



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

ROBSON DE SOUZA VASCONCELOS

**SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA DE UM PROTÓTIPO SEMI-INDUSTRIAL DE
FLOTAÇÃO POR PRÉ-SATURAÇÃO INDUZIDA PARA SEPARAÇÃO ÁGUA-
ÓLEO**

**Recife
2022**

ROBSON DE SOUZA VASCONCELOS

**SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA DE UM PROTÓTIPO SEMI-INDUSTRIAL DE
FLOTAÇÃO POR PRÉ-SATURAÇÃO INDUZIDA PARA SEPARAÇÃO ÁGUA-ÓLEO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Área de concentração: Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos

Orientadores: Prof. Dr. Mohand Benachour.
Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos.
Coorientadora: Profa. Dra. Leonie Asfora Sarubbo.

Recife

2022

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz CRB-4 / 2022

- V331s Vasconcelos, Robson de Souza.
Simulação fluidodinâmica de um protótipo semi-industrial de flotação por pré-saturação induzida para separação água-óleo / Robson de Souza Vasconcelos. 2022.
112 f: figs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Mohand Benachour.
Orientador: Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos.
Coorientadora: Profa. Dra. Leonie Asfora Sarubbo.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Recife, 2022.
Inclui referências.
1. Engenharia química. 2. Água residual oleosa. 3. Flotação. 4. Fluidodinâmica computacional. 5. Separação água-óleo. 6. unidade semi-industrial de FPSI. I. Benachour, Mohand (Orientador). II. Santos, Valdemir Alexandre dos (Orientador). III. Sarubbo, Leonie Asfora (Coorientador). IV. Título.

UFPE

660.2 CDD (22. ed.)

BCTG / 2022 - 379

ROBSON DE SOUZA VASCONCELOS

**SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA DE UM PROTÓTIPO SEMI-INDUSTRIAL DE
FLOTAÇÃO POR PRÉ-SATURAÇÃO INDUZIDA PARA SEPARAÇÃO ÁGUA-ÓLEO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico de Tecnologia e Geociências, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química. Área de concentração: Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Aprovado em: 15 / 08 / 2022.

Prof. Dr. Mohand Benachour/DEQ-UFPE
(Orientador)

Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos/DEQ-UNICAP
(Orientador)

Prof^a. Dr^a. Leonie Asfora Sarubbo/DEQ-UNICAP
(Co-orientadora)

Prof. Dr. José Marcos Francisco da Silva/DEQ-UFPE
(Examinador Interno)

Prof. Dr^a Otidene Rossiter Sá da Rocha/DEQ-UFPE
(Examinador Interno)

Prof. Dr. Nelson Medeiros de Lima Filho/DEQ-UFPE
(Examinador Interno)

Prof. Dr. Carlos Costa Dantas/DEN-UFPE
(Examinador Externo)

Prof. Dr. Francisco Madeiro Bernardino Junior /UNICAP
(Examinador Externo)

A Deus pela oportunidade, aos espíritos protetores e amigos pela intuição e a minha família, em especial aos meus pais construtores de meu caráter e sempre presentes nos grandes momentos de minha vida.

“O assassino secreto da inovação é a vergonha. Aquele medo profundo que todos temos de errar, de ser depreciados e de nos sentir menos do que o outro é o que nos impede de assumir os riscos indispensáveis para fazer nossas ideias avançarem”.

(Peter Sheahan, presidente da ChangleLabs)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de um novo recomeço.

Aos protetores e amigos espirituais as intuições e os bons pensamentos que me deram forças para essa longa jornada.

Aos meus professores, Orientadores e amigos, o Prof. Dr. Mohand Benachour, pela confiança depositada em mim e suas palavras de encorajamento ditas em momentos pertinentes e ao Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos, pelo apoio técnico, profissional e pessoal durante todo meu Doutorado e grande parte de minha existência.

A minha Co-orientadora, Prof^a. Dr^a Leonie Asfora Sarubbo, pelas palavras ditas nas horas certas, sem contar com o seu apoio técnico preciso.

A minha banca de avaliadores, Prof^o. Dr. José Marcos; Prof^a. Dr^a. Otidene Rocha, que me acompanharam desde o início deste Doutorado, pelas observações e sugestões preciosas, ditas de forma carinhosa e amiga.

A todos os Professores e Colaboradores do Departamento de Engenharia Química – DEQ.

À Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPGEQ) pelo apoio.

Ao Reitor da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Prof^o Alfredo Macêdo Gomes pela oportunidade em desenvolver este trabalho nesta universidade.

A Priscila, secretária da Pós-Graduação do Programa de Engenharia Química, pela paciência em sanar minhas dúvidas, sempre disposta a ajudar.

Aos meus pais Luiz Carlos Vieira de Vasconcelos (*In Memoriam*) e Maria Joseane de Souza, pelo grande apoio, compreensão, ajuda e, em especial, por todo carinho na presente caminhada.

A minha irmã Luiziane Vasconcelos, pela ajuda.

A minha esposa, Rosangela Henauth, pela cumplicidade, compreensão e oportunidade de caminhar juntos na mesma estrada.

Aos meus amigos, Alex Elton, Ivan Lins pela paciência e por terem me auxiliado nos momentos de dificuldades.

Aos meus sogros, Rosa Cristina da Silva Henauth e João de Deus Henauth Filho, pela acolhida e apoio precisos, sem contar os tantos exemplos e ensinamentos repassados a mim.

A minha madrinha Maria Auxiliadora Medeiros de Aguiar e meus tios Marineide Araújo dos Santos e Severino Claudino Araújo dos Santos, pela força espiritual e por acreditarem em mim nos momentos em que até eu duvidei da minha capacidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de Doutorado.

Ao Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI) pelo apoio técnico concedido.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Águas residuais oleosas, que constituem uma grande parte dos efluentes industriais, podem conter óleos, surfactantes, hidrocarbonetos e outros contaminantes como sais inorgânicos e outras matérias orgânicas. Neste cenário, o setor industrial tem direcionado pesquisas para agregar novas tecnologias direcionadas ao tratamento de efluentes oleosos. Para implementar tecnologias adequadas às circunstâncias atuais das empresas tem sido necessário definir se tais tecnologias possuem potenciais para oferecer água tratada para ser descartada em corpos d'água ou reutilizada de forma segura no próprio processo, sempre obedecendo às normas e regulamentos governamentais, em vigor. Neste trabalho, uma investigação computacional foi aplicada para avaliar o comportamento fluidodinâmico de um Flotador por Pré-saturação Induzida (FPSI) em escala Semi-Industrial (SI) no tratamento de águas oleosas. Mais especificamente a referida pesquisa abordou simulações da separação entre água e agregados estáveis, compostos por microbolhas envoltas por um filme oleoso proveniente do contato com gotículas de óleo. A densidade desses agregados, geralmente desconhecida e difícil de ser medida, foi estimada combinando as propriedades teóricas com a eficiência total de remoção do material oleoso, obtido de forma experimental. Para realização das simulações, foi utilizada a ferramenta de estudo de partículas presente no *software Solidworks* denominada de *Flow Simulation*. A estratégia proposta foi de menor esforço computacional para o *hardware* e relativa precisão, visto que se utilizou de um modelo fluidodinâmico homogêneo. Verificou-se, que o perfil fluidodinâmico de distribuição dos particulados, dividido em seis cenários, de acordo com a concentração do efluente na alimentação do sistema, apresentava eficiência próxima do aferido experimental, principalmente para cenários com maior teor de material oleoso, em que a maioria dos agregados formados são constituídos de particulados na faixa de 80 a 40 μm de diâmetros.

Palavras-chave: água residual oleosa; flotação; fluidodinâmica computacional; separação água-óleo; unidade semi-industrial de FPSI.

ABSTRACT

Oily wastewater, which constitutes a large part of industrial effluents, can contain oils, surfactants, hydrocarbons and other contaminants such as inorganic salts and other organic materials. In this scenario, the industrial sector has directed research to add new technologies aimed at the treatment of oily effluents. To implement technologies appropriate to the current circumstances of companies, it has been necessary to define whether such technologies have the potential to offer treated water to be discarded in water bodies or reused safely in the process itself, always complying with government rules and regulations in force. In this work, a computational investigation was applied to evaluate the fluid dynamic behavior of an Induced Pre-Saturation Flotation (FPSI) on a Semi-Industrial (SI) scale in the treatment of oily waters. More specifically, this research addressed simulations of the separation between water and stable aggregates, composed of microbubbles surrounded by an oily film resulting from contact with oil droplets. The density of these aggregates, generally unknown and difficult to measure, was estimated by combining the theoretical properties with the total efficiency of removal of the oily material, obtained in an experimental way. Para realização das simulações, foi utilizada a ferramenta de estudo de partículas presente no *software Solidworks* denominada de *Flow Simulation*. The proposed strategy was of lower computational effort for the hardware and relative precision, since a homogeneous fluid dynamic model was used. It was found that the fluid dynamic profile of particulate distribution, divided into six scenarios, according to the effluent concentration in the system feed, presented efficiency close to the experimental measurement, mainly for scenarios with higher content of oily material than most aggregates formed are made up of particulates in the range of 80 to 40 μm in diameter.

Keywords: oily wastewater; flotation; water-oil separation; computational fluid dynamics; semi-industrial unit IPSF.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do princípio FAI para geração de bolhas _____	30
Figura 2 - Esquema dos métodos hidráulico (a) e mecânico (b) e de dispersão de ar utilizado na FAI _____	31
Figura 3 - Esquema do princípio FAD para geração de bolhas _____	32
Figura 4 - Sistemas para saturação de água na FAD _____	33
Figura 5 - Esquema de câmara de flotação por ar dissolvido _____	35
Figura 6 - Fluxograma simplificado das etapas de modelagem computacional _____	40
Figura 7 - Comparativo entre as abordagens DNS, LES e RANS, na simulação de escoamentos do tipo jato _____	48
Figura 8 - Transformação de equações diferenciais em sistema de equações algébricas por método numérico _____	53
Figura 9 - Esquema de malha não estruturada _____	54
Figura 10 - Esquema de malha estruturada _____	54
Figura 11 - Esquema de malha híbrida estruturada e não estruturada _____	55
Figura 12 - Esquema de malha cartesiana de corpo imerso _____	55
Figura 13 - Esquema da distribuição de células parciais e volumes de controle _____	56
Figura 14 - Esquema dos níveis de refinamento _____	57
Figura 15 - Mecanismos de captura bolha/partícula _____	58
Figura 16 - Esquema comparativo da captura de particulado em único e duplo estágio _____	59
Figura 17 - Esquema do mecanismo de espalhamento da gotícula de óleo sobre a bolha de ar _	60
Figura 18 - Microfotografia das etapas de (a) Aproximação, (b) adesão pela drenagem do de filme líquido, (c) espalhamento de óleo sobre a superfície de uma bolha e (d) formação do agregado bolha-gotícula estável _____	61
Figura 19 - Esquema simplificado com os componentes básicos e funcionamento do Flotador com Pré-saturação Induzida (FPSI) _____	65
Figura 20 - Flotador FPSI-SI instalado na planta utilizados nos ensaios experimentais _____	66
Figura 21 - Flotador FPSI-SI instalado na planta utilizados nos ensaios experimentais Notebook utilizado nas simulações _____	68

Figura 22 - Modelo virtual simplificado do FPSI-SI gerado com o software SolidWorks (a) vista do plano YZ, (b) vista do plano XY _____	69
Figura 23 - Condições de contorno aplicadas ao modelo virtual do sistema FPSI-SI _____	71
Figura 24 - Malha cartesiana gerada com refinamento automático para a geometria do flutador (a) vista do plano YZ, (b) vista do plano XY _____	73
Figura 25 - Esquema da configuração utilizada na configuração C1 _____	74
Figura 26 - Vetores de velocidades na vista do plano XY da simulação preliminar com a configuração C1 _____	75
Figura 27 - Esquema da configuração utilizada na configuração C2 _____	76
Figura 28 - Gráfico do mecanismo MHS gerado pelo Flow Simulation/ SolidWorks durante a execução da condição C2 _____	77
Figura 29 - Vetores de velocidades na vista do plano XY da simulação preliminar com a configuração C2 _____	78
Figura 30 - Esquema da configuração utilizada na configuração C3 _____	78
Figura 31 - Vetores de velocidades na vista do plano XY da simulação preliminar com a configuração C3 _____	79
Figura 32 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 100 μm na configuração C1	80
Figura 33 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 100 μm na configuração C2	80
Figura 34 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 100 μm na configuração C3	81
Figura 35 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 50 μm na configuração C1	82
Figura 36 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 50 μm na configuração C2	82
Figura 37 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 50 μm na configuração C3	83
Figura 38 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 5 μm na configuração C1	84
Figura 39 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 5 μm na configuração C2	84
Figura 40 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 5 μm na configuração C3	85
Figura 41 - Comparativo entre as eficiências de remoção de agregados obtidos via simulações C1, C2 e C3 para faixa de particulados de 5 a 100 μm _____	88
Figura 42 - Vetores de velocidades (a) vista do plano YZ, (b) vista do plano XY no momento 10800 s _____	89
Figura 43 - Vetores de velocidades (a) vista do plano YZ, (b) vista do plano XY no momento 21600 s _____	89

Figura 44 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 100 μm de diâmetro no momento 10800 s	90
Figura 45 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 100 μm de diâmetro no momento 21600 s	90
Figura 46 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 85 μm de diâmetro no momento 10800 s	91
Figura 47 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 85 μm de diâmetro no momento 21600 s	91
Figura 48 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 80 μm de diâmetro no momento 10800 s	92
Figura 49 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 80 μm de diâmetro no momento 21600 s	92
Figura 50 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 40 μm de diâmetro no momento 10800 s	93
Figura 51 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 40 μm de diâmetro no momento 21600 s	93
Figura 52 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 35 μm de diâmetro no momento 10800 s	94
Figura 53 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 35 μm de diâmetro no momento 21600 s	94
Figura 54 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 5 μm de diâmetro no momento 10800 s	95
Figura 55 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 5 μm de diâmetro no momento 21600 s	95
Figura 56 - Comparativo entre as eficiências de remoção de óleo obtidas via simulações com tempos 10800 s (S1) e 21600 s (S2) em relação aos dados experimentais (EXP) coletados	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação física das gotículas de óleo _____	21
Tabela 2 - Classificação do nível de dispersão das gotas de óleo _____	21
Tabela 3 - Processos de separação óleo-água _____	29
Tabela 4 - Valores da constante de Henry para os gases nitrogênio (H_N) e oxigênio (H_O) _____	36
Tabela 5 - Concentrações de ar dissolvido em equilíbrio na água reciclada que sai do saturador _____	37
Tabela 6 - Valores das constantes empíricas do modelo κ - ϵ _____	50
Tabela 7 - Dados das vazões utilizadas nos ensaios experimentais _____	66
Tabela 8 - Teor de óleo e graxas obtidas nos ensaios experimentais _____	67

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1.1	Águas residuais oleosas	20
2.1.2	Emulsões de óleo em água	22
2.1.2.1	Estabilidade de emulsões	23
2.1.2.2	Mecanismos desestabilizadores	25
2.1.2.3	Condições hidrodinâmicas	26
2.1.3	Limites legais	27
2.1.4	Tratamentos para efluentes oleosos	27
2.1.4.1	Tratamento primário	27
2.1.4.2	Tratamento secundário	28
2.1.4.3	Tratamento terciário	28
2.1.5	Flotação a ar	29
2.1.5.1	Flotação por ar induzido (FAI)	30
2.1.5.2	Flotação por ar dissolvido (FAD)	31
2.1.5.3	Flotação por pré-saturação induzida (FPSI)	37
2.1.6	Fluidodinâmica computacional	38
2.1.6.1	Processo de modelagem	39
2.1.7	Modelagem matemática do escoamento multifásico	42
2.1.7.1	Escoamento multifásico	42
2.1.7.2	Modelagem matemática	43
2.1.7.2.1	<i>Modelo de turbulência e de rastreamento de partículas</i>	46
2.1.7.2.2	<i>Método de discretização e geração de malha</i>	53
2.2	ESTADO DA ARTE	57
2.2.1	Mecanismos de interação microbolha e gotículas de óleo	57
2.2.2	Fluidodinâmica aplicada em flotadores	61
3	MATERIAL E MÉTODOS	64
3.1	DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA	64

3.1.2	Modelagem matemática	68
3.1.2.1	Criação da geometria	69
3.1.2.2	Geração da malha	69
3.1.2.3	Pré-processamento e configurações	70
3.1.2.3.1	<i>Configuração do estudo e rastreamento de partículas</i>	71
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
4.1	MODELO FISICO VIRTUAL	73
4.2	TESTES DAS CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA PARA REMOÇÃO DE AGREGADOS	73
4.3	SIMULAÇÃO DO FPSI	88
4.4	VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO	95
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	98
5.1	CONCLUSÕES	98
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	99
	REFERÊNCIAS	100

1 INTRODUÇÃO

Iniciativas para a redução do consumo de água, dependendo da disponibilidade de recursos hídricos, para qualquer instalação industrial, ficam presas às questões ambientais e condicionantes legais de gestão de recursos associados à cobrança pelo uso da água (FERNÁNDEZ; TAPIA, 2021). Ficam então subordinadas a reusar, na medida do possível, seus próprios efluentes, após tratamento adequado. Os custos de implantação e operação são inferiores aos associados à captação e tratamento de águas de mananciais ou mesmo à compra de água oferecida por empresas de saneamento, tanto de sistemas potáveis como de sistemas de água de reuso (SINGH; SINGH, 2019).

As águas residuais oleosas, constituinte de grande percentual dos efluentes industriais, podem conter óleos, surfactantes, hidrocarbonetos e outros contaminantes como sais inorgânicos e matéria orgânica. Neste cenário o setor industrial é direcionado a conhecer as tecnologias de tratamento disponíveis e necessárias, a fim de implementar a mais adequada às circunstâncias atuais da empresa, obedecendo às normas e regulamentos vigentes (ZOLFAGHARI *et al.* 2016; LEE *et al.* 2019).

A resolução do Conselho Nacional do Meio ambiente – CONAMA 430/2011 (art. 16, i) que complementa e altera a resolução CONAMA 357/2005, estabelece o padrão de lançamento dos efluentes descartados pelo setor industrial, em corpos hídricos receptores no território nacional. Esta resolução, atribui valores máximos para o teor de resíduo oleoso presente nestes efluentes. por isso, alguns tratamentos para efluentes oleosos têm sido aplicados nas indústrias objetivando o seu descarte ou o reuso da água tratada na própria planta fabril (BRASIL, 2005; 2011).

Tratamentos mecânicos, físico-químicos e biológicos são os métodos mais utilizados para a recuperação de águas residuárias, em particular água oleosa. Os processos de separação gravitacional, hidrociclone, adsorção, coagulação, flotação e filtração por membrana são alguns tipos de tratamento comumente empregados para essa classe de efluente (YU; HAN; HE, 2017; JIMÉNEZ *et al.* 2017).

Procedimentos técnicos de flotação têm sido utilizado para solução de diferentes problemas de efluentes industriais. Essas técnicas possuem vantagens significativas, como por exemplo, carga hidráulica elevada (baixa taxa de retenção) e uma remoção eficaz de gotículas oleosas. Em detrimento destas vantagens e atreladas ao risco ambiental do efluente oleoso, elevado número de novas técnicas e equipamentos são desenvolvidos por equipes de pesquisadores. Esses estudiosos

têm como objetivo o aumento da flutuabilidade das gotículas de óleo através da interação com as bolhas, micro e nanométricas, removendo assim do efluente o componente oleoso (GOH; LEE, 2018).

Desenvolvida nos últimos anos, a pré-saturação induzida desponta como técnica promissora quanto ao tratamento de águas contaminadas com óleo. Por se tratar de uma técnica recente, os trabalhos disponíveis na literatura são escassos. Dentre esses, algumas pesquisas encontradas são inclinadas para determinação da eficiência do processo de flotação em escala de bancada com ou sem agentes coadjuvantes de interação bolha-gotículas. Do ponto de vista da mecânica dos fluidos, é essencial compreender a fluidodinâmica, como interferente no *design* e dimensionamento de equipamentos em escalas maiores, como é o caso do flotador por pré-saturação induzida em escala semi-industrial - FPSI-SI (AHMADI; SEFIDVASH, 2018; FILHO *et al.* 2021).

Uma importante ferramenta em Engenharia é a Fluidodinâmica Computacional, também chamada de *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*), que permite o uso de técnicas matemáticas, numéricas e computacionais para o estudo preditivo (qualitativo e quantitativo) de fenômenos que envolvem as transferências de quantidade de movimento, calor e massa. Esta ferramenta tem sido utilizada para resolver problemas de processos e equipamentos, onde a experimentação é limitada ou inviável economicamente (WANG *et al.* 2018). Desta forma, através da manipulação adequada da *CFD* é possível obter informações detalhadas sobre o comportamento de equipamentos e/ou de um processo como um todo. Entretanto, segundo Maliska (2004), o usuário deve fornecer informações necessárias à solução do problema, como por exemplo Geometria (forma e tamanho do domínio, entradas e saídas de massa do sistema); Propriedades dos fluidos (temperatura, densidade, viscosidade, condutividade térmica); Condições iniciais (importante para um fenômeno dependente do tempo); Condições de contorno (essencial para a resolução das equações que regem a fluidodinâmica computacional).

Entre os requisitos recomendados para a escolha de um *software* de aplicação da *CFD* na simulação de problemas da Engenharia, encontram-se critérios como fidelidade na modelagem, menor esforço computacional e tempo de simulação. Ramlan e Darlis (2020) apontam que apesar de serem ferramentas consolidadas em simulações *CFD*, os robustos pacotes comerciais de fluidodinâmica computacional da ANSYS (FLUENT e CFX) apresentam uma interface de usuário complexa, gerando certa dificuldade para projetar um modelo. Martín-Rodríguez *et al.* (2019) são enfáticos quando citam que o *Flow simulation* é uma ferramenta de *CFD* presente no *Solidworks*,

que fornece uma interface de usuário intuitiva para projetar e simular. Utilizando uma linguagem próxima da realidade, com a aplicação de abordagens numéricas, para uma análise pseudo-homogênea de escoamentos multifásicos, e o uso de um modelo de turbulência modificado de duas equações κ - ϵ para valores pequenos do número de Reynolds, referido *software* simula com precisão diversas circunstâncias no escoamento de fluidos.

Embora versátil na investigação fluidodinâmica de sistemas, o *Solidworks* ainda requer a melhoria de modelos, como o de turbulência segundo Yusuf *et al.* (2020), e a inserção de novos, tal qual a abordagem heterogênea de fluxos conforme indicado por Kim *et al.* (2018), a fim de melhor analisar escoamentos envolvendo fluidos imiscíveis entre si. O uso deste programa e seus suplementos em projetos e pesquisas direcionam aos seus desenvolvedores a possibilidade de atualizações do programa, a fim de estender os limites na modelagem. Quando executados, estes incrementos permitirão atender, o mais integralmente possível, os critérios de escolha de um *software* de fluidodinâmica computacional aplicados na Engenharia (VERMA; WEBER, 2020).

Baseado nesse contexto, o presente trabalho de pesquisa tem como objetivo geral simular a fluidodinâmica da separação água-óleo em um protótipo semi-industrial de FPSI. Para se alcançar este objetivo geral foram implantados os seguintes objetivos específicos:

- Definir as etapas básicas dos mecanismos fluidodinâmicos de separação água-óleo em uma unidade de FPSI;
- Construir um modelo virtual de um FPSI-SI, envolvendo a criação de malhas, para análise da geometria;
- Adaptar modelos fluidodinâmicos multifásicos a serem utilizados em CFD com o *software Solidworks*;
- Simular o processo de FPSI envolvido;
- Validar a simulação;
- Definir as condições operacionais adequadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1.1 Águas residuais oleosas

O uso extensivo de produtos derivados de petróleo (lubrificantes, óleo diesel, dentre outros) pela maioria dos membros do setor industrial (termelétricas, petroquímicas, por exemplo) está atrelado ao perigo em potencial de poluição por hidrocarbonetos. Para atender a demanda industrial, o setor petrolífero expande de forma contínua suas atividades elevando ainda mais o risco ambiental. As atividades de produção (*upstream*) e de refino (*downstream*) geram grandes quantidades de águas residuais oleosas. Por sua vez, o descarte ambientalmente aceitável destes volumes, continua sendo um desafio. Desta forma, o tratamento de efluentes oleosos é uma necessidade urgente e emergente nas indústrias químicas de modo abrangente (ROCHA E SILVA *et al.* 2018).

Rocha e Silva *et al.* (2018) definem “água oleosa” como uma representação de todos os tipos de água que apresentam quantidades variáveis de óleos e graxas, além de uma ampla variedade de materiais em suspensão, incluindo areia, argila e outras substâncias coloidais.

Atividades do cotidiano fabril, como o fechamento ou abertura dos equipamentos, esgotamento dos tanques de armazenagem, descarga da torre de resfriamento, despejos dos condicionadores de água, drenagens pluviais, lavagem de áreas ou equipamentos são exemplos de fontes geradoras de água oleosa em uma indústria (WALSH, 2016; VASCONCELOS *et al.* 2017).

O óleo disperso em água afeta a interface entre duas fases químicas da mistura, possibilitando-o subdividir-se em gotículas finas e isso acelera a dispersão na água, acarretando a dissolução dos componentes hidrofóbicos do óleo. Assim, alguns estudiosos asseguram que a mistura óleo em água pode apresentar-se de quatro maneiras: livre, disperso, solubilizado e emulsionado (FRANZOL; REZENDE, 2015).

Pesquisas realizadas por Rhee; Martyn; Kremer (1989) relataram que a mistura óleo em água pode ser elencada fisicamente de acordo com o nível de dispersão e estabilidade do componente oleoso, podendo este se encontrar presente na água em cinco modos diferentes.

(PINTOR *et al.* 2016). A classificação dos tipos de dispersão que as gotículas de óleo apresentam no meio aquoso e seus respectivos diâmetros de gotas, são trazidos pela Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação física das gotículas de óleo

Classe física	Faixa de diâmetro	Descrição
Livre	> 150 μm	Gotas que sobem rapidamente para a superfície em condições de repouso, devido ao desequilíbrio de forças causada pela densidade diferencial entre óleo e água
Dispersos	20 - 150 μm	Gotículas estabilizadas por cargas elétricas e outras forças interpartículas
Emulsionado	< 20 μm ;	Gotículas estabilizadas pela ação química de agentes ativos de superfície
Dissolvido	< 5 μm ;	Gotículas solubilizada ou muito finamente dispersas
Sólidos úmidos	-	Sólidos suspensos com óleo aderido à sua superfície

Fonte: Adaptado de Pintor *et al.* (2016)

Pintor *et al.* (2016), admitem que outros pesquisadores, direta ou indiretamente, classifiquem a dispersão oleosa, seja considerando algumas classes ou dando ênfase ao papel dos surfactantes na emulsificação do óleo na água, por exemplo. Desta forma, tais modificações fornecem apenas variações da classificação da Tabela 1.

Podemos visualizar, através de uma outra perspectiva, a forma que o óleo se dispersa na água (SATHTHASIVAM; LOGANATHAN; SARP, 2016). A Tabela 2 ilustra essa classificação.

Tabela 2 - Classificação do nível de dispersão das gotas de óleo

Formato	Faixa de diâmetro	Descrição
Livre/ Disperso	> 20 μm	Baixa densidade específica e fácil de separar
Emulsionado (Físico)	5 - 20 μm	Formas de emulsão devido a ações mecânicas, (Ex.: estrangulamento de válvula e bombeamento)
Emulsionado (Químico)	< 5 μm ;	Forma de emulsão devido à presença de surfactantes aniônicos
Dissolvido/ Solubilizado	-	Formado por todos os hidrocarbonetos e outros compostos que têm alguma solubilidade na água
Sólidos úmidos	-	Óleo que está ligado às partículas sólidas

Fonte: Adaptado de Saththasivam; Loganathan; Sarp, (2016)

No entanto, Saththasivam; Loganathan; Sarp (2016); Pintor *et al.* (2016), concordam que a escolha do tipo de método de separação e os recursos que precisam ser indicados para alcançar o objetivo do tratamento, sofrem influência dos critérios de dispersão e estabilidade da gotícula oleosa. Em função disto, inúmeras técnicas são utilizadas para separação óleo/água e o método de tratamento adequado é função das características do efluente (concentração de óleo, tamanho de gota, a existência ou não de sólidos suspensos etc.) e da capacidade específica desejada.

An *et al.* (2017) propuseram alguns caminhos para o tratamento do óleo livre e o disperso, que podem ser removidos por meio de métodos convencionais de separação gravitacional. Contudo, a eficiência de separação do óleo disperso dependerá da presença de agentes surfactantes, bem como, da distribuição de tamanhos de gotículas.

No caso do óleo emulsionado, o tamanho das gotas dificulta a utilização de separação por processos gravitacionais, requisitando, normalmente, o uso de processos mais complexos tais como, a centrifugação ou a flotação, associados ao emprego de produtos químicos com ação desemulsificantes. Em relação ao óleo dissolvido, extremamente difícil de promover a sua separação, faz-se necessário o uso de processos químicos especiais tais como, a extração por solventes, e/ou o emprego do tratamento biológico. Já para o óleo quando aderido às superfícies de partículas, a separação se promove com a remoção de sólidos em suspensão (LEE; KIM, 2017).

Diante das formas de dispersão abordadas, o óleo sob a forma emulsionada é a que mais preocupa, devido ao elevado grau de dificuldade encontrado para a sua remoção (LINS *et al.* 2017).

2.1.2 Emulsões de óleo em água

A definição de emulsão é trazida por Schramm (2006); Pashley; Karaman (2021) que dizem que esta é uma mistura de dois líquidos imiscíveis ou parcialmente miscíveis, em que uma de suas fases se encontra dispersa na outra sob forma de gotas de tamanho microscópio ou coloides.

Rajak *et al.* (2015) apresentam a classificação das emulsões de acordo com a natureza da fase contínua. Segundo esses pesquisadores, nas emulsões de água em óleo, gotas de água estão dispersas em óleo, sendo o óleo a fase contínua e a água é a fase descontínua. Nas chamadas emulsões óleo em água, gotas de óleo estão dispersas na água. Eles definem as gotículas como fase interna ou dispersa e o outro líquido como fase externa ou contínua.

Do ponto de vista termodinâmico, pode-se distinguir dois tipos de emulsão: macroemulsões, que são sistemas metaestáveis ou instáveis (tamanho de partículas $> 0.5 \mu\text{m}$), e microemulsões, que são sistemas termodinamicamente estáveis (tamanho de partículas $< 100 \text{ nm}$). Vários autores propuseram uma definição para microemulsão: Hoar; Schulman (1943) deram a primeira descrição, enfatizando aspecto, tamanho, natureza de fases e efeitos de translucidez; Overbeek (1978) descreveu esses sistemas como composição de uma minúscula gota (6-60 nm de diâmetro) de um líquido disperso em outro, devido à presença de uma concentração suficiente de tensoativos; e Robb (1982) considerou como sistemas dispersos, transparentes ou translúcidos, termodinamicamente estáveis, monofásicos, formados a partir de uma aparente solubilização espontânea de dois líquidos, normalmente imiscíveis, na presença de tensoativo (OGEMDI, 2019).

2.1.2.1 Estabilidade de emulsões

De acordo com Sharma *et al.* (2015) a estabilidade de uma emulsão é a capacidade da mesma em manter sua homogeneidade durante certo período de tempo. Segundo os autores, as emulsões originadas da dispersão de uma substância pura em outra são instáveis sob o ponto de vista termodinâmico.

Para Ravera *et al.* (2021), na coalescência há uma grande redução na área interfacial das fases, o que faz com que a variação da energia livre se torne negativa, caracterizando o processo de coalescência como espontâneo e as emulsões como termodinamicamente instáveis.

Umar *et al.* (2018), Pashley; Karaman (2021), dizem que a estabilidade das emulsões é afetada pelos volumes relativos das fases líquidas, o tamanho de gotas da fase dispersa e a viscosidade. Segundo eles, as emulsões estabilizadas fisicamente são aquelas formadas sem adição de substâncias surfactantes, mantida por cargas elétricas inerentes ao sistema. A estabilidade deste tipo de emulsão é fortemente afetada pela fração volumétrica da fase dispersa em relação à fase contínua, viscosidade da fase externa e, principalmente, pela distribuição de tamanho e pela carga superficial das gotas.

A adição de uma substância, de caráter surfactante, durante a sua formação garante às emulsões uma estabilidade razoável, denominada como estabilização química. A estabilidade destas é decorrente da alta densidade de carga superficial conferida às gotas devido à adsorção da substância emulsificante na superfície das mesmas (PASHLEY; KARAMAN, 2021). As gotas de

óleo estabilizadas quimicamente, segundo Brasileiro *et al.* (2017) comportam-se, fluidodinamicamente, como partículas sólidas devido à sua alta densidade de carga superficial e seu reduzido tamanho.

Conforme Homede *et al.* (2018) as forças de London-van der Waals são responsáveis pelo conjunto de forças de atração e as de caráter iônico pelas repulsões mútuas das partículas. Para eles todas as forças intermoleculares são de origens eletrostáticas, eletrodinâmicas e eletrônicas. Estabelecem, também, a teoria das duplas camadas elétricas que afirmam que existe preponderância das forças de atração para maiores distâncias e repulsão para menores distâncias. Tal comportamento pode indicar a possibilidade do uso de “moléculas ponte” como intermediadora da ação das cargas presentes entre as partículas, como atenuadoras ou amplificadoras.

