UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM HIDRÁULICA E SANEAMENTO

STEPHANIE IRIS GRACIANO PINTO

**Emprego da ferramenta CFD para representação da estrutura de escoamento de uma
unidade de flotação em escala piloto tratando água para abastecimento**

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio P. Reali

VERSÃO CORRIGIDA
SÃO CARLOS
2013

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM HIDRÁULICA E SANEAMENTO

STEPHANIE IRIS GRACIANO PINTO

Emprego da ferramenta CFD para representação da estrutura de escoamento de uma unidade de flotação em escala piloto tratando água para abastecimento

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio P. Reali

SÃO CARLOS
2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

G645e Graciano Pinto, Stephanie Iris
 Emprego da ferramenta CFD para representação da
 estrutura de escoamento de uma unidade de flotação em
 escala piloto tratando água para abastecimento /
 Stephanie Iris Graciano Pinto; orientador Marco Antônio
 Penalva Reali. São Carlos, 2013.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
 e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento --
 Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
 São Paulo, 2013.

 1. FAD. 2. CFD. 3. Tratamento de água. 4.
 Abastecimento. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **STEPHANIE IRIS GRACIANO PINTO**.

Título da dissertação: "Emprego da ferramenta CFD para representação da estrutura de escoamento de uma unidade de flotação em escala piloto tratando água para abastecimento".

Data da defesa: 31/10/2013

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Marco Antonio Penalva Reali (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Prof. Titular **Paulo Seleghim Júnior**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovada

Prof. Dr. **João Sérgio Cordeiro**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Profa. Associada **Maria Bernadete A. Varesche Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

ESCAR
Serviço de Pós-Graduação
Protocolado em
28/11/2013

A Maria dos Anjos, minha mãe, por me apoiar sempre na realização dos meus sonhos, ensinar-me valores humanos, ser muito boa e compreensiva, por ter sempre as palavras certas nos momentos de aflição e por possuir a risada mais contagiante do mundo, dedico.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali pela valiosa orientação, confiança depositada, inúmeros ensinamentos e pela fonte de inspiração.

Aos antigos pesquisadores do grupo, Leila, Moruzzi, Aline, André, Kysner, Irene e Cláudio pela disposição em ajudar.

Aos usuários do cluster, Evelise, Jorge, Patrícia e Jonas, pelos ensinamentos, sugestões e ajuda.

Ao Prof. Dr. Luiz Antonio Daniel e ao Prof. Dr. Paulo Seleghim Júnior pelos conselhos sábios e valiosos no exame de qualificação.

Ao Prof. Dr. Paulo Seleghim Júnior, pelo empréstimo do cluster de seu grupo de pesquisa.

Aos companheiros de laboratório, Gabriel, Karen, Teresa, Andressa, Thalita pela amizade e companhia.

Ao Henrique, meu companheiro, pelo apoio e paciência.

À minha mãe e irmão, por sempre acreditarem em mim.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo pelo apoio financeiro à pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela bolsa de estudos concedida.

E, principalmente, a Deus por mais uma oportunidade de aprendizado.

"Muitas coisas na vida pessoal e profissional são iguais ao bambu chinês. Você trabalha, investe tempo, esforço, faz tudo o que pode para nutrir seu crescimento, e às vezes não vê nada por semanas, meses ou anos. Mas se tiver paciência para continuar trabalhando, persistindo e nutrindo, o seu quinto ano chegará, e com ele virão um crescimento e mudanças que você jamais esperava"

Stephen Covey

Resumo

PINTO, S.I.G. **Emprego da ferramenta CFD para representação da estrutura de escoamento de uma unidade de flotação em escala piloto tratando água para abastecimento.** Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 112p., 2013.

A flotação por ar dissolvido é atualmente muito utilizada e reconhecida como uma técnica eficiente para o tratamento de águas para abastecimento. Diversos estudos vêm sendo realizados para aprimoramento desta técnica e das características físicas das unidades, dentre estes o estudo do emprego de ferramenta de simulação computacional do escoamento (CFD) para melhor compreensão da estrutura de escoamento dentro dos tanques e da influência de diversos parâmetros no processo, de modo a auxiliar nas etapas de projeto e melhorias das unidades. Neste contexto, o presente trabalho propôs a verificação do potencial de utilização da ferramenta computacional CFD para representação do escoamento em uma unidade piloto de flotação por ar dissolvido de grande porte. A pesquisa foi dividida em cinco etapas: as Etapas I e II compreenderam a validação dos modelos adotados através da variação do diâmetro de microbolhas e comparação com resultados experimentais de ADV de Escher (2011), na Zona de Separação, e de Patrizzi (2005), em ambas as zonas do reator; na Etapa III, foram realizadas quatro simulações com uma das configurações da Etapa I, variando a condição de contorno de superfície e de saída do flotador, de modo a calibrar o modelo; na Etapa IV, foram realizadas cinco simulações com um dos modelos da Etapa III, variando a geometria da unidade para análise da influência destas na estrutura de escoamento; e, finalmente, na Etapa V, uma mesma configuração de operação e geometria foi empregada em três variações do modelo, por meio de mudanças na condição de contorno de saída e na abordagem Eulerian-Eulerian ou Eulerian-Lagrangian. Nas Etapas I, II e V, a superfície d'água foi modelada como parede porosa sem atrito (permitindo a saída do ar), nas Etapas III e IV, esta foi modelada como superfície livre. Além dos resultados experimentais de ADV das autoras citadas, foram utilizados como base para avaliação dos resultados numéricos, os valores de concentração de ar e gradiente de velocidade. Os resultados mostraram que as simulações com parede porosa subestimaram os vetores de velocidade próximos à superfície, porém apresentaram resultados de concentração de ar próximos ao esperado. Em contrapartida, as simulações com superfície livre foram capazes de reproduzir melhor a turbulência próxima à superfície d'água, entretanto, não descreveram bem a concentração de microbolhas no meio líquido.

Palavras chave: FAD; CFD; tratamento de água; abastecimento.

Abstract

PINTO, S.I.G. **Use of CFD tool to represent the flow structure on a pilot scale flotation unit treating water for supply.** Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 112p., 2013.

The dissolved air flotation is currently widely used and recognized as an effective technique for the treatment of water for supply. Several studies have been conducted to perfect this technique and the physical characteristics of units, among them the application of computational flow simulation (CFD) to better understand the flow structure inside the tanks and the influence of various parameters on the process, to aid in the design steps and improvements of the units. In this context, the present study aimed to verify the potential use of CFD computational tool to represent the flow in a large scale pilot unit of dissolved air flotation. The research was divided into five stages: Stages I and II comprised the validation of the adopted models by varying the diameter of microbubbles and comparison with experimental results of ADV from Escher (2011), in the Separation Zone, and Patrizzi (2005) in both reactor zones; in Step III, four simulations were carried out with a group of settings of Step I, varying boundary conditions of the surface and outlet of the flotation unit, in order to calibrate the model; in Step IV five simulations were performed using one of the models of Step III, varying the geometry of the unit to analyze the influence on the flow structure; and finally, in Step V, the same geometry and operating configuration was tested in three variants of the model, by changing boundary conditions and outlet in Eulerian-Eulerian or Eulerian-Lagrangian approaches. In Steps I, II and V, the water surface was modeled as a frictionless porous wall (allowing air to scape), while in Steps III and IV, it was modeled as a free surface. In addition to the ADV experimental results of cited authors, were also used as basis for evaluating the numerical results, values of air concentration and velocity gradient. The results showed that simulations with porous wall underestimated the velocity vectors near the surface, although, these results showed air concentration close to expected values. In contrast, simulations with free surface were able to better represent the turbulence near the water surface, however, were unable to describe the concentration of microbubbles in the liquid medium.

Keywords: DAF, CFD, Water treatment, Water supply.

Lista de Abreviaturas e Siglas

UPFAD – Unidade Piloto de Flotação por Ar Dissolvido

FAD – Flotação por Ar Dissolvido

LATAR – Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo

USP – Universidade de São Paulo

EESC – Escola de Engenharia de São Carlos

CFD – Computational Fluid Dynamics (Dinâmica dos Fluidos Computacional)

CFX – Software de CFD da empresa ANSYS

TAS – Taxa de Aplicação Superficial (razão da vazão sobre a área em planta)

TAS_{ZC} – Taxa de Aplicação Superficial na Zona de Contato

TAS_{ZS} – Taxa de Aplicação Superficial na Zona de Separação

TDH_{ZC} – Tempo de Detenção Hidráulico na Zona de Contato

Lista de Tabelas

TABELA 1 – TRABALHOS DISPONÍVEIS NO CAMPO DE MODELOS NUMÉRICOS PARA FLOTAÇÃO. ADAPTADO DE BONDELIND (2012).....	36
TABELA 2 – CONCENTRAÇÃO DE MICROBOLHAS DE AR NA ZONA DE CONTATO PARA CADA RAZÃO DE RECIRCULAÇÃO ESTUDADA	40
TABELA 3 - VALORES DAS CONSTANTES DO MODELO DE TURBULÊNCIA K-E. FONTE: ANSYS, 2012.	50
TABELA 4 - DIÂMETROS DE MICROBOLHAS CALCULADOS PARA AS TAS_{ZC} UTILIZADAS, SEGUNDO GUIMET <i>ET AL</i> (2007).	54
TABELA 5 - VALORES DE VAZÃO MÁSSICA E FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE ÁGUA E PARTÍCULAS UTILIZADOS NA CONDIÇÃO DE CONTORNO ENTRADA	60
TABELA 6 - VALORES DE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE ÁGUA E AR UTILIZADOS NA CONDIÇÃO DE CONTORNO ENTRADA DE RECIRCULAÇÃO.	64
TABELA 7 - VALORES DE VAZÃO MÁSSICA UTILIZADOS NA CONDIÇÃO DE CONTORNO ENTRADA DE RECIRCULAÇÃO.....	64
TABELA 8 - VALORES CALCULADOS DE GRADIENTE MÉDIO DE VELOCIDADE DEVIDO AO ESCOAMENTO NAS CONFIGURAÇÕES DE ZONA DE CONTATO UTILIZADAS	68
TABELA 9 - GRADIENTE MÉDIO DE VELOCIDADE DEVIDO À INFLUÊNCIA DAS MICROBOLHAS CALCULADO SEGUNDO REALI (1991).....	69
TABELA 10 - VALORES CALCULADOS DE GRADIENTE MÉDIO DE VELOCIDADE DEVIDO AO ESCOAMENTO E À INFLUÊNCIA DE MICROBOLHAS	70
TABELA 11 - PARÂMETROS DE GEOMETRIA E OPERAÇÃO MANTIDOS FIXOS DURANTE AS SIMULAÇÕES DA ETAPA I	71
TABELA 12 - PARÂMETROS DE GEOMETRIA E OPERAÇÃO MANTIDOS FIXOS DURANTE AS SIMULAÇÕES DA ETAPA II	72
TABELA 13 - PARÂMETROS DE GEOMETRIA E OPERAÇÃO MANTIDOS FIXOS DURANTE AS SIMULAÇÕES DA ETAPA III	73
TABELA 14 - CÁLCULO DA VAZÃO MÁSSICA UTILIZADA NA CONDIÇÃO DE CONTORNO SAÍDA DA SIMULAÇÃO 3.1 – ETAPA III.....	73
TABELA 15 – CÁLCULO DA PRESSÃO RELATIVA UTILIZADA NA CONDIÇÃO DE CONTORNO SAÍDA DA SIMULAÇÃO 3.3 – ETAPA III.	75
TABELA 16 - CÁLCULO DA ALTURA D'ÁGUA SOBRE O VERTEDOR E DA ALTURA DO RETÂNGULO QUE REPRESENTA A CONDIÇÃO DE CONTORNO SAÍDA DA SIMULAÇÃO 3.4 – ETAPA III.....	76
TABELA 17 - PARÂMETROS DE GEOMETRIA E OPERAÇÃO MANTIDOS FIXOS DURANTE AS SIMULAÇÕES DA ETAPA IV.....	77
TABELA 18 - PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO 4.1, ETAPA IV.....	77
TABELA 19 – PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO 4.3, ETAPA IV	79
TABELA 20 - CÁLCULO DA ALTURA DO RETÂNGULO QUE REPRESENTA A CONDIÇÃO DE CONTORNO SAÍDA DA SIMULAÇÃO 4.3 – ETAPA IV.....	80
TABELA 21 - PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO 4.3, ETAPA IV	81
TABELA 22 - CÁLCULO DA ALTURA DO RETÂNGULO QUE REPRESENTA A CONDIÇÃO DE CONTORNO SAÍDA DA SIMULAÇÃO 4.4 – ETAPA IV.....	82
TABELA 23 - PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO 4.3, ETAPA IV.....	83
TABELA 24 - PARÂMETROS DE GEOMETRIA E OPERAÇÃO MANTIDOS FIXOS DURANTE AS SIMULAÇÕES DA ETAPA V	85
TABELA 25 - CONFIGURAÇÕES INSERIDAS EM DEFAULT DOMAIN NO SETUP DO ANSYS CFX 13.0 NAS SIMULAÇÕES COM ABORDAGEM <i>EULERIAN-EULERIAN</i>	89
TABELA 26 - CONFIGURAÇÕES INSERIDAS EM DEFAULT DOMAIN NO SETUP DO ANSYS CFX 13.0 NA SIMULAÇÃO 5.2 – ETAPA V, COM ABORDAGEM <i>EULERIAN-LAGRANGIAN</i>	90
TABELA 27 - CONFIGURAÇÕES INSERIDAS EM BOUNDARY CONDITION ENTRADA NO SETUP DO ANSYS CFX 13.0 NAS SIMULAÇÕES COM ABORDAGEM <i>EULERIAN-EULERIAN</i>	91

TABELA 28 - CONFIGURAÇÕES INSERIDAS EM BOUNDARY CONDITION ENTRADA NO SETUP DO ANSYS CFX 13.0 NAS SIMULAÇÕES COM ABORDAGEM <i>EULERIAN-LAGRANGIAN</i>	91
TABELA 29 - CONFIGURAÇÕES INSERIDAS EM BOUNDARY CONDITION ENTRADA DE RECIRCULAÇÃO NO SETUP DO ANSYS CFX 13.0 NAS SIMULAÇÕES COM ABORDAGEM <i>EULERIAN-EULERIAN</i>	91
TABELA 30 - CONFIGURAÇÕES INSERIDAS EM BOUNDARY CONDITION ENTRADA DE RECIRCULAÇÃO NO SETUP DO ANSYS CFX 13.0, NAS SIMULAÇÕES COM ABORDAGEM <i>EULERIAN-LAGRANGIAN</i>	92
TABELA 31 - CONFIGURAÇÕES INSERIDAS EM BOUNDARY CONDITION SAÍDA NO SETUP DO ANSYS CFX 13.0, EM CASO DE MODELAÇÃO DE SAÍDA POR PRESSÃO RELATIVA	92
TABELA 32 - CONFIGURAÇÕES INSERIDAS EM BOUNDARY CONDITION SAÍDA NO SETUP DO ANSYS CFX 13.0, EM CASO DE MODELAÇÃO DE SAÍDA POR VAZÃO MÁSSICA	92
TABELA 33 - CONFIGURAÇÕES INSERIDAS EM BOUNDARY CONDITION SUPERFÍCIE NO SETUP DO ANSYS CFX 13.0, EM CASO DE MODELAÇÃO DE SUPERFÍCIE POR PAREDE POROSA, NAS SIMULAÇÕES COM ABORDAGEM <i>EULERIAN-EULERIAN</i>	93
TABELA 34 - CONFIGURAÇÕES INSERIDAS EM BOUNDARY CONDITION SUPERFÍCIE NO SETUP DO ANSYS CFX 13.0, EM CASO DE MODELAÇÃO DE SUPERFÍCIE POR PAREDE POROSA, NAS SIMULAÇÕES COM ABORDAGEM <i>EULERIAN-LAGRANGIAN</i>	93
TABELA 35 - CONFIGURAÇÕES INSERIDAS EM BOUNDARY CONDITION SUPERFÍCIE NO SETUP DO ANSYS CFX 13.0, EM CASO DE MODELAÇÃO DE SUPERFÍCIE LIVRE	94
TABELA 36 - CONFIGURAÇÕES INSERIDAS EM GLOBAL INITIALIZATION NO SETUP DO ANSYS CFX 13.0	95

Lista de Figuras

FIGURA 1 - VISÃO GERAL DAS ETAPAS DE MODELAÇÃO POR CFD. ADAPTADO DE ANSYS, 2012.	34
FIGURA 2 - ESQUEMA DA UNIDADE PILOTO DE FAD. ADAPTADO DE REALI; PATRIZZI, 2007.....	38
FIGURA 3 – DESENHO DA UNIDADE PILOTO DE FAD COM SUAS MEDIDAS, TODAS EM METROS. ADAPTADO DE PATRIZZI, 2005.....	38
FIGURA 4 – DIMENSÕES DA GEOMETRIA I, VALORES EM METROS.	42
FIGURA 5 - DIMENSÕES DA GEOMETRIA II, VALORES EM METROS.....	43
FIGURA 6 - DIMENSÕES DA GEOMETRIA III, VALORES EM METROS.	43
FIGURA 7 - DIMENSÕES DA GEOMETRIA IV, VALORES EM METROS.	44
FIGURA 8 - DIMENSÕES DA GEOMETRIA V, VALORES EM METROS.	45
FIGURA 9 - DIMENSÕES DA GEOMETRIA VI, VALORES EM METROS.	46
FIGURA 10 - DIFERENÇAS NO PERFIL DE VELOCIDADE ENTRE OS MODELOS LES E K-E. FONTE: WOLS, 2012.	49
FIGURA 11 – LOCALIZAÇÃO DA CONDIÇÃO DE CONTORNO ENTRADA NA CONFIGURAÇÃO I.....	57
FIGURA 12 - LOCALIZAÇÃO DA CONDIÇÃO DE CONTORNO ENTRADA NA CONFIGURAÇÃO II.....	58
FIGURA 13 – ARRANJO DA ENTRADA DE RECIRCULAÇÃO NA POSIÇÃO 1.....	60
FIGURA 14 – ARRANJO DA ENTRADA DE RECIRCULAÇÃO NA POSIÇÃO 2.....	61
FIGURA 15 – ARRANJO DA ENTRADA DE RECIRCULAÇÃO NA POSIÇÃO 3.....	62
FIGURA 16 - CONFIGURAÇÃO DOS ORIFÍCIOS DE SAÍDA PARA ZONA DE SEPARAÇÃO COM COMPRIMENTO DE 1M (TAS=12,3M/H). VALORES EM METROS.	65
FIGURA 17 - CONFIGURAÇÃO DOS ORIFÍCIOS DE SAÍDA PARA ZONA DE SEPARAÇÃO COM COMPRIMENTO DE 1,4M (TAS=8,3M/H). VALORES EM METROS.	66
FIGURA 18 - ESQUEMA DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS NA ETAPA I.....	71
FIGURA 19 - ESQUEMA DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS NA ETAPA II.....	72
FIGURA 20 - REPRESENTAÇÃO 3D DOS ORIFÍCIOS DE SAÍDA NA SIMULAÇÃO 3.2 DA ETAPA III. DETALHE DO FUNDO DA ZONA SEPARAÇÃO VISTO POR BAIXO.....	74
FIGURA 21 - DETALHE DA ENTRADA DE RECIRCULAÇÃO DA SIMULAÇÃO 4.2, ETAPA IV.....	78
FIGURA 22 – VISTA EM 3D DA CHAPA DE FUNDO DA ZONA DE CONTATO, ILUSTRANDO A ENTRADA DE RECIRCULAÇÃO DA SIMULAÇÃO 4.2, ETAPA IV.....	78
FIGURA 23 - DIMENSÕES DA GEOMETRIA DA SIMULAÇÃO 4.3 DA ETAPA IV, VALORES EM METROS.....	79
FIGURA 24 - CONFIGURAÇÃO DOS ORIFÍCIOS DE SAÍDA PARA ZONA DE SEPARAÇÃO COM COMPRIMENTO DE 0,825M (TAS=15M/H). VALORES EM METROS.	80
FIGURA 25 - DIMENSÕES DA GEOMETRIA DA SIMULAÇÃO 4.4 DA ETAPA IV, VALORES EM METROS.....	81
FIGURA 26 - CONFIGURAÇÃO DOS ORIFÍCIOS DE SAÍDA PARA ZONA DE SEPARAÇÃO COM COMPRIMENTO DE 0,488M (TAS=25M/H). VALORES EM METROS.	82
FIGURA 27 - DIMENSÕES DA GEOMETRIA DA SIMULAÇÃO 4.5 DA ETAPA IV, VALORES EM METROS.....	84
FIGURA 28 - DIMENSÕES DA GEOMETRIA DA SIMULAÇÃO 5.1 DA ETAPA V, VALORES EM METROS.	86
FIGURA 29 - CONCENTRAÇÃO DE AR [G/M ³]. PLANO XZ, Y=0,20M. CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES: TAS _{ZC} =174,9M/H; TAS _{ZS} =12,3M/H; TDH _{ZC} = 43s; H _{ÁGUA} =2,27M. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 0 PA. 1A) AV =4,90G/M ³ E DB=75µm; 1B) AV =4,90G/M ³ E DB=68,4µm ; 1C) AV =4,90G/M ³ E DB=55µm; 2A) AV =6,41G/M ³ E DB=75µm; 2C) AV =6,41G/M ³ E DB=55µm; 3A) AV =7,87G/M ³ E DB=75µm; 3B) AV =7,87G/M ³ E DB=97,3µm; 3C) AV =7,87G/M ³ E DB=55µm.	97
FIGURA 30 – GRADIENTE DE VELOCIDADE (G). PLANO YZ, x=0,035M. CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES: TAS _{ZC} =174,9M/H; TAS _{ZS} =12,3M/H; TDH _{ZC} = 43s; H _{ÁGUA} =2,27M. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 0 PA. 1A) AV =4,90G/M ³ E DB=75µm; 1B) AV =4,90G/M ³ E DB=68,4µm ; 1C) AV =4,90G/M ³ E DB=55µm; 2A) AV =6,41G/M ³ E DB=75µm; 2C) AV =6,41G/M ³ E DB=55µm; 3A) AV =7,87G/M ³ E DB=75µm; 3B) AV =7,87G/M ³ E DB=97,3µm; 3C) AV =7,87G/M ³ E DB=55µm.	98
FIGURA 31 - GRADIENTE DE VELOCIDADE (G). PLANO XZ, Y=0,20M. CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES: TAS _{ZC} =174,9M/H; TAS _{ZS} =12,3M/H; TDH _{ZC} = 43s; H _{ÁGUA} =2,27M. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE	

