informações e trabalhos que investigam de forma fundamental a dinâmica de bolhas e gotas em um processo de flotação. Problemas que envolvem a análise de interação de uma bolha e uma gota em meio estagnado são encontrados, com estudos das forças e fenômenos envolvidos concentrando assim no processo de fixação entre a gota de óleo e a bolha de gás sob uma variedade de parâmetros, mas o estudo da dinâmica de várias bolhas e várias gotas com escoamento de líquido é ainda difícil de ser encontrado, ou seja, encontram-se trabalhos sobre a flotação como um todo ou trabalhos que estudam a interação de uma bolha e uma gota de forma isolada em líquido estagnado.

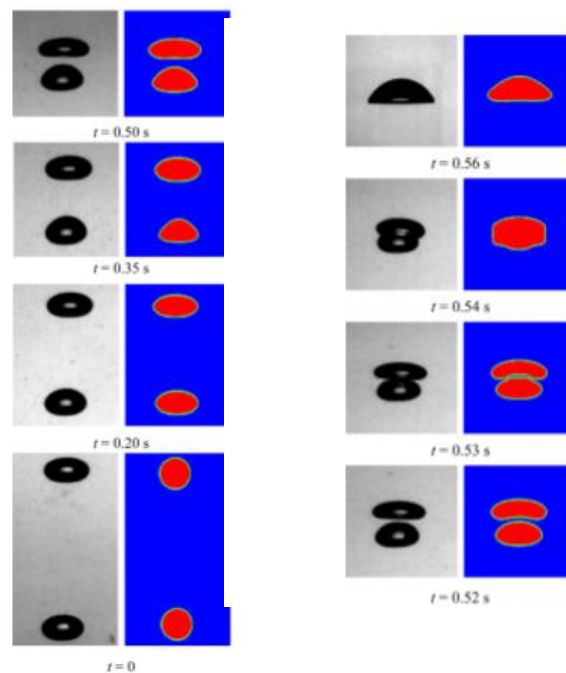
2.4.2 Estudos numéricos

Estudos computacionais mais antigos foram em geometria axissimétricos ou bidimensionais, mas estudos com simulações tridimensionais também foram realizadas, como Bunner e Tryggvason (1999), Sussman e Puckett (2000), Dijkhuizen, Van Sint Annaland e Kuipers (2010), Van Sint Annaland, Deen e Kuipers (2005) e Baltussen, Kuipers e Deen (2014). Houveram também vários estudos para seleção das melhores técnicas computacionais para resolver problemas de escoamento de bolha isolada em meio líquido, deformações de bolha e interações de bolha e gota isolada, sendo que é notável nestes estudos uma simplicidade na extensão de 2D para 3D.

Liu et al. (2014) investigaram numericamente, aplicando o método VOF, os comportamentos de coalescência e quebra de múltiplas bolhas paralelas em ascensão em fluido

não newtoniano. Os efeitos do número de bolhas, diâmetro da bolha, intervalo de bolhas e índice de vazão do fluido da lei de potência na coalescência e ruptura da bolha foram estudados sistematicamente. Sendo que os líquidos não newtonianos são frequentemente usados nos campos de recuperação avançada de petróleo no tratamento de águas residuais. Os autores utilizaram um domínio computacional 2D com dimensão de 200 mm por 300 mm. No modelo VOF, a função de fração de volume é resolvida usando o esquema de reconstrução geométrica baseado no cálculo da interface linear por partes (PLIC). A pressão implícita no algoritmo de divisão do operador (PISO) foi usada para resolver o acoplamento pressão-velocidade na equação de momento. A opção de escalonamento de pressão (PRESTO) e o esquema de primeira ordem foram utilizados para a discretização de pressão e momentum. O passo de tempo foi selecionado como 1.0×10^{-5} . A Figura 11 mostra a comparação da coalescência de duas bolhas entre experimento (imagens preto e branco) e simulação (imagens coloridas)

Figura 11 – Coalescência de duas bolhas experimentalmente e numericamente

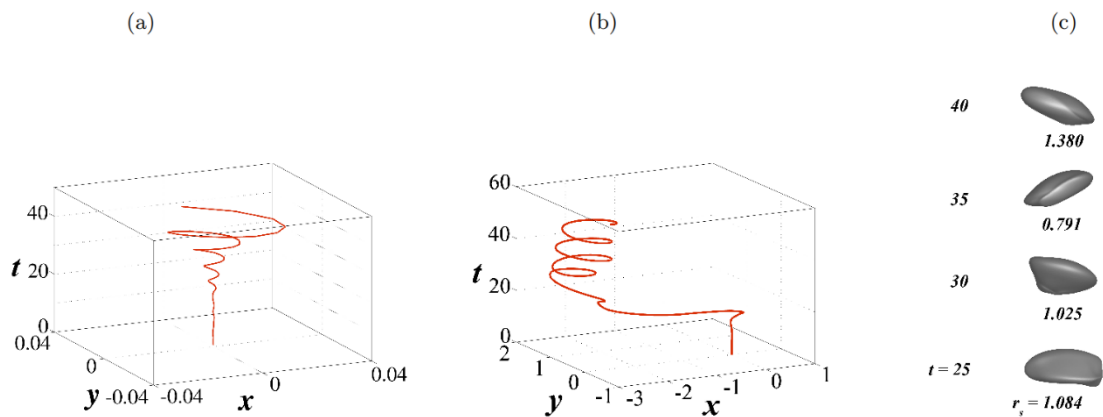


Fonte: adaptado de Liu et al. (2014)

Quando se trata de coalescência de bolhas, a maioria dos estudos basicamente se concentra em bolhas em linha, muito menos se sabe sobre a coalescência de bolhas paralelas, especialmente para múltiplas bolhas. Tripathi, Sahu e Govindarajan (2015), utilizaram em sua investigação o método Volume de Fluido (VOF) com refinamento dinâmico e malha adaptativa baseado na magnitude da vorticidade e interface de bolhas para representar a dinâmica da bolha.

Os autores compararam os resultados numéricos com os resultados experimentais, conforme Figura 12, que mostra a trajetória em (a) e (b) por resultado experimental, e a forma de uma bolha. Um movimento helicoidal é executado e a forma da bolha muda constantemente como é visto em (c).

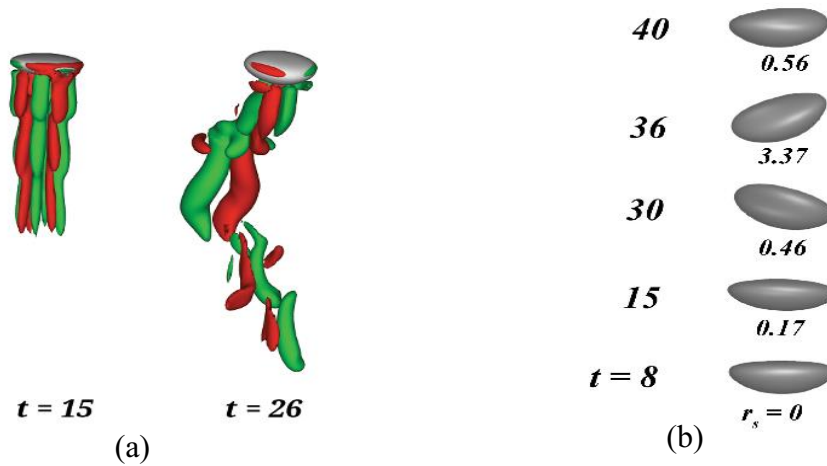
Figura 12- Trajetória de uma bolha experimental (a) com diâmetro igual a 5mm e $Eo = 10$ e (b) com diâmetro igual a 1mm $Eo = 4$, e (c) bolha numérica utilizando o método VOF, com distâncias do centro de gravidade



Fonte: TRIPATHI; SAHU; GOVINDARAJAN (2015)

Os autores afirmaram que o início do segundo tipo de instabilidade na trajetória pode ser atribuída ao início do vórtice que se desprende da superfície da bolha, conforme pode ser analisado na Figura 13, onde em (a) mostra a componente vertical da vorticidade, e em (b) a maneira com que a forma da bolha evolui durante o escoamento. As bolhas exibem fortes desvios de assimetria e tem sua subida em forma de ziguezague ou em espiral, sendo que as bolhas permanecem integrais, porém mudam sua forma com o tempo.

Figura 13 – Representação de superfície em (a) e a evolução da bolha com distâncias do centro de gravidade em (b)



Fonte: TRIPATHI; SAHU; GOVINDARAJAN (2015)

Ma et al. (2012), utilizaram o método VOF em conjunto com o modelo de força de superfície contínua (CSF) para investigar numericamente a formação e dinâmica de bolhas únicas em colunas de bolhas, utilizando o programa comercial FLUENT. As equações de conservação transientes de momentum, massa foram resolvidos pelo operador de pressão implícita (PISO) e cálculo de interface linear por partes (PLIC) para caracterizar o comportamento do movimento de interface gás-líquido do método VOF. Segundo Liu et al. (2014), o método PLIC é comparativamente preciso porque leva em consideração o transporte entre o fluido de interface adjacente. Cifani (2017), utiliza o VOF por meio da função indicadora para rastrear a segunda fase, em simulações DNS.

Akhtar, Pareek e Tadé (2007), utilizaram o método para simular bolhas subindo por líquido estagnado. O movimento da interface gás-líquido é rastreado com base na distribuição de fração de volume, o esquema de reconstrução geométrica que se baseou no método de cálculo da interface linear (PLIC) é aplicado para reconstruir a superfície livre de bolhas e a turbulência é modelada com o modelo de turbulência k- ϵ .

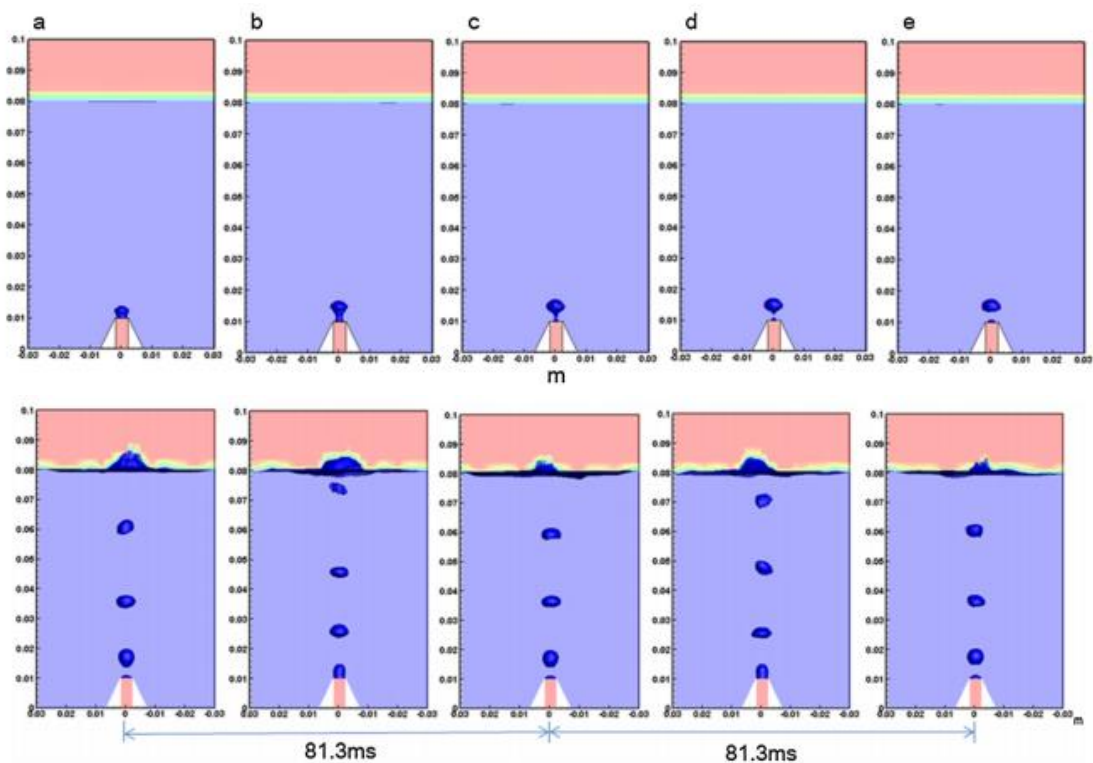
Van Sint Annaland, Deen e Kuipers (2005), aplicaram em seu trabalho o método VOF 3D, baseando-se na representação de interface linear por partes como técnica de reconstrução de interface, obtendo resultados de formação e deformação de bolhas idênticas a trabalhos experimentais.

Liu et al. (2017), fizeram simulações de formação de bolhas de um orifício, no qual utilizaram o método de volume finito (FVM) para simular o processo de formação de bolhas e

o método VOF para captura de interface gás-líquido desenvolvido no programa comercial FLUENT, com algoritmo de divisão de operadores (PISO) para o cálculo do acoplamento de pressão e velocidade, conforme mostrado na Figura 14.

Na Figura 14, o azul claro indica a fase líquida (água) e o vermelho e azul escuro a fase gás (ar). No começo a bolha de ar se expande com o fundo da bolha em contato com o orifício (a) e em (b) a força da tensão superficial desempenha seu papel. Com o tempo a bolha se torna maior e um fino pescoço entre o fundo da bolha e o orifício pode ser observado em (c). Quando a força de empuxo é maior do que a força de arrasto do líquido, a fratura da retenção leva ao descolamento da bolha (d) e a bolha sobe (e) e em seguida outra bolha é gerada.

Figura 14 – Resultados da simulação do processo de formação de bolhas iniciando em (a) sua formação e progredindo até a forma completa em (e)



Fonte: LIU et al. (2017)

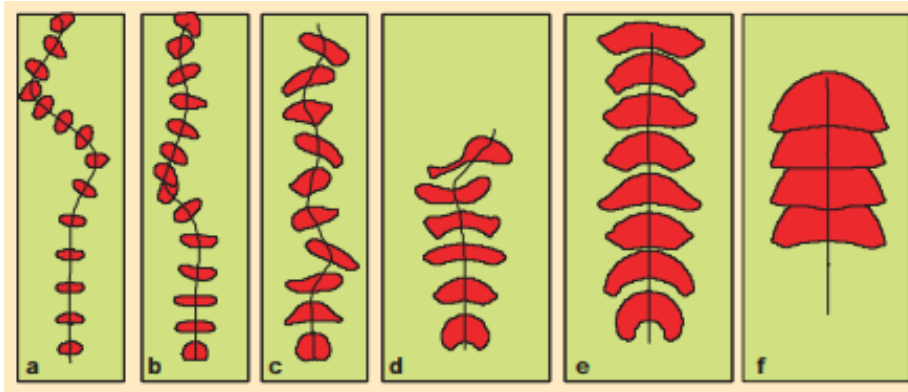
Segundo Delnoij, Kuipers e Van Swaaij (1998), para estudar o comportamento de “grandes” bolhas subindo em um líquido, de uma maneira mais fundamental, os autores utilizaram um modelo de rastreamento de volume baseado no conceito *Volume-Of-Fluid* (VOF). Este modelo bidimensional e de variação finita do *Volume Tracking* resolve o movimento dependente do tempo das fases gás e líquido e da interface que separa as duas fases.

Devido ao seu esquema avançado de rastreamento de interface, chamado de Youngs VOF, o modelo é capaz de explicar mudanças substanciais na topologia da interface gás-líquido induzida pelo movimento relativo do líquido. Esta capacidade particular permite um estudo detalhado da formação de bolhas, coalescência e separação.

Krishna e Van Baten (1999), utilizam o VOF para simular o movimento de bolhas em líquido em uma coluna retangular (sistema aberto) de 0,025 m de largura e 0,09 m de altura. A trajetória das bolhas é simulada em 2D, utilizando o programa comercial ANSYS CFX 4.1c. com variação do diâmetro das bolhas de 4 até 20mm. Os autores selecionaram condição de parede sem deslizamento, para acoplamento de pressão e velocidade foi imposto o algoritmo SIMPLEC. E como resultados das suas simulações a velocidade ascendente da bolha resultou na metade da velocidade de resultados experimentais de colunas cilíndricas, os autores destacaram que seria necessária uma simulação tridimensional para determinar quantitativamente a velocidade de subida e reproduzir as observações experimentais, mas existe um alto custo computacional envolvido.

É perceptível no trabalho de Krishna e Van Baten (1999), que o movimento da trajetória da bolhas está relacionado diretamente com o diâmetro da mesma. O que os autores mostram em seu trabalho é que bolhas menores apresentam um movimento oscilatório enquanto bolhas maiores movimento retilíneo, conforme Figura 15.

Figura 15 – Simulação da trajetória de bolhas com variação de diâmetro de 4mm e $Eo = 2.2$ (a), 5mm e $Eo = 3.4$ (b), 7 mm e $Eo = 6.7$ (c), 9mm e $Eo = 11$ (d), 12mm e $Eo = 19.6$ (e) e 20mm e $Eo = 54.5$ (f)



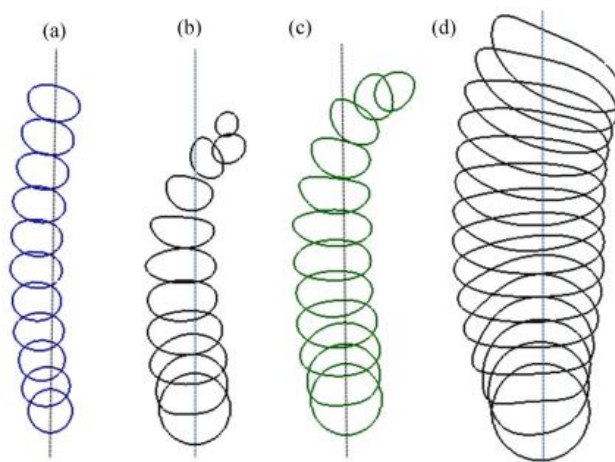
Fonte: KRISHNA; VAN BATEN (1999)

A Figura 15 mostra a trajetória de bolhas para diâmetros de 4 mm (a), 5 mm (b), 7 mm (c), 9 mm (d), 12 mm (e) e 20 mm (f). Krishna e Van Baten (2001) afirmaram que a morfologia

das bolhas depende fortemente das propriedades do sistema. Os autores também detalharam as simulações realizadas com o VOF, onde bolhas com 4 e 5 mm mostram trajetórias sinuosas, a bolha de 7 mm apresenta oscilação de lado a lado ao subir na coluna. A bolha de 9mm apresenta pouca oscilação, enquanto a bolha de 12 mm tem sua forma mais alongada e sem oscilação na sua trajetória, enquanto a bolha de 20 mm apresenta uma forma de tampa esférica e tem trajetória ascendente vertical. Com o aumento do tamanho das bolhas as variações em x diminuem, uma vez que, a oscilação é amenizada.

Analisar o comportamento de uma população de bolhas é interessante porque o movimento de cada bolha afeta a bolha vizinha (KRISHNA; VAN BATEN, 2001). Bahreini, Ramiar e Ranjbar (2015), investigaram por simulação numérica a condensação de bolha no escoamento de ebulição utilizando o método VOF com o modelo de força de superfície contínua (CSF) no *software* OpenFOAM. E neste trabalho os autores verificaram a trajetória da bolhas com variação do diâmetro da mesma, no qual destacam na Figura 16 (a), para a bolha de 2mm, onde a bolha se move ao longo de um caminho menos sinuoso, sendo que é percebido uma mudança na trajetória ascendente em comparação com as bolhas de 3mm na Figura 16 (b) e (c) e 4mm na Figura 16 (d).

Figura 16 – Trajetória e deformação da bolha, diâmetro de 2 mm (a), diâmetro de 3 mm (b) e (c) e diâmetro de 4 mm (d)



Fonte: BAHREINI; RAMIAR; RANJBAR (2015)

Os autores mostraram que a trajetória do movimento da bolha no líquido depende da forma da bolha, que deforma pela interação com o líquido circundante. Para a bolha de 2 mm, já que o tamanho da bolha é pequeno, o efeito de tensão superficial é grande o suficiente para

evitar que a forma mude. Portanto, a bolha menor sobe quase em pé, apesar da existência de um gradiente de velocidade do líquido. Por outro lado, para maiores bolhas ($D = 3$ e 4 mm), mudanças proeminentes são observadas tanto na trajetória em movimento quanto a forma da bolha.

Ma et al. (2012), investigaram numericamente a formação e dinâmica de bolha única em coluna de bolhas utilizando o método VOF em conjunto com o modelo de força de superfície contínua (CSF), o acoplamento de pressão e velocidade foi selecionado como o PISO em 2D, cujo domínio era uma coluna de 50 mm de largura por 100 mm de altura.

A aplicação da dinâmica de fluidos computacional na qual o sistema global é estudado considerando o movimento das bolhas e das gotas de óleo em meio líquido apresenta uma série de dificuldades para a identificação da interface. O outro ponto que gera mais complexidade é a necessidade de malhas extremamente finas para capturar detalhes quando as interfaces estão muito próximas. Por isso, aplicar a teoria da lubrificação, na qual somente o filme fino é considerado, permite estudar a fase final do processo de interação e determinar a estabilidade do sistema. A dificuldade na formulação do modelo teórico está no fato de termos um domínio limitado pelo tamanho da bolha na qual a fronteira é definida numa posição fora da zona de interação, mas menor do que seu raio. Essa fronteira avança e deforma simultaneamente e a deformação depende da solução de todo o sistema (MANICA; KLASEBOER; CHAN, 2012).

Não há investigações numéricas que englobe a dinâmica de bolhas e gotas em meio líquido, contudo encontram-se muitos estudos de simulações de colunas de bolhas, simulações de bolhas isoladas ou de duas bolhas, simulações de gotas em meio líquido. Existem trabalhos que abordam o escoamento multifásico com rastreamento discreto de interface, que analisa a formação de gotas e o comportamento de gotas em processos de flotação e emulsificação. Porém a literatura carece da aplicação de métodos computacionais para representar a dinâmica de bolhas e gotas, ou seja, estudo numérico aplicado ao escoamento de gotas de óleo, bolhas com escoamento do meio líquido.

2.5 FECHAMENTO DO CAPÍTULO

Com a apresentação da fundamentação teórica, nota-se que o escoamento água, óleo e gás em meio disperso está associado a diversas áreas da Engenharia, sendo o foco principal desta pesquisa a sua aplicação no processo de flotação para o processamento de petróleo, no qual a literatura não se mostra muito desenvolvida.

É importante destacar que as forças pertinentes aos movimentos das bolhas injetadas num flutador e a interação destas bolhas com as gotas de óleo é um fator de controle e otimização para o tratamento de águas residuais. Por exemplo, o processo de espalhar o óleo na superfície das bolhas é primordial, mas essa fixação do gás no óleo é complexa, porque no início é necessário a formação de uma lamela de filme espesso, a gota e abordagem de bolha, depois o afinamento da lamela criando um filme fino, que então se rompe.

Segundo Moosai e Dawe (2003), a força motriz da drenagem do filme (que é a pressão capilar) e a taxa de afinamento é conduzida pelas interações hidrodinâmicas e termodinâmicas. O espalhamento e posterior formação do aglomerado ocorre quando as tensões interfaciais dão um coeficiente positivo de distribuição de gás e óleo. Isto é crítico para a flutuação efetiva das gotas de óleo.

O presente capítulo apresentou trabalhos realizados com foco em escoamento de bolhas e gotas, e, nota-se que a maioria dos trabalhos são desenvolvidos selecionando um ou alguns fenômenos, mas não apresentam o sistema em sua totalidade. A literatura disponível mostrou alguns casos de interação entre duas bolhas, caso isolado de interação de uma bolha e uma gota em meio líquido estagnado e escoamento de bolhas em meio líquido.

Neste contexto, esta pesquisa se utiliza destes fundamentos teóricos para a realização da experimentação física e para complementar a experimentação numérica. Assim, vê-se a necessidade de maior investigação nesse tema, principalmente quando se inclui a dinâmica de bolhas com gotas de óleo em escoamento em meio líquido.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo, mostra-se a metodologia e o procedimento experimental desenvolvido para investigar a dinâmica de bolhas e gotas em escoamento de água, óleo e gás em meio disperso. O objetivo dos experimentos é adquirir uma base de dados, realizar o processamento, identificar os fenômenos envolvidos, comparar e validar com o modelo matemático que será utilizado na simulação numérica.

Um equipamento experimental foi especialmente desenvolvido para este trabalho, com detalhes apresentados a seguir.

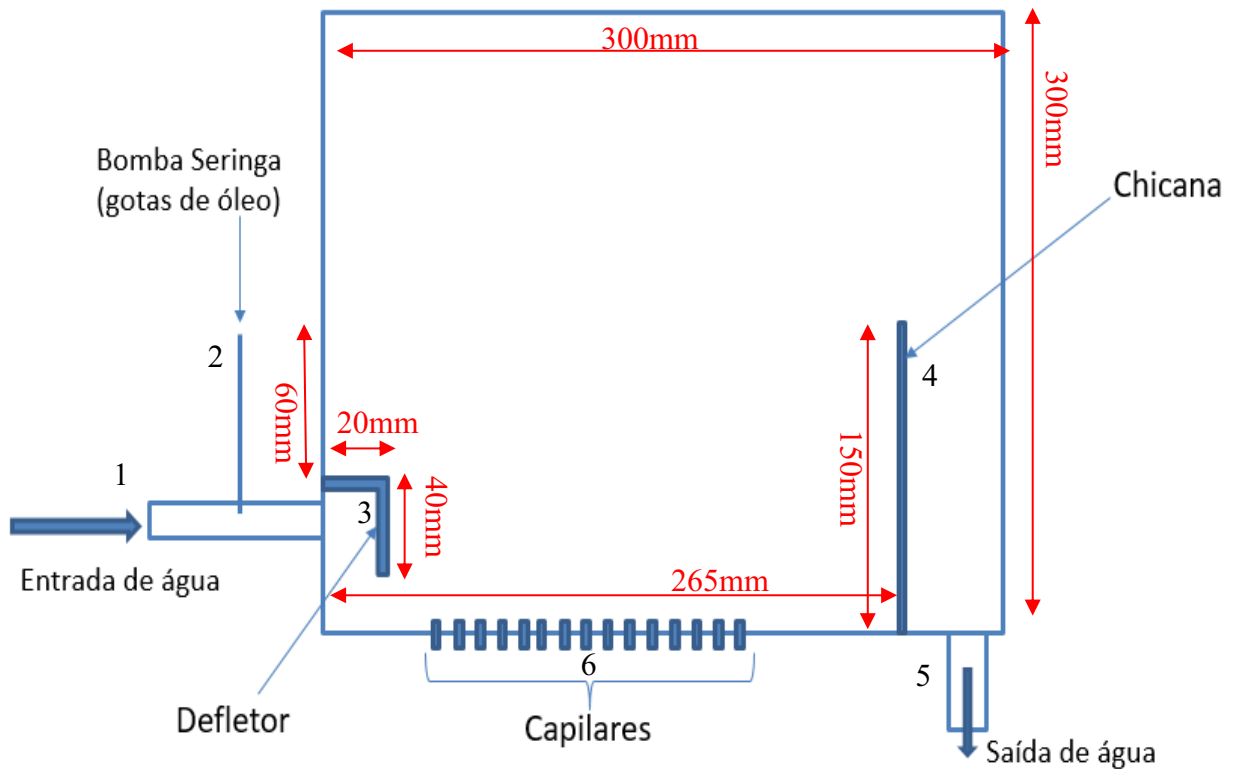
3.1 BANCADA EXPERIMENTAL

Para o estudo e análise do escoamento água, óleo e ar, é de extrema conveniência que se tenha um equipamento transparente, que possibilita a tomada de medidas de nível, visualização do escoamento, trajetórias de bolhas e gotas de óleo e conseqüentemente a dinâmica das gotas e bolhas no escoamento.

Para alcançar os objetivos, uma facilidade experimental foi projetada e construída com paredes de vidro para facilitar a limpeza e visualização do escoamento. As dimensões internas da câmara de vidro são 300 mm x 300 mm x 20 mm. Medições de nível, visualização de escoamento e injeção de gotas de óleo e bolha de gás permitem a determinação da cinemática de gotas e bolhas. O desenho quadrado do aparato experimental foi idealizado seguindo dimensões que caracterizam o tempo de residência do separador gravitacional industrial. Permite a quantificação do contorno das bolhas e gotas de óleo inseridas sem a distorção de forma adicional que é observada em superfícies curvas. O efeito de parede está além do escopo deste estudo e não é quantificado. O foco foi dado na compreensão dos fenômenos de interação envolvendo bolhas e gotas.

O esquema do aparato experimental ou câmara utilizada neste estudo está mostrado na Figura 17. A seção plana viabiliza a aquisição de imagens, sem deformações, que facilita o processamento e conseqüente análise dos resultados.

Figura 17 – Equipamento experimental para análise de escoamento água, óleo, ar em padrão disperso



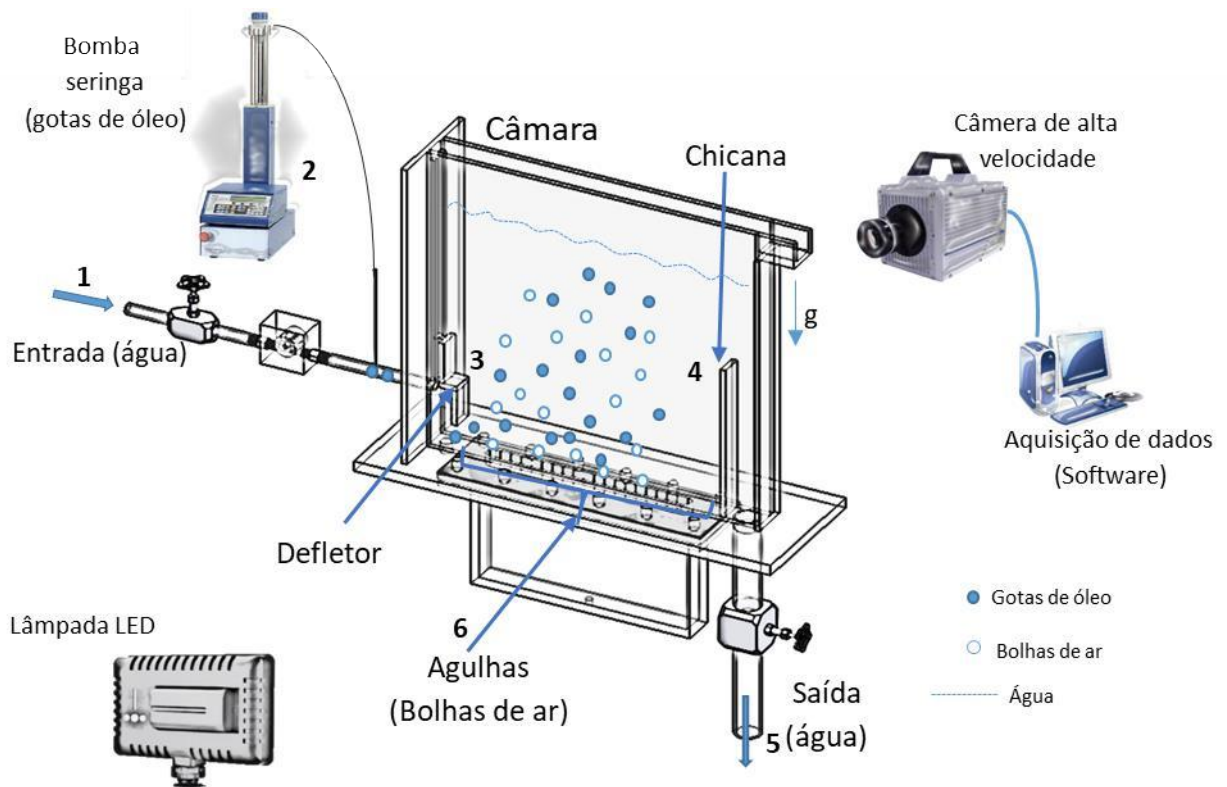
Fonte: Autoria própria

A câmara mostrada na Figura 17 possui uma entrada de água (1) (tubo de $\frac{1}{4}$ "), que alimenta continuamente o líquido (água da torneira) na câmara, garantindo um escoamento uniforme. Além disso, o tubo utilizado como entrada de água, também serve para injetar as gotas de óleo (2). O escoamento de óleo usado para produzir gotas de óleo é criado por meio de uma bomba seringa, permitindo o escoamento contínuo de óleo com pressão e vazão conhecidas. Um tubo capilar é acoplado à saída da bomba seringa (da TeleDyne, modelo 260 D ISCO-D Series) e conectado à entrada de água. O cisalhamento promovido pelo escoamento da água é responsável pela formação da população de gotas de óleo. Um defletor removível (3) é colocado após a entrada da câmara. Uma chicana de 150 mm de altura (4) impõe uma barreira que impede que as gotas de óleo saiam da câmara direto pela saída de água (5). A saída de água (5) está localizada na parte inferior (tubo de $\frac{3}{4}$ ") logo após a chicana. O ar comprimido é fornecido a uma câmara de gás de acrílico colocada na base da bancada, à qual é acoplado um sistema (placa) de agulhas hipodérmicas com diâmetro de 30 Gauge (0,27mm) (6), permitindo assim uma distribuição uniforme das bolhas geradas. Utilizam-se duas placas que alternam a quantidade de agulhas, uma com 10 e outra com 20 agulhas, para avaliar a influência da quantidade de bolhas geradas no sistema, uma vez que a vazão de ar dobra para o sistema com

20 agulhas. O sistema de iluminação consiste em uma lâmpada LED acoplada a um difusor de luz que é colocado atrás da câmara. No lado oposto, uma câmera de alta velocidade (Photron SA4 com resolução 1024 x 1024 pixels) é posicionada para capturar imagens na região entre o defletor e a chicana.

O aparato experimental completo é mostrado na Figura 18, onde para a obtenção de imagens durante a experimentação é utilizado um sistema de iluminação constituído de uma lâmpada fluorescente e uma placa translúcida para difundir a luz, colocada atrás do equipamento e posicionada de maneira a capturar as imagens na região entre o defletor e a chicana. O sistema de geração de bolhas é feito diretamente nas agulhas, já as gotas de óleo são geradas por uma bomba do tipo seringa, que injeta as gotas na tubulação de entrada de água, conforme já explicado.

Figura 18 – Aparato experimental completo



Fonte: Autoria própria

Os experimentos são realizados de acordo com as condições operacionais da Tabela 1, aplicadas em ambos os cenários com e sem defletor instalado e variando a quantidade de agulhas no sistema entre 10 e 20 agulhas, totalizando em 72 experimentos.

Independentemente da presença ou ausência do defletor e do sistema com 10 agulhas e 20 agulhas, três outras situações experimentais são analisadas: geração de bolhas, geração de gotas de óleo e um experimento completo com gotas e geração de bolhas. Sendo que o nível de água é mantido em 25 cm de altura no equipamento. A incerteza relativa no cálculo da velocidade e trajetória das partículas é de $\pm 6,19\%$ e foi estimada pelo método de propagação de incertezas.

Tabela 1 – Condições operacionais para a grade de experimentos, para casos com e sem defletor para sistema com 10 e com defletor para sistema com 20 agulhas

	Escala SKT	Vazão de água (l/h)	Velocidade de água (m/s)	Tempo de residência (min)	Vazão de ar (l/h) (mín/max)	Pressão Bomba Seringa (bar)	Vazão de Óleo (ml/min)
Caso 1	1	16	0,1402	4,96	1,6 – 3,2	130	4
Caso 2	10	34	0,2982	2,33	1,6 – 3,2	120	4
Caso 3	20	54	0,4738	1,47	1,6 – 3,2	110	4
Caso 4	30	74	0,6491	1,07	1,6 – 3,2	90	4
Caso 5	40	94	0,8245	0,84	1,6 – 3,2	85	4
Caso 6	51	125	1,0963	0,64	1,6 – 3,2	75	4

Fonte: Autoria própria

3.1.1 Procedimento Experimental

Para realizar os experimentos, inicia-se pela regulagem do ar comprimido que entra na câmara de distribuição para as agulhas, com esse parâmetro ajustado, abre-se a válvula para entrada da água no equipamento, enchendo até o nível (altura de 25cm), e controlando o nível com a abertura da válvula de saída. Em seguida faz-se a injeção das gotas de óleo pela bomba seringa, com controle da pressão e do volume nesta bomba.

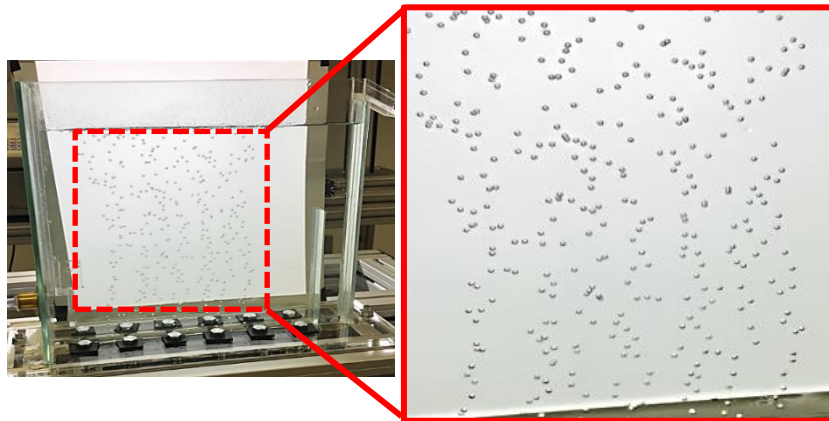
É necessário posicionar e regular a câmera de alta velocidade em frente ao equipamento, ajustando altura e foco. Com tudo ajustado, inicia-se a captura, processamento e pós processamento de informações utilizando uma técnica simples, a técnica fotográfica. Durante a execução do experimento, na geração das bolhas e gotas realiza-se a captura de imagens por uma câmera de alta velocidade, uma vez que as paredes do equipamento são transparentes, e para obter uma imagem clara das bolhas e gotas utiliza-se uma fonte de luz (difusor de LED). O diâmetro das bolhas e gotas e assim como as velocidades são estimadas pela técnica fotográfica seguida da análise de imagem. As imagens capturadas são analisadas

pelo *software* comercial de processamento DaVis e por meio de códigos desenvolvidos no MatLab e Phyton.

3.1.2 Metodologia de Análise de Dados

O óleo utilizado nos experimentos é óleo de milho comercial, cuja massa específica e viscosidade são 917 kg/m^3 e $67,6 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, respectivamente, em temperatura igual a $20 \text{ }^\circ\text{C}$. A água é fornecida pela companhia de água local, ou seja, água da torneira. O ar comprimido é usado como fonte de gás. O ar comprimido chega na câmara de gás para então ser uniformemente distribuído pelo conjunto de 10 ou 20 agulhas, sendo que para isso utiliza-se pressão e vazão muito baixas, com pressão menor que 1 bar. A vazão de ar apenas influencia na frequência de bolhas formadas. Com alta vazão a frequência de bolhas é maior, destaca-se, portanto, que não existe variação significativa no diâmetro das bolhas quando alterada a vazão de ar. O diâmetro das bolhas é aproximadamente de 2mm, conforme o processamento das imagens. A formação e o escoamento das bolhas podem ser observados na Figura 19.

Figura 19 – Escoamento das bolhas formadas durante os experimentos

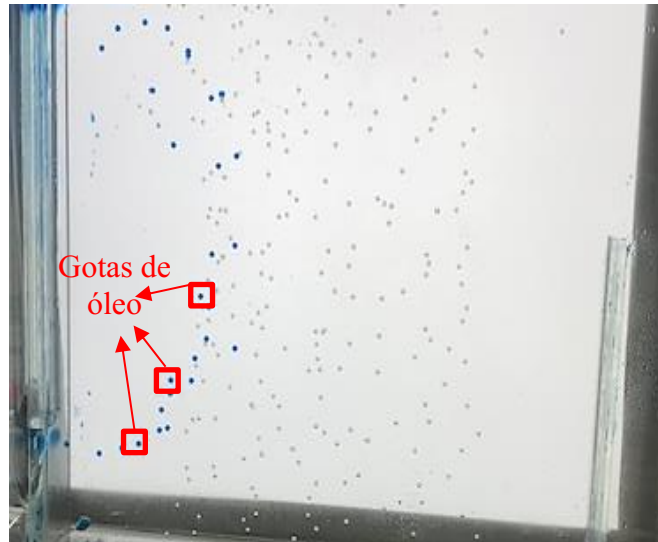


Fonte: Autoria própria

A pressão máxima de operação da bomba seringa é de 400 bar (pressão máxima da bomba). É observado que com maior vazão (maior abertura da válvula da bomba seringa) são geradas gotas de tamanhos menores, enquanto para vazão menor (válvula mais fechada da bomba seringa) são geradas gotas com tamanhos maiores, que é o caso apresentado na Figura 20, sendo que neste caso a vazão de entrada de água é menor também. Portanto, para os testes realizados a vazão de óleo é de 4 ml/s com pressão variável conforme Tabela 1 para garantir que

cada caso mantenha vazão de óleo constante e mesmos diâmetros, nas diferentes vazões de líquido, uma vez que a vazão de líquido influencia no cisalhamento.

Figura 20 – escoamento bolhas e gotas, sem uso do defletor e vazão baixa



Fonte: Autoria própria

O uso de imagens para calcular parâmetros de escoamento bifásico é uma técnica bem estabelecida. A técnica de medição utilizada é capaz de capturar movimentos no plano 2D. Além disso, com a evolução dos *softwares* de processamento e equipamentos de filmagem nas últimas décadas, a qualidade do processamento aumentou com ganhos de velocidade, autonomia e precisão (MAYOR; PINTO; CAMPOS, 2007; PAZ et al., 2017).

Uma imagem monocromática pode ser definida por uma função $f(x,y)$, que representa o produto da interação entre a iluminância, quantidade de luz que incide sobre um objeto; e a refletância ou transmitância próprias do objeto, que exprime a fração de luz incidente que o objeto reflete ou transmite (MARQUES; VIEIRA, 1999). Para fins práticos aos experimentos efetuados, as imagens digitalizadas sofrem um processo de discretização, no qual a imagem é representada como uma matriz de X por Y pontos, sendo cada ponto denominado como pixel, que é a unidade fundamental da imagem.

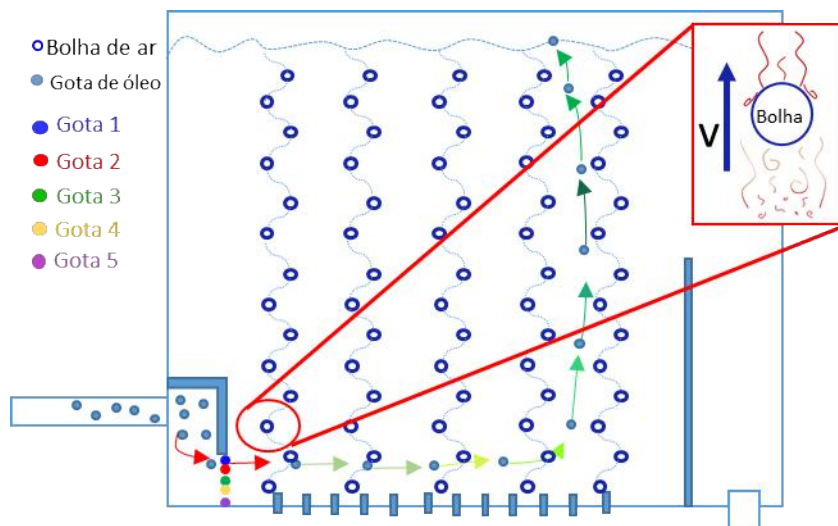
Para investigar e observar os fenômenos, segundo Prakash, Majumder e Singh (2018), a técnica de observação visual é uma das técnicas mais simples para estimar o padrão de escoamento em uma coluna de flotação, mas somente para colunas transparentes. No regime de escoamento homogêneo, observa-se o movimento lento da bolha, mas no regime heterogêneo, a circulação grosseira e a intensidade de interação das bolhas são muito altas, sendo necessário

utilizar o processamento de imagens para interpretar o regime de escoamento e demais fenômenos envolvidos.

Algoritmos de processamento de imagens foram desenvolvidos em Matlab (para rastrear as partículas individualmente) e em Python (para detectar as trajetórias de todas as partículas do experimento).

Com as imagens, o código Matlab desenvolvido rastreia trajetórias individuais e calcula parâmetros experimentais, como as velocidades instantânea e média. O procedimento adotado para o rastreamento individual das gotas é apresentado na Figura 21. As gotas escolhidas para serem rastreadas foram as mais próximas da entrada da câmara, para os cenários em que o defletor reduz a interferência do jato de líquido. A Figura 21 mostra um esquema do procedimento de rastreamento para os ensaios experimentais da cinemática de gotículas de óleo dispersas em uma população de bolhas. São selecionadas cinco gotas representativas, inicialmente localizadas em uma região posterior ao defletor, no ponto inicial de sua trajetória dentro da câmara. Esta área foi escolhida por ser a região de entrada onde a alta turbulência antes do defletor pode ser evitada. As trajetórias individuais de cinco gotas foram rastreadas e plotadas usando Matlab.

Figura 21 – Esquema da trajetória das gotículas de óleo representativas cujas posições dentro da câmara são exibidas. O caso analisado é o da inserção da população de bolhas. Marcadores preenchidos: gotas de óleo. Marcadores vazios: bolhas



Fonte: Autoria própria

O código desenvolvido em Python binariza as imagens pelo método *Mean*, com uma função que detecta a posição das bolhas, converte os diâmetros de pixels em milímetros e gera

as trajetórias de todas as partículas do experimento, separando bolhas e gotas. Além disso, o *software* calcula a velocidade instantânea das bolhas e gotas. Esses dois ambientes de programação (Matlab e Python) foram usados para equilibrar os altos custos computacionais e esforços de otimização que surgiriam se apenas uma dessas linguagens fosse usada.

3.1.3 Cálculos dos parâmetros

A velocidade de entrada do líquido é calculada pela Equação (3.1).

$$v = \frac{Q}{A} \quad (3.1)$$

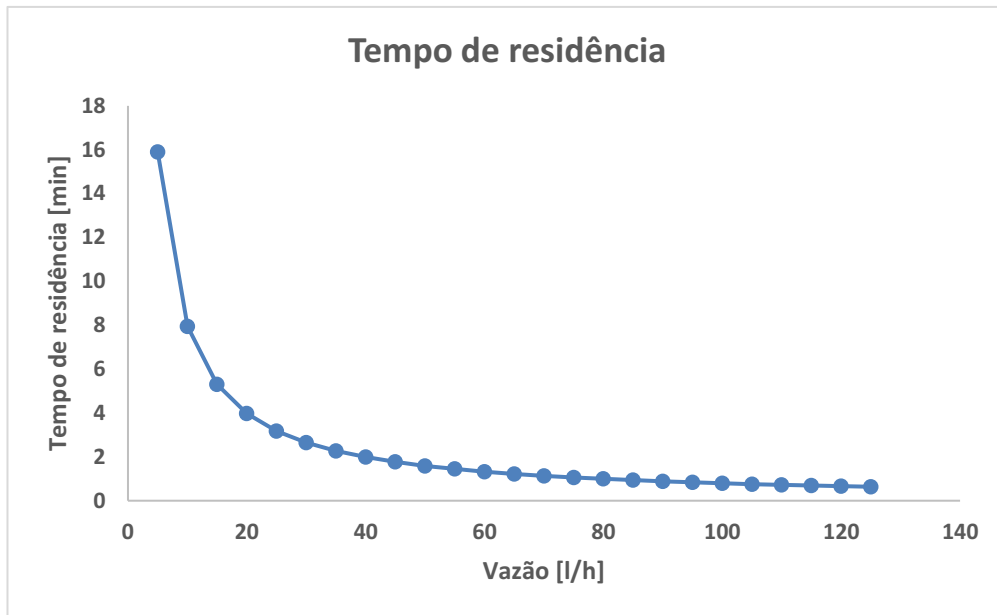
Onde Q é a vazão (m^3/s) e A é a área (m^2), e v é a velocidade (m/s). O cálculo do tempo de residência é feito baseado na região de separação de um separador convencional, utilizando assim um fator de conversão para as medidas do equipamento utilizado neste trabalho. Considera-se que as medidas efetivas da região de separação para a bancada experimental são: 26,5 cm de comprimento (L_{eff}), 25 cm de altura da água ($h_{\text{H}_2\text{O}}$), 2 cm de profundidade do equipamento (l), resultando numa área de seção transversal de $0,005 \text{ m}^2$ (A_a). Com isso o tempo de residência (t_r) é calculado com a Equação (3.2).

$$t_r = \frac{L_{\text{eff}} A_a}{Q} \quad (3.2)$$

O tempo de residência foi definido pela fase dispersa, gotas de óleo que adentram o equipamento, calculado baseando-se na velocidade de entrada do líquido, sendo que $\overline{v}_{\text{gota}} = \overline{v}_{\text{H}_2\text{O}}$, sendo assim, o tempo de residência da gota na fase contínua (água) é igual ao tempo de residência da água no equipamento $t_{r_{\text{gota}}} = t_{r_{\text{H}_2\text{O}}}$.

A Figura 22 mostra uma linha de tendência comparando a vazão com o tempo de residência. Sendo que se escolheu uma faixa de variação de vazão de entrada de água pertinente a uma faixa de variação do tempo de residência.

Figura 22 – Tempo de residência x vazão de entrada



Fonte: Autoria própria

Os valores dos números adimensionais estão na Tabela 2, que apresenta os casos com menor fração de gás e a Tabela 3 os casos com maior fração de gás, nas condições dos experimentos apresentados neste trabalho. Estes números adimensionais são úteis para considerar as forças que atuam na partícula.