Ravera *et al.* (2021) classificam as forças atuantes nas gotas em intergotas e de campo. A ação da gravidade é uma típica força de campo, podendo estar presente, também, as de campo elétrico. As forças intergotas são representadas pela atração e repulsão natural assim como por outras geradas pela aplicação de uma força de campo entre elas.

A força Browniana está sempre presente em sistemas fluidos, porém a sua intensidade é menor que as outras forças atuantes. Seu efeito é insignificante comparado com a eletrocoalescência (ANAND *et al.* 2019). A constatação da carga superficial negativa em gotículas de óleo para uma extensa faixa de pH é realizada por Oliveira *et al.* (2017). Eles afirmam, também, que a estabilidade de algumas emulsões está associada às forças de interação eletrostática, resultantes da sobreposição das camadas dielétricas.

Franzol e Rezende (2015) perceberam que ao adicionar óleo vegetal à água destilada ocorreu o surgimento de cargas negativas nas superfícies das gotículas, recém-formadas. De acordo com eles, o surgimento da carga superficial em misturas oleosas é decorrente de dois fatores: ionização ou dissociação de grupos superficiais acarretando o carregamento negativo da superfície; adsorção específica de íons produzidos pela hidrólise da água, na superfície das gotas.

As diferenças e similaridades entre emulsões e os sistemas espumosos são visualizadas pelo trabalho de Ravera *et al.* (2021). Nestes, são relacionados os princípios para a determinação da estabilidade de emulsões e espumas. O estudo sobre o uso de surfactantes discrimina os diferentes tipos de emulsificantes utilizados em processos de flotação. Ainda segundo os autores, existem emulsificantes que possuem características hidrofílicas, hidrofóbicas e lipofílicas na mesma

molécula, sendo sua escolha de fundamental importância, quando se deseja obter uma estabilidade da emulsão.

2.1.2.2 Mecanismos desestabilizadores

A busca de mecanismos que permitam reduzir a estabilidade de sistemas dispersos é pesquisada exaustivamente. No que tange águas oleosas, a redução da estabilidade é de fundamental importância para se obter a separação das duas fases líquidas. O processo de desestabilização de uma emulsão é regido por diferentes fenômenos, como: coalescência, *creaming* (sedimentação), coagulação e floculação (YANG *et al.* 2018).

- **Coalescência das gotas**

O mecanismo de coalescência de gotas possui três etapas: aproximação e colisão; drenagem e desestabilização do filme interfacial (levando à sua ruptura); e por fim, junção das duas gotas (YANG *et al.* 2018).

Segundo Silva *et al.* (2015), a energia cinética é utilizada como parâmetro importante para a coalescência das gotas. Desta maneira, quando duas gotas se aproximam há três possibilidades:

- ✓ As gotas se repelem caso a energia cinética delas, no momento do choque, não seja suficiente para superar a energia de repulsão natural, vencer a tensão superficial de cada gota e romper o filme de interface;
- ✓ As gotas se aglutinam, ou seja, se juntam uma na outra, permanecendo com a mesma área superficial, caso a energia cinética delas no momento do choque, seja equivalente à energia a superar a repulsão natural, vencer a tensão superficial de cada gota e romper o filme de interface.
- ✓ As gotas coalescem, tornando-se uma gota de maior diâmetro, com redução de área superficial, caso a energia cinética delas, no momento do choque, seja superior à energia para superar a repulsão natural, vencer a tensão superficial de cada gota e romper o filme da interface.

- ***Creaming (sedimentação)***

Creaming é definido como o deslocamento gravitacional dos glóbulos de líquido para a superfície da fase contínua em função da diferença de densidade entre as duas fases, não necessariamente decorrente da coagulação e/ou floculação das gotas. O aspecto principal que caracteriza o *creaming* é a manutenção da integridade física das gotas (formato) (SCHRAMM, 2006).

- ***Coagulação***

A coagulação pode ser explicada através do modelo físico da dupla camada elétrica. A adição de um eletrólito inorgânico reduz a espessura da dupla camada, reduzindo as forças repulsivas eletrostáticas entre as partículas. A coagulação, portanto, ocorre quando a interação repulsiva entre as camadas dielétricas é suficientemente reduzida, permitindo a aproximação das partículas até que as forças de atração de Van der Waals predominem (HOMEDE *et al.* 2018).

- ***Floculação***

O conceito de floculação é trazido por Watanabe, (2017) como sendo um fenômeno de agregação de partículas mediante adição de polímeros floculantes. A floculação é geralmente dependente das forças de longo alcance e a repulsão entre as gotas de óleo será mais efetiva contra a agregação quanto maior for a espessura da camada difusa.

Agentes coagulantes e floculantes na separação sólido/líquido são frequentemente utilizados em processos industriais. Nos sistemas óleo/água, os surfactantes podem tanto estabilizar, como desestabilizar as gotas de óleo dependendo do tamanho, forma e polaridade das moléculas do surfactante (WATANABE, 2017; LOURENÇO, 2018).

2.1.2.3 Condições hidrodinâmicas

As condições hidrodinâmicas, principalmente o tipo de mistura e de misturadores, têm grande influência na desestabilização de emulsões com sais metálicos hidrolisantes e/ou polímeros

floculantes. Após a adição do agente desestabilizante, faz-se necessário uma mistura rápida para sua difusão na suspensão sólido/líquido ou emulsão óleo/água (YIANATOS *et al.* 2020).

2.1.3 Limites legais

De acordo com Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), através da Resolução CONAMA nº 001/1986, os impactos ambientais são resultantes de qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente. Sendo capazes de afetar, direta ou indiretamente, a qualidade e condições dos recursos ambientais como também o bem-estar da população (BRASIL, 1986).

Assim, com o objetivo de regulamentar e, por sua vez, minimizar os impactos ambientais gerados pelo descarte de água residuária oleosa, especificações foram estabelecidas limitando a quantidade de poluente oleoso permitida nos efluentes aquosos. Na Resolução CONAMA nº 430/2011, os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente em corpo receptor natural se atenderem as condições e padrões previstos no Art. 16 da Seção II. Este estabelece que para óleos minerais o limite é de até 20 mg.L⁻¹ e em relação aos óleos vegetais e gorduras animais é de até 50 mg.L⁻¹ (BRASIL, 2011).

2.1.4 Tratamentos para efluentes oleosos

O tratamento do efluente oleoso representa um enorme desafio, por causa da sua composição heterogênea (OLIVEIRA; RUBIO, 2011). Para cumprimento das legislações ambientais, não basta retirar o óleo que está presente na forma livre, sendo necessária também a remoção da quase totalidade do mesmo, presente na forma emulsionada. Tratamentos de efluente oleoso são classificados em três categorias: sistemas de tratamento primário, secundário e terciário (VARJANI *et al.* 2020).

2.1.4.1 Tratamento primário

Esse primeiro tratamento (método físico), tem por objetivo a remoção de óleos e graxas em forma de óleo livre, bem como a sedimentação de sólidos e partículas coloidais instáveis. A

separação destas substâncias da matriz aquosa é, geralmente, realizada aproveitando-se de forças gravitacionais e da diferença de densidade dos materiais envolvidos. Os separadores gravitacionais, decantação, sedimentação são os principais sistemas de tratamento pertencentes a este grupo (SHAMMAS; WANG, 2016).

2.1.4.2 Tratamento secundário

O tratamento secundário é dividido em dois tipos de métodos, físicos e químico. Os métodos químicos visam a remoção do óleo que não foi removido pelo tratamento primário, ou seja, a quebra do óleo emulsionado, seguido da sua remoção da fase aquosa. O óleo restante, normalmente, disperso em gotículas muito pequenas e estabilizadas por forças que interagem diretamente nas partículas e/ou agentes ativos de superfície (floculantes e coagulantes). Esse tipo de tratamento é verificado em águas residuais industriais com certa frequência, uma vez que a separação gravitacional é ineficaz para esse tipo de efluente. Os métodos físicos removem o óleo disperso por meio de mecanismos que afetam alguma grandeza física intrínseca ao efluente oleoso como força centrífuga, de empuxo e gravitacional (LEE *et al.* 2019).

Centrifugação, flotação, filtração, hidrociclone são exemplos desse tipo de método. Em muitos casos o tratamento, pelos métodos químicos, é utilizado como etapa preliminar dos tratamentos físicos recebendo a denominação de pré-tratamento (YU; HAN; HE, 2017).

Dentre esses métodos secundários, a flotação é extensamente utilizada como tratamento de águas oleosas, devido à elevada taxa de separação diante de fatores como, o tempo de residência reduzido, vinculado a um baixo custo operacional (SILVA *et al.*, 2015; LEE *et al.* 2019; SHEN *et al.* 2022). De modo geral, a literatura apresenta diversos trabalhos, visando o estudo de processos para a separação de emulsões água/óleo.

2.1.4.3 Tratamento terciário

O tratamento terciário (método biológico) é, muitas vezes, concebido com a perspectiva de reutilização de água, por isso espera-se uma excelente qualidade de efluente final. As membranas utilizadas nesse tipo de tratamento apresentam uma eficiência de remoção de óleo bastante significativa, porém são bem onerosas. As tecnologias de oxidação, estão emergindo como forma

de tratamento alternativo, devido a sua capacidade de destruir matéria orgânica dissolvida, reduzindo, a quantidade de DBO que ainda restar do tratamento anterior. Essas são algumas técnicas dentre tantas outras classificadas nesta terceira parte do tratamento (PINTOR *et al.* 2016).

A Tabela 3 ilustra alguns tipos de processo de separação óleo-água. Porém, além de critérios técnicos, peculiaridades inerentes ao local de implantação do processo separador água-óleo (custos operacionais, disponibilidade de mão-de-obra, área disponível para instalação do(s) equipamento(s), afetam, em alguns casos, à seleção desses tipos de equipamentos (AN *et al.* 2017).

Tabela 3 - Processos de separação óleo-água

Processo	Vantagens	Desvantagens
Gravitacional (SHAMMAS; WANG, 2016)	Remoção de sólidos em suspensão e óleos livres e dispersos	Remoção limitada de óleo emulsionado; requer fluxo baixo
Flotação a ar (ZHANG <i>et al.</i> 2015)	Remoção de óleos emulsionados e dispersos com adição química	Manipulação de lodo químico (necessário quando coagulantes químicos são usados)
Floculação química (WATANABE, 2017)	Remoção de altos níveis de sólidos suspensos	Lodo químico produzido
Filtração (YU; HAN; HE, 2017)	Remoção de sólidos em suspensão; separação de óleo livre, disperso e emulsionado	Retrolavagem (requerendo tratamento subsequente)
Membrana (PINTOR <i>et al.</i> 2016)	Remoção de óleo solúvel	Vida útil curta; baixa taxa de fluxo

Fonte: An *et al.* (2017)

2.1.5 Flotação a ar

A flotação é um processo de separação por gravidade originário do processamento de minerais, que encontrou ampla aplicação no tratamento de efluentes industriais. Na separação líquido/líquido os sistemas de flotação utilizam-se de bolhas de gás para aumentar a flutuabilidade de material disperso ou emulsionado. Na prática, qualquer gás pode ser usado, mas devido ao custo,

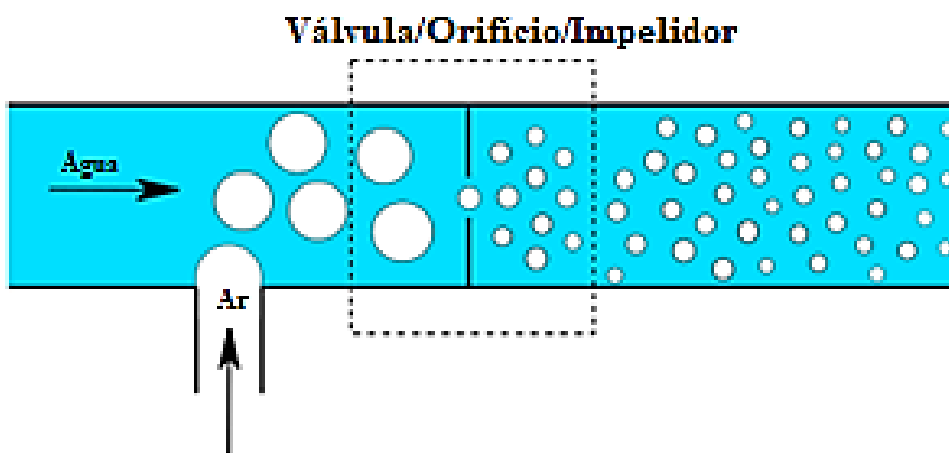
o ar atmosférico é, comumente, empregado na maioria das aplicações industriais. Assim, a flotação por gás é denominada mais especificamente como flotação por ar (REALI; PATRIZZI, 2016).

Dentre os métodos de flotação existentes, os que fazem uso do ar no tratamento de efluentes oleoso são, principalmente, de dois tipos: flotação por ar induzida (FAI), flotação por ar dissolvido (FAD). Estas técnicas diferem, fundamentalmente, na forma de geração de bolhas de ar, diferença de tamanho das bolhas, condições de mistura, taxa de carregamento hidráulico e tempos de retenção (CHAWALOESPHONSIYA *et al.* 2019).

2.1.5.1 Flotação por ar induzido (FAI)

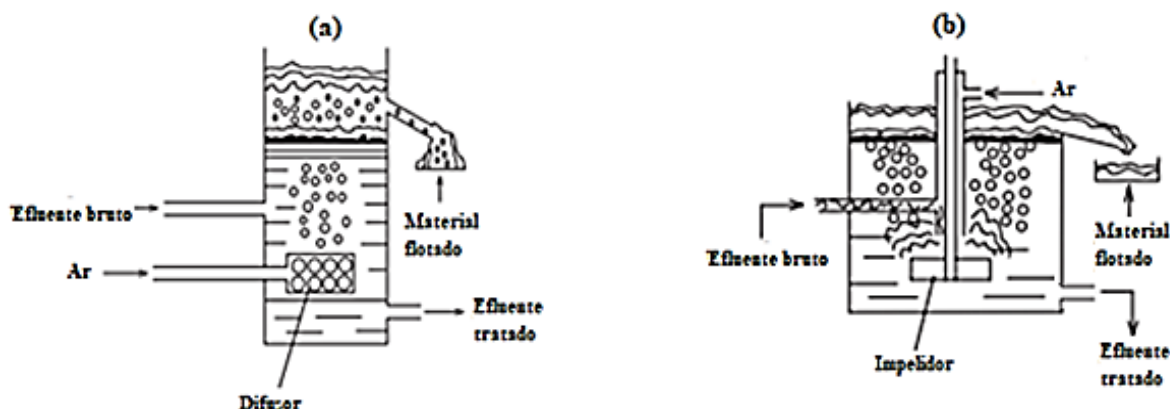
No processo de flotação por ar induzido (FAI), também denominado de flotação por ar disperso, a formação das bolhas de ar, tem seu princípio baseado na introdução do efluente pelo gás por métodos de dispersão mecânicos ou hidráulicos. Na FAI de caráter mecânico, o ar é disperso na água por redemoinhos de fluxo criados por um agitador mecânico. Pela ação de cisalhamento provocada por esses impulsores, pequenas bolhas são geradas. As unidades da FAI de base hidráulicas, por outro lado, usam um dispositivo difusor para dispersar o ar no líquido e tem menos peças móveis do que as unidades mecânicas (PICCIOLI *et al.* 2020). A ilustração dos princípios e métodos usados para geração de bolhas na FAI são trazidos nas Figura 1 e Figura 2, respectivamente.

Figura 1 – Esquema do princípio FAI para geração de bolhas



Fonte: Adaptado de Piccioli *et al.* (2020)

Figura 2 - Esquema dos métodos hidráulico (a) e mecânico (b) e de dispersão de ar utilizado na FAI



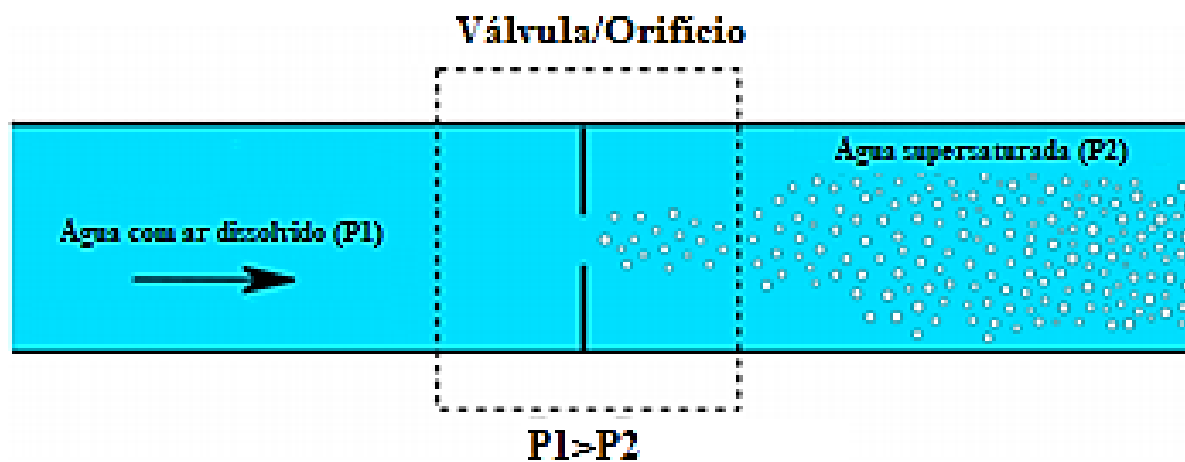
Fonte: Adaptado de Palaniandy *et al.* (2017)

A FAI, quando disposta em série, pode servir como única ferramenta de tratamento de efluente, por ser uma tecnologia mais robusta e menos sensível a alterações de tamanho de gota ou nível de pressão, quando comparada ao sistema FAD. Em alguns casos, podendo reduzir a concentração de óleo abaixo do limite de descarga desejado. O número de bolhas também impactam o desempenho da FAI, quanto a taxa de fluxo e ao tipo de aparelho de indução de ar (DUDEK *et al.* 2020). As bolhas de ar apresentam uma faixa de diâmetro de 100-1000 μm . Por outro lado, as bolhas maiores, na faixa milimétrica, podem provocar misturas no interior da célula de flotação e interferir no mecanismo de captura das gotículas (CHAWALOESPHONSIYA *et al.* 2019).

2.1.5.2 Flotação por ar dissolvido (FAD)

Em um processo de flotação, quando a fonte geradora de bolhas provém da brusca queda de pressão de um líquido saturado por ar, mediante elevada pressão, este processo denomina-se flotação por ar dissolvido, conforme visualizado na Figura 3 (HENAUTH *et al.* 2017; ROCHA E SILVA *et al.* 2018).

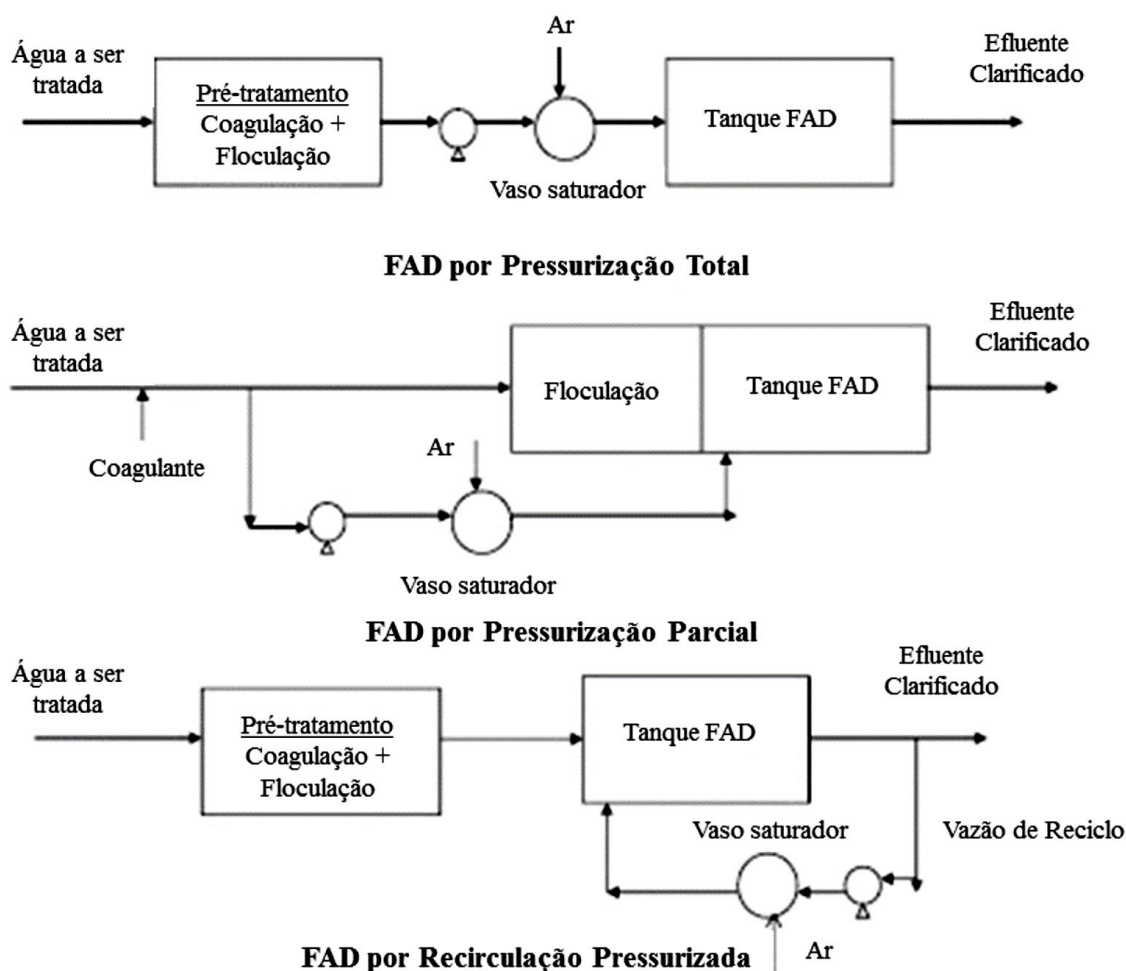
Figura 3 - Esquema do princípio FAD para geração de bolhas



Fonte: Adaptado de Piccioli *et al.* (2020)

O *layout* do processo de FAD em função do modo de alimentação do sistema saturador pode apresentar-se sob três formas: Pressurização total, parcial e recirculada. Na primeira forma, o efluente bruto passa por completo pelo sistema saturador; no segundo caso, parte do efluente bruto é saturado por ar e no terceiro arranjo operacional, a saturação ocorre em parte do efluente tratado, conforme mostrado pelo esquema da Figura 4 (EDZWALD, 2010).

Figura 4 - Sistemas para saturação de água na FAD



Fonte: Adaptado de Shammas; Bennett, (2010)

A formação de microbolhas na FAD é resultado do fenômeno conhecido por cavitação, que envolve a criação de novas interfaces gás/líquido, sendo o primeiro estágio definido como “nucleação”, ocasionado pela redução da pressão local abaixo da pressão de vapor do líquido (ZHOU *et al.* 2019).

Após a nucleação, inicia-se o segundo estágio, crescimento da bolha. Três fatores influenciam o tamanho destas, são eles: redução da pressão hidrostática, transferência de massa entre a interface gás/líquido e fusão entre as bolhas (coalescência) (RADZUAN; BELOPE; THORPE, 2016). A maneira como ocorre a nucleação das bolhas no primeiro estágio pode variar,

de acordo com a fase homogênea (líquida) ou sobre uma superfície (fase heterogênea) (ETCHEPARE *et al.* 2017).

Na nucleação homogênea, as bolhas são formadas no seio do líquido. A força motriz termodinâmica para a mudança da fase é o excesso de “potencial químico” da fase líquida, quando comparado com o vapor. Na prática, quando a água saturada é liberada progressivamente, uma diferença de pressão mínima é necessária para promover a nucleação de bolhas (HENAUTH *et al.* 2017).

Em uma nucleação heterogênea e modelo de fratura, a presença de pequena quantidade de ar não dissolvido, aprisionado nas cavidades das partículas, auxiliam e “catalisam” a cavitação, funcionando como núcleos para o crescimento das bolhas, sob condições de pressão mais baixa nestes locais. Além disso, a presença e forma de particulados, rugosidade das paredes internas, também favorecem a processo de cavitação (ETCHEPARE *et al.* 2017).

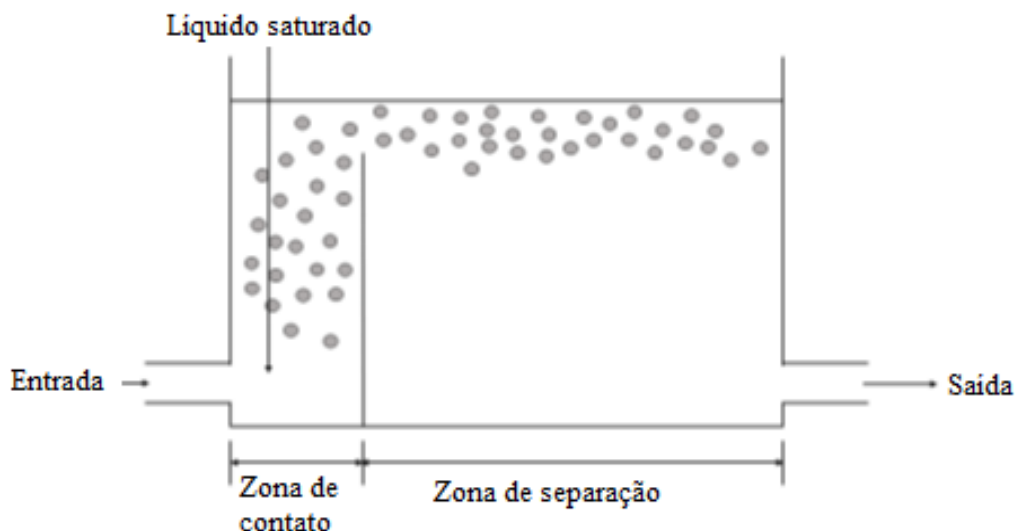
As bolhas produzidas no processo da FAD são denominadas de microbolhas, por possuírem tamanho micrométrico numa faixa de 20-100 μm de diâmetro (SHAMMAS; WANG, 2016).

O sistema saturador dos processos FAD tradicionais é composto por quatro componentes, são eles: compressor de ar, bomba centrífuga, vaso saturador e “bicos” injetores. De acordo com o tipo de sistema utilizado como gerador de bolhas, a separação pode ser prejudicada pela baixa eficiência na nucleação, fenômeno este, essencial à FAD (ROCHA E SILVA *et al.* 2018). Pesquisas recentes com o intuito de reduzir custos com equipamentos, desenvolveram sistemas de solubilização pressurizada da água por ar, mediante o uso de bombas multifásicas e centrífugas (HENAUTH *et al.* 2017).

Na FAD, o tanque em que ocorre o processo de flotação é denominado célula de flotação, possuindo duas partes distintas. A primeira, denominada de zona de contato, cujo propósito é fornecer oportunidade para colisões entre a gotículas de óleo com as bolhas e subsequente conexão por meio de mecanismos de aprisionamento. Após a etapa de fixação, o agrupamento bolhas-gotícula passa a ser denominado agregado. A segunda, denominada zona de separação, onde a diferença de densidade, do conjunto bolha-partícula irá promover sua flutuabilidade à superfície. Com o passar do tempo, esse material flotado é concentrado e removido do tanque de flotação por raspadores. Por sua vez, a água tratada é retirada pela base desse equipamento (FANAIE; KHIADANI; AYRES, 2019). O limite entre ambas as zonas é determinado por uma parede

nomeada de defletor, que assume o papel de direcionador de fluxo hidrodinâmico (ETCHEPARE *et al.* 2017), conforme indicado pela Figura 5.

Figura 5 - Esquema de câmara de flotação por ar dissolvido



Fonte: Adaptada de Edzwald, (2010)

A quantidade total de ar entregue à zona de contato está intimamente atrelada a solubilidade do ar em água que, é afetada fortemente por dois parâmetros: temperatura e pressão no sistema saturador. Estes fatores podem ser explicados de acordo com princípios físico-químicos estabelecidos na Lei de Henry (FONSECA *et al.* 2017), conforme Equação 1:

$$Y_a = H_a \cdot Ca_{max} \quad (1)$$

Em que:

Y_a é a concentração do componente no meio gasoso, Ca_{max} a concentração do componente no meio líquido em mg.L^{-1} e H_a a constante de Henry para o componente a uma dada temperatura e pressão.

A constante de Henry varia exponencialmente em função da temperatura de dissolução do gás na fase líquida. No seu cálculo é levada em consideração a entalpia de dissolução do gás ΔH_{Diss} ,

como também a constante universal dos gases R e a constante de dissolução K_d , como mostra a Equação 2 (GASPAROVIC *et al.* 2018; CRITTENDEN *et al.* 2022).

$$H_a = K_d \cdot e^{\left(-\frac{\Delta H_{Diss}}{R \cdot T}\right)} \quad (2)$$

Desta forma, a qualidade de geração de microbolhas em um processo de FAD varia de acordo com a temperatura em que o sistema se encontra. Assim, a baixas temperaturas a solubilidade do ar na água será maior, e a altas temperaturas a solubilidade será menor (CRITTENDEN *et al.* 2022).

O ar atmosférico consiste, para fins práticos, em apenas dois gases principais, o nitrogênio e oxigênio (STEINBACH; HAARHOFF, 1998). Por meio da Tabela 4, os referidos autores demonstram a relação da constante de Henry e a temperatura, para os dois gases.

Tabela 4 - Valores da constante de Henry para os gases nitrogênio (H_N) e oxigênio (H_O)

Constante de Henry	Temperatura					
	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C
H_N	49,8	54,0	58,2	62,3	66,5	70,7
H_O	23,9	26,4	28,8	31,3	33,8	36,3

Fonte: Steinbach; Haarhoff, (1998)

Fonseca *et al.* (2017), afirmaram que, baseados nesta propriedade físico-química dos gases, as plantas que se utilizam da tecnologia da FAD e que operam em regiões de clima tropical devem trabalhar com maior vazão de água com ar dissolvido para compensar sua baixa solubilidade, quando submetidas a altas temperaturas. Edzwald (2010); Edzwald; Haarhoff (2012) traz, por meio da Tabela 5, a relação entre pressão e temperatura com a solubilidade do ar, afetando assim a concentração de ar encaminhada à zona de contato.

Tabela 5 - Concentrações de ar dissolvido em equilíbrio na água reciclada que sai do saturador

Pressão de saturação (kPa)	C_r (mg.L ⁻¹)	
	5°C	20°C
400	144	108
500	172	130
600	202	151

Fonte: Edwald (2010)

2.1.5.3 Flotação por pré-saturação induzida (FPSI)

Na flotação por pré-saturação induzida (FPSI), as microbolhas são geradas simultaneamente durante a passagem do efluente com gotículas de óleo dispersas, através o auxílio de uma bomba centrífuga adaptada. O ar atmosférico e o efluente a ser tratado entram na linha de aspiração da bomba centrífuga geradora de microbolhas, promovendo a dispersão e dissolução do ar no líquido oleoso (FILHO *et al.* 2021). Portanto, temos no sistema do FPSI, a bomba geradora de microbolha promovendo em seu interior um contato intrínseco entre microbolhas de ar e gotículas de óleo, formando um fluido único e homogêneo. O processo se completa, na linha de descarga da bomba, com o início da formação dos agregados (SANTOS *et al.* 2021).

Na etapa de separação, os agregados são submetidos à flotação propriamente dita e ascendem ao topo da câmara do flotador. A espuma oleosa formada, é então removida por raspadores em intervalos previamente estabelecidos (FILHO *et al.* 2021).

Pesquisadores e estudiosos na área se referem a um potencial de remoção de contaminantes significativo, acima de 97%. A obediência à legislação vigente, baixo custo operacional e o alto índice de separação são fatores determinantes para utilização dessa técnica de FPSI (SANTOS *et al.* 2021).

A flotação é um processo análogo a sedimentação, por esse motivo o regime de escoamento do fluido e os tipos de particulados envolvidos possuem um grande impacto no desempenho dos equipamentos. Assim, flotadores utilizados na recuperação de águas residuais, como o FPSI, em alguns casos podem ter sua eficiência de remoção de óleo prejudicada. Desta maneira, torna-se

indispensável o entendimento do comportamento da mecânica dos fluídos no interior do flotor (LAKGHOMI; LAWRYSHYN; HOFMANN, 2015).

Nestes casos, uma ferramenta de design e análise bastante útil e conhecida na Engenharia, é a dinâmica de fluidos computacional ou Fluidodinâmica Computacional. Esta ferramenta descreve os processos, em termos de unidades de fluxo, localizados espacialmente e interconectados por massa, quantidade de movimento e fluxos de calor. Os perfis de escoamento e nuances operacionais de equipamentos, com maior conteúdo de informação, são melhor compreendidos, acarretando resultados são mais precisos. Por causa das melhorias que podem ser geradas através de sua utilização, há um grande interesse, do ponto de vista industrial, nesse tipo de recurso computacional (BHUTANI; PARADA, 2020).