D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 0 PA. 1A) $AV = 4,90G/M^3$ E $D_B=75\mu M$; 1B) $AV = 4,90G/M^3$ E $D_B=68,4\mu M$; 1C) $AV = 4,90G/M^3$ E $D_B=55\mu M$; 2A) $AV = 6,41G/M^3$ E $D_B=75\mu M$; 2C) $AV = 6,41G/M^3$ E $D_B=55\mu M$; 3A) $AV = 7,87G/M^3$ E $D_B=75\mu M$; 3B) $AV = 7,87G/M^3$ E $D_B=97,3\mu M$; 3C) $AV = 7,87G/M^3$ E $D_B=55\mu M$	99
FIGURA 32 – VETORES DE VELOCIDADE NORMALIZADOS. PLANO YZ, $Y=0,035M$. CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES: $TAS_{ZC}=174,9M/H$; $TAS_{ZS}=12,3M/H$; $TDH_{ZC}= 43s$; $H_{ÁGUA}=2,27M$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 0 PA. 1A) $AV = 4,90G/M^3$ E $D_B=75\mu M$; 1B) $AV = 4,90G/M^3$ E $D_B=68,4\mu M$; 1C) $AV = 4,90G/M^3$ E $D_B=55\mu M$; 2A) $AV = 6,41G/M^3$ E $D_B=75\mu M$; 2C) $AV = 6,41G/M^3$ E $D_B=55\mu M$; 3A) $AV = 7,87G/M^3$ E $D_B=75\mu M$; 3B) $AV = 7,87G/M^3$ E $D_B=97,3\mu M$; 3C) $AV = 7,87G/M^3$ E $D_B=55\mu M$	100
FIGURA 33 - VETORES DE VELOCIDADE. PLANO XZ, $Y=0,20M$. CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES: $TAS_{ZC}=174,9M/H$; $TAS_{ZS}=12,3M/H$; $TDH_{ZC}= 43s$; $H_{ÁGUA}=2,27M$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 0 PA. 1A) $AV = 4,90G/M^3$ E $D_B=75\mu M$; 1B) $AV = 4,90G/M^3$ E $D_B=68,4\mu M$; 1C) $AV = 4,90G/M^3$ E $D_B=55\mu M$. IMAGEM SUPERIOR RETIRADA DE ESCHER (2011). OS VETORES DAS IMAGENS INFERIORES ESTÃO NORMALIZADOS.	102
FIGURA 34 - VETORES DE VELOCIDADE. PLANO XZ, $Y=0,20M$. CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES: $TAS_{ZC}=174,9M/H$; $TAS_{ZS}=12,3M/H$; $TDH_{ZC}= 43s$; $H_{ÁGUA}=2,27M$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 0 PA. 2A) $AV = 6,41G/M^3$ E $D_B=75\mu M$; 2C) $AV = 6,41G/M^3$ E $D_B=55\mu M$. IMAGEM SUPERIOR RETIRADA DE ESCHER (2011). OS VETORES DAS IMAGENS INFERIORES ESTÃO NORMALIZADOS.	103
FIGURA 35 - VETORES DE VELOCIDADE. PLANO XZ, $Y=0,20M$. CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES: $TAS_{ZC}=174,9M/H$; $TAS_{ZS}=12,3M/H$; $TDH_{ZC}= 43s$; $H_{ÁGUA}=2,27M$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 0 PA. 1A) $AV = 4,90G/M^3$ E $D_B=75\mu M$; 3A) $AV = 7,87G/M^3$ E $D_B=75\mu M$; 3B) $AV = 7,87G/M^3$ E $D_B=97,3\mu M$; 3C) $AV = 7,87G/M^3$ E $D_B=55\mu M$. IMAGEM SUPERIOR RETIRADA DE ESCHER (2011). OS VETORES DAS IMAGENS INFERIORES ESTÃO NORMALIZADOS.	104
FIGURA 36 – CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO: $TAS_{ZC}=178,2M/H$; $TAS_{ZS}=12,3M/H$; $TDH_{ZC}= 43s$; $H_{ÁGUA}=2,27M$; $AV = 7,87G/M^3$ E $D_B=75\mu M$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= SUPERFÍCIE LIVRE; SAÍDA = $Q_M= 1,40 KG/S$. A) CONCENTRAÇÃO DE AR $[G/M^3]$. PLANO XZ, $Y=0,20M$; B) FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE ÁGUA. PLANO XZ, $Y=0,20M$. A RETA VERMELHA LOCALIZA-SE EM $Z=2,27M$	105
FIGURA 37 – GRADIENTE DE VELOCIDADE NA ZONA DE CONTATO. PLANO YZ. CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO: $TAS_{ZC}=178,2M/H$; $TAS_{ZS}=12,3M/H$; $TDH_{ZC}= 43s$; $H_{ÁGUA}=2,27M$; $AV = 7,87G/M^3$ E $D_B=75\mu M$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= SUPERFÍCIE LIVRE; SAÍDA = $Q_M= 1,40 KG/S$. A) $X=0,035M$, SEÇÃO MEDIANA; B) $X=0,0609M$, PLANO SOBRE O EIXO DOS CÍRCULOS DE ENTRADA DE RECIRCULAÇÃO.	106
FIGURA 38 – GRADIENTE DE VELOCIDADE NA ZONA DE SEPARAÇÃO. PLANO XZ, $Y=0,20M$. CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO: $TAS_{ZC}=178,2M/H$; $TAS_{ZS}=12,3M/H$; $TDH_{ZC}= 43s$; $H_{ÁGUA}=2,27M$; $AV = 7,87G/M^3$ E $D_B=75\mu M$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= SUPERFÍCIE LIVRE; SAÍDA = $Q_M= 1,40 KG/S$	107
FIGURA 39 – VETORES DE VELOCIDADE. CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO: $TAS_{ZC}=178,2M/H$; $TAS_{ZS}=12,3M/H$; $TDH_{ZC}= 43s$; $H_{ÁGUA}=2,27M$; $AV = 7,87G/M^3$ E $D_B=75\mu M$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= SUPERFÍCIE LIVRE; SAÍDA = $Q_M= 1,40 KG/S$. A) PLANO YZ, $x=0,035m$; B) PLANO XZ, $Y=0,20M$. OS VETORES DAS IMAGENS ESTÃO NORMALIZADOS.	107
FIGURA 40 – CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO: $TAS_{ZC}=178,2M/H$; $TAS_{ZS}=12,3M/H$; $TDH_{ZC}= 43s$; $H_{ÁGUA}=2,27M$; $AV = 7,87G/M^3$ E $D_B=75\mu M$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= SUPERFÍCIE LIVRE; SAÍDA = $16931,50 PA$. A) CONCENTRAÇÃO DE AR $[G/M^3]$. PLANO XZ, $Y=0,20M$; B) FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE ÁGUA. PLANO XZ, $Y=0,20M$. A RETA VERMELHA LOCALIZA-SE EM $Z=2,27M$	108
FIGURA 41 – GRADIENTE DE VELOCIDADE NA ZONA DE CONTATO. PLANO YZ. CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO: $TAS_{ZC}=178,2M/H$; $TAS_{ZS}=12,3M/H$; $TDH_{ZC}= 43s$; $H_{ÁGUA}=2,27M$; $AV = 7,87G/M^3$ E $D_B=75\mu M$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= SUPERFÍCIE LIVRE; SAÍDA = $16931,50 PA$. A) $X=0,035M$, SEÇÃO MEDIANA; B) $X=0,0609M$, PLANO SOBRE O EIXO DOS CÍRCULOS DE ENTRADA DE RECIRCULAÇÃO.	109
FIGURA 42 – GRADIENTE DE VELOCIDADE NA ZONA DE SEPARAÇÃO. PLANO XZ, $Y=0,20M$. CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO: $TAS_{ZC}=178,2M/H$; $TAS_{ZS}=12,3M/H$; $TDH_{ZC}= 43s$; $H_{ÁGUA}=2,27M$; $AV = 7,87G/M^3$ E $D_B=75\mu M$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= SUPERFÍCIE LIVRE; SAÍDA = $16931,50 PA$	110

FIGURA 43 – VETORES DE VELOCIDADE. PLANO YZ, $x=0,035\text{M}$. CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO: $TAS_{ZC}=178,2\text{M/H}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{M/H}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{ÁGUA}}=2,27\text{M}$; $AV=7,87\text{G/M}^3$ E $D_B=75\mu\text{M}$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= SUPERFÍCIE LIVRE; SAÍDA = 16931,50 PA. OS VETORES DA IMAGEM ESTÃO NORMALIZADOS.....	112
FIGURA 44 – VETORES DE VELOCIDADE. PLANO XZ, $x=0,20\text{M}$. CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO: $TAS_{ZC}=178,2\text{M/H}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{M/H}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{ÁGUA}}=2,27\text{M}$; $AV=7,87\text{G/M}^3$ E $D_B=75\mu\text{M}$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= SUPERFÍCIE LIVRE; SAÍDA = 16931,50 PA. OS VETORES DA IMAGEM ESTÃO NORMALIZADOS.....	113
FIGURA 45 – VETORES DE VELOCIDADE. PLANO XZ, $x=0,20\text{M}$. CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO: $TAS_{ZC}=178,2\text{M/H}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{M/H}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{ÁGUA}}=2,27\text{M}$; $AV=7,87\text{G/M}^3$ E $D_B=75\mu\text{M}$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= SUPERFÍCIE LIVRE; SAÍDA = 16931,50 PA. A) RESULTADOS NUMÉRICOS; B) VETORES EXPERIMENTAIS OBTIDOS POR SONDA MICROADV POR ESCHER (2011).....	114
FIGURA 46 - CONCENTRAÇÃO DE AR $[\text{G/M}^3]$. PLANO XZ, $y=0,20\text{M}$. CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES: $TAS_{ZC}=178,2\text{M/H}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{M/H}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{ÁGUA}}=2,27\text{M}$; $AV=7,87\text{G/M}^3$ E $D_B=75\mu\text{M}$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 16931,50 PA.	116
FIGURA 47 – GRADIENTE DE VELOCIDADE. CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO: $TAS_{ZC}=178,2\text{M/H}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{M/H}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{ÁGUA}}=2,27\text{M}$; $AV=7,87\text{G/M}^3$ E $D_B=75\mu\text{M}$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 16931,50 PA. A) PLANO YZ, $x=0,035\text{M}$; B) PLANO XZ, $y=0,20\text{M}$	116
FIGURA 48 - VETORES DE VELOCIDADE. CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO: $TAS_{ZC}=178,2\text{M/H}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{M/H}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{ÁGUA}}=2,27\text{M}$; $AV=7,87\text{G/M}^3$ E $D_B=75\mu\text{M}$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 16931,50 PA. A) PLANO YZ, $x=0,035\text{M}$; B) PLANO XZ, $y=0,20\text{M}$. OS VETORES DAS IMAGENS ESTÃO NORMALIZADOS.	117
FIGURA 49 – CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO: $TAS_{ZC}=178,2\text{M/H}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{M/H}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{ÁGUA}}=2,27\text{M}$; $AV=7,87\text{G/M}^3$ E $D_B=75\mu\text{M}$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= SUPERFÍCIE LIVRE; SAÍDA = 0 PA (VERTEDOR). A) CONCENTRAÇÃO DE AR $[\text{G/M}^3]$. PLANO XZ, $y=0,20\text{M}$; B) FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE ÁGUA. PLANO XZ, $y=0,20\text{M}$. A RETA VERMELHA LOCALIZA-SE EM $z=2,27\text{M}$ E $z=2,08\text{M}$	118
FIGURA 50 – GRADIENTE DE VELOCIDADE NA ZONA DE CONTATO. PLANO YZ. CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO: $TAS_{ZC}=178,2\text{M/H}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{M/H}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{ÁGUA}}=2,27\text{M}$; $AV=7,87\text{G/M}^3$ E $D_B=75\mu\text{M}$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= SUPERFÍCIE LIVRE; SAÍDA = 0 PA (VERTEDOR). A) $x=0,035\text{M}$, SEÇÃO MEDIANA; B) $x=0,0609\text{M}$, PLANO SOBRE O EIXO DOS CÍRCULOS DE ENTRADA DE RECIRCULAÇÃO.....	119
FIGURA 51 – GRADIENTE DE VELOCIDADE NA ZONA DE SEPARAÇÃO. PLANO XZ, $y=0,20\text{M}$. CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO: $TAS_{ZC}=178,2\text{M/H}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{M/H}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{ÁGUA}}=2,27\text{M}$; $AV=7,87\text{G/M}^3$ E $D_B=75\mu\text{M}$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= SUPERFÍCIE LIVRE; SAÍDA = 0 PA (VERTEDOR).	120
FIGURA 52 – VETORES DE VELOCIDADE. PLANO YZ, $x=0,035\text{M}$. CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO: $TAS_{ZC}=178,2\text{M/H}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{M/H}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{ÁGUA}}=2,27\text{M}$; $AV=7,87\text{G/M}^3$ E $D_B=75\mu\text{M}$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= SUPERFÍCIE LIVRE; SAÍDA = 0 PA (VERTEDOR). OS VETORES DA IMAGEM ESTÃO NORMALIZADOS.....	122
FIGURA 53 – VETORES DE VELOCIDADE. PLANO XZ, $x=0,20\text{M}$. CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO: $TAS_{ZC}=178,2\text{M/H}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{M/H}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{ÁGUA}}=2,27\text{M}$; $AV=7,87\text{G/M}^3$ E $D_B=75\mu\text{M}$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= SUPERFÍCIE LIVRE; SAÍDA = 0 PA (VERTEDOR). OS VETORES DA IMAGEM ESTÃO NORMALIZADOS.....	123
FIGURA 54 – VETORES DE VELOCIDADE. PLANO YZ, $x=1,20\text{M}$. CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO: $TAS_{ZC}=178,2\text{M/H}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{M/H}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{ÁGUA}}=2,27\text{M}$; $AV=7,87\text{G/M}^3$ E $D_B=75\mu\text{M}$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= SUPERFÍCIE LIVRE; SAÍDA = 0 PA (VERTEDOR). OS VETORES DA IMAGEM ESTÃO NORMALIZADOS.....	124
FIGURA 55 – VETORES DE VELOCIDADE. PLANO XZ, $x=0,20\text{M}$. CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO: $TAS_{ZC}=178,2\text{M/H}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{M/H}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{ÁGUA}}=2,27\text{M}$; $AV=7,87\text{G/M}^3$ E $D_B=75\mu\text{M}$. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= SUPERFÍCIE LIVRE; SAÍDA = 0 PA (VERTEDOR). A) RESULTADOS NUMÉRICOS; B) VETORES EXPERIMENTAIS OBTIDOS POR SONDA MICROADV POR ESCHER (2011).....	125
FIGURA 56 – VETORES DE VELOCIDADE. PLANO XZ, $x=0,20\text{M}$. CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO: $TAS_{ZC}=178,2\text{M/H}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{M/H}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{ÁGUA}}=2,27\text{M}$; $AV=7,87\text{G/M}^3$ E $D_B=75\mu\text{M}$. A) CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= SUPERFÍCIE LIVRE; SAÍDA = 16931,50 PA; B) CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE	

D'ÁGUA= SUPERFÍCIE LIVRE; SAÍDA = 0 PA (VERTEDOR); C) VETORES EXPERIMENTAIS OBTIDOS POR SONDA MICROADV POR ESCHER (2011).....	126
FIGURA 57 - VETORES DE VELOCIDADE. PLANO XZ, Y=0,20M. CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES: TAS _{ZC} =171,7M/H; AV =4,90G/M ³ E D _B =75μM. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= SUPERFÍCIE LIVRE; SAÍDA = 0 PA. OS VETORES DAS IMAGENS ESTÃO NORMALIZADOS. AS RETAS VERMELHAS REPRESENTAM A LOCALIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE D'ÁGUA.	127
FIGURA 58 - VETORES DE VELOCIDADE. PLANO XZ, Y=0,20M. CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES: TAS _{ZC} =171,7M/H; AV =4,90G/M ³ E D _B =75μM. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= SUPERFÍCIE LIVRE; SAÍDA = 0 PA. OS VETORES DAS IMAGENS ESTÃO NORMALIZADOS. AS RETAS VERMELHAS REPRESENTAM A LOCALIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE D'ÁGUA.	128
FIGURA 59 - CONCENTRAÇÃO DE AR [G/M ³]. PLANO XZ, Y=0,20M. CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES: TAS _{ZC} =171,7M/H; TAS _{ZS} =12,2M/H; TDH _{ZC} = 43s; H _{ÁGUA} =2,27M; AV =4,90G/M ³ E D _B =75μM. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 0 PA.	129
FIGURA 60 - CONCENTRAÇÃO DE AR [G/M ³]. PLANO XZ, Y=0,20M. CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES: TAS _{ZC} =171,7M/H; TAS _{ZS} =12,2M/H; TDH _{ZC} = 43s; H _{ÁGUA} =2,27M; AV =4,90G/M ³ E D _B =75μM. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 0 PA.	130
FIGURA 61 – VETORES DE VELOCIDADE. PLANO XZ, Y=0,20M. CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES: TAS _{ZC} =171,7M/H; TAS _{ZS} =12,2M/H; TDH _{ZC} = 43s; H _{ÁGUA} =2,27M; AV =4,90G/M ³ E D _B =75μM. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 0 PA. OS VETORES DAS IMAGENS ESTÃO NORMALIZADOS.	131
FIGURA 62 - CONCENTRAÇÃO DE AR [G/M ³]. PLANO XZ, Y=0,20M. CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES: TAS _{ZC} =171,7M/H; TAS _{ZS} =12,2M/H; TDH _{ZC} = 43s; H _{ÁGUA} =2,27M; AV =4,90G/M ³ E D _B =75μM. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 0 PA.	132
FIGURA 63 – GRADIENTE DE VELOCIDADE. PLANO XZ, Y=0,20M. CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES: TAS _{ZC} =171,7M/H; TAS _{ZS} =12,2M/H; TDH _{ZC} = 43s; H _{ÁGUA} =2,27M; AV =4,90G/M ³ E D _B =75μM. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 0 PA.	133
FIGURA 64 – VETORES DE VELOCIDADE. PLANO XZ, Y=0,20M. CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES: TAS _{ZC} =171,7M/H; TAS _{ZS} =12,2M/H; TDH _{ZC} = 43s; H _{ÁGUA} =2,27M; AV =4,90G/M ³ E D _B =75μM. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 0 PA. OS VETORES DAS IMAGENS ESTÃO NORMALIZADOS.	134
FIGURA 65 - CONCENTRAÇÃO DE AR [G/M ³]. PLANO XZ, Y=0,20M. CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES: TAS _{ZC} =171,7M/H; TAS _{ZS} =12,3M/H; TDH _{ZC} = 43s; H _{ÁGUA} =2,27M; AV =4,90G/M ³ E D _B =75μM. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 16931,50PA.	135
FIGURA 66 - GRADIENTE DE VELOCIDADE. PLANO XZ, Y=0,20M CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO: TAS _{ZC} =171,7M/H; TAS _{ZS} =12,3M/H; TDH _{ZC} = 43s; H _{ÁGUA} =2,27M; AV =4,90G/M ³ E D _B =75μM. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 16931,50PA.	136
FIGURA 67 - VETORES DE VELOCIDADE. PLANO XZ, Y=0,20M. CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO: TAS _{ZC} =171,7M/H; TAS _{ZS} =12,3M/H; TDH _{ZC} = 43s; H _{ÁGUA} =2,27M; AV =4,90G/M ³ E D _B =75μM. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 16931,50PA. OS VETORES DAS IMAGENS ESTÃO NORMALIZADOS.	137
FIGURA 68 – CONCENTRAÇÃO DE AR. PLANO XZ, Y=0,20M, H _{ÁGUA} =1,98M. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 0 PA. 1A) TAS _{ZC} =125M/H; TAS _{ZS} =8,3M/H; TDH _{ZC} = 29s; AV =8,65G/M ³ E D _B =63μM. 2) TAS _{ZC} =179M/H; TAS _{ZS} =8,3M/H; TDH _{ZC} = 34s; AV =8,65G/M ³ . 2A) D _B =63μM; 2B) D _B =97,3μM; 2C) D _B =55μM. 3) TAS _{ZC} =179M/H; TAS _{ZS} =12,3M/H; TDH _{ZC} = 34s; AV =4,36G/M ³ . 3A) D _B =75μM; 3B) D _B =68,4μM. 4A) TAS _{ZC} =179M/H; TAS _{ZS} =12,3M/H; TDH _{ZC} = 34s; AV =8,65G/M ³ ; D _B =75μM.	149
FIGURA 69 - GRADIENTE DE VELOCIDADE. PLANO YZ, X=0,01M, H _{ÁGUA} =1,98M. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 0 PA. 1A) TAS _{ZC} =125M/H; TAS _{ZS} =8,3M/H; TDH _{ZC} = 29s; AV =8,65G/M ³ E D _B =63μM. 2) TAS _{ZC} =179M/H; TAS _{ZS} =8,3M/H; TDH _{ZC} = 34s; AV =8,65G/M ³ . 2A) D _B =63μM; 2B) D _B =97,3μM; 2C) D _B =55μM. 3) TAS _{ZC} =179M/H; TAS _{ZS} =12,3M/H; TDH _{ZC} = 34s; AV =4,36G/M ³ . 3A) D _B =75μM; 3B) D _B =68,4μM. 4A) TAS _{ZC} =179M/H; TAS _{ZS} =12,3M/H; TDH _{ZC} = 34s; AV =8,65G/M ³ ; D _B =75μM.	150

FIGURA 70 - GRADIENTE DE VELOCIDADE. PLANO XZ, Y=0,20M, H _{ÁGUA} =1,98M. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 0 PA. 1A) TAS _{ZC} =125M/H; TAS _{ZS} =8,3M/H; TDH _{ZC} = 29s; AV =8,65G/M ³ E D _B =63μM. 2) TAS _{ZC} =179M/H; TAS _{ZS} =8,3M/H; TDH _{ZC} = 34s; AV =8,65G/M ³ . 2A) D _B =63μM; 2B) D _B =97,3μM; 2C) D _B =55μM. 3) TAS _{ZC} =179M/H; TAS _{ZS} =12,3M/H; TDH _{ZC} = 34s; AV =4,36G/M ³ . 3A) D _B =75μM; 3B) D _B =68,4μM. 4A) TAS _{ZC} =179M/H; TAS _{ZS} =12,3M/H; TDH _{ZC} = 34s; AV =8,65G/M ³ ; D _B =75μM.....	151
FIGURA 71 – VETORES DE VELOCIDADE. PLANO XZ, Y=0,218M. CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES: TAS _{ZC} =125M/H; TAS _{ZS} =8,3M/H; TDH _{ZC} = 34s; H _{ÁGUA} =1,98M; AV =8,65G/M ³ E D _B =63μM. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 0 PA. A) DADOS OBTIDOS NUMERICAMENTE, COM VETORES NORMALIZADOS; B) DADOS EXPERIMENTAIS DE PATRIZZI (2005) NA ZONA DE CONTATO COM COMPRIMENTO DE 10CM.	152
FIGURA 72 – VETORES DE VELOCIDADE. PLANO XZ, Y=0,218M. CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES: TAS _{ZC} =125M/H; TAS _{ZS} =8,3M/H; TDH _{ZC} = 34s; H _{ÁGUA} =1,98M; AV =8,65G/M ³ E D _B =63μM. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 0 PA. A) DADOS OBTIDOS NUMERICAMENTE, COM VETORES NORMALIZADOS; B) RESULTADO EXPERIMENTAL DE PATRIZZI (2005).	153
FIGURA 73 – VETORES DE VELOCIDADE. PLANO YZ, X=0,047M. CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES: TAS _{ZC} =179M/H; TAS _{ZS} =8,3M/H; TDH _{ZC} = 34s; H _{ÁGUA} =1,98M; AV =8,65G/M ³ . CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 0 PA. 2A) D _B =63μM; 2B) D _B =97,3μM; 2C) D _B =55μM. IMAGEM SUPERIOR RETIRADA DE PATRIZZI (2005). OS VETORES DAS IMAGENS INFERIORES ESTÃO NORMALIZADOS.	154
FIGURA 74 – VETORES DE VELOCIDADE. PLANO XZ, Y=0,24M. CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES: TAS _{ZC} =179M/H; TAS _{ZS} =8,3M/H; TDH _{ZC} = 34s; H _{ÁGUA} =1,98M; AV =8,65G/M ³ . CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 0 PA. 2A) D _B =63μM; 2B) D _B =97,3μM; 2C) D _B =55μM. IMAGEM SUPERIOR RETIRADA DE PATRIZZI (2005). OS VETORES DAS IMAGENS INFERIORES ESTÃO NORMALIZADOS.	155
FIGURA 75 – VETORES DE VELOCIDADE. PLANO XZ, Y=0,1999M. CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES: TAS _{ZC} =179M/H; TAS _{ZS} =12,3M/H; TDH _{ZC} = 34s; H _{ÁGUA} =1,98M; AV =8,65G/M ³ ; D _B =75μM. CONDIÇÕES DE CONTORNO: SUPERFÍCIE D'ÁGUA= PAREDE POROSA SEM ATRITO; SAÍDA = 0 PA. 4A) RESULTADO NUMÉRICO, COM VETORES NORMALIZADOS. A IMAGEM DA DIREITA FOI RETIRADA DE PATRIZZI (2005).....	156

Sumário

RESUMO	11
ABSTRACT	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	13
LISTA DE TABELAS	15
LISTA DE FIGURAS	17
1. INTRODUÇÃO	25
2. OBJETIVO	28
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	29
3.2. FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO PARA TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO	29
3.3. ESTRUTURA DE FLUXO	31
3.4. TRABALHOS REALIZADOS PELO GRUPO	32
3.5. A FERRAMENTA CFD	33
3.6. CFD APLICADO À FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO	34
4. MATERIAL E MÉTODOS	37
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	37
4.2. ESTUDO DE CASO: UNIDADE PILOTO DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO	37
4.3. CONCENTRAÇÃO DE MICROBOLHAS DE AR	39
4.4. RECURSOS DE INFORMÁTICA UTILIZADOS	40
4.5. VALIDAÇÃO DO MODELO	40
4.6. GEOMETRIA	41
4.7. MALHA	46
4.8. DESCRIÇÃO DO MODELO	47
4.8.1. <i>Microbolhas de ar</i>	51
4.8.2. <i>Flocos</i>	54
4.9. CONDIÇÕES DE CONTORNO	55
4.9.1. <i>Entrada</i>	56
4.9.2. <i>Entrada de Recirculação</i>	60
4.9.3. <i>Saída</i>	64
4.9.4. <i>Superfície d'água</i>	66
4.10. GRADIENTE DE VELOCIDADE	67
4.11. PROGRAMAÇÃO DE ANÁLISES	70
4.11.1. <i>Etapa I</i>	70
4.11.2. <i>Etapa II</i>	72
4.11.3. <i>Etapa III</i>	73
4.11.4. <i>Etapa IV</i>	76
4.11.5. <i>Etapa V</i>	84
4.12. CONFIGURAÇÕES NO CFX	88
4.12.1. <i>Default Domain: Eulerian-Eulerian</i>	89
4.12.2. <i>Default Domain: Eulerian-Lagrangian</i>	90
4.12.3. <i>Boudary Conditions</i>	91
4.12.4. <i>Expressions – para as simulações com superfície livre</i>	94
4.12.5. <i>Global Initialization – para as simulações com superfície livre</i>	95

5. RESULTADOS	96
5.1. ETAPA I	96
5.2. ETAPA II	105
5.3. ETAPA III	105
5.3.1. <i>Simulação 3.1</i>	105
5.3.2. <i>Simulação 3.2</i>	108
5.3.3. <i>Simulação 3.3</i>	114
5.3.4. <i>Simulação 3.4</i>	117
5.4. ETAPA IV	126
5.5. ETAPA V	128
5.5.1. <i>Simulação 5.1</i>	128
5.5.2. <i>Simulação 5.2</i>	131
5.5.3. <i>Simulação 5.3</i>	134
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	138
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	140
APÊNDICE A – CÁLCULO DA MASSA ESPECÍFICA DO AR A 25°C, 96KPA E COM 100% DE SATURAÇÃO DE VAPOR D'ÁGUA	145
APÊNDICE B – RESULTADOS ETAPA II	148
APÊNDICE C – OUTRAS CONFIGURAÇÕES ESPECÍFICAS DO CFX UTILIZADAS	157

1. Introdução

A Flotação por Ar Dissolvido vem sendo utilizada há mais de 40 anos e é um importante processo de clarificação de água de abastecimento, adotada como alternativa para a sedimentação principalmente nos últimos 20 anos, devido ao grande número de vantagens apresentadas (EDZWALD; HAARHOFF, 2012). Dentre elas, a facilidade de remoção de partículas menos densas, que dificilmente sedimentam, como algas comumente presentes em águas de reservatórios eutrofizados. Assim como, este processo requer menor área em planta para sua instalação, obtendo altas eficiências de remoção de cor e turbidez, com maiores taxas de aplicação superficial. Mesmo com todas suas vantagens, ainda há algum preconceito na utilização da flotação, pois esta demanda operação mais complexa, em relação à sedimentação. O que constitui um entrave, principalmente no Brasil, onde os operadores das estações de tratamento não são bem qualificados.