Tabela 2 – Números adimensionais para grade de teste experimental para casos com menor fração de gás (sistema com 10 agulhas)

	Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4		Caso 5		Caso 6	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Morton	2,54E-11		2,54E-11		2,54E-11		2,54E-11		2,54E-11		2,54E-11	
$Re_{entrada}$	888,67		1335,54		1890,16		2442,88		3003,21		3169,28	
Re_{bolha}	194,6	898,3	194,6	898,3	179,6	898,3	179,6	898,3	179,6	898,3	179,67	898,38
Re_{gota}	-	-	-	-	0,49	559,0	0,39	419,2	0,39	349,3	0,39	279,49
$Eö_{bolha}$	0,23	1,20	0,22	1,20	0,19	1,20	0,19	1,20	0,19	1,20	0,19	1,20
$Eö_{gota}$	-	-	-	-	0,03	0,34	0,02	0,19	0,02	0,13	0,02	0,08
We_{bolha}	0,40	3,6	0,40	3,6	0,36	3,69	0,36	3,69	0,36	3,69	0,36	3,69
We_{gota}	-	-	-	-	6,8e-6	2,68	5,5e-6	2,01	5,5e-6	1,68	5,5e-6	1,34

Fonte: Autoria própria

Tabela 3 – Números adimensionais para grade de teste experimental para casos com maior fração de gás (sistema com 20 agulhas)

	Caso 3		Caso 4		Caso 5		Caso 6	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Morton	2,54E-11		2,54E-11		2,54E-11		2,54E-11	
Re _{entrada}	1890,16		2442,88		3003,21		3169,28	
Re _{bolha}	194,6	898,3	194,6	898,3	194,6	898,3	179,67	898,3
Re _{gota}	0,49	339,3	0,39	269,5	0,39	293,47	0,39	279,49
Eö _{bolha}	0,22	1,20	0,22	1,20	0,22	1,20	0,19	1,21
Eö _{gota}	0,03	0,53	0,02	0,30	0,02	0,26	0,02	0,08
We _{bolha}	0,36	5,03	0,40	5,03	0,40	5,03	0,36	5,03
We _{gota}	6,8e-6	0,79	5,5e-6	0,66	5,5e-6	0,84	5,5e-6	1,34

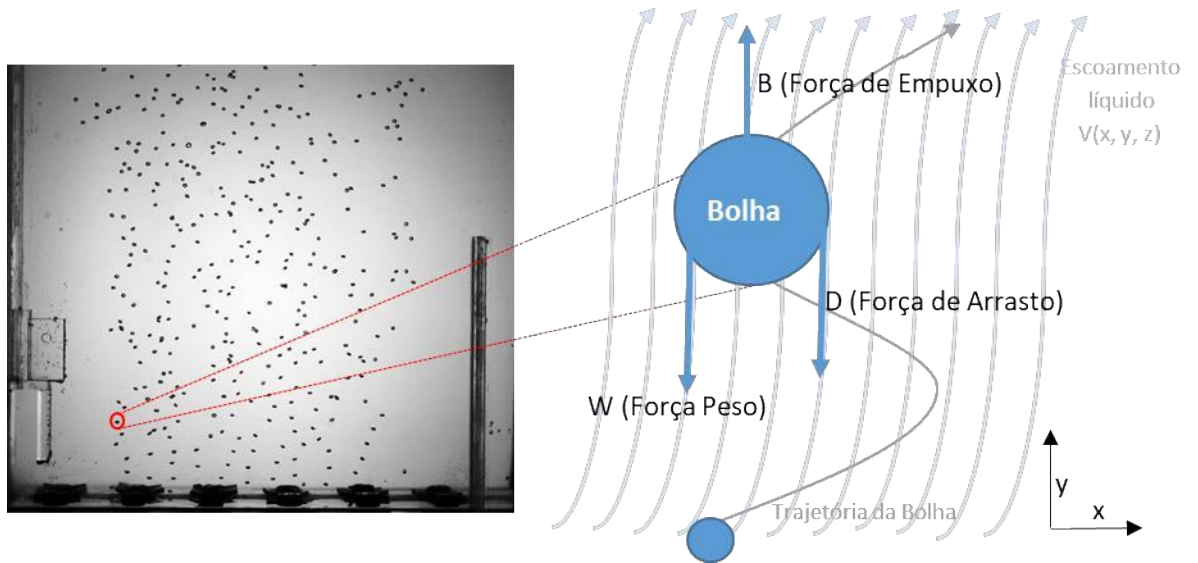
Fonte: Autoria própria

São apresentados os valores mínimos e máximos para cada número adimensional, considerando o menor e o maior diâmetro da bolha identificado na análise de imagens. O número de Morton não apresenta variação, pois relaciona as propriedades dos fluidos e não depende do diâmetro de bolhas e gotas. O Reynolds da entrada é calculado com base na entrada do equipamento utilizando assim o diâmetro da tubulação de entrada, Reynolds da bolha e da gota levam em consideração o diâmetro das partículas assim como também acontece para o número de Eötvös e Weber.

Como pode ser verificado na Tabela 2 e Tabela 3, o número de Re_{entrada} é alto, devido as forças inerciais (empuxo neste caso) serem maiores que as forças viscosas. E conforme Dumouchel (2008) com número de We < 8 pode-se concluir que o escoamento borbulhante é de baixa velocidade e pode ser caracterizado como um regime de gotejamento. Quando Eötvös está próximo a unidade indica que existe competição entre a inércia e a força de tensão superficial. Os valores entre a Tabela 2 e Tabela 3 apresentam pequenas variações que estão relacionadas com a velocidade das fases, sendo que a presença de maior quantidade de bolhas no sistema perturba o escoamento de líquido na câmara.

Um equilíbrio das forças mostradas na Figura 23 (Empuxo, Peso e Força de Arrasto) que atuam sobre uma bolha esférica (escolhida entre uma população de acordo com a Figura 23) permite estimar o coeficiente de arrasto.

Figura 23 – Equilíbrio de forças em uma bolha da primeira agulha, considerando empuxo, peso e força de arrasto



Fonte: Autoria própria

Desde que o movimento seja acelerado, deve-se considerar um termo temporal que leva em consideração o comportamento transitório da bolha, conforme a Equação (3.3).

$$\frac{d\bar{Q}}{dt} = B - W - D \quad (3.3)$$

onde $\bar{Q} = m_b U$ é o momento da bolha, m_b é a massa da bolha e U é a velocidade instantânea da bolha ($dU/dt = dU/(dt+t)$), obtido medindo o deslocamento do centro geométrico da bolha entre duas imagens sucessivas. Como m_b é constante, a Equação (3.3) pode ser reescrita, considerando uma bolha esférica, de acordo com a Equação (3.4).

$$\mathcal{V}_b \rho_b \frac{dU}{dt} = \frac{1}{6} \pi d_b^3 g \rho - \frac{1}{6} \pi d_b^3 g \rho_b - \frac{1}{8} C_D \rho U^2 \pi d_b^2 \quad (3.4)$$

onde C_D é o coeficiente de arrasto, d_b é o diâmetro da bolha, g é a aceleração da gravidade, ρ é a massa específica da fase contínua (líquida), ρ_b é a massa específica do ar e \mathcal{V}_b é o volume da bolha. U e d_b são obtidos experimentalmente com o processamento dos dados. A Equação (3.4) é reorganizada para obtenção da Equação (3.5).

$$C_D = \frac{4}{3} \frac{d_b \left(g \rho - \rho_b \left(g + \frac{dU}{dt} \right) \right)}{\rho V_{rel}^2} \quad (3.5)$$

onde V_{rel} é a velocidade relativa que é a diferença entre a velocidade da fase contínua (água) e a velocidade da partícula (bolha). Os valores de V_{rel} considerados nos cálculos são obtidos com

dados experimentais aplicados à correlação proposta por Garnier et al. (2002). Os dados obtidos experimentalmente e inseridos na Equação (3.5) (do equilíbrio de força em uma bolha) serão comparados no Capítulo de Resultados com os dados obtidos com as correlações da Tabela 4.

Tabela 4 – Correlações para coeficiente de arrasto (C_D) na literatura

Researchers	Correlation	Considerations
Mei, et al. (1994)	$C_D = \frac{16}{Re} \left(1 + \left(\frac{8}{Re} + \frac{1}{2} (1 + 3.315 Re^{-1/2}) \right)^{-1} \right)$ (3.6)	Bolha esférica em líquido estagnado dentro de uma ampla faixa de Reynolds.
Ishii and Zuber (1979)	$C_D = C_{D0} f(\alpha) \quad (3.7)$ $f(\alpha) = (1 - \alpha)^p \quad (3.8)$ C_{D0} refere-se a uma bolha isolada	O valor de p está sujeito a forma da bolha. O efeito da fração de gás é considerável.
Rusche and Issa (2000)	$C_D = C_{D0} f(\alpha) \quad (3.9)$ $f(\alpha) = \exp(K_1 \alpha) + \alpha^{K_2} \quad (3.10)$ With $K_1=3.64$ and $K_2=0.864$ C_{D0} refere-se a uma bolha isolada	O efeito da turbulência e a população da bolha são considerados.
Simonnet et al. (2007)	$C_D = \frac{4}{3} \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_l} g d_b \frac{1 - \alpha_{loc}}{V_{rel}^2} \quad (3.11)$	O equilíbrio na conservação do momento axial e a população de bolhas são considerados.
(Rusche and Issa (2000)	$C_D = \frac{4}{3} \frac{Ar(1 - \alpha)}{Re^2} \quad (3.12)$ $Ar = \frac{d^3 g \rho_c (\rho_c - \rho_g)}{\mu_c^2} \quad (3.13)$	A Equação $C_D = \frac{4}{3} \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_l} g d_b \frac{1 - \alpha_{loc}}{V_{rel}^2}$ (3.11) também pode ser escrita em termos do número de Arquimedes e Reynolds.

O número de Reynolds foi definido na Equação (2.2).

Fonte: Autoria própria

As velocidades terminais das bolhas individuais obtidas experimentalmente foram comparadas com as velocidades terminais calculadas com a Equação (3.14) de Treybal (1980), recomendada para bolhas com diâmetro entre 1,4 mm $< d_p < 6$ mm com movimento em ziguezague.

$$V_t = \sqrt{2\sigma / d_b \rho_l + g d_b / 2} \quad (3.14)$$

A velocidade relativa em um sistema com tamanho de bolha uniforme e sem gradientes transversais de velocidade do líquido e fração de gás local pode ser aplicada (GARNIER; LANCE; MARIÉ, 2002; SIMONNET et al., 2007). Para diâmetros de bolha menores que 5,5

mm e fração de gás local <35%, os autores encontraram a relação de Garnier et al. (2002) (GARNIER; LANCE; MARIÉ, 2002) apresentado na Equação (3.15). A correlação foi usada para medir a velocidade de flutuação da fase líquida.

$$V_{rel} = V_{\infty} (1 - \alpha_{loc}^{1/3}) \quad (3.15)$$

Onde V_{∞} é a velocidade do componente vertical de uma bolha isolada em um meio infinito, e α_{loc} a fração de gás local. A fração de gás local e global são iguais, porque as bolhas são distribuídas uniformemente na câmara. A fração de gás foi calculada medindo-se a diferença na altura da coluna de líquido com e sem bolhas inseridas no escoamento. Essa correlação foi verificada em outro sistema experimental por Guet et al. (2004), com bolhas de diâmetros menores que 6 mm e fração de gás local menor que 20%.

3.1.4 Avaliação da incerteza dos parâmetros no processamento manual

O modelo matemático utilizado para avaliação da incerteza de medição deriva da Equação (3.16), onde a velocidade da bolha no programa de processamento de imagens é calculada.

$$V_B = \frac{\Delta pixel}{\Delta imagens} \cdot (taxa_aquisição) \cdot \left(\frac{ref_mm}{ref_pixel} \right) \cdot 10^{-3} \quad (3.16)$$

Onde V_B representa a velocidade da frente da bolha em m/s, $\Delta pixel$ representa a diferença da posição da frente da bolha em pixel em imagens diferentes, $\Delta imagens$ representa o número de imagens percorridas que gerou o $\Delta pixel$. Entretanto, os resultados obtidos por meio da equação citada são valores contados em pixel. Para que seja possível obter valores em unidades de área, é necessário estabelecer a dimensão de um pixel, ou seja, definir quanto cada pixel visualizado na tela representa em termos de uma dada unidade de comprimento. A taxa_aquisição mostra a frequência de aquisição de imagens em imagens/segundo. O valor tam_pixel denota o tamanho de cada pixel da imagem em mm, ficando, portanto, com a unidade mm/pixel.

É possível, através da propagação de incertezas, estimar uma incerteza relativa para a medida de velocidade da bolha.

Sabe-se que se $R = f(X_1, X_2, \dots, X_i)$, a incerteza relativa de R (u_R) pode ser dada pelo método de propagação das incertezas de X_i da seguinte forma pela Equação (3.17).

$$u_R^2 = \sum_i \left(\frac{X_i}{R} \frac{\partial R}{\partial X_i} \right)^2 u_{X_i}^2 \quad (3.17)$$

A expressão para a incerteza do tipo A, é determinada a partir de n medições da grandeza de (u_R) , logo, a incerteza relativa na velocidade da bolha pode então ser dada pela Equação (3.18).

$$u_{V_B}^2 = (1)^2 u_{\Delta pixel}^2 + (-1)^2 u_{\Delta imagens}^2 + (1)^2 u_{taxa_aquisição}^2 + (1)^2 u_{ref_mm}^2 + (-1)^2 u_{ref_pixel}^2 \quad (3.18)$$

Cada uma das incertezas padrão relativa podem ser analisadas para estimar a incerteza global da velocidade da bolha da melhor maneira possível.

A incerteza do tipo B é determinada a partir de informações acessórias e externas ao processo de medição. Para a incerteza do tipo B, consideraram-se os fatores externos que podem contribuir ao erro, a fixação da altura da câmera durante a realização dos experimentos. A fixação da altura da câmera foi mantida para todos os experimentos realizados, não havendo mudanças na altura e posicionamento da câmera. Logo a incerteza do tipo B é inexistente, pois a variável de fixação e posicionamento indicará nas imagens discrepância nas regiões obtidas nas imagens, o que não seria uma incerteza, e sim um erro grosseiro.

A incerteza u_{ref_mm} e do u_{ref_pixel} indicam a incerteza que a referência de comprimento pode estar causando. Dessa forma a incerteza padrão relativa na velocidade da bolha pode ser reescrita pela Equação (3.19)

$$u_{V_B}^2 = u_{\Delta pixel}^2 + u_{taxa_aquisição}^2 + u_{ref_mm}^2 + u_{ref_pixel}^2 \quad (3.19)$$

A incerteza $u_{\Delta pixel}$ estará relacionada com a incerteza na determinação da posição da bolha, portanto pode ser relevante. A incerteza $u_{\Delta imagens}$ é inexistente, pois a variável indicará um número inteiro de imagens que foram passadas, podendo apenas ser contadas de maneira incorreta, o que não seria uma incerteza e sim um erro grosseiro. A incerteza da taxa de aquisição $u_{taxa_aquisição}$ depende da câmera utilizada, indicando quanto pode flutuar a taxa de aquisição real comparada com a de referência, a incerteza pode ser estimada pela metade da menor escala de medição (no caso 1 frame) = 0.5 frames / 1000 frames = 0,0005 ou 0,05%.

A incerteza da referência em mm (u_{ref_mm}) será considerada como a metade da menor divisão do instrumento, no caso como foi utilizado uma régua $\pm 0,5$ mm. Para encontrar a incerteza relativa, é usado o valor total mensurado pela régua na imagem, que é 200 mm. Dessa forma, a incerteza relativa causada pelo instrumento de referência é $u_{ref_mm} = \pm 0,5 / 200 = \pm 0,0025 = \pm 0,25\%$.

Para obter a incerteza causada pelas flutuações, são utilizadas as diversas medidas de comprimento feitas em uma imagem de referência. Cada medida feita na imagem de referência fornece um comprimento em pixel. Como o protocolo adotado consiste em tirar várias medidas de comprimento, é possível encontrar uma média (μ_{ref_pixel}) e um desvio padrão (σ_{ref_pixel}) dos valores de pixels da referência encontrados. Com isso, adotando um critério de 99,73% de confiança, a incerteza relativa causada pelas flutuações pode ser estimada pela Equação (3.20).

$$u_{ref_pixel} = \pm \frac{3 \cdot \sigma_{ref_pixel}}{\mu_{ref_pixel}} \quad (3.20)$$

Usando os valores encontrados na realização dos experimentos que levam à maior incerteza, a média obtida foi $\mu_{ref_pixel} = 887,29 \text{ pixel}$, enquanto o desvio padrão foi $\sigma_{ref_pixel} = 0,588133 \text{ pixel}$. Com isso, a incerteza relativa causada pelas flutuações pode ser calculada por $u_{ref_pixel} = \pm 3 \cdot 0,588133 / 887,29 = \pm 0,001988 = \pm 0,19\%$.

Para determinar a incerteza do $u_{\Delta pixel}$ considera-se que a determinação da posição da bolha, feita manualmente, tem uma incerteza unitária aproximada de 1 pixel. Como são necessárias duas posições para determinar um ponto de velocidade, neste caso estima-se que a incerteza da diferença neste ponto é o dobro da incerteza unitária. A incerteza é relativizada pela menor distância medida em pixel entre duas posições de uma bolha, conforme Equação (3.21).

$$u_{\Delta pixel} = \frac{2}{(\text{quantidade de pixel})} = \frac{2}{32,30} = 0,0619 = \pm 6,19 \quad (3.21)$$

Fazendo com que a incerteza na velocidade da frente da bolha (u_{V_B}) possa ser determinada conforme Equação (3.22).

$$u_{V_B} = \pm \sqrt{u_{\Delta pixel}^2 + u_{taxa_aquisição}^2 + u_{ref_mm}^2 + u_{ref_pixel}^2} = \pm 0,0619 = \pm 6,19\% \quad (3.22)$$

Portanto, a incerteza relativa estimada no cálculo da velocidade da bolha usando o programa de processamento manual é de $\pm 6,19\%$.

3.2 FECHAMENTO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram apresentados a metodologia e procedimento experimental para estudo da dinâmica de bolhas e gotas em escoamento de líquido. Abordou-se a bancada

experimental e seu funcionamento com condições operacionais. Foram mostrados os valores calculados dos números adimensionais mais influentes para o caso em estudo, determinando assim os limites operacionais de cada caso da experimentação.

Apresentou-se a metodologia utilizada para analisar os dados, assim como os cálculos de todos os parâmetros envolvidos no desenvolvimento desta tese, desde cálculo de velocidade terminal até as forças que agem sobre uma bolha. Mostra-se também a avaliação da incerteza dos parâmetros no processamento manual.

4 MODELAGEM MATEMÁTICA E MÉTODO NUMÉRICO

Este capítulo apresenta a modelagem matemática e suas hipóteses simplificadoras na dinâmica de bolhas e gotas, expondo a metodologia numérica empregada para as simulações. Reportam-se os principais aspectos da modelagem numérica utilizada para a solução do escoamento multifásico. São apresentadas as equações e modelos constitutivos assumidos para a solução numérica do escoamento multifásico em estudo. Aborda-se também o modelo de turbulência, modelo de forças interfaciais e o teste de malha.

4.1 MODELO MATEMÁTICO PARA ESCOAMENTO MULTIFÁSICO

Em escoamentos multifásicos existem diversas linhas de modelagens, cuja escolha leva em conta fatores como o padrão de escoamento e o grau de detalhe esperado da solução. Por exemplo, abordagens unidimensionais que desconsideram o movimento relativo entre as fases resultam em modelos simples para o cálculo de variáveis globais como o gradiente de pressão, mas não fornecem qualquer detalhe do campo de escoamento. No outro extremo, soluções diretas, que podem fornecer detalhes do complexo movimento e interação entre as fases, demandam elevado custo computacional, não sendo uma ferramenta prática para a maioria dos problemas em engenharia (ROSA, 2012).

Entretanto, pode-se direcionar o foco da modelagem para a obtenção de parâmetros globais de projeto, como a distribuição média das fases no domínio de interesse em uma situação de regime de operação, perdas de cargas e vazões médias e esforços em superfícies, deixando de lado complexos fenômenos locais de escoamentos multifásicos em favorecimento de um modelo mais compacto que permita obtenção de grande número de resultados em tempo factível. Entre esses extremos, métodos lagrangeanos e eulerianos podem ser alternativas para se obter detalhes do campo de escoamento com soluções computacionais de tempo factível, escolhendo-se o Modelo de Dois Fluidos.

Os modelos eulerianos, cuja descrição parte do conceito de médias, são muito úteis para uma descrição global do campo de escoamento, permitindo o cálculo de propriedades de interesse de projeto de muitos sistemas de engenharia, como perdas de carga, esforços em superfícies, vazões de entrada e saída das fases envolvidas, e uma visão macroscópica da distribuição das fases no domínio (CROWE et al., 2012).

Já os modelos lagrangeanos são úteis, por exemplo, para calcular a trajetória de partículas individuais em um meio contínuo, bem como suas eventuais interações (como

colisões, quebras e adesão em superfícies) (FERZIGER; PERIC, 2002). Dentre as vantagens dessa metodologia para padrões dispersos conforme esta pesquisa, pode-se citar a representação individual do movimento de cada bolha e gota, o que ajuda a entender detalhes da física do problema e, também, permite uma análise estatística como a contagem de partículas em entradas e saídas do domínio, o que pode ser útil para avaliar a eficiência de equipamentos, no caso de flotores e separadores.

Contudo, tanto a modelagem euleriana-euleriana não-homogênea, também conhecida como Modelo de Dois Fluidos, quanto a modelagem euleriana-lagrangeana, ou de seguimento de Partículas, são utilizadas, de maneira complementar, para a análise do escoamento água, óleo e ar em padrão disperso.

4.1.1 Modelo Euleriano-Euleriano Não-Homogêneo (Modelo de Dois Fluidos)

O modelo euleriano-euleriano não-homogêneo, usualmente mencionado na literatura como Modelo de Dois Fluidos (ISHII; HIBIKI, 2006), utiliza equações médias de transporte para cada fase, as quais são ponderadas por uma fração volumétrica correspondente (RZEHAKE; KREPPER, 2013).

O modelo de dois fluidos pode ser aplicado em escoamentos com mais de duas fases. A abordagem “euleriana-euleriana” é assim conhecida porque expressa as fases (contínuas ou dispersas) por referenciais eulerianos que se intercalam (UEYAMA, 2012). Afirma-se que a ocorrência das fases é suavizada no espaço. Este modelo pode ser aplicado a um sistema com grande número de partículas segundo Zaman e Bergstrom (2014). No entanto, parte fundamental dessa abordagem é a modelagem fenomenológica das interações entre as fases, que são dadas por equações constitutivas adicionais (UEYAMA, 2012).

Os princípios do modelo de dois fluidos são descritos detalhadamente por Rosa (2012); Crowe et al. (2012) e Ishii; Mishima (1984). O procedimento para a obtenção do Modelo de Dois Fluidos envolve a aplicação de médias sobre as equações, bem como o uso de propriedades de médias sobre variáveis escalares e vetoriais e várias considerações a respeito de interações interfaciais. As equações de continuidade e de quantidade de movimento para uma fase i resultante desse desenvolvimento são dadas pela Equação (4.1) e Equação (4.2).

$$\frac{\partial \alpha_i \rho_i^X}{\partial t} + \nabla \times (\alpha_i \rho_i^X \vec{V}_i^{Xp}) = \Gamma_i \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial \alpha_i \rho_i^X \bar{V}_i^{Xp}}{\partial t} + \nabla \times \left(\alpha_i \rho_i^X \bar{V}_i^{Xp} \bar{V}_i^{Xp} \right) = -\alpha_i \nabla \left(p_i^X \right) + \alpha_i \left(\mu_i^X + \mu_{i,t}^X \right) \times \nabla^2 \bar{V}_i^{Xp} + \\
& + \alpha_i \rho_i^X \bar{g}^{Xp} + \bar{M}_i + \bar{V}_i^m \Gamma_i
\end{aligned} \tag{4.2}$$

Na Equação (4.1), tem-se que a variação da massa da fase em um volume de controle (i), somada ao escoamento de massa da fase (ii) através do volume é igual à troca de massa interfacial, Γ_i (iii). Em cada termo, surge a fração volumétrica α_i como um termo multiplicador que pondera a probabilidade de ocorrência da fase i.

Na Equação (4.2), as acelerações temporais (iv) e convectiva (v) da fase i são balanceados pelo gradiente de pressão (vi), pelo tensor de tensões devido a efeitos laminares e turbulentos (vii), pela força gravitacional (viii), e pela troca de quantidade de movimento devido às tensões interfaciais (ix) e à troca de massa através da interface (x). Os sobrescritos X e Xp acompanham variáveis escalares e vetoriais, respectivamente. O primeiro indica uma média de fase, isto é, ponderada pela fração volumétrica, enquanto o segundo indica uma média de “Favre” (ROSA, 2012). O processo de médias indica que tais propriedades são reinterpretadas por seus valores médios. Não existindo troca de massa interfacial, hipótese por ora adotada, tem-se que $\Gamma_i = \bar{V}_i^m \Gamma_i = 0$.

O termo \bar{M}_i , relacionado às trocas de quantidade de movimento devido às tensões na interface, não possui uma equação constitutiva única, mas é aproximado por um conjunto de modelos para efeitos distintos. Quando existe uma fase contínua e uma ou mais fases dispersas, é usual o desmembramento de \bar{M}_i na força de arrasto, relevante em praticamente todos os padrões de escoamento multifásico, e outras forças, relevante em cenários específicos, conforme Equação (4.3).

$$\bar{M}_i = \alpha_i \frac{\bar{F}_D + \bar{F}_{MV} + \bar{F}_S + \bar{F}_{LP} + \bar{F}_{DT} + \dots}{\nabla_p} = \bar{M}_D + \bar{M}_{MV} + \bar{M}_S + \bar{M}_{LP} + \bar{M}_{DT} + \dots, \tag{4.3}$$

onde o termo \bar{M}_i , cuja dimensão é de força por unidade de volume, é dado pela soma das forças (por unidade de volume) de arrasto, \bar{M}_D , e outras forças relevantes em escoamentos dispersos, como \bar{M}_{MV} que é a massa virtual, \bar{M}_S é a força de sustentação, \bar{M}_{LP} lubrificação de parede, \bar{M}_{DT} trata da dispersão turbulenta, e outras forças importantes em cenários específicos. O

símbolo \forall_p é o volume da partícula sobre a qual atua a força. A fração volumétrica, α_i , indica a magnitude com que atua cada força dentro de um dado volume de líquido parcialmente ocupado pela fase dispersa, efeito que é tomado na média dentro do contexto do Modelo de Dois Fluidos.

A força de arrasto, \vec{F}_D , representa a resistência que uma partícula sofre ao se mover através de um meio contínuo com velocidade relativa $|\vec{V}_p - \vec{V}_L|$, onde \vec{V}_p e \vec{V}_L são os vetores velocidade da partícula e do campo de líquido, respectivamente. Considerando-se uma partícula esférica de diâmetro d_p , a força de arrasto por unidade de volume do líquido atuando sobre ela, $\vec{M}_{D,Lp}$, é dada pela Equação (4.4).

$$\vec{M}_{D,Lp} = -\frac{1}{8}C_D A_{ij} \rho_L (\vec{V}_p - \vec{V}_L) \times |\vec{V}_p - \vec{V}_L| \quad (4.4)$$

onde A_{ij} é a massa específica de área interfacial e C_D é o coeficiente de arrasto. O sinal negativo indica que a força atua sempre contra o sentido da velocidade relativa entre as fases. Essa força é simétrica com respeito à terceira lei de Newton, isto é, $\vec{M}_{D,Lp} = -\vec{M}_{D,pL}$, onde $\vec{M}_{D,pL}$ é a força de reação da bolha sobre o líquido.

A massa específica de área interfacial, A_{ij} , representa, como o próprio nome sugere, a quantidade de área interfacial existente entre as fases i e j por unidade de volume. Esse conceito surge de uma necessidade de generalização da área de contato média entre as fases, já que no Modelo de Dois Fluidos a presença da fase é suavizada no espaço. A forma mais comumente adotada para expressar A_{ij} para o escoamento disperso é o modelo de partícula, que assume uma forma esférica para as partículas e que pode ser obtida tomando-se a razão entre a área de sua superfície ($=\pi d_p^2$) pelo seu volume ($=\pi d_p^3/6$) multiplicando a fração volumétrica ocupada pelo meio disperso, α_p , como Equação (4.5).

$$A_{ij} = \alpha_p \frac{\pi d_p^2}{(\pi d_p^3 / 6)} = 6 \frac{\alpha_p}{d_p} \quad (4.5)$$

Por sua vez, modelos para o coeficiente de arrasto, C_D , levam em conta uma série de fatores, como o regime de escoamento da partícula através do meio contínuo, a sua forma e a proximidade entre as partículas em um escoamento disperso. Para uma partícula esférica escoando sozinha em um meio infinito (isto é, sem efeitos de parede ou proximidade de

partículas vizinhas), o modelo de Schiller e Naumann (1933) é largamente utilizado na literatura, o qual é dado pela Equação (4.6).

$$C_D = \text{máx} \left[\frac{24}{Re} (1 + 0,15Re^{0,687}); 0,44 \right] \quad (4.6)$$

onde Re é o número de Reynolds da partícula, calculado como Equação (2.2).

Nota-se, ainda, que o modelo da força de arrasto, bem como demais modelos para outras forças, exigem a especificação de um diâmetro de partícula. Assumiu-se a hipótese de escoamento monodisperso (isto é, sendo a fase dispersa modelada com um único diâmetro médio fixo). A força de massa virtual, a força de sustentação, lubrificação de parede e dispersão turbulenta não foram consideradas neste trabalho, devido à complexidade por se tratar de uma população de bolhas e uma população de gotas.

4.1.2 Modelo Euleriano-Lagrangeano (Rastreamento de Partículas)

Para uma descrição macroscópica da distribuição geral das fases no domínio de solução, o modelo Euleriano é indicado para o cálculo de campos de escoamento e propriedades médias. No presente trabalho, necessita-se de uma descrição detalhada da trajetória de partículas individuais, cada qual com um diâmetro ou propriedade física específica. Para tanto, aplica-se o Modelo Euleriano-Lagrangeano ou Rastreamento de Partículas, no qual a equação dinâmica do movimento para cada partícula individual é resolvida, e as propriedades da fase particulada são dadas pela média do conjunto sobre um grande número de partículas (ANH HO; SOMMERFELD, 2002).

O modelo é dito Euleriano-Lagrangeano porque a fase que compõe o meio contínuo é resolvida através de um referencial Euleriano, que é a fase primária da solução, enquanto as fases dispersas são resolvidas pelo referencial Lagrangeano, tomadas como secundárias. O campo de escoamento da fase primária é obtido através de uma solução de escoamento monofásico para o meio contínuo, cujas informações fluidodinâmicas previamente levantadas servirão de dados de entrada (plano de fundo) para a solução das equações lagrangeanas que descreverão o comportamento da fase dispersa.

Por sua vez, a solução lagrangeana é baseada na 2ª Lei de Newton para o movimento de uma partícula-pontual através do campo contínuo, resolvida na forma de uma integração de 1ª ordem de uma posição e tempo iniciais, (x_0, y_0, z_0, t_0) , até uma posição ou tempo final estabelecido, ou até que a partícula deixe o domínio de solução (quando aplicável). A aplicação da 2ª Lei de Newton para uma partícula de massa m_p é dada pela Equação (4.7).

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \vec{F} \quad (4.7)$$

onde \vec{v}_p é o vetor velocidade da partícula no referencial lagrangeano (usualmente inercial) e \vec{F} é o somatório de forças atuando sobre a partícula em virtude de sua interação com o meio contínuo que a envolve, sejam elas de superfície, \vec{F}_{Sup} , ou de corpo, \vec{F}_{Corp} , ou seja $\vec{F} = \vec{F}_{Sup} + \vec{F}_{Corp}$.

Para a modelagem de \vec{F}_{Sup} , forças análogas às consideradas para o modelo euleriano continuam sendo válidas, como a força de arrasto, e neste caso a força é adotada em unidades de força absoluta, sem a necessidade de uma especificação por unidade de volume necessário no Modelo de Dois Fluidos. Assim, pequenas modificações dos modelos usados para o caso euleriano são necessárias, ainda que os modelos usados para o cálculo dos coeficientes (como o de arrasto) sejam equivalentes.

Dentre as forças de superfície, apenas a força de arrasto é considerada, a qual é calculada com a Equação (4.8).

$$\vec{F}_D = -\frac{1}{2} C_D \frac{\pi d_p^2}{4} \rho_L (\vec{V}_p - \vec{V}_L) \times |\vec{V}_p - \vec{V}_L| \quad (4.8)$$

Para o cálculo do C_D de pequenas partículas esféricas, o modelo de Schiller e Naumann (1933) é largamente utilizado na literatura conforme Equação (4.6).

Forças de corpo, entretanto, que são automaticamente levadas em conta na modelagem das fases dispersas no Modelo de Dois Fluidos, devem ser explicitamente introduzidas no caso lagrangeano. Duas delas podem ser relevantes, sendo a primeira a força devido ao gradiente de pressão do campo de líquido, \vec{F}_p (Equação (4.9)) que é a força devida ao gradiente de pressão local da fase líquida ao redor da bolha, e a força de empuxo, \vec{F}_B (Equação (4.10)):

$$\vec{F}_p = -\frac{\pi d_p^3}{6} \nabla p \quad (4.9)$$

$$\vec{F}_B = -(\rho_L - \rho_p) \frac{\pi d_p^3}{6} \vec{g} \quad (4.10)$$

onde ρ_p é a massa específica da fase dispersa e \vec{g} é o vetor aceleração gravitacional.

Apenas a força de empuxo, \vec{F}_B , foi considerada nas simulações.

Por fim, os modelos para \vec{F}_{Sup} e \vec{F}_{Corp} são substituídos em \vec{F} na Equação (4.7). Tomadas algumas aproximações para alguns termos e coeficientes de modelos que dependem de \vec{v}_p (como o coeficiente de arrasto), o resultado é uma equação diferencial ordinária (EDO) em função de \vec{v}_p com solução analítica. Entretanto, uma solução numérica é necessária para a marcha temporal da trajetória.

Para a simulação, utilizou-se o programa comercial de CFD, o ANSYS® CFX®. Foram aplicadas soluções com o modelo de “uma via” (one-way). Uma vez que essa abordagem não perturba o meio contínuo, foi realizada uma única vez, ao final da solução euleriana do meio contínuo, o que resulta em tempos computacionais desprezíveis comparados ao da solução euleriana.

4.1.3 Modelo de Turbulência

Com a aplicação do procedimento de média nas equações Eulerianas da modelagem da fase líquida, termos adicionais aparecem devido à flutuação da turbulência e precisam ser representados por equações de fechamento. Esses termos são as tensões de Reynolds, que introduzem escoamentos adicionais de quantidade de movimento, calor e massa, e são linearmente relacionados aos gradientes da média dos escalares (hipótese de viscosidade turbulenta). Sendo assim, a viscosidade efetiva pode ser assumida como soma das viscosidades molecular e turbulenta, $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$. A primeira é uma propriedade física do fluido de trabalho. Já a viscosidade turbulenta deriva do procedimento de média de Reynolds e da hipótese de Boussinesq (WILCOX, 1993). Ela é calculada por meio de um modelo de turbulência, sendo assumido, neste trabalho, o modelo k- ω SST (Shear Stress Transport) (MENTER, 1992).

Para representar a viscosidade turbulenta, um modelo k- ω SST (Shear Stress Transport) é utilizado com a Equação (4.11).

$$\mu_t = \alpha_\omega \rho \frac{k}{\omega} \quad (4.11)$$

Onde k é a energia cinética turbulenta, ω é a taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta e α_ω é um fator de amortecimento para a transferência das tensões de cisalhamento turbulentas, calculado pela Equação (4.12) e Equação (4.13).

$$\alpha_\omega = \left[\max \left(\frac{1}{\alpha_\omega^*}, \frac{SF_1}{0,31\omega} \right) \right]^{-1} \quad (4.12)$$

$$\alpha_\omega^* = \left(\frac{0,144 + \text{Re}_t}{6 + \text{Re}_t} \right) \quad (4.13)$$

Onde Re_t é o número de Reynolds turbulento, S é a magnitude da taxa de deformação $S = \sqrt{2S:S}$ e F_1 é um parâmetro do modelo, definido pela Equação (4.14).

$$F_1 = \tanh \left\{ \left[\max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{0,09y\omega}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\} \quad (4.14)$$

Onde y é a distância até a superfície mais próxima. As equações de conservação para a energia cinética turbulenta e a sua dissipação específica são escritas como a Equação (4.15) e Equação (4.16).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \times (\rho k \mathbf{v}) = \nabla \times (\Gamma_k \nabla k) + G_k - D_k \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \nabla \times (\rho \omega \mathbf{v}) = \nabla \times (\Gamma_\omega \nabla \omega) + G_\omega - D_\omega + C_\omega \quad (4.16)$$

Onde G_k e G_ω representam a geração de k e ω devido aos gradientes de velocidade média, D_k e D_ω representam sua dissipação devido a turbulência e C_ω representa o termo de difusão cruzada, resultante da combinação dos modelos $k - \varepsilon$ e $k - \omega$ padrão para a geração do modelo $k - \omega$ SST. Os termos Γ_k e Γ_ω representam as difusividades efetivas de $k - \omega$, uma descrição mais detalhada do modelo é apresentada por (MENTER, 1992).

4.2 SOLUÇÃO NUMÉRICA

Aplica-se a metodologia de volumes finitos baseada em elementos, muito mencionado na literatura por Maliska (2004) e Patankar (1980) implementada no programa de dinâmica dos fluidos computacional ANSYS® CFX® (ANSYS, 2020).

O Método de Volumes Finitos é baseado na resolução de sistemas de equações diferenciais parciais por meio da subdivisão do domínio computacional em um número finito de volumes de controle, nos quais é realizado a discretização e resolução das equações de conservação. Maliska (2004), afirma que as equações aproximadas no Método dos Volumes Finitos são alcançadas com os balanços de conservação da propriedade envolvida em nível microscópico, ou ainda, integrando as equações diferenciais na forma conservativa sobre um volume infinitesimal, no espaço e tempo. O método de volumes finitos é extensamente descrito

com detalhes mais específicos sobre considerações, métodos de discretização e esquemas de interpolação em uma série de fontes bibliográficas, como Maliska (2004); Patankar (1980) e Versteeg; Malalasekera (2007).

Obtidas as equações discretizadas para todas as variáveis em todos os volumes de controle, um método para a solução iterativa propriamente dita precisa ser conduzido. Diferentemente de metodologias tradicionais para o acoplamento pressão-velocidade, como a família de métodos SIMPLE segundo Patankar (1980), o programa ANSYS® CFX® adota um sistema acoplado de solução, em que todos os sistemas de equações são resolvidos em uma única matriz. No processo iterativo para a solução da matriz, o termo temporal é usado como solução em problemas de regime transiente.

Para resolver, também, a interface entre as fases envolvidas, já que o escoamento no objeto de estudo é caracterizado pela formação de um corpo de líquido com uma superfície livre. Uma característica de soluções eulerianas é que, devido à “suavização” decorrente do procedimento de médias, as interfaces entre as fases se tornam excessivamente difusas. Para tanto, no programa ANSYS® CFX®, utiliza-se o método compressivo detalhado em Ansys (2020), para a solução das regiões de interface. Esse método consiste em um procedimento puramente numérico, cujo objetivo consiste em reduzir a difusividade natural da zona de interface calculada naturalmente pelo modelo euleriano. Este procedimento é adotado para todas as fases na solução do Modelo de Dois Fluidos. Uma solução semelhante é adotada para resolver a fase primária do modelo lagrangeano, no caso do Modelo de Rastreamento de Partículas.

Já para a solução do meio disperso do modelo lagrangeano, uma solução mais simples e de menor custo computacional é adotada, uma vez que a equação da 2ª Lei de Newton que descreve o movimento da partícula é, dada por uma EDO, com solução analítica. A marcha temporal da trajetória lagrangeana, por sua vez, pode ser resolvida tanto um modelo passo a passo de 1ª ordem quanto um modelo de alta ordem. Para tal, escreve-se a velocidade da partícula em função da derivada temporal de sua posição, \vec{r}_p , como Equação (4.17).

$$\vec{v}_p = \frac{d\vec{r}_p}{dt} \quad (4.17)$$

Discretizando-se a Equação (4.17) através de uma diferenciação de 1ª ordem explícita em função de uma posição inicial \vec{r}_p^0 e um tempo inicial $t = t^0$, conforme Equação (4.18).

$$\vec{r}_p^n = \vec{r}_p^0 + \vec{v}_p^0(t^n - t^0) \quad (4.18)$$

onde \vec{v}_p^0 é o vetor velocidade avaliado no instante anterior, e $(t^n - t^0)$ é o tempo decorrido entre o tempo inicial, $t = t^0$, e o novo, t^n , onde o sobrescrito n denota a propriedade avaliada no novo instante. Resolvido o lado direito da equação, pode-se, então, avançar a trajetória de \vec{r}_p^0 para \vec{r}_p^n .

Para obtenção da velocidade no novo instante de tempo, \vec{v}_p^n , resolve-se, iterativa ou analiticamente (caso possível), a Equação (4.7), uma vez que ela depende de propriedades e constantes conhecidas dos modelos e da própria velocidade, \vec{v}_p . Esse procedimento retornará a velocidade inicial do passo de tempo seguinte, \vec{v}_p^0 , para que o cálculo da Equação (4.18) possa ser novamente realizado. O passo de tempo, $\Delta t = (t^n - t^0)$, é arbitrariamente escolhido como um parâmetro de entrada, sendo usualmente definidos valores muito pequenos já que a solução é algébrica e, portanto, demanda baixo custo computacional.

Mais detalhes sobre o método de volumes finitos, o esquema de advecção de alta resolução, a linearização de termos fonte, a solução lagrangeana podem ser encontradas em Ansys (2020). Por sua vez, detalhes numéricos relacionados à implementação e inicialização do problema, condições de contorno, malha numérica adotada e demais detalhes específicos serão apresentados a seguir, nas seções que descrevem as configurações para os diferentes casos resolvidos numericamente.

4.3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

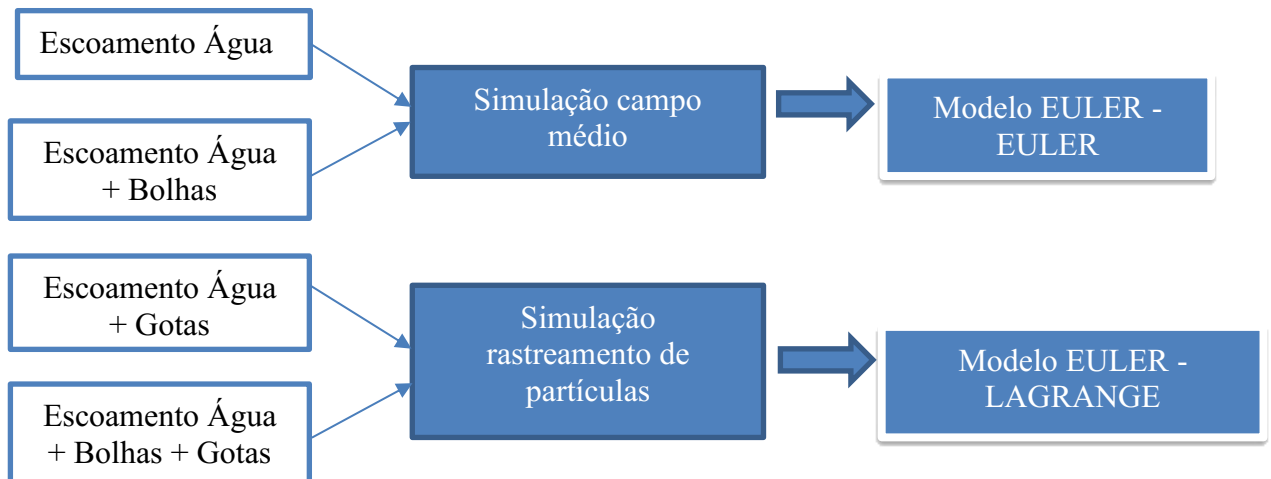
Para complementar os experimentos físicos, faz-se a simulação primeiramente do escoamento apenas do líquido (problema 1). Também são realizadas as simulações do escoamento de líquido + injeção de bolhas (problema 2), do escoamento de líquido + injeção de gotas de óleo (problema 3) e o escoamento multifásico de líquido + bolhas + gotas de óleo (problema 4) para comparação final com os dados experimentais obtidos.

Para representar os casos, definiu-se a geometria conforme equipamento experimental construído, tomando o cuidado para não inviabilizar o tamanho da malha e elevar o custo computacional. Injeta-se água a uma vazão (variável, conforme os experimentos), juntamente com gotas de óleo (viscosidade 14 cP), a uma vazão de 4 ml/min. Pela parte inferior do equipamento, bolhas são injetadas a uma vazão de 1.6 l/h, através de um conjunto de agulhas. Uma chicana, totalmente imersa no corpo de líquido, cria uma barreira no sentido de isolar as

gotas de saída de água, situada no extremo direito do equipamento. Regula-se a abertura da válvula dessa saída para que, na região superior do equipamento, seja formada um nível de líquido a uma altura de aproximadamente 250 mm, onde as gotas ali separadas se acumulam, e as bolhas se separam livremente para o meio gasoso superior (aberto para a atmosfera).

Embora permita fácil visualização da distribuição das fases água, óleo e gás, diversas características do escoamento não podem ser obtidas experimentalmente com a bancada desenvolvida no NUEM, como a quantificação de forças atuando sobre as partículas, campos de velocidade da água, velocidades de deslizamento, turbulência, entre outros. Visando complementar o estudo experimental nesse sentido, foi iniciado um estudo numérico do escoamento, que emprega, os modelos euleriano e lagrangeano para a solução do campo de escoamento trifásico no interior do equipamento, com uso do programa ANSYS® CFX®. O modelo Euleriano é aplicado para descrever o comportamento médio do campo de escoamento das fases, como uma visão média e variáveis globais. O modelo Lagrangeano é aplicado para acompanhar o movimento das partículas (fase discreta), ou seja, para calcular a trajetória de partículas no meio contínuo. Logo, os casos simulados seguem conforme apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Modelos aplicados nos casos simulados



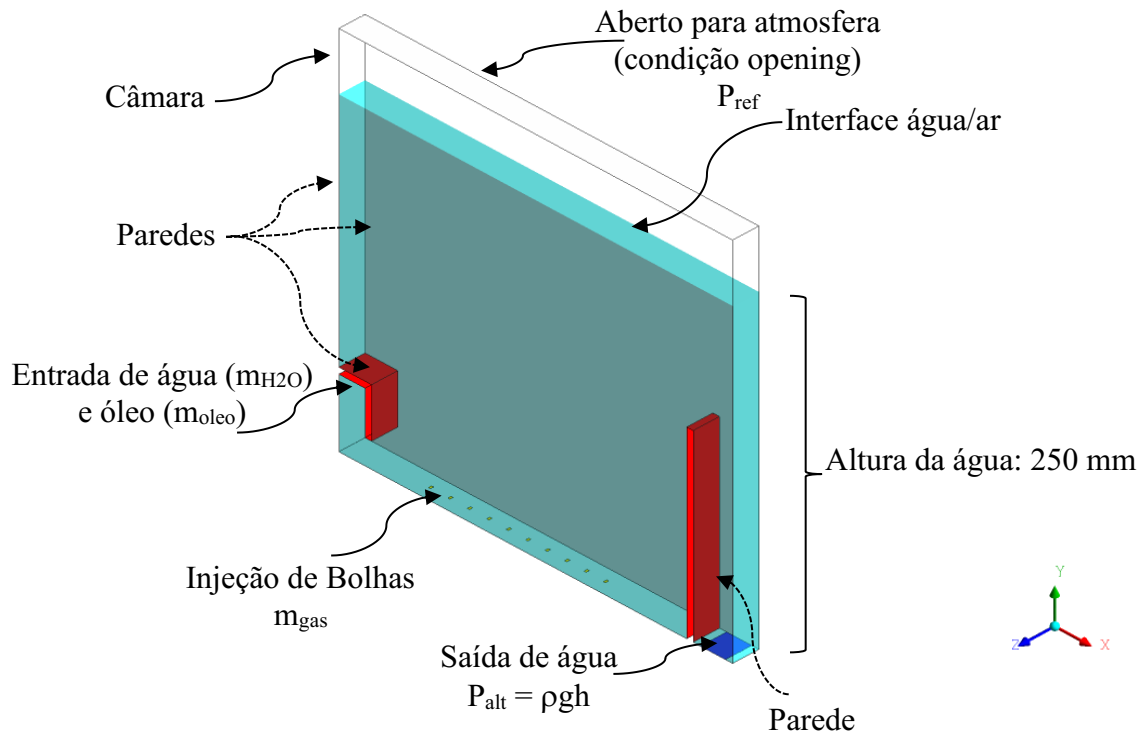
Fonte: Autoria própria

4.3.1 Domínio de Solução e Condições de Contorno

Visando complementar o estudo experimental, foi aplicado um estudo numérico do escoamento, que emprega os modelos euleriano (fase contínua) e lagrangeano (fase dispersa) para a solução do campo de escoamento trifásico no interior do equipamento em regime

transiente na condição Free Surface, com uso do programa ANSYS ® CFX ®. O domínio de solução considerado nas simulações é mostrado na Figura 25, contendo a câmara que recebe água e gotas de óleo (entrada lateral) e bolhas (parte inferior).

Figura 25 – Domínio numérico de solução



Fonte: Autoria própria

As vazões de água (m_{H_2O}), óleo (m_{oleo}) e gás (m_{gas}) seguem as mesmas utilizadas nos procedimentos experimentais, citadas na Tabela 1, ou seja, para cada caso simulado são especificados em função das condições operacionais que se pretende simular. Assume-se na entrada uma intensidade de 5% de turbulência, $I_{turb}=0,005$. Um fator importante para uma comparação adequada entre experimentos e simulações, assim como uma comparação entre diferentes pontos simulados, é a altura da interface água-óleo-ar. Essa altura deve ser fixa e constante em uma situação de regime, sendo especificado e iniciada as simulações com o nível de líquido no valor de 250 mm.

Sobrevém, entretanto, que a saída de líquido (saída de água P_{alt}), nas simulações de CFD, é um resultado em função de parâmetros primários (massa específica, gravidade e altura da coluna de líquido), sendo possível sua especificação direta por: $P_{alt} = \rho g h$, onde h é a altura

de líquido da coluna. O topo da câmara é considerado como uma superfície aberta (condição selecionada como Opening) com pressão manométrica de referência especificada em $p_{ref} = 0$ [Pa], devido a existência do nível de líquido permanecer abaixo do topo do equipamento. Essa condição de contorno tem a propriedade de se comportar como uma saída livre da fase gasosa conforme condição estabelecida no modelo experimental. A chicana e o defletor são considerados como parede. Para as paredes, considera-se a condição de não-deslizamento para a fase contínua, já as fases dispersas (óleo e ar) deslizam na parede.

No contexto da simulação de CFD, a água é definida como o fluido principal, a qual é assumida como uma fase de morfologia contínua. Como o objetivo é analisar o movimento das outras fases escoando através da água, essas fases foram definidas como dispersas (óleo e ar). Portanto, a fase dispersa (interna) encontra-se distribuída em forma de gotas e bolhas dentro da fase contínua (água). Devido à baixa vazão de óleo no sistema, sua influência sobre o campo contínuo é desprezível e por isso é resolvido pelo método Lagrangeano (rastreamento de partícula), enquanto a fase ar impacta diretamente no campo do líquido e é resolvida como fase dispersa pelo modelo Euleriano. Para que sejam definidas no contexto da simulação, assumiu-se um diâmetro médio fixo para cada fase dispersa. A fase de ar teve seu diâmetro de bolhas fixado em 1.8 mm. Já o óleo disperso foi definido com gotas de diâmetro de 500 μm , conforme determinação experimental.

4.3.2 Malha e Geometria

A geometria utilizada, em todas as simulações, consiste no equipamento experimental, apresentado na Figura 17 e Figura 18, com as mesmas dimensões. Com a geometria definida, foram criadas as malhas numéricas tridimensionais estruturadas, com elementos hexaédricos. As malhas numéricas foram construídas através do programa ANSYS® ICEM CFD™.

4.3.3 Determinação da Incerteza Numérica – Teste de Malha

Em estudos de validação de modelos matemáticos é de extrema importância que os erros além daqueles associados à modelagem sejam conhecidos. Para tanto, a discretização do domínio espacial foi realizada através de três malhas numéricas com diferentes níveis de refinamento (refinada, intermediária e grosseira), as quais são apresentadas na Tabela 5.