2.1.6 Fluidodinâmica computacional

Fluidodinâmica Computacional vem do inglês *Computational Fluid Dynamics* (CFD), é uma ferramenta poderosa, aplicada tanto em projeto de Engenharia como na investigação e desenvolvimento de uma base de conhecimentos para auxiliar novos projetos. Devido à importância e possíveis novas aplicações do processo de flotação, pesquisas têm sido realizadas com o intuito de compreender cada vez mais os seus princípios (BEHIN; BAHRAMI, 2012).

As soluções de problemas práticos em dinâmica dos fluidos eram, antes do surgimento dos computadores, de exclusividade da pesquisa experimental, *Experimental Fluid Dynamics* (EFD), que, através de observações em laboratórios, estudavam situações próximas da realidade. Embora com a vantagem de lidar com a configuração real do sistema estudado, altíssimos custos, ensaios com elevado risco de segurança ou pelas dificuldades de reprodução das condições reais inviabilizavam a sua utilização. Por outro lado, os pesquisadores teóricos faziam uso de modelos analíticos, *Analytical Fluid Dynamics* (AFD), aplicáveis apenas a geometrias e condições de contorno simples ou situações em que as hipóteses simplificativas requeridas não se desviavam demasiadamente do fenômeno físico real (LOU *et al.* 2008).

Com o advento dos computadores e a intensificação das pesquisas na área da análise numérica, surgiu um segmento direcionado ao estudo da dinâmica dos fluidos (PIAIA, 2009; HJERTAGER, 2017). Possibilitando assim, a solução de modelos complexos, definidos para geometrias também complexas e apresentando resultados dentro de intervalos de tempo muito

pequenos. Desta forma, o tempo e o custo de um novo projeto ou a otimização de sistemas já existentes podem ser reduzidos com o uso da simulação numérica através da ferramenta CFD (DENG; DING; GE, 2017).

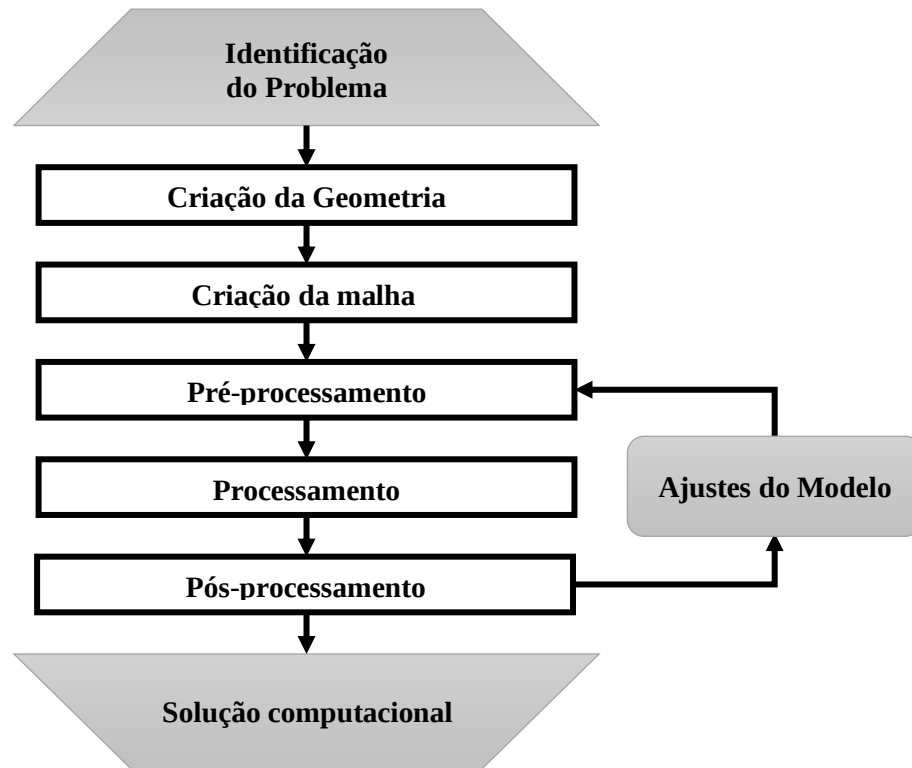
Embora apresente muitas vantagens, deve-se salientar que o uso da prática CFD para processos e equipamentos na Engenharia, com elevado grau de complexidade, em geral, não possibilita a descrição fiel do comportamento real, pois é composta de modelos matemáticos que se aproximam da realidade, elaborados por meio de hipóteses e considerações. Além do que, deve-se levar em consideração a existência dos erros atrelados ao cálculo iterativo, inerentes a todos os métodos numéricos e computacionais e a precisão da máquina (RODRIGUES; BÉTTEGA, 2018).

A dinâmica de fluidos computacional amadureceu durante as últimas décadas ao ponto de ter um grande impacto na nos processos de Engenharia (HJERTAGER, 2017). Na maioria dos casos, as suposições de modelagem não são adequadamente validadas e, portanto, as soluções não são confiáveis para fornecer valores absolutos de desempenho. Como resultado, a validação, o entendimento da dinâmica do escoamento e a modelagem ainda estimulam o desenvolvimento do CFD. O experimento sempre desempenhou um papel proeminente na validação de ferramentas de projeto e na compreensão da dinâmica dos fluidos, sendo assim uma das etapas integrantes no processo de modelagem (BAMBERGER *et al.* 2018).

2.1.6.1 Processo de modelagem

Na ferramenta computacional CFD, é simulado o comportamento de sistemas envolvendo processos físicos e químicos. Para isso, resolvem-se equações próprias de cada sistema modelado em uma determinada região de interesse onde condições de contorno são conhecidas. Fundamentalmente, entre a identificação de um problema e sua resolução, utilizando a técnica de simulação desta ferramenta, o processo de modelagem pode ser simplificado em cinco etapas (RODRIGUEZ *et al.* 2015). As etapas de modelagem são trazidas através do fluxograma a seguir, conforme a Figura 6:

Figura 6 – Fluxograma simplificado das etapas de modelagem computacional



Fonte: Adaptado de Vasconcelos *et al.* (2015)

▪ Criação da geometria

A solução de problemas pela metodologia CFD deve partir da representação do sistema a ser estudado. Essa representação é conhecida como geometria e deve englobar toda a região onde ocorrerá escoamento. Esta etapa de reprodução, em ambiente virtual, é executada por meio de ferramentas de *Computer Aided Design* (CAD), também nomeada de desenho assistido em computador (TIERNEY *et al.* 2019).

▪ Criação da malha computacional

Para a resolução de um problema de CFD é necessário proceder a uma discretização da geometria. Se a geometria puder ser considerada como o domínio do problema, pode-se encarar

cada elemento da malha como uma espécie de subdomínio, onde todas as equações serão resolvidas (TIERNEY *et al.* 2019).

▪ **Pré-processamento**

Esta etapa do pré-processamento tem por finalidade criar condições viáveis para solucionar o problema físico. Os modelos físicos que virão a ser utilizados na simulação serão selecionados, pelas propriedades do fluido e condições de contorno (planos de simetria, paredes, entrada e saída), além de valores iniciais, necessários para a resolução do sistema de equações em cada domínio de controle. Neste estágio, devem-se inserir todas as considerações relativas ao escoamento, para que a simulação ocorra sem erros e não gere resultados inesperados (MALISKA, 2004).

▪ **Processamento**

É a parte principal do pacote de CFD, visto que ele implementa as técnicas numéricas de solução e seus parâmetros para resolver os problemas físicos de modo apropriado. Resumidamente, os métodos numéricos que formam a base do *solver* passam pelos seguintes passos (SANT'ANNA *et al.* 2017):

- ✓ Aproximação das variáveis incógnitas do escoamento através de funções simples;
- ✓ Discretização pela substituição das aproximações (variáveis incógnitas) nas equações de transporte, que governam o escoamento, com manipulações matemáticas subsequentes;
- ✓ Linearização do sistema de equações algébricas resultantes e;
- ✓ Definição da estratégia e solução do sistema de equações algébricas lineares.

▪ **Pós-processamento**

No pós-processamento é possível visualizar a geometria e volumes de controle, gerar vetores que indicam a direção e magnitude do escoamento, observar a variação das variáveis escalares (com magnitude e sem direção) em todo o domínio e obter vídeos, para situações em regime transiente (MALISKA, 2004).

Assim, a CFD surgiu como uma técnica para execução de processos de modelagem matemática e simulação numérica em sistemas de escoamento com mais de uma fase. Com isso, a

fluidodinâmica computacional oferece uma possibilidade promissora para elaboração e compreensão da física complexa de equipamentos, respaldada pela validação experimental (AL-BAGHDADI *et al.* 2020).

2.1.7 Modelagem matemática do escoamento multifásico

2.1.7.1 Escoamento multifásico

O termo escoamento multifásico é usado para se referir a qualquer escoamento de fluido que consista em mais de uma fase/componente. Sendo classificados como escoamentos gás/sólido, líquido/sólido, líquido/gás, líquido/líquido (BUFFO *et al.* 2013).

Neste contexto, o conceito de fase é generalizado para dois fluídos imiscíveis que formam uma interface entre si. Em um sistema óleo-água, por exemplo, mesmo as duas substâncias encontrando-se no estado líquido, formam, no contexto desta definição, um sistema bifásico. Divergindo do ponto de vista termodinâmico, onde uma mesma substância existe nas formas sólida, líquida e gasosa (YAN *et al.* 2018).

A movimentação de fluido composto por sistema trifásico representa uma forma particularmente desafiadora de escoamento multicomponentes, pois são frequentemente caracterizados pela presença de uma fase contínua (transportadora) e duas fases dispersas que, ao interagirem, podem formar uma quarta “fase”, chamada agregados (SARDINA *et al.* 2019). Comumente identificado em flutadores, este tipo de fluxo multifásico é um fenômeno complexo e difícil de entender, prever e modelar (RODRIGUES; BÉTTEGA, 2018).

A modelagem matemática, portanto, representa uma etapa fundamental na investigação de fluxos multifásicos. No entanto, o grande desafio no tratamento desse tipo de escoamento, não é a falta de modelos detalhados, mas sim daqueles que sejam viáveis, computacionalmente. Ou seja, a aplicação de modelos numéricos robustos, embora tecnicamente viáveis para solucionar problemas de escoamento, tornam-se intratáveis, devido a exaustiva demanda computacional (SARDINA *et al.* 2019).

2.1.7.2 Modelagem matemática

A modelagem é a representação matemática de um sistema real e deve, dentro do possível, ser validada com experiências práticas ou calibrada com observações em campo ou laboratório. A simulação computacional permite fazer avaliações dos parâmetros do modelo sem maiores perdas de tempo. Além do que, o estado do sistema pode ser conhecido em qualquer momento e até pode-se observar processos impossíveis de serem visualizados em ambiente real (STEIN, 2017).

Sant'anna *et al.* (2017) afirmam que o procedimento da modelagem matemática começa com a elaboração de um modelo, a partir da aplicação de princípios físicos. Os modelos resultantes são expressos por equações que relacionam as grandezas relevantes entre si para um determinado espaço e tempo. Eles podem ser utilizados tanto para explicar, como para prever o comportamento do sistema em diferentes situações (YEOH; TU, 2019).

Embora os modelos matemáticos tenham sido usados durante toda a história da Matemática, foi no início das últimas duas décadas do século XIX, que sua utilização se difundiu na comunidade científica, dando origem a aplicações e estudos em diferentes áreas do conhecimento. Pesquisadores mencionaram que o uso de modelos na Engenharia é importante, uma vez que se torna dispendioso e, nada prático, construir todas as alternativas possíveis para o sistema físico real até encontrar uma solução satisfatória. O processo direto de construção pode ser destrutivo e perigoso e um modelo pode ser facilmente aprimorado, visto que há menos variáveis para controlar durante os testes. Ainda, é possível fazer um exame da situação de muitas variáveis, determinando seus efeitos sobre o sistema físico real. Com o avanço computacional, essas variáveis conseguem ser analisadas, pois vários testes podem ser realizados até a exaustão num curto espaço de tempo (VASCONCELOS *et al.* 2015).

Os modelos matemáticos aplicados à investigação dos fenômenos envolvidos em escoamentos multifásicos tornam-se ferramentas cruciais para o entendimento de suas nuances. Estes modelos, são divididos, a princípio, em duas categorias, homogêneo e heterogêneo (NAKHAEI *et al.* 2020).

O homogêneo é o modelo de escoamento multifásico mais simples, que assume todas as fases como uma mistura, movendo-se em um único campo de velocidade, porém, com densidade e viscosidade variáveis. Esta simplicidade acarreta resultados satisfatórios, com uma menor demanda computacional, tornando-se útil na execução de análises preliminares de fluxos

multifásicos. Por outro lado, detalhes interfaciais minuciosos são difíceis de serem capturados por este tipo de modelo (HAAG *et al.* 2018).

O heterogêneo, também conhecido como não-homogêneo, é teoricamente mais avançado, pois descreve totalmente a mecânica das fases. Assim, cada fase tem seu próprio campo de velocidade, descrito por um conjunto individual de equações governantes, sendo os efeitos da presença de outras fases, contabilizados por termos de transferência interfase. A necessidade de uma maior quantidade de equações para fechamento desses termos interfase pode promover incertezas das relações interfaciais. Estas incertezas são identificadas, principalmente, quando envolverem uma quantidade de informações empíricas para certos equipamentos, para os quais o conhecimento físico é limitado. Em alguns casos, tornam-se modelos menos confiável do que os modelos mais simples. Além da incerteza, o modelo multifásico não homogêneo requer maior custo computacional (WACK; RIEDELBAUCH, 2019).

A modelagem de escoamentos multifásicos pode ser novamente dividida em duas abordagens: Euleriano-Euleriano e Euleriano-Lagrangiano (SANT'ANNA *et al.* 2017).

A abordagem Euleriana-Euleriana, denominada de modelo de dois fluidos, caracteriza-se por considerar as diferentes fases do sistema como contínuas e interpenetrantes. Uma vez que, o volume de uma fase não pode ser ocupado pela outra. Surge, então, o conceito de fração volumétrica das fases. Estas, são consideradas como funções contínuas no espaço e tempo, cuja soma é igual a 1 (CHEN; WANG; YANG, 2016). A principal vantagem desta abordagem está na velocidade de simulação. Em contrapartida, a baixa precisão surge como desvantagem, pois a modelagem da fase dispersa é baseada em diversas suposições e simplificações. Como por exemplo, o uso de valor médio para tamanho de gotícula no fluido disperso, reduz o esforço computacional. Contudo, a incorporação de um fluido com características polidispersas é dificultada (HIRCHE; BIRKHOLZ; HINRICHSSEN, 2019).

Na abordagem Euleriana-Lagrangiana, a fase contínua é simulada de acordo com a teoria Euleriana, enquanto a fase dispersa é calculada por um “rastreamento lagrangiano de partícula”. Esta abordagem resolve a equação da conservação da quantidade de movimento para cada partícula, rastreando de forma individual o particulado, de acordo com a Segunda Lei do Movimento de Newton, mas não considera as colisões partícula-partícula (BONDELIND *et al.* 2010a; 2010b).

Quando comparada com a abordagem Euleriana-Euleriana, a Euleriana-Lagrangiana possui como vantagens uma melhor precisão, mas a velocidade de simulação, relativamente lenta, apresenta-se como desvantagem desta abordagem (PATEL *et al.* 2017).

A modelagem matemática de escoamentos multifásicos de fluidos imiscíveis é fundamentada pelas equações básicas da mecânica dos fluidos. Tais equações são expressas através das leis de conservação de quantidade de movimento, energia e massa (CHEN; WANG; YANG, 2016). No presente trabalho, por se tratar de um escoamento isotérmico e incompressível, as equações governantes são expressas pelas equações da conservação de massa e quantidade de movimento.

A lei da conservação de massa garante que nenhuma matéria será criada ou extinta dentro de um volume arbitrário no espaço, através do qual o fluido escoar. A equação da continuidade, trazida pela (Equação 3), é a formulação matemática que garante a observância desta lei.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

As equações de Navier-Stokes são a representação matemática do princípio da conservação de quantidade de momento aplicado aos fluidos, em que a taxa de variação temporal de momento é igual, à resultante das forças que atuam sobre o fluido. Tais equações foram derivadas a partir da segunda lei de Newton. São equações diferenciais parciais que relacionam os componentes de tensão com a taxa de deformação. A equação da conservação de quantidade de movimento (Equação 4) é dada por:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R)}{\partial x_j} + S_i \quad (i,j=1,2,3) \quad (4)$$

em que u a velocidade do fluido, ρ a densidade do fluido, S_i uma força externa por unidade de massa de fluidez. Está dada pela Equação 5:

$$S_i = -\rho g_i \quad (5)$$

em que o termo g_i é o componente de aceleração gravitacional ao longo da i -ésima direção da coordenada. O tensor de cisalhamento viscoso τ_{ij} , para fluidos Newtonianos, é definido pela Equação 6:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (6)$$

Seguindo a suposição de Boussinesq, o tensor de cisalhamento de Reynolds τ_{ij}^R é representado pela Equação 7:

$$\tau_{ij}^R = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (7)$$

em que δ_{ij} é a função delta de Kronecker, μ e μ_t são definidos respectivamente, como os coeficientes de viscosidade dinâmica e turbulenta. k representa a energia cinética turbulenta específica.

2.1.7.2.1 Modelo de turbulência e de rastreamento de partículas

Em alguns tipos de escoamentos, como laminares por exemplo, as equações governantes podem sofrer simplificações e tornarem-se relativamente simples de se resolver. Entretanto, a maior parte dos escoamentos de interesse na área de tratamento de efluentes oleosos, ou em outras áreas da Engenharia, são predominantemente turbulentos (RAMLAN; DARLIS; JET, 2019).

A turbulência é um fenômeno de dissipação energética e de aleatoriedade que desempenha um papel significativo nos escoamentos observados na natureza. No entanto, ela ainda não é totalmente compreendida em decorrência de sua complexidade, não-linearidade acentuada, características instantâneas e intermitentes, além de uma extensa variedade de escalas temporais e espaciais (HAMI, 2021).

A modelagem fluidodinâmica da turbulência pode ser feita por diferentes técnicas computacionais. Em geral, quanto mais precisa a solução, maior o tempo requerido para obtê-la. Por isso, é fundamental ponderar a relação custo-benefício e selecionar o modelo capaz de fornecer informações necessárias, porém, com o menor custo computacional possível (CIOFALO, 2022). Assim, a simplicidade é uma virtude importante na modelagem da turbulência. Em outros termos, um modelo só deve ser complexo o suficiente para prever o que se necessita, pois excessos geralmente produzem demandas matemáticas inconvenientes (HAIRANI; LEGONO; RAHARDJO, 2018).

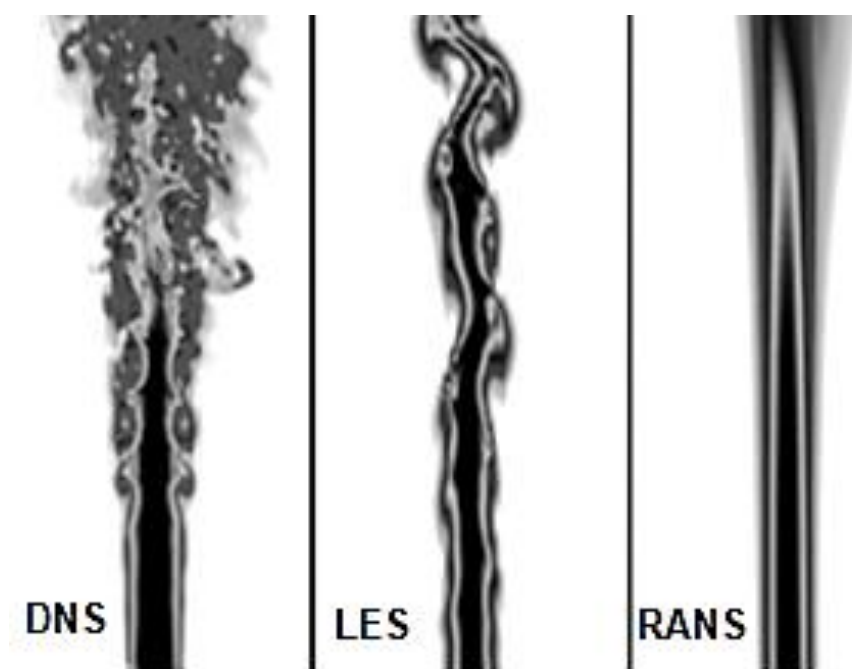
Normalmente, o fenômeno da turbulência é analisado com a utilização das abordagens; *Direct Numerical Simulation* (DNS), o *Large Eddy Simulation* (LES), *Reynolds Averaged Navier – Stokes* (RANS) ou formas híbridas, originária da combinação de duas das três abordagens (HAMI, 2021).

A abordagem DNS é o método mais preciso, visto que resolve diretamente todos os redemoinhos turbulentos sem usar nenhum modelo. No entanto, requer demandas computacionais extensas para resolver os escoamentos, restringindo seu uso pelo poder computacional atual (GHARAI; VENUGOPAL, 2016).

Na abordagem LES, toda a turbulência é separada em duas partes, grandes e pequenas escalas. A primeira escala é resolvida diretamente, enquanto a última é calculada usando simplificações. À medida que o poder computacional aumenta, essa abordagem torna-se mais utilizada para analisar a física da turbulência (MICHELASSI, 2020).

Uma terceira possibilidade para modelagem do fenômeno turbulento, compreende a abordagem RANS, amplamente usada para cálculos de escoamentos turbulentos. Graças à sua precisão, relativamente alta, em prever as características de fluxo médio, por meio da utilização de modelos simplificados. Possibilitando, com isso captar uma parcela dos efeitos da turbulência no escoamento, em detrimento de demandas computacionais reduzidas. Da abordagem RANS resultam modelos de duas equações bastante difundidos, como $\kappa - \varepsilon$ e $\kappa - \omega$, e suas respectivas variações (WANG *et al.* 2021). A Figura 7 mostra, graficamente, as diferenças descritas anteriormente entre as abordagens DNS, LES e RANS.

Figura 7 - Comparativo entre as abordagens DNS, LES e RANS, na simulação de escoamentos do tipo jato



Fonte: Adaptado de Hopf (2018)

- ***Modelo κ - ε padrão e o modelo κ - ε modificado***

Desenvolvido pelos pesquisadores Launder; Spalding (1974), o modelo $\kappa - \varepsilon$, denominado de padrão, é o modelo de turbulência mais popular e um dos mais consagrados para simulação de escoamento de fluidos, tanto de maneira interna quanto externa. O modelo é capaz de lidar com várias condições de escoamento por possuir formato simples, forte desempenho, além de ser amplamente validado. Neste modelo, várias simplificações foram conduzidas, resultando em um melhor desempenho e capacitando-o para lidar com vários problemas (WANG; LIU, 2020).

No modelo $\kappa - \varepsilon$, o tensor de Reynolds é obtido relacionando o gradiente de velocidade média com o conceito de viscosidade turbulenta, quando a média temporal é aplicada às equações de Navier-Stokes. Esta variável é trabalhada em função de duas equações de transporte, uma para a geração de turbulência κ , denominada de energia cinética turbulenta, e outra equação para a perda gradual desta energia no sistema ε , também nomeada de taxa de dissipação viscosa de energia cinética turbulenta. No entanto, quando usado para prever escoamentos próximo das paredes, o

modelo em questão exige uma malha extremamente fina, e isso eleva bastante o tempo computacional da análise (GHARAI; VENUGOPAL, 2016).

O escoamento junto à parede é uma região denominado de camada limite e essa, torna-se mais fina quanto maior for o número de Reynolds, ou seja, quanto menor for a viscosidade. Na maior parte da região de fluxo, a viscosidade pode ser desprezada, porém, na camada limite, principalmente as muito finas, esta grandeza deve ser levada em consideração. Uma abordagem nomeada de "função de parede" foi proposta por Launder; Spalding (1974) com a finalidade de reduzir o tamanho das malhas e com isso minimizar o tempo gasto em uma análise de fluxo. De acordo com esta abordagem, a resistência ao atrito da parede do fluido é usada para calcular, por meio de fórmulas empíricas, as condições de contorno da parede e assim, resolver as equações de Navier-Stokes (UCHIDA; LI, 2018).

O sucesso desse tipo de modelo turbulento depende, em grande parte, da "universalidade" da abordagem matemática utilizada para avaliar a estrutura turbulenta próxima da parede, pois quando encontradas divergências entre medições e previsões, a dificuldade reside em averiguar se o problema consiste nas equações de transporte do modelo padrão ou nas fórmulas empíricas de função de parede. Posteriormente, outros modelos com base no $\kappa - \varepsilon$ padrão foram desenvolvidos, porém, para a forma de baixo número de Reynolds permitindo assim, cálculos direto na parede. Porém, termos extras foram inclusos nas equações de transporte, para conveniência computacional, ou para melhorar as previsões na região próxima da parede (VERMA; WEBER, 2020).

Derivado do modelo $\kappa - \varepsilon$ padrão, o modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$ modificado traz funções de amortecimento propostas por Lam; Bremhorst (1981) e, por isso, denominado de modelo $\kappa - \varepsilon$ LB. Este, descreve o escoamento médio de fluidos em regimes laminares, turbulentos e transicionais (WANG *et al.* 2021). As Equações de transporte $\kappa - \varepsilon$ adicionais para a energia cinética turbulenta específica e de dissipação são mostradas pelas Equações 8 e 9, respectivamente:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + S_k; (i = 1, 2, 3) \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + S_\varepsilon; \quad (9)$$

Sendo os termos de origem S_k e S_ε definidos, pelas Equações 10 e 11, como:

$$S_k = \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_t P_B \quad (10)$$

$$S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left(f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t C_B P_B \right) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (11)$$

O termo P_B representa a geração de turbulência devido às forças de flutuabilidade, conforme Equação 12:

$$P_B = - \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (12)$$

em que g_i é o componente da aceleração gravitacional na direção x_i ; σ_B é constante com valor 0,9 e $C_B = 1$ quando $P_B > 0$, e $C_B = 0$, quando $P_B < 0$. A Tabela 6 apresenta outras constantes definidas empiricamente e seus respectivos valores para o modelo κ - ε :

Tabela 6 - Valores das constantes empíricas do modelo κ - ε

Constantes	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε
Valor	1,44	1,92	1	1,3

Fonte: Adaptado de (GHATAURAY; INGRAM; HOLBORN, 2019)

A relação entre energia cinética turbulenta (k), a taxa de dissipação viscosa de energia cinética turbulenta (ε) e o coeficiente de viscosidade turbulenta (μ_t) é dada pela Equação 13:

$$\mu_t = f_\mu \cdot \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (13)$$

em que a constante, $C_\mu = 0,09$, e a função de amortecimento de turbulência, f_μ , para considerar a transição entre regime laminar-turbulento em função da distância da parede, é definida pela Equação 14:

$$f_\mu = \left(1 - e^{(-0,0165 R_y)} \right)^2 \cdot \left(1 + \frac{20,5}{R_T} \right) \quad (14)$$

Outras duas de funções de amortecimento também são aplicadas ao modelo através das Equações 15 e 16, respectivamente:

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0,05}{f_\mu} \right)^3 \quad (15)$$

$$f_2 = 1 - e^{-R_T^2} \quad (16)$$

Os parâmetros intermediários R_y e R_T nas equações anteriores são definidos pela Equação 17:

$$R_y = \frac{\rho \sqrt{ky}}{\mu} \text{ e } R_T = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon} \quad (17)$$

em que y é a distância da parede.

As funções de amortecimento f_μ , f_1 e f_2 , trazidas no modelo de Lam; Bremhorst (1981) diminuem a viscosidade e energia turbulenta e incrementa a taxa de dissipação de turbulência, quando o número de Reynolds R_y , com base na velocidade média de flutuações e a distância da parede, torna-se muito pequeno (VERMA; WEBER, 2020).

- **Estudo e rastreamento de partículas**

A ideia básica do rastreamento de partículas é que, um número finito de partículas representa a distribuição de uma massa de soluto. Cada partícula carrega uma certa concentração ou fração da massa total e, se move no meio, conforme o campo de velocidade. O método de rastreamento de partículas não resolve a equação de transporte diretamente; em contra partida, ele usa as velocidades de escoamento obtidas da solução para adicionar algum deslocamento à partícula (LAK *et al.* 2020).

No modelo de rastreamento aceito pelo *Flow Simulation/ Solidworks*, as trajetórias das partículas são calculadas, após finalização dos cálculos de escoamento do fluido, seja em estado estacionário ou transiente (VERMA; WEBER, 2020). O movimento das partículas obedece à seguinte Equação (18):

$$m_p \cdot \frac{dv_p}{dt} = - \left(\frac{\rho_f (V_f - V_p) \cdot |V_f - V_p|}{2} \right) \cdot C_d \cdot A + F_g \quad (18)$$

em que, m_p é a massa da partícula e t o tempo; V_f e V_p são, as velocidades do fluido e partícula, respectivamente; ρ_f é a densidade do fluido; C_d é o coeficiente de arrasto da partícula; A é a área de superfície frontal da partícula e F_g é a força gravitacional.

As partículas são tratadas como esferas não rotativas, de massa constante e material especificado (sólido ou líquido), cujo coeficiente de arrasto é determinado a partir da fórmula semi-empírica desenvolvida por Henderson (1976), trazida pela Equação 19.

$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{4,12}{1+0,03 \cdot Re + 0,48 \sqrt{Re}} + 0,38 \quad (19)$$

Sendo o número de Reynolds é dado por Re e definido pela Equação 20:

$$Re = \frac{\rho_f \cdot |V_f - V_p| \cdot d}{\mu} \quad (20)$$

em que, d é o diâmetro das partículas e μ a viscosidade dinâmica do fluido.

No estudo de partículas, a interação das partículas com as paredes da geometria é levada em consideração. Características como reflexão ou absorção podem ser empregadas nas superfícies (SIEMANN *et al.* 2021).

A reflexão é configurada na sua forma ideal, em decorrência de sua simplicidade. A reflexão ideal, denota que no plano de impacto, definido pelo vetor de velocidade da partícula e a normal da superfície no ponto de colisão, o componente de velocidade da partícula, tangente à superfície, é conservado, enquanto o componente de velocidade da partícula, normal à superfície, muda seu sinal, ou seja, o ângulo de impacto igual ao ângulo de ricocheteio. Na reflexão não-ideal, coeficientes de restituição que definem as proporções dos componentes de velocidade normal e tangencial à parede, antes e depois da colisão, podem ser configurados (SIEMANN *et al.* 2021).

No caso da configuração absorção, usualmente efetuada para gotículas de líquido, os particulados que colidem com as superfícies de características absorventes, em velocidades baixas ou moderadas, depositam-se nesta superfície.

O Resultado do impacto dos particulados, em uma superfície sólida, pode ser contabilizado pela taxa de massa total erodida da parede, quando aplicados a paredes com características reflexivas. Mas, quando aplicadas características absorventes a paredes, atrelado ao uso de gotículas líquidas, como as de óleo, a taxa de massa de acreção total, $R_{\Sigma \text{ acreção}}$ é quantificada (REID *et al.* 2016), conforme Equação 21:

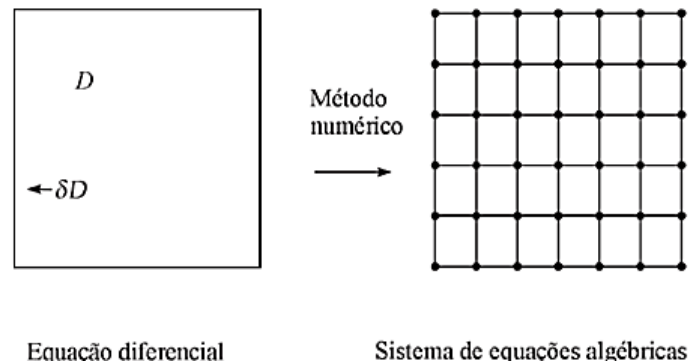
$$R_{\Sigma \text{ acreção}} = \sum_{i=1}^N m_{p_i} \quad (21)$$

em que, N é o número de frações de particulados inseridas em cada injeção do sistema estudado. Nessas injeções, propriedades como temperatura, velocidade de diâmetro da partícula, taxa de fluxo de massa e material do qual é composto o particulado, são constantes para a fração de partícula na entrada. O número da fração é dado por i ; a massa que incide nas paredes do modelo em tempo unitário para a i -ésima fração de partícula é representado por m_{p_i} (VERMA; WEBER, 2020).

2.1.7.2.2 Método de discretização e geração de malha

Os métodos aplicados para resolver as equações diferenciais, em problemas da dinâmica de escoamento de fluidos, por meio de computadores, requerem a discretização do domínio de solução, processo este que consiste na divisão em um número finito de subdomínios (ou elementos ou células), os quais formam a malha computacional. Esta malha determina a localização de um conjunto de pontos ou nós no domínio, nos quais valores próximos das variáveis das equações diferenciais são determinados por meio do método numérico. A geração da malha é um item chave para simulação usando na dinâmica de escoamento de fluidos, pois governa a estabilidade e a precisão das previsões de fluxo. A Figura 8 mostra a discretização de um sistema (LOU *et al.* 2008).