Neste sentido, é de extrema importância o contínuo estudo e aperfeiçoamento da técnica, assim como das características físicas das unidades. Melhorando o conhecimento das variáveis de projeto, a formação mais eficiente de microbolhas, diminuindo a existência de zonas mortas e recirculação dentro do flotador, além de reduzir a influência de variações, tão comuns em escala real, na eficiência do processo.

O grupo de pesquisa de Tratamento Avançado e Reuso de Águas do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo é pioneiro na linha de pesquisa de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) no tratamento de águas para abastecimento. Este grupo possui uma unidade piloto de FAD de formato retangular de grande porte, a qual permite diversos ajustes de configurações geométricas e de operação. Diversos estudos já foram realizados nesta unidade, de modo a investigar a influência de diferentes parâmetros na eficiência da flotação, dentre os quais podem ser citados: Reali e Patrizzi (2007); Pioltine e Reali (2011); Maia, Pioltine e Reali (2012) e Escher, Reali e Pelegrino (2012). A presente pesquisa veio complementar os trabalhos já realizados pelo grupo, introduzindo o CFD, uma nova e potente ferramenta, de modo a enriquecer os conhecimentos na área de flotação.

CFD é a abreviação para Computational Fluid Dynamics, trata-se de uma ferramenta computacional para simulação do comportamento de sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e outros processos físicos relacionados. Até a década de 80, os

programas de CFD eram exclusivamente utilizados em pesquisas, pois demandavam muito tempo de processamento e necessitavam de computadores muito poderosos. Com o avanço da tecnologia o processo de modelação se tornou menos árduo, com reduzido tempo e custo, e estes fatores estabeleceram o CFD como uma ferramenta de projetos industriais, ajudando a otimizar o tempo de projeto. Dentre as possíveis aplicações do software podem ser citadas: tanques de mistura em processos industriais; ventilação de ambientes, investigação de efeitos do fogo e do cigarro, na área de saúde; modelos de combustão para motores e aerodinâmica de carros, aviões, navios, submarinos; dispersão de poluentes na água e no ar; hidrodinâmica em reatores; máquinas hidráulicas; entre outros (ANSYS, 2012).

A dinâmica dos fluidos computacional (CFD) é cada vez mais aplicada na investigação e aprimoramento de processos hidráulicos em tratamento de água para abastecimento. Vários estudos mostram que o CFD é uma poderosa ferramenta para otimização de câmaras de contato de ozônio, com melhoria na hidráulica e/ou na inativação microbiana. A eficiência de processos de desinfecção por UV também pode ser melhorada pelo uso da ferramenta (WOLS, 2012).

O emprego da dinâmica dos fluidos computacional para predição do escoamento de fluidos é de grande valia para o entendimento da estrutura de escoamento na flotação, assim como para avaliação da influência no escoamento da variação de parâmetros físicos e operacionais e para determinação da eficiência que certo sistema atingirá. Estas informações são muito importantes para a área de engenharia e para o tratamento de água para abastecimento, de modo a auxiliar no projeto, ampliação e melhorias de sistemas, e muitas vezes na diminuição do custo de unidades. O software pode ser utilizado para determinar o desempenho de sistemas tanto na etapa de desenvolvimento do projeto quanto para analisar dificuldades em sistemas existentes e, conseqüentemente, melhorar o seu *design*.

Portanto, a aplicação da ferramenta CFD para a FAD traz muitas vantagens no sentido de ajudar a entender cada vez melhor o processo. Os experimentos podem ser feitos com menos custos, pois não há necessidade de montagem e reforma de estações piloto para as pesquisas. Trata-se de uma ferramenta complementar à sonda ADV, informando o encaminhamento do escoamento dentro do flotador, sem interferências, porém com simplificações. Com a inserção de modelos de remoção de partículas no software, ele é capaz de propiciar análises quanto à eficiência de remoção de partículas, além da hidrodinâmica dos fluidos e correlacionar as duas.

Não restam dúvidas de que esta ferramenta estará cada vez mais presente nas aplicações de engenharia, sendo peça chave ou complementar em projetos e pesquisas. Conforme a dificuldade de modelação for sendo reduzida, o desenvolvimento de softwares mais amigáveis e novos modelos sendo agregados a estes, assim como a redução do tempo computacional e desenvolvimento de computadores mais potentes. Por estes motivos, os estudos de aplicação de softwares CFD voltados para a Flotação por Ar Dissolvido são tão importantes, pois testam a aplicação de diferentes modelos e variáveis para representação computacional do processo, de forma a ajustar o modelo e torná-lo cada dia mais fidedigno, objetivando o momento em que este poderá ser aplicado para diversas condições de operação de flotores sem a realização de muitos testes adicionais.

Os estudos aplicando CFD nesta área ainda são relativamente poucos no exterior. O presente trabalho é o primeiro no Brasil e teve a intenção de trazer alguma contribuição à área, mesmo que singela.

2. Objetivo

Os objetivos do presente trabalho foram:

- Adequar o modelo da ferramenta CFD para representação da estrutura de escoamento no interior das Zonas de Contato e de Separação de uma unidade piloto de flotação por ar dissolvido com formato retangular em planta;
- Comparar os resultados obtidos através das simulações com CFX com os resultados obtidos experimentalmente por Patrizzi (2005) e Escher (2011) utilizando sonda microADV;
- Realizar simulações de outras conformações geométricas de instalação piloto utilizando o CFX.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Considerações Iniciais

A flotação é um mecanismo de separação de partículas ou outro fluido da água, através da utilização de bolhas de ar que colidem e aderem às partículas, fazendo com que estas subam à superfície do tanque e, assim, possam ser removidas (EDZWALD ; HAARHOFF, 2012). Esta técnica é largamente empregada em processos de tratamento de águas para abastecimento, águas residuárias urbanas e industriais, além de ser utilizada na extração de minérios importantes na indústria de mineração.

Existem três métodos de flotação, os quais são diferenciados pela técnica empregada para a geração de bolhas. No método de flotação por ar disperso ocorre a formação de bolhas relativamente grandes, na faixa de 0,3 a 2,0 mm de diâmetro, pela introdução de ar comprimido através de placas porosas na parte inferior do tanque ou por introdução de ar em sistema submetido a agitação intensa. No método de flotação eletrolítica ou eletro-flotação, as bolhas de ar são oriundas da eletrólise da água, através da aplicação de uma corrente elétrica entre pares de eletrodo localizados no fundo do reator, formando microbolhas de oxigênio e hidrogênio, cujo tamanho é o menor dentre as outras técnicas. Já na flotação por ar dissolvido (FAD), método escopo do presente trabalho, ocorre a liberação de microbolhas de ar provenientes de parcela do gás previamente dissolvido na massa líquida, devido ao abaixamento de pressão a que estava submetido este líquido (REALI, 1991).

3.2. Flotação por Ar Dissolvido para tratamento de água para abastecimento

O processo de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) é, atualmente, bem reconhecido e bastante utilizado em estações de tratamento de água, antecedendo a fase de filtração. Para esta aplicação, as bolhas de ar são formadas pela redução de pressão de parcela do efluente já clarificado, recirculado e saturado com ar. Segundo Reali (1991), o uso do efluente na recirculação é feito, ao invés de parte do afluente, para evitar o cizalhamento dos flocos frágeis formados pela prévia coagulação e floculação das partículas.

Antes do processo de flotação, a água deve ser apropriadamente coagulada respeitando valores adequados de pH e dosagens de coagulante, para desestabilização das impurezas. Com a finalidade de removê-las, agregados maiores devem ser formados, os flocos, através da floculação (REALI; PATRIZZI, 2007). Diferentemente da sedimentação,

são desejáveis flocos menores, de modo que estes não sedimentem e formem agregados mais estáveis com as microbolhas (EDZWALD ; HAARHOFF, 2012).

A remoção das partículas é feita pela aderência de microbolhas na superfície das mesmas, formando os agregados floco-bolha. As microbolhas aderidas aumentam o empuxo dos flocos, provocando sua ascensão à superfície d'água, onde são removidos (REALI, 1991). Para que ocorra a formação do agregado, devem acontecer colisões entre microbolhas e flocos e estas devem ser eficientes. A aderência das bolhas nas partículas depende de diversos fatores, entre eles, o ângulo de contato, que é dependente da hidrofobicidade do sólido, e a carga superficial das bolhas (KITCHENER, 1982¹ *apud* REALI, 1991; JAMESON, 1984² *apud* REALI, 1991).

Quando comparada com a sedimentação, a FAD é um melhor candidato para remodelações e ampliações com restrições de espaços, pois é um processo adaptável para várias formas e tamanhos geométricos. Os fatores responsáveis por esta adaptabilidade são reduzida dependência de condições de entrada e reduzida vulnerabilidade em relação a gradientes de densidade causados por mudanças de temperatura, salinidade, ou sólidos suspensos. Além disso, a profundidade requerida para flotação é menor do que para decantação e não há necessidade de espaço extra para armazenamento de lodo, já que o lodo produzido na flotação é constantemente ou intermitentemente removido (EDZWALD ; HAARHOFF, 2012).

Tal flexibilidade de configurações e operação representa um excelente campo de aplicação de softwares de CFD. Com esta ferramenta reatores problemáticos já implementados podem ser modelados, diagnosticados e diversas alternativas de solução podem ser testadas virtualmente antes do investimento. Assim como, durante a etapa de projeto, diversas configurações podem ser simuladas para obtenção da melhor opção para as disponibilidades de espaço e recursos. Possibilitando, desta forma, o aumento da eficiência dos sistemas de tratamento de água para abastecimento.

¹ KITCHENER, J.A. **The froth flotation process: past, present and future.** In: Nato Advanced Institute on the Scientific Bases of Flotation, Cambridge, England, July 5-6, 1982. Proceedings: Ed. by K.J. Ives. The Hague Martinus Nijhoff, 1984 p. 3-51. (NATO ASI Series).

² JAMESON, G.J. **Physics and hidrodinamics of bubbles.** In: Nato Advanced Institute on the Scientific Bases of Flotation, Cambridge, England, July 5-6, 1982. Proceedings: Ed. by K.J. Ives. The Hague Martinus Nijhoff, 1984 p. 53-78. (NATO ASI Series).

3.3. Estrutura de fluxo

O reator de flotação por ar dissolvido possui dois compartimentos com funcionalidades diferentes no processo. A primeira região é chamada de Zona de Contato e é uma região de reação, na qual há grande turbulência, possibilitando a colisões de diversas microbolhas com os flocos. Caso estas colisões sejam eficientes, há a formação do agregado. A segunda região é subsequente a primeira e é conhecida como Zona de Separação, neste compartimento ocorre a separação dos agregados da água clarificada e ascensão das microbolhas remanescentes. Ainda há a possibilidade de colisões, mas em quantidade bem menor em comparação às ocorridas na zona anterior.

Reali e Patrizzi (2007) estudaram a influência da taxa de aplicação superficial (TAS_{ZC}) e do tempo de contato (T_{ZC}) na Zona de Contato na eficiência de remoção de turbidez e cor e na estrutura de escoamento. A estrutura de fluxo foi avaliada por meio de sonda ADV e caracterizada pela disposição dos vetores de velocidade. As regiões foram consideradas de mistura quando os vetores apresentam turbulência ou recirculação e de escoamento tipo *plug-flow* quando os vetores estavam igualmente distribuídos através da seção. Os resultados mostraram que maiores TAS_{ZC} induziam escoamentos mais tendenciosos a *plug-flow*, mas ainda assim com considerável mistura, e maiores eficiências de remoção de cor e turbidez. Estas conclusões foram semelhantes às obtidas por Shawwa et al (1998).

Para a mesma TAS_{ZC} , a diminuição do tempo de contato, causou diminuição da eficiência, porém seu aumento indefinido também acarretou decréscimo em desempenho, revelando a existência de um ponto ótimo, ou faixa ótima, para cada TAS_{ZC} e que este valor ótimo de T_{ZC} diminui com o aumento da TAS_{ZC} . A possível explicação atribuída a este fato pelos autores supracitados é que o T_{ZC} alto levou à aglutinação excessiva de bolhas, causando carência na formação de agregados floco-bolha estáveis (REALI ; PATRIZZI, 2007).

A estrutura de fluxo na Zona de Separação varia de acordo com a TAS_{ZS} e com a concentração de ar (A/V). Para TAS_{ZS} baixas, menores de 10m/h, o padrão do escoamento é bem simples. A água adentra a Zona de Separação e segue em uma estreita camada horizontal em direção a parede à frente, durante este trajeto perde a velocidade e ao encontrar a parede é defletida e se encaminha para baixo, para a saída do flotador. Este comportamento foi comprovado por medidas de ADV e modelação por CFD (HAGUE *et al*, 2001b). Em TAS_{ZS} altas, ocorre a estratificação do escoamento. Quando a água deflete na parede à frente, outra

camada horizontal de escoamento é formada, com fluxo de retorno. Abaixo destas duas camadas, a água segue verticalmente para baixo. (Haarhoff ; Edzwald, 2004).

Escher (2011) realizou medições com sonda microADV na Zona de Separação de unidade piloto, para três diferentes valores de recirculação (concentração de ar). Seus resultados demonstraram não haver estratificação horizontal na parte superior, contrário ao descrito por Edzwald (2010). As conclusões foram de que tal fato pode ser consequência dos valores de TAS utilizados, que foram menores em relação aos recomendados pelo autor, devido à limitada altura da Zona de Separação. As estruturas de escoamento nos três casos estudados foram bem parecidas, apresentando curto-circuito e fluxo de retorno, e com apenas algumas diferenças, principalmente em relação à espessura da região superior. A explicação atribuída à ocorrência de curtos-circuitos foi de que, segundo Lundh *et al* (2001), estes são causados pela associação de baixas concentrações de ar a altos valores de TAS na Zona de Separação. Apesar da semelhança dos escoamentos na Zona de Separação, os resultados de eficiência obtidos foram distintos para cada recirculação empregada, levando a autora a concluir que a variação da porcentagem de recirculação tenha sido mais impactante no escoamento dentro da Zona de Contato.

3.4. Trabalhos realizados pelo grupo

O grupo de pesquisa de Tratamento Avançado e Reuso de Águas do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo é pioneiro na linha de pesquisa de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) no tratamento de águas para abastecimento. A seguir são apresentados alguns dos trabalhos desenvolvidos nos últimos dez anos pelo grupo de pesquisa citado:

- Remoção de Ferro, Manganês e Substâncias Húmicas de água para abastecimento, com uso de Flotação por Ar Dissolvido de Alta Taxa e Oxidação Química. Trabalho desenvolvido no doutorado de Leila J. Patrizzi, em 2002;
- Avaliação da influência da distribuição de tamanho de partículas e do binômio velocidade/tempo de detenção na zona de reação no desempenho da Flotação com utilização de sonda ultrasônica e técnica de análise por imagem. Tese de doutorado de Rodrigo B. Moruzzi, em 2005;

- The Influence of the Contact Zone Configuration on the Efficiency of a DAF Pilot Plant. Artigo apresentado na Internacional Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems, na Coréia em 2007, por Leila J. Patrizzi e Marco A. P. Reali;
- Influência da velocidade *Cross-Flow* na Câmara de Flotação na eficiência de unidades de Flotação por Ar Dissolvido tratando água para abastecimento. Trabalho realizado no mestrado de Cláudio Jr. Araújo, em 2010;
- Influência da velocidade de entrada na Zona de Contato na eficiência de clarificação de unidades retangulares de Flotação por Ar Dissolvido aplicado no tratamento de águas para abastecimento. Pesquisa realizada no mestrado de Kisner A. Maia, em 2010;
- Influência da taxa de aplicação superficial e da concentração de ar na eficiência de clarificação de água para abastecimento em unidades de Flotação por Ar Dissolvido. Dissertação de mestrado de Aline E. Escher, em 2011;
- Influência do gradiente médio de velocidade na zona de contato na eficiência de clarificação de água para abastecimento por flotação. Dissertação de mestrado de Irene M. da Franca Souza, em 2012;
- Influência do tamanho de partículas floculadas na eficiência de clarificação de águas para abastecimento por flotação. Tese de doutorado de André Pioltine, em 2013.

3.5. A ferramenta CFD

O funcionamento do software que foi utilizado nesta pesquisa, ANSYS CFX, é baseado na resolução de equações de escoamento de fluido sobre uma região de interesse (volume de controle), com condições especificadas de contorno, utilizando o método numérico dos volumes finitos (ANSYS, 2012).

As etapas de sua utilização são compreendidas por: identificação da região de interesse e sua geometria, criação da malha, definição das condições de contorno e propriedades do fluido. No CFD é definido como domínio computacional a região do espaço em que as equações de fluxo de fluido ou transferência de calor são resolvidas. O tipo de domínio pode ser fluido, poroso ou sólido e há a possibilidade de divisão da geometria em vários domínios ou subdomínios. Com essas informações o software é executado e gera um arquivo com resultados de variação de velocidade, pressão e várias outras variáveis. Os resultados podem ser visualizados graficamente e animações podem ser produzidas, de modo

a prover ao usuário o entendimento do comportamento do fluido através da região de interesse (ANSYS, 2012). A Figura 1 mostra um esquema das etapas da modelação utilizando CFD.

Figura 1 - Visão geral das etapas de modelação por CFD. Adaptado de ANSYS, 2012.

3.6. CFD aplicado à Flotação por Ar Dissolvido

No sentido de ampliar o conhecimento sobre o processo da flotação, diversos estudos têm sido realizados, como a caracterização do escoamento por dados experimentais coletados por sondas LDV (Laser Doppler Velocimeter) ou ADV (Acoustic Doppler Velocimeter). Entretanto, estes métodos experimentais apresentam suas dificuldades de execução, assim como, necessitam da introdução do equipamento dentro do fluxo. Consequentemente, os estudos voltados para a Dinâmica dos Fluidos Computacional são cada vez mais frequentes (BONDELIND, 2012).

Dentre as modelagens já realizadas para a Flotação por Ar Dissolvido, as diferenças encontradas são pequenas. As variações são, geralmente, em relação à quantidade de fases

introduzidas e em relação às dimensões da geometria, consequência principalmente, da capacidade computacional disponível e do software empregado para os estudos. As dimensões usuais são em 2D, 3D estreito e 3D. Já o escoamento é modelado com apenas uma fase (água), duas (água e microbolhas), três (água, microbolhas e flocos) ou até quatro fases (água, microbolhas, flocos e agregados bolhas-floco). Sendo o último modelo mais raro, devido a limitações de capacidade computacional e carência de conhecimentos físicos do escoamento multifásico e da formação do agregado bolhas-floco (BONDELIND, 2012).

Nas simulações multifásicas, o modelo de interação entre as fases tem sido realizado por duas abordagens. A abordagem *Eulerian-Lagrangian* rastreia as fases dispersas e a *Eulerian-Eulerian* trata as fases como contínuos separados (ANSYS, 2012), sendo a última mais comumente utilizada. A Tabela 1 reúne os trabalhos disponíveis na área de CFD aplicado à flotação.

Dentre os estudos com aplicação da ferramenta CFD para simulação da Flotação por Ar Dissolvido, Guimet *et al* (2007) encontrou concordância entre os resultados obtidos computacionalmente com os experimentais de Lundh (2000³, apud Guimet *et al*, 2007). O modelo dos autores contemplou a definição do parâmetro de bolhas para reproduzir o equilíbrio entre as forças de empuxo e arrasto, através do diâmetro das bolhas, levando à estratificação na Zona de Separação. As simulações foram realizadas em 2D monofásico e bifásico.

Kostoglou *et al* (2007) constataram, através das simulações, a existência de uma complexa interação entre a hidrodinâmica do tanque e as taxas locais de flotação que resultava em eficiências de remoção de partículas que não poderiam ser previstas pela teoria da flotação apenas.

Ta *et al* (2001) realizaram simulação em 3D de um tanque em escala real com vazão de 16,75 Ml/d e taxa de 8,5m/h. Os autores primeiro simularam apenas água e ar, pelo modelo Eulerian-Eulerian, e depois adicionaram as partículas utilizando modelo Lagrangian. O padrão geral de escoamento foi comparado por meio de uma câmera submersa e medições por sonda ADV. A comparação dos resultados simulados com os resultados experimentais mostrou que o modelo foi capaz de prever o fluxo dominante próximo à superfície d'água, porém o fluxo reverso logo abaixo da superfície d'água não foi predito. A comparação

³ LUNDH, M. **Flow Structure in dissolved air flotation – Experimental study in a pilot plant**. Licenciante thesis, Department of water and environmental Engineering, Lund Institute of Technology, 2000.

qualitativa com as imagens foi concordante. O modelo, porém, necessita de investigações adicionais.

Tabela 1 – Trabalhos disponíveis no campo de modelos numéricos para flotação. Adaptado de Bondelind (2012).

Referência	Software		Escala ^a		Dimensão			Turbulência ^b			Fases ^c		
	CFX	Fluent	Real	Piloto	2D	3D estreito	3D	Laminar	k-ε	k-ω	monofásico	bifásico	trifásico
Ta <i>et al.</i> (1996)				V								E	
Ta; Brignal (1997)				V									
Fawcett (1997)*												E	
Crossley <i>et al.</i> (1999)												L	
Hague <i>et al.</i> (2001b)**				V									
Hague <i>et al.</i> (2001a)				V					2			E	
Ta <i>et al.</i> (2001)			V						2			E	L
Kwon <i>et al.</i> (2006)			V						3			E	
Guimet <i>et al.</i> (2007)				V					4			E	
Emmanouil <i>et al.</i> (2007)												LME	
Kostoglou <i>et al.</i> (2007)													M
Amato; Wicks (2009)			V						1			E	
Bondelind <i>et al.</i> (2010b)				V								L	
Bondelind <i>et al.</i> (2010a)				V								L	
Emmanouil <i>et al.</i> (2011)												LE	M
Lakghomi <i>et al.</i> (2012)				V								M	
Bondelind <i>et al.</i> (2012b)				V									LE

(*) Modelo de turbulência não declarado claramente,

(**) Dimensões não declaradas claramente,

(a) Escala: (V) Validados com dados experimentais,

(b) Turbulência: (1) RNG k-ε; Para o ar: (2) Laminar e k-ε, (3) Equação Zero, (4) Teoria de Tchen,

(c) Fases: (L) Modelo Eulerian-Lagrangian, (M) Modelo de mistura, (E) Modelo Eulerian-Eulerian

4. Material e Métodos

4.1. Considerações Iniciais

O presente trabalho compreendeu o emprego de software de CFD para caracterização da estrutura de escoamento no interior de uma instalação piloto de Flotação por Ar Dissolvido de grande porte, com capacidade para operar com até 8 m³/h, alimentada com água bruta (“sintética”) proveniente de sistema de armazenamento com 60 m³ de capacidade. A unidade piloto em questão já foi utilizada para o desenvolvimento de outros projetos de pesquisa e apresenta grande versatilidade, permitindo a variação de características de projeto e operação, conforme descrito mais adiante.