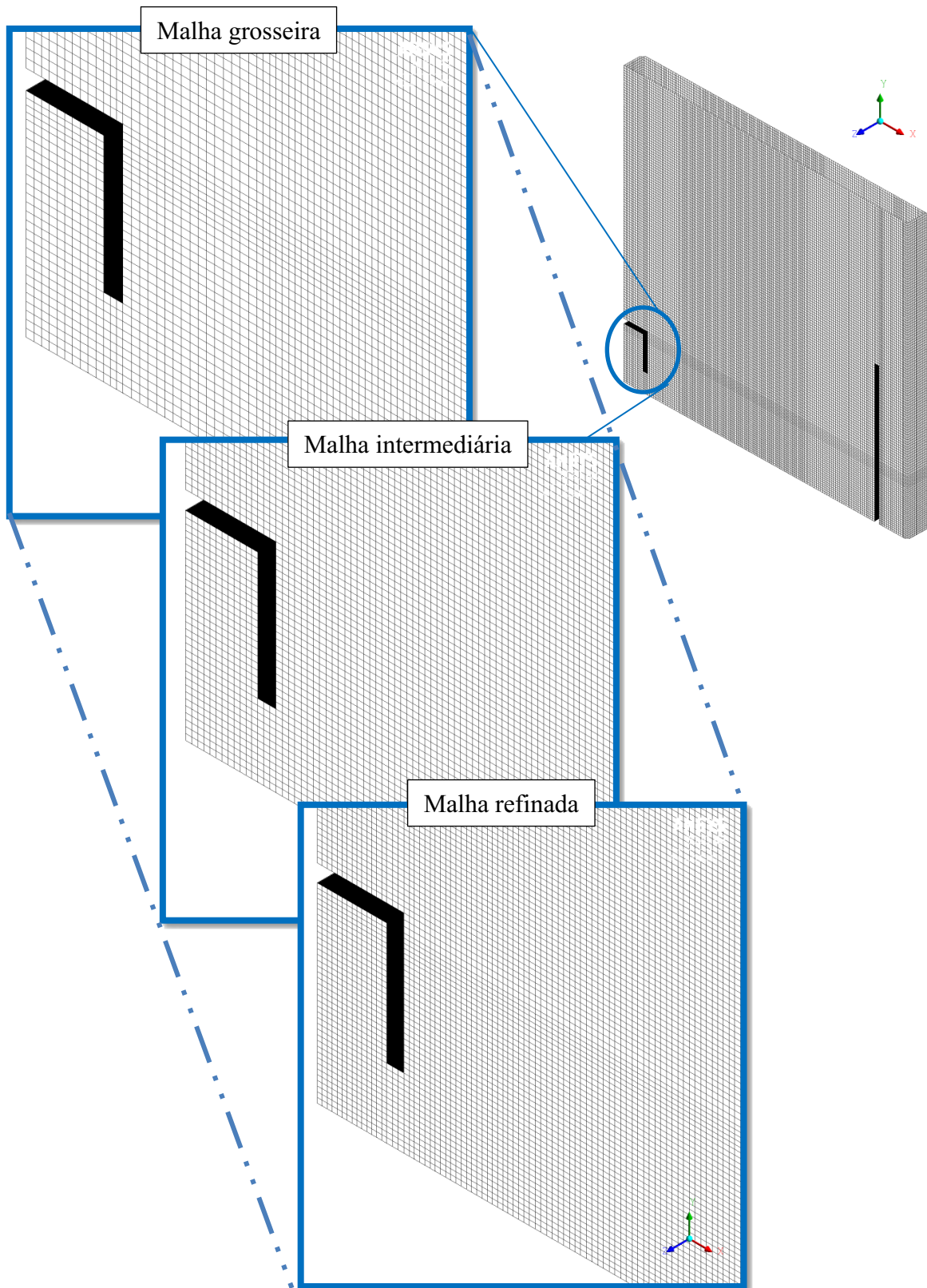
Tabela 5 – Informações das malhas

Malha	Volumes de Controle	Fator de Refinamento
Refinada (1)	623328	$r_{21} = 1,19$
Intermediária (2)	435792	$r_{32} = 1,22$
Grosseira (3)	303828	-

Fonte: Autoria própria

É possível observar o detalhamento próximo à entrada da câmara nas diferentes malhas utilizadas na Figura 26.

Figura 26 – Malhas numéricas com diferentes níveis de refinamento, utilizadas para a determinação do GCI



Fonte: Autoria própria

Os erros devidos às iterações, de acordo com Ferziger e Peric (2002) , são mais facilmente analisados e podem ser controlados através de critérios de convergência apropriados a cada variável analisada. No entanto, os erros de discretização são de tratamento complexo. Uma vez que as equações discretizadas correspondem a uma aproximação das equações diferenciais, existe um desbalanceamento nas soluções devido ao truncamento da série de Taylor (utilizada na discretização), denominado erro de truncamento.

A solução exata de algumas equações, entretanto, muitas vezes não está disponível e a definição precisa do erro de truncamento é impraticável. Como alternativa, Roache (1994) cita os chamados estimadores de erro, como a Extrapolação de Richardson, o estimador Delta e o Índice de Convergência de Malha (Grid-Convergence Index, GCI), os quais se baseiam em comparações feitas entre as soluções numéricas obtidas para duas ou mais malhas com diferentes graus de refinamento (estimados a posteriori). Quando o erro na solução devido à discretização é provocado apenas pelo erro de truncamento, ele pode ser expressado como uma expansão em série de Taylor.

Roache (1994), recomenda a utilização de três níveis de refinamento de malha para estimar a ordem de convergência da malha e assegurar que ela se encontra na região assintótica da curva.

A estimativa das incertezas numéricas com base no método GCI, do inglês *Grid Convergence Index* proposto, por Roache (1994) e descrito por Celik et al. (2008), se fundamenta na teoria de extrapolação de Richardson, que envolve a comparação entre as soluções discretas obtidas a partir de diferentes malhas numéricas (ROACHE, 1997). A partir da extrapolação de Richardson, estima-se o erro fracionado obtido para a malha refinada (E_1) pela Equação (4.19) e a malha grosseira (E_2) pela Equação (4.20), calculando-se ainda um erro absoluto pela Equação (4.21).

$$E_1^{\text{refinada}} = \frac{\varepsilon_{1,2}}{1-r^P} \quad (4.19)$$

$$E_2^{\text{grosseira}} = \frac{r^P \varepsilon_{1,2}}{1-r^P} \quad (4.20)$$

$$\varepsilon_{1,2} = |E_2 - E_1| \quad (4.21)$$

onde: E_1^{refinada} é o erro fracionado de Richardson para a malha refinada, $E_2^{\text{grosseira}}$ é o erro fracionado de Richardson para a malha grosseira, $\varepsilon_{1,2}$ é o erro absoluto, r^P é a razão de refinamento e P é a ordem formal da precisão do algoritmo.

Para trazer mais confiabilidade ao método, Roache (1994) propôs a incorporação do fator E_s . Recomendando assim o uso de $E_s = 3$, porém um valor maior pode ser utilizado

quando se deseja um nível mais conservador de confiança. Desta forma, as expressões para o cálculo do GCI das malhas grosseira é dado pela Equação (4.22) e para o caso de malha refinada é dada pela Equação (4.23).

$$GCI_1^{\text{refinada}} = E_s |E_1^{\text{refinada}}| \quad (4.22)$$

$$GCI_2^{\text{grosseira}} = E_s |E_2^{\text{grosseira}}| \quad (4.23)$$

Um valor de GCI pequeno indica que a solução está dentro do alcance assintótico (MEIER; NORILER; BERTOLI, 2009).

Utilizando uma malha suficientemente refinada, um algoritmo computacional é apropriado a resolver um sistema de equações diferenciais ou integrais acopladas com as condições iniciais e de contorno, e reproduzir resultados confiáveis (CELIK et al., 2008).

4.3.3.1 *Quantificação da Incerteza Numérica*

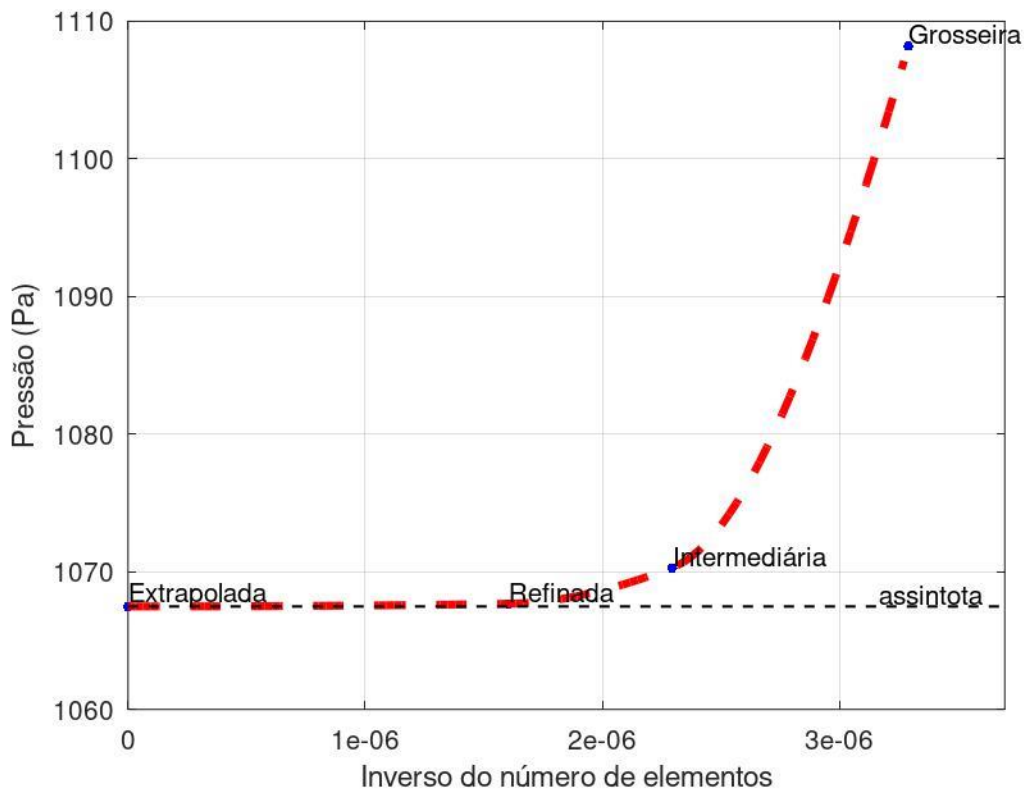
De acordo com o exposto anteriormente, com o intuito de quantificar a incerteza numérica, aplica-se o método GCI (ROACHE, 1997), que se baseia na ordem aparente do erro, apresentado anteriormente.

A discretização dos volumes de controle pode ocasionar erros na solução de uma aplicação, e dependendo da importância, tais desvios podem ocasionar resultados insatisfatórios ou o método numérico pode divergir. Diante da importância de quantificar e avaliar a influência de alguns comportamentos não evidenciados em malhas menos refinadas, realizou-se a quantificação da incerteza numérica com três distribuições diferentes (Tabela 5), para assim selecionar a melhor configuração. O método GCI foi empregado no presente trabalho com o intuito de quantificar a incerteza numérica, a partir da utilização de três malhas com diferentes níveis de refinamento. Em estudos que envolvem a validação de modelos matemáticos, a quantificação da incerteza numérica é de extrema importância, uma vez que é necessária a minimização dos erros numéricos frente aos erros de modelagem, para que estes possam ser devidamente avaliados.

Para o cálculo do GCI, o caso envolvendo bolhas com vazão volumétrica de líquido de 125 l/h foi escolhido e, como variáveis de resposta, foram selecionadas a pressão na câmara (variável global), a fração de volume do líquido (ao longo do eixo horizontal da câmara e a longo de uma linha localizada a uma altura de 180 mm) e a fração de volume do ar (ao longo do eixo horizontal da câmara e a longo de uma linha localizada a uma altura de 180 mm).

Os resultados referentes à pressão dentro da câmara são apresentados na Figura 27, na qual é possível observar que os valores calculados com a utilização das diferentes malhas se encontram em uma região assintótica, de forma que um maior refinamento na malha numérica provocaria pequena variação no resultado para essa variável. A pressão se trata de uma variável bastante interessante para esse tipo de análise, haja vista que é influenciada por diferentes aspectos do escoamento, como a velocidade do líquido e do ar.

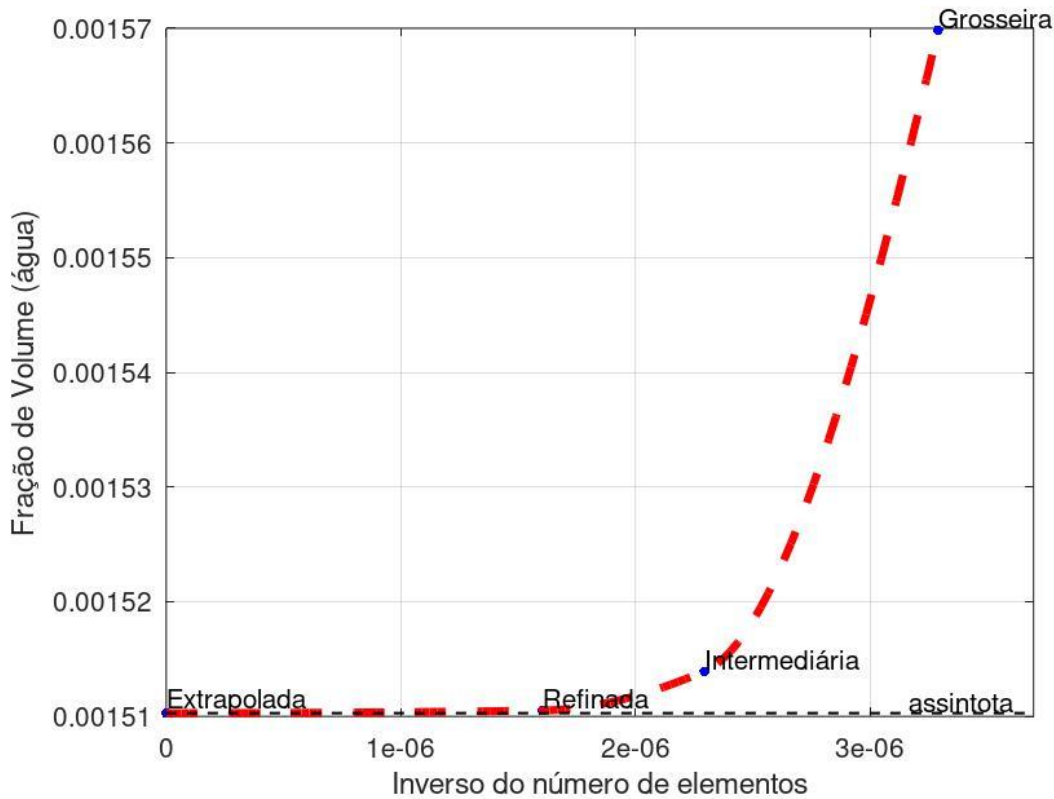
Figura 27 – Curva assintótica dos resultados de pressão para as malhas analisadas e para a extrapolação do método GCI



Fonte: Autoria própria

Já os resultados referentes à fração de volume do líquido dentro da câmara são apresentados na Figura 28, na qual é possível observar que os valores calculados com a utilização das diferentes malhas se encontram em uma região assintótica, de forma que um maior refinamento na malha numérica provocaria uma pequena variação no resultado para essa variável. A fração do volume de líquido se trata de uma variável bastante interessante para esse tipo de análise, haja vista que é influenciada pelo escoamento da fase ar.

Figura 28 – Curva assintótica dos resultados da fração de volume do líquido para as malhas analisadas e para a extrapolação do método GCI

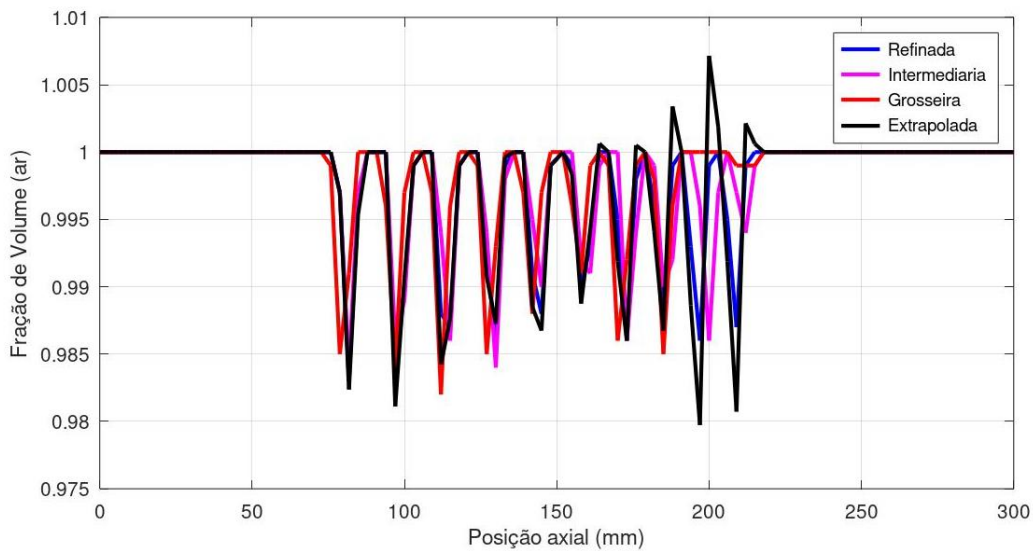


Fonte: Autoria própria

Os resultados para a análise do GCI com referência aos valores de fração de volume do ar calculados ao longo do eixo horizontal da câmara podem ser observados na Figura 29, Figura 30 e Figura 31. Na Figura 29, são exibidos os resultados das simulações obtidos com a utilização de cada uma das malhas, além do extrapolado. Nota-se que os valores se apresentam muito próximos, principalmente quando se comparam o resultado para malha refinada e a extrapolada. Uma maior diferença é observada no resultado para a malha grosseira na região próxima ao defletor e saída de água, porém, ainda assim, essa não se apresenta muito significativa. A proximidade dos resultados analisados indica que a magnitude do erro estimado associado à discretização é pequena, o que pode ser observado na Figura 30 e Figura 31, que correspondem ao erro para a variável. O erro percentual para a malha mais refinada apresentado na Figura 30, na qual se observa que para as regiões de injeção de bolhas o erro de discretização não passa de 0,49%. Valores de até 1,1% podem ser encontrados na região próxima da chicana, porém, esses valores apresentam pouca interferência na análise global do erro. Analisando para a malha intermediária, Figura 31, se observa que para as regiões de injeção de bolhas o erro de discretização não passa de 1,32%. Valores de até 2,6% podem ser encontrados na região

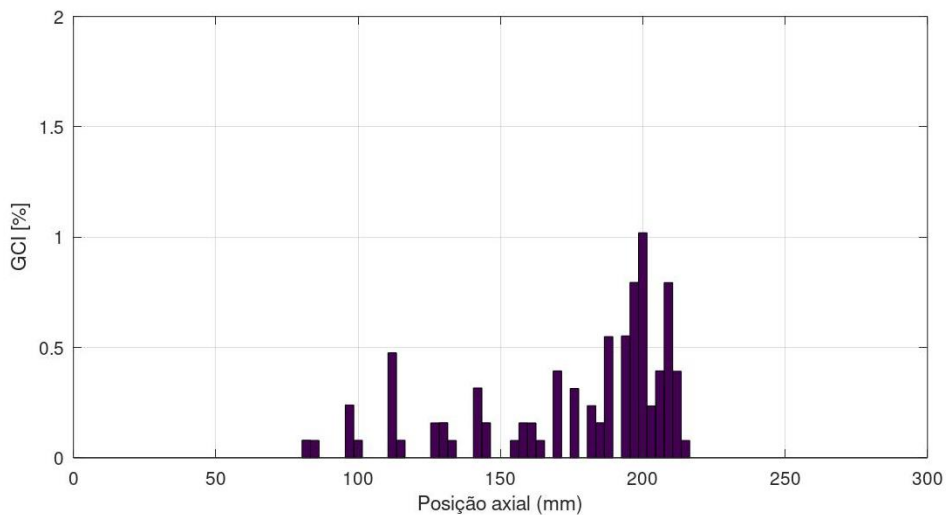
próxima da chicana, porém, esses valores apresentam pouca interferência na análise global do erro.

Figura 29 – Resultado da fração de volume do ar ao longo do eixo horizontal da câmara para as três malhas além da extrapolada analisadas pelo método GCI



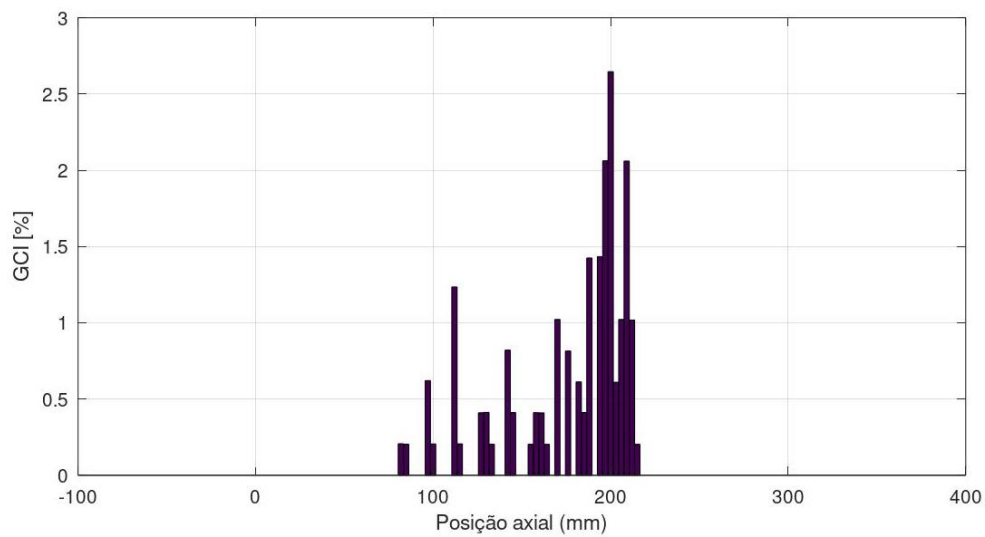
Fonte: Autoria própria

Figura 30 – Valores do GCI para a malha refinada, calculados com base nos resultados para a fração de volume do ar ao longo do eixo horizontal da câmara



Fonte: Autoria própria

Figura 31 – Valores do GCI para a malha intermediária, calculados com base nos resultados para a fração de volume do ar ao longo do eixo horizontal da câmara



Fonte: Autoria própria

Com a análise realizada, é possível visualizar que, para estas variáveis, as regiões de erro apresentam-se bastante estreitas. Com isso, é possível concluir que a malha intermediária já é adequada para a utilização nas demais simulações dos estudos propostos, haja vista que os erros de discretização associados a ela são de pequena magnitude e pouco influenciam nos resultados numéricos. Uma vez que o custo computacional no uso da malha refinada é alto para compensar um erro muito pequeno quando comparada com a malha intermediária.

4.4 FECHAMENTO DO CAPÍTULO

A modelagem matemática para o escoamento multifásico água, óleo e ar envolvendo as equações de conservação, a solução numérica, a determinação da incerteza numérica (teste de malha), descrição e representação do problema e casos simulados, descritos neste capítulo, constituem a base para os estudos numéricos. A formulação matemática proposta requer posterior validação, a partir de comparações dos resultados obtidos pela análise numérica com aqueles obtidos através de experimentos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento da tese com a metodologia experimental adotada e os aspectos relacionados às simulações numéricas através da aplicação de técnicas de CFD. Os estudos referentes à identificação da ocorrência de interação entre bolhas e gotas de óleo é apresentada, assim como a comparação entre os resultados obtidos através dos experimentos físicos e numéricos, a fim de validar o modelo matemático utilizado.

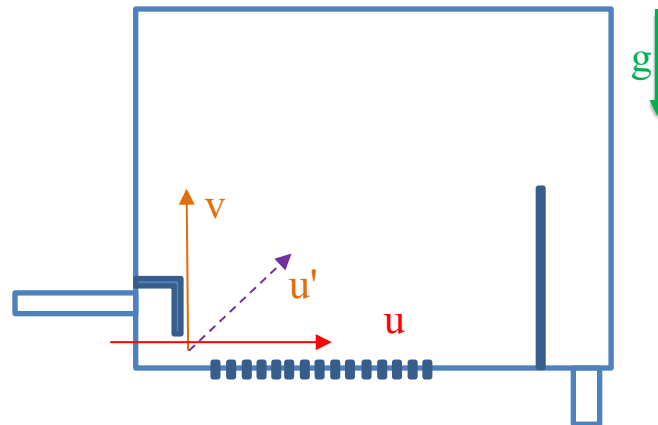
O estudo numérico tem por objetivo avaliar os efeitos tridimensionais no escoamento das bolhas e gotas de óleo. Os resultados das simulações numéricas fornecem informações que não foram capturadas experimentalmente (devido à limitação da técnica experimental utilizada).

5.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foram realizados experimentos de acordo com uma faixa de tempo de residência da água e óleo no equipamento, onde variaram-se as vazões de entrada. A sequência de experimentos também apresenta variações quanto a presença ou ausência da instalação do defletor no equipamento e a variação entre maior e menor quantidade de injeção de bolhas.

Os experimentos foram conduzidos a fim de avaliar os dados obtidos nas variações propostas e verificar a situação mais adequada capaz de representar a física do problema proposto. Os dados analisados são os diâmetros e velocidades de bolhas e gotas, fenômenos associados ao escoamento de água, óleo e ar e fenômenos envolvidos na interação de bolhas e gotas. Na Figura 32 para fins de referência dos resultados, mostram-se esquematicamente as coordenadas conforme aparato experimental.

Figura 32 – Coordenadas de referência no aparato experimental, u representa a velocidade na coordenada x , v representa a velocidade na coordenada y e u' a velocidade em z



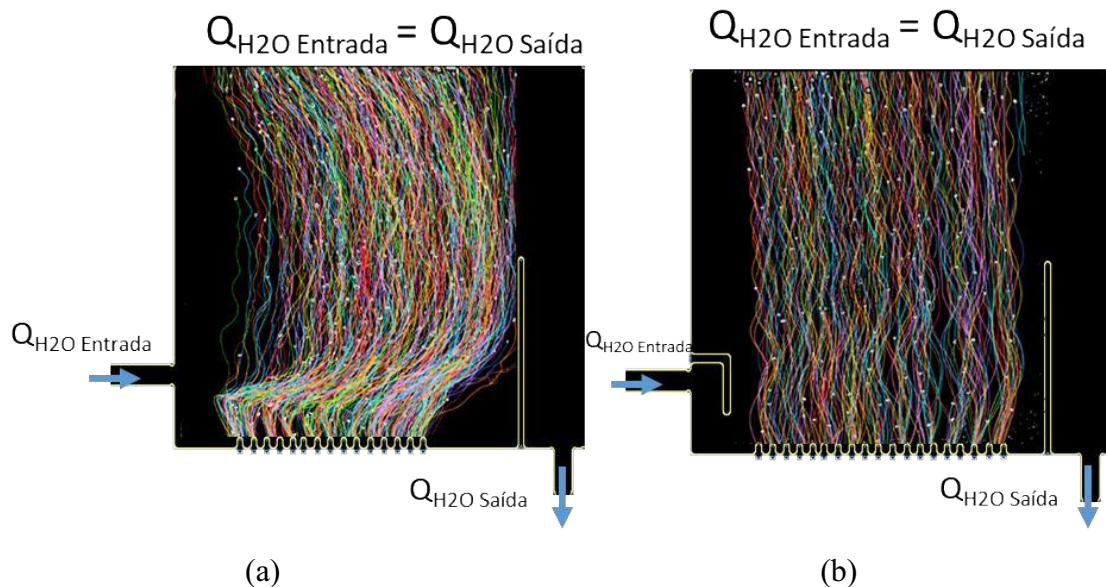
Fonte: Autoria própria

5.1.1 Cinemática da população de bolhas

A determinação do campo de velocidade e trajetória ascensional das bolhas é um dos objetivos deste trabalho, pois entende-se que a sua importância se reflete nos fenômenos de interação gota e bolha que ocorrem quando estas são inseridas na flotação para auxiliar a separação. Foram realizados experimentos somente com a geração de bolhas em escoamento de líquido (água) nas diferentes vazões de entrada.

Como exemplo, a Figura 33 mostra a trajetória ascendente bidimensional das bolhas na câmara de visualização para o caso de maior vazão de entrada de líquido. Os dados mostrados são para o regime de operação contínua, ou seja, quando as taxas de escoamento de entrada e saída são iguais. Verifica-se que o arranjo experimental adotado para a câmara de visualização influencia a cinemática das bolhas inseridas. As condições sob as quais o defletor não é implantado são mostradas na Figura 33a. A ausência do defletor promoveu um desvio abrupto das bolhas, logo após a etapa de desprendimento no fundo da câmara. No entanto, a trajetória inicial das bolhas logo é restabelecida. Esse comportamento sugere que o escoamento da fase contínua não é uniforme em toda a câmara, o que deve afetar o comportamento hidrodinâmico das bolhas.

Figura 33 – Trajetórias das bolhas ascendentes (em x e y) sem defletor (a) e com defletor (b) para a vazão de 125 l/h



Fonte: Autoria própria

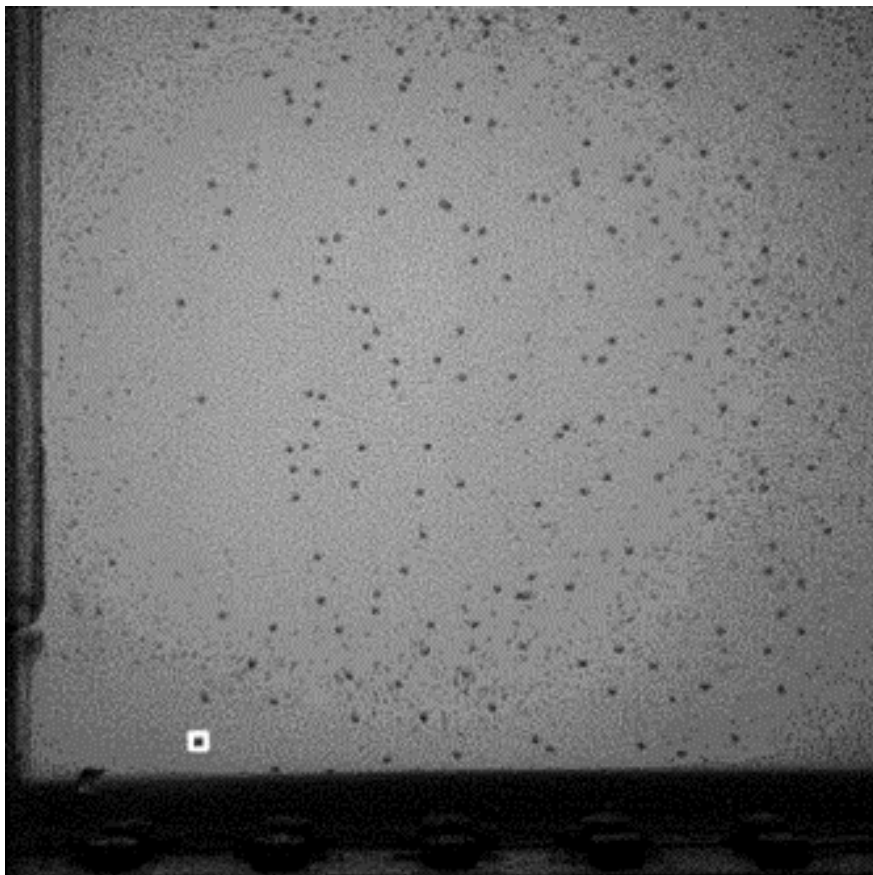
A Figura 33b mostra as trajetórias quando o defletor é implantado no bocal de entrada da câmara. Claramente, as medições indicam um escoamento uniforme da fase contínua, onde as trajetórias ascendentes das bolhas não são deslocadas lateralmente em qualquer estágio do movimento. Essas condições são mais representativas da modelagem de separadores gravitacionais em que o escoamento interno é essencialmente laminar e com menor recirculação do escoamento. Além disso, deve-se notar que as bolhas apresentam um caminho oscilatório. Ern et al. (2012) e Wu e Gharib (2002), sugerem que o aparecimento de instabilidades de caminho está relacionado à vorticidade observada na parte traseira da bolha, levando a uma trajetória curva. Portanto, esses resultados indicam que o fluido contínuo é afetado pela bolha, que promoveu uma velocidade induzida pelo líquido (ELLINGSEN; RISSO, 2001). Os efeitos desta hipótese sobre o movimento das gotas dispersas serão discutidos posteriormente.

Um olhar mais atento sobre as trajetórias individuais de uma das bolhas com movimento ascendente na população revela detalhes característicos do movimento da bolha, como mostrado em Ellingsen e Risso (2001) e Yan et al. (2017).

Faz-se o acompanhamento da trajetória de uma bolha em cada variação de vazão de líquido. A localização da bolha na câmara de visualização foi empregada como critério de seleção, em que foi escolhida a bolha mais próxima ao bocal de entrada, pois é neste local que se espera que a influência do escoamento de entrada seja mais evidente. Assim, o comportamento cinemático da bolha é considerado uma representação da população, onde as

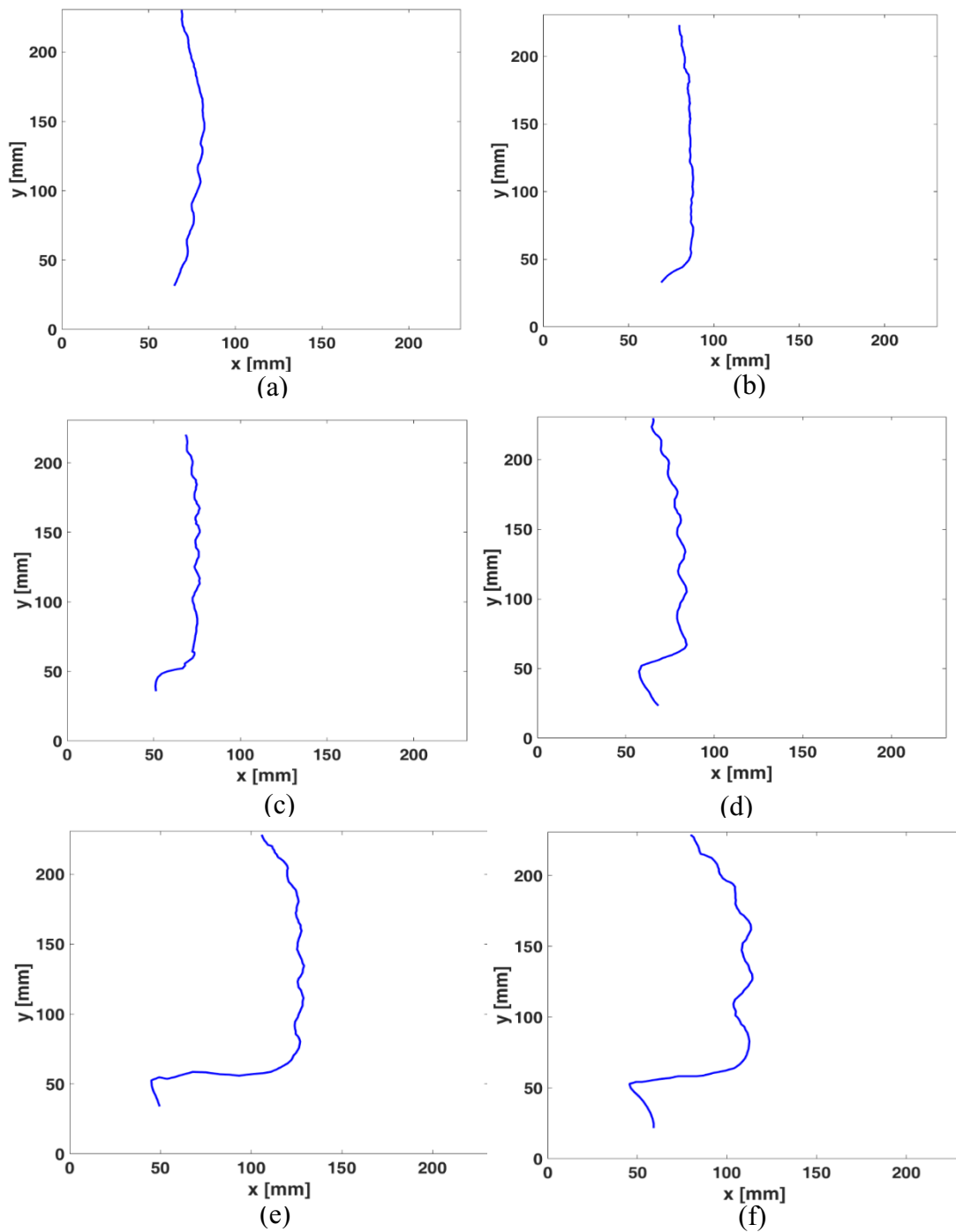
propriedades principais são consideradas correspondentes, onde se escolhe a bolha que está situada próximo à entrada do equipamento em duas situações: sem e com o defletor. Para tanto, determinou-se aproximadamente a mesma localização ou região para todos os casos, conforme pode ser visto na Figura 34. Notavelmente, embora o comportamento inicial das bolhas pareça ser independente em termos do desdobramento do defletor, o comportamento transitório das bolhas ascendentes é claramente afetado. A Figura 35 (casos sem defletor) e Figura 36 (casos com defletor) mostram as trajetórias das bolhas nas vazões especificadas.

Figura 34 – Localização da bolha escolhida para acompanhamento da trajetória



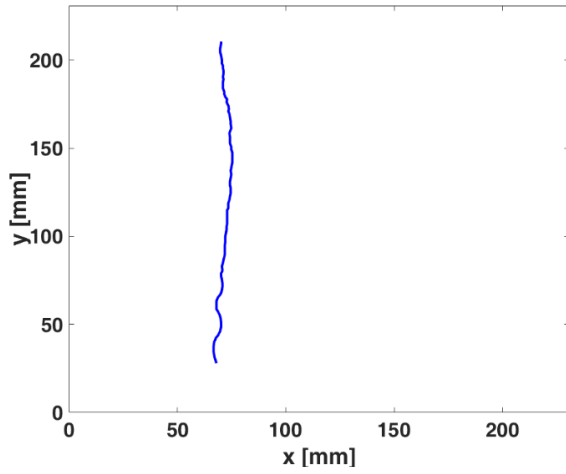
Fonte: Autoria própria

Figura 35 – Trajetória individual de bolha nos experimentos sem defletor, com vazão de entrada de 16l/h (a), 34l/h (b), 54l/h (c), 74l/h (d), 94 l/h (e) e Vazão máxima 125l/h (f) para o sistema de menor fração de gás

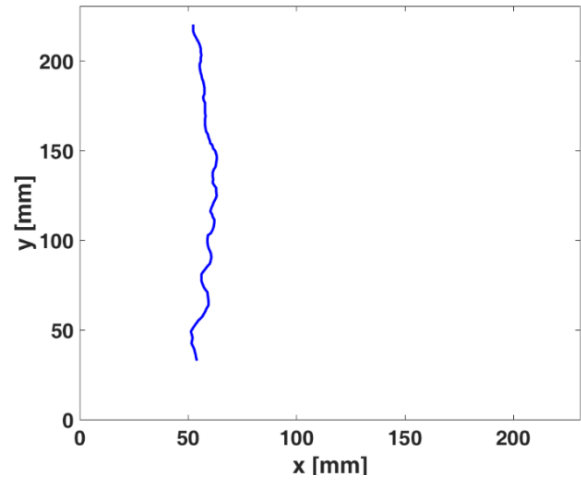


Fonte: Autoria própria

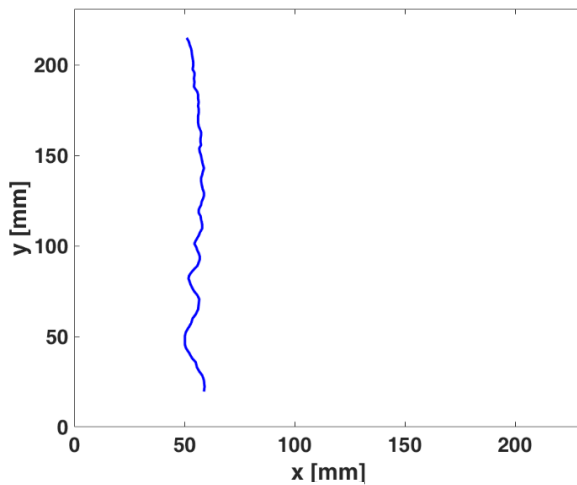
Figura 36 – Trajetória individual de bolha nos experimentos com defletor, com vazão de entrada de 16l/h (a), 34l/h (b), 54l/h (c), 74l/h (d), 94 l/h (e) e Vazão máxima 125l/h (f) para o sistema de menor fração de gás



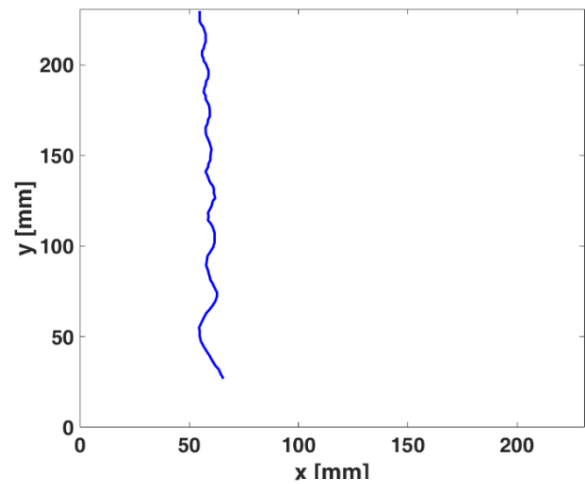
(a)



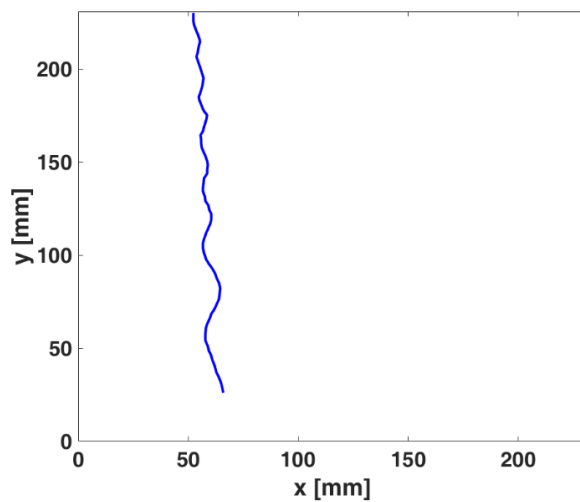
(b)



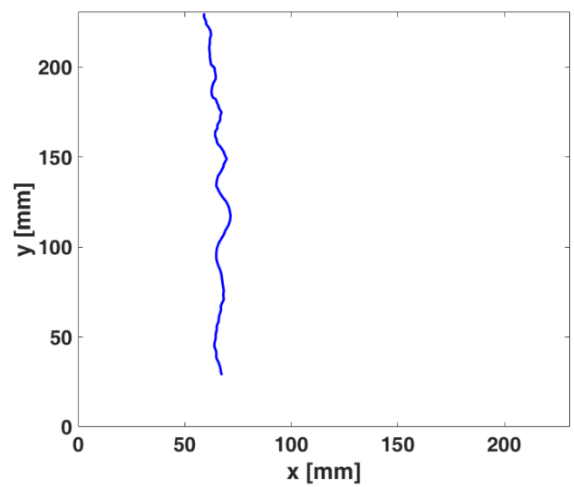
(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: Autoria própria

Na Figura 35, é claro o efeito do jato de entrada de líquido para os casos de vazão maior (94 l/h e 125 l/h), onde a trajetória de uma bolha injetada pela primeira agulha é desviada para o centro do equipamento. A Figura 35 e Figura 36 corroboram as observações anteriores a respeito da influência do defletor na entrada. Claramente, as trajetórias da bolha representativa são influenciadas pela implantação do defletor que leva a bolha apresentar movimento uniforme dentro da câmara. Por outro lado, a Figura 35(e,f) mostram que a trajetória da bolha apresenta um desvio lateral de aproximadamente 70 mm na direção x na altura da entrada de líquido. Este desvio persiste até que o jato de entrada de líquido perca sua força. O comportamento inicial da trajetória da bolha representativa é logo restabelecido, enquanto a localização inicial da bolha é perdida devido ao deslocamento lateral promovido pela entrada de escoamento. Portanto, pode-se observar que a ausência do defletor faz com que o escoamento seja desigualmente distribuído pela câmara, com as bolhas sendo carregadas pelo escoamento próximo à altura do bocal de entrada.

Casos sem defletor foram realizados, mas devido à forte influência da entrada de líquido foi observado que não reflete a realidade industrial, portanto, as análises foram realizadas com o cenário mais próximo a realidade, com defletor. A presença do defletor garante distribuição uniforme das bolhas, justificado por diminuir qualquer turbulência na entrada do escoamento de água com as gotas de óleo.

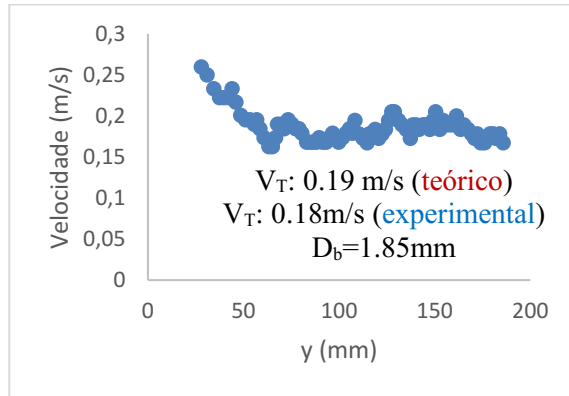
Para analisar a velocidade das bolhas fez-se o acompanhamento de uma bolha ao longo do seu escoamento, com resultados disponíveis na Figura 37 mostrando a tendência da velocidade individual da bolha em y, velocidade de subida (v), para as diferentes vazões de entrada de líquido, para o sistema com o defletor. A Figura 37 confirma as observações anteriores a respeito da influência do defletor posicionado na entrada. Claramente, as trajetórias das bolhas representativas são influenciadas pela implantação do defletor que leva a uma bolha apresentando movimento uniforme dentro da câmara.

A velocidade terminal das bolhas individuais foi calculada com a Equação (2.11) de Treybal (1980), indicada para bolhas com diâmetro entre $1,4 \text{ mm} < d_p < 6 \text{ mm}$ que apresentam movimento zig-zag. Portanto, confirma-se que a velocidade terminal obtida nos experimentos está próxima da velocidade terminal teórica, como pode ser visto em destaque na Figura 37.

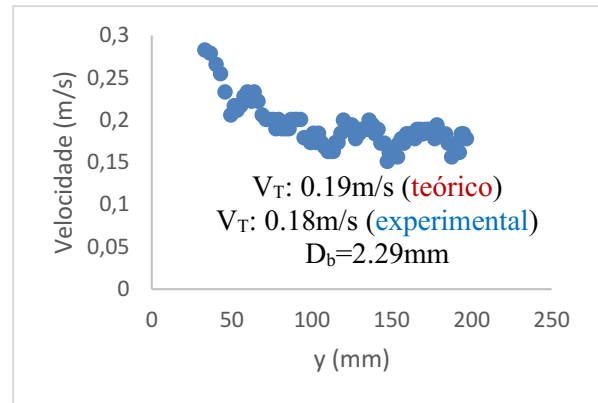
A Equação (2.11) pode ser aplicada quando a razão do diâmetro da bolha/diâmetro da coluna é menor do que 0,125, o que caracteriza que a influência do diâmetro da coluna sobre a velocidade de ascensão é negligenciável (MENDELSON, 1967). Quando o valor for maior que 0,125 ocorre redução na velocidade devido ao efeito de parede.

Figura 37 - Velocidade em y (ascendência) individual da bolha nos experimentos com bolhas com defletor, com vazão de entrada de 16l/h (a), 34l/h (b), 54l/h (c), 74l/h (d), 94 l/h (e) e

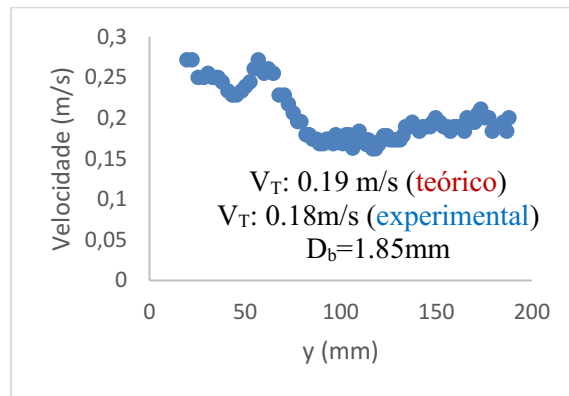
Vazão máxima 125l/h (f)



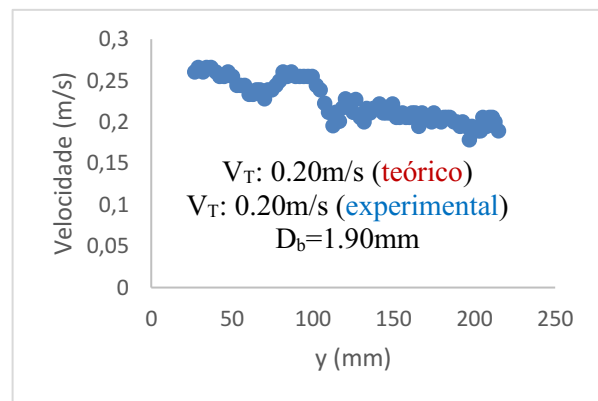
(a)



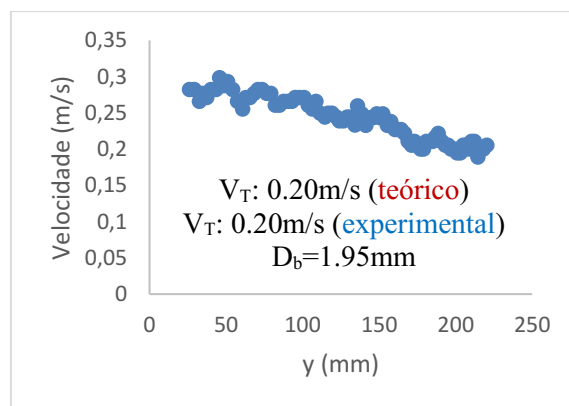
(b)



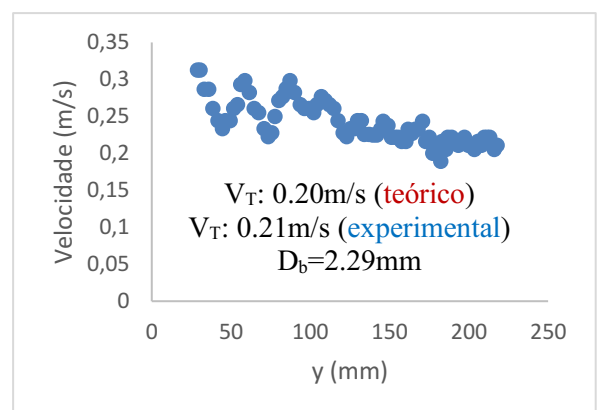
(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: Autoria própria

A Figura 37 indica que as oscilações de velocidade vertical instantânea da bolha ascendente se comporta de forma semelhante as oscilações presentes na sua trajetória e é influenciada pela implantação do defletor. As bolhas analisadas neste estudo apresentam os

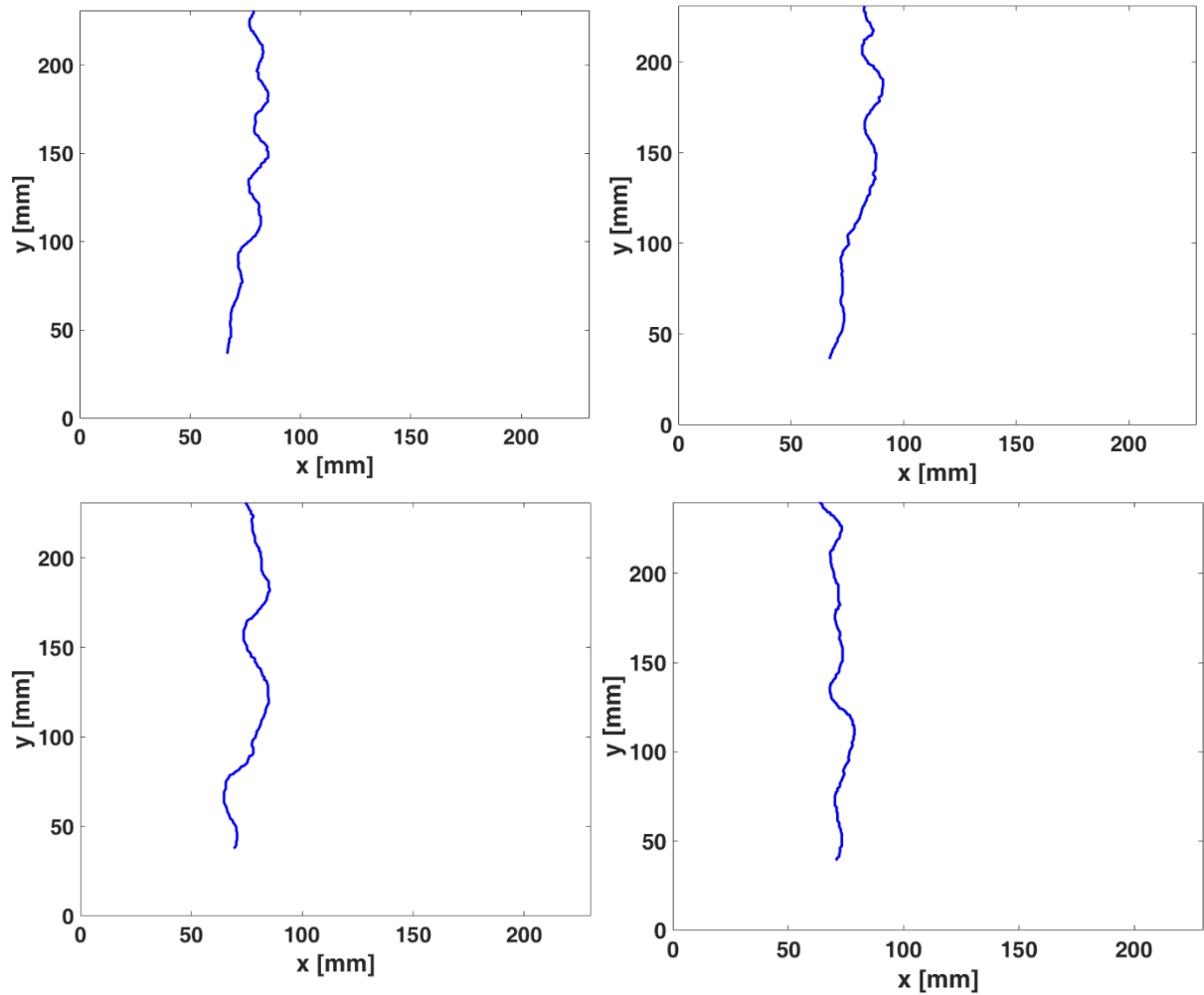
maiores valores de velocidade terminal logo após o descolamento do capilar. Isso é inconsistente com a maioria dos estudos experimentais de dinâmica de bolha que empregam o método de *pinch-off* para gerar bolhas, onde a velocidade da bolha aumenta até a velocidade terminal (VÉLEZ-CORDERO; ZENIT, 2011; WU; GHARIB, 2002). Isso é consequência da configuração da câmara de gás e das agulhas, através das quais se observa um grande escoamento de gás, e as bolhas são empurradas significativamente em direção à câmara em consequência do escoamento interno da agulha. Este comportamento é observado imediatamente após o desprendimento, de forma que a presença do defletor não é relevante para isso. Ao que parece, esse fenômeno pode ser considerado como uma perturbação inicial do sistema, uma vez que para ambas as condições analisadas a velocidade ascendente apresenta flutuações temporais desiguais até que as condições terminais sejam percebidas.