Figura 8 - Transformação de equações diferenciais em sistema de equações algébricas por método numérico



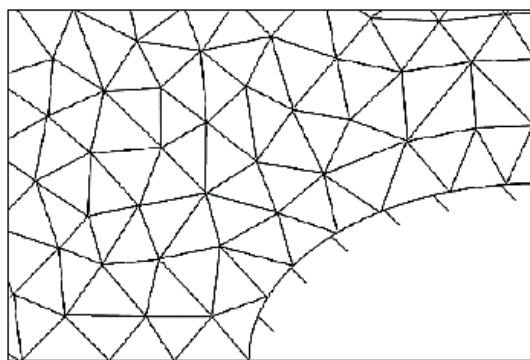
Fonte: Adaptado de Maliska (2004)

Dentre os principais métodos empregados nas resoluções de problemas de Engenharia, através de soluções numéricas, destacam-se os métodos das diferenças finitas (MDF), dos elementos finitos (MEF) e dos volumes finitos (MVF). O MDF é utilizado para resolução de problemas térmicos e de convecção de difusão; o MEF é aplicado a problemas estruturais de corpos sólidos, enquanto o MVF é empregado na solução de problemas de mecânica dos fluidos e transferência de calor. (SARMA; SINGH, 2021). O método dos volumes finitos é um dos mais utilizados nos *softwares* comerciais de análise da dinâmica de fluidos, inclusive no *Flow Simulation* presente no *Solidworks*, devido a característica conservativa e elevada robustez (LINS *et al.* 2021).

Os sistemas computacionais tradicionais de análise da dinâmica de escoamento de fluido, geralmente utilizam malhas ajustadas à geometria. Conforme mostrado na Figura 9, as malhas não

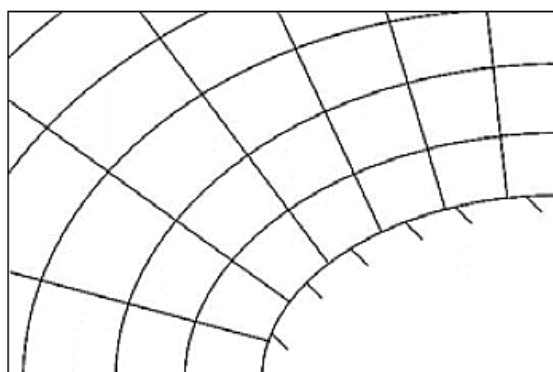
estruturadas são aplicadas a geometrias complexas, criando nós distribuídos irregularmente ao redor da geometria. Por outro lado, para geometrias mais simples, são empregadas malhas estruturadas como mostrado na Figura 10. A combinação de malhas, estruturadas e não estruturadas trazidas pela Figura 11, tem a intenção de melhor adequação a geometria e, esta combinação, recebe a denominação de malhas híbridas (SOBACHKIN; DUMNOV, 2014).

Figura 9 – Esquema de malha não estruturada



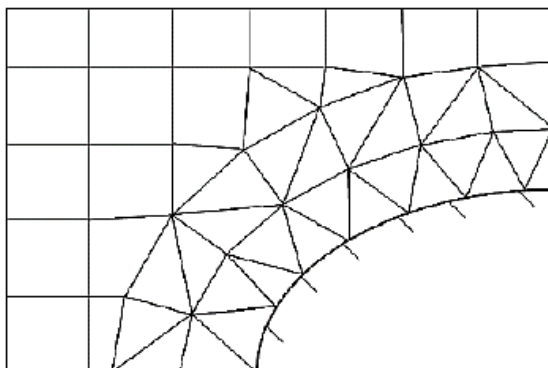
Fonte: Adaptado de Sobachkin; Dumnov, (2014)

Figura 10 - Esquema de malha estruturada



Fonte: Adaptado de Sobachkin; Dumnov, (2014)

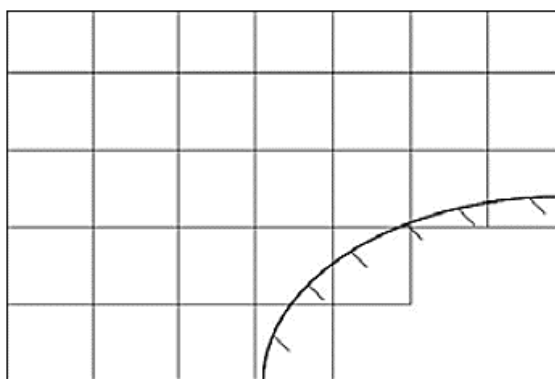
Figura 11 - Esquema de malha híbrida estruturada e não estruturada



Fonte: Adaptado de Sobachkin; Dumnov, (2014)

A geração de nós para essas malhas, ajustadas ao corpo, começa nas superfícies sólidas; portanto, essas malhas são altamente dependentes da geometria em que são aplicadas. A geração da malha geralmente falha se houver algum defeito na superfície da geometria. Para resolver esse problema, os usuários precisam refinar a superfície criando vários nós na área de geometria. Neste contexto, a malha de corpo imerso (Figura 12) configura uma alternativa aos repetitivos e trabalhosos refinamentos (TAHERI, 2018).

Figura 12 – Esquema de malha cartesiana de corpo imerso



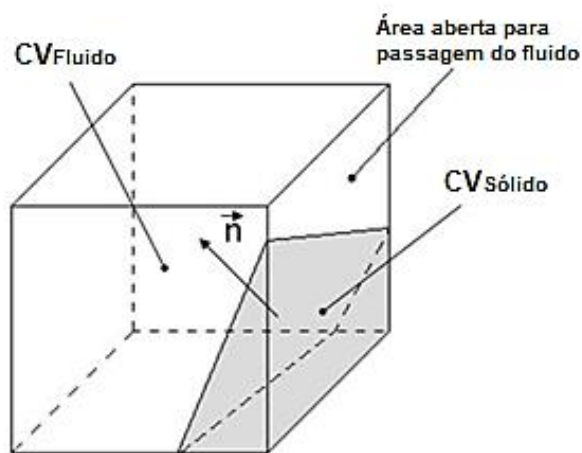
Fonte: Adaptado de Sobachkin; Dumnov, (2014)

A criação dos nós, neste tipo de malha, começa independentemente da geometria, pois a malha de corpo imerso pode cruzar a fronteira entre sólidos e fluidos, o que facilita o uso da malha de base cartesiana, que constitui um conjunto de cuboides (células retangulares) formadas pela

divisão do domínio computacional retangular. As vantagens das malhas cartesianas são a simplicidade, velocidade e robustez do seu método de geração (TAHERI, 2020).

O resultado do uso deste tipo de malha adaptável, nos fornece três possibilidades de localização das células, são elas: em corpos sólidos (células sólidas), fluidos (células de fluido) e as células que cruzam o limite entre sólido e fluido ("células parciais"). No caso mais simples, a célula parcial consiste em 2 volumes de controle (CV): um fluido e um sólido, conforme Figura 13 (RAMLAN *et al.* 2019).

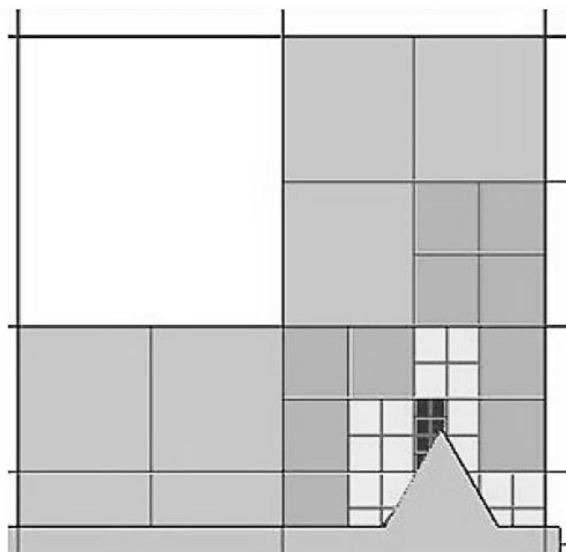
Figura 13 – Esquema da distribuição de células parciais e volumes de controle



Fonte: Adaptado de Sobachkin; Dumnov, (2014)

Aproveitando as vantagens das malhas de base cartesiana, o processo de refinamento, quando necessário, torna-se mais amistoso. Pois, a malha pode ser refinada automaticamente, dividindo cada célula cubiforme em até oito níveis de cuboides, geometricamente semelhantes, usando vários critérios de adaptação que podem ser definidos para cada corpo sólido. Após o processo, células com diferentes níveis de refino são formadas, e a diferença no nível de refinamento para cada célula vizinha não ultrapassa mais de um nível. A Figura 14 mostra o esquema de refinamento da malha (AHMADI; SEFIDVASH, 2018).

Figura 14 – Esquema dos níveis de refinamento



Fonte: Adaptado de Sobachkin; Dumnov, (2014)

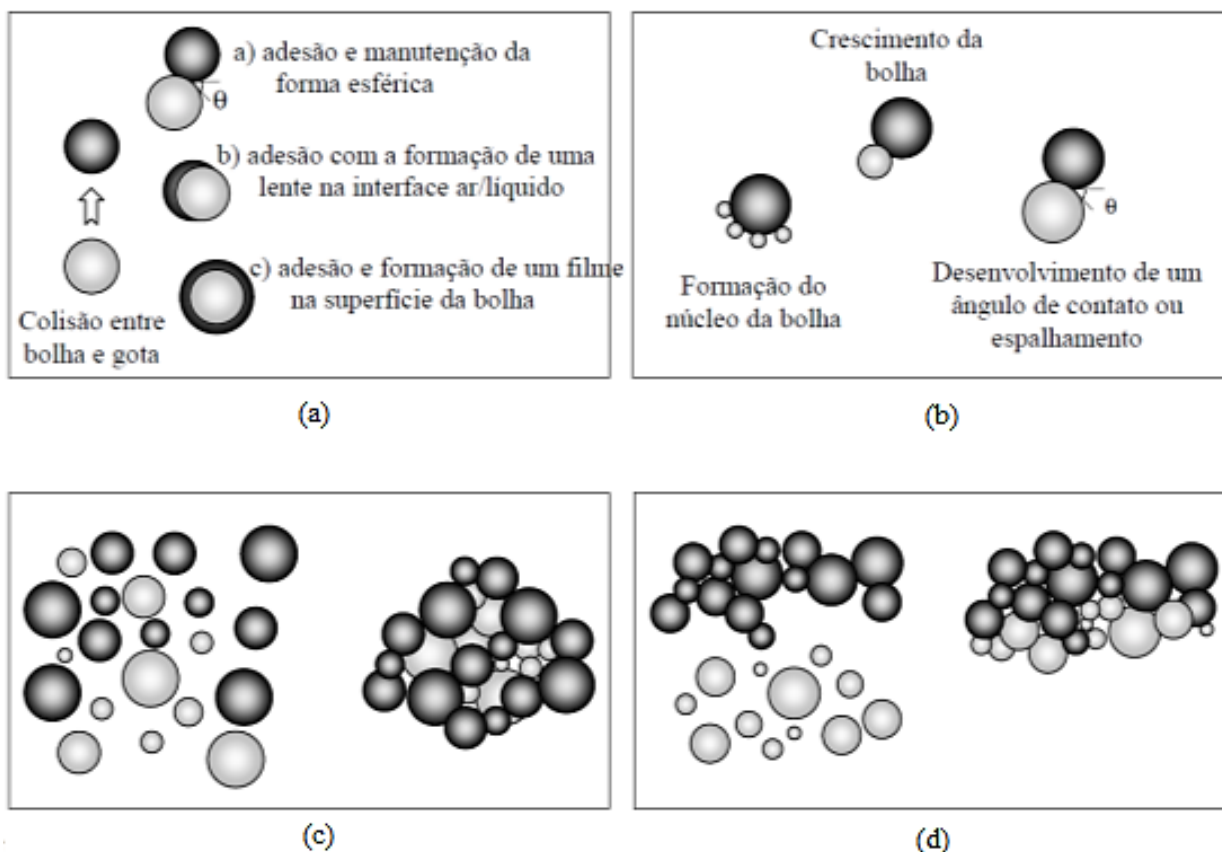
2.2 ESTADO DA ARTE

2.2.1 Mecanismos de interação microbolha e gotículas de óleo

As gotículas de óleo, quando dispersas em meio aquoso, são capturadas pelas bolhas de ar através de quatro mecanismos e suas subdivisões (DAS; JÄSCHKE, 2018), conforme Figura 15:

- ✓ colisão entre bolha e gotícula, resultando na adesão - com ambas conservando sua forma básica; com a formação de uma lente de óleo na interface gás-líquido; espalhamento da gota com a formação de um filme na interface da bolha (a);
- ✓ Desenvolvimento da bolha diretamente na superfície da partícula, com a formação de um ângulo de contato possivelmente seguida pela formação de lente ou filme (b);
- ✓ Incorporação (aprisionamento) das bolhas na estrutura do floco (c);
- ✓ Absorção das bolhas nos flocos já formados (d).

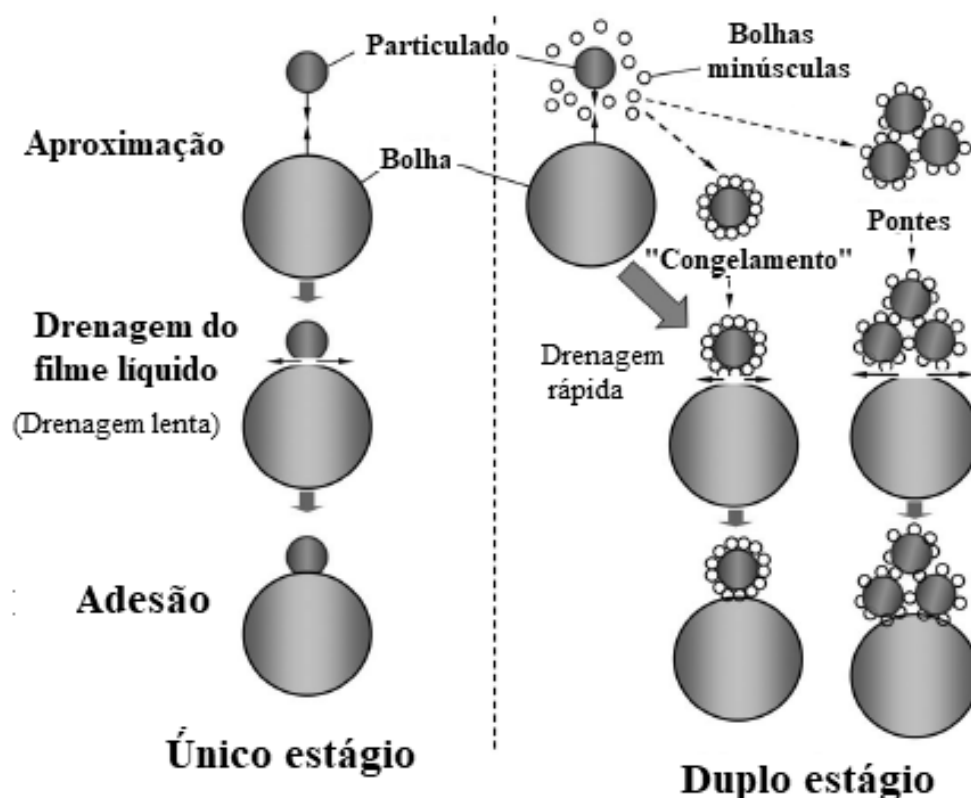
Figura 15 - Mecanismos de captura bolha/partícula



Fonte: Adaptado de Shammas; Bennett, (2010)

A chave para um aumento na taxa de agredado oleoso flotável está na redução da densidade efetiva da gotícula de óleo, que é realizado pela adesão da gotícula de óleo a bolha. Investigando a separação de material oleoso, pesquisadores sugeriram um modelo de captura, relativamente diferente do convencional, aplicado aos processos de flotação em que as bolhas são produzidas por cavitação de um rotor em um único fluxo, contendo particulados hidrofóbicos, pressurizado e saturado com ar. O modelo de captura proposto é composto de dois estágios. No primeiro estágio, há geração de núcleos de gás na água, estas bolhas minúsculas e, em sua maioria, de tamanho nanométricos envolve toda superfície das partículas hidrofóbicas, “congelando-as”. Num segundo estágio, as partículas “congeladas” são acopladas a bolhas de maior diâmetro, por meio de coalescência entre elas (ZHOU *et al.* 2019), conforme mostrado na Figura 16.

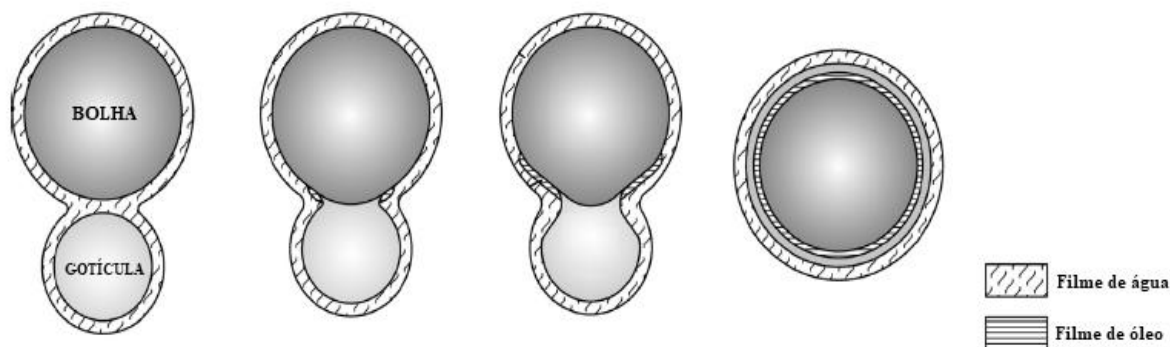
Figura 16 – Esquema comparativo da captura de particulado em único e duplo estágio



Fonte: Adaptado de Zhou *et al.* (2019)

A adesão de gotícula de óleo a bolha de ar não garante uma ascensão bem-sucedida desta pequena gota de óleo à superfície. Essa precisa espalhar-se sobre a bolha de ar, ou seja, encapsulá-la, para formar um agregado estável, capaz de tolerar o arrasto e a turbulência do fluido, sem romper-se (SHEN *et al.* 2022), como mostrado na Figura 17.

Figura 17 - Esquema do mecanismo de espalhamento da gotícula de óleo sobre a bolha de ar



Fonte: Adaptado de Yan *et al.* (2020)

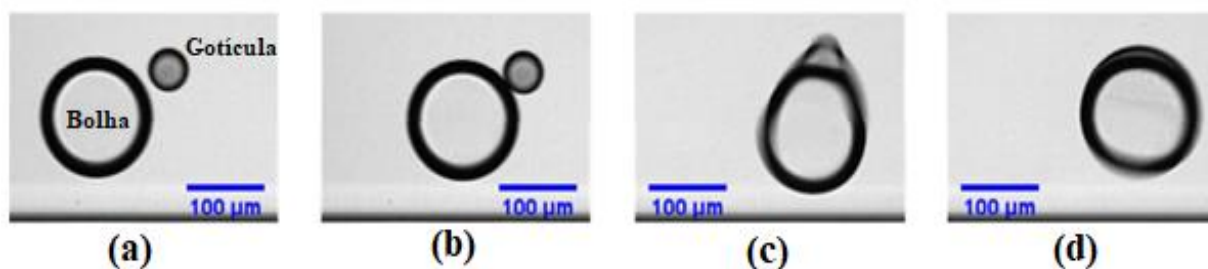
O processo de espalhamento (encapsulamento de bolhas de gás por gotículas de óleo), sofre influência do diâmetro da bolha e da viscosidade do óleo. Com as reduções do tamanho da bolha e viscosidade do óleo, a velocidade de descarga do filme aumenta, acarretando diminuição do tempo de drenagem e comprometendo o coeficiente de espalhamento (S_0). Este governa a interação de encapsulamento entre a bolha de ar e a gotícula de óleo e é resultado da diferença das tensões interfaciais que atuam em uma única linha de contato entre as três fases: ar, óleo e água (YAN *et al.* 2020), como mostrado na Equação 22.

$$S_0 = \gamma_{wa} - \gamma_{ow} - \gamma_{oa} \quad (22)$$

em que, γ_{wa} , γ_{ow} e γ_{oa} são a tensão superficial (água-ar), tensão interfacial (óleo-água) e tensão superficial (óleo-ar), respectivamente. Para que o óleo se espalhe pelas bolhas de ar, o S_0 deve ser positivo, caso contrário, fará com que o óleo forme um ângulo de contato definido com as outras duas fases (DUDEK; ØYE, 2018).

Nos métodos de captura, envolvido para criação do complexo bolha-gotícula, todos os mecanismos abrangem as etapas de aproximação dos particulados presentes, com posterior drenagem do filme líquido que os separam. Efetivando, assim, a adesão seguida pela ruptura da camada oleosa, promovendo o espalhamento de óleo sobre a superfície da bolha, culminando na formação agregados estáveis a fluidodinâmica do processo (PICCIOLI *et al.* 2020), conforme a Figura 18.

Figura 18 - Microfotografia das etapas de (a) Aproximação, (b) adesão pela drenagem do de filme líquido, (c) espalhamento de óleo sobre a superfície de uma bolha e (d) formação do agregado bolha-gotícula estável



Fonte: Adaptado de Dudek; Øye, (2018)

Com a formação de um complexo bolha-gotícula estável, a força resultante da gravidade e do empuxo será direcionada para cima e levará a um movimento ascendente. A velocidade desse movimento é tal que, a resistência do fluido (resistência ao arrasto) é igual ao componente de empuxo líquido (estático) resultante. Assim a separação de partículas por flotação segue as mesmas leis da sedimentação, mas de forma reversa. Desta maneira a taxa de ascensão de agregado pode ser mensurada pela equação provenientes da lei de Stokes (GOPALRATNAM; BENNETT; PETERS, 1988; QARANI; BARZANJY; TALABANY, 2020).

2.2.2 Fluidodinâmica aplicada em flotadores

Neste tópico, são citadas algumas das colaborações científicas a literatura, com relação a simulação fluidodinâmica de equipamentos de flotação em escala industrial e semi-industrial, com a finalidade de tratar águas oleosas. Porém, nas referidas colaborações, não constam a aplicação de uma metodologia numérica simplificada, para análise fluidodinâmica multifásica de flotadores, a partir de um fluido pseudo-homogêneo composto de particulados na forma de agregados flotáveis e estáveis. Além disso, as pesquisas aqui expostas, apresentam um elevado conteúdo de inovação, possibilitando a constatação da lacuna existente na literatura acerca da simulação fluidodinâmica de sistemas de Flotação por Pré-Saturação Induzida (FPSI) para separação água-óleo. Portanto, o presente trabalho é de grande originalidade e pioneirismo.

Amato *et al.* (2012) analisaram a viabilidade e características operacionais de uma planta industrial de tecnologia de FAD convencional, com vazão máxima de alimentação superior a 3000 m³.h⁻¹, para pré-tratamento de água do mar impregnada com matéria orgânica oleosa. A

investigação utilizou-se de simulações em CFD e dados experimentais obtidos em uma planta de menor escala, com alimentação de aproximadamente $61 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Concluíram que a dosagem química e a taxa de reciclo deveriam ser ajustadas, para lidar não apenas com a carga de particulados, mas também, com a alta salinidade e elevada temperatura. Além disso, identificaram que a aplicação de uma dosagem adicional de coagulante a jusante do FAD, pode ter um impacto benéfico ou prejudicial se não for definida corretamente.

Behin; Bahrami (2012) estudaram as características hidrodinâmicas de um tanque de FAD tradicional, em escala industrial, modelando o padrão de fluxo através da curva de distribuição do tempo de residência. Observaram que o regime de escoamento de fluido, teve grande impacto na eficiência de remoção de óleo, em um tanque de flotação por ar dissolvido. Visto que, a célula de flotação apresentava as zonas ativa, de fluxo em pistão e morta (compreendendo cerca de 22,6% do volume do tanque). Os padrões de fluxo e parâmetros de mistura foram examinados experimentalmente e comparados com resultados das simulações em CFD. Estas, obtidas por meio de abordagem Euleriana e modelo de turbulência κ - ϵ padrão, através do *software Fluent*. Os resultados validados mostraram um aumento na taxa de fluxo de entrada de líquido e do volume da área de mistura com redução da zona morta.

Uma análise computacional efetuada por Maelum; Rabe (2015) demonstrou a possibilidade de melhoria no desempenho da separação de óleo, em uma Unidade Compacta de Flotação (UCF) semi-industrial. Após implementar modificações no *design* da UCF original, o equipamento modificado mostrou aumento de 45% e 27% no desempenho de remoção de óleo em testes laboratoriais e de campo, respectivamente, quando comparada a tecnologia convencional. Além dos dados experimentais, a análise foi respaldada também, pelo uso da fluidodinâmica computacional, através dos *softwares Solidworks* e *Fluent*. Este, utilizado uma abordagem lagrangeana. O modelo de turbulência aplicado nas simulações foi κ - ϵ .

CAI *et al.* (2017) pesquisaram a separação óleo-água em uma Unidade de Flotação Compacta modificada, em escala semi-industrial, a partir da influência de características como, campo de escoamento, diâmetro de entrada e altura da zona de separação preliminar. Aplicaram a ferramenta CFD, mediante o uso do pacote comercial *Fluent*, utilizando abordagem Euleriana e o modelo de turbulência κ - ϵ RNG, atrelado ao método de balanço populacional (MBP). Concluíram que a manipulação das características interfere, tanto positivamente quanto negativamente na

colisão e coalescência das gotículas de óleo. Consequentemente, influenciando todo o processo de tratamento.

Rosli; Murshed; Adlan (2017), trabalharam com investigações numéricas e experimentais, características de escoamento como, efeitos do número de bicos e a velocidade de entrada do efluente, em uma planta semi-industrial de FAD. Essas características, foram modeladas usando a abordagem Euleriana e modelo de turbulência κ - ϵ RNG, mediante utilização do *Fluent*. Os dados computacionais validados, forneceram uma visão sobre a determinação da condição operacional ideal. Os resultados obtidos sugeriram que, as características estudadas, contribuíram para a distribuição e dispersão da vazão no interior do tanque. Desta forma, influenciando na eficiência do processo de separação do flotador.

CAI *et al.* (2019), utilizaram dinâmica de fluidos computacional (CFD) e método rede neurais para avaliar o desempenho e prever a correlação entre parâmetros estruturais nas características de separação de uma Unidade de Flotação Compacta (UFC), em escala semi-industrial, na separação óleo-água. O pacote comercial *Fluent*, mediante o uso da abordagem Euleriana e o modelo de turbulência κ - ϵ RNG, foi a ferramenta CFD aplicada, juntamente com o modelo de rede neural de retroprogramação. Concluíram que eficiência de separação do equipamento, após execução metodologia proposta, aumentou 13,6% quando comparado ao cenário sem otimização, atingido um valor de 92,82%. Além disso, efeitos no desempenho, provenientes da taxa de fluxo e do teor de óleo na entrada da UFC, foram previstos.

Huang; Long (2020) adotaram o modelo de Bloom-Heindel modificado, para calcular eficiência de colisão e fixação entre gotas de óleo e bolhas, juntamente com os modelos de BP (Balanço Populacional) e CFD, para analisar o desempenho de uma unidade FAD em escala industrial. Utilizaram pacote comercial *Fluent*, vinculado ao uso da abordagem euleriana e modelo de turbulência κ - ϵ padrão. As simulações validadas pelos resultados experimentais, demonstraram que o tamanho da gota de óleo é diretamente proporcional a eficiência de remoção. Esta, pode ser reduzida se, a concentração de óleo e a taxa de fluxo de gás assumirem valores extremos, para mais ou menos. Além disso, a comparação entre o modelo Bloom-Heindel e o modificado demonstra que este, pode fazer uma previsão mais aproximada da separação de óleo no FAD.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Encontram-se apresentados nesta seção, os equipamentos, metodologias aplicadas, condições e parâmetros utilizados. Inicialmente, é apresentado o FPSI e suas características geométricas, posteriormente, as configurações dos computadores utilizados no processo de simulação numérica.

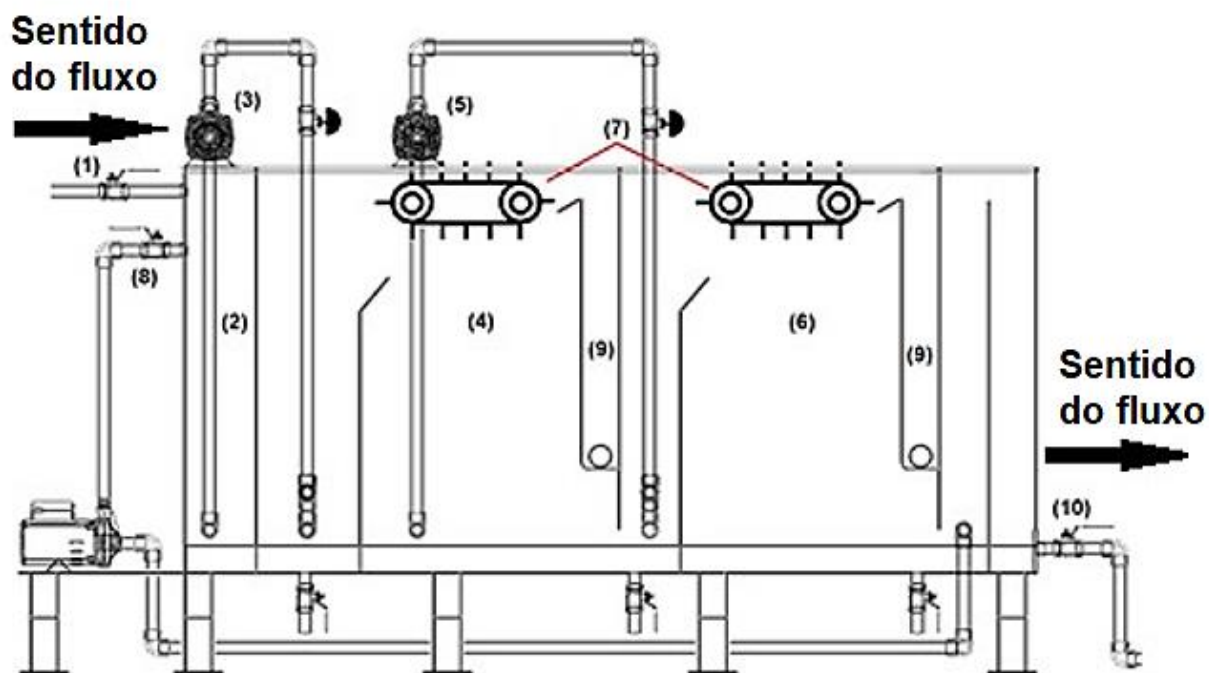
3.1 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

A Figura 19 mostra o arranjo experimental do FPSI. O efluente oleoso a ser tratado (1) entra na câmara de equalização do equipamento (2), onde é homogeneizado e captado por uma bomba centrífuga multiestágio (3), adaptada para produção de microbolhas (HENAUTH *et al.* 2017).

A referida bomba satura com microbolhas de ar o líquido oleoso e descarrega-o, na entrada da primeira câmara de flotação (4). A atuação desta bomba garante um contato bastante íntimo entre as gotículas de óleo presente no efluente e, as microbolhas de ar em ambas as câmaras de flotação, que passam então a terem uma única função de vaso separador de líquido e da espuma oleosa formada nas vizinhanças de sua superfície livre, cenário análogo aos tanques de sedimentação (SANTOS *et al.* 2021).

Em seguida, uma segunda bomba multiestágio adaptada (5) capta o efluente na primeira câmara satura-o com ar mais uma vez e descarrega-o na segunda câmara de flotação (6). A espuma oleosa formada, é descartada nos coletores (9) com auxílio de raspadores (7) instalados em cada câmaras de flotação. Em seguida o efluente tratado é destinado ao processo seguinte (10), sendo que parte dele é recirculado (8) para câmara de equalização.

Figura 19 - Esquema simplificado com os componentes básicos e funcionamento do Flotador com Pré-saturação Induzida (FPSI)



Fonte: Autor, (2021)

O flotador por pré-saturação induzida semi-industrial (FPSI) utilizado neste trabalho foi fabricado em chapas de aço carbono, com paredes internas envoltas por pintura epóxi. A intenção desta pintura é promover maior resistência à corrosão e garantir uma menor aglutinação de material oleoso. O FPSI foi projetado com 2,5 m de comprimento, 0,82 m de largura e 1,0 m de altura, comportando um volume útil total de 1,4 m³. Possui em sua base válvulas para drenos de esgotamento, facilitando o processo de limpeza em período de manutenção e é dotado de uma câmara de equalização e duas câmaras de flotação. A Figura 20, mostra um esquema do FPSI e seus componentes básicos.

Figura 20 - Flotador FPSI-SI instalado na planta utilizados nos ensaios experimentais



Fonte: Autor, (2021)

Nos ensaios experimentais, para validação do modelo fluidodinâmico, as vazões de alimentação, reciclo e saída do sistema foram ajustadas para obtenção de seis cenários distintos, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Dados das vazões utilizadas nos ensaios experimentais

	Vazão (L.h⁻¹)			
	Alimentação	Entrada	Reciclo	Saída
Cenário 1	546	612	66	546
Cenário 2	462	612	150	462
Cenário 3	408	612	204	408
Cenário 4	336	612	276	336
Cenário 5	270	612	342	270
Cenário 6	204	612	408	204

Fonte: Autor (2021)

A homogeneização entre o volume oleoso, presente no líquido tratado recirculado e no líquido proveniente da alimentação, fornece a alíquota de óleo da vazão de entrada do sistema. Os valores estimados de concentração de óleo na entrada, para cada cenário, foram calculados com base no conceito de mistura de soluções de mesmo soluto, conforme Equação 23.

$$C_e = \frac{C_a \cdot Q_a + C_r \cdot Q_r}{Q_a + Q_r} \quad (23)$$

em que, a concentração de óleo na entrada do sistema (C_e); concentração de óleo na alimentação (C_a); vazão de alimentação (Q_a); concentração de óleo no reciclo (C_r) e vazão do reciclo (Q_r).