4.2. Estudo de Caso: Unidade Piloto de Flotação por Ar Dissolvido

A unidade piloto de flotação por ar dissolvido que foi representada neste trabalho compreende os processos de coagulação, floculação e flotação. A coagulação é realizada por meio de mistura rápida “in line”, em um injetor acoplado à tubulação que possui em seu interior chapas metálicas em formato helicoidal. Os produtos químicos utilizados são sulfato de alumínio para coagulação e carbonato de sódio (barrilha) para controle do pH. Estes são armazenados em dois reservatórios com capacidade de 250 litros cada, equipados com agitadores para homogeneização, e dosados por meio de bombas dosadoras.

A floculação é realizada na câmara de floculação, que possui quatro compartimentos em série, contendo misturadores verticais. A câmara de flotação é dividida em duas zonas, a Zona de Contato, onde ocorre o encontro entre a água floculada e a água recirculada, resultando nos aglomerados floco-bolha, e a Zona de Separação, onde há a separação entre a água tratada e o lodo gerado. Na parte inferior da Zona de Separação existe um dispositivo tipo manifold que faz com que a água clarificada seja encaminhada ao vertedor triangular de saída, neste ponto ocorre também a alimentação da câmara de saturação. O esquema da unidade encontra-se na Figura 2 e suas medidas na Figura 3.

Figura 2 - Esquema da unidade piloto de FAD. Adaptado de REALI; PATRIZZI, 2007.

Figura 3 – Desenho da unidade piloto de FAD com suas medidas, todas em metros. Adaptado de PATRIZZI, 2005.

As microbolhas são geradas com auxílio de câmara de saturação, a qual recebe o fluxo de água de recirculação e ar comprimido do compressor, e três válvulas agulha instaladas na parte inferior da zona de contato.

A água bruta utilizada é armazenada em quatro reservatórios com capacidade de 15 m³ cada, com agitadores de eixo vertical, de modo que a água possa ser preparada nos próprios reservatórios pela adição de ácido húmico comercial e caulinita em dosagens previamente determinadas em laboratório, e mantida sob agitação contínua ao longo de todo o período de experimentos. O sistema ainda conta com um aquecedor a gás “*in-line*” instalado na mistura rápida com função de aquecer a água, em dias muito frios, e mantê-la com temperatura desejada para operação.

Esta unidade piloto permite alguns ajustes de modo a contemplar diferentes dimensões e parâmetros para a flotação. Seguem citados os possíveis ajustes. Alteração da vazão de entrada na unidade, do gradiente de floculação e do comprimento da Zona de Contato e da Zona de Separação. A existência de uma comporta entre a Câmara de Floculação e a Câmara de Flotação permite a alteração da velocidade de entrada na Zona de Contato e, conseqüentemente, a geração de diferentes gradientes médios de velocidade. Possibilidade de alteração da altura do vertedor de saída, a qual resulta na variação do nível d’água e, portanto, na alteração da área de passagem da Zona de Contato para a Zona de Separação, modificando a velocidade cross-flow.

4.3. Concentração de microbolhas de ar

Durante as simulações deste trabalho, foram aplicadas diferentes razões de recirculação de água, de forma a variar a concentração de microbolhas no reator. A determinação dos valores de concentração de ar após a mistura da água floculada com a de recirculação foi calculada pela Equação (1), proposta por Edzwald (2010).

$$\frac{A}{V} = \left[\frac{f * (P + 101,3)}{K_H} - \frac{P_{atm}}{K_H} \right] * \frac{R}{(1 + R)} \quad (1)$$

Onde:

$\frac{A}{V}$: concentração de microbolhas de ar após a mistura da vazão de recirculação com a vazão de água floculada [g de ar/m³ de água];

f : fator de eficiência da câmara de saturação utilizada na unidade piloto (igual a 0,9);

P : pressão relativa [KPa] (pressão da câmara de saturação, igual a 441,3 KPa);

P_{atm} : pressão atmosférica [KPa] (igual a 96 KPa para a cidade de São Carlos-SP);

K_H : constante de Henry [KPa/mg.l] (igual a 4,531 KPa/mg.l para 25°C);

R : razão de recirculação.

A Tabela 2 apresenta a concentração de microbolhas de ar na Zona de Contato para cada uma das razões de recirculação estudadas.

Tabela 2 – Concentração de microbolhas de ar na Zona de Contato para cada razão de recirculação estudada

R (%)	A/V (g de ar/m³ de água)
5,3	4,36
6	4,90
8	6,41
10	7,87
11,1	8,65

4.4. Recursos de informática utilizados

Para realização dos testes computacionais foram utilizados o programa ANSYS CFX 13.0 e um cluster pertencente ao Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos, coordenado pelo professor Paulo Seleglim Jr. da Escola de Engenharia de São Carlos. O cluster empregado é um SGI Altix XE Cluster, composto por dez nós de processamento, sendo seis nós com dois processadores Intel Xeon X5650 e quatro nós com dois processadores Intel Xeon E5-2660, totalizando 136 cores para processamento e 272 GB de RAM. Para capacitação no software, foi realizado em setembro de 2011 o curso ANSYS CFX – Introdução, ministrado pela própria ANSYS.

4.5. Validação do Modelo

A validação do modelo numérico com resultados experimentais é importante para auxílio da interpretação dos resultados computacionais, a qual deve ser feita com cuidado. Há vantagens em se aliar análises experimentais com as simulações, no sentido de se fornecer os dados requeridos para formulação do modelo com base em estudos experimentais prévios.

Assim como, para definição das melhores seções da unidade para realização das medições (BONDELIND, 2012).

A validação do modelo descrito nos tópicos anteriores foi feita com base nas pesquisas de Escher (2011) e Patrizzi (2005), que realizaram medidas com sonda MicroADV na UPFAD em estudo.

Escher (2011) realizou três análises com sonda MicroADV na seção média longitudinal do tanque ($y=0,2m$), na Zona de Separação, para três razões de recirculação de 6, 8 e 10%, mantendo os outros parâmetros constantes. Foram realizados 98 pontos de amostragem, numa grade de 7 pontos igualmente espaçados no comprimento e 14 pontos igualmente espaçados na altura. O tempo de amostragem foi de 2 min com frequência de amostragem de 50Hz em cada ponto de coleta. As tomadas foram realizadas em fluxo bifásico, com apenas água de poço e microbolhas. Os resultados apresentados aqui são apenas os utilizados para validar o modelo e maiores detalhes sobre como foram realizadas as análises podem ser encontrados em Escher (2011).

Patrizzi (2005) realizou diversas análises com sonda MicroADV em diferentes seções, em ambas zonas do tanque. Foram reproduzidas duas configurações de Zona de Contato e de Zona de Separação e duas razões de recirculação de 5,3 e 11,1%. O tempo de amostragem foi de 1 min com frequência de amostragem de 50Hz por ponto. As tomadas foram realizadas em fluxo com quatro fases: água, microbolhas, flocos e agregados. Os resultados apresentados aqui são apenas os utilizados para validar o modelo e maiores detalhes sobre como foram realizadas as análises podem ser encontrados em Patrizzi (2005).

4.6. Geometria

As simulações foram realizadas diretamente em 3D, devido à inexistência de modelo 2D no CFX, o software apresenta apenas uma falso 2D ou 3D estreito, no qual a largura é representada pela unidade. Outro fator decisivo para esta escolha foi a conclusão de Bondelind *et al* (2010a) de que o modelo bi-dimensional falha na replicação do escoamento na Zona de Contato, pois o fluxo das válvulas de dispersão impõe um escoamento nas três dimensões com bastante mistura, exigindo o uso do modelo tri-dimensional.

Foi escolhido como volume de controle para as simulações apenas o reator de flotação da UPFAD, compreendendo a Zona de Contato e a Zona de Separação.

Ao decorrer das simulações foram utilizadas seis geometrias, com as características e dimensões mostradas a seguir. O eixo x foi alocado no comprimento horizontal da unidade de flotação, o eixo y na largura horizontal e o eixo z na altura vertical da unidade. Apesar das diferenças entre as geometrias utilizadas, o ponto (0,0,0) do eixo de coordenadas foi mantido na mesma posição e a largura teve valor constante de 0,4 m.

Geometria I

Figura 4 – Dimensões da Geometria I, valores em metros.

Geometria IV

Figura 7 - Dimensões da Geometria IV, valores em metros.

Geometria VI

Figura 9 - Dimensões da Geometria VI, valores em metros.

As geometrias do tanque de FAD foram desenvolvidas no Design Modeler e as malhas no Meshing, ambos programas da ANSYS. Vale ressaltar que para a aplicação em CFD, o volume representado é o ocupado pelo fluido, ou seja, não há a representação de paredes, usual em desenhos técnicos.

4.7. Malha

A unidade piloto foi representada por malha constituída por células do tipo trapezoidais com refinamento próximo às paredes do tanque, para melhor representação dos efeitos de parede no escoamento. Os parâmetros utilizados para verificação da qualidade da malha foram a Razão de Aspecto Média e a variável Yplus. A primeira era calculada logo após a geração da malha, sendo a média das relações base por altura de cada elemento da

malha. Seu valor foi mantido menor do que cinco, sendo mais ideal quão mais próximo da unidade. Já a variável Yplus representa a distância adimensional da parede, checando a localização dos nós mais próximos da parede, de forma a garantir que as alterações na turbulência sejam captadas. Para o modelo de turbulência k-epsilon utilizado, o intervalo recomendado para Yplus é entre 30 e 300 (ANSYS, 2012). Tal variável foi plotada na parte externa da geometria, na etapa de pós-processamento, e mantida entre os valores recomendados em grande parte da geometria. As regiões próximas aos orifícios de entrada de recirculação e saída apresentaram valores menores de 30 devido ao pequeno tamanho dos elementos de malha próximos a estes, porém não representam prejuízo ao modelo.

4.8. Descrição do Modelo

O ponto de partida da modelação computacional é a descrição do escoamento da água no interior do reator. As equações que descrevem o comportamento dos fluidos são as equações da continuidade e da conservação de quantidade de movimento. A primeira (Equação (2)) garante que nenhuma quantidade de matéria é criada ou destruída dentro do volume de controle, entendido no CFX como o domínio computacional. A segunda é descrita pela equação de Navier-Stokes, que relaciona os componentes da tensão com a taxa de deformação. As equações de Navier-Stokes foram derivadas a partir da segunda Lei de Newton e podem ser simplificadas para o problema em questão, considerando escoamento incompressível com viscosidade constante, conforme Equação (3) (FOX,2012; POTTER ; WIGGERT, 2004; BONDELIND, 2011).

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{DU_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + g_i \quad (3)$$

Onde:

P : pressão;

U_i : velocidade;

ν : viscosidade cinemática;

g_i : aceleração da gravidade.

A resolução destas equações descreve o comportamento do fluido, porém a turbulência, uma importante propriedade do escoamento, requer cuidado especial, uma vez que atua em diferentes escalas espaciais, desde as macro até as micro-escalas. Para resolver a turbulência em todas estas escalas é necessário trabalhar com malhas extremamente refinadas, demandando extenso tempo computacional. Consequentemente, para reduzir o esforço computacional é usual a adoção de modelos de turbulência para sua resolução de forma aproximada (WOLS, 2012).

Existem duas principais abordagens para modelação da turbulência. Uma delas envolve as equações de Navier-Stokes aplicadas sobre o conceito de média temporal de Reynolds (RANS – *Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations*). A aplicação do conceito de média temporal resulta em um termo conhecido como tensor de Reynolds, a modelação desse termo pode ser feita por diferentes modelos, o mais utilizado deles, utiliza duas equações e se baseia no conceito de viscosidade turbulenta que pode ser modelado matematicamente como função de K e ε , respectivamente energia cinética turbulenta, definida como a variação das flutuações na velocidade, e dissipação viscosa da energia cinética turbulenta, a taxa em que ocorre a dissipação das flutuações da velocidade (BONDELIND, 2011; ANSYS, 2012).

O método de simulação de larga escala (LES – Large Eddy Simulation) é outra abordagem comumente utilizada para a modelação da turbulência. Esse método resolve as grandes escalas de turbulência (escalas maiores ou iguais à ordem de grandeza da malha), enquanto utiliza uma simplificação para as pequenas escalas (modelo de sub-escalas). Esse método apresenta maior custo computacional, se comparado ao método k - ε , pois resolve movimentos turbulentos variáveis no tempo e, desta forma, apresenta resultados mais fidedignos. A escolha de uma ou outra abordagem deve-se basear no balanço entre o custo computacional e a importância no detalhamento da turbulência para o fenômeno em estudo (WOLS, 2012).

Figura 10 - Diferenças no perfil de velocidade entre os modelos LES e k-ε. Fonte: WOLS, 2012.

O modelo k-ε apresenta inúmeras variações e tem sido frequentemente utilizado para aplicações de engenharia, sendo o modelo de turbulência mais bem conhecido atualmente. Nas aplicações de CFD para flotação também é o mais utilizado. Ta *et al* (2001) testou a aplicação do modelo laminar, k-ε e outros para a fase dispersa, ar, e o segundo foi o que representou melhor o escoamento multifásico. Portanto, para representação da turbulência este foi o modelo designado.

O modelo k-ε introduz duas novas variáveis no sistema de equações, deste modo, a Equação da continuidade se torna (ANSYS, 2012):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (4)$$

Por sua vez, a Equação de Quantidade de Movimento fica da seguinte forma:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad (5)$$

Onde:

S_M : Somatório de forças no corpo;

μ_{eff} : Viscosidade efetiva contabilizada para a turbulência;

p' : Pressão modificada definida, para fluidos incompressíveis, por:

$$p' = p + \frac{2}{3}\rho k \quad (6)$$

A viscosidade efetiva corresponde à soma da viscosidade com a viscosidade turbulenta (μ_t):

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (7)$$

Por fim, a viscosidade turbulenta é definida pela Equação (8);

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

Onde:

C_μ : Constante adimensional;

k : Energia cinética turbulenta [m^2/s^2];

ε : Taxa de energia dissipada por unidade de massa [J/kg.s ou m^2/s^3];

As equações de k e ε utilizadas no modelo são (ANSYS, 2012):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb} \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{\varepsilon b}) \quad (10)$$

P_{kb} e $P_{\varepsilon b}$ contabilizam os efeitos do empuxo na turbulência. A turbulência gerada devido às forças viscosas (P_k) é modela segundo:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \left(3\mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \quad (11)$$

$C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k e σ_ε são constantes e seus valores estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores das constantes do modelo de turbulência k-ε. Fonte: ANSYS, 2012.

Símbolo	Valor
C_μ	0,09
$C_{\varepsilon 1}$	1,44
$C_{\varepsilon 2}$	1,92
σ_k	1,0
σ_ε	1,3

Nas regiões próximas às paredes, onde os efeitos viscosos são dominantes, as propriedades do escoamento não são corretamente previstas pelos modelos de turbulência. Para contornar este problema são adicionadas funções de parede, que introduzem regras específicas para determinação de k e ε , no modelo k - ε por exemplo. (KUNDU; COHEN, 2002). Os resultados obtidos por estes modelos são dependentes do ponto mais próximo da parede e do refinamento da malha nestas regiões. Neste trabalho, utilizou-se o modelo de função escalável (*Scalable Wall Functions*) implementado no software utilizado. Este modelo apresenta a vantagem de aferir a qualidade dos resultados, para a malha utilizada, através da análise de uma variável específica denominada Y_{plus} (y^+), o qual garante a inexistência de inconsistência para as funções de parede (ANSYS, 2012).

O modelo escolhido para contabilizar as forças adicionais de empuxo foi o *Density Difference*, o qual considera as diferentes densidades entre as fases e é a opção padrão para escoamentos multifásicos (ANSYS, 2012).

$$F_{\alpha} = (\rho_{\alpha} - \rho_{ref}) \cdot g \quad (12)$$

Onde:

F_{α} : Força empuxo em α ;

ρ_{α} : Massa específica do fluido α ;

ρ_{ref} : Massa específica do fluido de referencia, neste caso a água, por ser o fluido contínuo;

g : Aceleração da gravidade.

Para a caracterização do escoamento dos outros fluidos presentes na flotação, o Modelo Não Homogêneo foi selecionado, permitindo que cada fluido possua seu próprio campo de fluxo e que os fluidos interajam através de termos de transferência interfases, sendo os campos de solução separados para cada fase. A seguir são apresentados os modelos e variáveis utilizados para as microbolhas e flocos.

4.8.1. Microbolhas de ar

Na UPFAD, assim como em todas as unidades de flotação por ar dissolvido, a formação de microbolhas ocorre pela diferença de pressão devido à injeção dentro do reator de fluxo de recirculação pressurizado com ar dissolvido, por meio de válvulas agulha. A representação de tal fenômeno de formação de microbolhas consumiria muito tempo

computacional e devido a sua curta duração, foi considerado durante as simulações que o fluxo de recirculação era composto por água mais microbolhas, todas de mesmo diâmetro, assim como realizado por Kostoglou (2007) e Bondelind (2011).

Outra consideração feita com relação às microbolhas com o intuito de simplificar o modelo, foi a de que não ocorrem interações entre as microbolhas ao longo de seu percurso dentro do tanque, ou seja, não ocorre aglutinação de bolhas e estas permanecem com o mesmo diâmetro de entrada.

Para a análise do comportamento do escoamento de fluidos, num determinado volume de controle, podem ser utilizadas as abordagens de Euler ou Lagrange. Na primeira, as variáveis de interesse são calculadas em pontos específicos do espaço, enquanto na segunda, partículas de fluido são acompanhadas, assim como suas variáveis, ao longo de seu trajeto dentro do domínio.

O modelo utilizado para simulação do escoamento das microbolhas no interior da unidade piloto de flotação foi o *Eulerian-Eulerian*, baseado na abordagem de Euler, com sub-modelo *Particle Model* responsável por representar os termos de transferência entre ar e água. As forças de empuxo também foram contabilizadas através do modelo *Density Difference*.

O coeficiente de arrasto C_D foi modelado por Ishii-Zuber (ISHII; ZUBER, 1979; ANSYS, 2012):

$$C_D = \frac{24}{Re_m} (1 + 0,15 Re_m^{0,687}) \quad (13)$$

$$Re_m = \frac{\rho_c |U_d - U_c| d_p}{\mu_m} \quad (14)$$

$$\frac{\mu_m}{\mu_c} = \left(1 - \frac{r_d}{r_{dm}}\right)^{-2,5 r_{dm} \mu_*} \quad (15)$$

r_{dm} : Máximo empacotamento, com valor padrão igual à unidade para fase de fluido disperso;

$$\mu_* = \frac{\mu_d + 0,4 \mu_c}{\mu_d + \mu_c} \quad (16)$$

Conforme simulações preliminares foram sendo testadas com as configurações de modelo acima citadas, notou-se que o tamanho das microbolhas influenciava consideravelmente as direções de fluxo dentro do reator. Para comparação foram adotadas três maneiras de definição do tamanho de partículas. A primeira através de resultados experimentais, por análise de imagens, de Pioltine (2013), obtidos na mesma unidade piloto estudada, foram encontrados os valores médios de diâmetro de microbolhas de 68,4µm para a concentração de ar de 4,8g/m³ e de 97,3µm para a concentração de 7,8g/m³. O valor de 68,4µm foi adotado para as simulações com recirculação de 5,3 e 6% e o valor de 97,3µm adotado para as simulações com recirculação de 10 e 11,1%.

A segunda definição do diâmetro de microbolhas foi através de cálculo teórico, segundo Guimet *et al* (2007). Os autores pressupõem que, para obtenção da estratificação na Zona de Separação, as forças exercidas na microbolha devem estar em equilíbrio e para tal a velocidade desta deve ter módulo igual e sentido contrário à velocidade do escoamento, neste caso, a taxa de aplicação superficial da Zona de Separação. Portanto, pela lei de Stokes é possível obter o diâmetro da bolha:

$$d_b = \sqrt{\frac{18 TAS_{zs}\mu_f}{(\rho_f - \rho_{ar})g}} \quad (17)$$

Na qual:

d_b : Diâmetro teórico de microbolha [m];

TAS_{zs} : Taxa de aplicação superficial na Zona de Separação [m/s];

μ_f : Viscosidade dinâmica do fluido [Ns/m³];

ρ_f : Massa específica do fluido [kg/m³];

ρ_{ar} : Massa específica do ar [kg/m³];

g : Aceleração da gravidade [m/s²].

Assim, os valores de diâmetro de microbolhas foram calculados com base em $\mu_f = 0,000890$ Ns/m³ para a água a 25°C (NIST, 2013); $\rho_f = 997$ kg/m³ para 25°C (NIST, 2013); $\rho_{ar} = 1107,3$ g/m³ (para 25°C, 96kPa e 100% de saturação de vapor d'água, conforme calculado no Apêndice A); $g = 9,81$ m/s². Os resultados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Diâmetros de microbolhas calculados para as TAS_{zc} utilizadas, segundo GUIMET *et al* (2007).

TAS_{zs} (m/h)	d_b (μm)
8,7 $\pm$ 0,2	63
12,3 $\pm$ 0,3	75

O terceiro e último diâmetro de microbolhas adotado foi baseado em MORUZZI (2007), o qual utilizou um método não-intrusivo de análise de imagens digitais. Para as condições de concentração de ar de 5,3; 10,6 e 21,2 g de ar/m³ de água, tempo de detenção hidráulico na Zona de Contato de 40, 60 e 90s e temperatura de 22 $\pm$ 1°C, o autor gerou gráficos de frequência acumulada e frequência de volume por diâmetros de microbolhas. Com base em seus resultados, foi adotado o valor de diâmetro de microbolhas de 55 μm .

Portanto, foram adotados ao todo cinco diâmetros de microbolhas (55; 63; 68,4; 75; 97,3 μm), dois dependentes da concentração de ar disponível, dois dependentes da configuração da Zona de Separação, e o último independente da geometria do tanque e das configurações de operação. A distribuição destes valores pelas simulações está ilustrada no item 4.11.

4.8.2. *Flocos*

Os flocos produzidos na etapa de tratamento preliminar que precede a flotação adentram o reator de flotação com diferentes geometrias e tamanhos, dispersos na massa líquida. Sua representação nas simulações foi feita por esferas de diâmetros constantes e idênticos entre si. O material constituinte dos flocos é uma mistura dos compostos da água sintética e dos produtos utilizados na coagulação, para sua inserção no software foi criado um novo material de densidade igual a 1.100 kg/m³, segundo Edzwald e Haarhoff (2012).

O modelo utilizado para simulação do escoamento dos flocos também foi o *Eulerian-Eulerian*, com sub-modelo *Particle Model* responsável por representar os termos de transferência entre floco e água. As forças de empuxo também foram contabilizadas através do modelo *Density Difference*.

O coeficiente de arrasto C_D foi modelado por Schiller-Newman (ANSYS, 2012):

$$C_D = \max\left(\frac{24}{Re}(1 + 0,15Re^{0,687}), 0,44\right) \quad (18)$$

O diâmetro adotado para os flocos foi baseado na pesquisa de Pioltine (2013) que, por meio de análises de imagens, caracterizou a distribuição do diâmetro de flocos na UPFAD em estudo. O autor obteve os valores médios de flocos de 521,4 μm para gradiente de velocidade de floculação (G) de 40 s^{-1} ; 411,9 μm para $G=45 \text{ s}^{-1}$; 423 μm para $G=60 \text{ s}^{-1}$ e 327 μm para $G=75 \text{ s}^{-1}$. Estes dados foram plotados e, por meio de regressão linear, o diâmetro médio de flocos de 443 μm foi obtido, para $G=50 \text{ s}^{-1}$. O valor de G de floculação 50 s^{-1} foi selecionado para reprodução das análises de Patrizzi (2005) na etapa II da pesquisa. As simulações das etapas I e III foram realizadas sem inclusão de terceira fase.

No presente trabalho não foi incluída a interação entre bolhas e partículas devido à limitação da atual versão do software utilizado, o qual não apresenta modelos de interação (colisões) entre partículas diferentes, neste caso, entre partículas sólidas e bolhas. Tal fato impediu a modelação da eficiência do processo.