Foram realizados experimentos com maior número de bolhas no sistema, aumentando assim, a fração de gás, mostrando os resultados de trajetória na Figura 38 e velocidade de ascensão na Figura 39. Na Figura 38 é possível observar que o comportamento transitório das bolhas ascendentes é claramente afetado quando inseridas maior quantidade de bolhas no sistema. As trajetórias das bolhas não apresentam movimento uniforme, pois as bolhas interagem entre elas, e acabam causando movimento desigual. Os casos de menor vazão (16 l/h e 34 l/h) devido ao uso do defletor aprisionam as gotas de óleo no defletor impedindo que elas fluam para dentro do equipamento, portanto nas próximas análises a serem apresentadas neste trabalho, excluem-se estes casos, garantindo assim condições mais representativas da modelagem de separadores.

Conforme mostrado na Figura 37, após o aumento inicial, a velocidade instantânea diminui e, isso se deve ao desvio horizontal da bolha, pois sua velocidade vertical é reduzida, a taxa de tendência da diminuição da velocidade é substancialmente reduzida, quando a velocidade instantânea das gotas da bolha atinge 0,20 m/s, aproximadamente. Esta conclusão é consistente com a ausência do deslocamento lateral da bolha promovido pelo escoamento não uniforme. Para comparar a validade das medições de velocidade terminal, os dados experimentais foram comparados com a previsão pela Equação (2.11) levando a um desvio geral de menos de 2%. Conforme mencionado por Haberman; Morton (1954b), a velocidade terminal de uma única bolha com 2 mm de diâmetro varia entre 0,2 m/s e 0,3 m/s, e ao comparar os resultados do autor para uma população de bolhas a velocidade terminal de 0,2 m/s foi encontrada. Assim, as interações bolha-bolha presentes em uma população de bolhas atuam no sentido de reduzir sua velocidade terminal, confirmado pelos resultados obtidos aumentando-se a fração de gás no sistema, conforme Figura 39. Normalmente, isso pode estar relacionado a

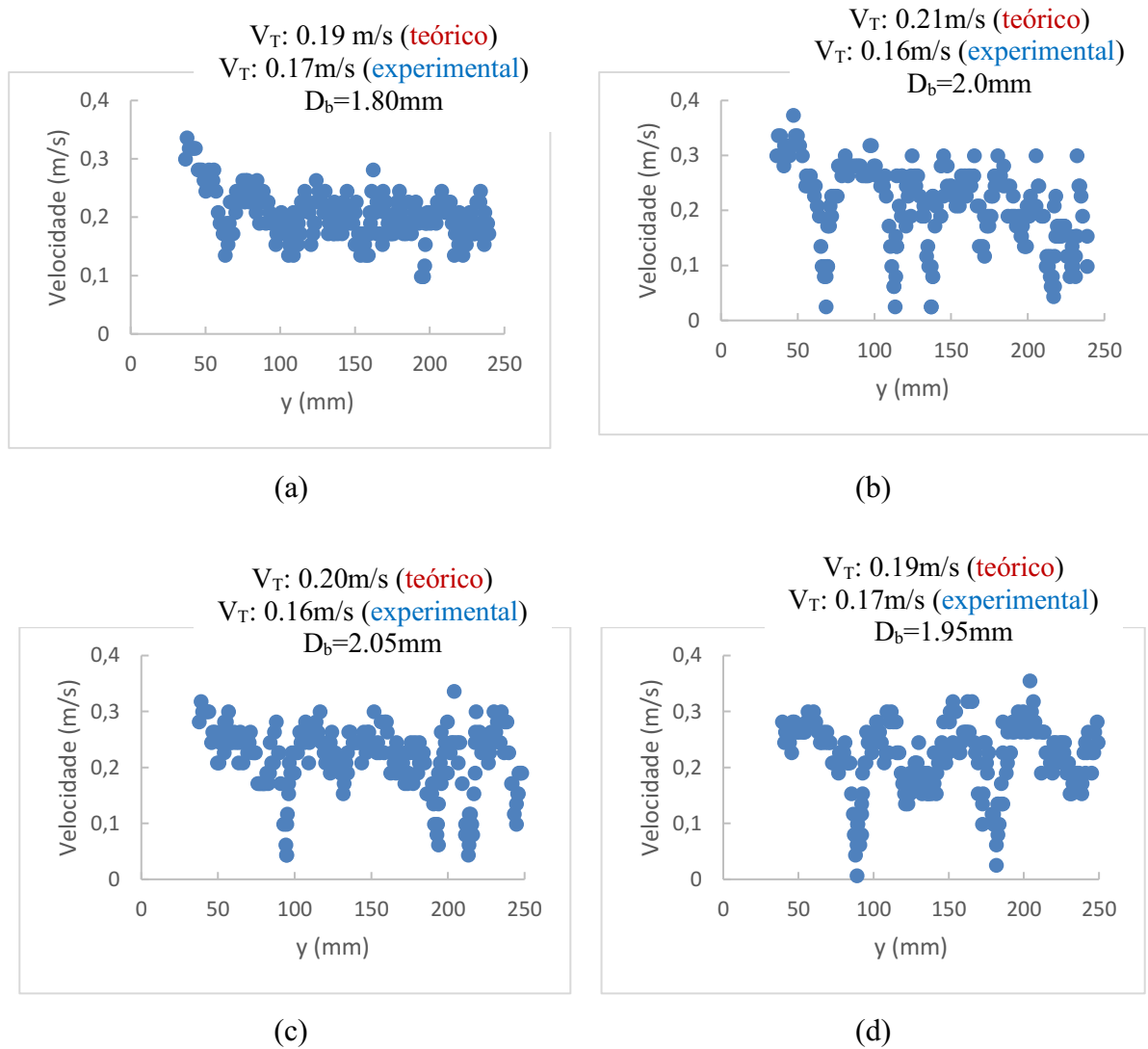
uma maior resistência ao deslocamento – e à turbulência circundante gerada no líquido pela ação da população de bolhas (ALMÉRAS et al., 2017).

Figura 38 – Trajetória individual de bolha nos experimentos com defletor, com vazão de entrada de 54l/h (a), 74l/h (b), 94 l/h (c) e Vazão máxima 125l/h (d) para o sistema de maior fração de gás



Fonte: Autoria própria

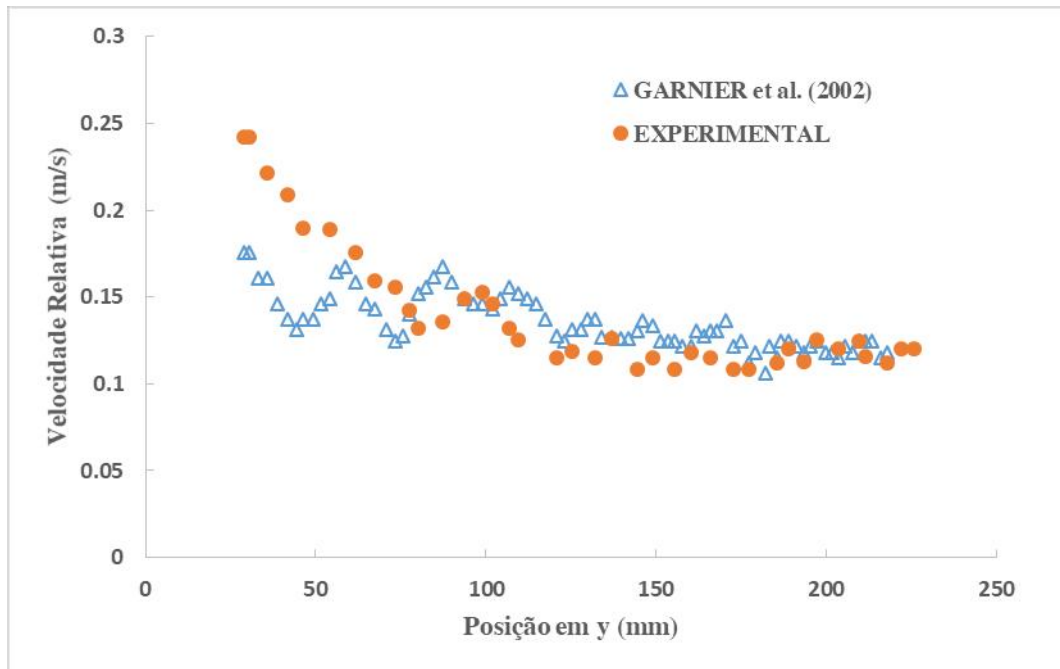
Figura 39 - Velocidade em y (ascendência) individual da bolha nos experimentos com bolhas com defletor com maior fração de gás, com vazão de entrada de 54l/h (a), 74l/h (b), 94 l/h (c) e Vazão máxima 125l/h (d)



Fonte: Autoria própria

E para complementar o estudo, a velocidade relativa (velocidade entre as fases) necessária para calcular a força de arrasto foi calculada. Os resultados foram comparados com os valores obtidos experimentalmente ao longo da taxa de ascensão da bolha, medida como seu deslocamento para cima ao longo da direção y e no caso com defletor, conforme mostrado na Figura 40, para a maior vazão de entrada de líquido, como vazão representativa para tal análise.

Figura 40 - Velocidade relativa da bolha ascendente em função de sua posição vertical. As medidas experimentais são comparadas com os resultados obtidos pela correlação de Garnier et al. (2002) (Garnier et al., 2002) – Equação (3.15)



Fonte: Autoria própria

A Figura 40 mostra a velocidade relativa da bolha representativa em função de sua posição vertical. O comportamento das medidas corrobora os pressupostos anteriores a respeito do regime transitório de aumento da velocidade da bolha. A condição terminal é observada quando a posição vertical da bolha é maior que 150 mm, aproximadamente. Além disso, as medições mostradas na Figura 40 são substancialmente menores em comparação com a velocidade absoluta mostrada na Figura 37, sugerindo que a fase contínua tem uma velocidade significativa dentro da câmara. Além disso, a Figura 40 também apresenta a estimativa da velocidade relativa pela Equação (3.15), que mostra uma boa concordância com as medidas experimentais, com uma discrepância de menos de 3%. Assim, a velocidade do líquido pode ser aproximada como unidirecional, com o componente transversal sendo desprezível.

A força de arrasto atua na direção do movimento e sua magnitude aumenta com a velocidade, e tem dependência com a forma e orientação da bolha em relação ao escoamento, bem como de parâmetros de escoamento como o número de Reynolds, e o nível de turbulência. A força de arrasto é a força mais importante que controla o movimento da bolha e, durante a subida da bolha, tem um efeito impeditivo e geralmente é caracterizada por um parâmetro adimensional, o coeficiente de arrasto (ZHOU; ZHAO; BO, 2020).

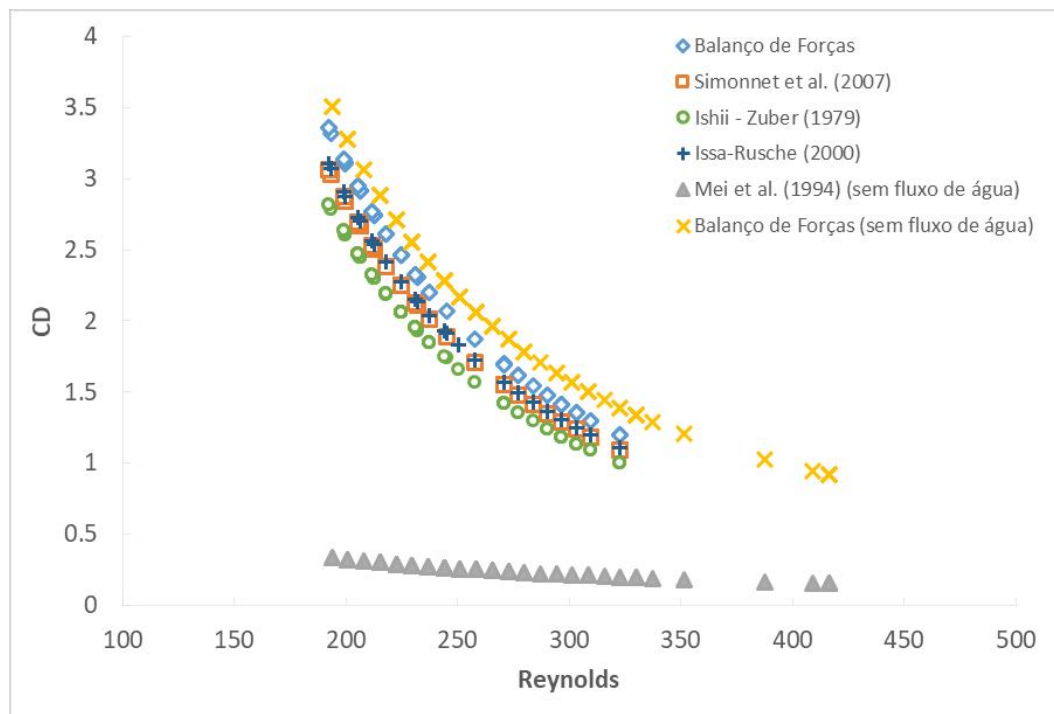
A compreensão do comportamento cinemático das bolhas ascendentes requer a avaliação do coeficiente de arrasto, em cada variação de vazão de líquido, plotado em função do Reynolds instantâneo na Figura 41 (vazão de 54 l/h), Figura 42 (vazão de 74 l/h), Figura 43 (vazão de 94 l/h) e na Figura 44 (vazão de 125 l/h). Para avaliar a influência das condições operacionais neste estudo, as medidas obtidas pelo equilíbrio de forças (Equação (3.3)) são comparados com as previsões da literatura para várias suposições, como mostrado anteriormente na Tabela 4. Além disso, a operação sem escoamento da fase contínua é mostrada para fins de comparação, enquanto o comportamento cinemático da população de bolhas é obtido comparando as medidas com a correlação obtida por Mei et al. (1994) (MEI; KLAUSNER; LAWRENCE, 1994) para uma única bolha, na ausência da contaminação interfacial e desconsiderando a distorção da forma.

Em resumo, o coeficiente de arrasto diminui com a magnitude das forças inerciais, o que é consistente com o comportamento do coeficiente de arrasto de partículas rígidas e fluidas (CLIFT; GRACE; WEBER, 1978; ZIEGENHEIN; LUCAS, 2017). Neste estudo, as forças inerciais desempenham um papel essencial e precisam ser consideradas nesta análise. Nesses sistemas, o aumento da quantidade de movimento exercido pelo fluido contínuo afeta a dinâmica interfacial da partícula, levando à formação de vorticidade no fluido contínuo e, no caso de partículas fluidas, potencializa o movimento interno. Portanto, o coeficiente de arrasto é reduzido por esses efeitos.

Ressalta-se que a Figura 41, Figura 42, Figura 43 e a Figura 44 mostram os valores instantâneos de C_d , durante a trajetória da bolha dentro da câmara. No entanto, é notável que o comportamento das medições transientes do C_d possa ser explicado em termos das medições em condições terminais. Pode-se observar que as condições operacionais adotadas influenciam no comportamento do coeficiente de arrasto. A presença da população de bolhas aumentou a magnitude do coeficiente de arrasto. Por exemplo, próximo ao banco de agulhas na parte inferior da câmara (Re é de aproximadamente 400), o C_d se aproxima da unidade neste estudo, enquanto a correlação de Mei et al., 1994 (MEI; KLAUSNER; LAWRENCE, 1994) prevê um valor muito mais baixo, de aproximadamente 0,2. Assim, as interações bolha-bolha descritas neste estudo aumentam o coeficiente de arrasto, o que está de acordo com as medidas de velocidade terminal que mostraram uma diminuição substancial em comparação com bolhas únicas. Além disso, é esperado um aumento do arrasto para o movimento transitório analisado, no qual as bolhas são impelidas para dentro da câmara, e seu deslocamento deve ser equilibrado por um aumento da força de arrasto.

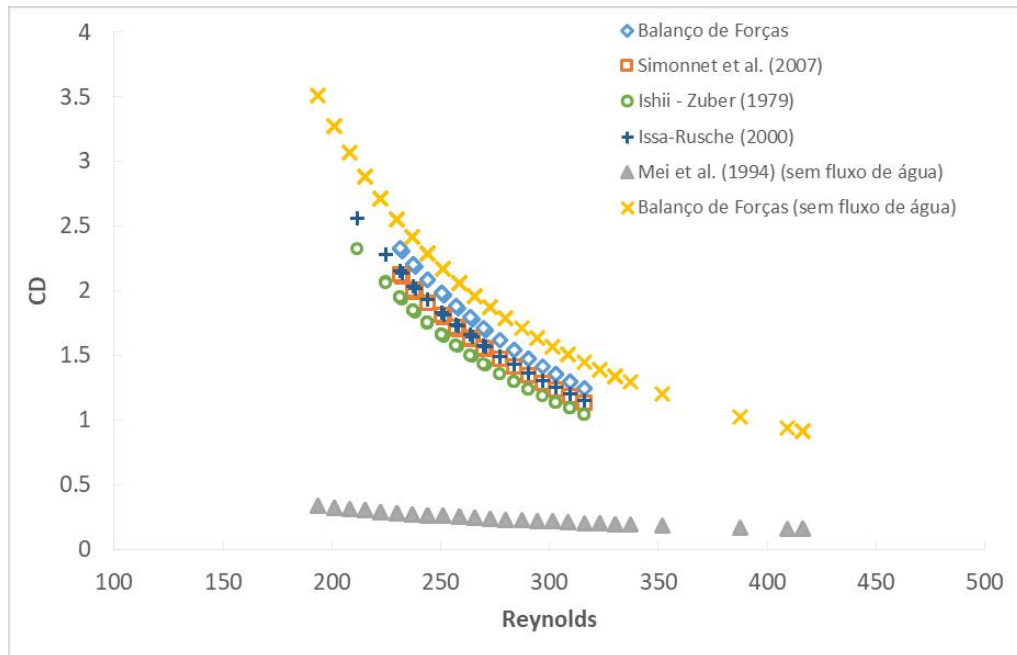
Verifica-se que o coeficiente de arrasto da população de bolhas é diminuído pelo escoamento da corrente de líquido. Isso está relacionado ao aparecimento de um componente vertical dentro da câmara, levando a uma diminuição da velocidade relativa e ao deslizamento da interface que promovem essa ligeira redução do coeficiente de arrasto. No entanto, deve-se ressaltar que este efeito é menos evidente em comparação às interações hidrodinâmicas bolha-bolha.

Figura 41 - Comparação do coeficiente de arrasto em condições transitórias nos dois sistemas (sem e com escoamento de água de 54 l/h) entre o equilíbrio de forças e as correlações selecionadas



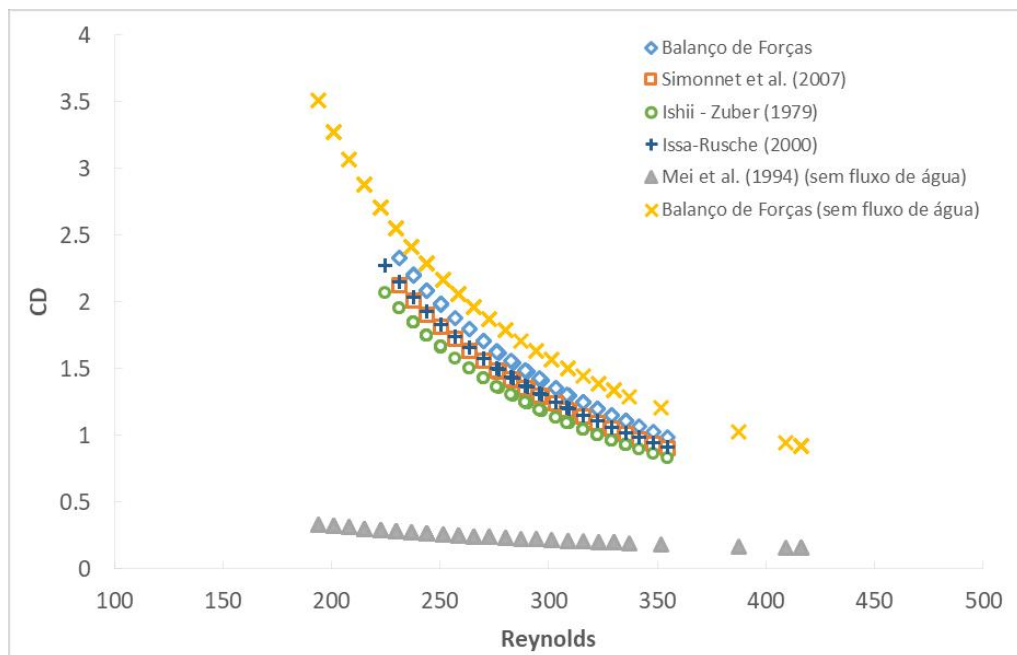
Fonte: Autoria própria

Figura 42 - Comparação do coeficiente de arrasto em condições transitórias nos dois sistemas (sem e com escoamento de água de 74 l/h) entre o equilíbrio de forças e as correlações



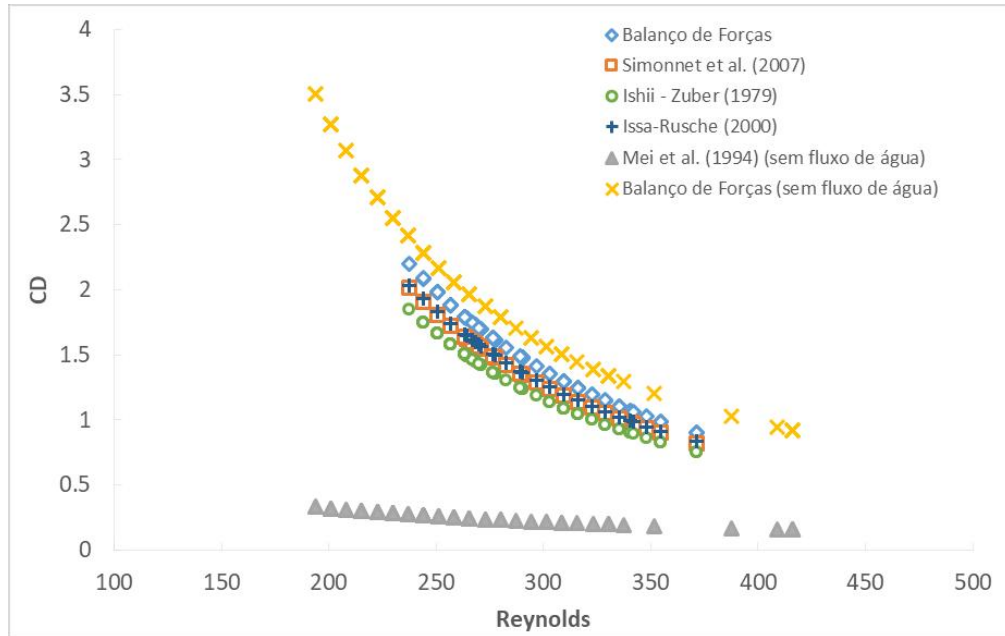
Fonte: Autoria própria

Figura 43 - Comparação do coeficiente de arrasto em condições transitórias nos dois sistemas (sem e com escoamento de água de 94 l/h) entre o equilíbrio de forças e as correlações selecionadas



Fonte: Autoria própria

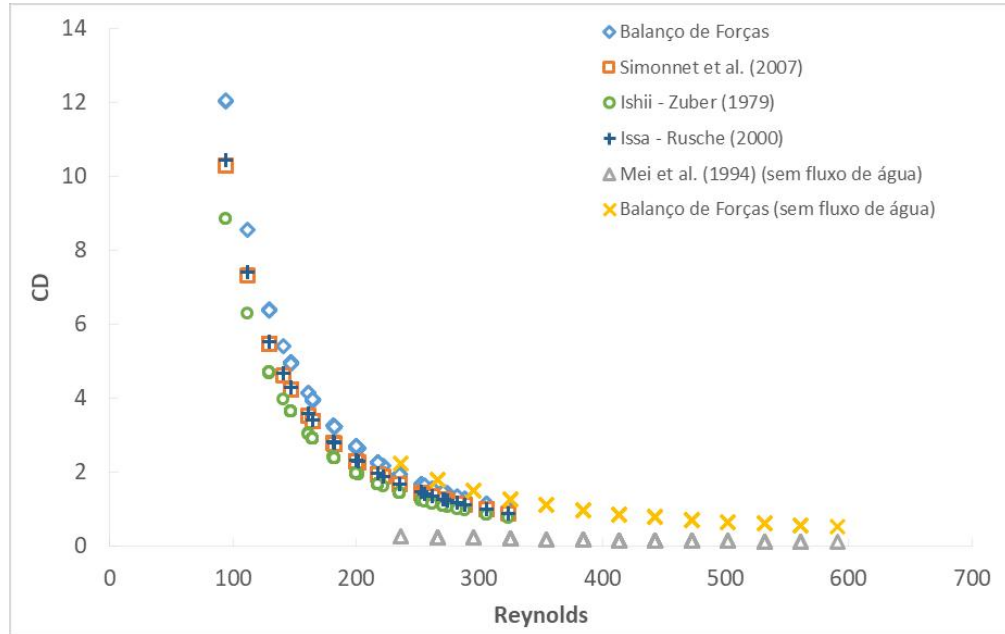
Figura 44 - Comparação do coeficiente de arrasto em condições transitórias nos dois sistemas (sem e com escoamento de água de 125 l/h) entre o equilíbrio de forças e as correlações selecionadas



Fonte: Autoria própria

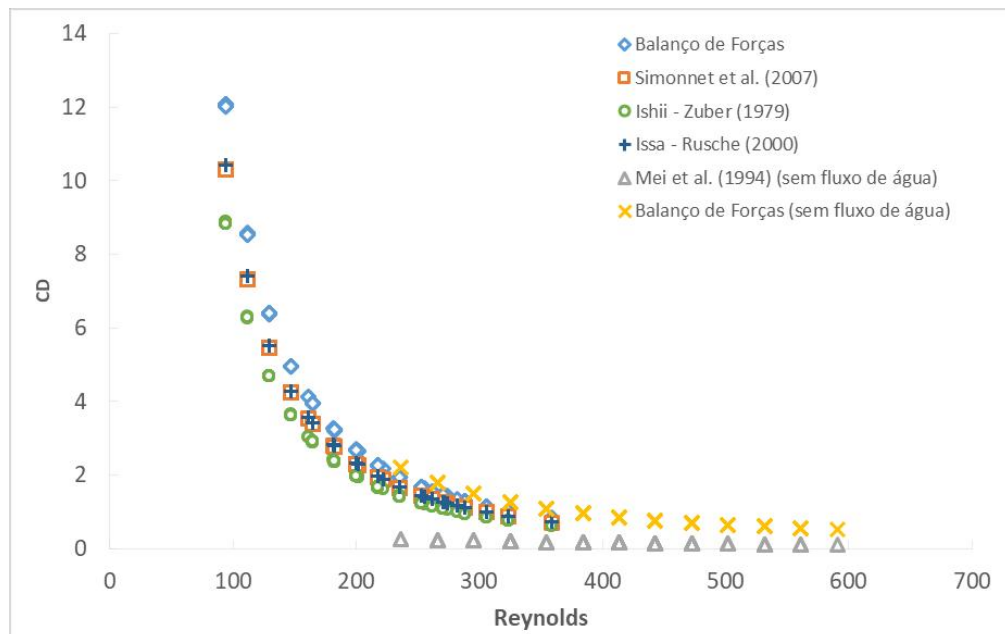
Esta mesma análise foi aplicada para os casos com maior fração de gás, mostradas na Figura 45 (vazão de 54 l/h), Figura 46 (vazão de 74 l/h), Figura 47 (vazão de 94 l/h) e na Figura 48 (vazão de 125 l/h), que mostram os valores instantâneos de C_d , durante a trajetória da bolha. Com o aumento da quantidade de bolhas no sistema, o movimento exercido pelo fluido contínuo que afeta a dinâmica interfacial da partícula é reduzido, potencializando agora o movimento das partículas. Pode-se observar que as condições operacionais adotadas neste sistema influenciam no comportamento do coeficiente de arrasto. Com maior população de bolhas, a magnitude do coeficiente de arrasto aumentou ainda mais, fato já constatado na análise com fração de gás menor, quando comparado com os dados da literatura com bolhas isoladas.

Figura 45 - Comparação do coeficiente de arrasto em condições transitórias nos dois sistemas (sem e com escoamento de água de 54 l/h) entre o equilíbrio de forças e as correlações selecionadas



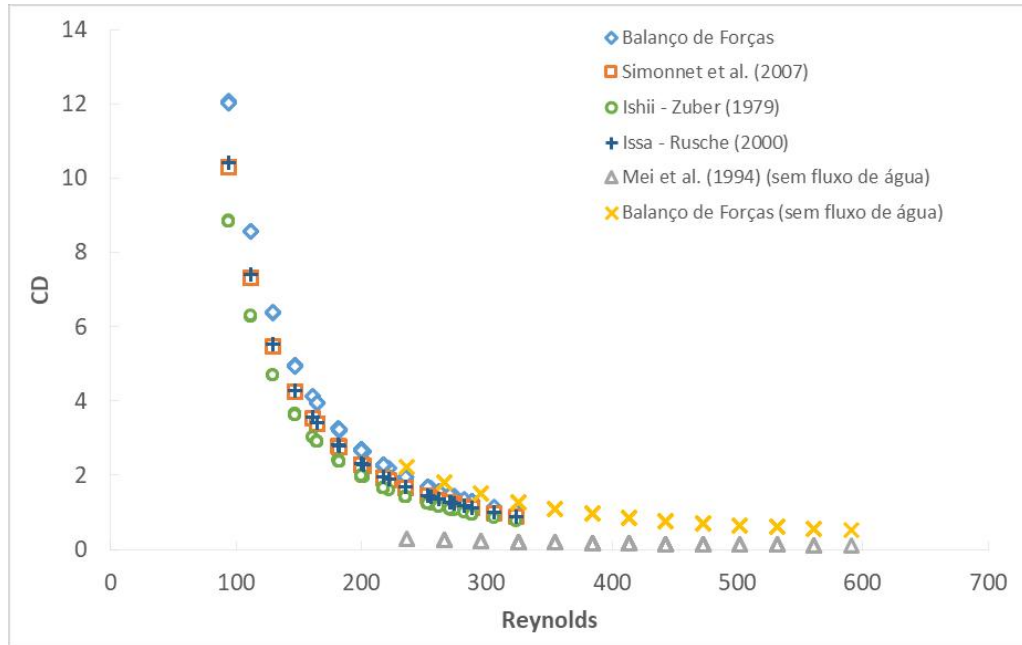
Fonte: Autoria própria

Figura 46 - Comparação do coeficiente de arrasto em condições transitórias nos dois sistemas (sem e com escoamento de água de 74 l/h) entre o equilíbrio de forças e as correlações selecionadas



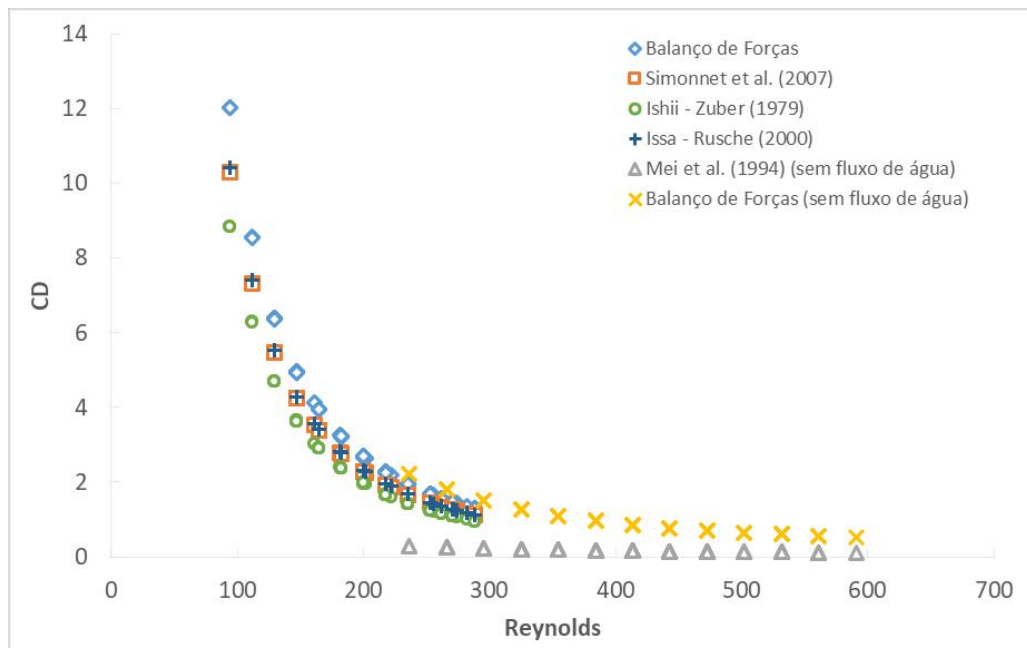
Fonte: Autoria própria

Figura 47 - Comparação do coeficiente de arrasto em condições transitórias nos dois sistemas (sem e com escoamento de água de 94 l/h) entre o equilíbrio de forças e as correlações selecionadas



Fonte: Autoria própria

Figura 48 - Comparação do coeficiente de arrasto em condições transitórias nos dois sistemas (sem e com escoamento de água de 125 l/h) entre o equilíbrio de forças e as correlações selecionadas



Fonte: Autoria própria

Com base na análise dos dados do experimento com escoamento de água, três correlações Ishii e Zuber (1979) (ISHII; ZUBER, 1979); Rusche e Issa (2000) (RUSCHE; ISSA, 2000) e Simonnet et al., (2007) (SIMONNET et al., 2007) foram selecionados para aferir os valores obtidos experimentalmente pela equação do balanço de forças (Equação (3.5)). Os valores obtidos com o equilíbrio de forças apresentaram um coeficiente de arrasto maior, o que pode ser explicado pelo fato da presença de outras bolhas e as perturbações consequentes da fase contínua são negligenciadas por esta abordagem, comprovado quando se aumenta a fração de gás no sistema. As correlações aplicadas estimam o comportamento transiente do coeficiente de arrasto, levando a uma excelente concordância com as medidas experimentais (discrepância máxima em 1,9%). Isso pode ser explicado pelo fato de que a influência da população de bolhas é avaliada em termos da fração de gás global. Assim, acredita-se que um aumento na quantidade de bolhas injetadas influencie no desempenho da separação final. Este comportamento do coeficiente de arrasto de uma população de bolhas pode ser explicado posteriormente pelo esquema mostrado na Figura 49.

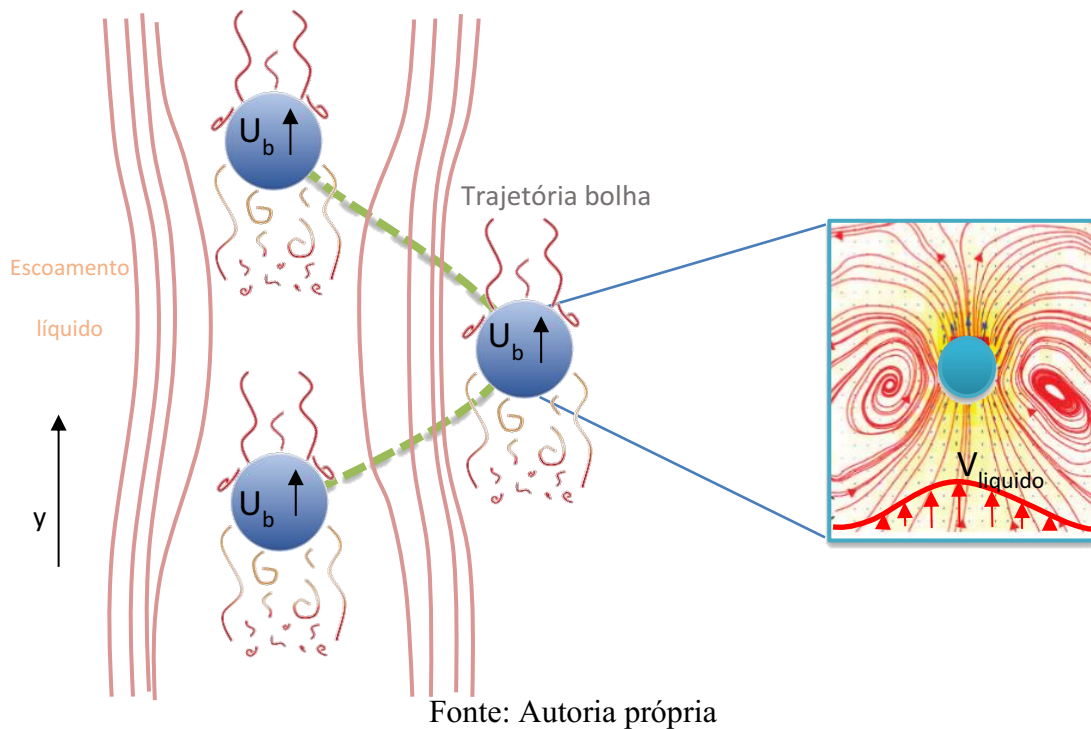
Em escoamentos de cisalhamento, a magnitude das forças inerciais não é desprezível, levando a um desprendimento das linhas de corrente na parte traseira do objeto, em oposição à suposição de escoamento rasteiro que geralmente é válida para pequenas bolhas com um diâmetro equivalente inferior a aproximadamente 1 mm (CLIFT; GRACE; WEBER, 1978). Conforme explicado por Ern et al. (2012), o desprendimento das linhas de corrente é uma consequência da inércia exercida pelo fluido contínuo, ou seja, o aumento do momento impede a distribuição uniforme do fluido circundante na vizinhança da partícula. A partir disto uma região de pressão significativamente menor é formada, levando à formação de vórtices em espiral na parte traseira do objeto. Esse fenômeno é ilustrado na Figura 49, mostrando que nessas situações de escoamento um movimento adicional é observado na fase contínua, em decorrência do movimento da bolha. Em resumo, para os casos analisados, as trajetórias oscilatórias das bolhas perturbam o fluido contínuo e, conseqüentemente, a cinemática das bolhas subsequentes.

Devido à grande diferença de massa específica entre gases e líquidos, as bolhas não se movem na mesma velocidade que o líquido. As bolhas, portanto, causam distúrbios de velocidade no líquido que, coletivamente, geram uma agitação complexa. No entanto, segundo Riboux; Risso e Legendre (2010) essa agitação induzida por bolhas - também chamada de pseudo-turbulência - muitas vezes não é a única causa da agitação do líquido. Quando o escoamento de líquido já é turbulento na ausência das bolhas, a agitação geral resulta do

acoplamento bidirecional entre a turbulência induzida por cisalhamento clássico e a agitação induzida por bolhas.

O movimento das bolhas influencia no movimento do líquido, devido à presença das linhas de corrente a jusante e a montante das bolhas, conforme mostrado na Figura 49. Inicialmente, o movimento da bolha requer a aceleração da lamela fluida nas proximidades de sua superfície, que se comporta como uma massa adicionada presa à bolha (MAGNAUDET, 1997). Além disso, a perturbação do fluido contínuo leva ao desenvolvimento de uma camada limite, temporariamente retardada como consequência da dissipação viscosa. Naturalmente, esse fenômeno afeta o movimento das bolhas subsequentes e influencia seu comportamento cinemático. Os vórtices no líquido que são causados pelo escoamento da bolha dependem do número de Reynolds, conforme já mostrado em Islam e Nguyen (2019) e (2020), Li et al. (2019) e Li, Jue e Sun (2020). As peculiaridades acima mencionadas dos escoamentos de população de bolhas afetam o coeficiente de arrasto da população de bolhas em relação ao coeficiente de arrasto de uma bolha individual representativa, na qual tais forças podem ser desprezadas. Como consequência, o coeficiente de arrasto em uma população de bolhas é substancialmente aumentado, seguindo a tendência observada nos resultados.

Figura 49 - Linhas de corrente da fase contínua com uma população de bolhas



Logo após o descolamento capilar, a bolha começa a se deformar em forma elipsoidal (BOZZANO; DENTE, 2000). Tal deformação perturba a fase contínua promovendo a formação

de forças de sustentação e uma trajetória oscilatória da bolha (LEGENDRE; ZENIT; VELEZ-CORDERO, 2012).

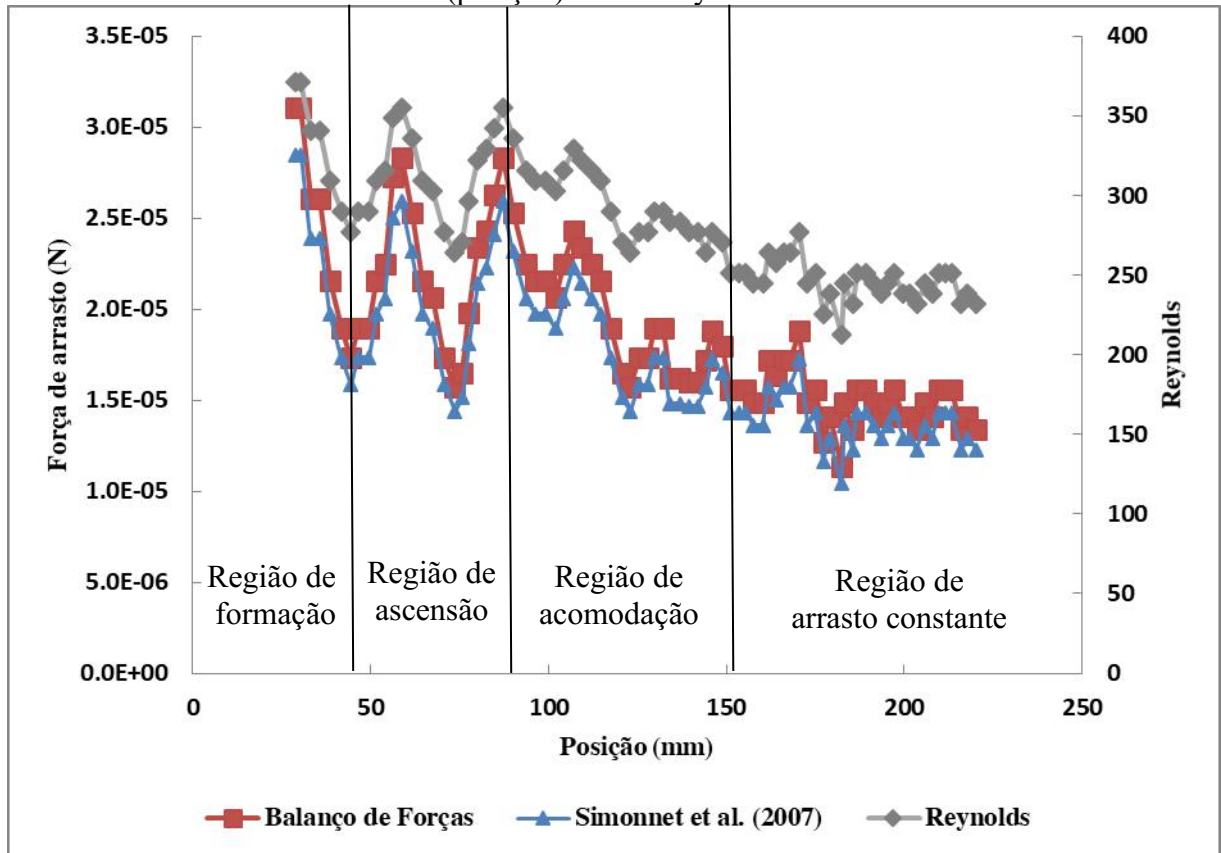
A Figura 50 mostra a força de arrasto transiente calculada pela Equação 3 (Equação (3.3)) em função da posição vertical da bolha. Além disso, o número de Reynolds instantâneo correspondente é exibido. A força de arrasto é calculada considerando uma esfera, a partir de sua definição dada pela equação (5.1).

$$D = \frac{1}{8} C_D \rho V_{rel}^2 \pi d_b^2 \quad (5.1)$$

De acordo com a Figura 50 não há diferenças significativas, e os erros entre os cálculos do equilíbrio de força e a correlação selecionada foram menores que 3%. A Figura 50 também identifica a trajetória da bolha nas quatro regiões da força de arrasto instantânea e perfil de Reynolds. A Figura 50 permite a avaliação do comportamento transiente da bolha, classificando o movimento em diferentes regiões. A primeira região corresponde a posições verticais menores que 50 mm, aproximadamente, nas quais ocorrem a formação e o desprendimento das bolhas. Nessa região, as tensões de Reynolds e de arrasto apresentam seus valores máximos logo após o desprendimento do capilar, sendo observada uma tendência claramente decrescente. A segunda região refere-se à altura aproximada da câmara de 50 a 80 mm na qual as flutuações temporais dos parâmetros são observadas. Nessa região de ascensão, a bolha começa a sofrer os efeitos das forças de movimento, uma vez que a propulsão inicial observada na fase de formação diminui. Então, o arrasto e o número de Reynolds da bolha apresentam uma clara tendência decrescente com a posição vertical abaixo de 160 mm, aproximadamente. Nesta região de acomodação, as flutuações temporais tornam-se menos pronunciadas. A diminuição dos efeitos da inércia segue a mesma tendência da força de arrasto, sugerindo que outros fatores e forças estão relacionados a este efeito de amortecimento observado para os parâmetros avaliados. Finalmente, as condições terminais são alcançadas quando a posição vertical está acima de 160 mm, sugerindo que um equilíbrio de força é alcançado. Assim, percebe-se uma região de arrasto constante, quando as flutuações temporais são menores.

As imagens que visualizam o movimento das bolhas, mostraram ocorrência típica do balanço característico das bolhas. Com o processamento das imagens, foi possível determinar a frequência média de oscilação e amplitude média das bolhas. A frequência de oscilação da trajetória das bolhas é observada pelo seu deslocamento no líquido. Durante a ascensão das bolhas no meio contínuo (líquido), este é afastado para dar passagem a bolha, até que as bolhas passem e o líquido volta a preencher o espaço antes ocupado por elas. Esse processo é repetitivo, e assim podemos distinguir o movimento oscilatório.