Foram calculados, para cada cenário, as eficiências de remoção de óleo no efluente, por meio da relação do teor de óleo, aferido através do método ABNT NBR 13348/95, na alimentação e na saída do sistema de tratamento. As eficiências foram calculadas mediante a Equação 24.

$$X_{\text{óleo}} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \cdot 100 \quad (24)$$

em que, a eficiência percentual de óleo removido ($X_{\text{óleo}}$); concentração de óleo inicial (C_i) e concentração de óleo final no sistema (C_f). Os valores encontrados para (C_i) e (C_f) são análogos aos atribuídos a (C_a) e (C_r) respectivamente. A Tabela 8 mostra as eficiências obtidas para cada cenário.

Tabela 8 - Teor de óleo e graxas obtidas nos ensaios experimentais

	Concentração (mg.L⁻¹)		Eficiência de remoção (%)
	Alimentação	Saída	
Cenário 1	948	43	95,5
Cenário 2	805	50	93,8
Cenário 3	1089	56	94,8
Cenário 4	839	54	93,6
Cenário 5	912	78	91,5
Cenário 6	948	104	89,0

Fonte: Autor (2021)

3.1.2 Modelagem matemática

O desenvolvimento de um modelo fluidodinâmico em *CFD* para água oleosa compreendeu o emprego do *Flow simulation*, suplemento de simulação da dinâmica dos fluidos, presente no *software* de CAD *solidworks* 2019. A simulação de fluido com particulados é feita em duas etapas. primeiramente, o escoamento do fluido (fase contínua) e, em seguida, o estudo das partículas lançadas no fluido (fase dispersa). O *hardware* utilizado nas simulações foi um *notebook* (Figura 20), detentor da seguinte configuração: Processador Intel Core i7 7700HQ, 16GB de memória RAM, HD 2TB, SSD 256GB e placa de vídeo GTX 1050 TI.

Figura 21 – Flotador FPSI-SI instalado na planta utilizados nos ensaios experimentais Notebook utilizado nas simulações



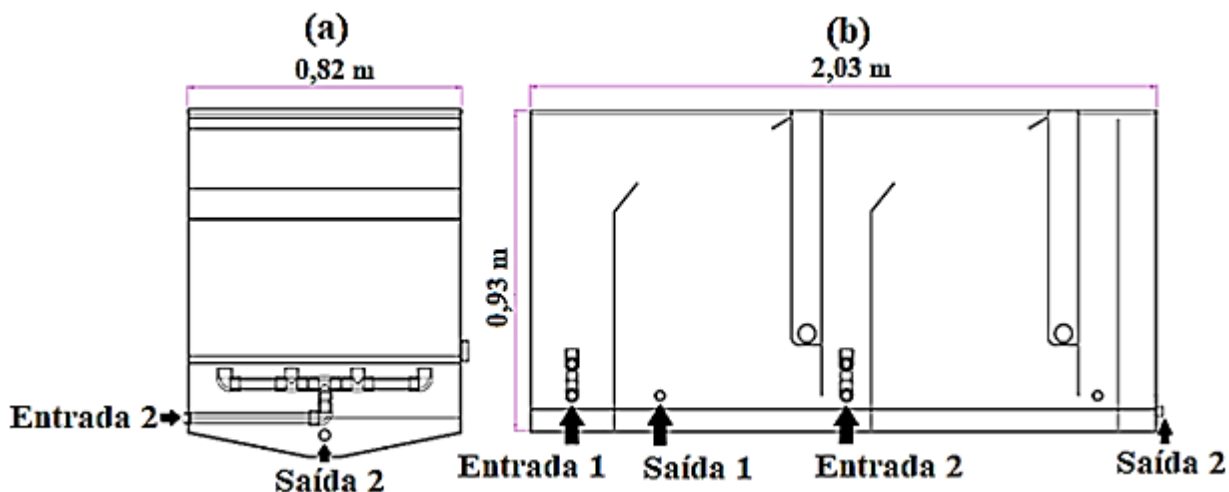
Fonte: Autor (2021)

O procedimento de modelagem utilizando a ferramenta CFD, para resolução de equações de escoamento de fluido sobre uma região de interesse, baseia-se em uma sequência de etapas que são compreendidas por: identificação da região de interesse e sua geometria, criação da malha, configuração das condições de contorno e propriedades do fluido.

3.1.2.1 Criação da geometria

Em um primeiro momento, foi utilizado o *Solidworks*, para modelagem simplificada da geometria da câmara do FPSI. Este programa engloba a categoria de ferramentas *CAD (Computer Aided Design)* para construção de domínios tridimensionais. As simplificações efetuadas, com o intuito de reduzir o esforço computacional foram compostas pela retirada da câmara de equalização, aproximação da superfície da câmara ao ponto de inflexão da espuma nos coletores, com redução da altura do FPSI, retirada das bombas geradoras de microbolhas e reciclo. O modelo simplificado da geometria da câmara do FPSI está demonstrado na Figura 22.

Figura 22 – Modelo virtual simplificado do FPSI-SI gerado com o *software SolidWorks* (a) vista do plano YZ, (b) vista do plano XY



Fonte: Autor (2021)

3.1.2.2 Geração da malha

Inicialmente, foi escolhida a geração de malha com refinamento automático, que permite 7 níveis de configurações de malha. No entanto, os três primeiros níveis geram malhas muito grosseiras, acarretando imprecisões nos dados simulados. Em contrapartida, os dois últimos níveis atribuiriam à malha alto grau de refinamento, elevando o tempo de simulação e tornando-o proibitivo. Optou-se por utilizar um nível cinco, de refino a referida malha. Equilibrando as

demandas de fidedignidade dos resultados das simulações e esforço computacional. A discretização do domínio, foi realizada pelo método dos volumes finitos (MVF).

3.1.2.3 Pré-processamento e configurações

A etapa de pré-processamento, tem por finalidade criar as condições viáveis para resolver o problema físico. Neste estágio, foram inseridas todas as considerações relativas ao escoamento, a fim de evitar resultados não esperados (MALISKA, 2004).

As simulações, de caráter Euleriano, foram divididas em seis cenários de acordo com a concentração de óleo na alimentação do FPSI. Por não haver alteração no fluxo, que entra na primeira câmara, a vazão foi fixada num valor $612 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ e, para manter um equilíbrio de material, do que entra e sai do sistema, a saída 1 e entrada 2, tiveram seus valores de vazões igualados ao valor de entrada na primeira câmara (entrada 1). Na saída 2, foi aplicado a condição de contorno de pressão ambiente (1 atm).

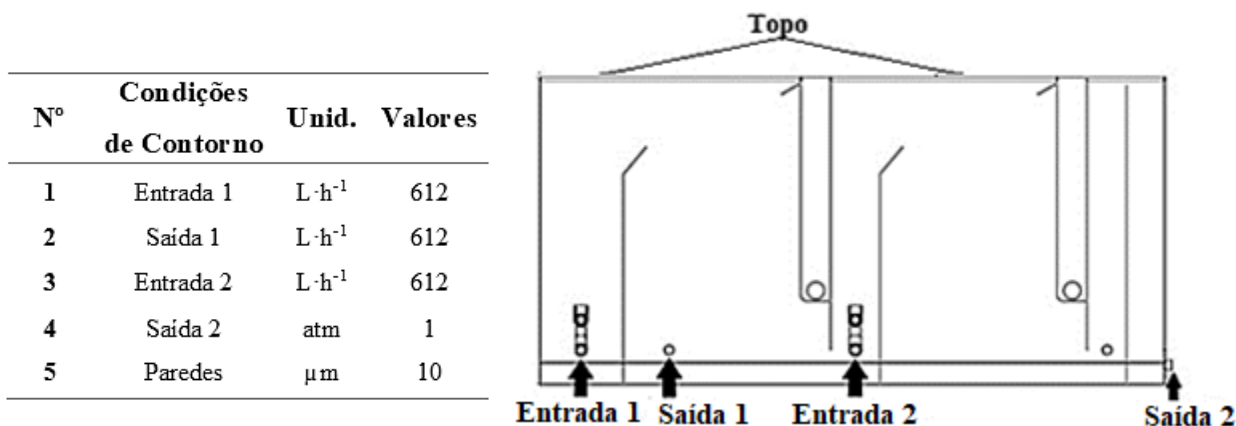
Na parte superior do equipamento (topo) foram testadas três configurações para reproduzir virtualmente a remoção do material flotado. A primeira condição, denominada de C1, foi configurada com *Real Wall*, que implica em adicionar propriedades como rugosidade e de deslocamento na direção dos coletores de espuma, na superfície em questão. Os valores estimados e inseridos para as duas propriedades foram $60 \mu\text{m}$ e $0,0036 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, com base nos dados de Porto (2006) e Nascimento (2018), respectivamente. Também foi atribuído o valor estimado de $6,12 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ na parede localizada no ponto de inflexão dos coletores, correspondente a vazão de material flotado removido.

Na segunda configuração (C2), foi aplicada a característica *Ideal Wall*, que acarreta paredes sem atrito e atribuído o valor de $6,12 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ na parede presente no ponto de vertedura dos coletores de espuma oleosa. No entanto, neste caso, foi inserido um efeito MHS (Movimento Harmônico Simples). O mecanismo de MHS simularia o movimento de abaixar e o levantar de um vertedouro. E assim, inserindo na simulação um caráter oscilatório dependente do tempo. Na terceira condição (C3), inseriu-se o atributo *Ideal Wall* e posteriormente empregada a característica *absorption*, presente no estudo de partícula do *Flow Simulation/ SolidWorks*.

Por conta do equipamento ser revestido internamente por pintura epóxi e possuir difusores fabricados em policloreto de vinila (PVC), conforme dados de Porto (2006), todas as outras paredes

foram configuradas com característica de atrito e valor de 10 μm de rugosidade. A Figura 23 demonstra as condições de contorno aplicadas ao modelo.

Figura 23 - Condições de contorno aplicadas ao modelo virtual do sistema FPSI-SI



Fonte: Autor (2021)

O tempo total das corridas foi de 21600 segundos. Sendo utilizados 3600 segundos nos testes introdutórios para as condições C1, C2 e C3, com passos de 0,25 segundos e variação máxima de 0,01% para condições de contorno. O fluido utilizado foi a água e o modelo de turbulência aplicado foi o $\kappa\text{-}\epsilon$ LB.

3.1.2.3.1 Configuração do estudo e rastreamento de partículas

A configuração do rastreamento de partículas, fase da simulação de característica Lagrangiana, teve início com a estimativa do percentual de óleo nos agregados. Considerando-se uma vazão de entrada de $612 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ e uma concentração de $850 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de óleo. A partir de cálculos realizados, foram obtidas as vazões volumétricas de óleo e ar, assumindo valores de $0,57 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ e $2,5 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$, respectivamente.

Com base nestes dados e após alguns cálculos de mistura de substâncias, chegou-se a um produto com massa específica de $170,473 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ e viscosidade dinâmica de, aproximadamente, $0,00948 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Esses valores encontrados, para os agregados, foram inseridos na base de dados do *Flow Simulation/ SolidWorks*, para cada cenário.

Após a criação das particularidades do novo fluido, foram configuradas condições de contorno para o rastreamento de agregados. Tendo início com a inserção de dados como, vazão mássica e propriedades da partícula, local/posição de injeção no sistema, diâmetro, quantidade de particulado e injeções. Estas foram ajustadas de acordo com cada diâmetro, variando numa faixa de 100 a 5 μm , com uma nova injeção a cada 5 μm . Assim, proporcionando um total de 20 injeções para cada cenário e, para cada injeção, tivemos um total de 1000 particulados e de 500 para os testes iniciais das configurações C1, C2 e C3.

Na etapa seguinte, foram aplicadas algumas características físicas ao sistema como, gravidade, com valor de 9,81m e acreção, para habilitar o cálculo do aumento de massa por aglomeração de material, em um ponto no sistema.

Após aplicação das características físicas, foram ajustadas configurações de parede do sistema FPSI. Como padrão, foi aplicado a todo sistema a condição de *ideal reflection*, que permite as partículas, quando colidem com a parede da geometria, alterarem sua direção. Porém, às paredes do topo da geometria e, exclusivamente, aplicada à configuração C3, foi empregado o atributo *absorption*, Com isso, estas superfícies adquirem a peculiaridade de absorverem todas as partículas que colidirem com elas. Sendo, a representação virtual do efeito de remoção, existente no FPSI, executada pelos raspadores de espuma.

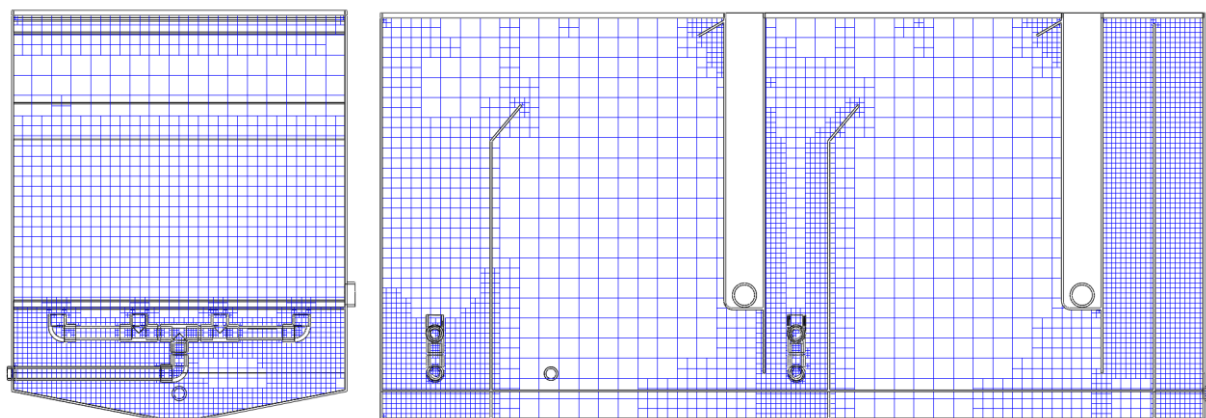
A última fase foi a configuração da etapa de cálculos do rastreamento de partículas. Inicialmente, com a seleção do tipo de investigação acerca do particulado. Neste caso, a seleção foi o item “trajetória”, compreendendo os dados estatísticos dos particulados, direção e sentido percorridos. As restrições aplicadas ao particulados foram, distância máxima percorrida de 1000 m e tempo máximo de permanência no sistema. Este determinou a execução de duas corridas, para cada cenário: 10800 e 21600 segundos e 3600 segundos para os testes preliminares das configurações para captura de partículas. Para ambas as corridas foram utilizadas o valor de 50000 interações, pré-definido pelo *software*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MODELO FISICO VIRTUAL

A malha gerada, proveniente do método de refinamento automático, realizado pelo *software*, apresenta um número total de 377.637 células. O refino da malha, pode ser observado, principalmente, na região dos difusores, em ambas as câmaras, bem como no espaço próximo a saída do sistema antes e após o vertedouro, além setor nas redondezas das aletas dos coletores de material flotado. Nas duas câmaras, foi possível notar ainda, áreas pouco refinadas, localizadas entre o defletor (direcionador ascendente do fluxo) e a parede do coletor, conforme Figura 24.

Figura 24 - Malha cartesiana gerada com refinamento automático para a geometria do flotador (a) vista do plano YZ, (b) vista do plano XY



Fonte: Autor, (2021)

4.2 TESTES DAS CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA PARA REMOÇÃO DE AGREGADOS

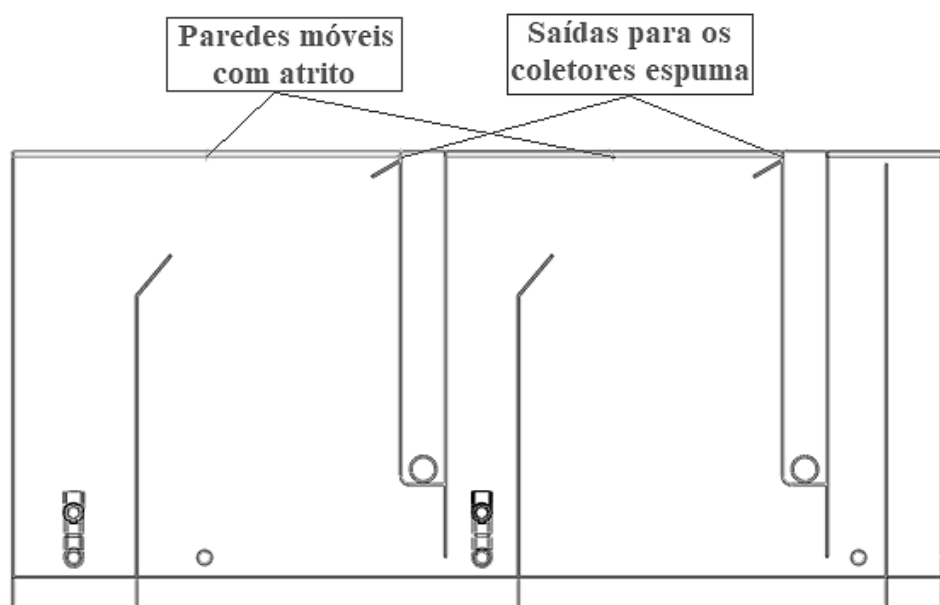
De acordo com a literatura, em simulações de células de flotação, mais especificamente na superfície do sistema, são inseridas equações, ou um conjunto delas, com a intenção de reproduzir virtualmente a remoção das partículas, efetuada pelos raspadores de material flotado. Porém, isso acarreta um aumento do esforço computacional (LAKGHOMI; LAWRYSHYN; HOFMANN, 2015). Outra condição de contorno para paredes nas superfícies de câmaras de flotação verificada em grande parte do acervo literário consultado, é a condição de paredes sem atrito, mais simples

de configurar e requerendo menor esforço computacional (CHEN; WANG; YANG, 2016). Ambas as condições foram aplicadas de maneira conjunta e individual.

As três configurações utilizadas, C1, C2 e C3 foram executadas preliminarmente, em um tempo físico de 3600 segundos, ou seja, 1 hora de duração, tanto para o escoamento do fluido quanto para as simulações envolvendo o estudo de partículas. Esta investigação inicial foi necessária para definir qual, ou quais configurações seriam mais adequadas para o modelo fluidodinâmico do FPSI-SI.

A Primeira configuração testada das condições de contorno (C1), que representa uma parede real com atrito na superfície da câmara de flotação simulada, assemelha-se a uma esteira em movimento, paralelo a superfície do material flotado. À medida que a parede se movimenta o fluxo direciona-se para a abertura dos seus correspondentes coletores de espuma. Conforme Figura 25.

Figura 25 - Esquema da configuração utilizada na configuração C1

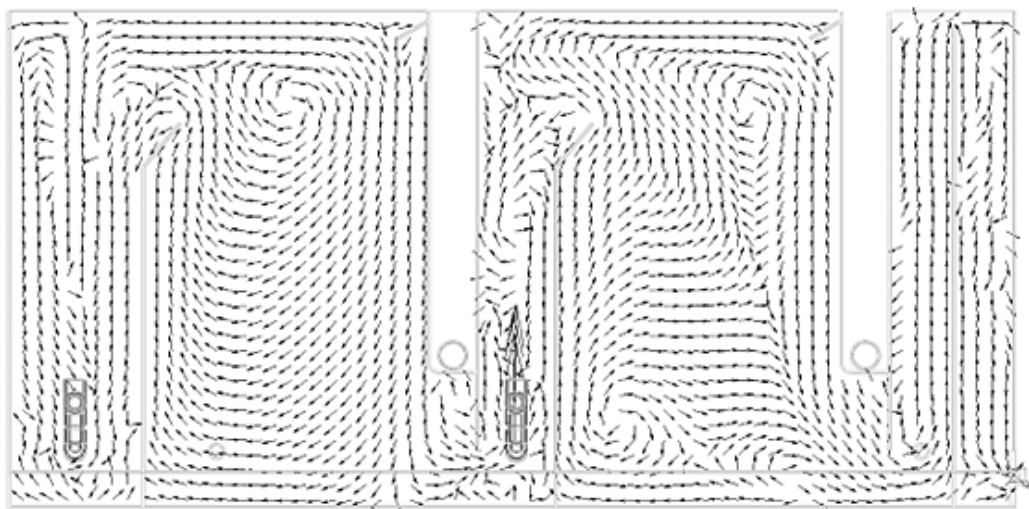


Fonte: Autor, (2021)

A simulação ocorreu em um tempo de 21 horas. Contudo, apesar de promover o deslocamento do fluido na superfície do modelo virtual, o valor de velocidade utilizado não foi o suficiente para direcionar o fluxo às aberturas nas respectivas câmaras, como visto na Figura 26. Além disso, o ajuste deste parâmetro cinemático, que solucionaria o problema (direcionamento),

tornou-se inviável pelo grau de dificuldade apresentado ao correlacionar os dados do equipamento físico com sua replica virtual. Isto ocorreu, em virtude do sistema removedor de espuma oleosa do FPSI-SI ter o seu funcionamento semelhante a paredes perpendiculares à superfície da lâmina d'água, divergindo do conceito aplicado nesta simulação. Outro ponto observado foi a vazão na abertura acima dos coletores, que mesmo sendo ajustada a velocidade da parede e fluxo direcionado corretamente, ainda divergiria do escoamento intermitente efetuado no flotador real que no caso desta configuração criada era contínua.

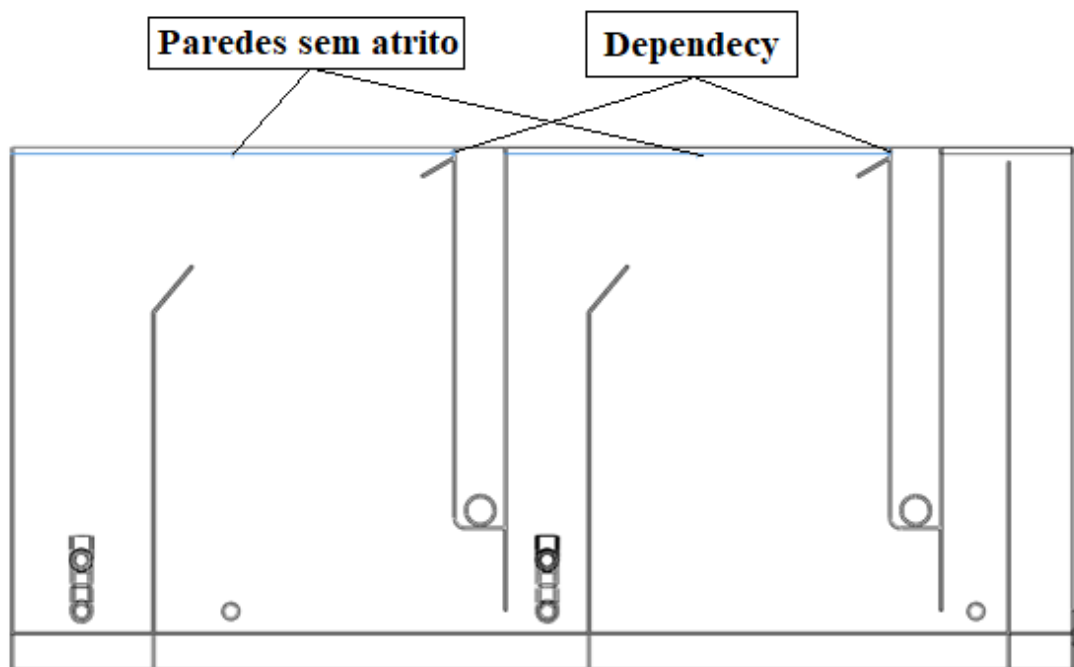
Figura 26 - Vetores de velocidades na vista do plano XY da simulação preliminar com a configuração C1



Fonte: Autor, (2021)

Para segunda configuração (C2), foi utilizado uma equação que introduziu o efeito MHS adaptado, nas aberturas localizada acima do coletor de espuma. A referida equação foi adotada para ambas as câmaras, atribuída automaticamente pelo programa à denominação de *Dependency*, por ser um valor de grandeza calculado e dependente de uma equação inserida pelo usuário. Além disso, foi atribuída a condição de parede sem atrito para permitir o escoamento livre pelos agregados na direção da saída, localizada próxima dos coletores de material flotado e, assim, foi adotada a configuração trazida pela Figura 27.

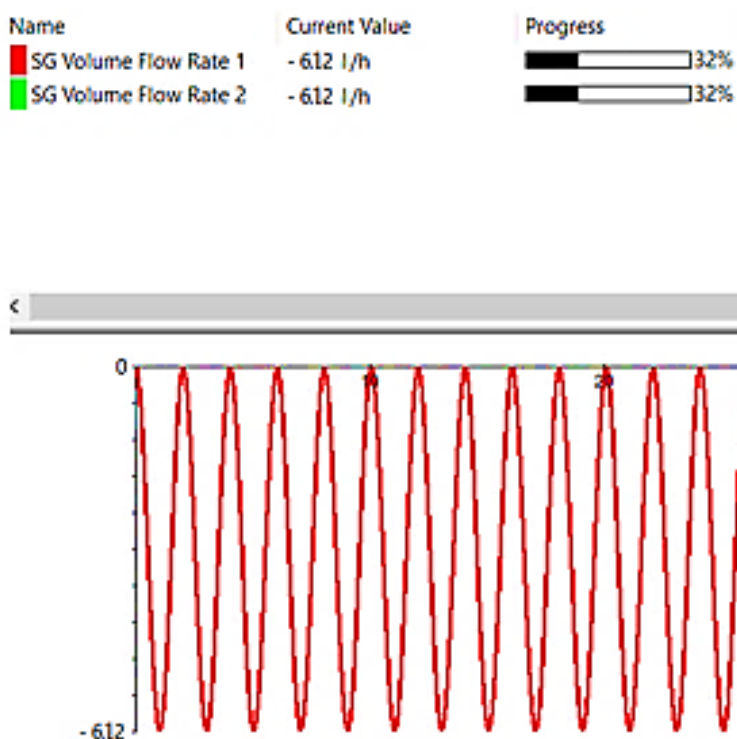
Figura 27 - Esquema da configuração utilizada na configuração C2



Fonte: Autor, (2021)

A configuração utilizada na abertura realmente não permitiu a passagem de forma contínua, como ocorre em sistemas de flotação por transbordo. Ou seja, o mecanismo regulador tipo MHS restringiu adequadamente a passagem do fluido de maneira intermitente e dependente do tempo, como observado por meio da Figura 28. Este tipo de escoamento descontínuo aproxima-se da vazão de espuma oleosa removida pelos raspadores, presentes no FPSI-SI.

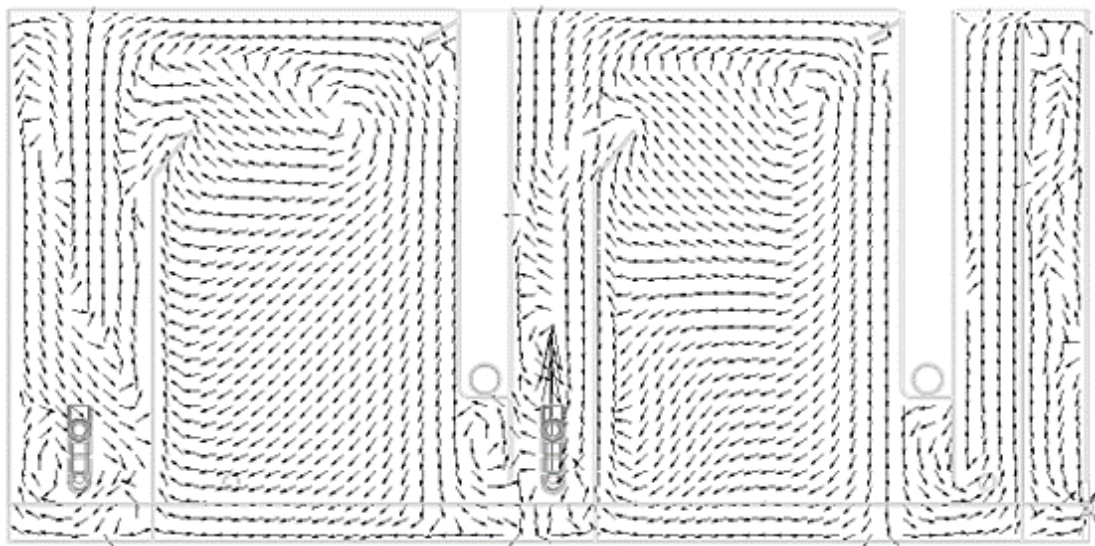
Figura 28 – Gráfico do mecanismo MHS gerado pelo *Flow Simulation/ SolidWorks* durante a execução da condição C2



Fonte: Autor, (2021)

A simulação desta configuração utilizou, aproximadamente, 25 horas para ser concluída. Mesmo apresentando um fluxo descontínuo, efetuado pelo mecanismo MHS adaptado, este não influenciou significativamente a dinâmica do fluido nas câmaras do flutador. Porém, quando aberta a saída oscilatória, o fluido foi direcionado para esta. O perfil de velocidade, trazido pela Figura 29, demonstra menor turbulência na geometria, do que o apresentado pelo perfil da configuração anterior (C1).

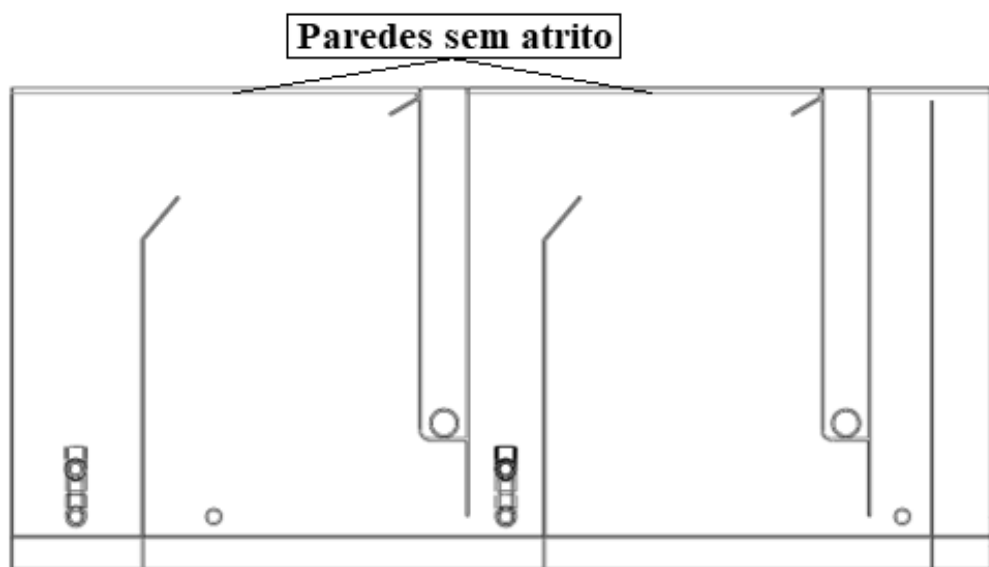
Figura 29 - Vetores de velocidades na vista do plano XY da simulação preliminar com a configuração C2



Fonte: Autor, (2021)

O terceiro tipo de condição de contorno aplicada ao sistema simulado (C3) foi a inserção unicamente de paredes sem atrito na superfície do equipamento, onde o escoamento do fluido não sofrerá perda de carga devido a rugosidade na parede, pois esta é desconsiderada para cálculos de fluxo, conforme trazido pela Figura 30.