4.9. Condições de Contorno

As condições de contorno são importantes definições físicas que garantirão que o modelo inserido represente a situação de estudo desejada. Estas são fundamentais para que o software entenda quais as características que fazem fronteira com o volume de controle. Durante a criação da malha, no Meshing, foram informadas as *Named Selections* pela escolha de faces externas da geometria, ou seja, onde seria a localização espacial das condições de contorno. No Setup, as *Boundary Conditions* foram criadas e relacionadas com as *Named Selections*. Dados como vazão mássica de entrada, composição do fluxo de entrada por frações volumétricas de cada fase, vazão mássica de saída, dentre outros, foram discriminados. As opções para definição são variadas e podem ser escolhidas de acordo com a melhor aplicação ao problema em questão. Foram criadas quatro condições de contorno para representação da entrada de água floculada, entrada de recirculação, saída e abertura superior do reator de flotação da UPFAD. As outras faces delimitantes da geometria que não foram caracterizadas são interpretadas como paredes pelo CFX.

4.9.1. *Entrada*

Esta condição de contorno representa a entrada de água floculada na Zona de Contato do reator de FAD. Durante as simulações foram utilizadas as vazões de entrada de 4,5 e 4,6m³/h, que correspondem aos valores utilizados por Patrizzi (2005) e Escher (2011), respectivamente, nas análises experimentais na UPFAD. A água bruta empregada por Patrizzi (2005) era composta por água de poço subterrâneo do Campus 1 da EESC-USP, 1mg/L de ácido húmico e 7mg/L de Kaolin. Esta era coagulada com sulfato de alumínio e, em seguida, submetida à floculação. A dosagem de coagulante foi de 30mg/L de sulfato de alumínio. Escher (2011) utilizou apenas a água de poço para suas análises, sem nenhum aditivo. Maiores detalhes de como foi realizada a preparação, coagulação e floculação podem ser encontrados nos trabalhos das respectivas autoras.

A geometria utilizada para representação da entrada variou durante as etapas do trabalho. Nas etapas I e III, foi utilizada a Configuração I e na etapa II, a Configuração II, conforme descrição apresentada a seguir.

Configuração I

Nesta configuração a entrada na Zona de Contato foi simbolizada por um retângulo com largura coincidente com a da Zona de Contato da UPFAD de 0,4 m e altura de 69mm. A entrada é afogada e situa-se no fundo da Zona de Contato, conforme mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Localização da Condição de Contorno Entrada na Configuração I

Configuração II

A localização das válvulas agulha nos ensaios de Patrizzi (2005) forçou a modificação da geometria de entrada. As válvulas se encontram na projeção horizontal da entrada na Zona de Contato. Nesta segunda configuração, a altura da entrada na Zona de Contato é de 200 mm, permanecendo a largura de 0,4m. Este retângulo foi projetado no sentido negativo do eixo x por 0,1m, gerando um paralelepípedo anexo a entrada. A localização da condição de contorno Entrada foi a face superior do paralelepípedo, com dimensões 0,4x0,1m, conforme mostrado na Figura 12. Vale ressaltar que esta região (paralelepípedo) existe na UPFAD, correspondendo à saída da floculação.

Figura 12 - Localização da Condição de Contorno Entrada na Configuração II

Para esta condição de contorno, foram fornecidos a vazão mássica de entrada, correspondente a soma da vazão mássica de partículas com a vazão mássica de água, e as frações volumétricas de água e partículas no fluxo de entrada. Tais valores estão resumidos na Tabela 5 e foram calculados conforme as equações a seguir.

$$\Phi_{part} = \frac{SST}{\rho_{part}} \quad (19)$$

Sendo:

Φ_{part} : fração volumétrica de partículas [adimensional];

SST : média de sólidos suspensos totais para a água floculada [kg/m^3];

ρ_{part} : massa específica dos flocos [kg/m^3].

Os valores médios de Sólidos Suspensos Totais para água floculada foram obtidos de Araújo (2010), que realizou análises para as duas dosagens de coagulante adotadas. A média das análises de SST para a dosagem de 22,5 mg/L de sulfato de alumínio foi de 19,3mg/L

resultante de 6 medidas e a média para a dosagem de 42,5 mg/L foi de 27,8mg/L, a partir de 14 medidas. Estes valores foram plotados e, por regressão linear, obteve-se o valor de SST para a dosagem de 30mg/L, correspondente a 23mg/L. Portanto, na equação acima foram utilizados os valores de 0,023kg/m³ de SST e 1100 kg/m³ para a massa específica dos flocos, segundo proposto por Edzwald e Haarhoff (2012). Os valores resultantes encontram-se também na Tabela 5.

Uma vez calculada a fração volumétrica de partículas, apenas subtraiu-se este valor de um para obtenção da fração volumétrica de água, conforme Equação (20):

$$\Phi_{\text{água}} = 1 - \Phi_{\text{part}} \quad (20)$$

Onde:

$\Phi_{\text{água}}$: fração volumétrica de água [adimensional].

Em seguida, a vazão mássica de entrada de água floculada foi calculada pela Equação (21):

$$Q_m = (\rho_{\text{água}}\Phi_{\text{água}} + \rho_{\text{part}}\Phi_{\text{part}}) * Q_{\text{ent}} \quad (21)$$

Na qual:

Q_m : vazão mássica de água floculada [kg/s];

$\rho_{\text{água}}$: massa específica da água [kg/m³] (igual a 997 kg/m³ para 25°C (NIST, 2013));

$\Phi_{\text{água}}$: fração volumétrica de água [adimensional];

Φ_{part} : fração volumétrica de partículas [adimensional].

ρ_{part} : massa específica dos flocos [kg/m³] (valor adotado de 1100 kg/m³ (EDZWALD; HAARHOFF, 2012));

Q_{ent} : vazão volumétrica de entrada de água floculada [m³/s].

Tabela 5 - Valores de Vazão Mássica e Fração volumétrica de água e partículas utilizados na Condição de Contorno Entrada

Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	SST médio para água floculada (mg/L)	Fração Volumétrica de Partículas	Fração Volumétrica de Água	Qm (kg/s)
0	0,0	0,00000	1,00000	1,2462500
30	23,0	0,00002	0,99998	1,2462527

4.9.2. Entrada de Recirculação

Esta condição de contorno representa a entrada da recirculação saturada em ar. Na UPFAD, a inserção deste fluxo é feita por meio de válvulas agulha. Durante as etapas do trabalho, o diâmetro das válvulas, sua quantidade e disposição variaram, porém, sempre foram representadas por círculos no fundo da Zona de Contato. Os detalhes das diferentes configurações encontram-se a seguir.

Posição 1

Esta configuração representa a disposição utilizada nas análises de Escher (2011). Nas quais, foram utilizadas três válvulas agulha com diâmetro de $\frac{1}{2}$ '' e foram representadas por três círculos de 13,27 mm de diâmetro. O centro de tais círculos se encontra a 60,9 mm de distância da entrada de água floculada, ou seja, em $x=60,9$ mm.

Figura 13 – Arranjo da Entrada de Recirculação na Posição 1

Posição 2

Esta configuração representa a disposição utilizada nas análises de Patrizzi (2005), com comprimento de Zona de Contato de 0,1m. Nas quais, foram utilizadas duas válvulas agulha com diâmetro de $\frac{3}{4}$ '' e foram representadas por dois círculos de 18,75 mm de diâmetro. O centro de tais círculos se encontra a 8 mm de distância da entrada da Zona de Contato, ou seja, em $x=8$ mm.

Figura 14 – Arranjo da Entrada de Recirculação na Posição 2

Posição 3

Esta configuração representa a disposição utilizada nas análises de Patrizzi (2005), com comprimento de Zona de Contato de 0,07m. Nas quais, também foram utilizadas duas válvulas agulha com diâmetro de $\frac{3}{4}$ '' e foram representadas por dois círculos de 18,75 mm de diâmetro. O centro de tais círculos se encontra a 8 mm de distância da entrada da Zona de Contato, ou seja, em $x=8$ mm.

Figura 15 – Arranjo da Entrada de Recirculação na Posição 3

A vazão volumétrica de entrada variou de acordo com as porcentagens de recirculação utilizadas, que foram de 5,3; 6; 8; 10 e 11,1%. Para esta condição de contorno, assim como na anterior, foram fornecidas a vazão mássica de entrada, correspondente a soma da vazão mássica de microbolhas com a vazão mássica de água, e as frações volumétricas de água e microbolhas no fluxo de entrada de recirculação. Tais valores estão resumidos nas Tabela 6 e Tabela 7.

No item 4.3 foi mostrado o cálculo da concentração de ar na Zona de Contato após a mistura da água floculada com a água de recirculação saturada com ar. Para o cálculo da concentração de ar na água de recirculação antes da mistura, a fórmula proposta por Edzwald (2010) é simplificada para a Equação (22)

$$\frac{A}{V} = \left[\frac{f * (P + 101,3)}{K_H} - \frac{P_{atm}}{K_H} \right] \quad (22)$$

Onde:

$\frac{A}{V}$: concentração de microbolhas de ar na água de recirculação saturada com ar [g de ar/m³ de água];

f : fator de eficiência da câmara de saturação (igual a 0,9 para a câmara de saturação utilizada);

P : pressão relativa [KPa] (pressão da câmara de saturação, igual a 441,3 KPa);

P_{atm} : pressão atmosférica [KPa] (igual a 96 KPa para a cidade de São Carlos-SP);

K_H : constante de Henry [KPa/mg.l] (igual a 4,531 KPa/mg.l para 25°C);

Esta concentração $\frac{A}{V}$ obtida representa a quantidade de ar dissolvido na vazão de recirculação de água. Como a inserção no software deste fluxo ocorre com as microbolhas já formadas, ou seja, não dissolvidas no meio líquido, o volume total de entrada será maior que o real, já contabilizando o volume de ar. Deste modo, a concentração de ar em fração volumétrica, pode ser calculada por:

$$\Phi_{ar} = \frac{Q_{ar}}{Q_R + Q_{ar}} \quad (23)$$

Como $Q_{ar} = Q_R \frac{A}{V} / \rho_{ar}$:

$$\Phi_{ar} = \frac{\frac{(A/V)}{\rho_{ar}}}{1 + \frac{(A/V)}{\rho_{ar}}} \quad (24)$$

Sendo:

Φ_{ar} : fração volumétrica de ar na água de recirculação saturada com ar [m³ de ar/m³ de água];

Q_{ar} : vazão volumétrica de ar [m³/s];

Q_R : vazão volumétrica recirculada de água [m³/s];

ρ_{ar} : massa específica do ar [g/m³] (igual a 1107,3 g/m³ para 25°C, 96kPa e 100% de saturação de vapor d'água, conforme calculado no Apêndice A).

Uma vez calculada a fração volumétrica de ar, apenas subtraiu-se este valor de um para obtenção da fração volumétrica de água:

$$\Phi_{água} = 1 - \Phi_{ar} \quad (25)$$

Onde:

$\Phi_{água}$: fração volumétrica de água [adimensional].

Tabela 6 - Valores de Fração Volumétrica de água e ar utilizados na Condição de Contorno Entrada de Recirculação.

A/V (g de ar/m³ de água)	Fração Volumétrica de Ar	Fração Volumétrica de Água
86,59	0,0725	0,9275

Em seguida, a vazão mássica de entrada de água de recirculação saturada com ar foi calculada pela Equação (26):

$$Q_m = (\rho_{\text{água}} + \frac{A}{V}) * Q_{\text{ent}} * R \quad (26)$$

Na qual:

Q_m : vazão mássica de água floculada [kg/s];

$\rho_{\text{água}}$: massa específica da água [kg/m³] (igual a 997 kg/m³ para 25°C (NIST, 2013));

$\frac{A}{V}$: concentração de microbolhas de ar na água de recirculação saturada com ar [kg de ar/m³ de água];

Q_{ent} : vazão volumétrica de entrada de água floculada [m³/s];

R : razão de recirculação.

Tabela 7 - Valores de Vazão Mássica utilizados na Condição de Contorno Entrada de Recirculação

Qe (m³/h)	R (%)	Qm (kg/s)
4,5	5,3	0,0661
4,6	6	0,0764
4,6	8	0,1019
4,6	10	0,1274
4,5	11,1	0,1383

4.9.3. Saída

A saída da água clarificada da Zona de Separação da UPFAD ocorre por meio de diversos orifícios, através de um Manifold, e é encaminhada a um vertedor móvel que determina o nível d'água dentro da unidade de flotação. Os orifícios de 5,61 mm de diâmetro

foram representados por duas configurações, a primeira por círculos e a segunda por tubos de 8 mm de comprimento. Na segunda configuração, a face selecionada para fornecimento das informações sobre a condição de contorno foi o círculo resultante do final do tubo. A quantidade de orifícios variou de acordo com o comprimento da Zona de Separação utilizado, conforme ilustrado nas figuras a seguir. Para os comprimentos de 1 e 1,40m da Zona de Separação, foram totalizados 49 e 70 orifícios, respectivamente.

Figura 16 - Configuração dos orifícios de saída para Zona de Separação com comprimento de 1m (TAS=12,3m/h). Valores em metros.

Figura 17 - Configuração dos orifícios de saída para Zona de Separação com comprimento de 1,4m (TAS=8,3m/h). Valores em metros.

A modelação desta condição de contorno variou ao longo do trabalho e a metodologia utilizada em cada uma das simulações está detalhada no item 4.11.

4.9.4. Superfície d'água

Após coletada, a água clarificada é conduzida a um vertedor que determina o nível d'água dentro da unidade de flotação. A superfície d'água foi modelada de duas maneiras. Primeiramente, como uma parede sem atrito, porosa para a saída de ar, neste caso a geometria utilizada terminou exatamente no nível d'água. Posteriormente, por meio de modelo de superfície livre. Neste caso, o limite superior da geometria corresponde à abertura superior do flotador, a qual não foi condizente com a borda da unidade real. Uma borda livre de 20 cm foi adotada, tornando a altura total da unidade maior do que a real. Esta fronteira foi modelada como uma abertura com pressão relativa igual a zero e fração volumétrica do fluido disperso ar igual à unidade. O modelo de superfície livre permite que o software calcule a localização

do nível d'água, portanto, quando este modelo foi utilizado, foram informadas condições iniciais de simulação (altura inicial de água e pressão hidrostática).

4.10. Gradiente de Velocidade

A distribuição do gradiente de velocidade através da Zona de Contato do reator UPFAD foi investigada para cada configuração geométrica e de operação do reator por meio de cálculo no software dos gradientes médios pontuais, comparando-os com os valores médios calculados teoricamente, segundo formulação de Richter e Netto (1991) e Reali (1991).

O gradiente médio de velocidade pode ser calculado segundo a expressão (27).

$$G = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\nu}} \quad (27)$$

Sendo:

G: gradiente médio de velocidade [s^{-1}];

ε : taxa de energia dissipada por unidade de massa [$J/kg.s$ ou m^2/s^3];

ν : viscosidade cinemática da água [m^2/s].

A viscosidade cinemática utilizada neste calculo foi a do banco de dados do CFX, variável com a temperatura, a qual foi definida em 25°C. O valor de ε foi calculado pelo software através da Equação (28), fornecida por ANSYS (2012).

$$\varepsilon = \frac{C_\mu k^2}{\nu * (\mu_T/\mu)} \quad (28)$$

Em que:

C_μ : constante não dimensional;

k: energia cinética turbulenta [m^2/s^2];

ν : viscosidade cinemática da água [m^2/s];

μ_T/μ : taxa de dissipação de viscosidade (definida como 10 por padrão).

Segundo Richter e Netto (1991), o gradiente médio de velocidade, decorrente apenas do escoamento, na Zona de Contato pode ser calculado pela Equação (29). Os valores correspondentes para as taxas de aplicação utilizadas encontram-se na Tabela 8.

$$G_e = \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} * \frac{TAS_{ZC}^{1,5}}{Rh^{0,67}} * n \quad (29)$$

Onde:

G_e : gradiente médio de velocidade devido ao escoamento da água [s^{-1}];

γ : peso específico da água [N/m^3] (igual a 9777,58 N/m^3 para 25°C);

μ : viscosidade dinâmica da água [Ns/m^3] (igual a 0,000890 Ns/m^3 para a água estudada a 25°C (NIST, 2013);

TAS_{ZC} : taxa de aplicação superficial na Zona de Contato [m/s];

Rh : raio hidráulico [m];

n : coeficiente de rugosidade de Manning (igual a 0,01 para o material que reveste o flotador – metal liso).

Tabela 8 - Valores calculados de Gradiente Médio de Velocidade devido ao escoamento nas configurações de Zona de Contato utilizadas

TAS_{ZC} (m/h)	Área (m^2)	$P_{molhado}$ (m)	R_h (m)	G (s^{-1})
125	0,04	1	0,0400	1,88
174,9	0,0284	0,942	0,0301	3,75
179	0,028	0,94	0,0298	3,92

Com o intuito de calcular a influência das microbolhas no gradiente médio de velocidade, foi utilizada a Equação (30), proposta por Realí (1991). Os valores obtidos para cada par de concentração de ar e diâmetro de microbolhas estão na Tabela 9.

$$G_b = \left[\frac{g^2 d_b^2 S_v R}{18 v_f^2 (1 + R)} \right]^{0,5} \quad (30)$$

Sendo:

G_b : gradiente médio de velocidade devido às microbolhas [s^{-1}];

g : aceleração da gravidade [m/s^2];

d_b : diâmetro de microbolhas [m];

S_V : concentração de gás (em volume) disponível na água pressurizada da vazão de recirculação, expresso em termos de: $S_V = \frac{\text{volume de ar dissolvido (liberado)}}{\text{volume de água de recirculação}}$;

R : razão de recirculação $\left(\frac{\text{vazão de recirculação}}{\text{vazão de água floculada afluente}} \right)$ [adimensional];

ν_f : viscosidade cinemática da água [m^2/s].

O termo $\left[\frac{S_V R}{(1+R)} \right]$ pode ser substituído por $\left[\frac{(A/V)}{\rho_{\text{ar}}} \right]$ e a Equação (32) torna-se:

$$G_b = \left[\frac{g^2 d_b^2 (A/V)}{18 \nu_f^2 \rho_{\text{ar}}} \right]^{0,5} \quad (31)$$

Na qual:

$\frac{A}{V}$: concentração de microbolhas de ar após a mistura da vazão de recirculação com a vazão de água floculada [$\text{g de ar}/\text{m}^3 \text{ de água}$];

ρ_{ar} : massa específica do ar [g/m^3];

Tabela 9 - Gradiente médio de velocidade devido à influência das microbolhas calculado segundo Reali (1991)

$A/V \text{ (g/m}^3\text{)}$	$db \text{ (}\mu\text{m)}$	$G \text{ (s}^{-1}\text{)}$
4,36	68,4	11,40
4,36	75	12,50
4,90	55	9,72
4,90	68,4	12,09
4,90	75	13,25
6,41	55	11,12
6,41	75	15,16
7,87	55	12,32
7,87	75	16,79
7,87	97,3	21,79
8,65	55	12,91
8,65	63	14,79
8,65	75	17,61
8,65	97,3	22,84

Estes valores foram somados aos calculados anteriormente segundo Richter e Netto (1991), e os gradientes médios de velocidade resultantes encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores calculados de Gradiente Médio de Velocidade devido ao escoamento e à influência de microbolhas

Etapa	Simulação	TASZC (m/h)	A/V (g/m ³)	db (μm)	G escoamento (s ⁻¹)	G bolhas (s ⁻¹)	G Total (s ⁻¹)
I	1a	174,9	4,90	75	3,75	13,25	17,00
I	1b	174,9	4,90	68,4	3,75	12,09	15,84
I	1c	174,9	4,90	55	3,75	9,72	13,47
I	2a	174,9	6,41	75	3,75	15,16	18,91
I	2c	174,9	6,41	55	3,75	11,12	14,87
I	3a	174,9	7,87	75	3,75	16,79	20,54
I	3b	174,9	7,87	97,3	3,75	21,79	25,54
I	3c	174,9	7,87	55	3,75	12,32	16,07
II	1a	125	8,65	63	1,88	14,79	16,67
II	2a	179	8,65	63	3,92	14,79	18,71
II	2b	179	8,65	97,3	3,92	22,84	26,76
II	2c	179	8,65	55	3,92	12,91	16,83
II	3a	179	4,36	75	3,92	12,50	16,41
II	3b	179	4,36	68,4	3,92	11,40	15,32
II	4a	179	8,65	75	3,92	17,61	21,52
III	3.1	174,9	7,87	75	3,75	16,79	20,54
III	3.2	174,9	7,87	75	3,75	16,79	20,54
III	3.3	174,9	7,87	75	3,75	16,79	20,54
III	3.4	174,9	7,87	75	3,75	16,79	20,54
IV e V	todas	174,9	4,90	75	3,75	13,25	17,00

4.11. Programação de Análises

4.11.1. *Etapa I*

Nesta etapa do trabalho foram reproduzidos os experimentos de Escher (2011) para validação do modelo. Os parâmetros mantidos fixos encontram-se detalhados na Tabela 11 e o esquema das simulações e dos aspectos variados encontram-se na Figura 18.

Tabela 11 - Parâmetros de Geometria e Operação mantidos fixos durante as simulações da Etapa I

Parâmetro	Valor
Geometria	Configuração I
TAS _{ZC}	174,9 ± 3,2 [m/h]
TAS _{ZS}	12,3 ± 0,2 [m/h]
Altura d'água	2,27 [m]
Altura do Anteparo	2,01 [m]
Tempo de Detenção Hidráulico na ZC	43 [s]
Nº de fases	bifásico
Vazão de entrada	4,6 [m³/h]
Entrada	Configuração I
Qm de entrada	1,2739444 [kg/s]
Fração Volumétrica de Água na Entrada	1
Fração Volumétrica de Flocos na Entrada	0
Válvulas Agulha de Recirculação	Posição 1
Fração Volumétrica de Água na Recirculação	0,9275
Fração Volumétrica de Ar na Recirculação	0,0725
Saída	Configuração de Círculos
Orifícios de Saída	49 unidades
Pressão Relativa na Saída	0 [Pa]
Abertura Superior	Parede porosa sem atrito

Figura 18 - Esquema das simulações realizadas na Etapa I

4.11.2. Etapa II

Nesta etapa foram reproduzidos os experimentos de Patrizzi (2005) para validação do modelo. Os parâmetros mantidos fixos encontram-se detalhados na Tabela 12 e o esquema das simulações e dos aspectos variados encontra-se na Figura 19.

Tabela 12 - Parâmetros de Geometria e Operação mantidos fixos durante as simulações da Etapa II

Parâmetro	Valor
Altura d'água	1,98 [m]
Nº de fases	trifásico
Vazão de entrada	4,5 [m³/h]
Entrada	Configuração II
Qm de entrada	1,2462527 [kg/s]
Fração Volumétrica de Água na Entrada	0,99998
Fração Volumétrica de Flocos na Entrada	0,00002
Fração Volumétrica de Água na Recirculação	0,9275
Fração Volumétrica de Ar na Recirculação	0,0725
Saída	Configuração de Círculos
Pressão Relativa na Saída	0 [Pa]
Abertura Superior	Parede porosa sem atrito

Figura 19 - Esquema das simulações realizadas na Etapa II

4.11.3. Etapa III

Na terceira etapa, foram realizadas simulações utilizando as configurações da análise 3.a da Etapa I, variando a condição de contorno da superfície d'água e de saída, de modo a calibrar o modelo. Os parâmetros mantidos fixos são listados na Tabela 13.

Tabela 13 - Parâmetros de Geometria e Operação mantidos fixos durante as simulações da Etapa III

Parâmetro	Valor
TASZC	178,2 [m/h]
TASZS	12,3 +- 0,2 [m/h]
Altura d'água	2,27 [m]
Nº de fases	bifásico
Vazão de entrada	4,6 [m³/h]
Entrada	Configuração I
Qm de entrada	1,2739444 [kg/s]
Fração Volumétrica de Água na Entrada	1
Fração Volumétrica de Flocos na Entrada	0
Razão de Recirculação	10%
Qm de Recirculação	0,1274 [kg/s]
Válvulas Agulha de Recirculação	Posição 1
Fração Volumétrica de Água na Recirculação	0,9275
Fração Volumétrica de Ar na Recirculação	0,0725
Orifícios de Saída	49 unidades

Simulação 3.1

Esta simulação foi feita com a geometria V e condição de contorno de superfície d'água como superfície livre. Foram adicionados 20 cm de borda livre acima do nível d'água, conforme Figura 8. Os orifícios de saída foram representados por círculos e a condição de contorno foi modelada por vazão mássica de saída. Esta vazão foi considerada igual a toda vazão de água afluyente ao reator, ou seja, foi suposto que nenhuma bolha de ar é carreada para a saída. Através da multiplicação da vazão volumétrica total pela massa específica da água (997kg/m³), obteve-se a vazão mássica de saída, conforme Tabela 14.

Tabela 14 - Cálculo da vazão mássica utilizada na Condição de Contorno Saída da Simulação 3.1 – Etapa III.