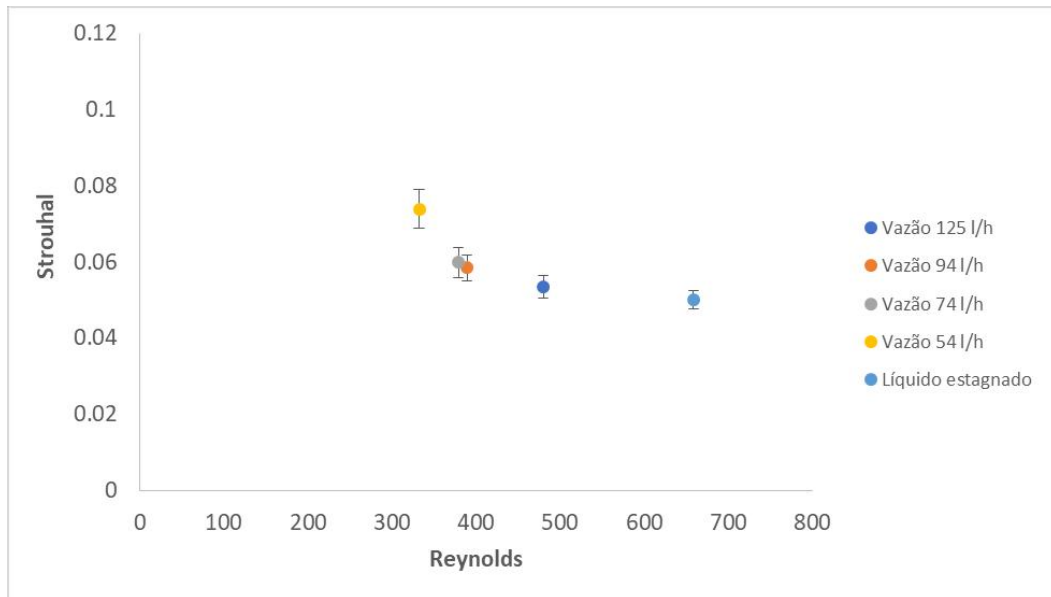
Figura 50 - Comparação da força de arrasto transiente ao longo da trajetória da bolha (posição) e com Reynolds



Fonte: Autoria própria

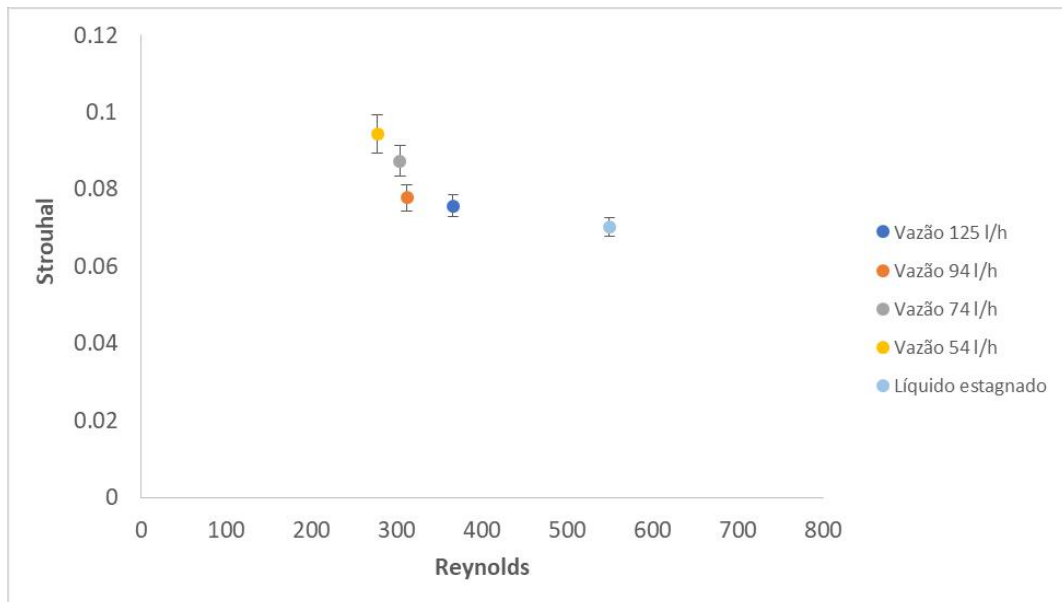
Avaliou-se em termos do Número de Strouhal (Equação (2.5)), conforme Lindt e Groot (1974)) e pelo Número de Reynolds (Equação (2.2)), apresentando assim na Figura 51 e Figura 52 para cada variação de vazão e fração de gás. O número de Strouhal depende fortemente do número de Reynolds (LINDTT; GROOT, 1974). Indicando assim, que na menor vazão de entrada de líquido, o Número de Strouhal é maior, pois a frequência de oscilação da bolha é maior. Resultado esperado, uma vez que a menor vazão de líquido perturba menos o escoamento das bolhas. Existe outra diferença significativa a ser analisada, para o caso em que se aumenta a fração de gás no sistema, verificando que a frequência de oscilação aumenta (número de Strouhal maior), e isso pode ser explicado pelo fato de que existem maior quantidade de bolhas no sistema. Isso é confirmado pelos sistemas sem escoamento do líquido, onde não existe a influência do campo de líquido no escoamento das bolhas, e neste caso a frequência de oscilação é maior e a amplitude menor.

Figura 51 – Número de Strouhal em função do número de Reynolds (medições no sistema de menor fração de gás)



Fonte: Autoria própria

Figura 52 – Número de Strouhal em função do número de Reynolds (medições no sistema de maior fração de gás)



Fonte: Autoria própria

Quando uma bolha oscila nas proximidades de outra bolha, isso influencia tanto a oscilação quanto ao movimento translacional de ambas as bolhas (LAUTERBORN; KURZ, 2010). Existe uma força de interação bolha-bolha, que pode ser formulada em termos da oscilação da bolha e da distância entre elas. A interação entre as bolhas pode ser fraca quando

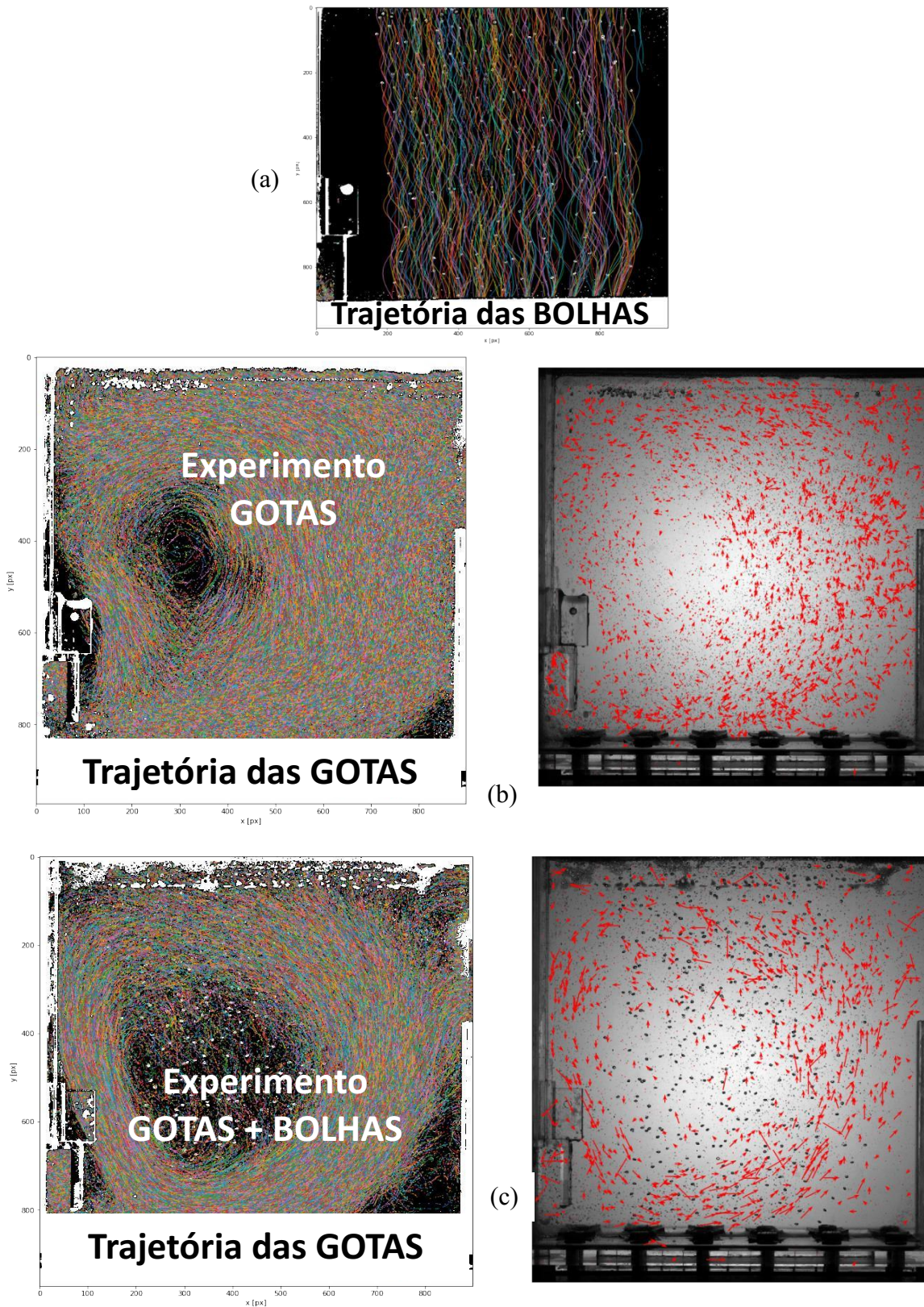
as bolhas estão distantes (menor fração de gás), e, forte quando as bolhas estão próximas (fração de gás maior). E isso influencia diretamente na frequência de oscilação e na amplitude, quando existe maior quantidade de bolhas no sistema (maior fração de gás), as bolhas se aproximam e a frequência de oscilação se torna maior (LAUTERBORN; KURZ, 2010). Verifica-se exatamente o relatado pelos autores na Figura 51 e Figura 52, com maior fração de gás, as oscilações das bolhas são maiores, aumentando assim o número de Strouhal. O número de Reynolds dos sistemas em estudos condizem com a análise de Mougin e Magnaudet (2002), onde eles fazem um acompanhamento do Número de Reynolds ao longo da trajetória da bolha, evidenciando que o número de Reynolds diminui à medida que a bolha evolui no escoamento, relatando que a bolha passa por regiões de transição, iniciando com um Reynolds alto no escoamento inicial, chegando até as condições terminais.

5.1.2 Cinemática de gotas dispersas em uma população de bolhas

Para analisar a influência que as bolhas exercem no escoamento das gotas, foi realizado um experimento com gotas de óleo e inserção de bolhas. Um código Python foi utilizado para processar as imagens com escoamento simultâneo de gotas e bolhas e também para o caso apenas com gotas de óleo, conforme mostrado na Figura 53, onde são mostradas as trajetórias de bolhas e gotas para um determinado período.

A Figura 53, mostra as trajetórias das bolhas em (a), e as gotas dispersas dentro da câmara de visualização para os casos sem escoamento de bolhas em (b) e com escoamento de bolhas em (c), para o caso de maior vazão de líquido (125 l/h). Cada linha colorida se refere à trajetória de bolha em (a) e de uma gota de óleo em (b) e (c), assim como as setas vermelhas representam o vetor velocidade de cada gota. Na Figura 53 (b) as gotas de óleo entram na câmara junto com a fase contínua, cuja velocidade afeta o comportamento cinemático das gotas, se dispersam aleatoriamente pela câmara com a recirculação, seguindo dispersas pelo escoamento do líquido. Nessas circunstâncias, percebe-se um aumento do tempo de residência devido a um caminho mais longo e tortuoso. Este comportamento não é desejado, visto que o objetivo deste trabalho é investigar as condições relacionadas à separação ótima das gotas, cuja eficiência se baseia principalmente nos efeitos gravitacionais. Assim, pode ser visto a partir das medições qualitativas mostradas na Figura 53b que melhorias devem ser feitas para garantir uma separação adequada das gotas de óleo finamente dispersas.

Figura 53 – Trajetória de todas as bolhas (a), trajetória de todas as gotas (b) e trajetória de todas as gotas no experimento gotas + bolhas (c), na maior vazão de líquido (125 l/h)



Fonte: Autoria própria

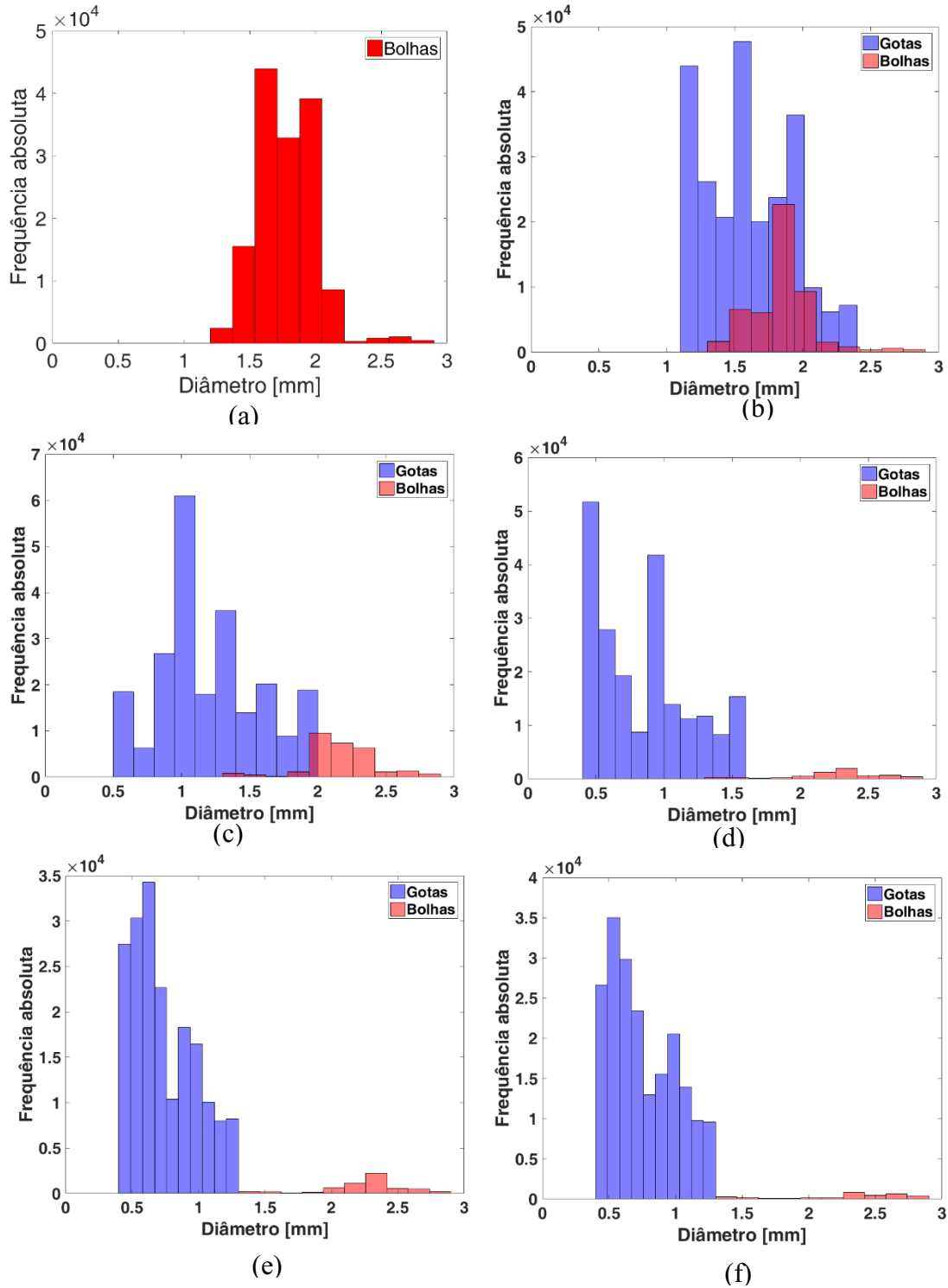
A influência do escoamento da bolha no comportamento cinemático das gotas é mostrada na Figura 53 (c). É possível observar que existe uma diferença significativa quando comparado ao caso em que as bolhas estão ausentes. A população de bolhas reduz o efeito de flutuabilidade neutro observado para as gotas de óleo, cujas trajetórias tornam-se cada vez mais retas para cima, levando a um menor tempo de retenção na câmara e uma separação com maior eficiência. Particularmente, as gotículas dispersas tendem a seguir o caminho das bolhas, ao contrário da configuração anterior, onde as gotículas são distribuídas aleatoriamente pela câmara. Esta é uma consequência direta da velocidade induzida pelo líquido promovida pelo movimento das bolhas, de acordo com os fenômenos já mencionados que decorrem da perturbação da fase contínua. É notável que a presença das bolhas aumentou as forças gravitacionais atuantes sobre as gotas, levando a uma separação eficiente observada pelo menor número de gotas fluindo para a câmara próxima à saída de água, o que é visualmente perceptível durante os experimentos e nas imagens. Estudos anteriores sobre a eficiência da técnica de flotação relataram que a separação aprimorada é resultado da fixação da gota-bolha (MOOSAI; DAWE, 2003; OLIVEIRA; GONZALEZ; OLIVEIRA, 1998; SATHTHASIVAM; LOGANATHAN; SARP, 2016). No entanto, este estudo relata que os efeitos hidrodinâmicos também são importantes e devem ser levados em consideração. Além disso, avalia-se o papel da interação direta das bolhas com as gotas, conforme será apresentado nas próximas seções.

5.1.2.1 *Análise global do diâmetro das bolhas e gotas*

Uma análise global do diâmetro das bolhas e das gotas é feita com o processamento das imagens. Os dados são obtidos pela seleção de uma região do escoamento no processamento das imagens pelo *software* DaVis, sendo que essa demarcação da região é a mesma para todos os casos dentro do mesmo cenário. A região foi delimitada entre o defletor (entrada) e a chicana do equipamento, que consiste na região de separação, sendo irrelevante a região após a chicana.

O *software* DaVis, não distingue bolhas e gotas, logo, o processamento é realizado com auxílio de código em MatLab no qual se aplicam critérios para caracterizar bolhas e gotas de acordo com tamanho dos diâmetros e velocidades das partículas, fornecendo assim os histogramas de variação de tamanho das bolhas e gotas em relação a frequência absoluta em cada variação do escoamento de entrada de líquido, conforme Figura 54.

Figura 54 – Histogramas da variação do diâmetro nos experimentos com bolhas e gotas com defletor com vazão de 16l/h (a), 34l/h (b), 54l/h (c), 74l/h (d), 94 l/h (e) e Vazão máxima 125l/h (f)

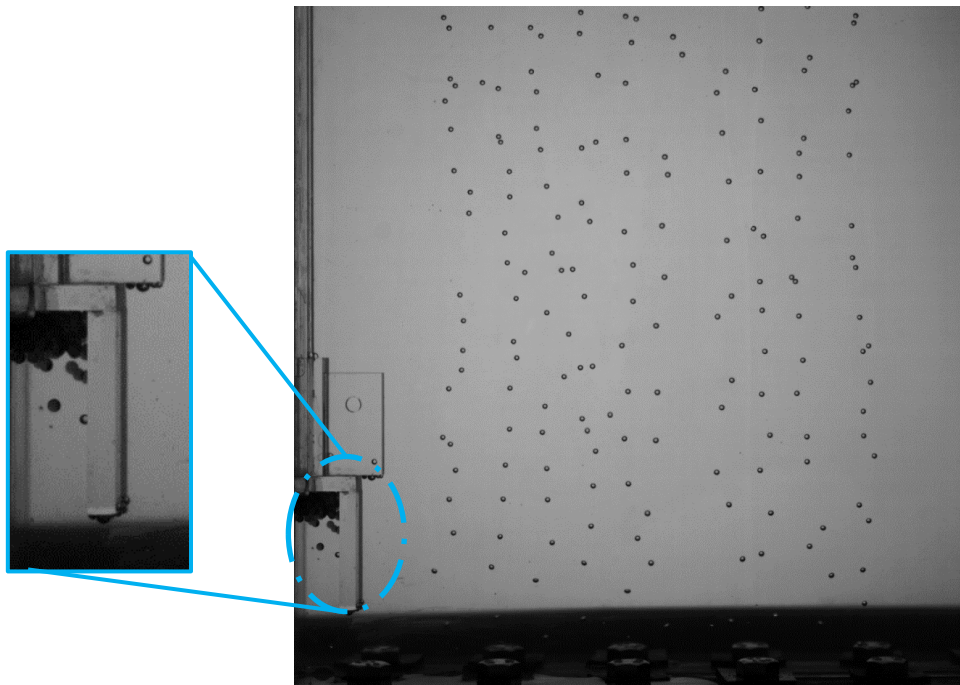


Fonte: Autoria própria

Na Figura 54, verifica-se que em (a) vazão mínima de 16 l/h existe apenas a presença de bolhas com diâmetro variando entre 1,3 mm até 3mm, cuja variação perpetua em todos os casos. Já na vazão de 34l/h (b), a probabilidade de ocorrência é de gotas com diâmetro de 1,1 até 2,4 mm, e de bolhas com diâmetro de 1,3 até 3 mm, este caso apresenta ainda tamanho de gotas maiores devido a baixa vazão. A vazão 54l/h (c) já apresenta valores menores de diâmetro de gota, variando entre 0,5mm até 2mm, sendo que a probabilidade de ocorrência são de gotas com diâmetro 1,1mm. E com o aumento da vazão em 74l/h (d), 94l/h (e) e vazão máxima de 125l/h (f) é perceptível que há maior probabilidade de ocorrência de gotas com diâmetro de 0,5mm, e, também é observado que a medida que a vazão é aumentada tem-se a presença de gotas menores e em maior quantidade, fato explicado devido a tensão cisalhante, que com o aumento da vazão de entrada de água promove a quebra das gotas.

A vazão mais baixa, 16l/h e 34 l/h, conforme já informado anteriormente, são excluídos das análises posteriores. Porque devido a presença do defletor e por ser a vazão mais baixa, as gotas ficaram “presas” no defletor, não conseguindo fluir ao longo do escoamento, conforme Figura 55.

Figura 55 - Gotas e bolhas ao longo do escoamento na vazão mínima (16l/h) com defletor

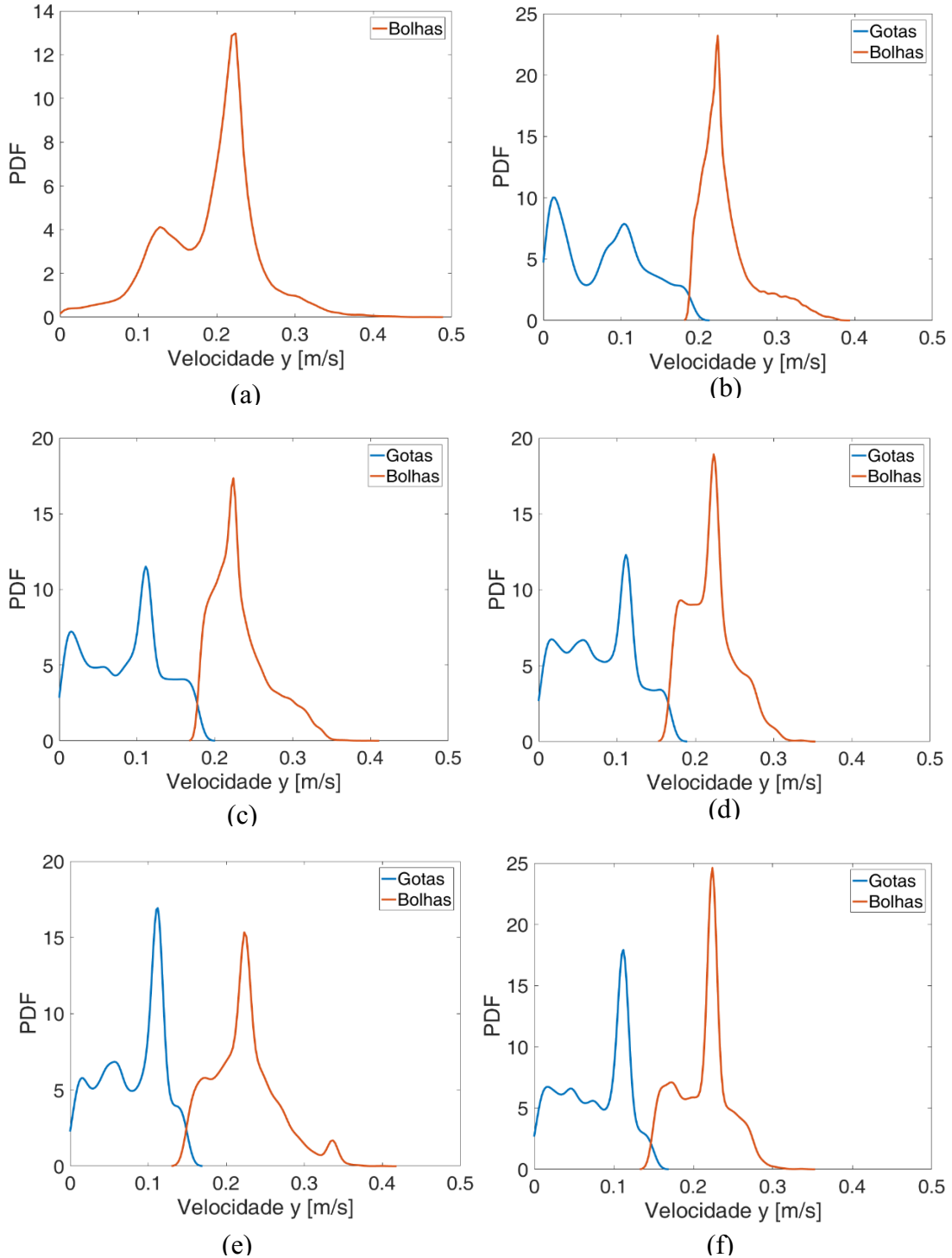


Fonte: Autoria própria

5.1.2.2 *Análise global da distribuição da velocidade das bolhas e gotas nos experimentos com defletor*

Com os dados obtidos nos experimentos é analisado a distribuição da velocidade das bolhas e gotas na direção y (ascendência da bolha e da gota) ao longo do escoamento, na mesma região demarcada para a análise dos diâmetros. Os valores das velocidades são obtidos pela seleção de uma região do escoamento no processamento das imagens, com o auxílio do *software* DaVis. A distribuição da velocidade (PDF) na direção y , das bolhas e gotas nos diferentes casos (variação da vazão de entrada) com a presença do defletor pode ser verificada na Figura 56, diferenciando a velocidade das gotas (linha azul) da velocidade das bolhas (linha vermelha).

Figura 56 – PDF da variação da velocidade em y nos experimentos com bolhas e gotas com defletor com vazão de 16l/h (a), 34l/h (b), 54l/h (c), 74l/h (d), 94 l/h (e) e Vazão máxima 125l/h (f)



Fonte: Autoria própria

Pela Figura 56 é possível analisar que a velocidade em y das gotas variam entre 0,01 até 0,15m/s. A velocidade em y das bolhas varia entre 0,15 até 0,3m/s. Sendo que na vazão mais baixa, ou seja, 16l/h (a) não teve processamento de dados para as gotas, pois devido a

presença do defletor as gotas ficaram “presas”, não conseguindo fluir ao longo do escoamento, portanto tem-se apenas a variação de velocidade das bolhas, com maior probabilidade de ocorrência de bolhas com velocidade de 0,225 m/s. Na vazão de 34 l/h (b) e 54 l/h (c) tem-se distribuição parecida, onde a maior probabilidade de ocorrência são gotas com velocidade de 0,12 m/s e maior probabilidade de ocorrência são bolhas com velocidade de 0,225 m/s. Nas vazões de 74 l/h (d), 94 l/h (e) e vazão máxima de 125 l/h (f) a distribuição também é parecida entre estes casos, com crescimento da região de velocidades entre 0,03 e 0,009 m/s, destacando ainda assim a maior probabilidade de ocorrência de gotas com velocidades de 0,11 m/s, o crescimento da região com menor velocidades é devido a presença de gotas com diâmetro menor. E para as bolhas a maior probabilidade de ocorrência é a velocidade de 0,225 m/s. A presença do defletor não altera muito os valores de velocidade em cada variação de vazão.

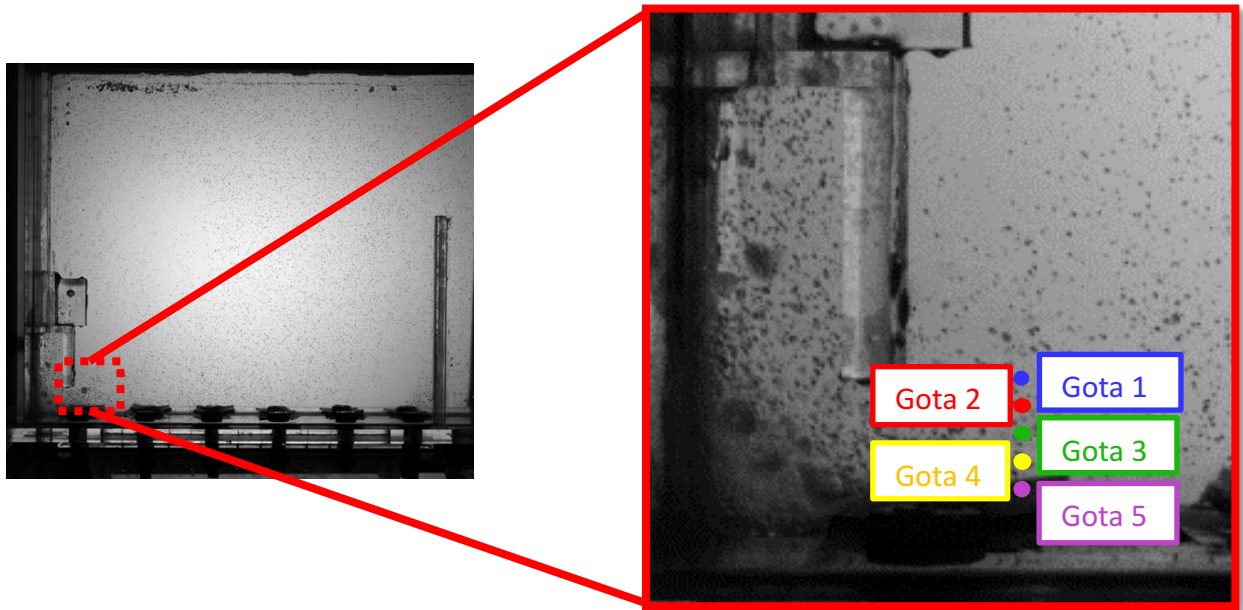
5.1.2.3 *Rastreamento individual das gotas*

Para avaliar melhor a influência da população de bolhas na separação de gotas de óleo finamente dispersas, a avaliação das trajetórias de gotas individuais é necessária. Para tanto, é realizado um rastreamento individual de gotas de óleo selecionadas. Assim, pode-se realizar uma avaliação quantitativa do comportamento cinemático, cujas conclusões são consideradas representativas de toda a população de gotas dispersas. Os parâmetros calculados envolvem a trajetória ascendente e o tempo de retenção da gota, até atingir a interface água-ar no segmento superior da câmara.

São escolhidas cinco gotas para fazer o rastreamento de suas trajetórias desde a entrada no equipamento até atingir a interface do líquido com o ar. Fez-se o processamento com auxílio de um código no MatLab para plotar a trajetória individual de cada gota individualmente. O processamento foi realizado manualmente imagem por imagem devido às dificuldades do programa em acompanhar a partícula em meio a tantas outras de maneira automática. Para isso, foram utilizadas para cada trajetória um número variável de imagens, cujo objetivo é percorrer toda a trajetória que a gota realiza durante o escoamento.

A localização das gotas representativas selecionadas é próxima a entrada do equipamento, conforme pode ser visto na Figura 57, que demonstra a localização da região de seleção das gotas para os experimentos.

Figura 57 – Marcação de posição inicial das gotas no experimento

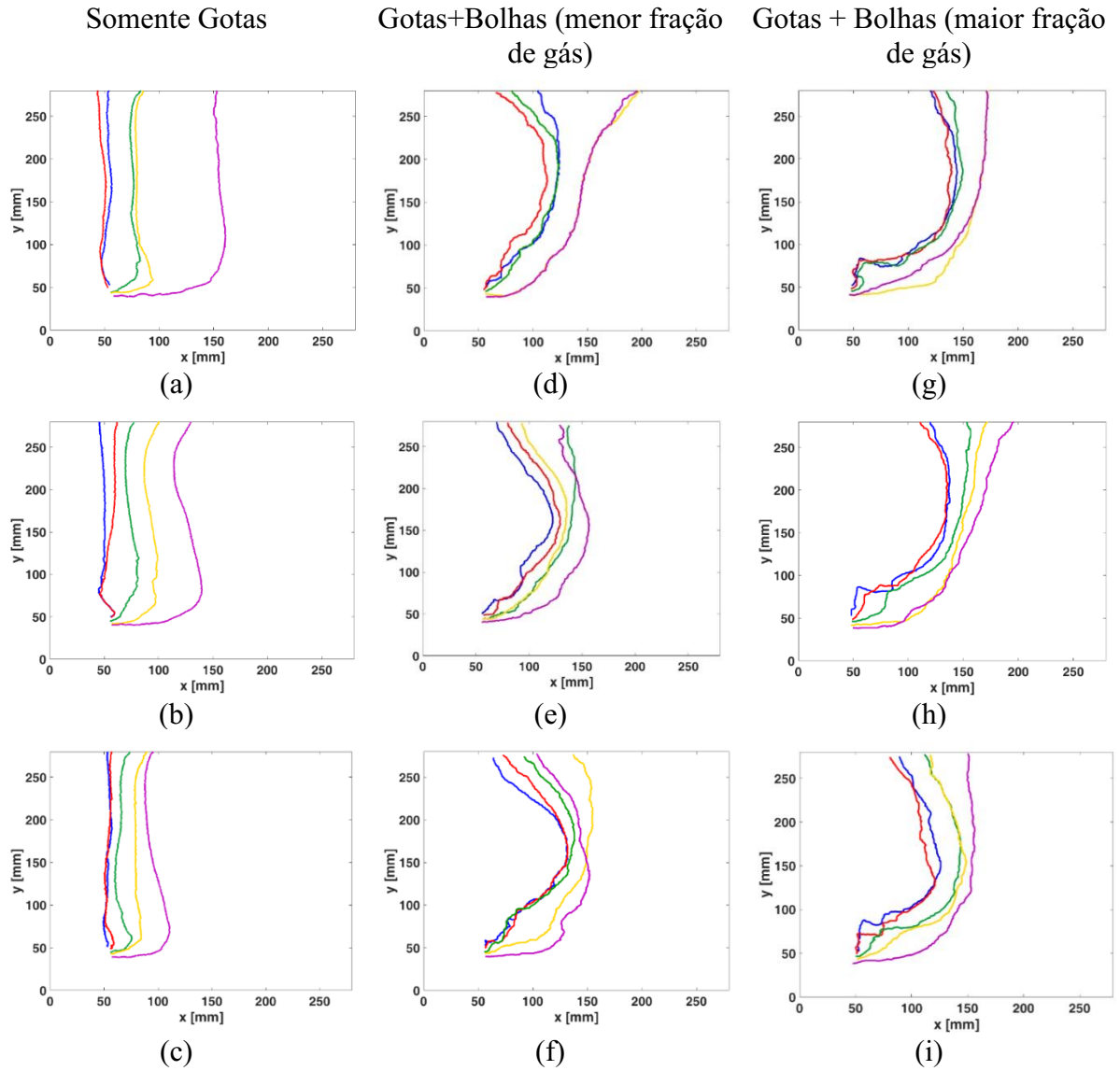


Fonte: Autoria própria

A Figura 58, Figura 59, Figura 60 e Figura 61 mostram as trajetórias ascendente das gotas representativas obtidas a partir do algoritmo de rastreamento de gotas individuais, para as três situações: somente gotas, gotas e bolhas com menor fração de gás e gotas e bolhas com maior fração de gás, variando a vazão de líquido. Todos as análises foram realizadas em triplicata para verificar a repetibilidade das medidas. As trajetórias apresentadas em (a-c) mostram quando não há população de bolhas e as gotas dispersas fluem livremente ao longo do escoamento. Em (d-f) mostram-se as trajetórias das gotas quando são inseridas as bolhas em menor quantidade (menor fração de gás). E (g-i) são as trajetórias das gotas quando inseridas maior quantidade de bolhas (maior fração de gás).

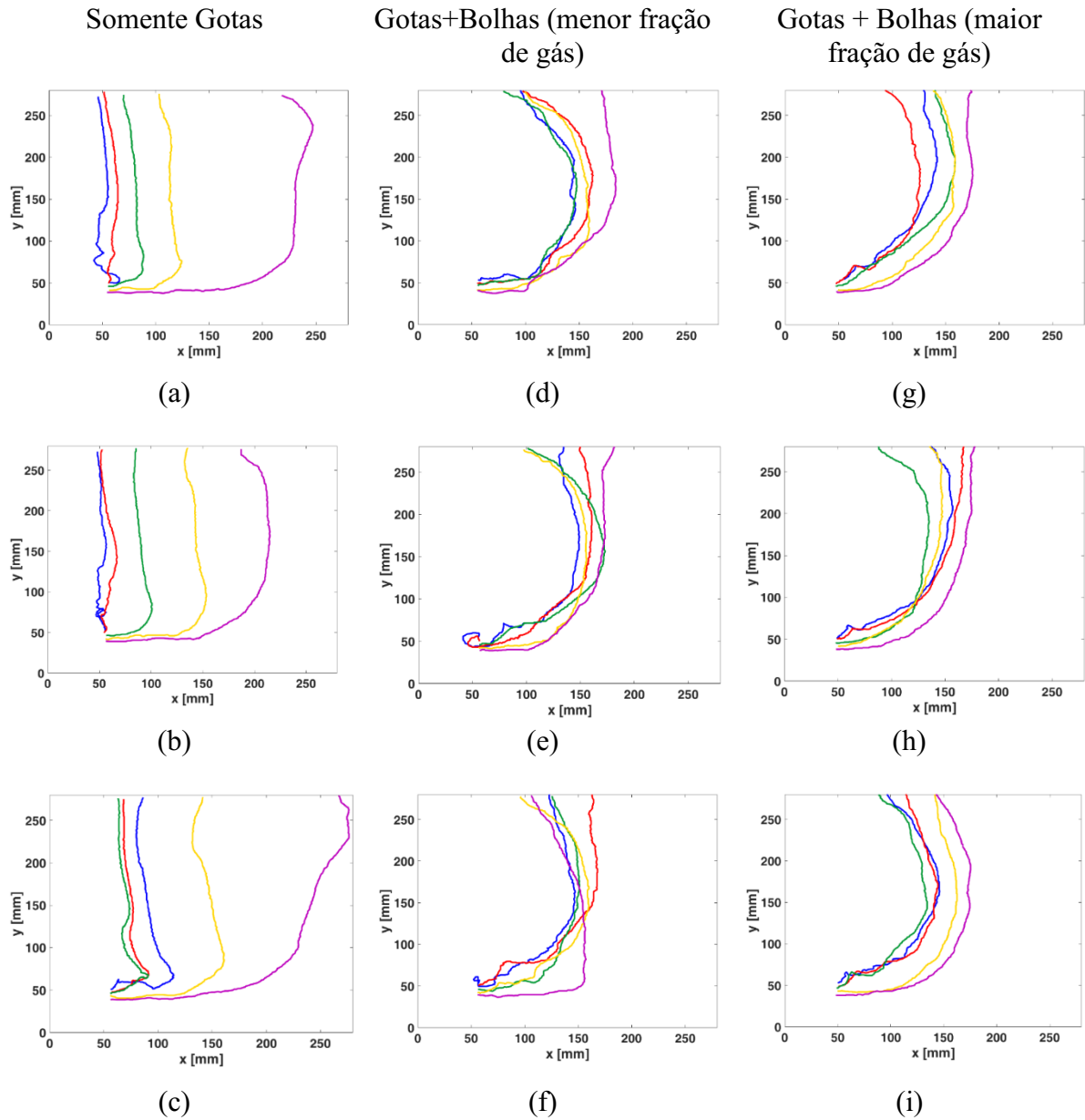
Primeiramente, pode-se observar que o comportamento cinemático das gotas é estocástico, pois elas são distribuídas aleatoriamente pela câmara. Porém, vale ressaltar que o comportamento geral não é afetado durante as medidas repetidas, sugerindo que o movimento não apresenta alterações temporais, mas mantém as características cinemáticas do escoamento.

Figura 58 – Trajetória ascendente das gotas representativas sem bolhas (a-c), trajetória das gotas nos experimentos com menor quantidade de bolhas (d-f) e trajetória das gotas nos experimentos com maior quantidade de bolhas inseridas (g-i), na vazão de líquido de 54 l/h



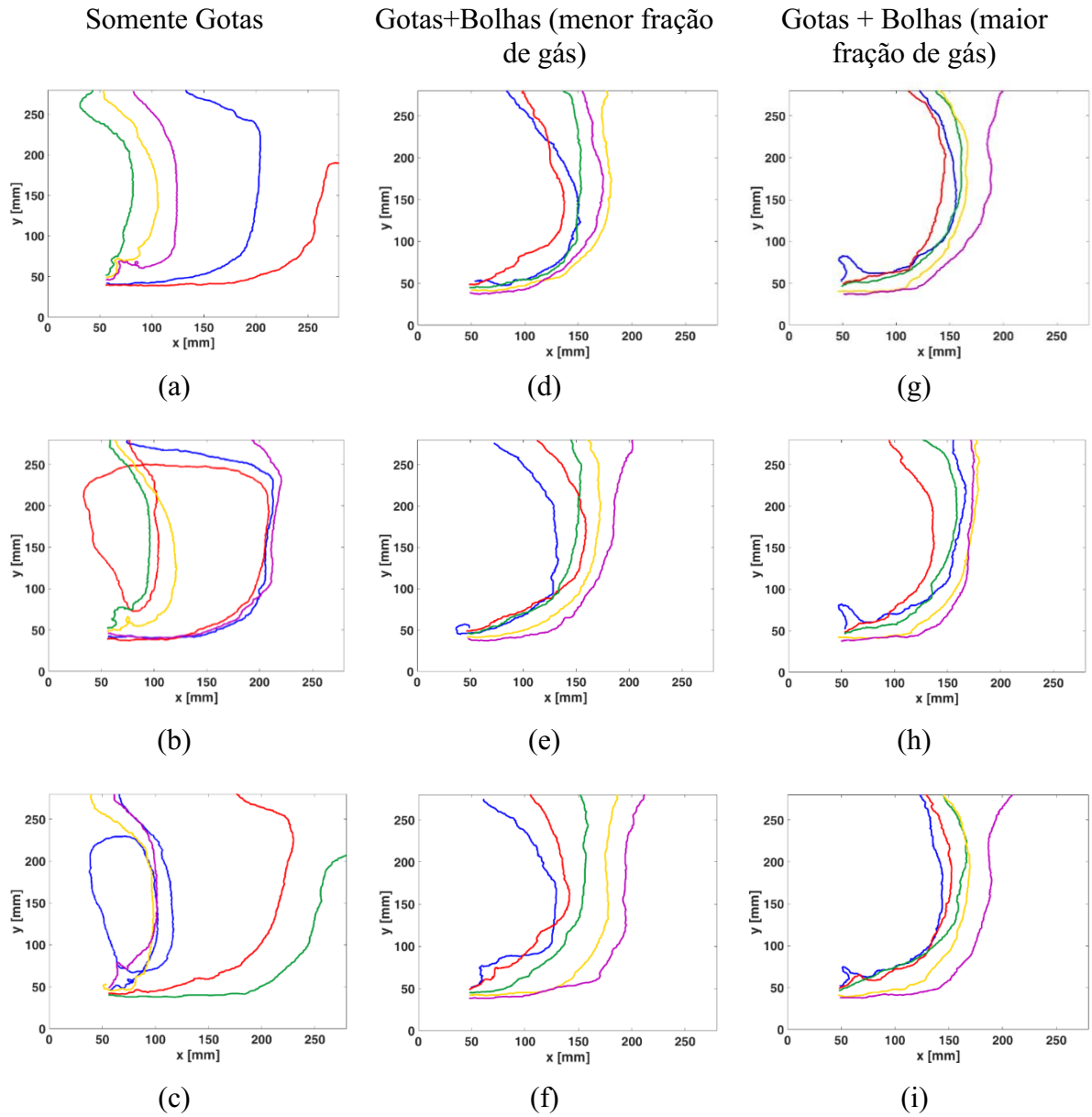
Fonte: Autoria própria

Figura 59 – Trajetória ascendente das gotas representativas sem bolhas (a - c), trajetória das gotas nos experimentos com menor quantidade de bolhas (d- f) e trajetória das gotas nos experimentos com maior quantidade de bolhas inseridas (g-i), na vazão de líquido de 74 l/h



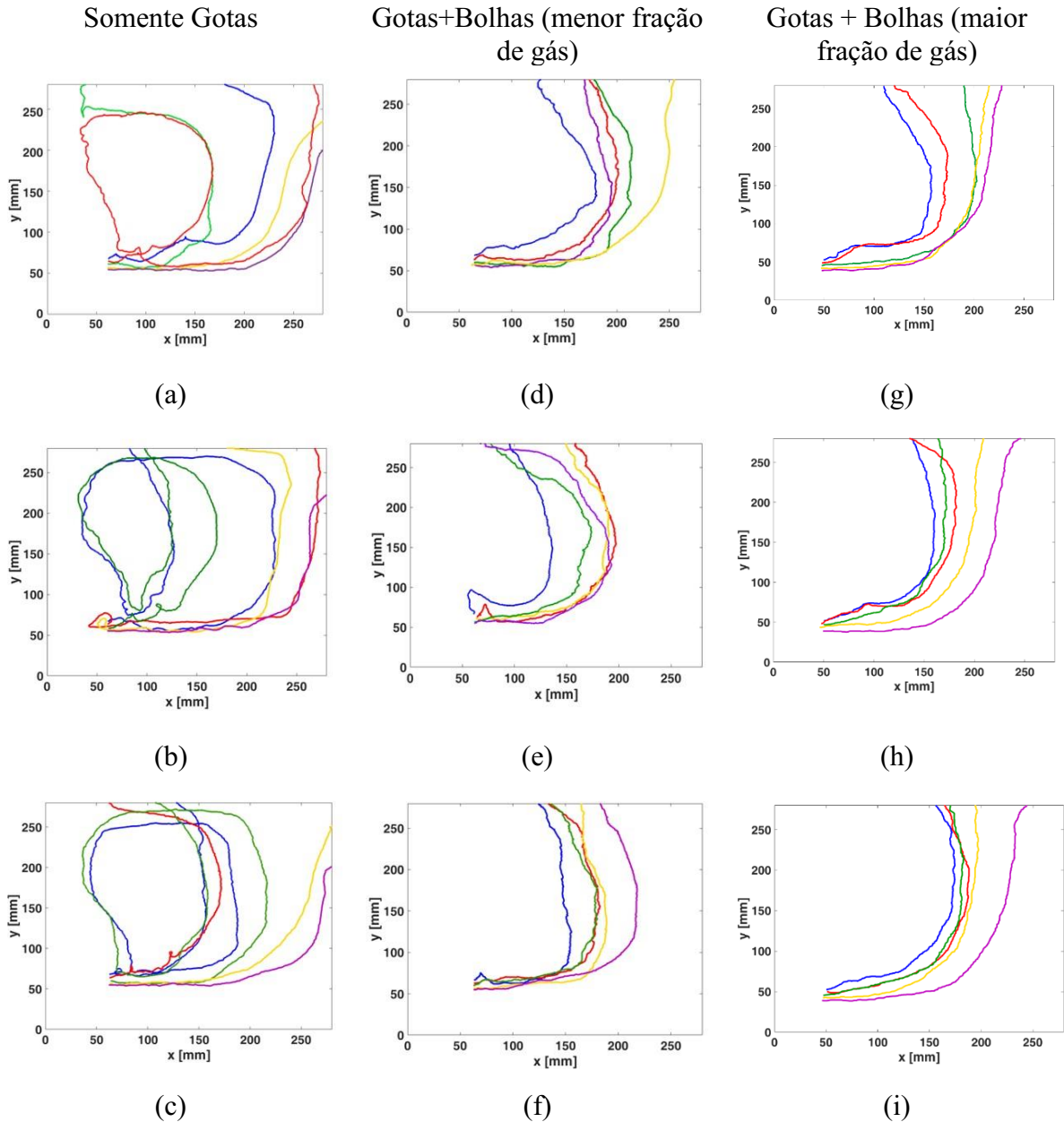
Fonte: Autoria própria

Figura 60 – Trajetória ascendente das gotas representativas sem bolhas (a - c), trajetória das gotas nos experimentos com menor quantidade de bolhas (d- f) e trajetória das gotas nos experimentos com maior quantidade de bolhas inseridas (g-i), na vazão de líquido de 94 l/h



Fonte: Autoria própria

Figura 61 – Trajetória ascendente das gotas representativas sem bolhas (a - c), trajetória das gotas nos experimentos com menor quantidade de bolhas (d- f) e trajetória das gotas nos experimentos com maior quantidade de bolhas inseridas (g-i), na vazão de líquido de 125 l/h



Fonte: Autoria própria

A aleatoriedade do movimento é atestada pelo fato de que as trajetórias das gotas são intercambiáveis e não relacionadas à posição inicial escolhida. Além disso, na ausência de escoamento de bolha representado nas figuras de (a-c), um movimento de recirculação claro é observado com as gotículas fluindo ao longo da corrente de líquido nas duas vazões maiores (94 e 125 l/h). Além disso, nestes mesmos casos, as gotas de óleo tendem a escapar pela saída de água, após um caminho de subida mais longo e tempo de retenção antes de cruzar a interface

ar-água ou sair da câmara com o escoamento de água. Em resumo, o rastreamento das gotas representativas dentro do maior escoamento de líquido confirma o comportamento geral descrito na Figura 58, Figura 59, Figura 60 e Figura 61 em (a-c). Quanto as vazões de líquido menores (54 e 74 l/h) não há recirculação conforme rastreamento das bolhas representativas, mas o movimento das gotas ocorre lentamente, uma avaliação mais detalhada do tempo de retenção das gotas e do comportamento de saída será discutida posteriormente.

Um comportamento diferente é observado quando o escoamento de bolhas é inserido na câmara, conforme mostrado na Figura 58, Figura 59, Figura 60 e Figura 61 em (d-f), quando inseridas menor quantidade de bolhas, ou seja, menor fração de gás no sistema. Tanto o tempo de retenção quanto o caminho de subida são substancialmente reduzidos quando comparados ao caso da análise anterior, somente com injeção de gotas. As gotas dispersas tendem a seguir o escoamento de líquido nas proximidades do bocal de entrada, quando um caminho quase horizontal é observado para todas as gotas analisadas, em todas as vazões de líquido. Esse comportamento é observado em uma posição horizontal abaixo de 150 mm, aproximadamente, ponto em que as bolhas inseridas interagem com as gotas e seu comportamento é afetado. As gotas então experimentam um caminho virtualmente retilíneo na direção para cima. Desse modo, pode-se inferir que as gotas de óleo agora fluem ao longo da corrente da bolha e não do líquido, provável consequência dos efeitos hidrodinâmicos que surgem das forças que atuam sobre a população de bolhas. Também é perceptível que a distribuição aleatória é menos evidente quando as bolhas são inseridas na câmara. Comportamento semelhante é observado para todas as gotas analisadas, que se distribuem de maneira mais uniforme pela câmara. Finalmente, é razoável considerar que as medidas são representativas, uma vez que um comportamento semelhante é observado para todos os testes em triplicata, dentro de cada vazão de líquido analisada. Um comportamento semelhante é observado quando o escoamento de bolhas inserido na câmara é maior, ou seja, maior fração de gás no sistema, conforme mostrado na Figura 58, Figura 59, Figura 60 e Figura 61 (g- i), com diferenças no tempo de permanência dentro da câmara, uma avaliação mais detalhada do tempo de retenção das gotas será discutida posteriormente.

Portanto, ao se analisar as trajetórias das gotas de óleo representativas no interior da câmara, é notável que a inserção de bolhas influencia o escoamento dessas gotas. A eficiência da separação é aumentada reduzindo o tempo de retenção e a distância percorrida pelas gotas. Além disso, os efeitos gravitacionais são aumentados pela presença das bolhas, e as gotas não são mais carregadas pelo escoamento de líquido, reduzindo o número de gotas que saem pela saída de água. Isso pode ser explicado pela velocidade induzida pelo líquido promovida pelo

escoamento das bolhas (ELLINGSEN; RISSO, 2001), que leva a diversos efeitos hidrodinâmicos e interações bolha-gota, conforme mencionado anteriormente neste estudo. As forças inerciais das bolhas prevalecem no escoamento, superando assim os efeitos da viscosidade na superfície da bolha (ZHOU; ZHAO; BO, 2020).

Uma análise quantitativa da eficiência da separação promovida pela inserção das bolhas é realizada por meio dos tempos de retenção cuja faixa é mostrada na 6, Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9. E também complementado pela Figura 62, Figura 63, Figura 64 e Figura 65 que apresenta o tempo de retenção de cada gota em triplicata nas 5 posições definidas na Figura 57, nas diferentes vazões de líquido. Nestas tabelas e figuras comparam-se o tempo de permanência na câmara nos casos apenas com gotas, no caso com bolhas e gotas com menor fração de gás e no caso com bolhas e gotas com maior fração de gás.