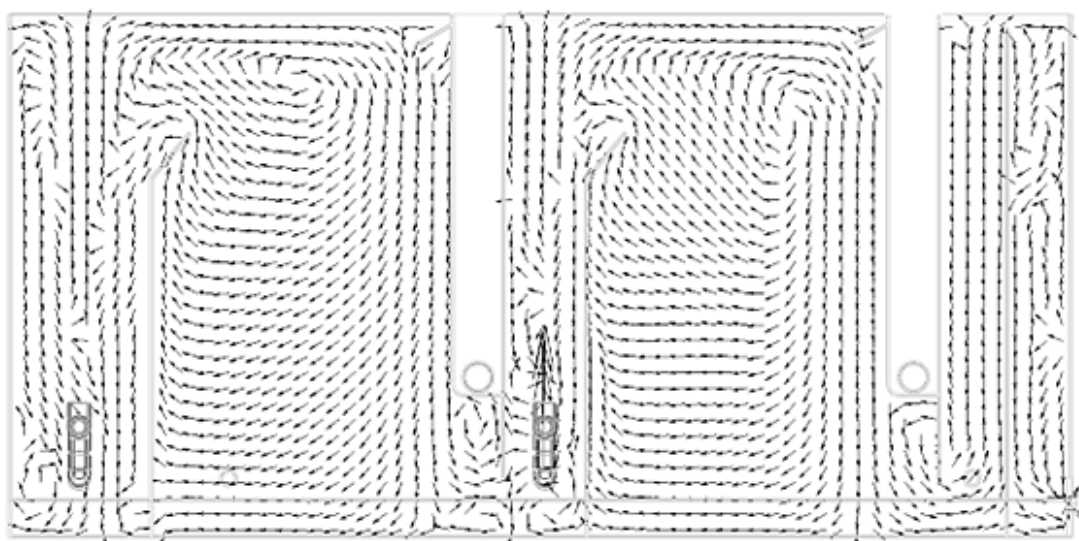
Figura 30 - Esquema da configuração utilizada na configuração C3



Fonte: Autor, (2021)

A simulação foi finalizada com um tempo de 19 horas de duração. Quando comparado com as outras duas configurações (C1 e C2), esta foi a que necessitou de menos tempo para finalizar os cálculos fluidodinâmicos. Com base no trabalho de Rodrigues e Béttega (2018) isto já era algo esperado pois, este tipo de condição de contorno requer menor demanda computacional, quando não apresenta nenhum mecanismo matemático adicional para simular a remoção de particulado. Outro ponto verificado foi que a turbulência provocada na célula de flotação, próxima à superfície, foi mínima. Porém, bastante semelhante a configuração C2, nos inclinamos a acreditar que este padrão de escoamento foi ocasionado pelas conformações de paredes sem atrito, inseridas para ambas as simulações, conforme visualizado na Figura 31.

Figura 31 - Vetores de velocidades na vista do plano XY da simulação preliminar com a configuração C3



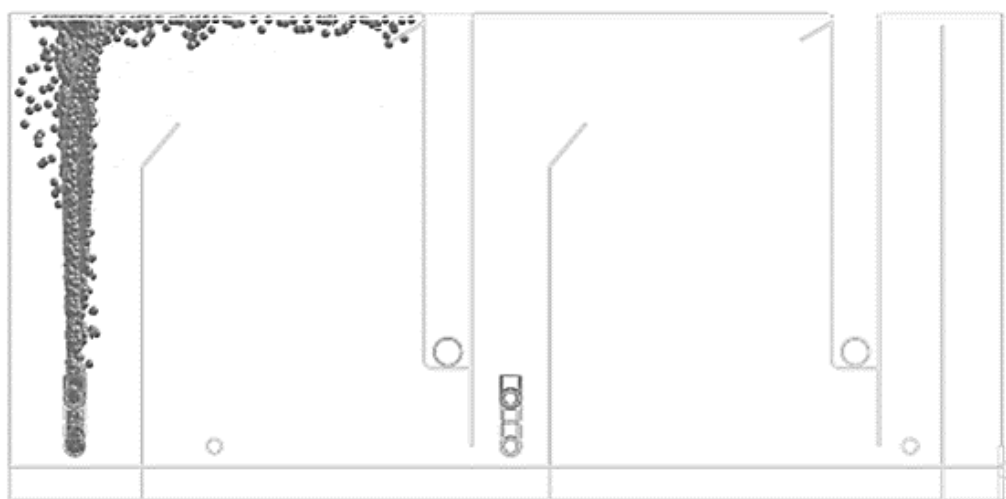
Fonte: Autor, (2021)

As configurações C1, C2 e C3 utilizadas, foram testadas com o procedimento de estudo de partículas presente no *Flow Simulation/ SolidWorks*. A finalidade desta etapa preliminar, foi averiguar quais ou qual configuração descreveria o comportamento dos particulados. No entanto como ambas as câmaras são relativamente semelhantes e, com intuito de reduzir a demanda computacional, este teste foi executado apenas na primeira câmara.

Os dados trazidos pelas Figuras 32, 33 e 34, englobam a suspensão de agregados com 100 μm gerados em suas respectivas configurações. Inicialmente, quando comparamos C1 com o resultado das demais condições de contorno, verificamos que houve maior dispersão dos

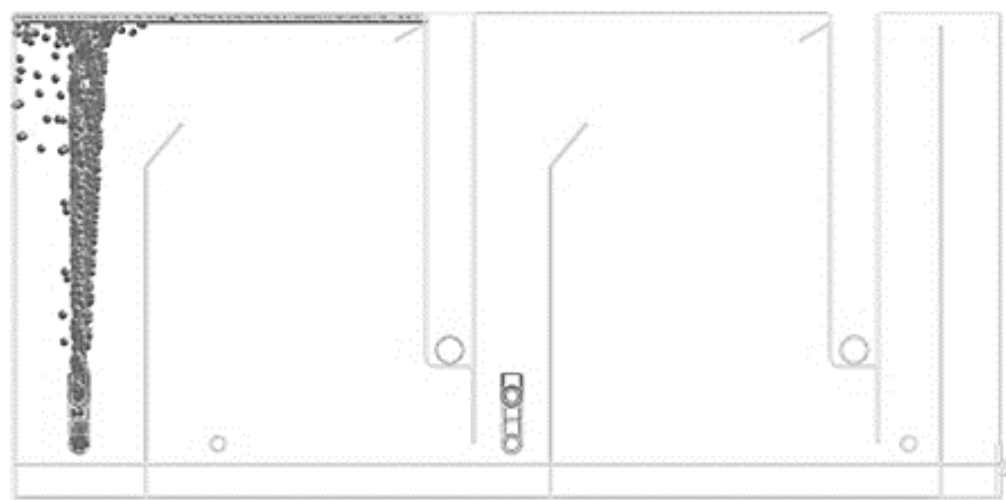
particulados nesta configuração. Isto nos induz a acreditar que este fenômeno foi decorrente da configuração de parede aplicada, criando um efeito divergente do esperado. No caso de C2 e C3, obtiveram, visualmente, baixa disseminação de particulados em relação a C1, mas ao defrontarmos, a configuração com o efeito MHS demonstrou maior difusão das partículas. Isto ocorreu provavelmente por causa da configuração *absorption*, presente na configuração C3. No entanto em ambas as condições, as partículas acomodaram-se em larga maioria na superfície da geometria.

Figura 32 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 100 μm na configuração C1



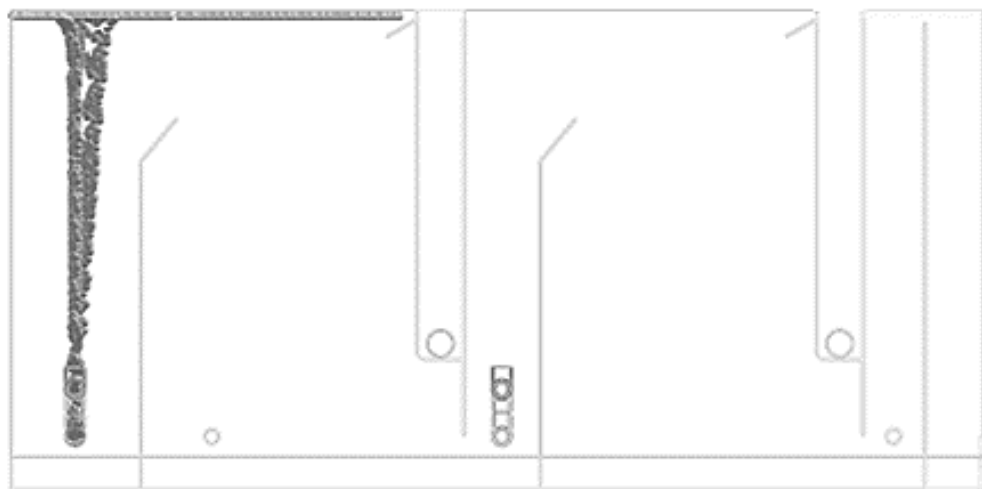
Fonte: Autor, (2021)

Figura 33 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 100 μm na configuração C2



Fonte: Autor, (2021)

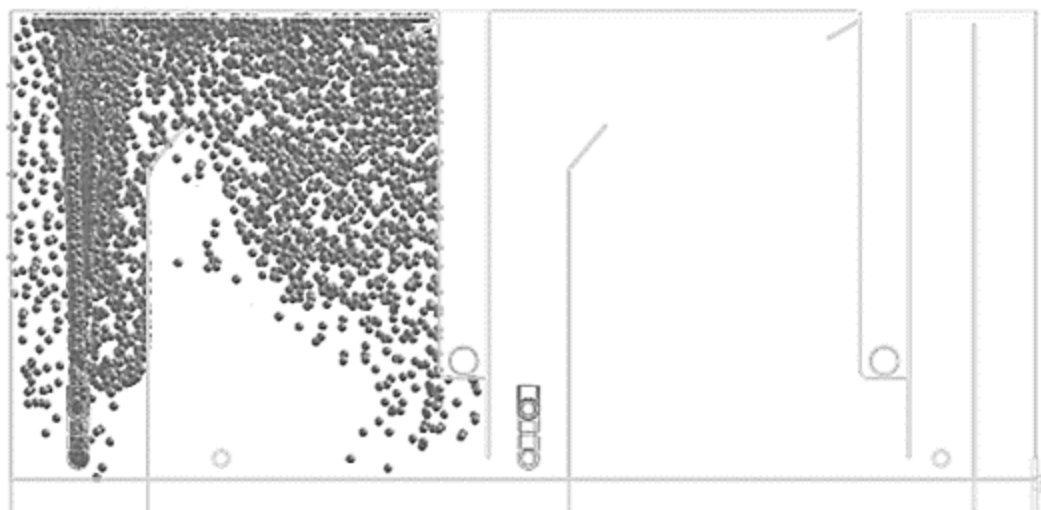
Figura 34 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 100 μm na configuração C3



Fonte: Autor, (2021)

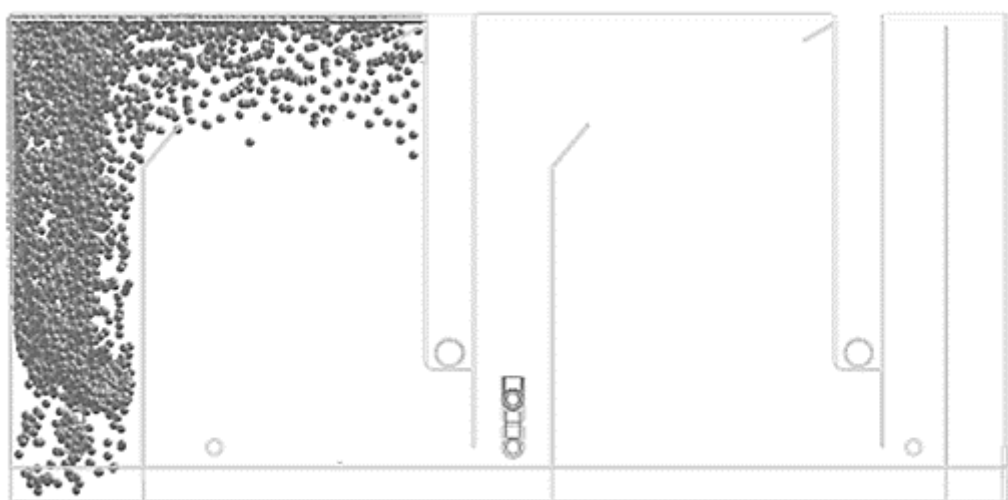
Ao analisarmos o bloco de ilustrações composto pelas Figuras 35, 36 e 37, para suspensão de agregados com 50 μm obtidos em suas respectivas configurações, constatamos uma vez mais, alto grau de distribuição de partículas em C1, na câmara de flotação, em comparação as outras duas condições de contorno aplicadas. Esta distribuição abrange considerável parte do sistema analisado, atingindo às imediações da base do flotador. Fica mais evidente que a condição de contorno em C1 possui um caráter mais dispersivo do que convergente. Averiguando comparativamente o comportamento dos particulados em C2 e C3, verificamos maior dispersão da primeira configuração em relação à segunda. Isto nos inclina a acreditar fortemente que o efeito de absorção de particulado, presente em C3, propicia esta diferença na distribuição das partículas. Ao confrontarmos o trio de figuras analisados anteriormente com estas três imagens, nas suas respectivas configurações, observamos um aumento na suspensão de particulados. De acordo Rodrigues; Batista; Béttega, (2019), é esperado esta elevação do efeito dispersivo nas partículas, torna-se mais evidente com a redução gradativa do diâmetro dos particulados.

Figura 35 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 50 μm na configuração C1



Fonte: Autor, (2021)

Figura 36 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 50 μm na configuração C2



Fonte: Autor, (2021)

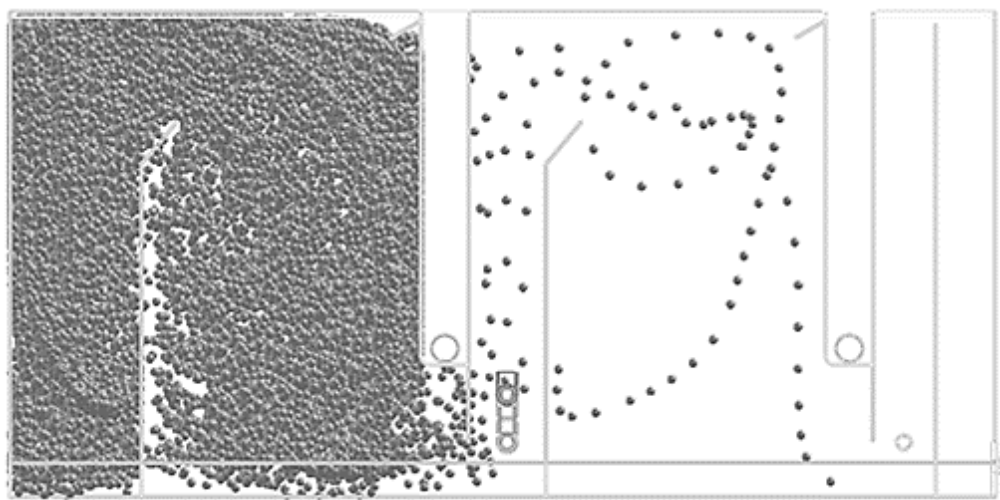
Figura 37 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 50 μm na configuração C3



Fonte: Autor, (2021)

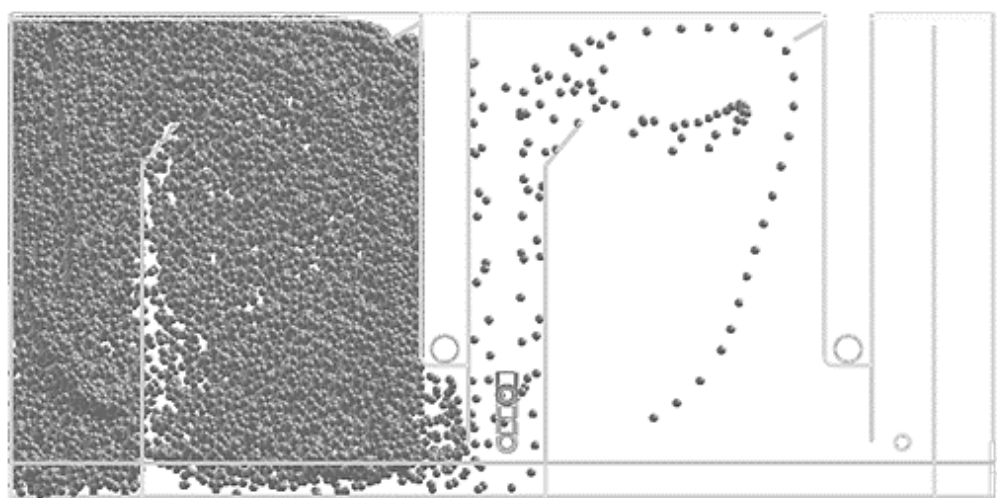
No terceiro bloco de imagens compostas pelas Figuras 38, 39 e 40, para a difusão de partículas com 5 μm , obtidos para as suas respectivas condições, detectamos uma uniformidade entre as três configurações utilizadas. Pois, nos três casos, não houve fluxo de agregados na área próxima da parede, localizada no ponto de inflexão do coletor de espuma. Ainda foi possível verificar que a dispersão de agregados acarretou completa distribuição destes em toda região da primeira câmara. A passagem de alguns particulados para a segunda câmara é evidência de que estes são de fácil arrastamento pelo escoamento do fluido no equipamento. Isto nos fornece indícios de que agregados com baixíssimo diâmetro podem prejudicar bastante a eficiência de separação do FPSI-SI.

Figura 38 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 5 μm na configuração C1



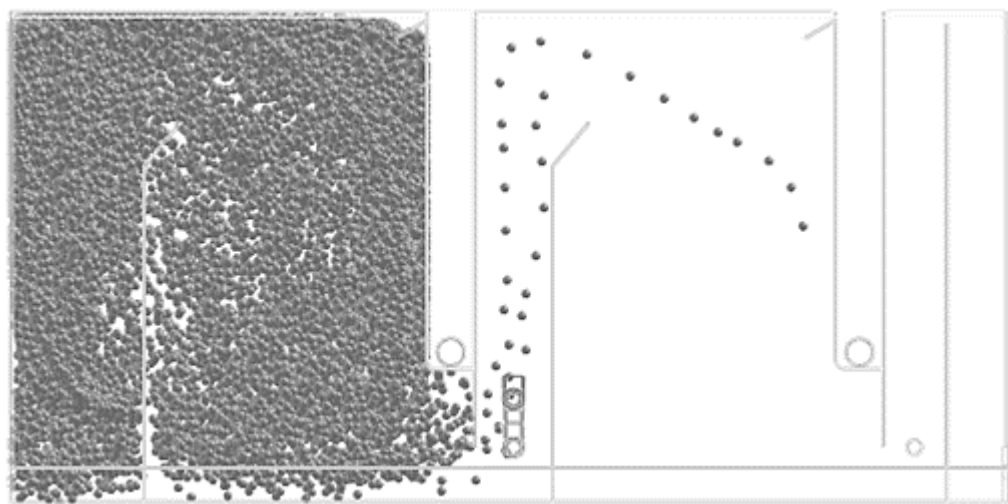
Fonte: Autor, (2021)

Figura 39 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 5 μm na configuração C2



Fonte: Autor, (2021)

Figura 40 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 5 μm na configuração C3



Fonte: Autor, (2021)

Comparando os três blocos de figuras, nas suas configurações correspondentes, notamos uma tendência que o aumento do nível de dispersão de agregados é inversamente proporcional ao diâmetro destes particulados. Uma elucidação sobre este fenômeno é trazida por Chen; Wang; Yang (2016). Segundos os autores, um termo bastante comum na literatura, em trabalhos envolvendo tanques de flotação é a denominação “água branca”. Este termo é frequentemente empregado para descrever a suspensão de bolhas micrométricas nos tanques, por atribuírem à água uma aparência leitosa. A altura de zona de “água branca” diminuiu com o aumento do diâmetro das microbolhas, significando que a adição de bolhas de diâmetro cada vez menor, aumenta o volume de fluido leitoso. Outro ponto importante salientado por Shen *et al.* (2022), é que os agregados considerados estáveis, nada mais são do que pequenas bolhas envoltas de um filme oleoso. Isso nos direciona fortemente a acreditar que o comportamento fluidodinâmico de ambos os particulados são análogos, pois sua configuração apenas diverge pela presença da película de óleo existente nos agregados.

Os dados obtidos através dos testes preliminares, em relação a eficiência de remoção e diâmetro dos agregados, expuseram o comportamento dos particulados por meio da Figura 41. Podemos perceber primeiramente que a configuração C3, em comparação às outras duas conformações, demonstra graficamente ampla vantagem. Pois, no que diz respeito à eficiência de

remoção média global para cada condição, C3 apresentou um valor de 58%, quase 50% a mais que C2 e mais do que o dobro do desempenho mostrado por C1.

Dentro da faixa de diâmetro de agregado analisada, outro ponto verificado em C3 foi a quase totalidade da remoção dos particulados com diâmetro acima de 75 μm , com exceção dos agregados com 100 μm que tiveram um valor de captura igual a 100%. Este perfil não foi seguido pelas configurações 1 e 2, visto que, ambas as conformações apresentaram perfis descendentes a partir de 80 μm e 75 μm , respectivamente, para C1 e C2.

De acordo com o trabalho de investigação numérica de uma câmara de flotação, executado por Deng; Ding; Ge (2017), o comportamento apresentado pelas condições C1 e C2 diverge do habitual examinado por dispersões de particulados gasosos em um flotor do tipo tanque. Uma vez que o aumento progressivo do diâmetro de uma partícula composta do mesmo material, seja ela microbolhas de gás, gotículas oleosas ou agregados por exemplo, tende a elevar a capacidade ascensional dela. Porém, em conformidade com a pesquisa efetuada por Deng; Ding; Ge (2017), os dados provenientes de C3 apresentaram semelhante comportamento ao encontrado comumente em tipos de flotores da geometria mencionada. Entretanto, esta disparidade nos resultados adquiridos para C1 e C2, frente a literatura na área de flotação, pode ser explicada pelo mecanismo de captura de particulado operado nas respectivas configurações.

Como visto anteriormente, na análise do perfil fluidodinâmico dos particulados com 100 μm , os agregados com este diâmetro atingiram a superfície da primeira câmara do FPSI-SI virtual percorrendo o caminho mais curto possível. No entanto, ao alcançar esta área do flotor, os agregados de C3 já eram removidos do sistema e contabilizados, mas, os particulados das demais conformações precisariam atingir a zona próxima dos coletores de espuma. Mesmo C2 equipada por uma parede sem atrito na superfície, seu mecanismo MHS oscilante não possuía vazão elevada o suficiente para encaminhar os particulados, acarretando completa dependência do escoamento do fluido para direcioná-los à saída.

Ao seu turno, a condição de contorno de C1 era constituída do artifício de “parede rugosa móvel”, este apresentou a característica de fluxo divergente, o oposto do planejado. E por sua vez, a saída disporia ainda de uma vazão, embora constante, relativamente baixa para auxiliar de maneira expressiva o direcionamento do fluxo os coletores.

Com esta premissa, as conformações tanto C1 quanto C2 contribuíram para o contexto de “competição” pela influência direcional dos particulados de 80 a 100 μm , por intermédio da força

inercial de escoamento do fluido, e da força empuxo inferida em cada agregado. Com base nos dados gráficos e na revisão efetuada por Shammass; Bennett, (2010), a respeito da flotação, esclarece que a referida “disputa” foi vencida pelo empuxo que dificultou o deslocamento dos agregados para as respectivas saídas, tanto em uma configuração quanto na outra. Contudo, esta “vitória” foi visualizada de maneira mais significativa em C1 em decorrência do ângulo de inclinação descendente exposto no gráfico, para a faixa de particulados acima de 75 μm . A trajetória dos agregados entre a superfície do modelo virtual do FPSI-SI até os coletores foi o ponto crucial para o baixo despenho das duas configurações mencionada.

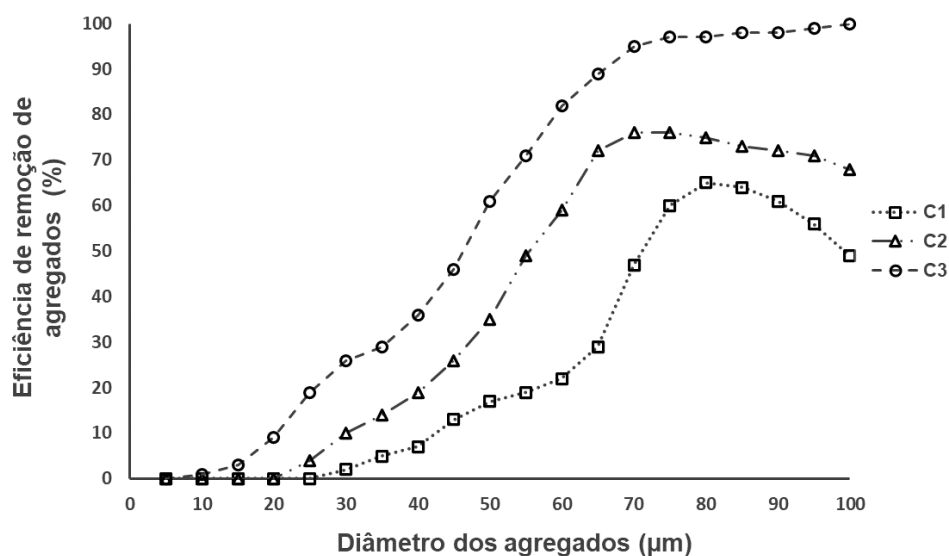
Ainda foi possível observar uma eficiência extremamente baixa para agregados nas faixas com diâmetros de 5 e 10 μm para C3, de 5 a 20 μm para C2 e de 5 a 30 μm para C1. Ao englobamos os resultados para o trio de faixa de diâmetro de particulado das três configurações, a eficiência de remoção de agregado não passou mais do que 2%, tendo como destaque os dados de particulados com 5 μm que apresentou um valor percentual de zero de eficiência. Segundo Rodrigues; Batista; Béttega, (2019), a eficiência extremamente baixa, de remoção de agregados, mencionada é decorrente da suscetibilidade dos particulados de pequeno diâmetro serem facilmente direcionados pelo escoamento do fluido, dificultando sua remoção do sistema. Isto incute-nos a ideia de que se uma quantidade expressiva de agregados, com diâmetro excessivamente pequenos for produzida, estes podem reduzir significativamente a eficiência do processo de flotação, por “apoderá-se” do sistema por completo.

Na faixa mais intermediária do gráfico, entre 35 e 65 μm de diâmetro, constatamos uma peculiaridade, pelo menos em C2 e C3, pois, em C1 tal característica aparece de forma mais discreta e irregular. Verificamos, portanto, o comportamento crescente e praticamente linear dos valores da relação eficiência de remoção e diâmetro de agregado, gerando linhas relativamente paralelas entre si. Shammass e Bennett (2010) nos esclarecem que este comportamento constatado é típico de processos que obedecem a leis da sedimentação, como no caso da flotação que ocorre de forma reversa. Desta forma, à medida que o diâmetro de um particulado aumenta, a sua capacidade de ascensão eleva-se, promovendo, assim, o maior número de agregados na superfície do flotador.

Assim, com base na análise dos dados gerados pelas simulações das condições de contorno C1, C2 e C3, e respaldado pelo acervo literário consultado, definimos que a configuração C3 mostrou-se como a condição de contorno mais promissora e adequada, para darmos prosseguimento na investigação fluidodinâmica do sistema FPSI-SI. Pois, dentre as três condições

averiguadas, a C3 foi a que apresentou uma configuração mais simples de ser aplicada, resultados em conformidade com a literatura examinada, menor tempo de execução na fase Euleriana da simulação e, por consequência, menor esforço computacional.

Figura 41 - Comparativo entre as eficiências de remoção de agregados obtidos via simulações C1, C2 e C3 para faixa de particulados de 5 a 100 μm

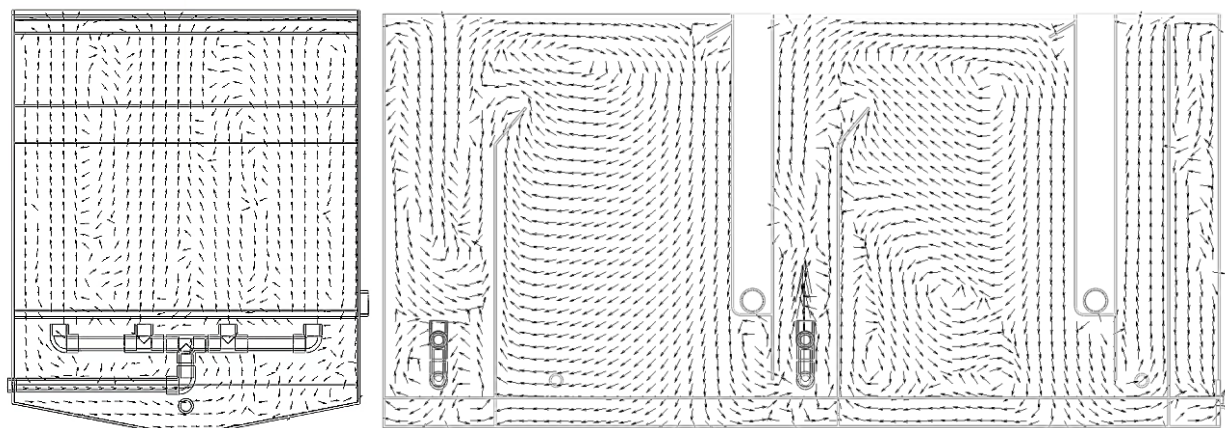


Fonte: Autor, (2021)

4.3 SIMULAÇÃO DO FPSI

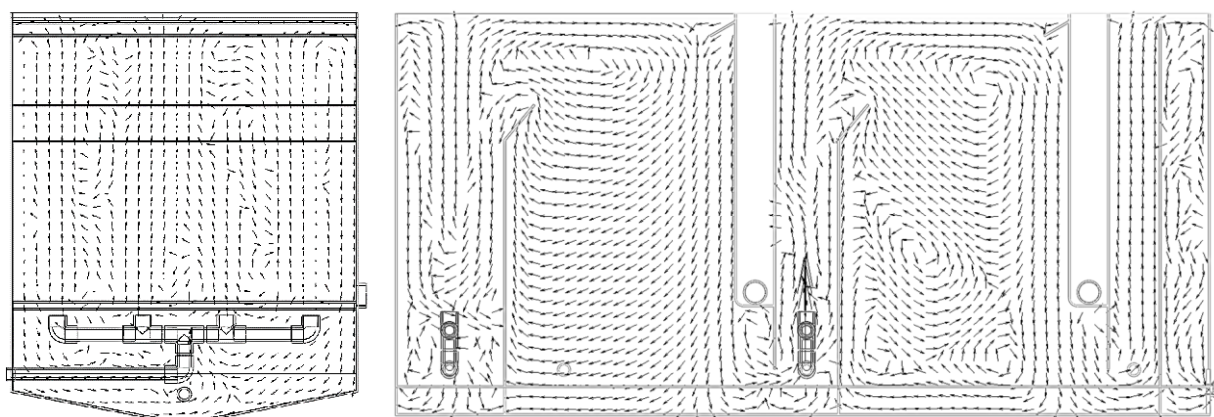
A simulação de fluxo foi realizada sem intercorrências e o tempo transcorrido para sua finalização excedeu pouco mais que 98 h. As Figura 42 e 43 trazem o comportamento do fluido no sistema, através da distribuição dos vetores de velocidade nos momentos 10800 s e 21600 s. A comparação entre as duas figuras demonstra relativa semelhança com relação aos dois momentos, o que nos inclina a interpretação de que o sistema atingiu a condição de regime estacionário. Também foi possível observar uma maior turbulência na zona inferior da câmara 2 em comparação ao que foi visualizado nos testes preliminares. Acreditamos que devido à completa movimentação do fluido decorrente do tempo utilizado ter sido superior ao tempo de residência do equipamento. Pois, para a vazão de alimentação atribuída, o valor deste tempo seria inferior a 3 horas ou 10800 segundos.

Figura 42 - Vetores de velocidades (a) vista do plano YZ, (b) vista do plano XY no momento 10800 s



Fonte: Autor (2021)

Figura 43 - Vetores de velocidades (a) vista do plano YZ, (b) vista do plano XY no momento 21600 s



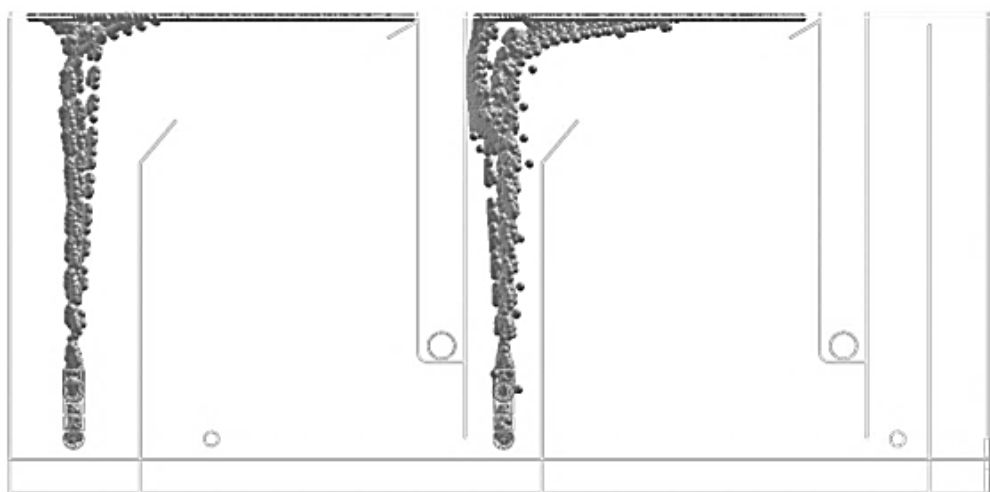
Fonte: Autor (2021)

Com os dados do perfil de fluxo no FPSI, foram realizadas corridas para o rastreamento dos agregados, nos fornecendo os perfis de comportamento fluidodinâmico dos particulados, com seus respectivos diâmetros que abrange a faixa de 100 a 5 μm . As corridas em todos os cenários apresentaram perfis bastante semelhantes, por isso são apresentados apenas os perfis das corridas para o cenário 1.