Qe (m³/h)	R (%)	Qr (m³/h)	Qt (m³/h)	Qm (kg/s)
4,6	10	0,46	5,06	1,40

Simulação 3.2

Esta análise foi realizada com a geometria V e condição de contorno de superfície como superfície livre. A representação dos orifícios de saída foi feita em três dimensões com 8 mm de comprimento e diâmetro de 5,61 mm, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Representação 3D dos orifícios de saída na simulação 3.2 da Etapa III. Detalhe do fundo da Zona Separação visto por baixo

A condição de contorno de saída foi modelada por meio de pressão relativa, com valor resultante calculado pela altura da lâmina d'água na Zona de Separação menos a perda de carga nos orifícios. A perda de carga nos orifícios foi obtida pela Equação (32):

$$Q = C_d S \sqrt{2g\Delta h} \quad (32)$$

Onde:

Q : Vazão afluyente ao orifício [m^3/s];

C_d : Coeficiente dependente do formato do orifício [adimensional];

S : Área superficial do orifício [m^2];

g : Aceleração da gravidade [m/s^2];

Δh : Perda de carga nos orifícios [m].

Como o nível d'água é fixo durante a operação, a vazão afluyente aos orifícios foi considerada igual a toda vazão de água afluyente ao reator. Logo, foi suposto que nenhuma bolha de ar é carregada para a saída. O valor de coeficiente C_d utilizado foi de 0,6. Os valores empregados no cálculo e a pressão relativa resultante encontram-se na Tabela 15.

Tabela 15 – Cálculo da pressão relativa utilizada na Condição de Contorno Saída da Simulação 3.3 – Etapa III.

Qe (m³/h)	R (%)	Qr (m³/h)	Qt (m³/h)	Nº de orifícios	Δh (m)	H _{água} na ZS (m)	P (mca)	P (Pa)
4,6	10	0,46	5,06	49	0,190	1,917	1,727	16931,50

Simulação 3.3

Esta simulação foi feita com a geometria I e condição de contorno de superfície d'água como parede porosa sem atrito. A condição de saída foi representada por orifícios em 3D e modelada por pressão relativa de 16931,50 Pa, assim como na Simulação 3.2.

Simulação 3.4

Esta simulação foi feita com a geometria VI, incluindo o encaminhamento da água clarificada dos orifícios até o vertedor, e condição de contorno de superfície d'água como superfície livre. O vertedor da UPFAD apesar de ser triangular foi modelado como retangular para simplificação do desenho de sua geometria. Os orifícios nesta análise também possuem espessura de 8 mm, porém a condição de contorno de saída é representada pelo retângulo acima do vertedor com largura equivalente à do flutador (0,4m). A altura deste retângulo foi calculada pela soma da borda livre mais a perda de carga hidráulica nos orifícios mais a altura d'água acima do vertedor. A borda livre adotada como já dito anteriormente foi de 0,20 m. A perda de carga nos orifícios foi calculada para a simulação 3.2 (Tabela 15) e equivale a 0,19 m. A altura d'água acima do vertedor foi calculada pela equação de Francis para vertedor retangular de parede fina sem contrações (PORTO, 2004).

$$Q = 1,838 L h^{3/2} \quad (33)$$

Na qual:

Q : vazão que passa pelo vertedor [m³/s];

L : largura do vertedor [m];

h : lâmina d'água sobre o vertedor [m].

Assim como no cálculo da perda de carga nos orifícios, a vazão foi considerada igual a toda vazão de água afluyente ao reator, ou seja, foi suposto que nenhuma bolha de ar é carregada para a saída. Os valores obtidos para h e para a altura do retângulo de saída acima do vertedor estão na Tabela 16. A condição de saída foi modelada por pressão relativa igual a zero.

Tabela 16 - Cálculo da altura d'água sobre o vertedor e da altura do retângulo que representa a Condição de Contorno Saída da Simulação 3.4 – Etapa III.

Q_e (m ³ /h)	R (%)	Q_r (m ³ /h)	Q_t (m ³ /h)	Nº de orifícios	Δh (m)	h (m)	Altura do retângulo de saída (m)
4,6	10	0,46	5,06	49	0,19	0,016	0,406

4.11.4. Etapa IV

Com base nos resultados obtidos nas etapas anteriores, foi escolhido o modelo utilizado na Simulação 3.4 da Etapa III para obtenção de diferentes condições de escoamento, através da variação das dimensões da geometria do flotor. De modo a possibilitar a visualização do efeito destas na estrutura de escoamento e na distribuição de concentração de ar dentro das Zonas de Contato e de Separação. As análises foram feitas com a razão de recirculação de 6% (4,9g/m³), pois esta condição forneceu melhores resultados de eficiência de remoção de cor e turbidez para Escher (2011), em comparação às razões de 8 e 10%. Os parâmetros mantidos fixos são listados na Tabela 17.

Tabela 17 - Parâmetros de Geometria e Operação mantidos fixos durante as simulações da Etapa IV

Parâmetro	Valor
TAS _{ZC}	171,7 [m/h]
Nº de fases	bifásico
Vazão de entrada	4,6 [m³/h]
Entrada	Configuração I
Qm de entrada	1,2739444 [kg/s]
Fração Volumétrica de Água na Entrada	1
Fração Volumétrica de Flocos na Entrada	0
Razão de Recirculação	6%
Qm de Recirculação	0,0764 [kg/s]
Válvulas Agulha de Recirculação	Posição 1
Fração Volumétrica de Água na Recirculação	0,9275
Fração Volumétrica de Ar na Recirculação	0,0725
Saída	Retângulo acima do vertedor
Pressão Relativa na Saída	0 [Pa]
Abertura Superior	Superfície Livre

Simulação 4.1

Esta simulação reproduziu a Simulação 3.4, com o encaminhamento da água clarificada dos orifícios até o vertedor, e condição de contorno de superfície d'água como superfície livre, porém com recirculação de 6%. Os parâmetros detalhados utilizados, além dos descritos acima, estão na Tabela 18.

Tabela 18 - Parâmetros da Simulação 4.1, Etapa IV

Parâmetro	Valor
TAS _{ZS}	12,2 [m/h]
Comprimento da Zona de Separação	1 [m]
Altura d'água	2,27 [m]
Altura do Anteparo	2,01 [m]
Tempo de Detenção Hidráulico na ZC	43 [s]
Orifícios no fundo da ZS	49 unidades

Simulação 4.2

A simulação 4.2 foi similar a 4.1, com as mesmas condições de operação e de geometria das Zonas de Contato e Separação, porém foi modificada a configuração da entrada de recirculação na Zona de Contato. Um obstáculo circular de 5 mm de espessura foi

adicionado logo acima da antiga entrada, forçando o fluxo a passar pelas laterais da estrutura. Esta modificação auxilia na melhor distribuição do fluxo de recirculação na Zona de Contato, garantindo maior homogeneização da distribuição de microbolhas e, com isto, maior contato destas com os flocos. O intuito da simulação foi observar esta melhor distribuição das microbolhas. As Figura 21e Figura 22 trazem os detalhes da estrutura adicionada no fundo da Zona de Contato e as faces que foram modeladas como Condição de Contorno de Entrada de Recirculação em vermelho.

Figura 21 - Detalhe da entrada de recirculação da Simulação 4.2, Etapa IV

Figura 22 – Vista em 3D da chapa de fundo da Zona de Contato, ilustrando a entrada de recirculação da Simulação 4.2, Etapa IV

Como a placa com orifícios de saída é fixa, a quantidade de destes é reduzida e, com isso, há maior perda de carga ao atravessá-los. A disposição dos orifícios para esta configuração de Zona de Separação está ilustrada na Figura 24.

Figura 24 - Configuração dos orifícios de saída para Zona de Separação com comprimento de 0,825m (TAS=15m/h). Valores em metros.

Portanto, o cálculo segundo equação (32) foi refeito. A altura d'água acima do vertedor permaneceu a mesma, já que a vazão de saída variou pouco com a diminuição da razão de recirculação de 10 para 6%. O novo valor da altura do retângulo acima do vertedor está apresentado na Tabela 20. Este retângulo representou a condição de saída, cuja modelagem foi realizada por pressão relativa igual a zero.

Tabela 20 - Cálculo da altura do retângulo que representa a Condição de Contorno Saída da Simulação 4.3 – Etapa IV.

Qe (m³/h)	R (%)	Qr (m³/h)	Qt (m³/h)	Nº orifícios	Δh (m)	h (m)	Altura do Retângulo de Saída (m)
4,6	6	0,28	4,88	42	0,241	0,02	0,461

Figura 26 - Configuração dos orifícios de saída para Zona de Separação com comprimento de 0,488m (TAS=25m/h). Valores em metros.

O cálculo segundo equação (32), de perda de carga nos orifícios, também foi feito e o valor da altura do retângulo acima do vertedor está apresentado na Tabela 22. Este retângulo representou a condição de saída, cuja modelagem foi realizada por pressão relativa igual a zero.

Tabela 22 - Cálculo da altura do retângulo que representa a Condição de Contorno Saída da Simulação 4.4 – Etapa IV.

Qe (m ³ /h)	R (%)	Qr (m ³ /h)	Qt (m ³ /h)	Nº orifícios	Δh (m)	h (m)	Altura do Retângulo de Saída(m)
4,6	6	0,28	4,88	21	0,963	0,02	1,183

Simulação 4.5

Na simulação 4.5, manteve-se o comprimento da Zona de Separação de 0,488m como na simulação anterior e aumentou-se a altura d'água para 4 m na UPFAD, aumentando também a profundidade desta. A geometria resultante está ilustrada na Figura 27 e maiores detalhes das características da simulação podem ser encontrados na Tabela 23. Como a TAS_{zs} foi similar à anterior, a quantidade e distribuição de orifícios no fundo da Zona de Separação foi o mesmo da Figura 26. Logo, a altura do retângulo de saída acima do vertedor também foi de 1,183 m e foi modelada como condição de contorno de saída com pressão relativa igual a zero.

Tabela 23 - Parâmetros da Simulação 4.3, Etapa IV

Parâmetro	Valor
TAS_{zs}	25 [m/h]
Comprimento da Zona de Separação	0,488 [m]
Altura d'água	4 [m]
Altura do Anteparo	3,74 [m]
Tempo de Detenção Hidráulico na ZC	79 [s]
Orifícios no fundo da ZS	21 unidades

Figura 27 - Dimensões da Geometria da Simulação 4.5 da Etapa IV, valores em metros.

4.11.5. Etapa V

Com base nos resultados obtidos na etapa IV, nesta última etapa diferentes modelos foram testados numa mesma condição de operação. A intenção na execução desta etapa foi a de melhorar a representação da concentração de ar no flutador, em relação às simulações com superfície livre. Os parâmetros mantidos fixos são listados na Tabela 24.

Tabela 24 - Parâmetros de Geometria e Operação mantidos fixos durante as simulações da Etapa V

Parâmetro	Valor
TASZC	171,7 [m/h]
TASZS	12,2 [m/h]
Altura d'água	2,27 [m]
Altura do Anteparo	2,01 [m]
Tempo de Detenção Hidráulico na ZC	43 [s]
Nº de fases	bifásico
Vazão de entrada	4,6 [m³/h]
Entrada	Configuração I
Qm de entrada	1,2739444 [kg/s]
Razão de Recirculação	6%
Qm de Recirculação	0,0764 [kg/s]
Válvulas Agulha de Recirculação	Posição 1
Fração Volumétrica de Água na Recirculação	0,9275
Fração Volumétrica de Ar na Recirculação	0,0725
Orifícios no fundo da ZS	49 unidades
Abertura Superior	Parede porosa sem atrito

Simulação 5.1

Esta simulação foi feita com a geometria da Figura 28, incluindo o encaminhamento da água clarificada dos orifícios até o vertedor, e condição de contorno de superfície d'água como parede porosa sem atrito. Neste caso, a superfície d'água coincidiu com a Condição de Contorno de Superfície e o nível d'água acima do vertedor foi imposto pela geometria. A condição de Contorno de Saída foi modelada por pressão relativa igual a zero e representada pelo retângulo acima do vertedor. A altura deste retângulo foi menor que nas simulações anteriores, pois foi composta apenas da altura d'água acima do vertedor, a qual possui o valor de 0,20 m. A diferença de nível entre as superfícies d'água no flotor e no vertedor possuiu valor semelhante à perda de carga nos orifícios, de 0,19 m.

Figura 28 - Dimensões da Geometria da Simulação 5.1 da Etapa V, valores em metros.

Simulação 5.2

Foi utilizada geometria semelhante à da Simulação 5.1, contudo, foi empregada a abordagem Eulerian-Lagrangian para a modelação das microbolhas de ar. As condições de contorno foram modeladas do mesmo modo também: Entrada e Entrada de Recirculação por vazão mássica, Saída por pressão relativa igual a zero e Superfície por parede porosa ao ar, sem atrito. Porém, ao modificar-se a abordagem, os mesmos tipos de condição de contorno são configurados diferentemente no software e estas particularidades foram abordadas no tópico 4.12.

Na abordagem Eulerian-Lagrangian, as microbolhas são tratadas como partículas fluidas e suas trajetórias são rastreadas. Entretanto, não é viável computacionalmente o rastreio de todas as microbolhas que adentram o domínio. Por este motivo, o CFX possui a variável “*Number of Positions*”, que determina o número de partículas representativas, ou seja, o número de partículas (microbolhas) que serão rastreadas. O valor adotado para esta variável foi proporcional à vazão mássica de entrada de ar, ou seja, representou o número de partículas por unidade de vazão mássica.

A vazão mássica de entrada de ar pode ser calculada pela equação (34). Para a situação simulada, com vazão de entrada de água floculada de 4,6 m³/h, razão de recirculação de 6% e concentração de ar antes da mistura de 86,59 g de ar/m³ de água (conforme calculado no item 4.9.2), o valor resultante de Qm_{ar} é de $6,64 \cdot 10^{-6}$.

$$Qm_{ar} = Q_e * R * \frac{A}{V} \quad (34)$$

Sendo:

Qm_{ar} : vazão mássica de ar [kg/s];

Q_e : vazão de entrada de água floculada [m³/s];

R : razão de recirculação;

$\frac{A}{V}$: concentração de ar na recirculação antes da mistura [kg ar/m³ de água].

O volume de apenas uma bolha com diâmetro de 75μm é de $2,21 \cdot 10^{-13}$ m³. Com base na massa específica do ar, calculada no Apêndice A, a massa de uma única microbolha é de $2,45 \cdot 10^{-13}$ kg. Dividindo-se a vazão mássica de entrada de ar pela massa singular, obtém-se a quantidade de bolhas que adentram na Zona de Contato, para a condição ideal adotada de que todas as bolhas possuem o mesmo diâmetro. Este número é $2,71 \cdot 10^7$ bolhas por segundo.

Para que todas estas partículas fossem rastreadas o valor inserido em “*Number of Positions*” deveria ser de $2,71 \cdot 10^7$ dividido por $6,64 \cdot 10^{-6}$, ou seja, $4,08 \cdot 10^{12}$ s/kg. Entretanto, o valor máximo possível atingido com a capacidade computacional disponível foi de 10^{10} s/kg. Este número equivale a 66.400 partículas rastreadas por segundo das mais de 27 milhões que adentram a Zona de Contato, portanto, cada microbolha representou um grupo de 408 microbolhas.

Simulação 5.3

Na simulação 5.3, foi reproduzida a análise 3.3 da Etapa III, utilizando a geometria I e condição de contorno de superfície d’água como parede porosa sem atrito, porém com razão de recirculação de 6%. A condição de saída foi representada por orifícios em 3D e modelada por pressão relativa de 16931,50 Pa, assim como nas Simulações 3.2 e 3.3.

4.12. Configurações no CFX

A seguir são apresentadas exatamente as configurações adotadas no software utilizado (ANSYS CFX 13.0) para aplicação dos modelos explanados nos tópicos anteriores.

4.12.1. Default Domain: Eulerian-Eulerian

Tabela 25 - Configurações inseridas em Default Domain no Setup do ANSYS CFX 13.0 nas simulações com abordagem Eulerian-Eulerian

Tab	Setting	Value
Basic Settings	Fluid and Particle Definitions	Air
	Fluid and Particle Definitions>Air>Material	Air at 25 C
	Fluid and Particle Definitions>Air>Morphology>Option	Dispersed Fluid ⁽¹⁾
	Fluid and Particle Definitions>Air>Morphology>Mean Diameter	(2)
	Fluid and Particle Definitions	Water
	Fluid and Particle Definitions>Water>Material	Water
	Fluid and Particle Definitions>Water>Morphology>Option	Continuous Fluid
	Fluid and Particle Definitions ⁽⁵⁾	Particle
	Fluid and Particle Definitions>Particle>Material ⁽⁵⁾	Lodo
	Fluid and Particle Definitions>Particle>Morphology>Option ⁽⁵⁾	Dispersed Solid ⁽¹⁾
	Fluid and Particle Definitions>Particle>Morphology>Mean Diameter ⁽⁵⁾	443 [μm]
	Domain Models>Pressure>Reference Pressure	96 [kPa]
	Domain Models>Buoyancy>Option	Buoyancy
	Domain Models>Buoyancy>Gravity X Dirn.	0 [m.s ⁻²]
	Domain Models>Buoyancy>Gravity Y Dirn.	0 [m.s ⁻²]
	Domain Models>Buoyancy>Gravity Z Dirn.	-g
	Domain Models>Buoyancy>Buoy. Ref. Density	(3)
	Domain Models>Domain Motion>Option	Stationary
Fluid Models	Multiphase>Homogeneous Model	Cleared
	Multiphase>Homogeneous Model>Free Surface Model	(4)
	Heat Transfer>Homogeneous Model	Selected
	Heat Transfer>Option	None
	Turbulence>Homogeneous Model	Selected
	Turbulence>Option	K-Epsilon
	Turbulence>Wall Function	Scalable
Fluid Specific Models	Air>Fluid Buoyancy Model>Option	Density Difference
	Water>Fluid Buoyancy Model>Option	Density Difference
	Particles>Fluid Buoyancy Model>Option	Density Difference
Fluid Pair Models	Fluid Pair	Air Water
	Fluid Pair>Air Water>Surface Tension Coefficient	Selected
	Fluid Pair>Air Water>Surface Tension Coefficient>Surf. Tension Coeff.	0,07198 [Nm ⁻¹]
	Fluid Pair>Air Water>Interphase Transfer>Option	Particle Model
	Fluid Pair>Air Water>Momentum Transfer>Drag Force>Option	Ishii Zuber
	Fluid Pair ⁽⁵⁾	Particles Water
	Fluid Pair>Particle Water>Interphase Transfer>Option ⁽⁵⁾	Particle Model
	Fluid Pair>Particle Water>Momentum Transfer>Drag Force>Option ⁽⁵⁾	Schiller Naumann

- (1) Esta morfologia define a utilização do modelo *Eulerian-Eulerian*;
- (2) Os valores utilizados são os descritos no item 4.8.1;
- (3) A densidade de referência foi igual à massa específica da água (997 [kg.m⁻³]) para as simulações na qual a superfície d'água foi modelada como parede porosa sem atrito. Nas simulações com superfície livre, esta foi igual à massa específica do ar (1,1073 [kg.m⁻³]). Segundo ANSYS (2012), a *Buoyancy Reference Density* deve ser igual à do fluido mais leve nas simulações com *Free Surface* e igual à do fluido contínuo em simulações multifásicas;
- (4) “None” nas simulações com parede porosa e “Standard” nas simulações com superfície livre;
- (5) Estas opções só foram utilizadas nas simulações trifásicas.

4.12.2. Default Domain: Eulerian-Lagrangian

Tabela 26 - Configurações inseridas em Default Domain no Setup do ANSYS CFX 13.0 na simulação 5.2 – Etapa V, com abordagem *Eulerian-Lagrangian*

Tab	Setting	Value
Basic Settings	Fluid and Particle Definitions	Air
	Fluid and Particle Definitions>Air>Material	Air at 25 C
	Fluid and Particle Definitions>Air>Morphology>Option	Particle Transport Fluid
	Fluid and Particle Definitions>Air>Morphology>Particle Diameter Distribution>Option	Specified Diameter
	Fluid and Particle Definitions>Air>Morphology>Particle Diameter Distribution>Diameter	75 [micron]
	Fluid and Particle Definitions	Water
	Fluid and Particle Definitions>Water>Material	Water
	Fluid and Particle Definitions>Water>Morphology>Option	Continuous Fluid
	Domain Models>Pressure>Reference Pressure	96 [kPa]
	Domain Models>Buoyancy>Option	Buoyancy
	Domain Models>Buoyancy>Gravity X Dirn.	0 [m.s ⁻²]
	Domain Models>Buoyancy>Gravity Y Dirn.	0 [m.s ⁻²]
	Domain Models>Buoyancy>Gravity Z Dirn.	-g
	Domain Models>Buoyancy>Buoy. Ref. Density	997 [kg.m ⁻³]
	Domain Models>Domain Motion>Option	Stationary
Fluid Models	Heat Transfer>Option	None
	Turbulence>Option	K-Epsilon
	Turbulence>Wall Function	Scalable
Fluid Specific Models	Air>Fluid Buoyancy Model>Option	Density Difference
	Water>Fluid Buoyancy Model>Option	Density Difference
Fluid Pair Models	Fluid Pair	Air Water
	Fluid Pair>Air Water>Particle Coupling	Fully Coupled
	Fluid Pair>Air Water>Surface Tension Coefficient	Selected
	Fluid Pair>Air Water>Surface Tension Coefficient>Surf. Tension Coeff.	0,07198 [Nm ⁻¹]
	Fluid Pair>Air Water>Momentum Transfer>Drag Force>Option	Ishii Zuber

4.12.3. Boundary Conditions

Entrada: Abordagem Eulerian-Eulerian

Tabela 27 - Configurações inseridas em Boundary Condition Entrada no Setup do ANSYS CFX 13.0 nas simulações com abordagem Eulerian-Eulerian

Tab	Setting	Value
Basic Settings	Boundary Type	Inlet
	Location	Inlet
Boundary Details	Flow Regime>Option	Subsonic
	Mass and Momentum>Option	Bulk Mass Flow Rate
	Mass and Momentum>Mass Flow Rate	(1)
Fluid Values	Air>Volume fraction	0
	Water>Volume Fraction	(1)
	Particle>Volume Fraction ⁽²⁾	(1)

(1) Valores utilizados estão descritos no item 4.9.1;

(2) Opção disponível apenas nas simulações trifásicas.

Entrada: Abordagem Eulerian-Lagrangian

Tabela 28 - Configurações inseridas em Boundary Condition Entrada no Setup do ANSYS CFX 13.0 nas simulações com abordagem Eulerian-Lagrangian

Tab	Setting	Value
Basic Settings	Boundary Type	Inlet
	Location	Inlet
Boundary Details	Flow Regime>Option	Subsonic
	Mass and Momentum>Option	Mass Flow Rate
	Mass and Momentum>Mass Flow Rate	(1)

(1) Valores utilizados estão descritos no item 4.9.1.