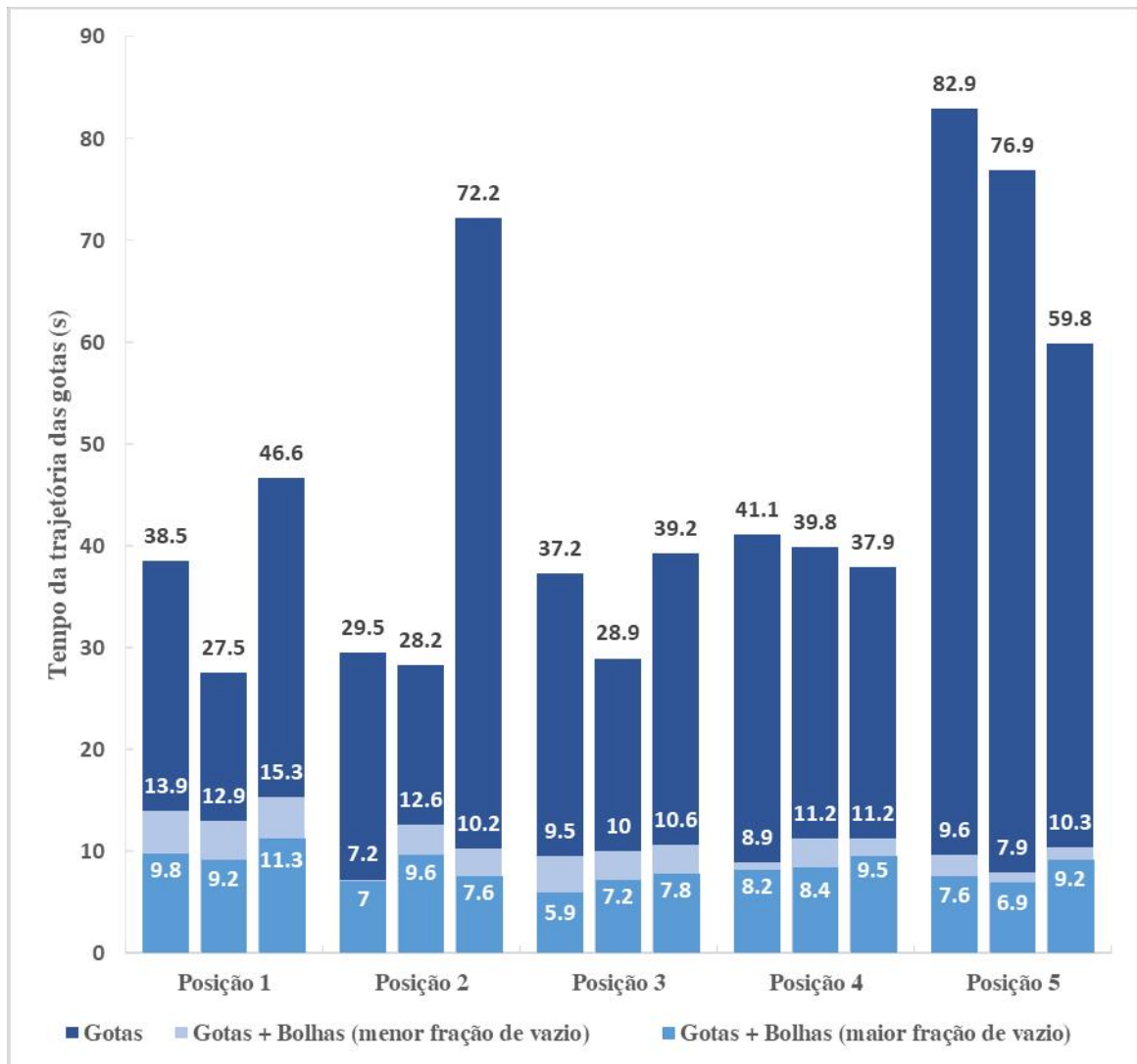
O tempo de retenção das gotas representativas é definido como o tempo entre uma gota que entra e sai da câmara e é fornecida pela rotina desenvolvida do Matlab. Os casos analisados nas tabelas e figuras são as mesmas medidas para as quais as trajetórias apresentadas anteriormente. Em resumo, as medidas do tempo de retenção corroboram as observações anteriores quanto à eficiência da separação das gotas. Sem a população de bolhas, as gotas são submetidas a uma ampla gama de tempos de retenção, principalmente nas vazões de líquido menores de 54 e 74 l/h, mostrados na 6 e Tabela 7, assim sugerindo um comportamento aleatório que impede a previsão do comportamento cinemático dentro da câmara. No entanto, esse comportamento estocástico não é mais observado uma vez que as bolhas são inseridas, e as medições caem em uma faixa mais estreita, da qual uma estimativa precisa do tempo de retenção é habilitada. Além disso, os tempos de retenção são evidentemente reduzidos pela presença das bolhas, evidenciado ainda mais quando se aumenta a quantidade de bolhas injetadas, indicando que o movimento de recirculação dentro da câmara é perdido e o efeito de flutuação das gotas é diminuído como consequência do movimento das bolhas, cujo efeito é significativo a partir de um ponto de vista estatístico. Assim, uma separação gravitacional é habilitada mesmo para um escoamento de líquido relativamente alto e pequenas gotas dispersas.

Tabela 6 – Comparação dos tempos de permanência da gota nos três tipos de experimentos realizados, realizados em triplicata (3 medições), vazão de líquido de 54 l/h

	Medição 1 (s)	Medição 2 (s)	Medição 3(s)
Gotas	29.5 – 82.9	27.5 – 76.9	37.9 – 72.2
Gotas + Bolhas (menor fração de gás)	7.2 – 13.9	7.9 – 12.9	10.2 – 15.3
Gotas + Bolhas (maior fração de gás)	5.9 – 9.8	6.9 – 9.6	7.6 – 11.3

Fonte: Autoria própria

Figura 62 – Tempo de retenção das trajetórias das três gotas nas cinco posições diferentes, para experimento somente com gotas, gotas e bolhas com menor fração de gás e gotas e bolhas com maior fração de gás, com vazão de líquido de 54 l/h



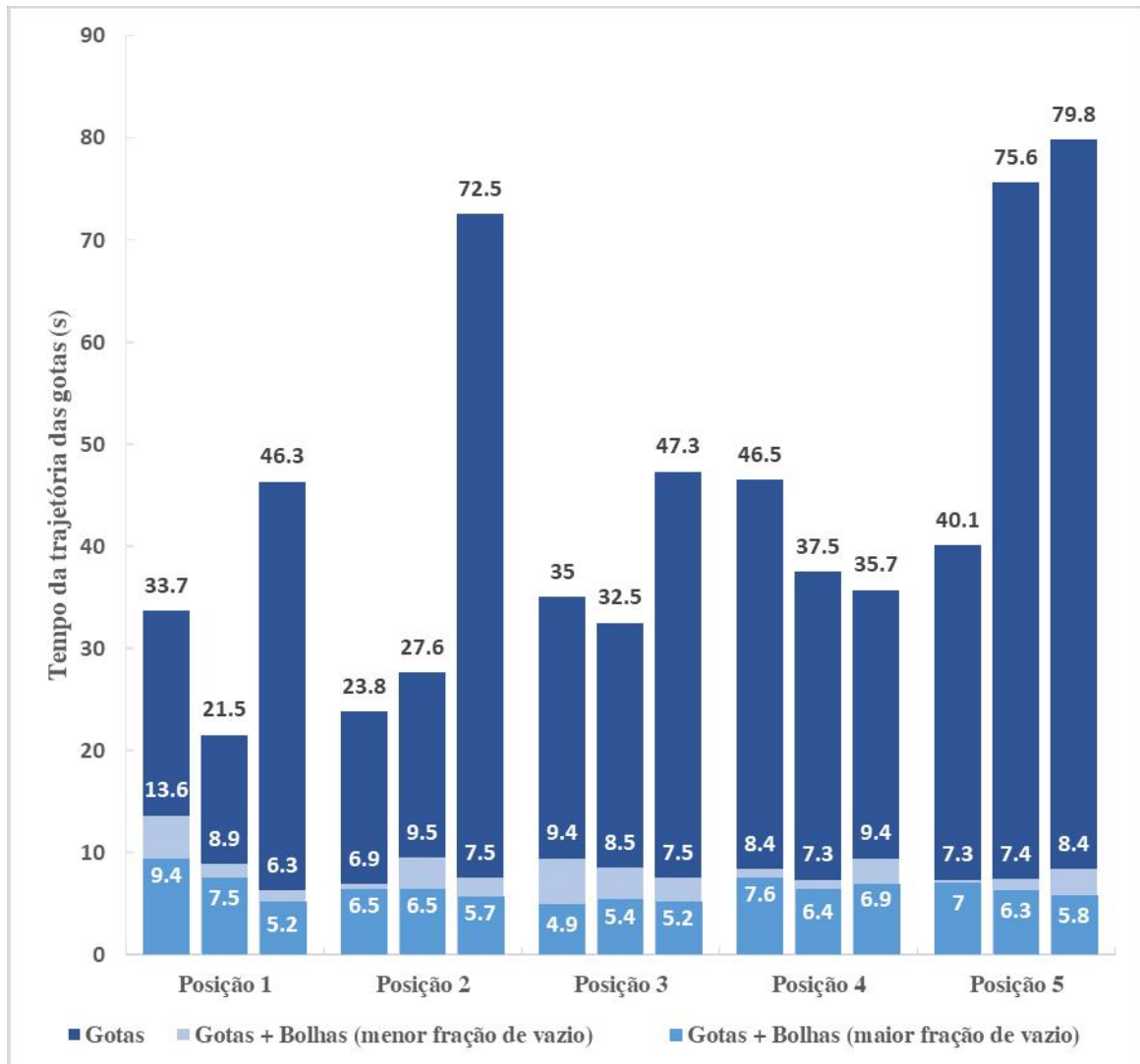
Fonte: Autoria própria

Tabela 7 – Comparação dos tempos de permanência da gota nos três tipos de experimentos realizados, realizados em triplicata (3 medições), vazão de líquido de 74 l/h

	Medição 1(s)	Medição 2 (s)	Medição 3 (s)
Gotas	23.8 – 46.5	21.5 – 75.6	35.7 – 79.8
Gotas + Bolhas (menor fração de gás)	6.9 – 13.6	7.3 – 9.5	6.3 – 9.4
Gotas + Bolhas (maior fração de gás)	4.9 – 9.4	5.4 – 7.5	5.2 – 6.9

Fonte: Autoria própria

Figura 63 – Tempo de retenção das trajetórias das três gotas nas cinco posições diferentes, para experimento somente com gotas, gotas e bolhas com menor fração de gás e gotas e bolhas com maior fração de gás, com vazão de líquido de 74 l/h



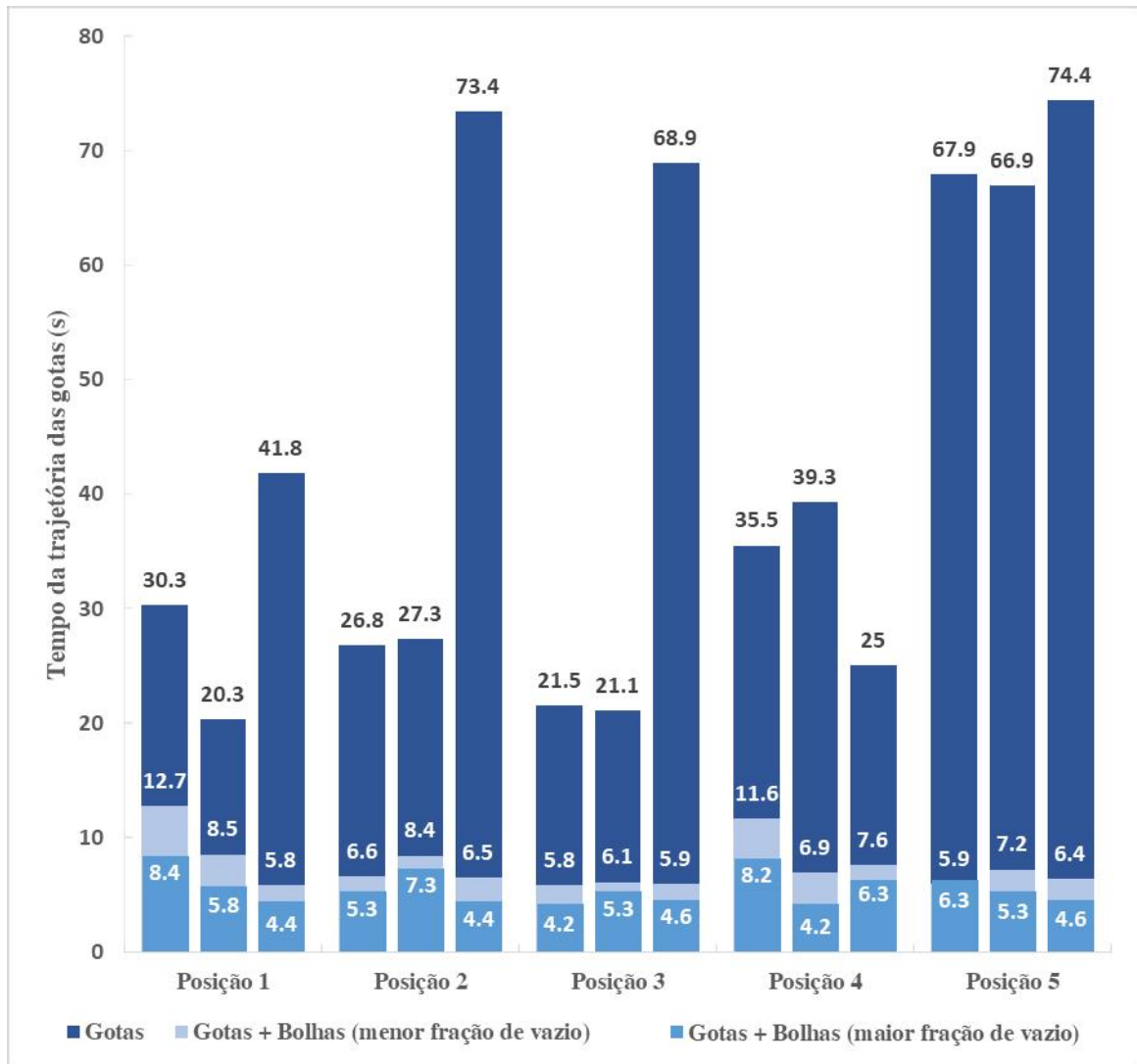
Fonte: Autoria própria

Tabela 8 – Comparação dos tempos de permanência da gota nos três tipos de experimentos realizados, realizados em triplicata (3 medições), vazão de líquido de 94 l/h

	Medição 1(s)	Medição 2 (s)	Medição 3 (s)
Gotas	21.5 – 67.9	20.3 – 66.9	25 – 74.4
Gotas + Bolhas (menor fração de gás)	5.8 – 11.6	6.1 – 8.5	5.8 – 7.6
Gotas + Bolhas (maior fração de gás)	4.2 – 8.4	5.3 – 7.3	4.4 – 6.3

Fonte: Autoria própria

Figura 64 – Tempo de retenção das trajetórias das três gotas nas cinco posições diferentes, para experimento somente com gotas, gotas e bolhas com menor fração de gás e gotas e bolhas com maior fração de gás, com vazão de líquido de 94 l/h



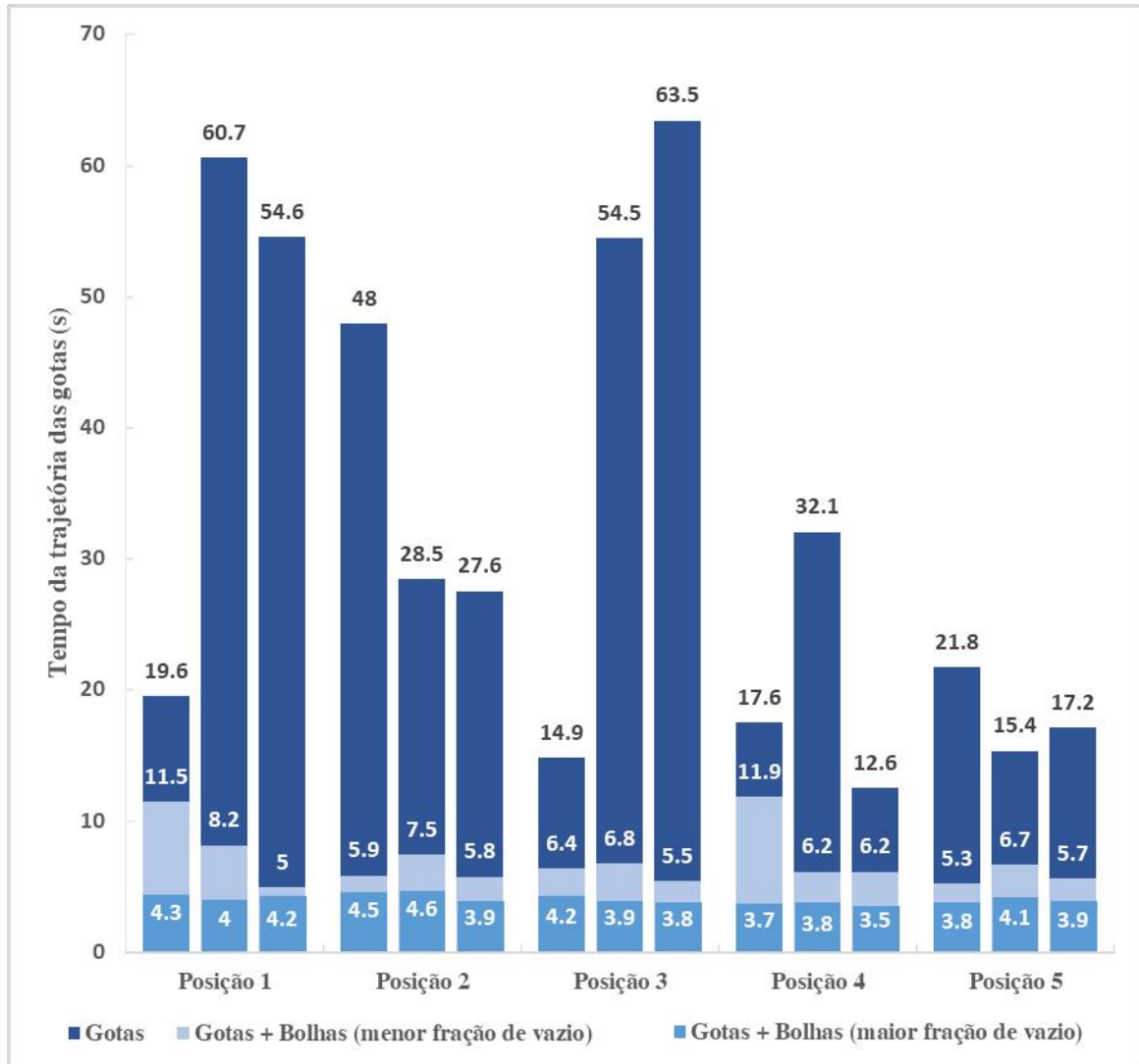
Fonte: Autoria própria

Tabela 9 – Comparação dos tempos de permanência da gota nos três tipos de experimentos realizados, realizados em triplicata (3 medições), caso de maior vazão de líquido (125 l/h)

	Medição 1(s)	Medição 2 (s)	Medição 3 (s)
Gotas	14.9 – 48.0	15.4 – 60.7	12.6 – 63.5
Gotas + Bolhas (menor fração de gás)	5.3 – 11.9	6.2 – 8.2	5.0 – 6.2
Gotas + Bolhas (maior fração de gás)	3.7 – 4.5	3.8 – 4.6	3.5 – 4.2

Fonte: Autoria própria

Figura 65 – Tempo de retenção das trajetórias das três gotas nas cinco posições diferentes, para experimento somente com gotas, gotas e bolhas com menor fração de gás e gotas e bolhas com maior fração de gás, com vazão de líquido de 125 l/h



Fonte: Autoria própria

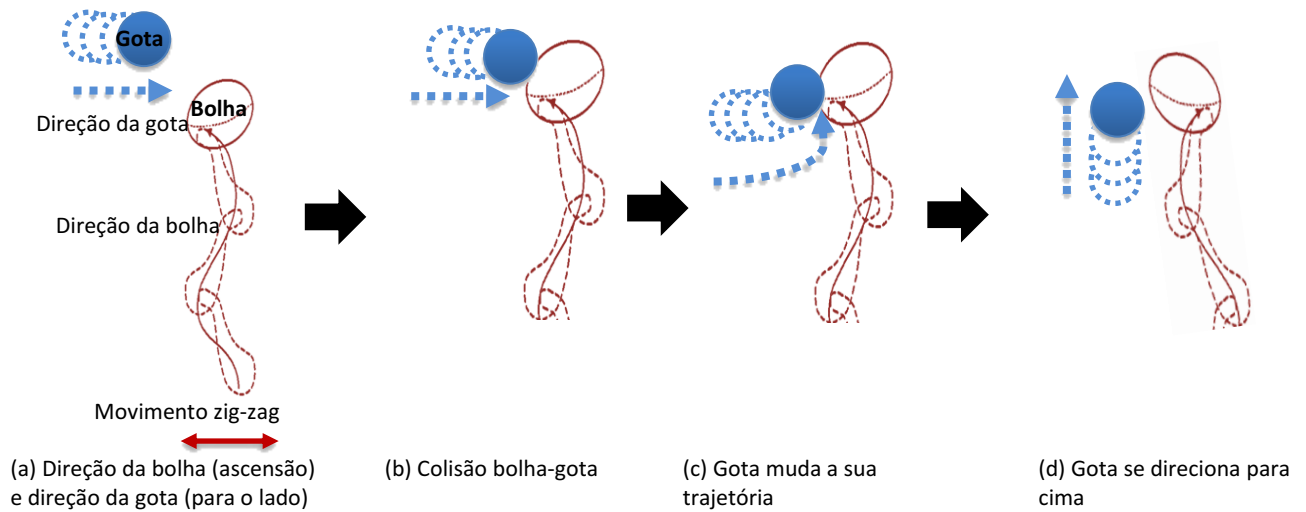
A influência da população de bolhas, tanto para menor quanto maior fração de gás também pode ser identificada a partir das medições mostradas na Figura 62, Figura 63, Figura 64 e Figura 65. Evidenciando que a vazão de líquido afeta proporcionalmente o escoamento. Os tempos de retenção das gotas representativas são divididos em cinco posições, de acordo com a localização das gotas na vizinhança do bocal de entrada (ver Figura 57). Para cada gota representativa, as medições dos testes em triplicata são mostradas, indicando a diminuição substancial no tempo de retenção para cada medição quando a população de bolhas é adicionada ao sistema. Além disso, as medições sugerem que o comportamento estocástico observado para as gotas com flutuabilidade neutra é perdido, devido à estreita faixa de dados percebida com o escoamento das bolhas.

Nesta análise, a seleção em diferentes posições é realizada porque o movimento da gota é estocástico e caótico, assim como o comportamento de uma gota é imprevisível, de acordo com relatos semelhantes da literatura em Kikuchi et al. (1997), Slater et al. (2008) e Zhuang, Chen e Liu (2016). Nessa condição de operação entre todas as variações de vazão de líquido, com apenas gotas, os tempos de retenção das gotas variam de 12,6 a 82,9 segundos, enquanto a adição da população de bolhas (menor fração de gás) reduz essa faixa de 5,0 a 15,3, e, enquanto a adição da população de bolhas (maior fração de gás) reduz essa faixa de 3,5 a 11,3, aproximadamente.

5.1.2.4 Análise da interação entre bolhas e gotas

Além da velocidade da gota aumentar com a inserção de bolhas no escoamento, para complementar essa análise, faz-se o diagnóstico de outros fatores envolvidos, comparando assim casos dos experimentos realizados. Com o processamento das imagens e observação visual de uma sequência de imagens, é possível verificar a interação entre bolhas e gotas, como o choque ou colisão, representado no esquema da Figura 66.

Figura 66 – Esquema representativo da colisão entre uma bolha e uma gota

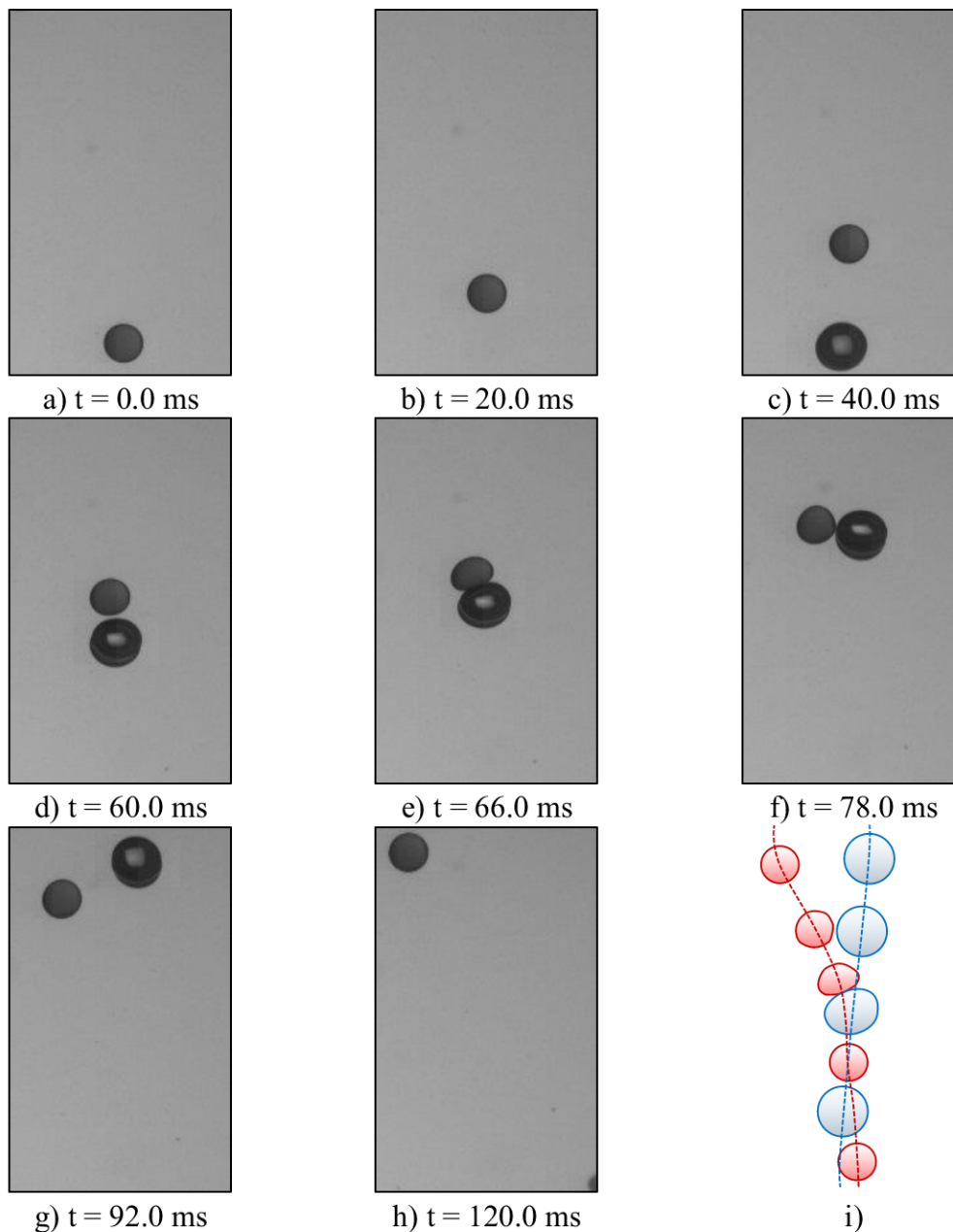


Fonte: Autoria própria

A Figura 67 apresenta movimentos instantâneos sequenciais de uma bolha de gás e uma gota de óleo que sofre um processo de colisão. O principal objetivo dessas medições é identificar a interação bolha-gota com detalhes.

A análise começa com uma única gota de óleo com um diâmetro equivalente a 2,0 mm com forma aproximadamente esférica (Figura 67a) subindo em um movimento direto para cima. Uma bolha de gás sobe mais rápido da parte inferior da estrutura (Figura 67c) e se aproxima da gota de óleo (Figura 67d). Eventualmente, a bolha ascendente colide com a gota (Figura 67e), cuja troca de momento leva a uma deformação da superfície da gota e a uma mudança na trajetória. Por um curto período, a velocidade de subida da gota é aumentada por um fator de aproximadamente 100%, até que o efeito de salto seja percebido (Figura 67f) e o movimento individual da bolha e da gota seja restabelecido (Figura 67g). Este efeito, promovido por uma colisão de gota-bolha, é ilustrado na Figura 67i, na qual a forma e a trajetória das partículas são mostradas. É notável que o momento adicionado durante a colisão é suficiente para aumentar os efeitos gravitacionais que atuam sobre a gota, neutralizando sua flutuabilidade quase neutra.

Figura 67 – Instantâneos da colisão de gotas de bolha. (a - b) movimento de gotículas individuais; (c - d) aparecimento de uma bolha de gás e sua aproximação em direção às gotas; (e) colisão de gota-bolha; (f) quicando; (g - h) restabelecimento da trajetória individual; e (i) trajetórias individuais de bolha (azul) e gota (vermelho) antes e depois da colisão



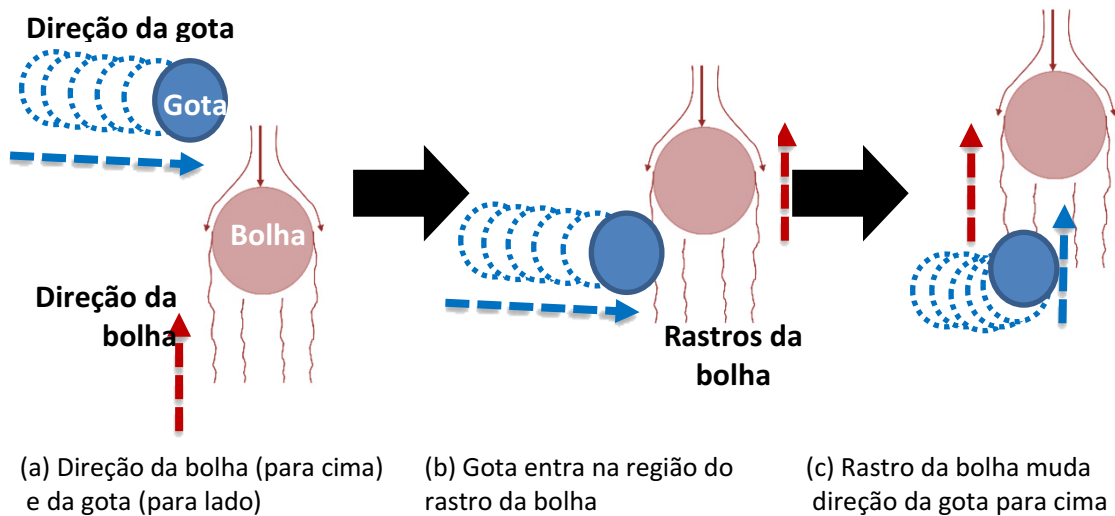
Fonte: Autoria própria

Além disso, nos experimentos realizados neste estudo, os tamanhos das gotas são substancialmente reduzidos quando comparados com o tamanho das bolhas, possibilitando assim a distinção durante o processamento da imagem e, assim, o efeito da colisão bolha-gota torna-se mais evidente. Deve-se notar que a colisão entre uma bolha e uma gota, por mais

relevante que seja, requer que ambas as partículas estejam dentro da região de colisão, i. e., quando seus caminhos ascendentes acabarão por coincidir, como mostrado na Figura 67i.

A Figura 68 mostra esquematicamente um outro fenômeno, o arraste da gota pelo rastro da bolha, interação percebida nos experimentos realizados, no qual a gota escoava na direção x com velocidade lenta até encontrar a bolha escoando para cima em velocidade maior, sendo que na parte traseira da bolha tem-se os vórtices ou esteiras provocadas pelo escoamento e movimento de trajetória da bolha. Portanto a gota entra no rastro ou esteira da bolha, e acaba modificando sua trajetória e velocidade, pois a ascensão das bolhas causa uma diferença de velocidades entre a fase líquida contínua (água) e a interface entre o gás-líquido, sendo que por isso é possível observar um regime de escoamento ao redor da bolha e consequentemente o aparecimento do rastro. Quando uma bolha está em ascensão o rastro surge na região inferior da bolha, numa região contrária a que vai de encontro com o fluido.

Figura 68 – Esquema representativo do arraste da gota pelo rastro da bolha



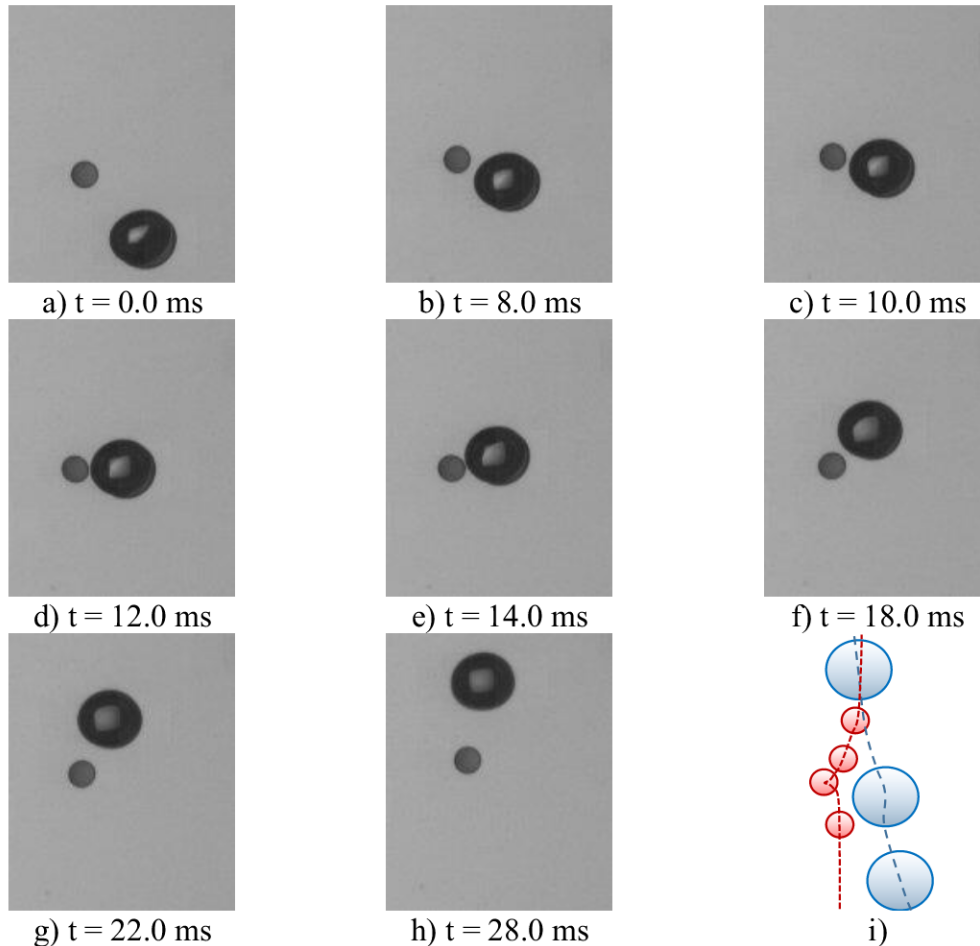
Fonte: Autoria própria

A Figura 69 mostra instantâneos de uma bolha de gás se aproximando de uma gota de 0,8 mm, para o caso em que suas trajetórias ascendentes não se sobrepõem e, portanto, a colisão não ocorre. Embora seja esperado que o fenômeno de colisão ocorra frequentemente em uma população de bolhas, muitas situações envolvem o efeito de “quase colisão”, no qual os efeitos hidrodinâmicos também são relevantes. Conforme mostrado na Figura 69 (a), uma bolha de gás se aproxima de uma gota de óleo até que suas camadas limites se sobreponham (Figura 69c),

para o qual o movimento da gota é afetado de forma indireta, ou seja, quando a colisão não é perceptível.

No entanto, quando a lamela de líquido formada entre as bolhas e a gota é suficientemente pequena, a gota é capturada pela esteira da bolha. No presente estudo, esse fenômeno é denominado arrasto da gota e é observado quando a bolha é significativamente maior do que a gota, cujo diâmetro equivalente é aproximadamente igual aos vórtices em gancho que se formam na parte traseira da bolha. Nesse cenário, a trajetória ascendente da gota é redirecionada para a bolha (Figura 69c-f), levando a um aumento na velocidade de ascensão de aproximadamente 80%. Este efeito não é permanente e a gota se desprende da esteira da bolha, como consequência do derramamento dos vórtices. Em seguida, as trajetórias individuais são restabelecidas (Figura 69h). O resumo dessa interação hidrodinâmica é mostrado na Figura 69i, que mostra a trajetória da gota e da bolha.

Figura 69 – Instantâneos da interação hidrodinâmica bolha-gota. (a) abordagem; (b - d) superposição da camada limite; (e - g) captura da gota pela esteira da bolha; (h) restabelecimento do movimento individual; e (i) adquiriu trajetórias individuais de bolha (azul) e gota (vermelho) antes e depois da colisão. Os diâmetros equivalentes de bolha e gota são de aproximadamente 2,5 e 0,8 mm, respectivamente

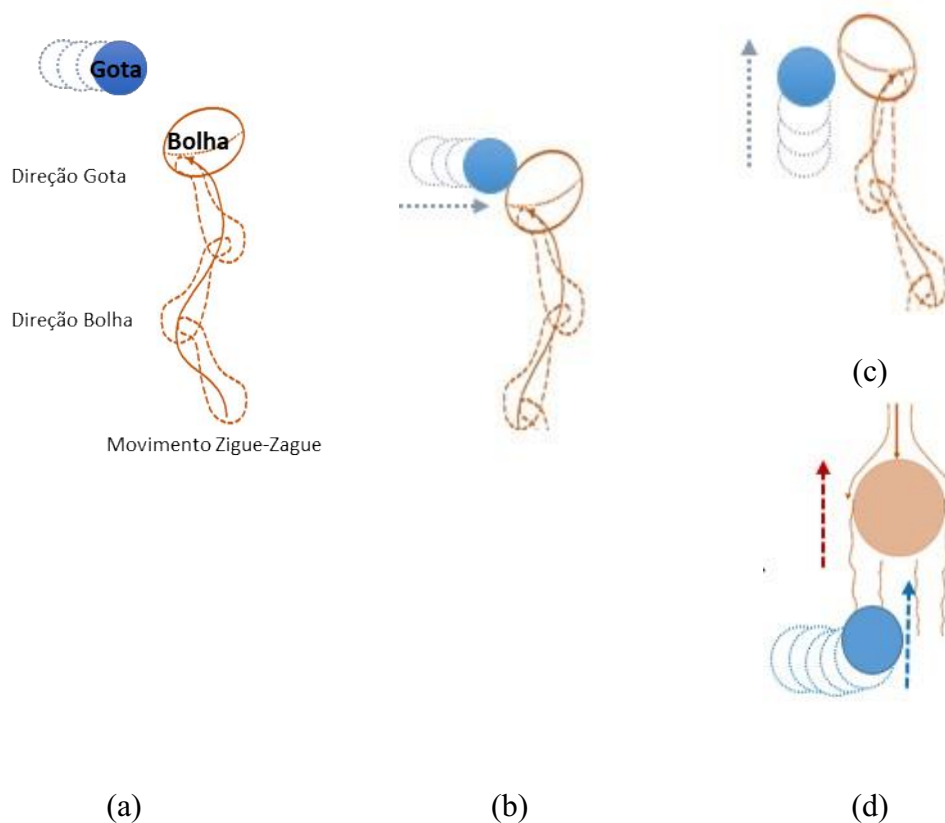


Fonte: Autoria própria

O comportamento geral dos efeitos hidrodinâmicos da interação bolha-gota é mostrado esquematicamente na Figura 70. A Figura 70a mostra o caso quando uma bolha de gás se aproxima de uma gota crescente. Devido ao aumento dos efeitos de fluatibilidade, a bolha sobe mais rápido e a distância entre os dois centróides é reduzida. Além disso, a aproximação da bolha na gota promoveu a formação e drenagem de um filme líquido entre elas. Uma vez que a espessura desta lamela de líquido é suficientemente reduzida, as camadas limites da gota e da bolha ficam sobrepostas, ou seja, o movimento da gota é diretamente afetado pela bolha. Conforme mostrado na Figura 70b, este estágio também é mútuo para ambas as condições em relação à interação bolha-gota.

A Figura 70b também mostra que a colisão da gota com a bolha é uma consequência direta da sobreposição de suas trajetórias, com a gota dentro da faixa de colisão da bolha oscilatória (Figura 70c). Assim, o contato físico entre as partículas permite a troca de momento e um efeito gravitacional temporariamente aumentado que permite que a gota seja separada da corrente de líquido. Dependendo do estágio de abordagem, a gota pode não colidir com a bolha (Figura 70d). Nessas situações de escoamento, a superposição das camadas limites sugere que a gota pode sofrer um comportamento de arrasto, ficando por um período presa dentro dos vórtices em forma de gancho enquanto a bolha sobe ao longo da gota.

Figura 70 - Esquema das possíveis interações bolha-gota. (a) abordagem; (b) superposição de camadas limite; (c) colisão e choque; e d) captura da gota pela esteira da bolha



Fonte: Autoria própria

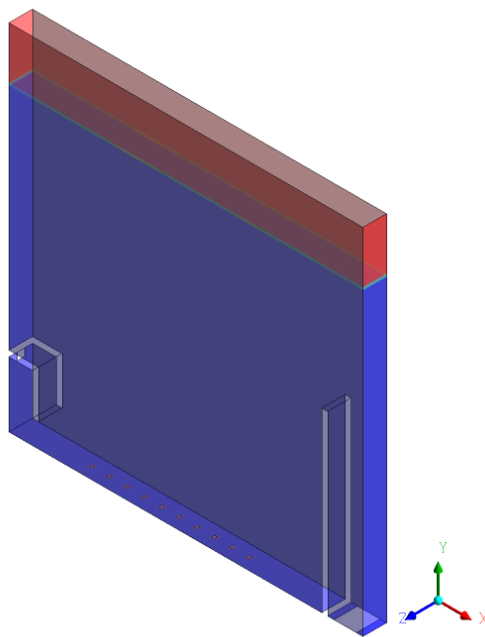
Como observação final, a ocorrência desses fenômenos é estocástica e a taxa com que ocorrem dentro da câmara pode ser estimada qualitativamente (OLIVEIRA; GONZALEZ; OLIVEIRA, 1998). Além disso, é virtualmente impossível determinar qual processo tem maior probabilidade de ocorrer com base nas características do escoamento. No entanto, as medições

apresentadas neste estudo sugerem fortemente que a presença da população de bolhas é suficiente para aumentar os efeitos gravitacionais que as gotas de óleo finamente dispersas sofrem, caso contrário, as gotas de óleo finamente dispersas estariam diretamente associadas ao movimento do líquido e uma separação do escoamento é impedida. Propõe-se, portanto, que o papel dos efeitos hidrodinâmicos que surgem a partir da colisão e arrasto de gotículas é essencial para uma separação eficiente.

5.2 RESULTADOS NUMÉRICOS

As propriedades da fase contínua (água) possuem grande influência na fluidodinâmica em um escoamento com partículas, como: a velocidade terminal das bolhas e a transferência de quantidade de movimento entre as fases. Para avaliar esta influência foram estudados numericamente quatro sistemas, isto é, um caso que simula o escoamento apenas do líquido, outro contendo água e injeção de bolhas, outro caso contendo somente água e gotas de óleo e um quarto caso com água, óleo e ar. Em todos, variaram-se as vazões de entrada de líquido, mantendo a injeção de gás e óleo constante, conforme procedimento experimental. Na Figura 71 o corpo de líquido é mostrado, mantém-se constante a altura ao longo das simulações, onde a cor azul foi utilizada para representar a água.

Figura 71 - Corpo de líquido obtido na simulação contendo apenas água



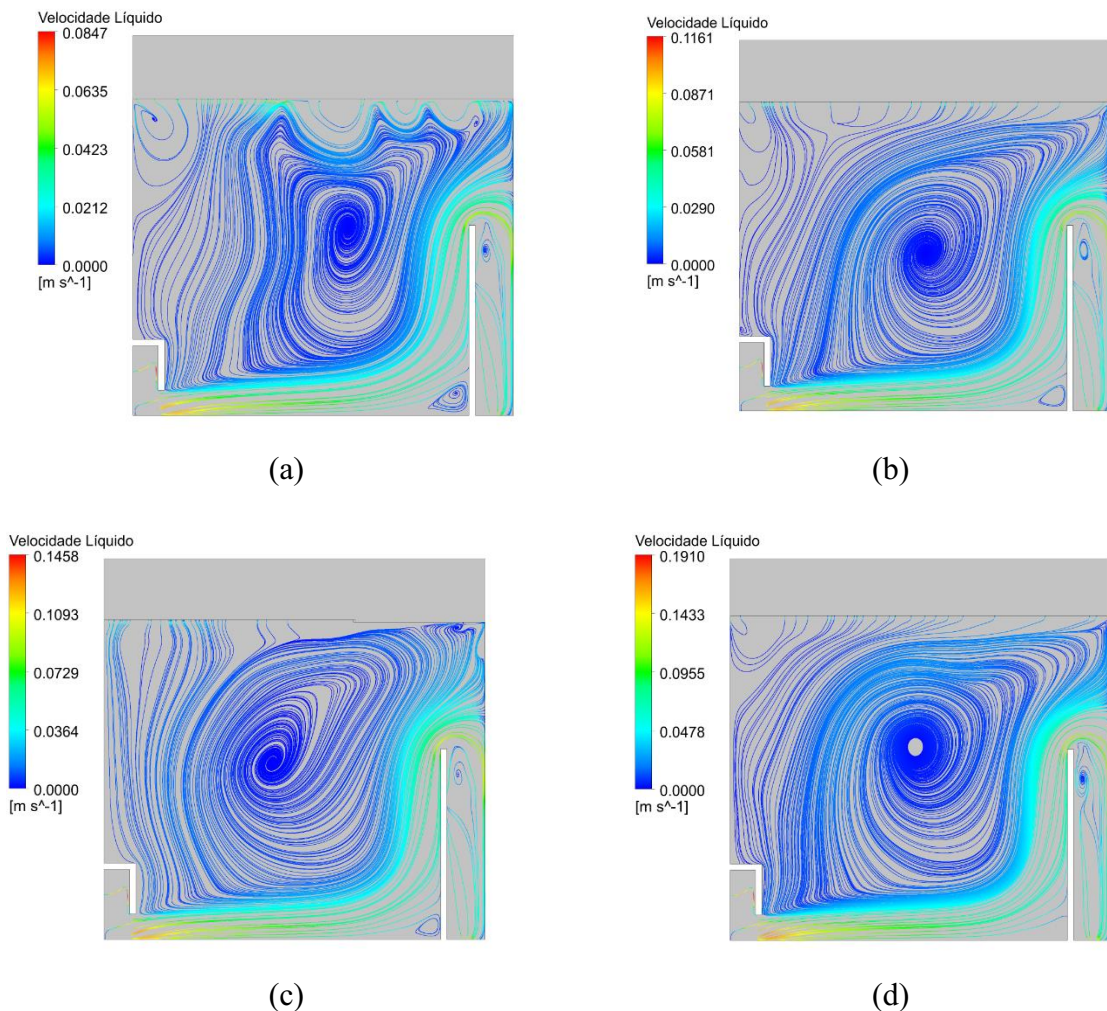
Fonte: Autoria própria

5.2.1 Simulação do escoamento de água

Essa simulação foi realizada com o intuito de explorar o campo de velocidade e as linhas de corrente da camada de água, a fim de tomar como base o escoamento sem a inserção de bolhas no inferior da câmara e sem a presença de óleo.

Mostram-se as linhas de corrente do líquido cujo domínio tem apenas água sendo injetada nas quatro vazões, conforme Figura 72.

Figura 72 - Vista frontal das linhas de corrente da água para a simulação contendo apenas água (a) vazão 54 l/h, (b) vazão 74 l/h, (c) vazão 94 l/h e (d) vazão 125 l/h



Fonte: Autoria própria

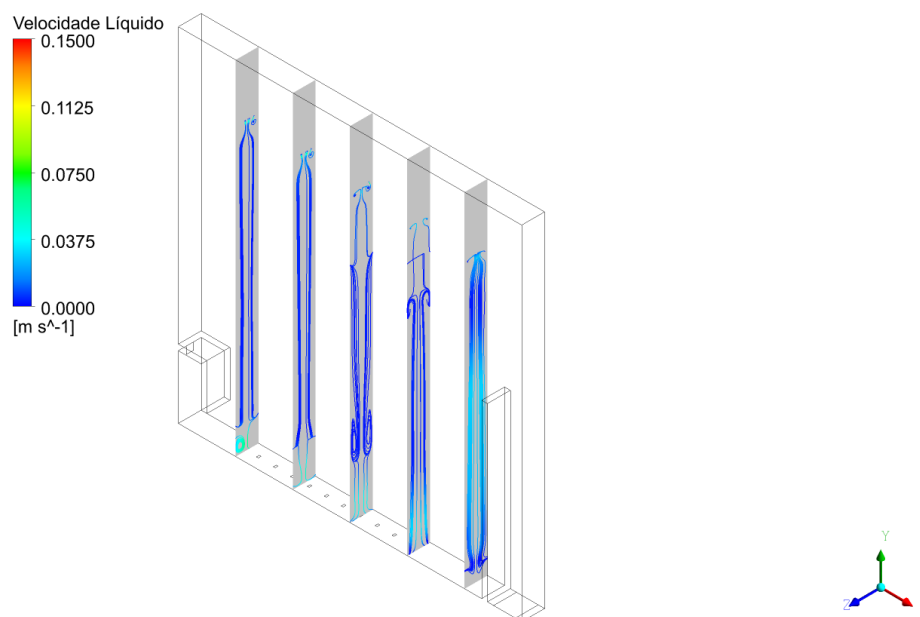
A Figura 72 tem vista frontal, plano x,y, exibindo as linhas de corrente da água. Com o aumento da vazão de 54 l/h em (a) para 125 l/h em (d) é observado a elevação na velocidade

do líquido no interior da câmara. Observa-se que quanto maior a vazão de entrada de líquido (água) a tendência é ter maior recirculação do fluido no interior da câmara (escoamentos secundários), isso pode ser visto qualitativamente no campo do líquido mostrado em (d), que inclusive apresenta vórtice centralizado e de maior intensidade. Já em (a) na menor vazão, existe a presença de instabilidade próximo a interface da água com o ar, com vórtice não definido. Essa instabilidade é explicada pela velocidade menor do fluido no interior da câmara, ocasionando recirculação com intensidade menor. Inclusive no caso de menor vazão (Figura 72 (a)) o vórtice formado pela recirculação está levemente deslocado a direita, devido existência do defletor e a velocidade do líquido ser menor. Enquanto com o aumento da vazão principalmente em (c) e (d) a recirculação se desenvolve por todo o domínio do equipamento.

Não é possível comparar estes resultados com os dados das medidas experimentais, pois com a metodologia aplicada neste estudo não é possível rastrear o comportamento do líquido experimentalmente. Neste caso, os resultados numéricos auxiliam e complementam na validação dos resultados experimentalmente obtidos, e é possível analisar também o escoamento no plano y,z para visualizar o escoamento secundário, que auxilia na interpretação e entendimento dos fenômenos que promovem a interação entre as bolhas e gotas.