As corridas com agregados de diâmetros, na primeira subfaixa, entre 100 a 85 μm apresentaram perfis semelhantes. Podemos observar uma tendência de curta trajetória para o topo

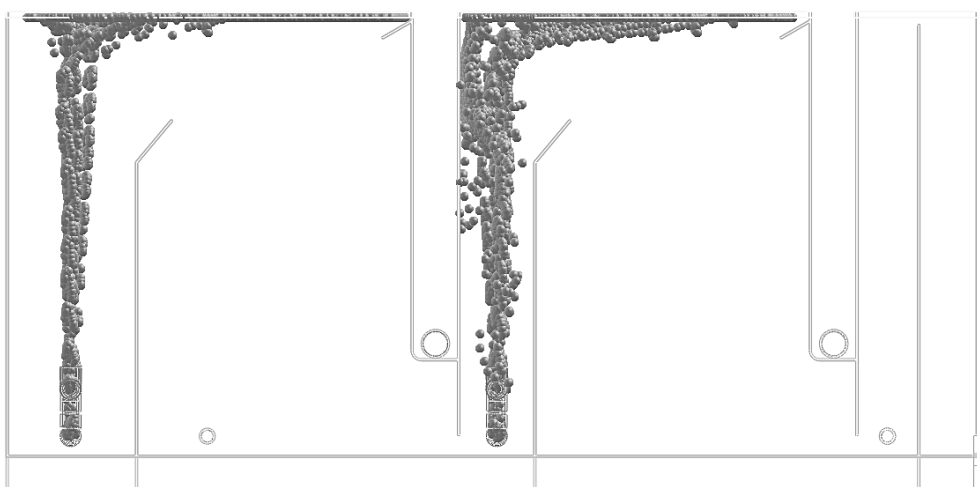
do equipamento, com mínimo de dispersão de particulados nas câmaras do FPSI-SI. Conforme as Figuras 44 a 47.

Figura 44 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 100 μm de diâmetro no momento 10800 s



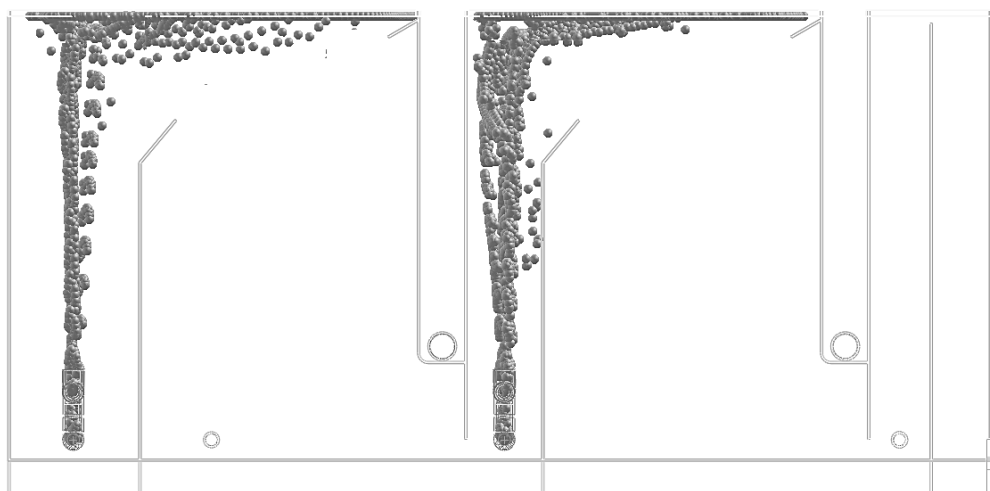
Fonte: Autor (2021)

Figura 45 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 100 μm de diâmetro no momento 21600 s



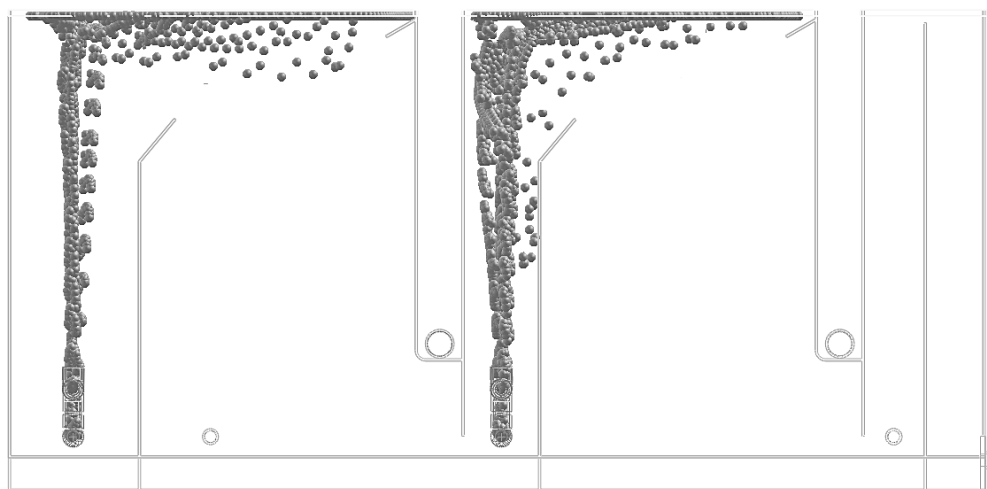
Fonte: Autor (2021)

Figura 46 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 85 μm de diâmetro no momento 10800 s



Fonte: Autor (2021)

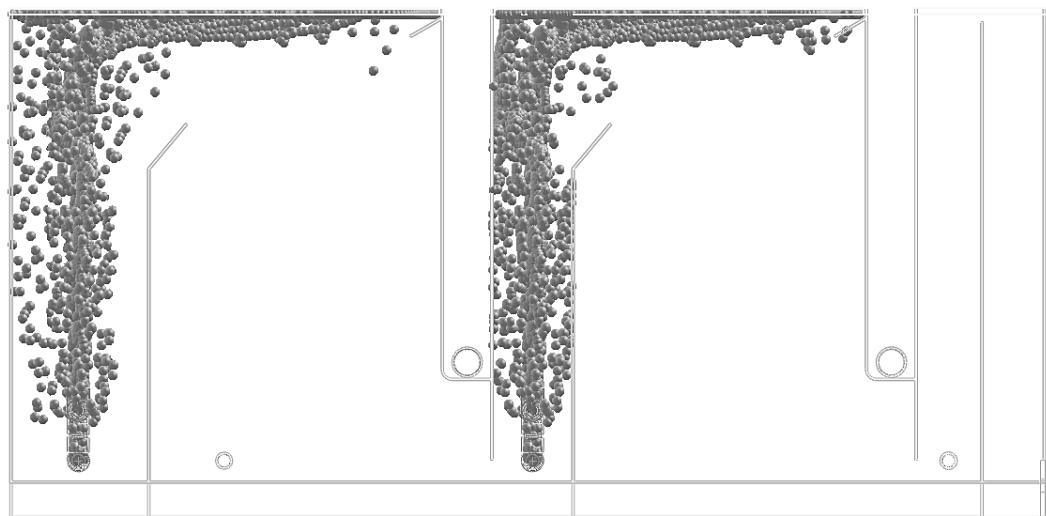
Figura 47 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 85 μm de diâmetro no momento 21600 s



Fonte: Autor (2021)

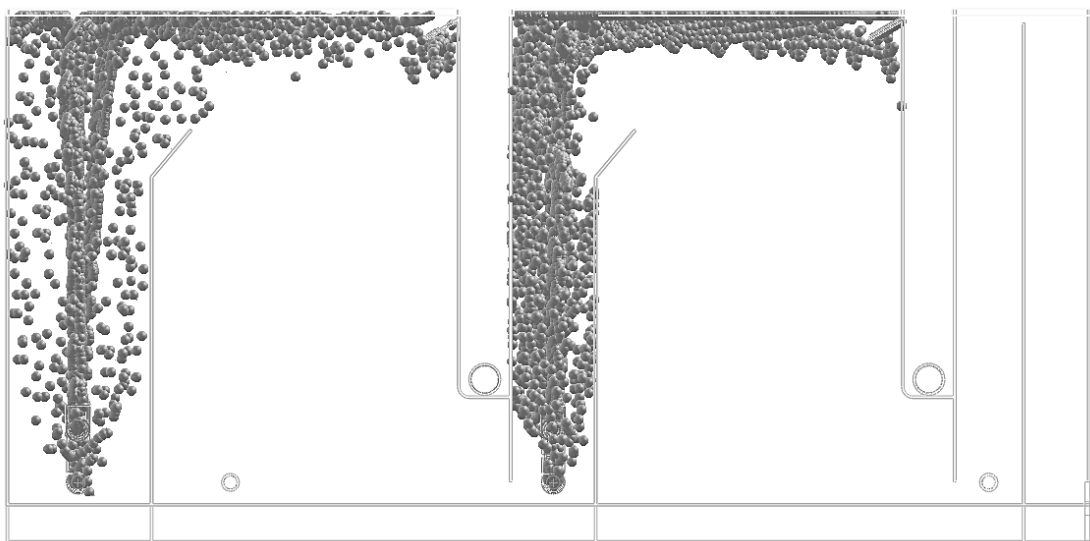
As corridas com particulados de diâmetros na segunda subfaixa entre 80 a 40 μm apresentaram perfis equivalentes com mínimas alterações, mas, aumento da tendência dos agregados dispersarem por maior parte do sistema. A distribuição de particulados no fluxo se localiza principalmente no topo do sistema, com alguns agregados descrevendo uma sutil trajetória em direção a saída 1, como mostrado pelas Figura 48 a 51.

Figura 48 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 80 μm de diâmetro no momento 10800 s



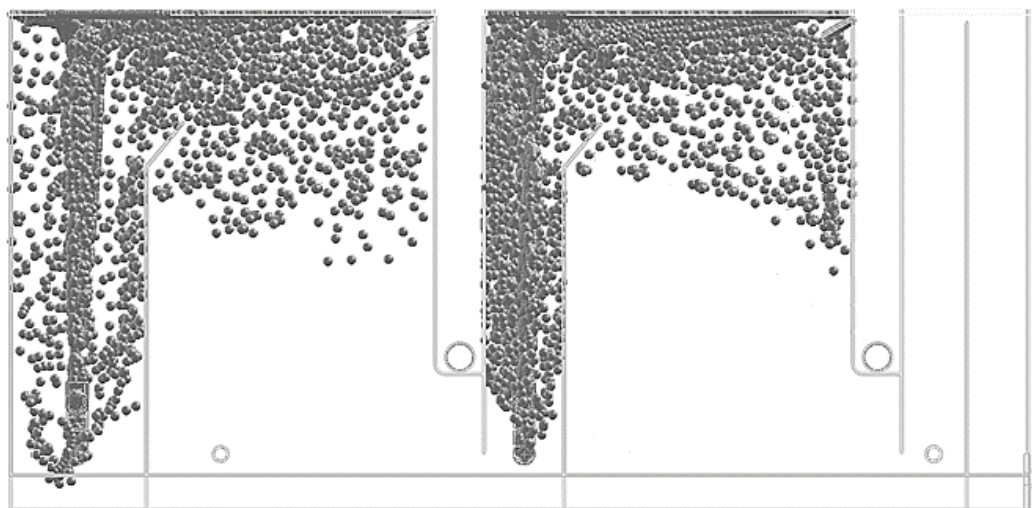
Fonte: Autor (2021)

Figura 49 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 80 μm de diâmetro no momento 21600 s



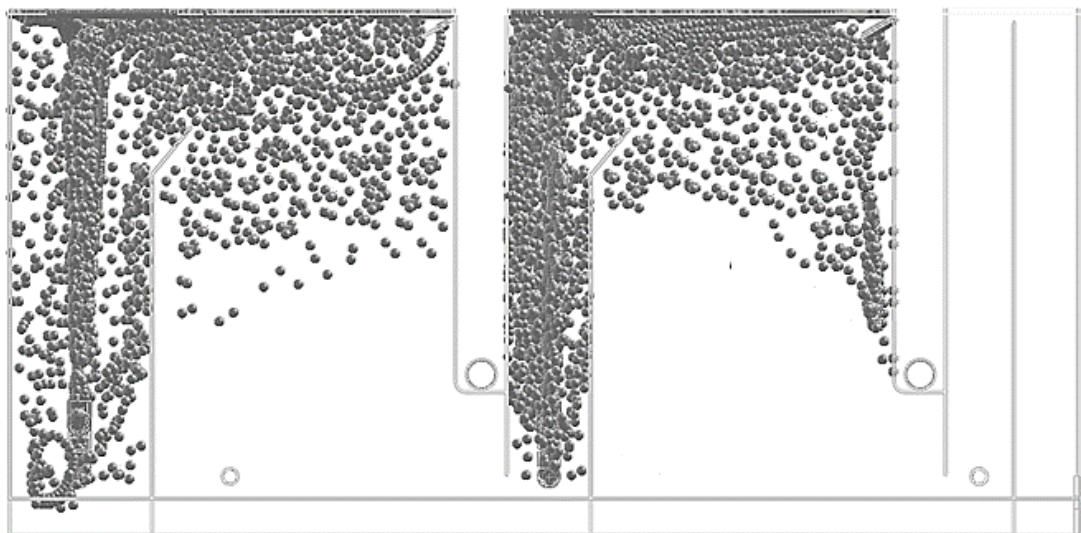
Fonte: Autor (2021)

Figura 50 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 40 μm de diâmetro no momento 10800 s



Fonte: Autor (2021)

Figura 51 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 40 μm de diâmetro no momento 21600 s

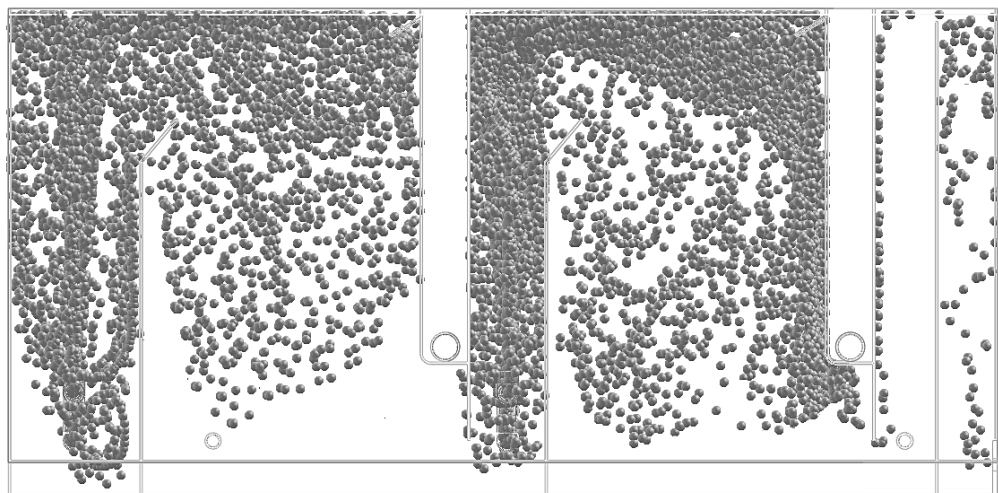


Fonte: Autor (2021)

Os resultados das simulações para os diâmetros na terceira subfaixa a partir 35 μm , apresentaram elevado grau de dispersão dos agregados e alta possibilidade de arrasto dos particulados pelo fluxo, com agregados sendo direcionados para as saídas 1 e 2. De acordo com a visualização trazida pelas Figuras 52 e 53. Destacaram-se, nesta subfaixa de agregados, aqueles com diâmetros na casa 5 μm , que difundiu por completo, tanto nas câmaras 1 e 2 do FPSI-SI,

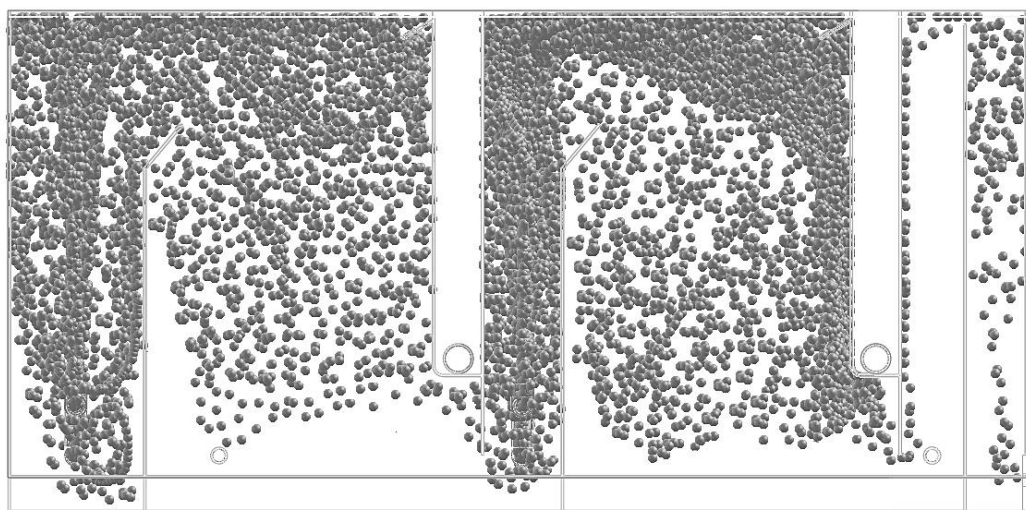
quanto pela região próxima do vertedouro, atingido assim a saída do sistema, conforme Figuras 54 e 55.

Figura 52 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 35 μm de diâmetro no momento 10800 s



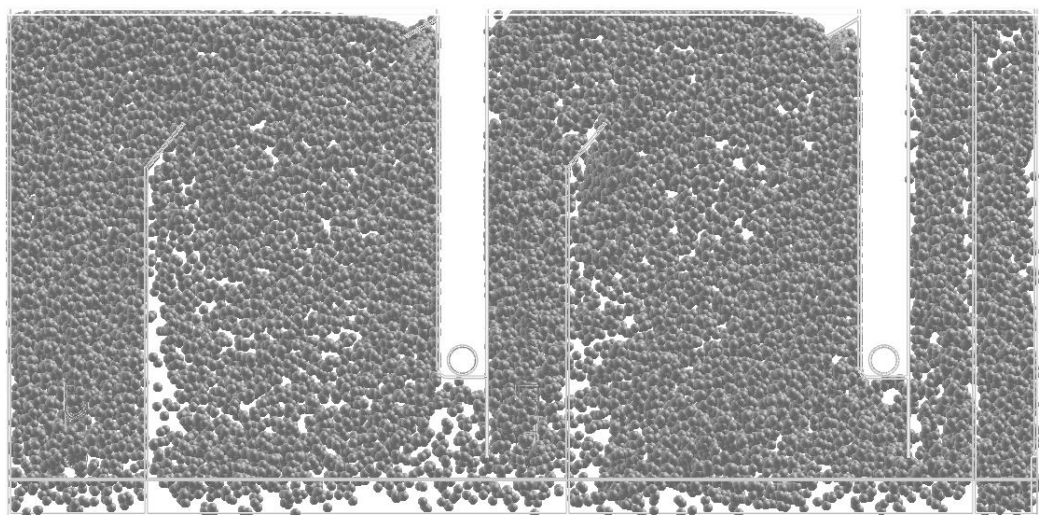
Fonte: Autor (2021)

Figura 53 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 35 μm de diâmetro no momento 21600 s



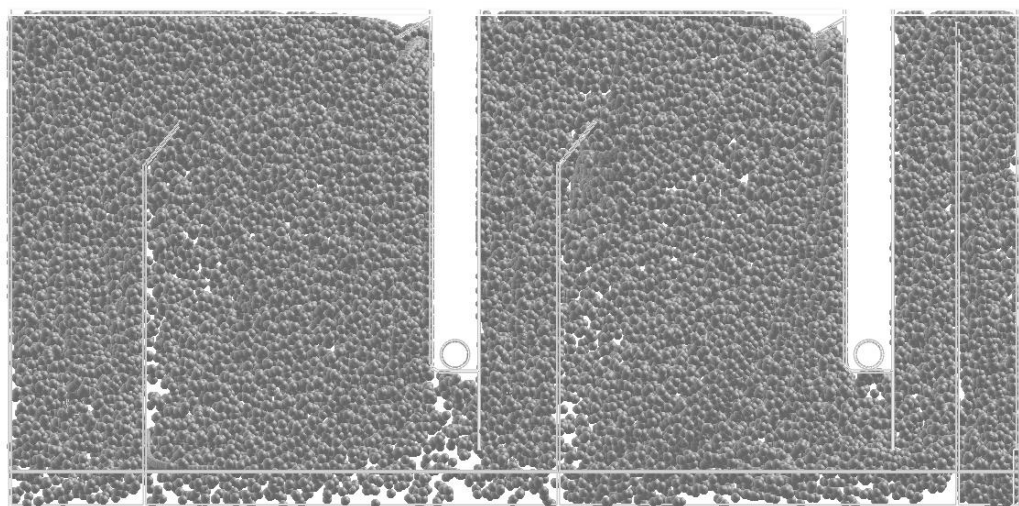
Fonte: Autor (2021)

Figura 54 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 5 μm de diâmetro no momento 10800 s



Fonte: Autor (2021)

Figura 55 - Perfil fluidodinâmico do plano XY para agregados de 5 μm de diâmetro no momento 21600 s



Fonte: Autor (2021)

4.4 VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO

As simulações realizadas para os seis cenários, com duração de 10800 s e 21600 s, foram nomeadas de S1 e S2, respectivamente. Estas, tiveram seus resultados gráficos comparados com os dados obtidos experimentalmente no FPSI-SI, conforme trazido pela Figura 56.

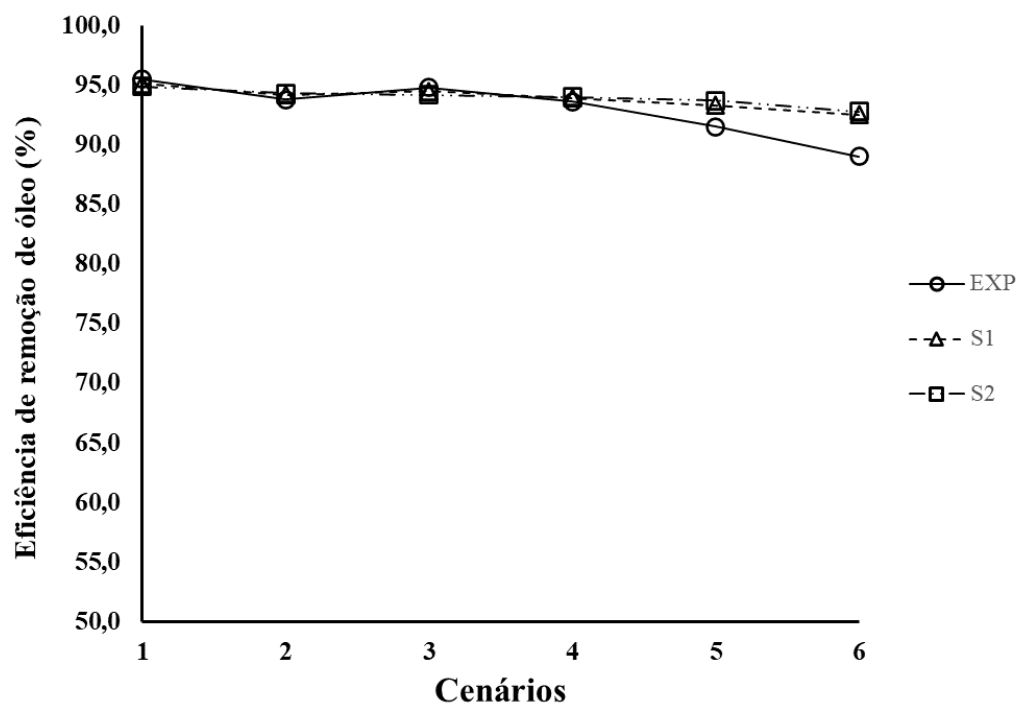
Observamos nos cenários de 1 a 4, uma boa convergência entre os dados experimentais e simulados. Ao comparamos S1 e S2, também verificamos concordância entre si. Os cenários 5 e 6, apresentaram distanciamento entre os dados obtidos em S1 e S2, quando comparados aos dados experimentais.

A diferença observada nos resultados para os últimos cenários, foi proveniente de uma possível diluição no sistema. Esta diferença converge com o observado na pesquisa desenvolvida por Al-Dulaimi e Al-Yaqoobi (2021) sobre separação óleo em água, utilizando sistema de flotação a ar. Os autores constataram redução na eficiência do sistema para remoção do componente oleoso, quando este apresentava-se em teor reduzido na alimentação do processo.

Com isso, a referida diluição promovida pelo fluxo de reciclo, acarretou um baixo número de gotículas oleosas, minimizando a coalescência entre si e a captura por microbolhas presentes no sistema. Por sua vez, Shen *et al.* (2022), nos esclarecem acerca da diluição, quando afirmam que a redução da remoção oleosa, pode ser devido a diminuição da probabilidade de colisão e captura de gotículas de óleo na emulsão por bolhas de gás. Isto nos inclina a acreditar que minúsculas esferas oleosas, atingiram o final do equipamento em considerável quantidade, provocando uma redução da eficiência do sistema, menor do que as observadas nos dados simulados.

Apesar da vazão de reciclo ocasionar a diluição do sistema, e por sua vez, o afastamento dos valores obtidos nas simulações, em relação aos aferidos experimentalmente, podemos inferir que o modelo proposto foi validado. Pois, ao inspecionarmos a variação percentual entre os valores nos cenários (experimental e simulado) verificamos que esta não ultrapassa 5%. O que nos leva a considerar esta discrepância como irrelevante.

Figura 56 - Comparativo entre as eficiências de remoção de óleo obtidas via simulações com tempos 10800 s (S1) e 21600 s (S2) em relação aos dados experimentais (EXP) coletados



Fonte: Autor (2021)

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

5.1 CONCLUSÕES

Objetivando avaliar e investigar o processo de Flotação por Pré-Saturação Induzida em uma unidade Semi-industrial (FPSI-SI), o presente trabalho desenvolveu estudos na área de fluidodinâmica computacional, buscando oferecer resultados deste processo de separação água-óleo por meio do *software Flow Simulation/Solidwork*.

Desta maneira, concluímos:

- As etapas básicas para a separação água-óleo em flotadores, neste caso o FPSI-SI, inclui a colisão/nucleação, adesão e encapsulamento da bolha pela gotícula de óleo. Estas etapas têm como elemento chave e resultante, a taxa de formação de agregados oleosos flotáveis e estáveis. Estes particulados, tidos como alvo, são capazes de tolerar o arrasto e a turbulência do fluido no sistema. Além disso, sua maior ou menor presença, está intimamente ligada à variação da eficiência de remoção no processo de flotação.
- O modelo virtual construído, teve a malha elaborada pelo mecanismo de refinamento automático presente no *software*. O refino da malha foi observado em elevado grau de ajuste, nos locais com estreitamento entre paredes, onde a velocidade do fluido, no centro nesta região, seria mais rápida. Contudo, na região onde o fluido poderia apresentar uma turbulência de caráter laminar, o uso do refinamento foi minimizado;
- A estratégia de adaptar os modelos fluidodinâmicos, disponíveis no *Flow Simulation/Solidwork*, para simular duas etapas um fluido pseudo-homogêneo composto de agregados estáveis com diâmetros variados, para uma análise multifásica, mostrou-se satisfatória. Visto que, os resultados virtuais obtiveram boa adequação com os dados experimentais, em conformidade com a literatura pesquisada. Além disso, o *software* apresentou bom desempenho dentro dos critérios estabelecidos neste trabalho, como fidedignidade entre dados e baixo custo computacional ao simular o processo no FPSI.

- Os resultados simulados, validados pelo acervo literário consultado, apresentaram adequada configuração com relação aos experimentais, na modelagem do FPSI-SI, com alta carga oleosa, como vistos nos cenários 1, 2, 3 e 4. Embora, em alguns cenários, com elevada diluição no sistema (5 e 6), foi possível observar o distanciamento entre os dados obtidos, de forma virtual e experimental. No entanto, este distanciamento é reduzido quando comparado com a escala semi-industrial utilizada. Contudo, os cenários 1, 2 e 3 demonstraram as melhores condições operacionais, uma vez que, apresentaram melhor eficiência de remoção, convergência dos dados virtuais e resultados experimentais, respaldados pela literatura;

- As simulações nos direcionaram a acreditar que a faixa de agregado estável, em sua maioria, formado no FPSI-SI, está entre 80 a 40 μm de diâmetro. Pois, não foi evidenciado geração de espuma oleosa na região do vertedouro nos testes de campo. Para agregados, com diâmetro igual ou superior a 85 μm , a eficiência atingiria um patamar de 100% de remoção, algo não verificado nos ensaios experimentais. Porém, não foi desconsiderada a presença de alguns agregados, deste subfaixa de particulados no sistema FPSI-SI, contudo, acreditamos que em proporção menor do que a segunda subfaixa de agregados.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões são inseridas a seguir para dar segmento aos trabalhos de pesquisa iniciados nessa tese de doutorado, com o objetivo melhorias do processo flotação por pré-saturação induzida:

- Simular toda a planta do FPSI-SI, incluindo bombas existentes no processo e a câmara de equalização de efluente;
- Realizar modelagem do sistema com o uso do modelo fluidodinâmico não-homogêneo;
- Investigar numericamente a interação intrínseca entre microbolhas de ar e gotículas de óleo no interior da bomba multiestágio (geradora de microbolhas), para a formação de agregados estáveis;
- Utilizar sistemas de medição, para aferição dos diâmetros de microbolhas geradas em diferentes pontos do sistema FPSI-SI.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT - NBR 13348/1995. **Banho residual de efluente líquido – Determinação do teor de óleos e graxas totais, minerais e vegetais**. Rio de Janeiro/RJ. 1995
- AHMADI, S.; SEFIDVASH, F. Study of pressure drop in fixed bed reactor using a Computational Fluid Dynamics (CFD) code. **ChemEngineering**, v. 2, n. 2, p. 14, 2018. DOI: 10.3390/CHEMENGINEERING2020014
- AL-BAGHDADI, M.A.S.; NOOR, Z.M.H.; ZEINY, A.; BURNS, A.; WEN, D. CFD analysis of a nanofluid-based microchannel heat sink. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 20, p. 100685, 2020. ISSN: 2451-9049. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100685
- AL-DULAIMI, S.L.; AL-YAQOOBI, A.M. **Separation of oil/water emulsions by microbubble air flotation**. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2021. p. 012030. DOI: 10.1088/1757-899X/1076/1/012030
- AN, C.; HUANG, G.; YAO, Y.; ZHAO, S. Emerging usage of electroagulation technology for oil removal from wastewater: A review. **Science of the Total Environment**, v. 579, p. 537-556, 2017. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.062
- ANAND, V.; PATEL, R.; NAIK, V.M.; JUVEKAR, V.A.; THAOKAR, R.M. Modelling and particle based simulation of electro-coalescence of a water-in-oil emulsion. **Computers and Chemical Engineering**, v. 121, p. 608-617, 2019. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2018.12.003
- AMATO, T.; PARK, K.S.; YIM, W.; KIM, T. SWRO pre-treatment design and operation using Enflo-DAF™ technology. **Water Practice and Technology**, v. 7, n. 4, 2012. DOI: 10.2166/wpt.2012.070
- BAMBERGER, J. A.; PEASE, L. F.; RECKNAGLE, K. P.; ENDERLIN, C. W.; MINETTE, M. J. Using Experimental Fluid Dynamics and Computational Fluid Dynamics for Evaluating Periodic Mixing. In: **ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition**. American Society of Mechanical Engineers, 2018. p. V007T09A017. DOI: 10.1115/IMECE2018-88531
- BEHIN, J.; BAHRAMI, S. Modeling an industrial dissolved air flotation tank used for separating oil from wastewater. **Chemical Engineering and Processing.: Process Intensification**, v. 59. p. 1-8, 2012. DOI: 10.1016/j.cep.2012.05.004
- BHUTANI, G.; PARADA, P.R.B.B. A Framework for polydisperse pulp phase modelling in flotation, **Separation and Purification Technology**, v. 236, p. 116252, 2020. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.116252
- BONDELIND, M.; SASIC, S.; KOSTOGLU, M.; BERGDAHL, L.; PETTERSSON, T.J.R. Single and two-phase numerical models of dissolved air flotation: comparison of 2D and 3D

simulations, **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 365, p. 137-144, 2010a. ISSN: 0927-7757. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2010.02.035

BONDELIND, M.; SASIC, S.; PETTERSSON, T.J.R.; KARAPANTSIOS, T.D.; KOSTOGLU, M.; BERGDAHL, L. Setting up a numerical model of a daf tank: turbulence, geometry, and bubble size. **Journal Environmental Engineering**, v. 136, n. 12, p. 1424-1434, 2010b. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000275

BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA)**, Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, p. 2548-2549, Resolução no 001, de 23 de janeiro de 1986

BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA)**, Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, p.58-63, Resolução no 357, de 17 de março de 2005

BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA)**, Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, p.89, Resolução N° 430, de 13 de maio de 2011

BRASILEIRO, P. P. F.; LUNA, J. M. ; SARUBBO, L. A. ; ROQUE, B. A. C. ; RUFINO, R. D. ; SANTOS, V. A. The oil cage: Arduino, biosurfactant, and CCRD. **Chemical Engineering Transactions**, v. 57, p. 367-372, 2017. ISBN 978-88-95608-48-8; ISSN 2283-9216. DOI: 10.3303/CET1757062

BUFFO, A.; MARCHISIO, D.L.; VANNI, M.; RENZE, P. Simulation of polydisperse multiphase systems using population balances and example application to bubbly flows. **Chemical Engineering and Research and Design**, v. 9, n. 1, p. 1859-1875, 2013. DOI: 10.1016/j.cherd.2013.06.021

CAI, X.; CHEN, J.; LIU, M.; JI, Y.; DING, G.; ZHANG, L. CFD simulation of oil–water separation characteristics in a compact flotation unit by population balance modeling. **Journal of Dispersion Science and Technology**, v. 38, n. 10, p. 1435-1447, 2017. DOI: 10.1080/01932691.2016.1251323

CAI, X.; CHEN, J.; JI, Y.; LIU, M.; LIU, W. Structural optimization and performance prediction of a compact flotation unit using GA-BP neural network with computational fluid dynamics simulation. **Environmental Engineering Science**, v. 36, n. 9, p. 1185-1198, 2019. DOI: 10.1089/ees.2018.0327

CHAWALOESPHONSIYA, N.; WONGWAILIKHIT, K.; SARET, P.; PAINMANAKUL, P. Stabilized Oily-Emulsion Separation Using Modified Induced Air Flotation (MIAF): Factor Analysis and Mathematical Modeling. **Engineering Journal**, v. 23, n. 5, p. 29–42, 2019. DOI: 10.4186/ej.2019.23.5.29

CHEN, A.; WANG, Z.; YANG, J. Influence of bubble size on the fluid dynamic behavior of a DAF tank: a 3D numerical investigation. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 495, p. 200-207, 2016. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2015.10.039

CIOFALO, M. Rans Models. In: *Thermofluid Dynamics of Turbulent Flows*. [s.l.] **Springer**, 2022. p. 65–93. ISBN: 978-3-030-81078-8

CRITTENDEN, J.C.; TRUSSELL, R.R.; HAND, D.W.; HOWE, K.J.; TCHOBANOGLOUS, G. **Stantec's water treatment: principles and design**, ed. 3, Wiley, Hoboken, N.J., 2022.