Entrada de Recirculação: Eulerian-Eulerian

Tabela 29 - Configurações inseridas em Boundary Condition Entrada de Recirculação no Setup do ANSYS CFX 13.0 nas simulações com abordagem Eulerian-Eulerian

Tab	Setting	Value
Basic Settings	Boundary Type	Inlet
	Location	Inlet2
Boundary Details	Flow Regime>Option	Subsonic
	Mass and Momentum>Option	Bulk Mass Flow Rate
	Mass and Momentum>Mass Flow Rate	(1)
Fluid Values	Air>Volume fraction	(1)
	Water>Volume Fraction	(1)
	Particle>Volume Fraction ⁽²⁾	0

- (1) Valores utilizados estão descritos no item 4.9.2
 (2) Opção disponível apenas nas simulações trifásicas

Entrada de Recirculação: Abordagem *Eulerian-Lagrangian*

Tabela 30 - Configurações inseridas em Boundary Condition Entrada de Recirculação no Setup do ANSYS CFX 13.0, nas simulações com abordagem *Eulerian-Lagrangian*

Tab	Setting	Value
Basic Settings	Boundary Type	Inlet
	Location	Inlet2
Boundary Details	Flow Regime>Option	Subsonic
	Mass and Momentum>Option	Mass Flow Rate
	Mass and Momentum>Mass Flow Rate	0,0764 [kg s ⁻¹]
Fluid Values	Air>Particle Behavior>Define Particle Behavior	Selected
	Air>Mass and Momentum>Option	Zero Slip Velocity
	Air>Particle Position>Option	Uniform Injection
	Air>Particle Position>Number of Positions>Option	Proportional to Mass Flow Rate
	Air>Particle Position>Number of Positions>Number	1e+10 [s kg ⁻¹]
	Air>Particle Mass Flow>Mass Flow Rate	7e-06 [kg s ⁻¹]

Saída: Pressão Relativa

Tabela 31 - Configurações inseridas em Boundary Condition Saída no Setup do ANSYS CFX 13.0, em caso de modelação de saída por pressão relativa

Tab	Setting	Value
Basic Settings	Boundary Type	Outlet
	Location	Outlet
Boundary Details	Flow Regime>Option	Subsonic
	Mass and Momentum>Option	Static Pressure
	Mass and Momentum>Relative Pressure	(1)

(1) Valores utilizados estão descritos no item 4.11

Saída: Vazão Mássica

Tabela 32 - Configurações inseridas em Boundary Condition Saída no Setup do ANSYS CFX 13.0, em caso de modelação de saída por vazão mássica

Tab	Setting	Value
Basic Settings	Boundary Type	Outlet
	Location	Outlet
Boundary Details	Flow Regime>Option	Subsonic
	Mass and Momentum>Option	Bulk Mass Flow Rate
	Mass and Momentum>Mass Flow Rate	(1)

(1) Valores utilizados estão descritos no item 4.11

Abertura superior do flutador: parede porosa – Abordagem *Eulerian-Eulerian*

Tabela 33 - Configurações inseridas em Boundary Condition Superfície no Setup do ANSYS CFX 13.0, em caso de modelação de superfície por parede porosa, nas simulações com abordagem *Eulerian-Eulerian*

Tab	Setting	Value
Basic Settings	Boundary Type	Outlet
	Location	Superfície
Boundary Details	Flow Regime>Option	Subsonic
	Mass and Momentum>Option	Degassing Condition

Abertura superior do flutador: parede porosa – Abordagem *Eulerian-Lagrangian*

Tabela 34 - Configurações inseridas em Boundary Condition Superfície no Setup do ANSYS CFX 13.0, em caso de modelação de superfície por parede porosa, nas simulações com abordagem *Eulerian-Lagrangian*

Tab	Setting	Value
Basic Settings	Boundary Type	Wall
	Location	Superfície
Boundary Details	Mass and Momentum>Option	Free Slip Wall
Fluid Values	Boundary Conditions>Air>Velocity>Option	Restitution Coefficient
	Boundary Conditions>Air>Velocity>Perpendicular Coefficient	0
	Boundary Conditions>Air>Velocity>Parallel Coefficient	0
	Boundary Conditions>Air>Mass Flow Absorption	Selected
	Boundary Conditions>Air>Mass Flow Absorption>Absorption Coeff.	1

Abertura superior do flutador: superfície livre

Tabela 35 - Configurações inseridas em Boundary Condition Superfície no Setup do ANSYS CFX 13.0, em caso de modelação de superfície livre

Tab	Setting	Value
Basic Settings	Boundary Type	Opening
	Location	Superfície
Boundary Details	Flow Regime>Option	Subsonic
	Mass and Momentum>Option	Opening Pres. And Dirn
	Mass and Momentum>Relative Pressure	0 [Pa]
Fluid Values	Boundary Conditions	Air
	Boundary Conditions>Air>Volume Fraction>Volume Fraction	1
	Boundary Conditions	Water
	Boundary Conditions>Water>Volume Fraction>Volume Fraction	0
	Boundary Conditions ⁽¹⁾	Particle
	Boundary Conditions>Particle>Volume Fraction>Volume Fraction ⁽¹⁾	0

(1) Opção disponível apenas nas simulações trifásicas

4.12.4. Expressions – para as simulações com superfície livre

Quando as simulações foram realizadas pelo modo de superfície livre, esta configuração permite que o CFX defina a superfície d'água. Como na UPFAD este nível é mantido constante por um vertedor a jusante, foram definidos no software: vazão de saída semelhante à soma das de entrada, altura d'água inicial e pressão hidrostática inicial. Para estabelecer os valores iniciais de altura d'água e pressão hidrostática foram inseridas as seguintes equações no software:

$$\text{waterDen}=997 \text{ [kg m}^{-3}\text{]} \quad (35)$$

waterDen: densidade da água.

$$\text{waterHt}= 2.27 \text{ [m]} \quad (36)$$

waterHt: altura d'água inicial.

$$\text{waterVF}=\text{if}(z<\text{waterHt},1,0)*\text{if}(y>-0.01[\text{mm}],1,0)*\text{if}(x>-0.11[\text{mm}],1,0) \quad (37)$$

waterVF: fração volumétrica de água dentro do volume de controle.

$$\text{HydroP} = \text{waterDen} * g * (\text{waterHt} - z) * \text{waterVF} \quad (38)$$

HydroP: pressão hidrostática inicial.

4.12.5. Global Initialization – para as simulações com superfície livre

Tabela 36 - Configurações inseridas em Global Initialization no Setup do ANSYS CFX 13.0

Tab	Setting	Value
Global Settings	Initial Conditions>Static Pressure>Option	Automatic with value
	Initial Conditions>Static Pressure>Relative Pressure	HydroP
Fluid Settings	Fluid Specif Initialization	Water
	Fluid Specif Initialization>Water>Initial Conditions>Volume Fraction>Option	Automatic with value
	Fluid Specif Initialization>Water>Initial Conditions>Volume Fraction>Volume Fraction	waterVF
	Fluid Specif Initialization	Air
	Fluid Specif Initialization>Air>Initial Conditions>Volume Fraction>Option	Automatic with value
	Fluid Specif Initialization>Air>Initial Conditions>Volume Fraction>Volume Fraction	1-waterVF

5. Resultados

5.1. Etapas I

As simulações desta etapa foram feitas com a geometria I e condição de contorno de superfície d'água como parede porosa sem atrito. A condição de saída foi modelada por pressão relativa igual a zero. Os resultados são analisados e apresentados brevemente a seguir, porém vale ressaltar que apresentam erro conceitual na condição de saída ao considerar a pressão relativa como zero, não sendo, portanto, confiáveis.

A Figura 29 apresenta a concentração de ar para as diferentes situações investigadas. Nas imagens 1a, 2a e 3a, o diâmetro utilizado de microbolhas foi o calculado conforme proposto por Guimet (2007) pelo balanço das forças de empuxo, peso e de arrasto, de forma que a velocidade ascensional da bolha seja igual à velocidade de descida do fluido. Segundo Reali (1991) para que a bolha não seja arrastada sua velocidade ascensional deve ser maior que a do fluido. Portanto, é esperado que as microbolhas com diâmetro menor de $75\mu\text{m}$ sejam conduzidas à saída, para as condições de geometria e operação utilizadas nesta etapa (TASZS = $12,3 \pm 0,2$ m/h). Este fato foi notado em todas as simulações com diâmetro de $55\mu\text{m}$ (1c, 2c e 3c), porém não ocorreu na simulação 1b, a qual possui diâmetro de microbolhas de $68,4\mu\text{m}$. O propósito de Guimet (2007) ao igualar as forças nas microbolhas era reproduzir a estratificação do escoamento na Zona de Separação e formação de coluna de microbolhas. Este efeito foi notado apenas na situação 3a, com relação A/V de $7,87\text{g de ar/m}^3$ de água. Em contrapartida, a simulação 3b, com maior diâmetro de microbolhas entre todas foi a que apresentou menor espessura de coluna de microbolhas, como esperado.

Os valores de Gradiente de Velocidade, ilustrados nas Figuras Figura 30 e Figura 31, não variaram significativamente com a concentração de ar e com o diâmetro de microbolhas, porém sua magnitude foi maior do que os valores médios calculados e esperados, descritos no item 4.10.

A estrutura de escoamento obtida para a Zona de Contato foi similar em quase todas as simulações da Etapa I, com fluxo ascendente e recirculação próxima à parede a partir de $z=0,35\text{m}$. Apenas as simulações 2c e 3c apresentaram maior turbulência nessa Zona. Nas imagens com vetores de velocidade geradas no CFX, os vetores estão normalizados e, portanto, apresentam o mesmo tamanho, variando sua cor de acordo com seu módulo.

Figura 29 - Concentração de ar [g/m³]. Plano XZ, y=0,20m. Condições das simulações: $TAS_{ZC}=174,9\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = 0 Pa. 1a) $\frac{A}{V}=4,90\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$; 1b) $\frac{A}{V}=4,90\text{g/m}^3$ e $d_B=68,4\mu\text{m}$; 1c) $\frac{A}{V}=4,90\text{g/m}^3$ e $d_B=55\mu\text{m}$; 2a) $\frac{A}{V}=6,41\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$; 2c) $\frac{A}{V}=6,41\text{g/m}^3$ e $d_B=55\mu\text{m}$; 3a) $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$; 3b) $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=97,3\mu\text{m}$; 3c) $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=55\mu\text{m}$.

Figura 30 – Gradiente de Velocidade (G). Plano YZ, $x=0.035\text{m}$. Condições das simulações: $TAS_{ZC}=174.9\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12.3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2.27\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = 0 Pa. 1a) $\frac{A}{V}=4.90\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$; 1b) $\frac{A}{V}=4.90\text{g/m}^3$ e $d_B=68.4\mu\text{m}$; 1c) $\frac{A}{V}=4.90\text{g/m}^3$ e $d_B=55\mu\text{m}$; 2a) $\frac{A}{V}=6.41\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$; 2c) $\frac{A}{V}=6.41\text{g/m}^3$ e $d_B=55\mu\text{m}$; 3a) $\frac{A}{V}=7.87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$; 3b) $\frac{A}{V}=7.87\text{g/m}^3$ e $d_B=97.3\mu\text{m}$; 3c) $\frac{A}{V}=7.87\text{g/m}^3$ e $d_B=55\mu\text{m}$.

Figura 31 - Gradiente de Velocidade (G). Plano XZ, $y=0,20\text{m}$. Condições das simulações: $TAS_{ZC}=174,9\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = 0 Pa. 1a) $\frac{A}{V}=4,90\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$; 1b) $\frac{A}{V}=4,90\text{g/m}^3$ e $d_B=68,4\mu\text{m}$; 1c) $\frac{A}{V}=4,90\text{g/m}^3$ e $d_B=55\mu\text{m}$; 2a) $\frac{A}{V}=6,41\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$; 2c) $\frac{A}{V}=6,41\text{g/m}^3$ e $d_B=55\mu\text{m}$; 3a) $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$; 3b) $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=97,3\mu\text{m}$; 3c) $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=55\mu\text{m}$.

Figura 32 – Vetores de Velocidade normalizados. Plano YZ, $y=0,035\text{m}$. Condições das simulações: $TAS_{ZC}=174,9\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = 0 Pa. 1a) $\frac{A}{V}=4,90\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$; 1b) $\frac{A}{V}=4,90\text{g/m}^3$ e $d_B=68,4\mu\text{m}$; 1c) $\frac{A}{V}=4,90\text{g/m}^3$ e $d_B=55\mu\text{m}$; 2a) $\frac{A}{V}=6,41\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$; 2c) $\frac{A}{V}=6,41\text{g/m}^3$ e $d_B=55\mu\text{m}$; 3a) $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$; 3b) $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=97,3\mu\text{m}$; 3c) $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=55\mu\text{m}$.

Nas figuras a seguir, os vetores de velocidade na Zona de Separação são comparados com os resultados experimentais de Escher (2011) por sonda microADV. Nota-se nas simulações com microbolhas de diâmetro de $55\mu\text{m}$ (1c e 3c) maior turbulência, devido à presença destas ao longo de toda a Zona de Separação. A simulação 3a apresentou padrão de escoamento estratificado conforme discutido anteriormente e as outras (1a, 1b, 2a e 3b) exibiram estrutura de fluxo similar, seguindo em direção à parede oposta à Zona de Contato e retornando a esta, posteriormente, o fluxo segue à saída e ocorre a formação de um vórtice em sentido anti-horário.

Comparando os resultados obtidos com os experimentais de Escher (2011), nestes não há a formação de vórtice próximo à saída. Observa-se também que os vetores obtidos numericamente são mais comportados próximo à superfície d'água, o que pode ser ocasionado pela condição de contorno de superfície d'água como parede porosa sem atrito. Para elucidação desta teoria, as simulações da Etapa III foram realizadas com superfície livre.

Esta primeira etapa de análises demonstrou uma grande dependência do escoamento perante aos valores de diâmetro de microbolhas, para as condições de simulação adotadas. Vale ressaltar que a adoção de um valor médio de microbolhas é uma simplificação e que na realidade existe uma distribuição com diversas faixas de diâmetros, compondo a fase de bolhas. A fim de se reproduzir uma situação real como, neste caso, a UPFAD seria necessário a adoção de um diâmetro padrão que não necessariamente fosse igual ao médio medido experimentalmente, mas sim, a um valor padrão cujos efeitos no escoamento sejam similares aos efeitos causados pela nuvem de microbolhas com distribuição de diferentes tamanhos, conforme proposto por Guimet (2007).

Figura 33 - Vetores de Velocidade. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$. Condições das simulações: $TAS_{ZC}=174,9\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Paredes porosa sem atrito; Saída = 0 Pa. 1a) $\frac{A}{V}=4,90\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$; 1b) $\frac{A}{V}=4,90\text{g/m}^3$ e $d_B=68,4\mu\text{m}$; 1c) $\frac{A}{V}=4,90\text{g/m}^3$ e $d_B=55\mu\text{m}$. Imagem superior retirada de Escher (2011). Os vetores das imagens inferiores estão normalizados.

Figura 34 - Vetores de Velocidade. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$. Condições das simulações: $TAS_{ZC}=174,9\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = 0 Pa. 2a) $\frac{A}{V}=6,41\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$; 2c) $\frac{A}{V}=6,41\text{g/m}^3$ e $d_B=55\mu\text{m}$. Imagem superior retirada de Escher (2011). Os vetores das imagens inferiores estão normalizados.

Figura 35 - Vetores de Velocidade. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$. Condições das simulações: $TAS_{ZC}=174,9\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = 0 Pa. 1a) $\frac{A}{V}=4,90\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$; 3a) $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$; 3b) $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=97,3\mu\text{m}$; 3c) $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=55\mu\text{m}$. Imagem superior retirada de Escher (2011). Os vetores das imagens inferiores estão normalizados.

5.2. Etapa II

As simulações desta etapa foram feitas com a geometria II, III e IV e condição de contorno de superfície d'água como parede porosa sem atrito. A condição de saída foi modelada por pressão relativa igual a zero. Os resultados são apresentados brevemente no APÊNDICE B – **Resultados Etapa II**.

5.3. Etapa III

5.3.1. *Simulação 3.1*

Esta simulação foi realizada com a geometria I e condição de contorno de superfície como livre. A condição de saída foi modelada por vazão mássica de saída. Os resultados são analisados e apresentados a seguir.

Figura 36 – Condições da simulação: $TAS_{ZC}=178,2\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}= 43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Superfície Livre; Saída = $Q_m= 1,40\text{ kg/s}$. a) Concentração de ar $[\text{g/m}^3]$. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$; b) Fração volumétrica de água. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$. A reta vermelha localiza-se em $z=2,27\text{m}$.

Na Figura 36b é ilustrada a variação da fração volumétrica da água dentro do flotor, por meio desta variável é possível a visualização da superfície d'água calculada pelo

CFX. Esta se manteve bem próxima ao valor inicial informado, com apenas algumas flutuações, conforme mostra a comparação com a reta a $z=2,27\text{m}$. Por outro lado, pela análise da concentração de ar, plotada na Figura 36a, pode-se concluir que as configurações de modelação adotadas nesta simulação não foram capazes de reproduzir a coluna de microbolhas constantemente presente no fluxo de água dentro do flotador. Mesmo com a diminuição do intervalo de concentrações (imagem não inclusa), a concentração de ar era informada apenas próximo à entrada de recirculação e o restante do reator era preenchido pelo intervalo menor (azul escuro).

Os gradientes de velocidade apresentados nas Figura 37 e Figura 38 foram bem maiores do que o valor médio calculado segundo Richter e Netto (1991) e Reali (1991).

Figura 37 – Gradiente de Velocidade na Zona de Contato. Plano YZ. Condições da simulação: $TAS_{ZC}=178,2\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}= 43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. **Condições de Contorno:** Superfície d'água= Superfície Livre; Saída = $Q_m= 1,40\text{ kg/s}$. a) $x=0,035\text{m}$, seção mediana; b) $x=0,0609\text{m}$, plano sobre o eixo dos círculos de entrada de recirculação.

Figura 38 – Gradiente de Velocidade na Zona de Separação. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$. Condições da simulação: $TAS_{ZC}=178,2\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Superfície Livre; Saída = $Q_m=1,40\text{ kg/s}$.

Figura 39 – Vetores de Velocidade. Condições da simulação: $TAS_{ZC}=178,2\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Superfície Livre; Saída = $Q_m=1,40\text{ kg/s}$. a) Plano YZ, $x=0,035\text{m}$; b) Plano XZ, $y=0,20\text{m}$. Os vetores das imagens estão normalizados.

Os vetores de velocidade na Zona de Contato foram ascendentes predominantemente. Já os vetores de velocidade na Zona de Separação apresentaram comportamento anormal, com intenso fluxo de água em direção à superfície superior aberta. Portanto, esta condição de contorno foi abandonada e passou-se para a simulação 3.2.

5.3.2. Simulação 3.2

Esta simulação foi realizada com a geometria I e condição de contorno de superfície livre. A condição de saída foi modelada por pressão relativa igual a 16931,50 Pa. Os orifícios de saída foram representados por tubos de 8 mm de comprimento. Os resultados são analisados e apresentados a seguir.

Figura 40 – Condições da simulação: $TAS_{ZC}=178,2\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}= 43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. **Condições de Contorno:** Superfície d'água= Superfície Livre; Saída = 16931,50 Pa. a) Concentração de ar [g/m^3]. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$; b) Fração volumétrica de água. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$. A reta vermelha localiza-se em $z=2,27\text{m}$.

Assim como na simulação 3.1, a variação da fração volumétrica da água dentro do flotor foi utilizada para visualização da superfície d'água calculada pelo CFX, segundo Figura 40b. A localização desta está de acordo com o esperado, a 2,27m. O resultado para

concentração de ar, ilustrado na Figura 40a, foi similar ao da simulação 3.1, sem representação da coluna de microbolhas. Por outro lado, os gradientes de velocidade apresentados nas Figura 41 e Figura 42 apresentam valores muito menores em relação aos calculados no item 4.10.

Figura 41 – Gradiente de Velocidade na Zona de Contato. Plano YZ. Condições da simulação: $TAS_{ZC}=178,2\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}= 43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. **Condições de Contorno:** Superfície d'água= Superfície Livre; Saída = 16931,50 Pa. a) $x=0,035\text{m}$, seção mediana; b) $x=0,0609\text{m}$, plano sobre o eixo dos círculos de entrada de recirculação.

Na Zona de Contato, os valores de gradiente de velocidade são maiores no plano acima das válvulas de recirculação (Figura 41b) e vão diminuindo em direção a $x=0$, uma vez que as válvulas nesta configuração encontram-se bem próximas ao anteparo. Na Zona de Separação, os valores são ligeiramente mais altos próximo à parede e à superfície d'água, nesta última possivelmente pelo desprendimento das microbolhas.

Figura 42 – Gradiente de Velocidade na Zona de Separação. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$. Condições da simulação: $TAS_{ZC}=178,2\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d’água= Superfície Livre; Saída = $16931,50\text{ Pa}$.

Em relação aos vetores de velocidade, os obtidos para a Zona de Contato possuem comportamento ascendente e organizado, indicando alguma turbulência e retorno próximo à superfície d’água e à transição para a Zona de Separação. A configuração da geometria utilizada nesta simulação não foi contemplada nos estudos de Patrizzi (2005), porém em todas as análises com sonda ADV que a autora realizou na Zona de Contato foi notado um comportamento similar. Na parte inferior da Zona de Contato, a autora observou uma região de mistura, a partir, aproximadamente, da altura de $1,50\text{m}$ tendência de fluxo do tipo “plugflow”, seguida de região com tendência de fluxo de retorno da Zona de Separação para a

Zona de Contato e, na sequencia, região com tendência de fluxo direcionado para a Zona de Separação.

O comportamento observado por Patrizzi (2005) não foi exatamente o observado nas Figura 43 e Figura 44, não estando o fluxo de retorno e a mistura inicial bem definidos, porém considerando a turbulência próxima ao topo do anteparo prevista e a pequena quantidade de pontos levantados pela autora, considera-se que o escoamento na Zona de Contato foi bem representado pela simulação em tela.

Na zona seguinte do flotor, os vetores estão bem desorganizados próximos à superfície d'água, indicando a presença de turbulência nesta região. Em seguida, eles seguem em direção em direção à saída com comportamento desorganizado próximo às paredes.

Esta simulação, assim como a 3.1, apresentou vetores de velocidade de água acima dos limites da superfície d'água, já que a condição de abertura, imposta para a borda do flotor nestes casos, permite a entrada e saída dos fluidos. Porém a vazão mássica média de saída de água pela superfície, calculada pelo software, foi da ordem de $1,7 \cdot 10^{-15}$ kg/s, podendo ser desprezada.

Figura 43 – Vetores de Velocidade. Plano YZ, $x=0,035\text{m}$. Condições da simulação: $TAS_{ZC}=178,2\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Superfície Livre; Saída = $16931,50\text{ Pa}$. Os vetores da imagem estão normalizados.

Figura 44 – Vetores de Velocidade. Plano XZ, $x=0,20\text{m}$. Condições da simulação: $TAS_{ZC}=178,2\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Superfície Livre; Saída = $16931,50\text{ Pa}$. Os vetores da imagem estão normalizados.

A seguir os resultados de velocidade obtidos numericamente foram plotados nos mesmos pontos coletados por Escher (2011) e os vetores não foram normalizados, para facilitar a comparação entre os resultados.

Figura 45 – Vetores de Velocidade. Plano XZ, $x=0.20\text{m}$. Condições da simulação: $TAS_{ZC}=178.2\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12.3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2.27\text{m}$; $\frac{A}{V}=7.87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d’água= Superfície Livre; Saída = 16931.50 Pa . a) resultados numéricos; b) vetores experimentais obtidos por sonda microADV por Escher (2011).

Comparando os vetores de escoamento obtidos nesta simulação com os experimentais de Escher (2011), estes parecem bastante similares, considerando que resultados numéricos, baseados em muitas simplificações, jamais serão idênticos à realidade, assim como, resultados experimentais possuem interferências (mesmo que pequenas, como no caso da sonda utilizada pelas autoras adotadas como parâmetro).

5.3.3. Simulação 3.3

Esta simulação foi realizada com a geometria I e condição de contorno de superfície d’água como parede porosa. A condição de saída foi modelada por pressão relativa igual a 16931.50 Pa e os orifícios foram representados em 3D com 8 mm de comprimento. A

intenção na execução desta simulação foi a de repetir uma das condições empregadas na Etapa I do trabalho (3a), porém com condição de saída adequada.

Apesar da mudança empregada, os resultados não foram muito divergentes dos obtidos na primeira etapa. A concentração de ar obtida possui valores similares, porém indica uma faixa menos espessa de microbolhas. A magnitude do gradiente de velocidade foi similar e ligeiramente maior do que os valores médios calculados, descritos no item 4.10.

Os vetores de velocidade na Zona de Contato apresentam comportamento similar, com sentido ascendente e recirculação próxima à $z=0,35\text{m}$, porém são mais organizados próximo à superfície d'água. Em relação a Zona de Separação, o padrão de escoamento mudou. Com a condição de pressão igual a zero ele estava estratificado, nesta simulação, com a condição de pressão ajustada, o escoamento apresentou padrão similar às simulações 1a, 1b, 2a e 3c, seguindo em direção à parede oposta à Zona de Contato e retornando a esta, posteriormente, o fluxo segue à saída e ocorre a formação de um vórtice em sentido anti-horário.

Novamente foi constatado que os vetores obtidos numericamente são mais comportados próximo à superfície d'água e que tal fato pode ser ocasionado pela condição de contorno de superfície d'água como parede porosa sem atrito. Guimet et al (2007) utilizou condição de contorno parecida para a superfície d'água e os autores atribuíram a esta representação, o fato de que os valores de velocidade tendem a subestimar o impacto da estratificação de ar na Zona de Separação.

Figura 46 - Concentração de ar $[g/m^3]$. Plano XZ, $y=0,20m$. Condições das simulações: $TAS_{ZC}=178,2m/h$; $TAS_{ZS}=12,3m/h$; $TDH_{ZC}=43s$; $H_{água}=2,27m$; $\frac{A}{V}=7,87g/m^3$ e $d_B=75\mu m$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = 16931,50 Pa.

Figura 47 - Gradiente de Velocidade. Condições da simulação: $TAS_{ZC}=178,2m/h$; $TAS_{ZS}=12,3m/h$; $TDH_{ZC}=43s$; $H_{água}=2,27m$; $\frac{A}{V}=7,87g/m^3$ e $d_B=75\mu m$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = 16931,50 Pa. a) Plano YZ, $x=0,035m$; b) Plano XZ, $y=0,20m$.