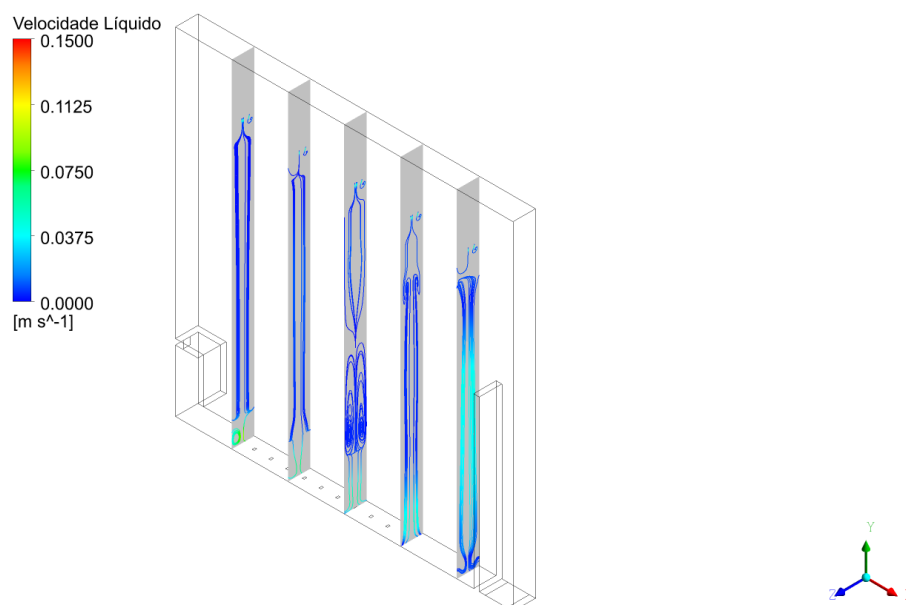
Entretanto, para verificar o escoamento secundário (planos y,z), apresentam-se na , Figura 75 - Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação contendo apenas água na vazão 94 l/h, Figura 75 e , o perfil de velocidade e comportamento do campo de líquido, em cada variação de vazão, 54 l/h , 74 l/h, 94 l/h e 125 l/h, respectivamente. Cada plano tem distância de 50 mm em si, e 50 mm das paredes do equipamento. Os escoamentos secundários são frequentemente descritos em termos de vórtices. Os vórtices introduzem mistura adicional ao escoamento, transportando material da camada limite de baixo para o fluxo principal e se dissipam.

Figura 73 - Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação contendo apenas água na vazão 54l/h



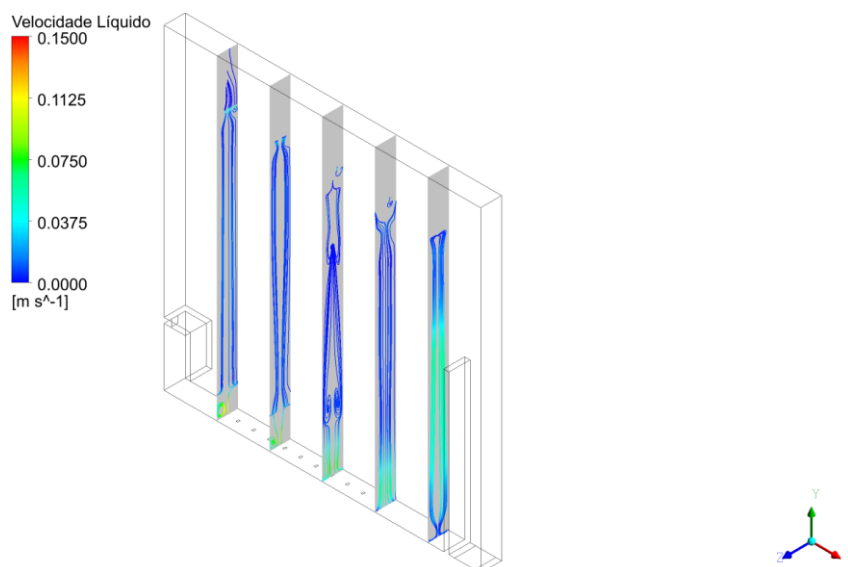
Fonte: Autoria própria

Figura 74 - Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação contendo apenas água na vazão 74 l/h



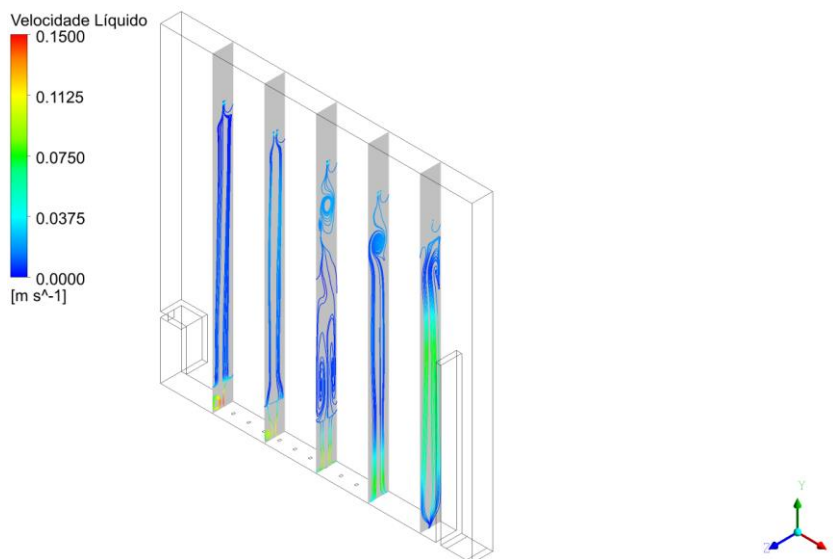
Fonte: Autoria própria

Figura 75 - Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação contendo apenas água na vazão 94 l/h



Fonte: Autoria própria

Figura 76 - Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação contendo apenas água na vazão 125 l/h



Fonte: Autoria própria

Com os planos y,z nas diferentes vazões na , Figura 75 - Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação contendo apenas água na vazão 94 l/h, Figura 75 e , nota-se que existe um escoamento secundário, com vórtices no centro da câmara e velocidade maior próximo a chicana.

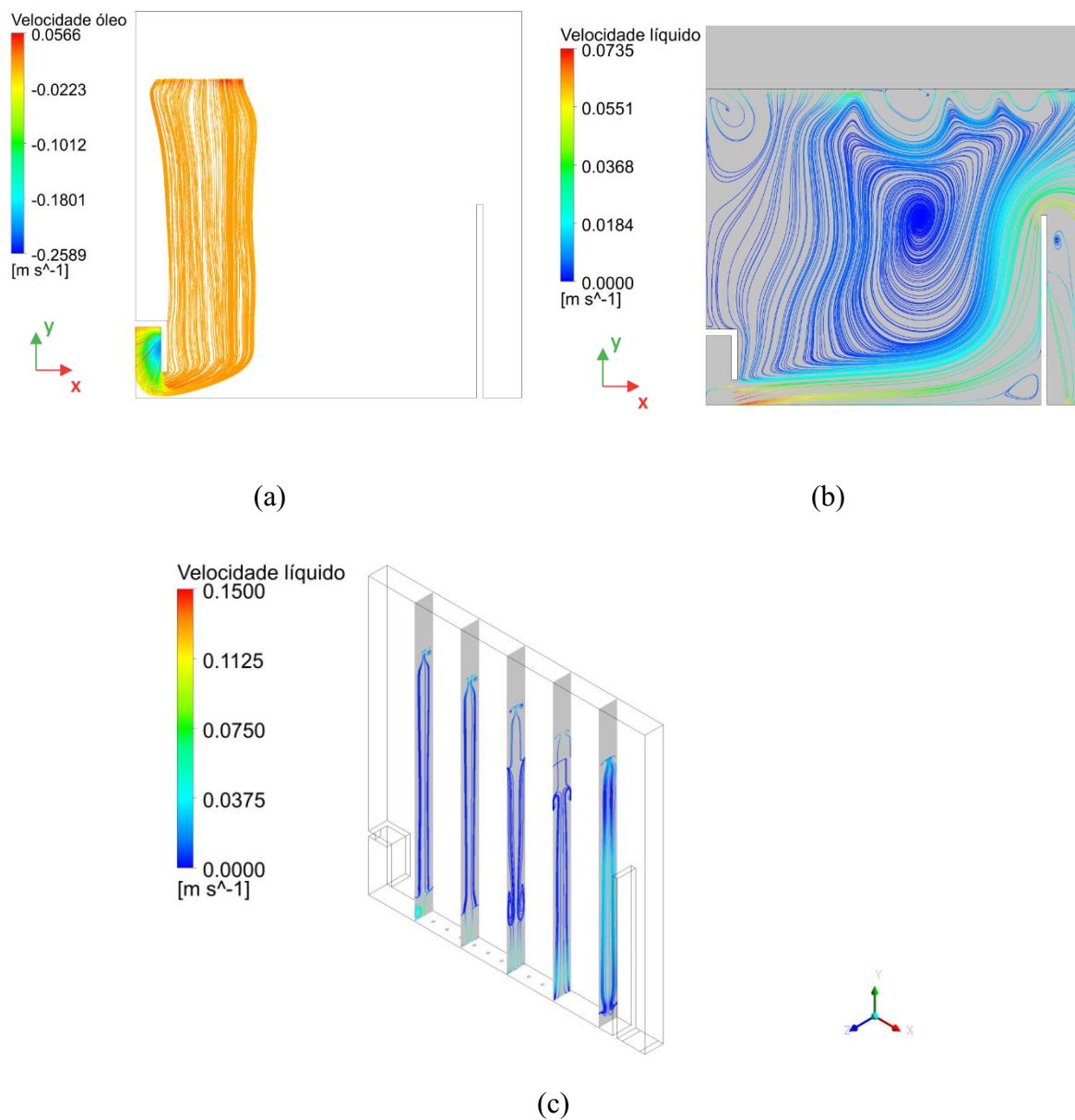
Conforme a vazão de líquido aumenta de 54 l/h para 125 l/h, a velocidade no interior da câmara também é afetada, aumentando-a, assim como também a intensificação do escoamento secundário. Na menor vazão () observa-se que o vórtice secundário é menos desenvolvido, devido a recirculação do líquido ser menos intensa. À medida que se aumenta a vazão de água, o vórtice central é desenvolvido e maior (Figura 75 - Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação contendo apenas água na vazão 94 l/h). Essa característica se destaca mais ainda nas vazões maiores (Figura 75 e), no qual além da característica do vórtice também se observa que a velocidade próximo a chicana é maior.

A turbulência criada pela recirculação do líquido influencia no desenvolvimento do vórtice no escoamento secundário, amplificada à medida que a vazão de líquido é aumentada e pela perturbação induzida pelo defletor na entrada. A frequência dos vórtices produzidos e a intensidade é proporcional a velocidade do escoamento do líquido. Os movimentos tridimensionais produzem instabilidades transversais que formam os vórtices longitudinais centrais. Contudo, nem sempre os vórtices apresentam a mesma configuração por se tratar de escoamento oscilante.

5.2.2 Comportamento das gotas no líquido

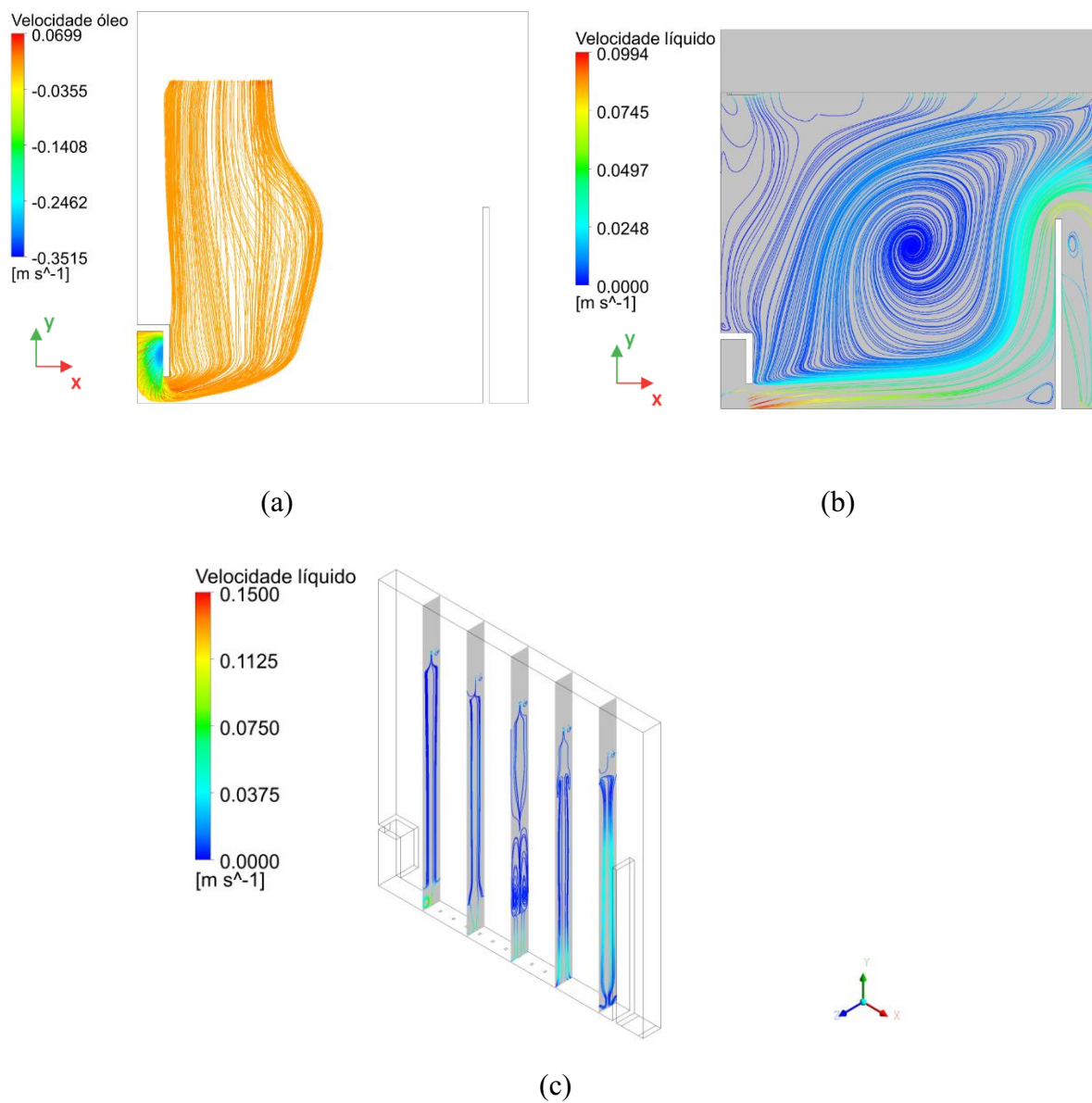
Essa simulação foi realizada com o intuito de explorar o campo de velocidade e as linhas de corrente da camada de água, a fim de tomar como base o escoamento sem a inserção de bolhas no inferior da câmara e com a presença de óleo. Com base nas simulações realizadas, mostram-se as linhas de corrente do líquido e do óleo cujo domínio tem água e gotas de óleo sendo injetada, na Figura 77, Figura 78, Figura 79 e Figura 80 na qual variam-se a vazão de entrada de líquido em 54 l/h, 74 l/h, 94 l/h e 125 l/h, respectivamente.

Figura 77 – Simulação com a vazão de entrada de líquido (54 l/h). Vista frontal das linhas de corrente do óleo em (a). Vista frontal das linhas de corrente da água em (b). Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação em (c)



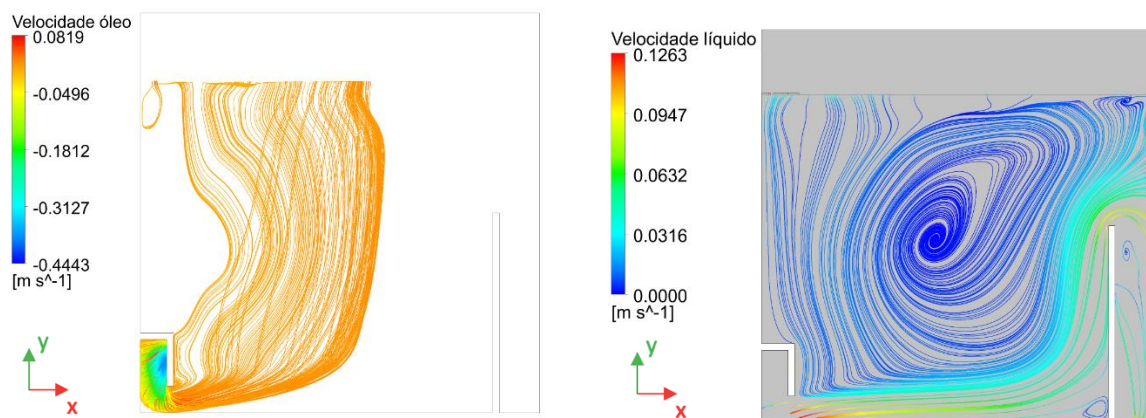
Fonte: Autoria própria

Figura 78 – Simulação com a vazão de entrada de líquido (74 l/h). Vista frontal das linhas de corrente do óleo em (a). Vista frontal das linhas de corrente da água em (b). Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação em (c)



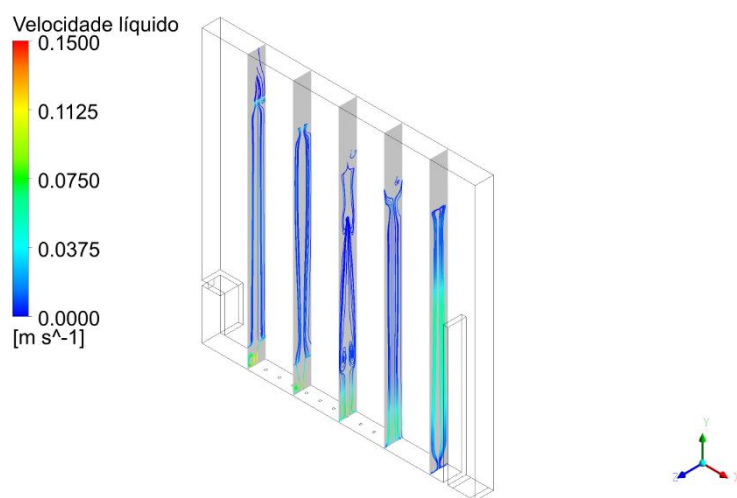
Fonte: Autoria própria

Figura 79 – Simulação com a vazão de entrada de líquido (94 l/h). Vista frontal das linhas de corrente do óleo em (a). Vista frontal das linhas de corrente da água em (b). Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação em (c)



(a)

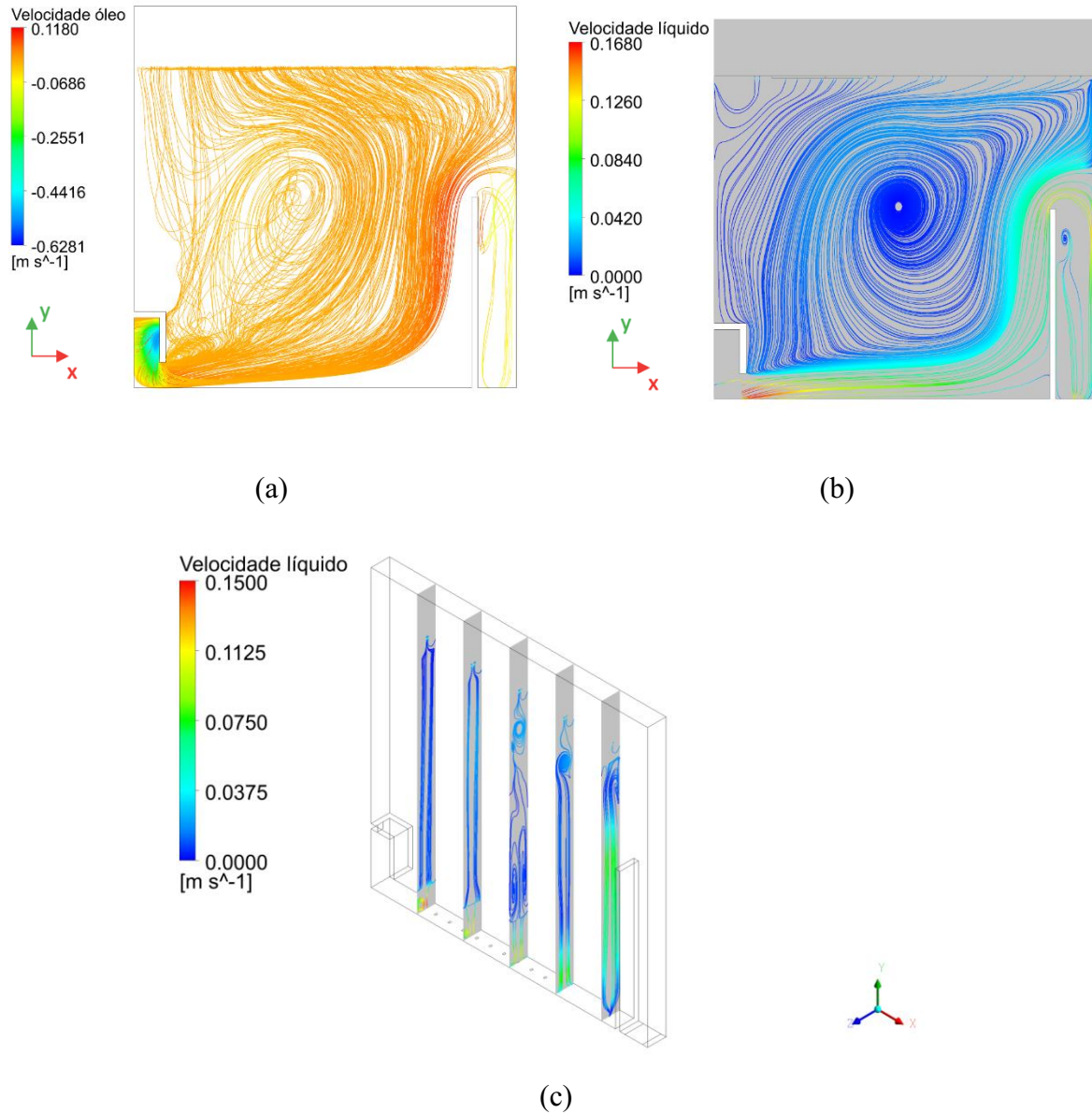
(b)



(c)

Fonte: Autoria própria

Figura 80 – Simulação com a vazão de entrada de líquido (125 l/h). Vista frontal das linhas de corrente do óleo em (a). Vista frontal das linhas de corrente da água em (b). Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação em (c)



Fonte: Autoria própria

Para cada caso de variação de vazão, em (a), apresentam-se as linhas de correntes de óleo, em (b) as linhas de corrente do líquido (água) e em (c) a vista lateral de 5 planos y,z de (b). Comparando estes resultados com injeção de óleo com os resultados anteriores (apenas líquido) percebe-se que não existe influência do óleo no campo de líquido. O escoamento secundário também não é afetado. Isso é explicado porque o óleo é injetado juntamente com a corrente de líquido, portanto essa fase dispersa acompanha a fase contínua sem alterá-la. As

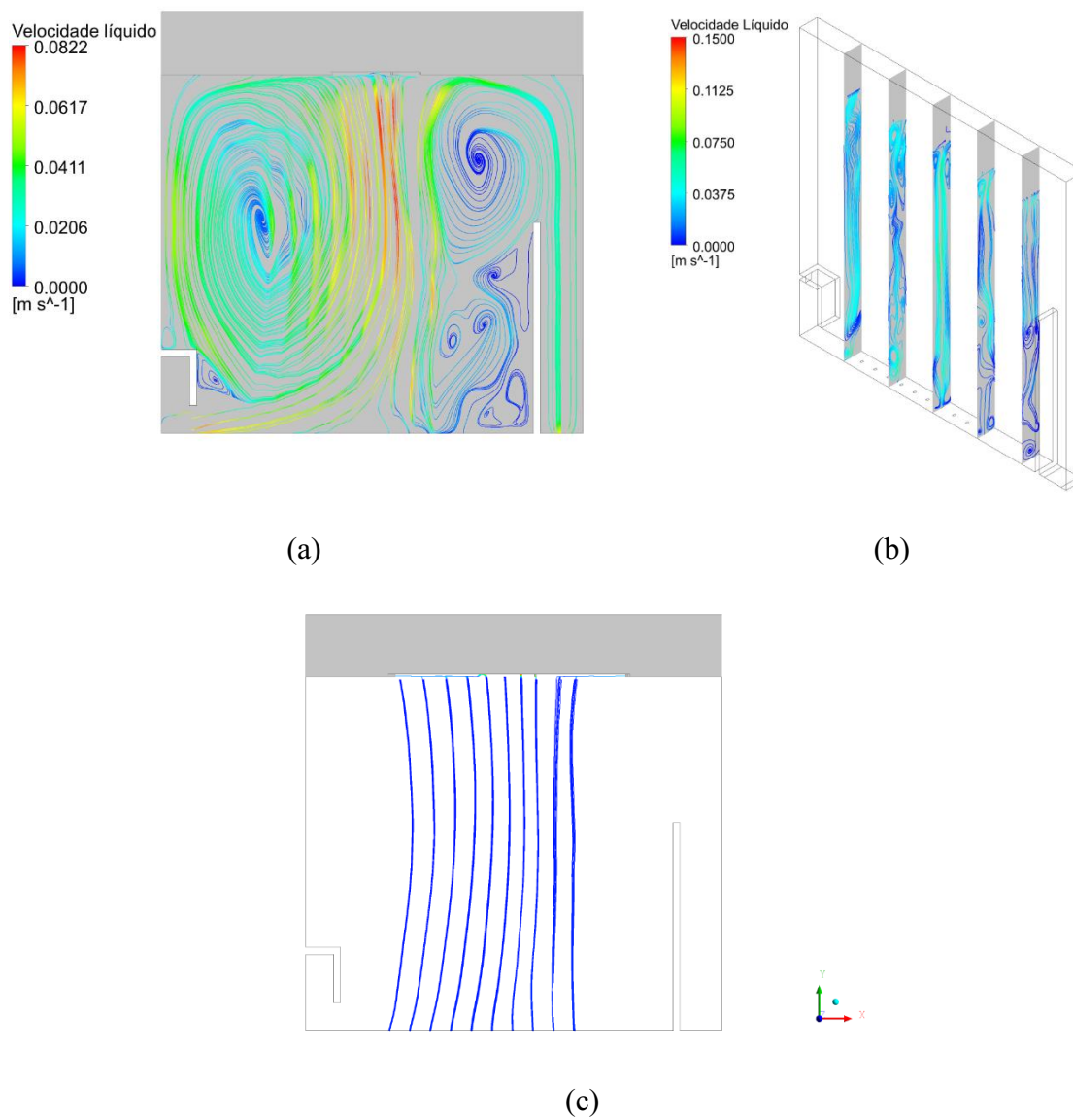
características observadas no escoamento do líquido neste sistema foram as mesmas observadas no sistema anterior (escoamento apenas do líquido). Os vórtices induzem mistura adicional ao escoamento, pois o giro do vetor de vorticidade induz a vorticidade no sentido da corrente, e, portanto, componentes de velocidade transversal são intensificados com o aumento da velocidade do líquido. Afetando diretamente o escoamento das gotas, como visto na Figura 80, em que as gotas recirculam. Portanto nesse caso reduzir o escoamento secundário deve beneficiar a eficiência geral, uma vez que as gotas podem escoar em caminhos preferenciais formados pelos vórtices. Para tanto, a inserção de bolhas pode amenizar o problema.

5.2.3 Comportamento das bolhas no líquido

Essa simulação foi realizada com o intuito de explorar o campo de velocidade e as linhas de corrente da camada de água, a fim de tomar como base o escoamento com a inserção de bolhas no inferior da câmara e sem a presença de óleo.

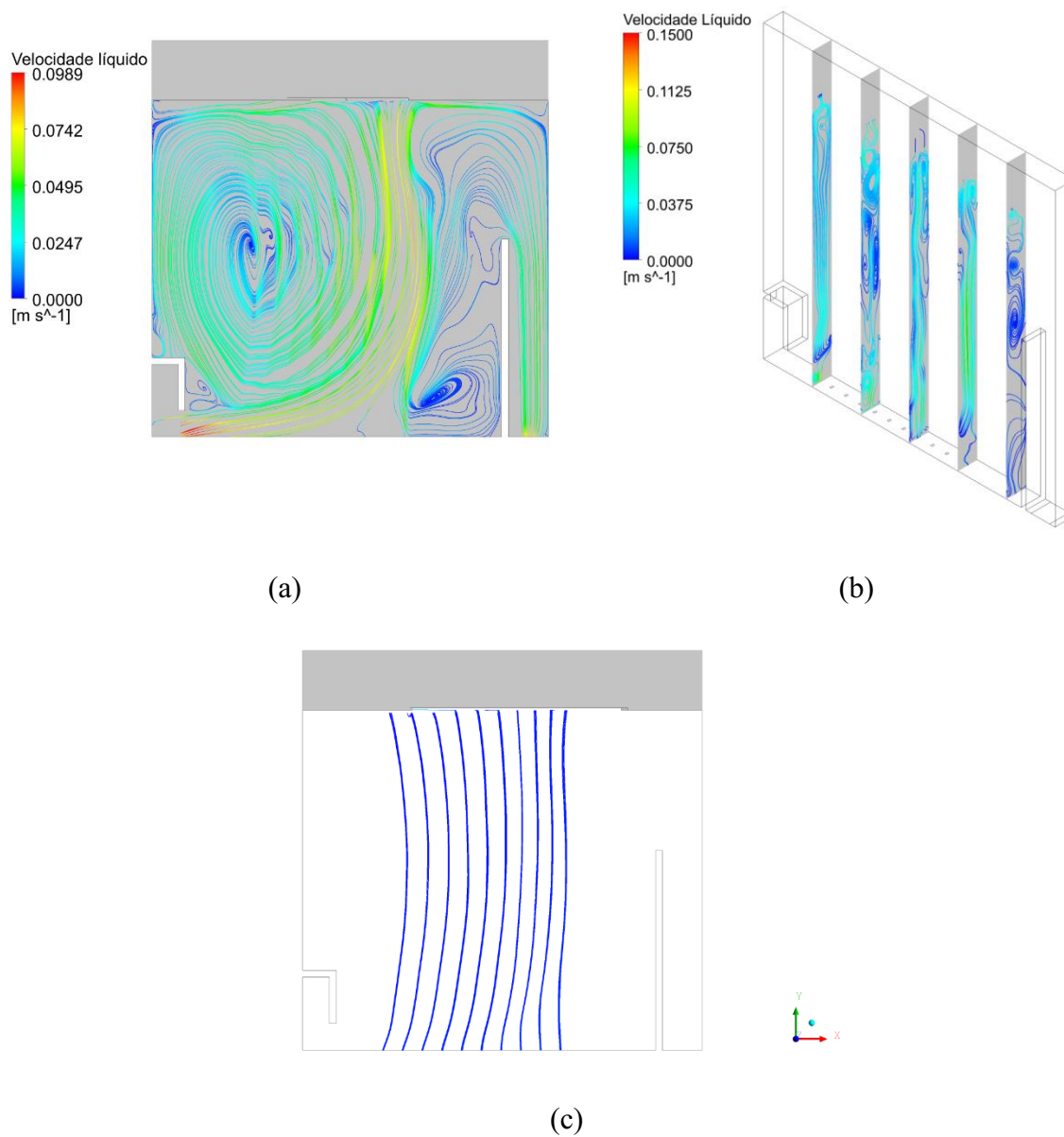
Com base nas simulações realizadas, mostram-se as linhas de corrente do líquido e do ar cujo domínio tem água e bolhas sendo injetada, variando a vazão de entrada de líquido em 54 l/h, 74 l/h, 94 l/h e 125 l/h, conforme respectivamente Figura 81, Figura 82, Figura 83 e Figura 84.

Figura 81 – Simulação com a vazão de entrada de água (54 l/h). Vista frontal das linhas de corrente da água em (a). Planos do escoamento secundário da água (b). Vista frontal das linhas de corrente do ar em (c)



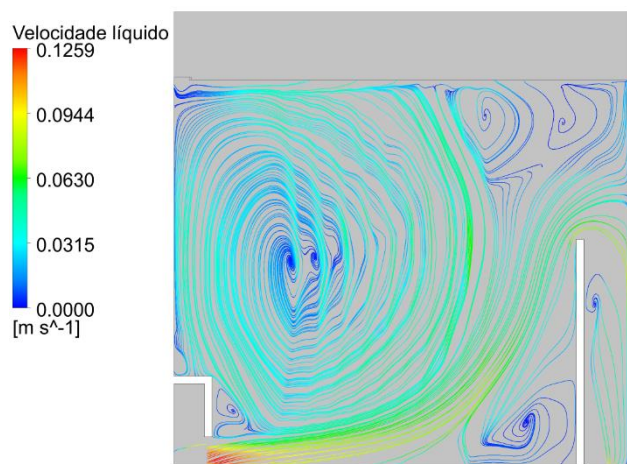
Fonte: Autoria própria

Figura 82 – Simulação com a vazão de entrada de água (74 l/h). Vista frontal das linhas de corrente da água em (a). Planos do escoamento secundário da água (b). Vista frontal das linhas de corrente do ar em (c)

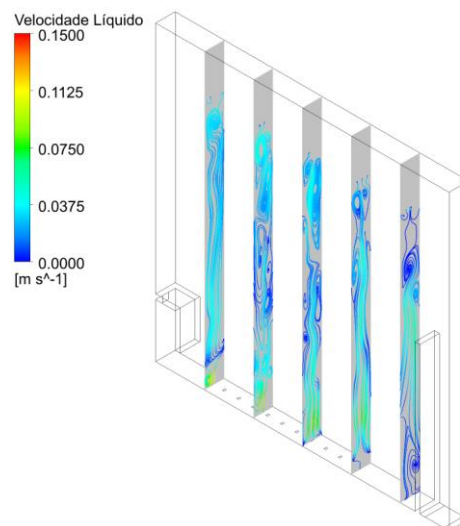


Fonte: Autoria própria

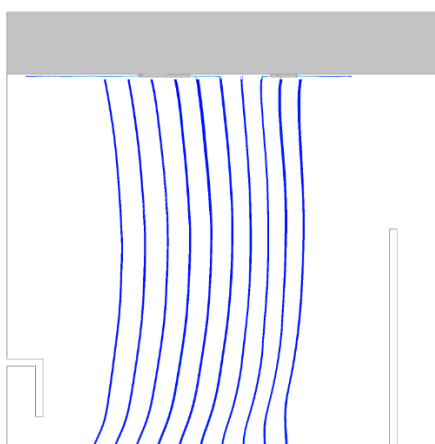
Figura 83 – Simulação com a vazão de entrada de água (94 l/h). Vista frontal das linhas de corrente da água em (a). Planos do escoamento secundário da água (b). Vista frontal das linhas de corrente do ar em (c)



(a)



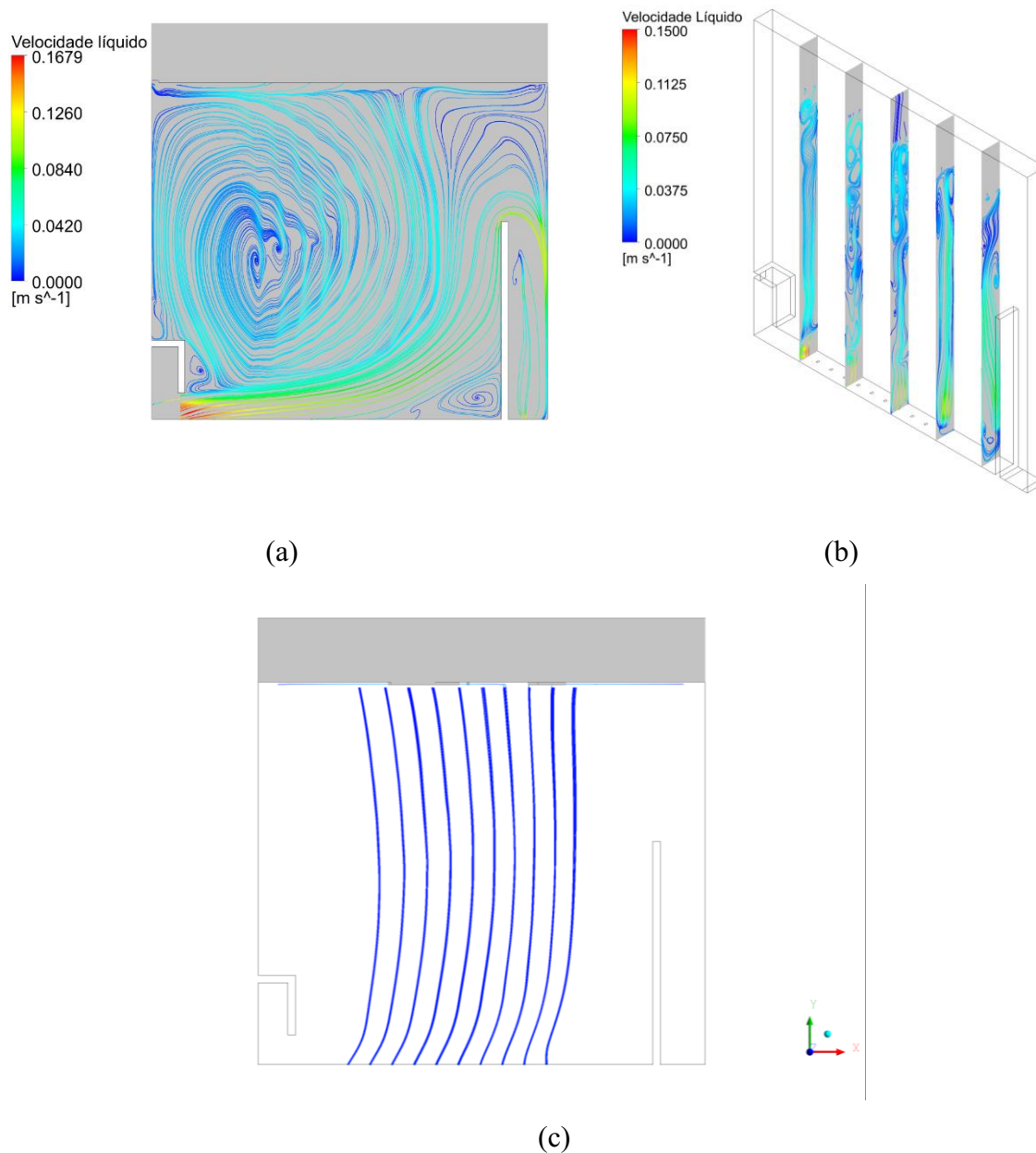
(b)



(c)

Fonte: Autoria própria

Figura 84 – Simulação com a vazão de entrada de água (125 l/h). Vista frontal das linhas de corrente da água em (a). Planos do escoamento secundário da água (b). Vista frontal das linhas de corrente do ar em (c)



Fonte: Autoria própria

Para cada caso de variação de vazão, em (a), apresentam-se as linhas de correntes de água, em (b) a vista lateral de 5 planos y,z de (a) e em (c) as linhas de corrente do ar. Observe-se qualitativamente que o campo de líquido (a) é afetado pelo ar na Figura 81, Figura 82, Figura 83 e Figura 84 em (a), independentemente da vazão de entrada. Ocorre uma perturbação na fase

líquida criada pela passagem do ar, assim como também a velocidade do líquido é alterada quando comparado ao escoamento apenas com água e água + óleo.

Conforme a vazão de líquido aumenta, a velocidade do líquido no interior da câmara também aumenta de maneira proporcional impedindo pontos ou regiões estagnadas, já as linhas de corrente do ar seguem inalteradas. É perceptível que a injeção de ar ocasiona uma perturbação nos vórtices do escoamento do líquido, devido ao maior contato superficial. Nas vazões mais baixas, a corrente de ar atua como uma barreira, deslocando o desenvolvimento dos vórtices do escoamento de líquido da área central, devido a baixa velocidade do líquido. Conseqüentemente o escoamento secundário também é afetado, intensificando-o por toda a câmara. Com a passagem do ar o campo de líquido sofre perturbação, pois o líquido se desloca para passagem do ar, que devido ao movimento espiral causa escoamento secundário intensificado.

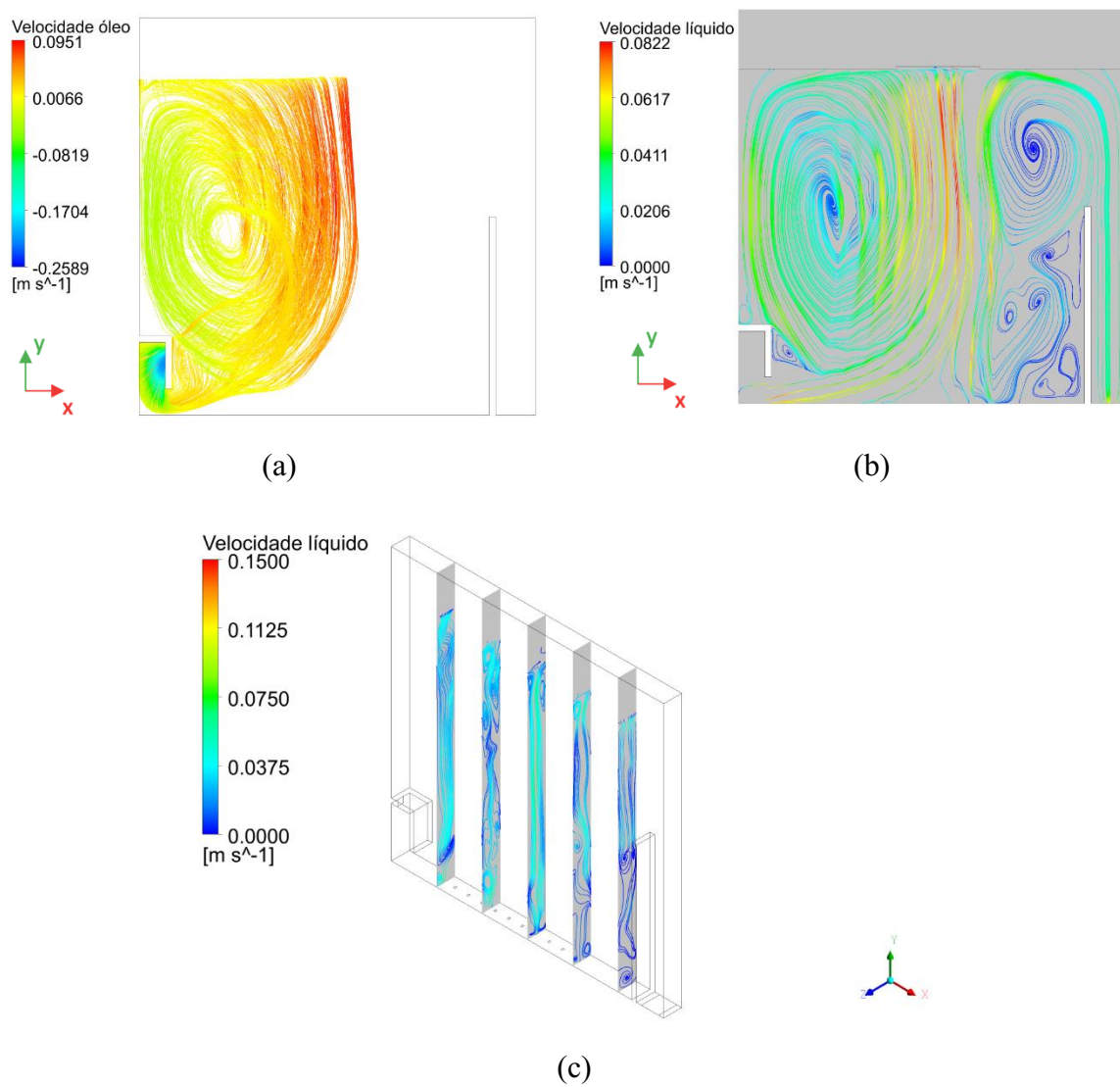
Com a visualização neste sistema de escoamento de líquido (água) e escoamento de ar, pode-se observar que existe influência do ar no campo de líquido, em qualquer plano do escoamento, independente da vazão de entrada, pois a vorticidade explica as origens do escoamento secundário. Sendo que em qualquer vazão de entrada de líquido, a injeção de ar provoca a minimização e inclusive o deslocamento das regiões de recirculação/vórtices.

5.2.4 Comportamento das gotas e bolhas no líquido

Essa simulação foi realizada com o intuito de explorar o campo de velocidade e as linhas de corrente da camada de água, a fim de tomar como base o escoamento com a inserção de bolhas no inferior da câmara e com a presença de óleo, simulação trifásica.

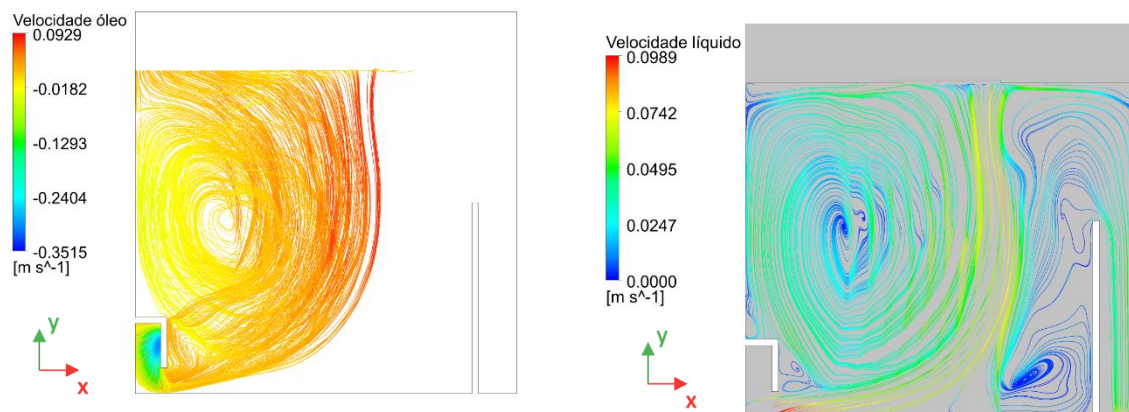
Com base nos experimentos realizados, mostram-se as linhas de corrente do líquido e do óleo cujo domínio tem água, gotas de óleo e bolhas, conforme Figura 85, Figura 86, Figura 87 e Figura 88, com variação de vazão de líquido.