DAS, T.; JÄSCHKE, J. Simplified first-principles model of a compact flotation unit for use in optimization and control. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 58, n. 3, p. 1273-1285, 2018. DOI: 10.1021/acs.iecr.8b04018

DENG, B.; DING, Q.; GE, D. Three dimensional Eulerian-Eulerian simulation on hydrodynamics in dissolved air flotation tank with different turbulence models. **Water Science & technology**, v. 76, n. 2, p. 425-433, 2017. DOI: 10.2166/wst.2017.178

DUDEK, M.; VIK, E.A.; AANESSEN, S.V.; ØYE, G. Colloid chemistry and experimental techniques for understanding fundamental behaviour of produced water in oil and gas production. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 276, p. 102105, 2020. DOI: 10.1016/j.cis.2020.102105

DUDEK, M.; ØYE, G. Microfluidic study on the attachment of crude oil droplets to gas bubbles. **Energy & Fuels**, v. 32, n. 10, p. 10513–10521, 2018

EDZWALD, J.K. Dissolved air flotation and me. **Water Research**, v. 44, p. 2077-2106, 2010. DOI: 10.1016/j.watres.2009.12.040

EDZWALD, J.K., HAARHOFF, J. **Dissolved air flotation for water clarification**. McGraw-Hill, 384p., 2012. ISBN 9780071745628

ETCHEPARE, R.; OLIVEIRA, H.; AZEVEDO, A.; RUBIO, J. Separation of emulsified crude oil in saline water by dissolved air flotation with micro and nanobubbles. **Separation and Purification Technology**, v. 186, p. 326-332, 2017. DOI: 10.1016/j.seppur.2017.06.003

FERNÁNDEZ, D.A.R.; TAPIA, L.R. Water scarcity reduces the efficiency of the manufacturing industry in the valley of Mexico Basin:DEA-based two-stage efficiency analysis. **Applied Economics Letters**, p. 1-6, 2021. DOI: 10.1080/13504851.2021.1918623

FONSECA, R.R.; THOMPSON, J.P.JR.; FRANCO, I. C.; SILVA, F.V.S. Uutomation and control of a dissolved air flotation pilot plant. **Preprint of the 20th World Congress the International Federation of Automatic Control Toulouse**, France, p. 3972-3977, 2017

FANAIE, V. R.; KHIADANI, M.; AYRES, T. Effects of internal geometry on hydrodynamics of dissolved air flotation (DAF) tank: An experimental study using particle image velocimetry

(PIV). **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 575, p. 382-390, 2019. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.05.027

FRANZOL, A.; RESENDE, M.C. Estabilidade de emulsões: um estudo de caso envolvendo emulsionantes aniônico, catiônico e não-iônico, **Polímeros**, São Carlos/SP, v. 25, n. spe., 2015. ISSN: 0104-1428, ISSN: 1678-5169. DOI: 10.1590/0104-1428.1669

GASPAROVIC, S.L.M.; EYNG, E.; FRARE, L.M.; SABBI, L.B.C. Dimensionamento e avaliação da viabilidade técnica e mecânica de uma coluna de absorção para purificação de biogas. **Revista Gestão Industrial**, v. 14, n.1, p. 180-197, 2018. ISSN 1808-0448. DOI: 10.3895/gi.v14n1.5964

GHARAI, M.; VENUGOPAL, R. Modeling of flotation process-An overview of different approaches. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, v. 37, n. 2, p. 120-133, 2016. DOI: 10.1080/08827508.2015.1115991

GHATAURAY, T.S.; INGRAM, J.M.; HOLBORN, P.G. A comparison study into low leak rate buoyant gas dispersion in a small fuel cell enclosure using plain and louvre vent passive ventilation schemes. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 17, p. 8904–8913, 2019

GOH, P.S.; LEE, W.J. Zwitterion embedded thin film composite membrane for oily wastewater treatment. **International Journal of Engineering Transaction B: Applications**, v. 31, n. 8, p. 1464-1472, 2018. www.ije.ir/Vol31/No8/B/39-2805.pdf

GOPALRATNAM, V.C.; BENNETT, G.F.; PETERS, R. The simultaneous removal of oil and heavy metals from industrial wastewater by joint precipitation and air flotation. **Environmental Progress**, v. 7, n. 2, p. 84-92, 1988. DOI: 10.1002/ep.3300070208

HAAG, J.; GENTRIC, C.; LEMAITRE, C.; LECLERC, J-P. Modelling of chemical reactors: from systemic approach to compartmental modelling. **International Journal of Chemical Reactor Engineering**, 2018. DOI: 10.1515/ijcre-2017-0172

HAARHOFF, J.; EDZWALD, J.K. Dissolved air flotation modelling: insights and shortcomings. **Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua**, v. 53, n. 3, p. 127–150, 2004. DOI: 10.2166/aqua.2004.0012

HAARHOFF, J.; EDZWALD, J.K. Adapting dissolved air flotation for the clarification of seawater. **Desalination**, v. 311, p. 90–94, 2013. DOI: 10.1016/j.desal.2012.10.035

HAIRANI, A.; LEGONO, D.; RAHARDJO, A.P. **Study on Hydraulic Flow in Stratified Pipe Performed by Numerical Simulation**. Applied Mechanics and Materials. **Anais...Trans Tech Publ**, 2018. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.881.3

HAMI, K. Turbulence modeling a review for different used methods. **International Journal of Heat and Technology**, v. 39, n. 1, p. 227-234, 2021. DOI:10.18280/ijht.390125

HENAUTH, R.C.S.; VASCONCELOS, R.S.; MOURA, A.E.; SARUBBO, L.A.; SANTOS, V.A. Produção de microbolhas para a flotação por ar induzido. In: **Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ 2014**, Santa Catarina/SC. Blucher Chemical Engineering Proceedings, v.1, n.2, São Paulo: Blucher, 2015. DOI: 10.5151/chemeng-cobeq2014-1281-20108-147896

HENAUTH, R.C.S.; VASCONCELOS, R.S.; MOURA, A.E.; SARUBBO, L.A.; SANTOS, V.A. Microbubble generation with the aid of a centrifugal pump, **Chemical Engineering & Technology**, v. 40, n. 1, p. 138-144, 2017. DOI: 10.1002/ceat.201500301

HENDERSON, C.B. **Drag coefficients of spheres in continuum and rarefied flows**. AIAA journal, v. 14, n. 6, p. 707-708, 1976. DOI: 10.2514/3.61409

HIRCHE, D.; BIRKHOLZ, F.; HINRICHSSEN, O. A hybrid Eulerian-Eulerian-Lagrangian model for gas-solid simulations. **Chemical Engineering Journal**, v. 377, p. 119743, 2019. DOI: 10.1016/j.cej.2018.08.129

HJERTAGER, B.H. Multi-fluid CFD analysis in Process Engineering. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2017. p. 012010. DOI: 10.1088/1757-899X/276/1/012010

HOAR, T.P.; SHULMAN, J.H. Transparent water-in-oil dispersions: the oleopathic hydro-micelle. **Nature – International Journal of Science**, v. 152, p. 102-103, 1943

HOMEDE, E.; ZIGELMAN, A.; ABEZGAUZ, L.; MANOR, O. Signatures of Van Der Waals and electrostatic forces in the deposition of nanoparticle assemblies. **Journal of Physical Chemistry Letters**, v. 9, n. 18, p. 5226-5232, 2018. DOI: 10.1021/acs.jpclett.8b02052

HOPF, A. Simulation of airflow within horticulture high-tunnel greenhouses using open-source CFD software. **Bachelor dissertation, Hochschule Geisenheim University**, Moritzburg Germany, 2018. DOI: 10.13140/RG.2.2.12070.57923

HUANG, Q.; LONG, X. Analysis of the influencing factors on oil removal efficiency in large-scale flotation tanks: Experimental observation and numerical simulation. **Energies**, v. 13, n. 4, p. 927, 2020. DOI: 10.3390/en13040927

JIMÉNEZ, M.; MICÓ, M.; ARNOLDOS, M.; FERRERO, E.; MALFEITO, J.; MEDINA, F.; CONTRETAS, S. Integrated processes for produced water polishing: enhanced flotation/sedimentation combined with advanced oxidation processes. **Chemosphere**, v. 168, p. 309-317, 2017. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.10.055

KIM, H.; PARTHASARATHY, N.; CHOI, Y. H.; LEE, Y. W. Reduction of sloshing effects in a rectangular tank through an air-trapping mechanism—a numerical study. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 32, n. 3, p. 1049-1056, 2018. DOI: 10.1007/s12206-018-0206-9

LAK, B.; AZADI, A.; FIROOZABADI, B.; AFSHIN, H. Evaluation of the Effects of Inlet Conditions on Particle-Laden Flows in Secondary Sedimentation Tanks. **Journal of**

Environmental Engineering, v. 146, n. 3, p. 04020004, 2020 DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001663

LAKGHOMI, B.; LAWRYSHYN, Y.; HOFMANN, R. A model of particle removal in a dissolved air flotation tank: Importance of stratified flow and bubble size. **water research**, v. 6, n. 8, p. 262-272, 2015. DOI: 10.1016/j.watres.2014.09.053

LAKGHOMI, B.; LAWRYSHYN, Y.; HOFMANN, R. Evaluation of flow hydrodynamics in a pilot-scale dissolved air flotation tank: A comparison between CFD and experimental measurements. **Water Science and Technology**, v. 72, n. 7, p. 1111-1118, 2015. DOI: 10.2166/wst.2015.321

LAM, C.K.G.; BREMHORST, K. A modified form of the k- ϵ model for predicting wall turbulence. **Journal of Fluids Engineering**. V. 103, n. 3, p. 456-460, 1981 DOI: 10.1115/1.3240815

LAUNDER, B.E.; SPALDING, D.B. The numerical computation of turbulent flows. In: **Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion**. Pergamon, 1974. p. 96-116. DOI: 10.1016/B978-0-08-030937-8.50016-7

LEE, J-G.; KIM, Y-J. Performance evaluation of cleaning energy of an induced gas flotation machine using multiple-size-group (musig) model. **Energy Procedia**, v. 142, p. 3460-3467, 2017. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.230

LEE, K.H.; KIM, H.; KUK, J.W.; CHUNG, J.D.; PARK, S.; KWON, E.E. Micro-bubble flow simulation of the dissolved air flotation process for water treatment using computational fluid dynamics. **Environmental Pollution**, In Press, 2019. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.01.011

LINS, J.M.; SANTOS, L.B.; SANTOS, V.A.; SARUBBO, L.A. Industrial reuse of water from chemical washing of residual frying oil. **Chemical Engineering Transaction**, v. 57, p.523-528, 2017. ISBN 978-88-95608- 48-8, ISSN 2283-9216. DOI: 10.3303/CET1757088

LINS, I. X.; LIMA FILHO, H. J. B.; DOS SANTOS, V. A.; PEREIRA, J. C. S.; MAK, J.; VIEIRA, C. W. Hydrodynamic study of the oil flow in a protective relay coupled to a power transformer: CFD simulation and experimental validation. **Engineering Failure Analysis**, v. 128, p. 105599, 2021. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105599

LOU, S.; ZHAO, G.; WANG, R.; WU, X. Modeling of aluminium alloy profile extrusion process using finite volume method. **Journal of Material Processing Technology**, v. 206, p. 481-490, 2008. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.12.084

LOURENÇO, A.S. **Development of novel flocculants to treat oily waters using health-friendly processes**. PhD Thesis in Chemical Engineering, Faculty of Sciences and Technology of the University of Coimbra, 2018

FILHO, A.A.P.S.; CHAPRÃO, M.C.; CAMPELO FILHO, A.A.P.; BRASILEIRO, P.P.F.; ARAÚJO, G.P.; SANTOS, L.B.; RUFINO, R.D.; SANTOS, V.A.; SOARES da SILVA, R.C.F.; SARUBBO, L.A. Application of a Biosurfactant as a Collector in Flotation Chamber with

Induced Pre-saturation in Bench Scale for Oil Water Treatment. **Chemical Engineering Transactions**, v. 86, p. 979–984, 2021. DOI: 10.3303/CET2186164

MAELUM, M.; RABE, K. **Improving oil separation from produced water using new compact flotation unit design**. In: SPE Production and Operations Symposium. OnePetro, 2015. DOI: 10.2118/173589-MS

MALISKA, C.R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**, Rio de Janeiro, LTC, S.A., ed. 2, 2004

MARTÍN-RODRÍGUEZ, M.; PATROCINIO, A.S.; RODRÍGUEZ-GONZÁLVES, P.; MARTÍN, J.R.S. **Short simulation activity to improve the competences in the fluid-mechanical Engineering classroom using Solidworks Flow Simulation**, TEEM'19: Proceedings of the Seventh International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality, León-Spain, p. 72-79, 2019. DOI: 10.1145/3362789.3362809

MICHELASSI, V. Turbomachinery research and design: The role of DNS and LES in industry. In: **Progress in Hybrid RANS-LES Modelling**. Springer, Cham, 2020. p. 55-69. DOI: 10.1007/978-3-030-27607-2_4

NAKHAEI, M.; LU, B.; TIAN, Y.; WANG, W.; DAM-JOHANSEN, K.; WU, H. CFD Modeling of gas–solid cyclone separators at ambient and elevated temperatures. **Processes**, v. 8, n. 2, p. 228, 2020. DOI: 10.3390/pr8020228

NASCIMENTO, R.S. **Desenvolvimento de uma metodologia de determinação da velocidade de raspadores de espuma em células de flotação por ar**. Dissertação de Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais – Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), 60p., 2019

OGEMDI, I.K. Properties and uses of colloids: a review. **Colloid and Surface Science**, v. 4, n. 2, p. 24, 2019. DOI: 10.11648/j.css.20190402.12

OLIVEIRA, C.; RUBIO, J. Zeta potential of single and polymer-coated microbubbles used an adapted microelectrophoresis technique. **International Journal of Mineral Processing**, v. 98, p. 118-123, 2011. DOI: 10.1016/j.minpro.2010.10.006

OLIVEIRA, H.A.; AZEVEDO, A.C.; ETCHEPARE, R.; RUBIO, J. Separation of emulsified crude oil in saline water by flotation with micro and nanobubbles generated by a multiphase pump. **Water Science and Technology**, In Press, 2017. DOI: 10.2166/wst.2017.441

OVERBEEK, J.TH.G. Microemulsions: a field at the border between lyophobic and lyophilic colloids. **Faraday Discussions of the Chemical Society**, v. 65, p. 7-19, 1978. DOI: 10.1039/dc9786500007

PALANIANDY, P.; ADLAN, M.N.; AZIZ, H.A.; MURSHED, M.F.; HUNG, Y.T. Dissolved air flotation (DAF) for wastewater treatment. In: **Handbook of advanced industrial and**

hazardous wastes management. CRC Press, 2017. p. 657-694 DOI: 10.1201/9781315117423-20

PASHLEY, R.M.; KARAMAN, M. E. Applied colloid and surface chemistry. **John Wiley & Sons**, ed.2 2021. DOI: 10.1002/0470014709

PATEL, R.G.; DESJARDINS, O.; KONG, B.; CAPECELATRO, J.; FOX, R.O. Verification of Eulerian–Eulerian and Eulerian–Lagrangian simulations for turbulent fluid–particle flows. **AIChE Journal**, v. 63, n. 12, p. 5396-5412, 2017. DOI: 10.1002/aic.15949

PIAIA, J.C.Z. **Secagem da língua calabresa: experimentação e modelagem 3D aplicadas a fornos industriais.** Tese de Doutorado em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 127p., 2009

PICCIOLI, M.; AANESEN, S.V.; ZHAO, H.; DUDEK, M.; ØYE, G. Gas Flotation of petroleum produced water: a review on status, fundamental aspects, and perspectives. **Energy & Fuels**, v. 34, n. 12, p. 15579-15592, 2020. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c03262

PINTOR, A.M.A.; VILAR, V.J.P.; BOTELHO, C.M.S.; BOAVENTURA, R.A.R. Optimization of a primary gravity separation treatment for vegetable oil refinery wastewaters. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 16, n. 8, p. 1725-1734, 2016. DOI 10.1007/s10098-014-0754-3

PORTO, R.M. **Hidráulica Básica**, EESC-USP. São Carlos, 4ª edição, 2006

QARANI, C. A.; BARZANJY, M. J.; TALABANY, Z. J. Reducing oil pollution in Kawergosk oil refinery effluent. **Zanco Journal of Pure and Applied Sciences**, v. 32, n. 5, p. 26-35, 2020. DOI: 10.21271/ZJPAS.32.5.3

RADZUAN, M.R.A.; BELOPE, A-B.; THORPE, R. B. Removal of fine oil droplets from oil-in-water mixtures by dissolved air flotation. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 115, parte, A, p. 19-33, 2016. DOI: 10.1016/j.cherd.2016.09.013

RAJAK, V.K.; RELISH, K.K.; KUMAR, S.; MANDAL, A. mechanism and kinetics of separation of oil from oil-in-water emulsion by air flotation. **Petroleum Science and Technology**, v. 33, n. 23-24, p. 1861-1868, 2015. ISSN 1091-6466; e-ISSN 1532-2459. DOI: 10.1080/10916466.2015.1108987

RAMLAN, I.; DARLIS, N.; ISHAK, I. A.; KHALID, A.; ZAILANI, M. A. A Comparison between Solidworks and Ansys CFX Flow Simulation on Aerodynamic Studies. **Journal of Complex Flow**, v. 1, n. 2, 2019

RAMLAN, I.; DARLIS, N.; JET, L.J. Comparison between Solidworks and Ansys CFX Flow Simulation on Aerodynamic Studies. **Journal of Industry, Engineering and Inovation** , v. 2, n. 1, p. 1-9 de 2019

RAMLAN, I.; DARLIS, N. Comparison between Solidworks and Ansys Flow Simulation on Aerodynamic Studies. **Journal of Design for Sustainable and Environment**, v. 2, n. 2, 2020

RAVERA, F.; DZIZA, K.; SANTINI, E.; CRISTOFOLINI, L.; LIGGIERI, L. Emulsification and emulsion stability: The role of the interfacial properties. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 288, p. 102344, 2021. DOI: 10.1016/j.cis.2020.102344

REALI, M.A.P.; PATRIZZI, L.J. A The influence of the contact zone configuration on the performance of a DAF pilot plant applied to water treatment. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 16, n. 1, p. 186-192, 2016. DOI: 10.2166/ws.2015.127

REID, J.A.; MOLLICA, P.A.; JOHNSON, G.D.; OGLE, R.C.; BRUNO, R.D.; SACHS, P.C. Accessible bioprinting: adaptation of a low-cost 3D-printer for precise cell placement and stem cell differentiation. **Biofabrication**, v. 8, n. 2, p. 025017, 2016. DOI: 10.1088/1758-5090/8/2/025017

RHEE, C.H.; MARTYN, P.C.; KREMER, J.G. **Removal of oil and grease in oil processing wastewater**. Sanitation District of Los Angeles County, USA, 1989

ROBB, I.D. **Microemulsions**. ed. 1, New York: Plenum Press, 259p., 1982

ROCHA E SILVA, F.C.P.; ROCHA E SILVA, N.M.P.; SILVA, I.A.; BRASILEIRO, P.P.F.; LUNA, J.M.; RUFINO, R.D.; SANTOS, V.A.; SARUBBO, L.A. Oil removal efficiency forecast of a Dissolved Air Flotation (DAF) reduced scale prototype using the dimensionless number of Damköhler. **Journal of Water Process Engineering**, v. 26, 2018. DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.01.019

RODRIGUEZ, G.Y.; VALVERDE-RAMÍREZ, M.; MENDES, C.E.; BÉTTEGA, R. Global performance parameters for different pneumatic bioreactors operating with water and glycerol solution: Experimental data and CFD simulation. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, Springer, 13p., 2015. DOI: 10.1007/S00449-015-1446-z

RODRIGUES, J.P.; BÉTTEGA, R. Evaluation of multiphase CFD models for dissolved air flotation (DAF) process. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 539, p. 116-123, 2018. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2017.12.015

RODRIGUES, J.P.; BATISTA, J.N.M.; BÉTTEGA, R. Application of population balance equations and interaction models in CFD simulation of the bubble distribution in dissolved air flotation. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 577, p. 723-732, 2019. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.06.032

ROSLI, N.A.; MURSHED, M.F.; ADLAN, M.N. Experiment and computational fluid dynamics (cfd) simulation of flow characteristics in dissolved air flotation tank. **Malaysian Construction Research Journal**, v. 20, n. 3, p. 43-61, 2017

SANT'ANNA, M.C.S.; CRUZ, W.R.S.; SILVA, G.F.; MEDRONHO, R.A.; LUCENA, S. Analyzing the fluidization of a gas-sand-biomass mixture using CFD techniques. **Powder Technology**, v. 316, p. 367-372, 2017. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.12.023

SANTOS, L.B.; BRASILEIRO, P.P.F.; BALDO, R.D.; SARUBBO, L.A.; SANTOS, V.A. Oily water treatment in a multistage tower operated under a novel induced pre-saturation process in the presence of a biosurfactant as collector. **Biotechnology Reports**, v. 30, p. e00638, 2021. DOI: 10.1016/j.btre.2021.e00638

SARDINA, G.; JARETEG, K.; STRÖM, H.; SASIC, S. Assessing the ability of the Eulerian-Eulerian and the Eulerian-Lagrangian frameworks to capture meso-scale dynamics in bubbly flows. **Chemical engineering science**, v. 201, p. 58-73, 2019. DOI: 10.1016/j.ces.2019.02.022

SATHTHASIVAM, J.; LOGANATHAN, K.; SARP, S. An overview of oil-water separation using gas flotation systems. **Chemosphere**, v. 144, p. 671-680, 2016. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.08.087

SCHRAMM, L. **Emulsions, Foams and Suspensions**. Fundamentals and Applications. Wiley-VCH, 2006. ISBN 3-527-30743-5

SARMA, R.; SINGH, S; K. Simulating contaminant transport in unsaturated and saturated groundwater zones. *Water Environment Research*, v. 93, n. 9, p. 1496-1509, 2021. DOI: 10.1002/wer.1555

SHAMMAS, N.K.; BENNETT, G.F. **Principles of air flotation technology**. In: *Flotation Technology*. Humana Press, Totowa, New Jersey, USA. p. 1-47. 2010

SHAMMAS, N.K.; WANG, L.K. **Water engineering: hydraulics, distribution and treatment**. ed. 5, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA. 806p. 2016

SHARMA, T.G.; KUMAR, S.; CHON, B.H.; SANGWAI, J.S. Thermal stability of oil-in-water Pickering emulsion in the presence of nanoparticle, surfactant, and Polymer. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 22, p. 324-334, 2015. DOI: 10.1016/j.jiec.2014.07.026

SHEN, W.; MUKHERJEE, D.; KOIRALA, N.; HU G.; LEE, K.; ZHAO, M.; LI, J. Microbubble and nanobubble-based gas flotation for oily wastewater treatment: A review. **Environmental Reviews**, 2022. DOI: 10.1139/er-2021-0127

SIEMANN, L.A.; DAVIS, F.H.; BENDIKSEN, T.A.; SMOLOWITZ, R.J. Scallop dredge design using computational fluid dynamics and flume tank testing and the application of both methods to improving a low-profile dredge. **Fisheries Research**, v. 241, p. 105998, 2021. DOI: 10.1016/j.fishres.2021.105998

SILVA, F.C.P.R.; SILVA, N.M.P.R.; MOURA, A.E.; GALDINO, R.A.; LUNA, J.M.; RUFINO, R.D.; SANTOS, V.A.; SARUBBO, L.A. Effect of Biosurfactant Addition in a Pilot Scale

Dissolved Air Flotation System. **Separation Science and Technology**, v. 50, n. 4, p. 618-625, 2015. DOI: 10.1080 / 01496395.2014.957319

SINGH, R.L.; SINGH, R.P. Advances in biological treatment of industrial waste water and their recycling for a sustainable future. **Springer**, 376p., 2019. ISSN 2570-2165; e-ISSN 2570-2170; ISBN 978-981-13-1467-4; e-ISBN 978-981-13-1461-1. DOI: 10.1007/978-981-13-1468-1

SOBACHKIN, A.; DUMNOV, G. **Numerical basis of CAD-embedded CFD**. In: NAFEMS World Congress., p. 1-20, 2014

STEIN, E. Fundamentals: Introduction and survey. **Encyclopedia of Computational Mechanics**, Wiley online library, ed. 2, p. 1-14, 2017. DOI: 10.1002/9781119176817.ecm2001

STEINBACH, S.; HAARHOFF, J.J.W.S. A simplified method for assessing the saturation efficiency at full-scale dissolved air flotation plants. **Water Science and Technology**, v. 38, n. 6, p. 303-310, 1998. DOI: 10.1016/S0273-1223(98)00590-3

TAHERI, A. On the hydrodynamic effects of humpback whale's ventral pleats. **American Journal of Fluid Dynamics**, v. 8, n. 2, p. 47-62, 2018. DOI: 10.5923/j.ajfd.20180802.02

TAHERI, A. Hydrodynamic impacts of prominent longitudinal ridges on the 'whale shark' swimming. **Research in Zoology**, v. 10, n. 1, p. 18-30, 2020. DOI: 10.5923/j.zoology.20201001.03

TIERNEY, C.; BOUSSUGE, F.; ROBINSON, T.T.; NOLAN, D.; ARMSTRONG, C. Tolerant geometric extraction of fluid domains to assist CFD analyses of aero-engines. **Science Technology Forum**, 2019. DOI: 10.2514/6.2019-1720

UCHIDA, T.; LI, G. Comparison of RANS and LES in the prediction of airflow field over steep complex terrain. **Open Journal of Fluid Dynamics**, v. 8, n. 3, p. 286-307, 2018. DOI: 10.4236/ojfd.2018.83018

VARJANI, S.; JOSHI, R.; SRIVASTAVA, V. K.; NGO, H. H.; GUO, W. Treatment of wastewater from petroleum industry: current practices and perspectives. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 22, p. 27172-27180, 2020. DOI: 10.1007/s11356-019-04725-x

VASCONCELOS, R.S.; HENAUTH, R.C.S.; MOURA, A.E.; SANTOS, V.A.; SARUBBO, L.A. Strategy for a Scale-up Correlation in a Dissolved Air Flotation Chamber. **Chemical Engineering and Technology**. v. 38, n. 5, 745-955, 2015. DOI: 10.1002/ceat.201400665

VASCONCELOS, R.S.; HENAUTH, R.C.S.; SARUBBO, L.A.; SANTOS, V.A.; BENACHOUR, M. **Estudos de parâmetros da velocidade de ascensão de microbolhas em uma câmara de FAD para tratamento de águas oleosas em uma termelétrica**. In: 9º Encontro Internacional das Águas, Rios Urbanos Limpos: possibilidades e desafios, Recife: Fasa, v. 1, p. 459-469, 2017

VERMA, G.; WEBER, M. **SolidWorks Flow Simulation 2020 Black Book**. 3ed. CAD/CAM/CAE Works, 2020. 242p. ISBN 978-1-988722-79-5

WACK, J.; RIEDELBAUCH, S. Cavitation simulations of a tip leakage vortex for a NACA0009 hydrofoil and a Francis turbine at stable full load operating point. In: **High Performance Computing in Science and Engineering'18**. Springer, Cham, 2019. p. 351-365. DOI: 10.1007/978-3-030-13325-2_22

WALSH, J.M. The Effect of Shear on Produced Water Treatment. The Savvy Separator Series: Part 5. **Society of Petroleum Engineering**, v. 5. n. 1, p. 17-23, 2016. DOI: www.onepetro.org/journal-paper/SPE-0216-0016-OGF

WANG, Y.L.; WANG, N.; JIA, R.; ZHANG, K.; LIU, B.; SONG, W.; JIA, J. Research on CFD numerical simulation and flow field characteristics of countercurrent-cocurrent dissolved air flotation. **Water Science & technology**, In Press., 2018. DOI: 10.2166/wst.2018.006

WANG, D.; LIU, P.L.F. An ISPH with $k-\epsilon$ closure for simulating turbulence under solitary waves. **Coastal Engineering**, v. 157, p. 103657, 2020. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2020.103657

WANG, Y.; CAO, L.; CHENG, Z.; BLANPAIN, B.; GUO, M. Mathematical methodology and metallurgical application of turbulence modelling: A review. **Metals**, v. 11, n. 8, p. 1297, 2021. DOI: 10.3390/met11081297

WATANABE, Y. Flocculation and me. **Water Research**, v. 114, p. 88-103, 2017. DOI: 10.1016/j.watres.2016.12.035

UMAR, A. A.; SAAID, I. B. M.; SULAIMON, A. A.; PILUS, R. B. M. A review of petroleum emulsions and recent progress on water-in-crude oil emulsions stabilized by natural surfactants and solids. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 165, p. 673-690, 2018. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.03.014

YAN, Y.; WANG, L.; WANG, T.; WANG, X.; HU, Y.; DUAN, Q. Application of soft computing techniques to multiphase flow measurement: A review. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 60, p. 30-43, 2018. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2018.02.017

YAN, S.; SUN, S.; LUO, X.; CHEN, S.; LI, C.; FENG, J. **Numerical investigation on bubble distribution of a multistage centrifugal pump based on a population balance model**. *Energies*, v. 13, n. 4, p. 908, 2020. DOI: 10.3390/en13040908

YANG, F.; TCHOUKOV, P.; QIAO, P.; MA, X.; PENSINI, E.; DABROS, T.; CZARNECKI, J.; XU, Z. Studying demulsification mechanisms of water-in-crude oil emulsions using a modified thin liquid film technique. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 540, p. 215-223, 2018. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2017.12.056

YIANATOS, J.; VALLEJOS, P.; GRAU, R.; YAÑEZ, A. New approach for flotation process modelling and simulation. **Minerals Engineering**, v. 156, p. 106482, 2020 DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106482

YEOH, G.h.; TU, J. **Computational techniques for multiphase flows**. ed.2 Butterworth-Heinemann, p.632, 2019. DOI: 10.1016/C2017-0-01655-5

YU, L.; HAN, M.; HE, F. A review of treating oil wastewater. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 10, S1913-S1922, 2017. DOI: 10.1016/j.arabjc.2013.07.020

YUSUF, S.N.A.; ASAKO, Y.; SIDIK, N. A. C.; MOHAMED, S. B.; JAPAR, W. M. A. A.A short review on rans turbulence models. **CFD Letters**, v. 12, n. 11, p. 83-96, 2020. DOI:10.37934/cfdl.12.11.8396

ZHANG, W-H.; ZHANG, J.; ZHAO, B.; ZHU, P. Microbubble size distribution measurement in a DAF system. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 54, p. 5179-5183, 2015. DOI: 10.1021/asc.iecr.5b00109

ZHOU, J.Z.; LI, H.; CHOW, R.S.; LIU, Q.; XU, Z.; MASLIYAH, J. Role of mineral flotation technology in improving bitumen extraction from mined Athabasca oil sands II. Flotation hydrodynamics of water-based oil sand extraction. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 98, n. 1, p. 330-352, 2019. Doi: 10.1002/cjce.23598

ZOLFAGHARI, R.; FAKHRU'L-RAZI, A.; ABDULLAH, L.C.; ELNASHAIE, S.S.; PENDASHTEH, A. Demulsification techniques of water-in-oil and oil-in-water emulsions in petroleum industry. **Separation and Purification Technology**, v. 170, p. 377-407, 2016. DOI: 10.1016/j.seppur.2016.06.026