Figura 85 – Simulação com a vazão de entrada 54 l/h. Vista frontal das linhas de corrente do óleo em (a). Vista frontal das linhas de corrente da água em (b). Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação em (c)



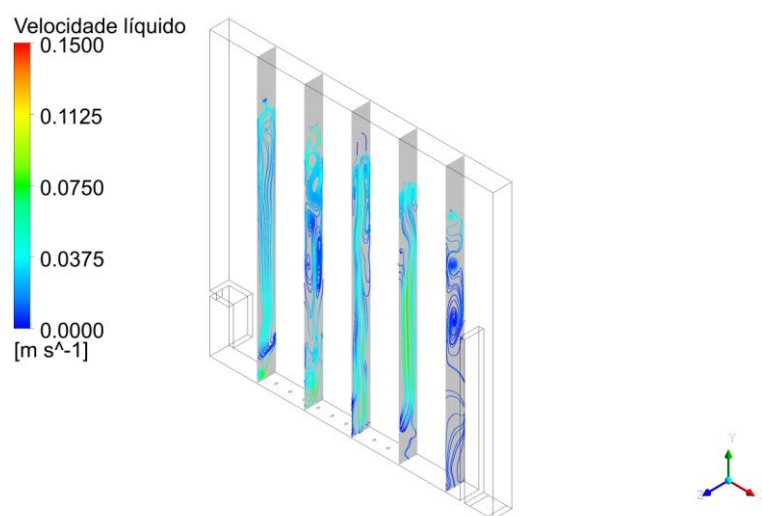
Fonte: Autoria própria

Figura 86 – Simulação com a vazão de entrada 74 l/h. Vista frontal das linhas de corrente do óleo em (a). Vista frontal das linhas de corrente da água em (b). Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação em (c)



(a)

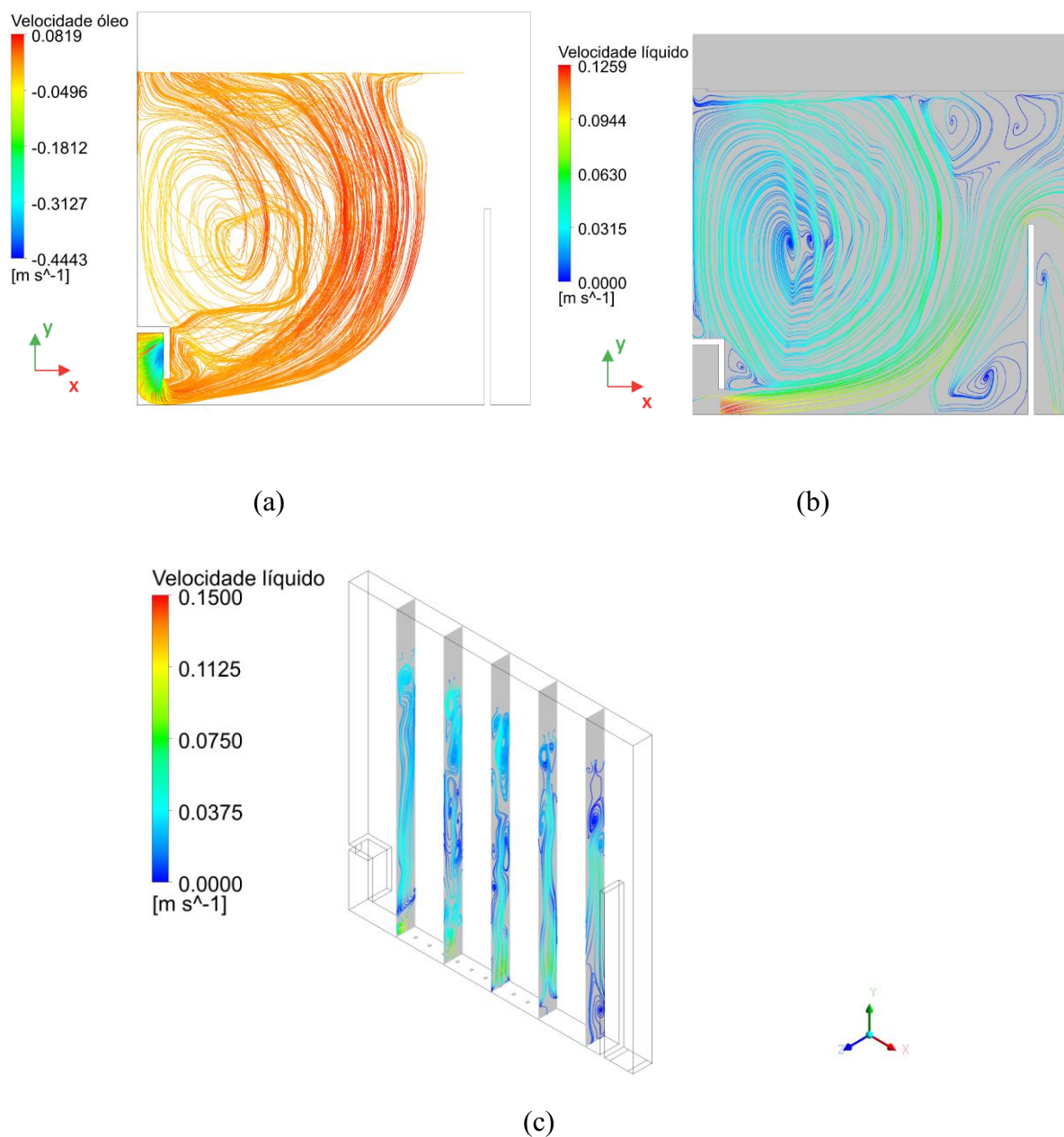
(b)



(c)

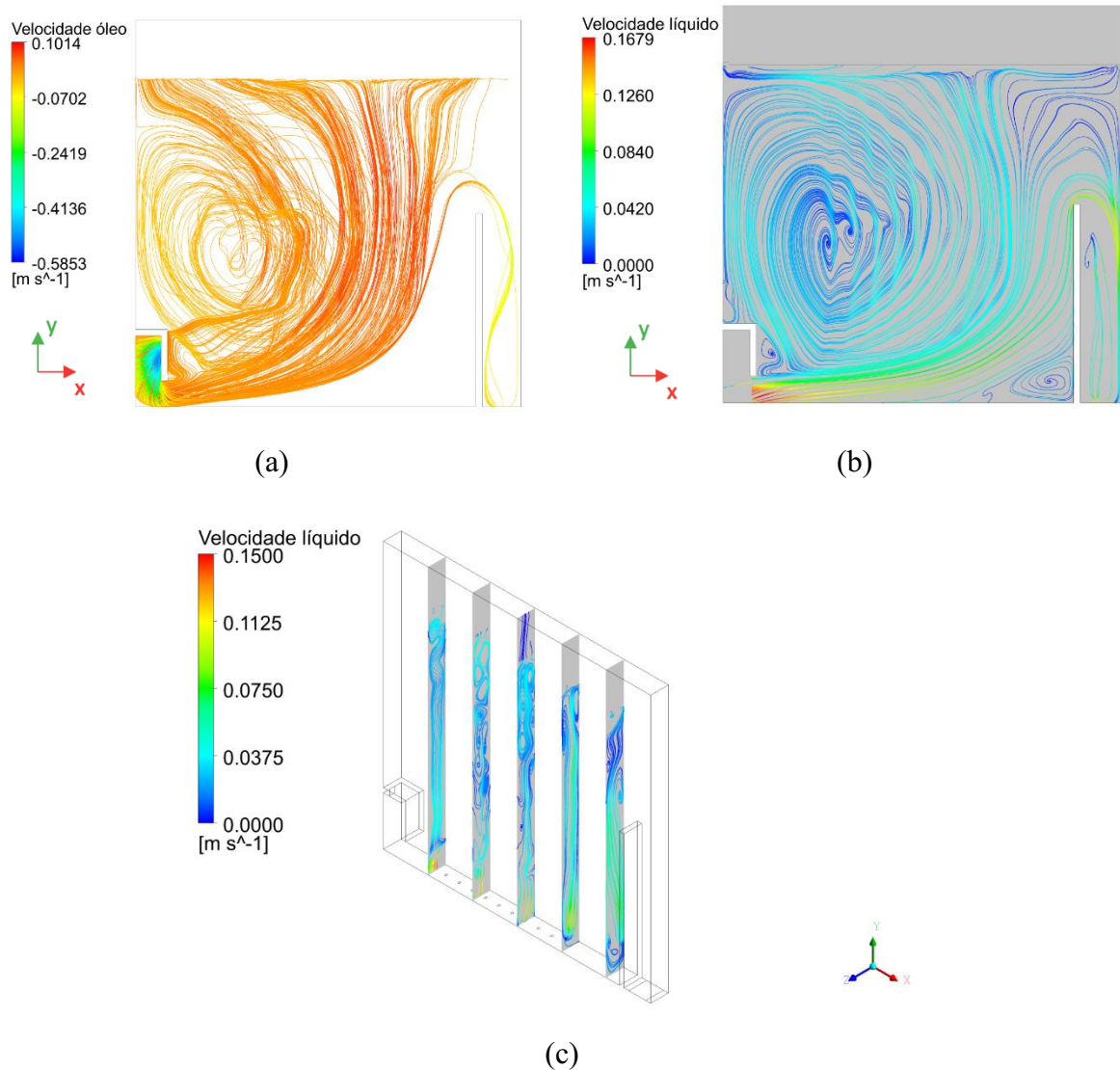
Fonte: Autoria própria

Figura 87 – Simulação com a vazão de entrada 94 l/h. Vista frontal das linhas de corrente do óleo em (a). Vista frontal das linhas de corrente da água em (b). Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação em (c)



Fonte: Autoria própria

Figura 88 – Simulação com a vazão de entrada 125 l/h. Vista frontal das linhas de corrente do óleo em (a). Vista frontal das linhas de corrente da água em (b). Vista lateral das linhas de corrente da água para a simulação em (c)



Fonte: Autoria própria

Comparando essa simulação trifásica, com a simulação do escoamento de água e apenas gotas de óleo, é observado através das linhas de corrente do óleo em (a) que o comportamento do óleo apresenta é diferente em qualquer vazão de entrada. É evidente que quando se tem apenas as gotas de óleo no sistema, elas fluem muito próximas da chicana e maior quantidade delas escapam na saída da água. Quando inseridas as bolhas, o líquido é perturbado (conforme analisado no sistema de escoamento de água e bolhas), já as gotas permanecem distantes do defletor, e isso fica mais acentuado nas vazões de líquido mais baixas conforme Figura 85 e Figura 86, as gotas tem menor velocidade e acabam seguindo o rastro

formado pelo caminho das bolhas. Em (b) mostram-se as linhas de corrente do líquido, que seguem o que foi identificado no escoamento somente com bolhas, apresentando velocidade maior com o aumento da vazão de líquido. Em (c) mostram-se os planos y,z do escoamento do líquido, com escoamento secundário de maneira intensificada devido ao comportamento das bolhas, sendo que a inserção de gotas de óleo não afeta o escoamento secundário. Nas vazões maiores, ocorre a acentuação destes fenômenos (Figura 87 e Figura 88), sendo proporcional ao aumento da velocidade do líquido.

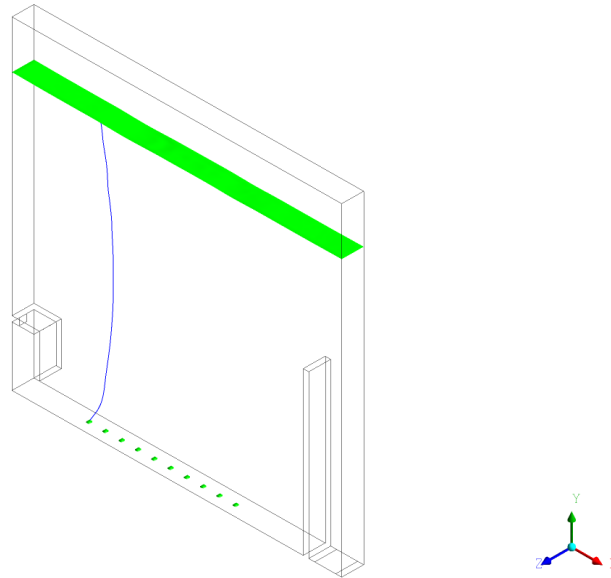
Portanto, o líquido está sujeito ao cisalhamento interfacial do ar, tensão superficial e pressão do ar causada pela redução da área da seção transversal do escoamento, quando injetadas as bolhas. A tensão superficial desempenha um papel fundamental na estabilização do escoamento do líquido. Ao contrário, a tensão de cisalhamento interfacial e pressão do escoamento de gás promovem a perturbação do líquido, aumentando assim a instabilidade do líquido.

As simulações trifásicas mostram o comportamento global da fase líquida e das fases dispersas, já as simulações iniciais são necessárias para auxiliar e identificar os fenômenos e fases que influenciam, além de mostrar o que não é identificado nos experimentos com a metodologia adotada, como o escoamento secundário. Entretanto, com o escoamento das bolhas (ar), o líquido é perturbado deslocando os vórtices do escoamento secundário e minimizando-os. As linhas de corrente de ar (bolhas) não se movimentam de forma retilínea, existe uma frequência de oscilação e amplitude, influenciando no escoamento das gotas de óleo que entram dispersas no equipamento. Uma variação característica do campo de velocidade ao redor da bolha ocorre quando a instabilidade na trajetória aparece, com isso, pode-se afirmar que o aparecimento das instabilidades no líquido está diretamente relacionado ao aparecimento de vórtices que se separam da parte traseira da bolha e da movimentação do líquido ao redor.

5.2.5 Validação das simulações numéricas

Para validação do modelo numérico utilizado nas simulações, comparam-se os resultados experimentais com os numéricos. Portanto, para fins comparativos seleciona-se nas simulações numéricas a primeira linha de corrente de ar, representando assim a bolha gerada na primeira agulha do equipamento experimental, conforme mostrado na Figura 89.

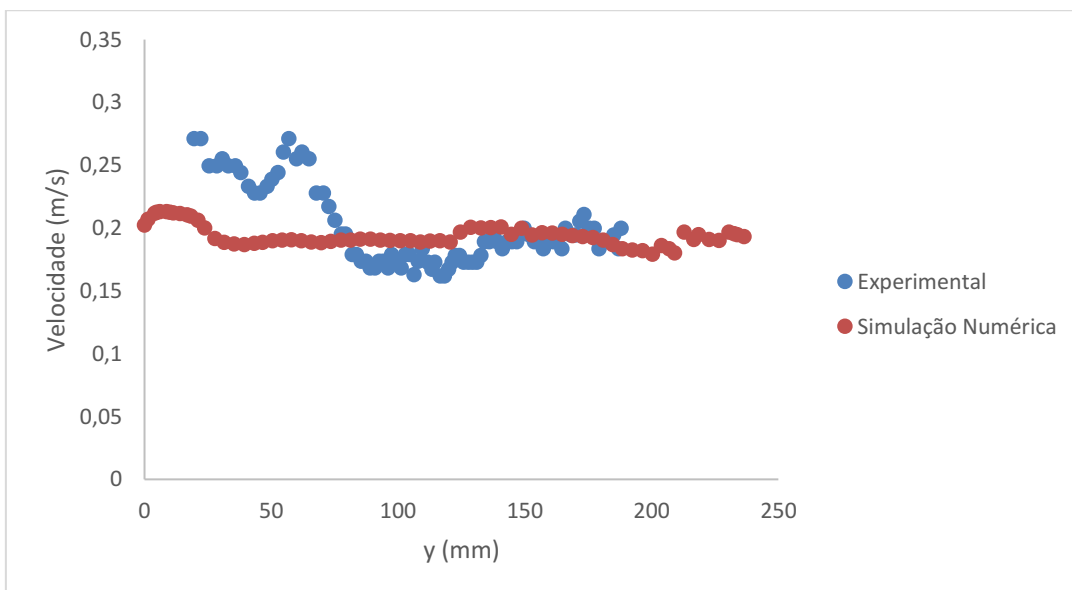
Figura 89 – Localização da linha de corrente de ar, conforme experimento realizado



Fonte: Autoria própria

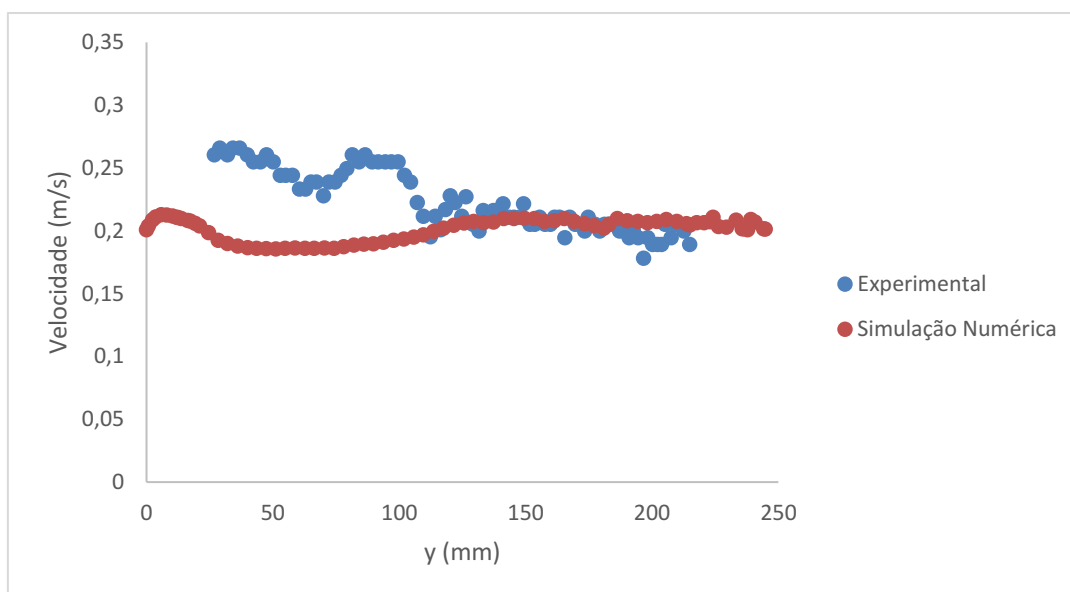
Comparam-se o perfil de velocidade de ascensão desta bolha, numericamente e experimentalmente, com resultados disponíveis na Figura 93, Figura 91, Figura 92 e Figura 93 mostrando a tendência da velocidade individual da bolha em y, velocidade de subida (v), para as diferentes vazões de entrada de líquido 54l/h, 74 l/h, 94 l/h e 125l/h, respectivamente.

Figura 90 – Comparação experimental e numérica da velocidade de ascensão da bolha para a vazão de líquido de 54 l/h



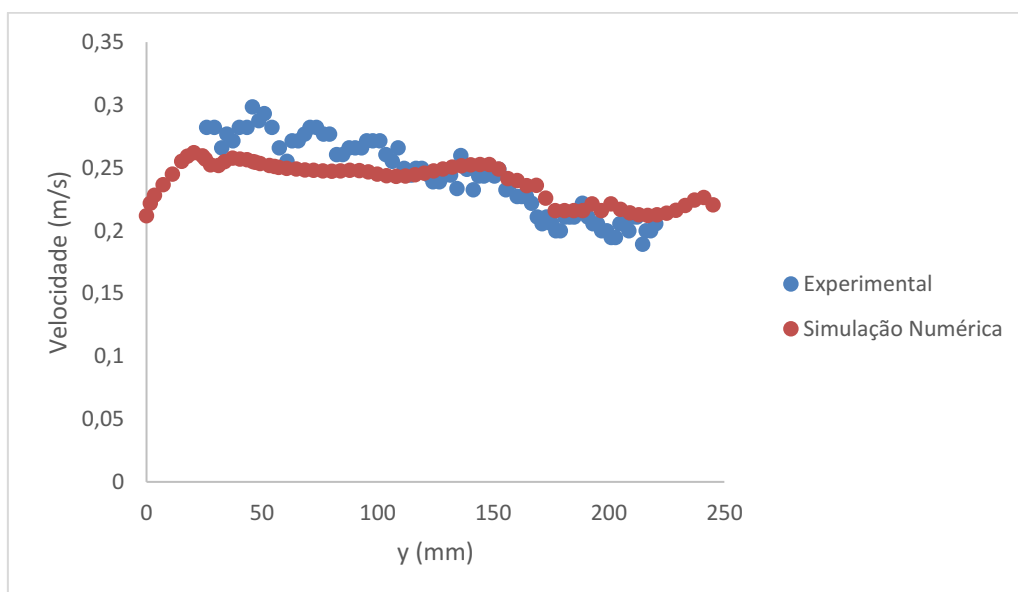
Fonte: Autoria própria

Figura 91 – Comparação experimental e numérica da velocidade de ascensão da bolha para a vazão de líquido de 74 l/h



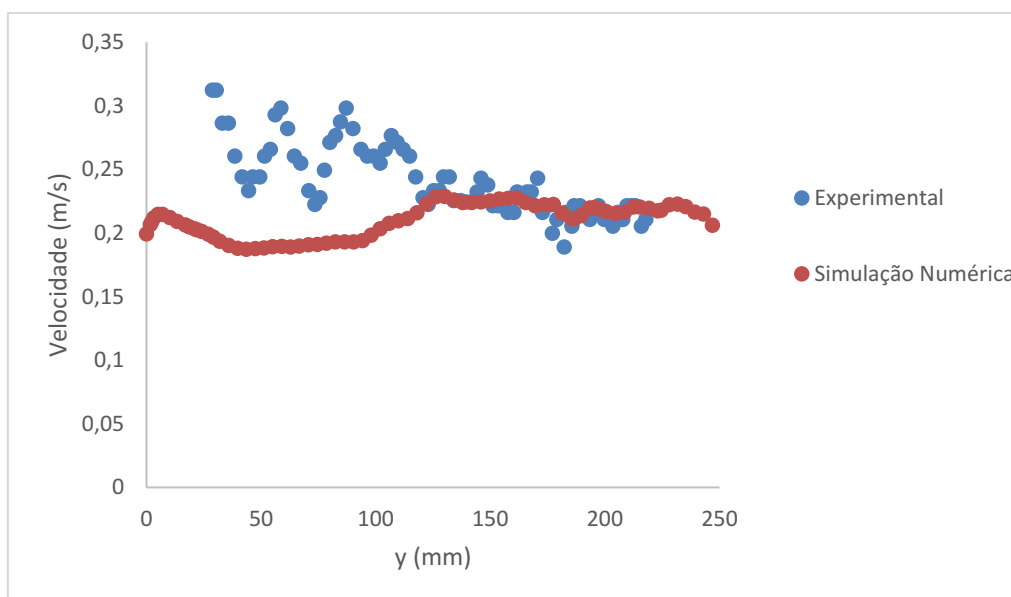
Fonte: Autoria própria

Figura 92 – Comparação experimental e numérica da velocidade de ascensão da bolha para a vazão de líquido de 94 l/h



Fonte: Autoria própria

Figura 93 – Comparação experimental e numérica da velocidade de ascensão da bolha para a vazão de líquido de 125 l/h



Fonte: Autoria própria

Os resultados mostrados nas figuras indicam que a velocidade terminal da bolha ascendente alcançada na altura acima de 120 mm se comporta de forma semelhante numericamente e experimentalmente. Experimentalmente as bolhas analisadas neste estudo apresentam maiores valores de velocidade logo após o descolamento do capilar, devido a metodologia de injeção das bolhas adotadas no experimento. Já os resultados numéricos neste aspecto seguem a maioria dos estudos experimentais que empregam a técnica de pinch-off para geração de bolhas (VÉLEZ-CORDERO; ZENIT, 2011; WU; GHARIB, 2002).

É possível observar que quando a bolha estabiliza nas oscilações iniciais, a sua trajetória permanece quase que inalterada. Logo, pode-se afirmar que ocorreu o equilíbrio das forças, principalmente de empuxo e arraste, e com isso a bolha atingiu de certa maneira a sua velocidade terminal. Ao atingir a velocidade terminal, acima de 120 mm em y, os resultados numéricos obtidos condizem com os resultados experimentais em todas as variações de vazão de líquido.

Para comparar a validade das medições experimentais com numéricas, comparam-se também o tempo médio de permanência das gotas dentro do equipamento com bolhas e sem bolhas, experimentalmente e numericamente, conforme Tabela 10.

Tabela 10 – Tempo médio de permanência das gotas na câmara

Caso	Sem Bolhas		Com Bolhas	
	Experimental	Numérico	Experimental	Numérico
54 l/h	45.7 s	53.8 s	12.7 s	18.6 s
74 l/h	43.7 s	45.7 s	12.4 s	15.1 s
94 l/h	42.6 s	38.2 s	11.5 s	10.1 s
125 l/h	33.5 s	32.3 s	10.3 s	9.5 s

Fonte: Autoria própria

Os resultados apresentados na Tabela 10, indicam valores experimentais muito próximos dos obtidos nas simulações numéricas independente da vazão de líquido. E baseado nessa diferença conforme apresentado na Tabela 10, valida-se assim o modelo numérico empregado. Além disso, com estes resultados também verifica-se a influência que as bolhas têm sobre o escoamento das gotas, apresentando um ganho de 3 vezes no tempo médio de permanência das gotas escoando na câmara.

Para complementar e explorar a experimentação numérica realizada, foram executadas simulações com vazão de entrada de líquido maior, com 140 l/h e 160 l/h, a fim de verificar o comportamento e possível ganho, uma vez que não é possível a experimentação física para estes casos, devido a limitação de bancada experimental. Logo, o tempo médio de permanência das gotas dentro do equipamento com bolhas e sem bolhas para esses dois casos são mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 – Tempo médio de permanência das gotas na câmara

Caso	Simulação Numérica	
	Sem Bolhas	Com Bolhas
140 l/h	30.7 s	8.6 s
160 l/h	73.7 s	32.4 s

Fonte: Autoria própria

Com esses resultados adicionais é possível observar que quando se aumenta a vazão de líquido na entrada de 125 l/h para 140 l/h o tempo de permanência da gota na câmara diminui de maneira pouca expressiva, mas ainda existe um pequeno ganho no tempo de separação. Já quando se aumenta a vazão para 160 l/h obtêm-se um resultado inverso ao esperado, ou seja, o tempo de permanência das gotas é maior do que na menor vazão de líquido na entrada, quando comparamos os resultados da Tabela 10 e Tabela 11.

Aumentando a vazão de líquido na entrada, conseqüentemente aumenta-se também a velocidade do líquido no interior do equipamento, provocando recirculação mais intensa. Com a recirculação do líquido intensa demais, as bolhas injetadas não conseguem atuar de forma eficiente (como nos casos anteriores). Surgindo assim, escoamento secundário mais acentuado provocando a recirculação das gotas de óleo em um loop dentro do domínio, não proporcionando o deslocamento da trajetória para o topo, para então promover a separação. Isso acontece devido as proporções geométricas, as dimensões do equipamento experimental adotado são pequenas, e neste caso, forçar a recirculação de líquido não é benéfico para o objetivo de separação mais eficiente de gotas de óleo. As proporções geométricas L/H e a profundidade influenciam sobre as características do escoamento.

5.3 FECHAMENTO DO CAPÍTULO

As atividades realizadas durante a elaboração do presente trabalho envolveram a análise experimental e numérica, a fim de avaliar o escoamento multifásico de água, óleo e ar em padrão disperso, presente no processamento de petróleo. Assim como analisar a interação de bolhas e gotas de óleo no qual não atingiram o fenômeno de coalescência. Além de descrever o comportamento da população de gotas e bolhas durante a evolução do escoamento. Comparações entre os resultados obtidos experimentalmente e através de simulações numéricas indicam uma adequada representação das características, possibilitando a exploração de diferentes condições operacionais (vazões).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo foi dedicado ao detalhamento da influência dos efeitos hidrodinâmicos no movimento de gotas finamente dispersas em um escoamento líquido na presença de uma população de bolhas. Foi desenvolvido para prever a interação entre gotas de óleo e bolhas para otimização do projeto e operação de processos de separação, como a flotação. Buscando consolidar como resultado para a literatura que hoje carece, a dinâmica entre gotas de óleo e bolhas. O estudo experimental teve como objetivo determinar os parâmetros do problema, e consequentemente utilizá-los para o modelo numérico para validação e por conseguinte auxiliar no entendimento da física do problema, destacando o ganho/rendimento que se pode obter no escoamento de gotas de óleo com a inserção de bolhas.

Um aparato experimental foi projetado e construído especialmente para este estudo. O sistema construído permite realizar os experimentos com controle de vazão de entrada de líquido (água e óleo) e vazão de entrada do ar. É possível controlar a formação de uma população de gotas de óleo e bolhas, de maneira com que a câmera de alta definição possa registrar com alta resolução o andamento dos experimentos e consequentemente os fenômenos. Pelos resultados experimentais foi possível verificar que a bancada consegue reproduzir o escoamento de água, óleo e gás em padrão disperso, com população de bolhas e gotas, o que até o momento não é encontrado na literatura. A experimentação numérica foi baseada no Modelo Euler-Euler aplicado para determinar o campo médio do escoamento e no Euler-Lagrange aplicado para rastrear o movimento das partículas. O estudo numérico foi realizado com o pacote da ANSYS, especificamente o CFX 2020.

Foram realizados testes experimentais, que permitiram por meio de técnicas de visualização de escoamento quantificar o comportamento cinemático. Diversas condições operacionais foram analisadas de acordo com tempo de residência do equipamento industrial, obtendo assim resultados em termos de diâmetros, trajetórias crescentes e velocidades terminais que permitam avaliar a presença de escoamento de bolhas. A eficiência da separação de gotas mostrou ser altamente dependente da velocidade induzida pelo líquido que surge do escoamento de bolhas. Quando não existem bolhas no sistema, a inércia imposta pelo fluido contínuo suprime os efeitos gravitacionais que atuam nas gotas, que são então levadas pelo escoamento líquido. Esse comportamento neutralmente flutuante é indesejado e impede uma separação eficiente, para o qual os efeitos gravitacionais são essenciais. Como resultado, as gotas recirculam dentro do equipamento, levando a altos tempos de retenção e uma separação ineficiente.

Assim, a viabilidade da separação depende dos fenômenos que emergem da população de bolha. O aumento do impulso promovido por colisões elásticas entre gotas e bolhas, bem como o componente de velocidade induzido pelo líquido, virtualmente aumentam os efeitos gravitacionais que atuam na gota, permitindo uma separação adequada. O aumento da força de Arquimedes das bolhas influenciou a cinemática das gotas, que se destacam das linhas de corrente do líquido, levando a uma trajetória relativamente reta. Para estas condições operacionais, foi observada um tempo de retenção substancialmente reduzido, como consequência do componente horizontal da velocidade reduzido. Este estudo mostrou que a eficiência da separação não depende apenas da adesão físico-químico, mas também em interações hidrodinâmicas observadas para bolhas de milímetros.

Os dados obtidos numericamente mostraram boa concordância quanto ao tempo de permanência das gotas no interior do equipamento, mas também complementaram os estudos mostrando parâmetros que não puderam ser vistos experimentalmente com a metodologia adotada, como o campo de escoamento do líquido no plano e o escoamento secundário, tanto para escoamento apenas com líquido quanto para escoamento com gotas, com bolhas ou com bolhas e gotas.

Além disso, este estudo mostrou que o comportamento transitório das bolhas influencia o comportamento cinemático dentro da câmara. Isso foi observado analisando o coeficiente de arrasto e a força de arrasto das bolhas, cujo movimento foi classificado em diferentes regiões com características específicas de movimento.

Os resultados apresentados experimentalmente quanto numericamente confirmaram que a inserção de bolhas é determinante para obter uma separação otimizada de gota, sendo a principal contribuição o papel desempenhado por efeitos hidrodinâmicos, em vez de interações físico-químicas apenas.

Espera-se que as ideias abordadas experimentalmente e numericamente e os resultados e discussões apresentados contribuam de forma positiva para a literatura da área, servindo de base para outros estudos. Como sugestões para estudos futuros, pode-se mencionar:

- novos estudos de visualização com tamanho de gotas e bolhas menores, que busquem obter a identificação de fenômenos de interação bolha-gota;
- avaliação de inserção de fluidos com propriedades diferentes, principalmente o óleo;
- avaliação de inserção de sal (solução salina) e/ou solução com pH menor (meio levemente ácido) como meio contínuo e, que busquem obter a identificação de interações e/ou tempos de permanência de gota menor;

- avanços na simulação numérica, incluindo alternativas para modelos de arrasto, coalescência e quebra e interações;
- avanços no entendimento das interações de bolhas e gotas, de modo a ser aplicado em projetos.

REFERÊNCIAS

AKHTAR, A.; PAREEK, V.; TADÉ, M. CFD simulations for continuous flow of bubbles through gas-liquid columns: Application of VOF method. **Chemical Product and Process Modeling**, v. 2, n. 1, 2007.

ALMÉRAS, E. et al. Experimental investigation of the turbulence induced by a bubble swarm rising within incident turbulence. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 825, n. June 2018, p. 1091–1112, 2017.

ANH HO, C.; SOMMERFELD, M. Modelling of micro-particle agglomeration in turbulent flows. **Chemical Engineering Science**, v. 57, n. 15, p. 3073–3084, 2002.

ANSYS, I. **User 's Guide CFX** Novembro Canonsburg, PA, 2020.

ATA, S.; PUGH, R. J.; JAMESON, G. J. The influence of interfacial ageing and temperature on the coalescence of oil droplets in water. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 374, n. 1–3, p. 96–101, 2011.

BAHADORI, A. et al. Estimation of air concentration in dissolved air flotation (DAF) systems using a simple predictive tool. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 91, n. 1, p. 184–190, 2013.

BAHREINI, M.; RAMIAR, A.; RANJBAR, A. A. Numerical simulation of bubble behavior in subcooled flow boiling under velocity and temperature gradient. **Nuclear Engineering and Design**, p. 238–248, 2015.

BALTUSSEN, M. W.; KUIPERS, J. A. M.; DEEN, N. G. A critical comparison of surface tension models for the volume of fluid method. **Chemical Engineering Science**, v. 109, p. 65–74, 2014.

BEHZADI, A.; ISSA, R. I.; RUSCHE, H. Modelling of dispersed bubble and droplet flow at high phase fractions. **Chemical Engineering Science**, v. 59, n. 4, p. 759–770, 2004.

BERTOLA, F. et al. Momentum transfer in a swarm of bubbles: Estimates from fluid-dynamic simulations. **Chemical Engineering Science**, v. 59, n. 22–23, p. 5209–5215, 2004.

BESAGNI, G.; INZOLI, F. Bubble size distributions and shapes in annular gap bubble column. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 74, p. 27–48, 2016.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport Phenomena**. [s.l: s.n.]. v. 55

BOUROUBA, L.; BUSH, J. W. M. Drops and bubbles in the environment. In: **Handbook of Environmental Fluid Dynamics, Volume One: Overview and Fundamentals**. [s.l.] Handbook of Environmental Fluid Dynamics, 2013. p. 427–439.

BOZZANO, G.; DENTE, M. Shape and terminal velocity of single bubble motion: a novel approach. **Computer Aided Chemical Engineering**, v. 8, n. C, p. 649–654, 2000.

BRENNEN, C. Fundamentals of Multiphase Flows. **Cambridge University Press**, v. 128, p. 368, 2005.

BRUNN, P. O.; RODEN, T. On the deformation and drag of a type-amultiple drop at low Reynolds number. **Journal of fluid Mechanics**, v. 160, p. 211–234, 1985.

BUNNER, B.; TRYGGVASON, G. Direct numerical simulations of three-dimensional bubbly flows. **Physics of Fluids**, v. 11, n. 8, p. 1967–1969, 1999.

CELIK, I. B. et al. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. **Journal of Fluids Engineering**, v. 130, n. 7, p. 78001, 2008.

CHAKIBI, H. et al. Role of Bubble-Drop Interactions and Salt Addition in Flotation Performance. **Energy and Fuels**, v. 32, n. 3, p. 4049–4056, 2018.

CIFANI, P. **DNS of turbulent bubble-laden channel flows**. [s.l.] Thesis (Ph.D), University of Twente, Netherlands, 2017.

CLIFT, R.; GRACE, J. R.; WEBER, M. E. **Bubbles, drops and particles**. New York - USA: [s.n.]. v. 5

COLOMBET, D. et al. On single bubble mass transfer in a volatile liquid. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 125, p. 1144–1155, 2018.

CROWE, C. T. et al. **Multiphase flows with droplets and particles**. New York, USA: CRC Press, 2ed, 2012.

DA SILVA JÚNIOR, J. L. Investigação do Escoamento Bifásico Gás-Líquido em uma Coluna

de Bolhas Retangular por meio da Técnica CFD. 2011.

DE VRIES, A. W. G.; BIESHEUVEL, A.; VAN WIJNGAARDEN, L. Notes on the path and wake of a gas bubble rising in pure water. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 28, n. 11, p. 1823–1835, 2003.

DELNOIJ, E.; KUIPERS, J. A. M.; VAN SWAAIJ, W. P. M. Numerical Simulation of Bubble Coalescence Using a Volume of Fluid (Vof) Model. **Third International Conference on Multiphase Flow, ICMF'98**, v. 12, p. 1–9, 1998.

DIJKHUIZEN, W.; VAN SINT ANNALAND, M.; KUIPERS, J. A. M. Numerical and experimental investigation of the lift force on single bubbles. **Chemical Engineering Science**, v. 65, n. 3, p. 1274–1287, 2010.

DORAISWAMY, L. K.; MUJUMBAR, A. S. **Transport in Fluidized Particle Systems**. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1989.

DUMOUCHEL, C. On the experimental investigation on primary atomization of liquid streams. **Experiments in Fluids**, v. 45, n. 3, p. 371–422, 2008.

EFTEKHARDADKHAH, M. et al. Oil Removal from Produced Water during Laboratory- and Pilot-Scale Gas Flotation: The Influence of Interfacial Adsorption and Induction Times. **Energy and Fuels**, v. 29, n. 11, p. 7734–7740, 2015.

ELLINGSEN, K.; RISSO, F. On the rise of an ellipsoidal bubble in water: Oscillatory paths and liquid-induced velocity. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 440, p. 235–268, 2001.

ERN, P. et al. Wake-induced oscillatory paths of bodies freely rising or falling in fluids. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 44, p. 97–121, 2012.

FENG, J. et al. Dynamics of a bubble bouncing at a liquid/liquid/gas interface. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 807, p. 324–352, 2016.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computacional Methods for Fluid Dynamics**. 3. ed ed. Berlin: Springer-Verlag, 2002.

FIGUEIREDO, A. I. L.; OSCAR A. Z. SOTOMAYOR. Aspectos de controle de um processo de separação água-óleo-gás. **VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**, p. 8, 2009.

FINBORUD, A.; FAUCHER, M.; SELLMAN, E. **New method for improving oil droplet growth for separation enhancement**. Annual Technical Conference. **Anais...**Houston: Annual Technical Conference, 1999.

GARNIER, C.; LANCE, M.; MARIÉ, J. L. Measurement of local flow characteristics in buoyancy-driven bubbly flow at high void fraction. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 26, p. 811–815, 2002.

GUET, S. et al. Bubble size effect on low liquid input drift-flux parameters. **Chemical Engineering Science**, v. 59, n. 16, p. 3315–3329, 2004.

HABERMAN, W. L.; MORTON, R. K. An Experimental Study of Bubbles Moving in Liquids. **American Society of Civil Engineers**, p. 227–252, 1954a.

HABERMAN, W. L.; MORTON, R. K. An experimental investigation of the drag and shape of air bubbles rising in various liquids / by W. L. Haberman and R. K. Morton. **An experimental investigation of the drag and shape of air bubbles rising in various liquids / by W. L. Haberman and R. K. Morton.**, 1954b.

HINZE, J. O. Fundamentals of the Hydrodynamic Mechanism of Splitting in Dispersion Processes. **AIChE Journal**, v. 1, n. 3, p. 289–295, 1955.

ISHII, M.; HIBIKI, T. **Thermo-fluid dynamics of two-phase flow**. Japan, Springer, 2006.

ISHII, M.; MISHIMA, K. Two-fluid model and hydrodynamic constitutive relations. **Nuclear Engineering and Design**, v. 82, n. 2–3, p. 107–126, 1984.

ISHII, M.; ZUBER, N. Drag coefficient and relative velocity in bubbly, droplet or particulate flows. **AIChE Journal**, v. 25, n. 5, p. 843–855, 1979.

ISLAM, M. T.; NGUYEN, A. V. The fore-and-aft asymmetry of the bubble-particle collision interaction in the non-turbulent regime of multiphase bubble-particle suspension flows. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 585, p. 124085, 2019.

ISLAM, M. T.; NGUYEN, A. V. Effect of microturbulence on bubble-particle collision during the bubble rise in a flotation cell. **Minerals Engineering**, v. 155, n. December 2019, p. 106418, 2020.

JAWORSKI, A. J.; MENG, G. On-line measurement of separation dynamics in primary gas/oil/water separators: Challenges and technical solutions-A review. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 68, n. 1–2, p. 47–59, 2009.

JONES, R.; SOUTHERN, R. Physically-based droplet interaction. **Proceedings of the ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium on Computer Animation - SCA '17**, p. 1–10, 2017.

JOSHI, J. B. Computational flow modelling and design of bubble column reactors. **Chemical Engineering Science**, v. 56, n. 21–22, p. 5893–5933, 2001.

JÚNIOR, J. LAMEU DA S. Modelagem E Simulação Fluidodinâmica De Sistemas Gás-Líquido-Sólido Em Leitos De Lama Usando Cfd: Síntese De Metanol. p. 222, 2015.

KANNAN, V. et al. Effect of drag correlation and bubble-induced turbulence closure on the gas hold-up in a bubble column reactor. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 94, n. 9, p. 2944–2954, 2019.

KIKUCHI, R. et al. Diagnosis of chaotic dynamics of bubble motion in a bubble column. **Chemical Engineering Science**, v. 52, n. 21–22, p. 3741–3745, 1997.

KITCHENER, J. A. The froth flotation process: past, present and future—in brief. In: **The Scientific Basis of Flotation**. Series 75 ed. [s.l.] NATO ASI, 1984. p. 3–51.

KNESEBECK, A.; GUARDANI, R. Particle distribution in a three-phase fluidized bed under low-to-intermediate Reynolds conditions. **Powder Technology**, v. 140, n. 1–2, p. 30–39, 2004.

KRAUSE, F.; LI, X.; FRITSCHING, U. Simulation of droplet-formation and interaction in emulsification processes. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, v. 5, n. 3, p. 406–415, 2011.

KRISHNA, R.; VAN BATEN, J. M. Simulating the motion of gas bubbles in a liquid. **Macmillan Magazines**, v. 398, n. March, p. 208, 1999.

KRISHNA, R.; VAN BATEN, J. M. Scaling up bubble column reactors with the aid of CFD. **Trans IChemE**, v. 79, n. 2, p. 283–309, 2001.

KRISHNA, R.; VAN BATEN, J. M.; URSEANU, M. I. Three-phase Eulerian simulations of bubble column reactors operating in the churn-turbulent regime: A scale up strategy. **Chemical**

Engineering Science, v. 55, n. 16, p. 3275–3286, 2000.

LAUTERBORN, W.; KURZ, T. Physics of bubble oscillations. **Reports on Progress in Physics**, v. 73, n. 10, 2010.

LAUTRUP, B. **Physics of Continuous Matter: Exotic and Everyday Phenomena in the Macroscopic World**. 2. ed. [s.l.] CRC Press, 2011.

LEGENDRE, D.; ZENIT, R.; VELEZ-CORDERO, J. R. On the deformation of gas bubbles in liquids. **Physics of Fluids**, v. 24, n. 4, 2012.

LI, C. et al. A study of drag force in isothermal bubbly flow. **Journal of Computational Multiphase Flows**, v. 1, n. 4, p. 295–309, 2009.

LI, S. et al. A CFD study of particle–bubble collision efficiency in froth flotation. **Minerals Engineering**, v. 141, n. July, p. 105855, 2019.

LI, S.; JUE, K.; SUN, C. Effect of bubble surface properties on bubble–particle collision efficiency in froth flotation. **Minerals**, v. 10, n. 4, 2020.

LIM, M. W.; LAU, E. V.; POH, P. E. Analysis of attachment process of bubbles to high-density oil: Influence of bubble size and water chemistry. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 68, p. 192–200, 2016.

LINDTT, J. T.; GROOT, R. G. F. The Drag on a Single Bubble Accompanied by a periodic wake. **Chemical Engineering Science**, v. 29, p. 957–962, 1974.

LIU, J. et al. Systematic study on the coalescence and breakup behaviors of multiple parallel bubbles rising in power-law fluid. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 53, n. 12, p. 4850–4860, 2014.

LIU, J. et al. Numerical simulations of bubble formation and acoustic characteristics from a submerged orifice: The effects of nozzle wall configurations. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 123, p. 130–140, 2017.

LUCAS, D.; PRASSER, H. M.; MANERA, A. Influence of the lift force on the stability of a bubble column. **Chemical Engineering Science**, v. 60, n. 13, p. 3609–3619, 2005.

LUO, H.; SVENDSEN, H. F. 1996-Theoretical model for drop and bubble breakup in turbulent dispersions.pdf. **AIChE Journal**, v. 42, n. 5, p. 1225–1233, 1996.

MA, D. et al. Two-dimensional volume of fluid simulation studies on single bubble formation and dynamics in bubble columns. **Chemical Engineering Science**, v. 72, p. 61–77, 2012.

MAGNAUDET, J.; EAMES, I. The motion of high-Reynolds-number Bubbles in inhomogeneous flows. **Annual**, v. Volume 32, p. 659–708, 2000.

MAGNAUDET, J. J. M. Forces acting on bubbles and rigid particles. **American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FED**, v. 16, n. January, 1997.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional: fundamentos e coordenadas generalizadas**. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos, 2004.

MANICA, R.; KLASEBOER, E.; CHAN, D. Y. C. Modelo e Simulação Numérica de Interações Envolvendo Bolhas e Gotas. **TEMA - Tendências em Matemática Aplicada e Computacional**, v. 2, n. 2, p. 121–132, 2012.

MARQUES, O. F.; VIEIRA, H. N. **Processamento digital de imagens**. Rio de Janeiro: Brasport, 1999.

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, 2007.

MEI, R.; KLAUSNER, J. F.; LAWRENCE, C. J. A note on the history force on a spherical bubble at finite Reynolds number. **Physics of Fluids**, v. 6, p. 418–420, 1994.

MEIER, H. F.; NORILER, D.; BERTOLI, S. L. A solution for a heat transfer model in a moving bed through the self-adjoint operator method. **Latin American Applied Research**, v. 39, n. 4, p. 327–336, 2009.

MENDELSON, H. D. The Prediction of Bubble Terminal Velocities from Wave Theory. **AIChE Journal**, v. 13, p. 250–253, 1967.

MENTER, F. R. Zonal two equation κ - ω turbulence models for aerodynamic flows. **Nasa - National Aeronautics and Space Administration**, 1992.

METTU, S.; BERRY, J. D.; DAGASTINE, R. R. Charge and Film Drainage of Colliding Oil Drops Coated with the Nonionic Surfactant C12E5. **Langmuir**, v. 33, n. 20, p. 4913–4923, 2017.

MIKAELIAN, D. et al. Dynamics and morphology of single ellipsoidal bubbles in liquids. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 64, p. 1–12, 2015.

MILLER, R.; LIGGIERI, L. **Bubble and drop interfaces**. Netherlands: VSP, 2011.

MOOSAI, R.; DAWE, R. A. Gas attachment of oil droplets for gas flotation for oily wastewater cleanup. **Separation and Purification Technology**, v. 33, n. 3, p. 303–314, 2003.

MOUGIN, G.; MAGNAUDET, J. Path Instability of a Rising Bubble. **Physical Review Letters**, v. 88, n. 1, p. 4, 2002.

OLIVEIRA, R. C. G.; GONZALEZ, G.; OLIVEIRA, J. F. Interfacial studies on dissolved gas flotation of oil droplets for water purification. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 154, p. 127–135, 1998.

PANG, M. J.; WEI, J. J. Analysis of drag and lift coefficient expressions of bubbly flow system for low to medium Reynolds number. **Nuclear Engineering and Design**, v. 241, n. 6, p. 2204–2213, 2011.

PATANKAR, S. V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. New York - USA: McGraw-Hill, 1980.

PATEL, G. N. **CFD Simulation of Two-phase and Three-phase Flows in Internal-loop Airlift Reactors**. Master's Thesis, Lappeenranta University of Technology Department, Lappeenranta, 2010.

PAZ, C. et al. On the application of image processing methods for bubble recognition to the study of subcooled flow boiling of water in rectangular channels. **Sensors (Switzerland)**, v. 17, n. 6, 2017.

PRAKASH, R.; MAJUMDER, S. K.; SINGH, A. Flotation technique: Its mechanisms and design parameters. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 127, n. February, p. 249–270, 2018.

RAWLINS, H. C. **Mechanisms for Flotation of Fine Oil Droplets**. SME Annual Meeting &

Exhibit. **Anais...2011**

REAY, C.; RATCLIFF, G. A. Removal of fine particles from water by dispersed air flotation: effects of bubble size on collection efficiency. **Can. J. Chem. Eng.**, p. 178–185, 1973.

RIBOUX, G.; RISSO, F.; LEGENDRE, D. Experimental characterization of the agitation generated by bubbles rising at high Reynolds number. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 643, p. 509–539, 2010.

ROACHE, P. J. A method for uniform reporting of refinement studies. **Fluids Engineering**, v. 116, p. 406–413, 1994.

ROACHE, P. J. Quantification of Uncertainty in Computational Fluid Dynamics. **Fluid. Mech.**, 1997.

ROSA, E. Capítulo 7 - Parte I: Algumas Soluções Exatas de Navier-Stokes. **Unicamp**, 2012.

RUSCHE, H.; ISSA, R. I. The Effect of Voidage on the Drag Force on Particles, Droplets and Bubbles in Dispersed Two-Phase Flow. **Proceedings of the Japanese European Two-Phase Flow Meeting**, n. 1, 2000.

RZEHAKE, R.; KREPPER, E. Closure models for turbulent bubbly flows: A CFD study. **Nuclear Engineering and Design**, v. 265, p. 701–711, 2013.

SANADA, T. et al. **Motion and coalescence of a pair of bubbles rising side by side** **Chemical Engineering Science**, 2009.

SATHTHASIVAM, J.; LOGANATHAN, K.; SARP, S. An overview of oil-water separation using gas flotation systems. **Chemosphere**, v. 144, p. 671–680, 2016.

SCHÄFER, R.; MERTEN, C.; EIGENBERGER, G. Bubble size distributions in a bubble column reactor under industrial conditions. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 26, n. 6–7, p. 595–604, 2002.

SCHILLER, L.; NAUMANN, Z. A Drag Coefficient Correlation. **VDI Zeitung**, v. 77, p. 318–320, 1935.

SHAIKH, A.; AL-DAHMAN, M. H. A Review on Flow Regime Transition in Bubble Columns. **International Journal of Chemical Engineering**, v. 5, p. 1–68, 2007.

SHEIKHI, A. et al. Understanding bubble hydrodynamics in bubble columns. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 45, p. 63–74, 2013.

SHI, C. et al. Interaction Mechanism of Oil-in-Water Emulsions with Asphaltenes Determined Using Droplet Probe AFM. **Langmuir**, v. 32, n. 10, p. 2302–2310, 2016.

SILVA, F. R. DA. **Estudo de um novo sistema de separação primária de gás-óleo-água para plataformas de petróleo**. [s.l.] Trabalho de diplomação em Engenharia Química. UFRGS, 2013.

SIMMONS, M. J. H.; WILSON, J. A.; AZZOPARDI, B. J. Interpretation of the flow characteristics of a primary oil & water separator from the residence time distribution. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 80, n. July, p. 471–481, 2002.

SIMONNET, M. et al. Experimental determination of the drag coefficient in a swarm of bubbles. **Chemical Engineering Science**, v. 62, n. 3, p. 858–866, 2007.

SLATER, D. M. et al. Chaotic motions of a forced droplet-droplet oscillator. **Physics of Fluids**, v. 20, n. 9, 2008.

STRICKLAND, W. T. Laboratory results of cleaning produced water by gas flotation. **Soc. Pet. Eng. J**, v. 10, p. 175–190, 1980.

SUSSMAN, M.; PUCKETT, E. G. A Coupled Level Set and Volume-of-Fluid Method for Computing 3D and Axisymmetric Incompressible Two-Phase Flows. **Journal of Computational Physics**, v. 162, n. 2, p. 301–337, 2000.

SYLVESTER, N. D.; BYESED, J. J. Oil/water separation by induced air flotation. **Soc. Pet. Eng**, p. 579–590, 1980.

TABIB, M. V.; ROY, S. A.; JOSHI, J. B. CFD simulation of bubble column-An analysis of interphase forces and turbulence models. **Chemical Engineering Journal**, v. 139, n. 3, p. 589–614, 2008.

TABOR, R. F. et al. Homo- and hetero-interactions between air bubbles and oil droplets measured by atomic force microscopy. **Soft Matter**, v. 7, n. 19, p. 8977–8983, 2011.

TALAIA, M. A R. Terminal Velocity of a Bubble Rise in a Liquid Column. **International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electric and Computer Engineering**,

v. 1, n. 4, p. 220–224, 2007.

TOMASONI, E.; DOS SANTOS, D. B. **Análise de riscos do emissário submarino para o descarte de água produzida**. II Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás e Biocombustíveis. **Anais...**2016.

TREYBAL, R. E. **Mass Transfer Operations**. Third Edit ed. London: McGraw-Hill Book Company, 1980.

TRIPATHI, M. K.; SAHU, K. C.; GOVINDARAJAN, R. Dynamics of an initially spherical bubble rising in quiescent liquid. **Nature Communications**, v. 6, n. 2004, 2015.

UEYAMA, K. A study of two-fluid model equations. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 690, p. 474–498, 2012.

VAN SINT ANNALAND, M.; DEEN, N. G.; KUIPERS, J. A. M. Numerical simulation of gas bubbles behaviour using a three-dimensional volume of fluid method. **Chemical Engineering Science**, v. 60, n. 11, p. 2999–3011, 2005.

VÉLEZ-CORDERO, J. R.; ZENIT, R. Bubble cluster formation in shear-thinning inelastic bubbly columns. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 166, n. 1–2, p. 32–41, 2011.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to computational fluid dynamics the finite volume method**. 2. ed. England: Pearson Education Limited, 2007. v. 2

WESSELINGH, J. A. The velocity of particles, drops and bubbles. **Chemical Engineering and Processing**, v. 21, n. 1, p. 9–14, 1987.

WILCOX, D. C. **Turbulence Modeling for CFD**. [s.l.] La Cañada: DCW Industries, 1993.

WU, M.; GHARIB, M. Experimental studies on the shape and path of small air bubbles rising in clean water. **Physics of Fluids**, v. 14, n. 2002, p. 49–52, 2002.

YAN, S. et al. Drop attachment behavior of oil droplet-gas bubble interactions during flotation. **Chemical Engineering Science**, v. 223, p. 115740, 2020.

YAN, X. et al. Drag coefficient fluctuation prediction of a single bubble rising in water. **Chemical Engineering Journal**, v. 316, p. 553–562, 2017a.

YAN, X. et al. Drag Coefficient Prediction of a Single Bubble Rising in Liquids. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 57, n. 15, p. 5385–5393, 2018.

YANG, W.-C. **Handbook of fluidization and fluid-particles systems**. New York, EUA: Marcel Dekker, Inc, 2003.

YASUDA, K.; HANEDA, K. Separation of oil droplets from oil-in-water emulsion using a microbubble generator. **Journal of Chemical Engineering of Japan**, v. 48, n. 3, p. 175–180, 2015.

ZAMAN, A. U.; BERGSTROM, D. J. Implementation of two-fluid model for dilute gas-solid flow in pipes with rough walls. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, v. 136, n. 3, p. 1–11, 2014.

ZANDE, M. J. VAN DER; BROEK, W. M. G. T. VAN DEN. Break-up of oil droplets in the production system. p. 1–7, 1996.

ZANDE, M. J. VAN DER; JANSSEN, P. H.; BROEK, W. M. G. T. VAN DEN. **Size of oil droplets under high water-cut condition**. SPE Production and Operations Symposium. **Anais...Oklahoma**: 2001.

ZHOU, Y.; ZHAO, C.; BO, H. Analyses and modified models for bubble shape and drag coefficient covering a wide range of working conditions. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 127, p. 103265, 2020.

ZHUANG, Y.; CHEN, X.; LIU, D. Stochastic bubble developing model combined with Markov process of particles for bubbling fluidized beds. **Chemical Engineering Journal**, v. 291, p. 206–214, 2016.

ZIEGENHEIN, T.; LUCAS, D. Observations on bubble shapes in bubble columns under different flow conditions. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 85, p. 248–256, 2017.