Figura 48 - Vetores de Velocidade. Condições da simulação: $TAS_{ZC}=178,2\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = $16931,50\text{ Pa}$. a) Plano YZ, $x=0,035\text{m}$; b) Plano XZ, $y=0,20\text{m}$. Os vetores das imagens estão normalizados.

5.3.4. Simulação 3.4

Esta simulação foi realizada com a geometria I e condição de contorno de superfície como livre. A condição de saída foi modelada por pressão relativa igual a zero. Sendo a localização da saída diferente das simulações anteriores. Os resultados são analisados e apresentados a seguir.

Figura 49 – Condições da simulação: $TAS_{ZC}=178,2\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}= 43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d’água= Superfície Livre; Saída = 0 Pa (vertedor). a) Concentração de ar $[\text{g/m}^3]$. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$; b) Fração volumétrica de água. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$. A reta vermelha localiza-se em $z=2,27\text{m}$ e $z=2,08\text{m}$.

Assim como nas simulações 3.1 e 3.2, a variação da fração volumétrica da água dentro do flotor foi utilizada para visualização da superfície d’água calculada pelo CFX, segundo Figura 49b. Mais uma vez a superfície d’água foi de acordo com a esperada. A perda de carga hidráulica calculada pelo software também coincidiu com a calculada no item 4.11.3 de 0,19 m, conforme mostram as retas alocadas em $z=2,27\text{m}$ e $z=2,08\text{m}$.

O resultado para concentração de ar, ilustrado na Figura 49a, seguiu o padrão das simulações anteriores com superfície livre, não sendo capaz de reproduzir, através das configurações de modelação adotadas, a coluna de microbolhas constantemente presente no flotor.

Semelhante ao ocorrido na Simulação 3.2, os gradientes de velocidade apresentados nas Figura 50 e Figura 51 exibem valores menores ao valor médio calculado, porém um pouco maiores que os da Simulação 3.2, principalmente próximo às paredes e à superfície d’água.

Figura 50 – Gradiente de Velocidade na Zona de Contato. Plano YZ. Condições da simulação: $TAS_{ZC}=178,2\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}= 43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. **Condições de Contorno:** Superfície d'água= Superfície Livre; Saída = 0 Pa (vertedor). a) $x=0,035\text{m}$, seção mediana; b) $x=0,0609\text{m}$, plano sobre o eixo dos círculos de entrada de recirculação.

Na Zona de Contato, os valores de gradiente de velocidade são maiores no plano acima das válvulas de recirculação (Figura 50) e vão diminuindo em direção a $x=0$, uma vez que as válvulas nesta configuração encontram-se bem próximas ao anteparo. Na Zona de Separação, os valores são mais altos próximo à parede e à superfície d'água, nesta última possivelmente pelo desprendimento das microbolhas.

Figura 51 – Gradiente de Velocidade na Zona de Separação. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$. Condições da simulação: $TAS_{ZC}=178,2\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}= 43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Superfície Livre; Saída = 0 Pa (vertedor).

Em relação aos vetores de velocidade, na Zona de Contato estes possuem comportamento ascendente e organizado, indicando alguma turbulência próxima à superfície d'água e na transição para a Zona de Separação. Assim como na Simulação 3.2, o comportamento observado nas Figura 52 e Figura 53 não foi exatamente o observado por Patrizzi (2005), não estando o fluxo de retorno e a mistura inicial bem definidos, porém, considerando a turbulência próxima ao topo do anteparo prevista e a pequena quantidade de

pontos levantados pela autora, considera-se que o escoamento na Zona de Contato também foi bem representado por esta simulação.

Na zona seguinte do flutador, os vetores estão bem desorganizados próximos à superfície d'água, indicando a presença de turbulência nesta região. Em seguida, eles seguem em direção à parede oposta ao anteparo e pra baixo. Aproximadamente da metade da Zona de Separação até a saída, os vetores possuem direção negativa no eixo z, com comportamento desorganizado próximo às paredes.

Esta simulação, assim como as outras com superfície livre, apresentou vetores de velocidade de água acima dos limites da superfície d'água. Porém a vazão mássica média de saída de água pela superfície, calculada pelo software, foi da ordem de $8,9 \cdot 10^{-10}$ kg/s, podendo ser desprezada.

Figura 52 – Vetores de Velocidade. Plano YZ, $x=0,035\text{m}$. Condições da simulação: $TAS_{ZC}=178,2\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Superfície Livre; Saída = 0 Pa (vertedor). Os vetores da imagem estão normalizados.

Figura 53 – Vetores de Velocidade. Plano XZ, $x=0,20\text{m}$. Condições da simulação: $TAS_{ZC}=178,2\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Superfície Livre; Saída = 0 Pa (vertedor). Os vetores da imagem estão normalizados.

Abaixo foi ilustrado também o escoamento no trecho que encaminha o fluido dos orifícios ao vertedor. Este se mostrou bem similar ao escoamento na Zona de Contato, com vetores ascendentes e relativamente bem organizados.

Figura 54 – Vetores de Velocidade. Plano YZ, $x=1,20\text{m}$. Condições da simulação: $TAS_{ZC}=178,2\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Superfície Livre; Saída = 0 Pa (vertedor). Os vetores da imagem estão normalizados.

A seguir os resultados de velocidade obtidos numericamente foram plotados nos mesmos pontos coletados por Escher (2011) e os vetores não foram normalizados, para facilitar a comparação entre os resultados.

Figura 55 – Vetores de Velocidade. Plano XZ, $x=0.20\text{m}$. Condições da simulação: $TAS_{ZC}=178.2\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12.3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2.27\text{m}$; $\frac{A}{V}=7.87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Superfície Livre; Saída = 0 Pa (vertedor). a) resultados numéricos; b) vetores experimentais obtidos por sonda microADV por Escher (2011).

Comparando os vetores de escoamento obtidos nesta simulação com os experimentais de Escher (2011), estes também parecem bastante similares, considerando as simplificações e interferências intrínsecas aos métodos utilizados para geração de cada um destes resultados.

Comparação entre as simulações 3.2 e 3.4

Figura 56 – Vetores de Velocidade. Plano XZ, $x=0,20\text{m}$. Condições da simulação: $TAS_{ZC}=178,2\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=7,87\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. a) Condições de Contorno: Superfície d'água= Superfície Livre; Saída = $16931,50\text{ Pa}$; b) Condições de Contorno: Superfície d'água= Superfície Livre; Saída = 0 Pa (vertedor); c) vetores experimentais obtidos por sonda microADV por Escher (2011).

Comparando os resultados numéricos com o experimental, a simulação 3.2 aparenta representar melhor a metade inferior da Zona de Separação e a simulação 3.4 a metade superior, com maior turbulência próximo à superfície d'água. Levando em consideração a escolha entre um dos dois modelos, acredita-se que a modelação com vertedor seja melhor, por ser mais fiel à realidade. Portanto, mais testes foram realizados na Etapa IV, utilizando o modelo da simulação 3.4.

5.4. Etapa IV

Comparando os resultados obtidos nas cinco simulações desta etapa com os da Simulação 3.4 da Etapa III, todos foram muito parecidos. Os vetores de velocidade apresentaram o mesmo comportamento, muito possivelmente pela falha do modelo em detectar a distribuição de concentração de ar no flutador, como observado na Figura 49a.

Na Zona de Separação, os vetores estão bem desorganizados próximos à superfície d'água, indicando a presença de turbulência nesta região. Em seguida, eles seguem em

direção à parede oposta ao anteparo e pra baixo. Aproximadamente da metade da Zona de Separação até a saída, os vetores possuem direção negativa no eixo z, com comportamento desorganizado próximo às paredes.

Consequentemente, não foi possível a observação da influência na estrutura de escoamento das modificações realizadas na entrada de recirculação, variação da razão de recirculação, taxa de aplicação superficial na Zona de Separação e na altura da unidade.

Figura 57 - Vetores de Velocidade. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$. Condições das simulações: $TAS_{zc}=171,7\text{m/h}$; $\frac{A}{V}=4,90\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Superfície Livre; Saída = 0 Pa. Os vetores das imagens estão normalizados. As retas vermelhas representam a localização da superfície d'água.

Figura 58 - Vetores de Velocidade. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$. Condições das simulações: $TAS_{ZC}=171,7\text{m/h}$; $\frac{A}{V}=4,90\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Superfície Livre; Saída = 0 Pa. Os vetores das imagens estão normalizados. As retas vermelhas representam a localização da superfície d'água.

5.5. Etapa V

5.5.1. *Simulação 5.1*

Esta simulação foi realizada com a geometria apresentada na Figura 28, incluindo o encaminhamento da água clarificada dos orifícios até o vertedor, e condição de contorno de superfície d'água como parede porosa. A condição de saída foi modelada por pressão relativa igual a zero e foi representada pelo retângulo acima do vertedor.

Os valores de concentração de ar observados na Figura 59 apresentaram coluna de microbolhas muito larga na Zona de Separação, com grande concentração de microbolhas até metade de sua extensão. Os resultados de Gradiente de Velocidade também foram altos, em relação ao valor teórico esperado de 17s^{-1} . Já os vetores de velocidade obtidos apresentaram

comportamento anormal, com recirculação anti-horária, a qual ignora a inércia advinda do escoamento proveniente da Zona de Contato.

Figura 59 - Concentração de ar [g/m³]. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$. Condições das simulações: $TAS_{ZC}=171,7\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,2\text{m/h}$; $TDH_{ZC}= 43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=4,90\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = 0 Pa.

Figura 60 - Concentração de ar [g/m³]. Plano XZ, y=0,20m. Condições das simulações: $TAS_{ZC}=171,7\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,2\text{m/h}$; $TDH_{ZC}= 43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=4,90\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = 0 Pa.

Figura 61 – Vetores de Velocidade. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$. Condições das simulações: $TAS_{ZC}=171,7\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,2\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=4,90\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = 0 Pa. Os vetores das imagens estão normalizados.

5.5.2. Simulação 5.2

A simulação 5.2 foi a única deste trabalho com modelo Eulerian-Lagrangian. Com condições idênticas à Simulação 5.1, diferindo apenas na abordagem adotada. Pela análise da concentração de ar, na Figura 62, pode-se notar que o valor utilizado de microbolhas rastreáveis (variável *Number of Positions*) não foi suficiente para reproduzir a concentração de microbolhas no flutador. Os valores de Gradiente de Velocidade foram próximos ao teórico calculado de 17 s^{-1} . Os vetores de velocidade na Zona de Separação apresentaram

comportamento similar aos obtidos por Bondelind (2011) e Lundh (2000⁴, apud Bondelind, 2011) para simulações com apenas uma fase (água), com padrão circular no sentido horário. Tal semelhança é condizente, uma vez que, a falha do modelo em reproduzir a alta concentração de microbolhas, aproxima aquele da condição de ausência destas.

Figura 62 - Concentração de ar $[\text{g/m}^3]$. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$. Condições das simulações: $\text{TAS}_{\text{ZC}}=171,7\text{m/h}$; $\text{TAS}_{\text{ZS}}=12,2\text{m/h}$; $\text{TDH}_{\text{ZC}}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=4,90\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = 0 Pa.

⁴ LUNDH, M. **Flow Structure in dissolved air flotation – Experimental study in a pilot plant**. Licenciante thesis, Department of water and environmental Engineering, Lund Institute of Technology, 2000.

Figura 63 – Gradiente de Velocidade. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$. Condições das simulações: $TAS_{ZC}=171,7\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,2\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=4,90\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = 0 Pa.

Figura 64 – Vetores de Velocidade. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$. Condições das simulações: $TAS_{ZC}=171,7\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,2\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=4,90\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = 0 Pa. Os vetores das imagens estão normalizados.

5.5.3. Simulação 5.3

Esta simulação foi realizada com a geometria I e condição de contorno de superfície d'água como parede porosa. A condição de saída foi modelada por pressão relativa igual a 16931,50 Pa e os orifícios foram representados em 3D com 8 mm de comprimento. A intenção na execução desta simulação foi a de repetir uma das condições empregadas na Etapa III do trabalho (Simulação 3.3), porém com razão de recirculação de 6%.

Apesar da mudança empregada, os resultados foram semelhantes aos obtidos na terceira etapa. A concentração de ar calculada pelo CFX possui valores similares, porém indica uma faixa menos espessa de microbolhas na superfície da Zona de Separação. A

magnitude do gradiente de velocidade foi similar, com valores mais altos próximo à região das válvulas agulha, porém o valor médio na Zona de Contato foi próximo ao teórico calculado de 17 s^{-1} .

Os vetores de velocidade na Zona de Separação apresentaram padrão similar à simulação 3.3, seguindo alinhadamente em direção à parede oposta à Zona de Contato e retornando a esta, posteriormente, o fluxo segue à saída e ocorre a formação de um vórtice em sentido anti-horário. Este vórtice próximo à saída não foi observado nas análises experimentais de Escher (2011).

Figura 65 - Concentração de ar $[\text{g}/\text{m}^3]$. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$. Condições das simulações: $TAS_{ZC}=171,7\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}= 43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=4,90\text{g}/\text{m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = $16931,50\text{Pa}$.

Figura 66 - Gradiente de Velocidade. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$ Condições da simulação: $TAS_{ZC}=171,7\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=4,90\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = $16931,50\text{Pa}$.

Figura 67 - Vetores de Velocidade. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$. Condições da simulação: $TAS_{ZC}=171,7\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=43\text{s}$; $H_{\text{água}}=2,27\text{m}$; $\frac{A}{V}=4,90\text{g/m}^3$ e $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = $16931,50\text{Pa}$. Os vetores das imagens estão normalizados.

6. Conclusões e Recomendações

Os resultados mostraram que as simulações com parede porosa subestimaram os vetores de velocidade próximos à superfície, porém apresentaram resultados de concentração de ar próximos ao esperado. Em contrapartida, as simulações com superfície livre foram capazes de reproduzir melhor a turbulência próxima à superfície d'água, entretanto, não descreveram bem a camada de microbolhas no meio líquido.

Nenhuma das simulações realizadas apresentou resultados suficientemente satisfatórios para reprodução confiável da estrutura de escoamento no interior das Zonas de Contato e de Separação da UPFAD em questão. As simulações com condição de contorno de superfície livre apresentaram vetores de velocidade muito similares aos experimentais utilizados como referência, porém falharam em reproduzir a distribuição de microbolhas no meio líquido, como pode ser observado nas simulações 3.2 e 3.4 da Etapa III e nas simulações da Etapa IV. Por outro lado, a modelação da superfície d'água como parede sem atrito permeável ao ar trouxe bons resultados de concentração de ar e gradiente médio de velocidade, porém os vetores de velocidade não se aproximaram dos dados experimentais, como pode ser observado nas simulações 3.3 da Etapa III e 5.3 da Etapa V.

Em relação à simulação 5.2 da Etapa V, realizada com abordagem Eulerian-Lagrangian, observou-se que os resultados de vetores de velocidade foram similares aos obtidos em pesquisas anteriores, que utilizaram tanto testes experimentais quanto numéricos monofásicos. Tal concordância é válida, visto que a concentração de microbolhas no flutador reproduzida pelo modelo foi muito baixa, em comparação ao valor médio teórico. Possivelmente, se o número de partículas fluidas rastreáveis fosse maior, seu efeito no escoamento seria captado.

A partir dos resultados obtidos, para a realização de trabalhos posteriores, os seguintes procedimentos são recomendados:

- Recomenda-se a realização de mais testes com simulações Eulerian-Eulerian, com superfície d'água modelada por parede porosa sem atrito, de modo a ajustar as condições de contorno, adequando os resultados de vetores de velocidade;
- Utilização de modelo Eulerian-Eulerian similar ao empregado neste trabalho, porém com dois diâmetros de microbolhas. No qual, cada diâmetro compõe um fluido disperso.

- Realização de mais testes com simulações Eulerian-Lagrangian, se a capacidade computacional disponível permitir;
- Utilização de modelo Eulerian-Eulerian-Lagrangian, composto por água como fluido contínuo (Eulerian), microbolhas como fluido disperso (Eulerian) e microbolhas como partículas fluidas rastreáveis (Lagrangian).
- Recomenda-se também a inserção nas simulações de diâmetro de microbolhas variável (considerando aglutinação e quebra).
- Adoção de parâmetros quantitativos para comparação dos resultados, como, por exemplo: a distribuição do tempo de detenção hidráulico (por meio de teste de traçador ou integração dos campos de velocidade), histograma de vorticidade, histograma de velocidades.
- Obtenção da relação de eficiência de remoção de cor e turbidez com gasto energético para operação da unidade de flotação.
- Para comparação mais clara dos resultados experimentais com os numéricos e melhor caracterização do escoamento na unidade piloto em tela, recomenda-se a realização de análises experimentais com sonda ADV com malha bem refinada, mesmo que em apenas uma condição de geometria e operação, em ambas as zonas do flotador.
- Em relação a pesquisadores que desejam iniciar seus estudos na área de CFD, as recomendações são de que se comece pela condição mais simples, adicionando de forma gradativa outras variações nas simulações. Por exemplo, no caso da flotação, começar com simulação monofásica (apenas água), depois acrescentar as microbolhas, analisar os resultados em relação a possíveis erros físicos de configuração do modelo e se possível compará-los com resultados experimentais. Em seguida, pode-se partir para um modelo mais completo, através da inserção de diferentes tamanhos de microbolhas, modelos de quebra e aglutinação destas, acréscimo da fase sólida, diferentes tamanhos de partículas e, finalmente, inserção de modelos de remoção de partículas.

7. Referências Bibliográficas

AMATO, T.; WICKS, J. **The practical application of computational fluid dynamics to dissolved air flotation, water treatment plant operation, design and development.** Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA 58, 65-73, 2009.

ANSYS CFX. **User's Guide, versão 13.0.** Ansys Inc, março 2012.

ARAUJO, C. J. **Influência da Velocidade Cross-Flow na Câmara de Flotação na Eficiência de Unidades de Flotação por Ar Dissolvido tratando Água para Abastecimento.** Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 119p., 2010.

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 365, 137-144, 2010a.

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 of environmental engineering 136, 1424-1434, 2010b.

BONDELIND, M. **Dissolved Air Flotation: A numerical investigation of the flotation process.** Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. Department of Civil and Environmental Engineering Water Environment Technology, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Gothenburg, Sweden, 2011.

BONDELIND, M. **Investigating the applicability to use Computational Fluid Dynamics for modeling Dissolved Air Flotation.** The 6th International Conference on Flotation for Water and Wastewater Systems, NY USA, 2012.

BONDELIND, M.; STRÖM, H.; SASIC, S.; BERGDAHL, L. **Eulerian modelling of the formation and flow of aggregates in Dissolved Air Flotation.** Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'12): The 15th International Conference on Fluid Flow Technologies, Budapest, Hungary, September 4-7, 2012.

CROSSLEY, I.A.; ROKJER, D.; KIM, J. **Optimizing the DAF process utilizing two phase 3D CFD modeling.** Proc. AWWA Chicago, Illinois, 35-41, 1999.

EDZWALD, J. K. **Dissolved Air Flotation and me.** Water Research, 44, 2077-2106, 2010.

EDZWALD, J. K.; HAARHOFF, J. **Dissolved Air Flotation for Water Clarification**. McGraw Hill, 2012.

EMMANOUIL, V.; SKAPERDAS, E. P.; KARAPANTSIOS, T. D.; MATIS, K. A. **Two-phase simulations of an off-nominally operating dissolved-air flotation tank**. International Journal of Environment and Pollution 30, 213-230, 2007.

EMMANOUIL, V. A.; KARAPANTSIOS, T. D.; MATIS, K. A. **Two- and three-phase simulations of an ill-functioning dissolved-air flotation tank**. International Journal of Environment and Waste Management 8, 215-228, 2011.

ESCHER, A. E. **Influência da Taxa de Aplicação Superficial e da Concentração de Ar na Eficiência de Clarificação de Água de Abastecimento em Unidades de Flotação por Ar Dissolvido**. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 104p., 2011.

ESCHER, A. E. ; REALI, M. A. P.; PELEGRINO, E. C. F. **Influence of Hydraulic loading rate in the contact and separation zones on the performance of a DAF pilot unit applied for drinking water clarification**. In: The 6th International Conference on Flotation for Water and Waste Water Systems, 2012, New York. Proceedings of The 6th International Conference on Flotation for Water and Waste Water Systems. New York: IWA, 2012. v. 1. p. 1-8.

FAWCETT, N. S. J. **The hydraulics of flotation tanks: computational modelling**. Dissolved air flotation, Proceedings of the Int. Conf. Chartered Institute of Water and Environmental Management, London, 51-71, 1997.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. LTC Editora Guanabara Dois S.A, Rio de Janeiro, 7ª edição, 2012.

GUIMET, V.; BROUTIN, C.; VION, P.; GLUCINA, K. **CFD modeling of high-rate dissolved air flotation**. Proceedings of The 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems, Seoul South Korea, 113-119, 2007.

HAARHOFF, J.; EDZWALD, J. K. **Dissolved air flotation modeling: insights and shortcomings**. Journal of Water Supply: Research and Technology – Aqua, 53 (3), 127-150, 2004.

HAGUE, J.; TA, C. T.; BIGGS, M. J. **Dense Micro-bubble flow system CFD modeling and experimental validation**. 4 th international conference of multiphase flow, ICMF, Hague, 2001a.

HAGUE, J.; TA, C. T.; BIGGS, M. J.; SATTARY, J. A. **Small scale model for CFD validation in DAF application.** Water Science and Technology 43, 167-173, 2001b.

ISHII, M.; ZUBER, N. **Drag coefficient and relative velocity in bubbly, droplet or particulate flows.** A.I.Ch.E. Journal, 5, 843-855, 1979.

KOSTOGLU, M.; KARAPANTSIOS, T. D.; MATIS, K. A. **CFD model for the design of large scale flotation tanks for water and wastewater treatment.** Industrial and Engineering Chemistry Research 46, 6590-6599, 2007.

KUNDU, P. K.; COHEN, I. M. **Fluid Mechanics.** Second Edition, Academic Press, San Diego, USA, 2002.

KWON, S. B.; PARK, N. S.; LEE, S. J.; AHN, H. W.; WANG, C. K. **Examining the effect of length/width ratio on the hydro-dynamic behavior in a DAF system using CFD and ADV techniques.** Water Science and Technology 53, 141-149, 2006.

LAKGHOMI, B.; LAWRYSHYN, Y.; HOFMANN, R. **Importance of flow stratification and bubble aggregation in the separation zone of a dissolved air flotation tank.** Water Research, In press, 2012.

LUNDH, M.; JONSSON, L.; DAHLQUIST, J. **The flow structure in the separation zone of a DAF pilot plant and the relation with bubble concentration.** Water Science and Technology. v.43, p.185-194, 2001.

MAIA, K. A. **Influência da Velocidade de Entrada na Zona de Contato na Eficiência de Clarificação de Unidades Retangulares de Flotação por Ar Dissolvido Aplicado no Tratamento de Águas para Abastecimento.** Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 120p., 2010.

MAIA, K. A.; REALI, M. A. P.; PIOLTINE, A. **The influence of the water velocity at the entrance of the contact zone on the performance of a DAF pilot plant.** In: The 6th International Conference on Flotation for Water and Waste Water Systems., 2012, New York. Proceedings of The 6th International Conference on Flotation for Water and Waste Water Systems. New York, 2012. v. 1. p. 1-8.

MORUZZI, R. B. **Avaliação da Influência da Distribuição de Tamanho de Partículas e do Binômio Velocidade/Tempo de Detenção na Zona de Reação no Desempenho da Flotação com Utilização de Sonda Ultrassônica e Técnica de Análise por Imagem.** Tese de doutorado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 240p., 2005.

MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. **Characterization of Micro-bubble Size Distribution and flow configuration in DAF Contact Zone by a Non-intrusive Image Analysis System and tracer tests.** Water Science and Technology, 2007.

NIST. National Institute of Standards and Technology. Disponível em: <webbook.nist.gov/chemistry/fluid>. Acesso em: 08 Dez. 2013.

PATRIZZI, L. J. **Relatório de pós-doutorado apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos.** São Carlos: EESC-USP, 2005.

PATRIZZI, L. J. **Remoção de Ferro, Manganês e Substancias Húmicas de Água para Abastecimento, com Uso de Flotação por Ar Dissolvido de Alta Taxa e Oxidação Química.** Tese de doutorado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 232p, 2002.

PIOLTINE, A.; REALI, M. A. P. **Influence of Flocculated Particles Size on the Efficiency of Dissolved Air Flotation.** In: 8th IWA Leading-Edge Conference on Water and Wastewater Technologies, 2011, Amsterdam, The Netherlands. 8th IWA Leading-Edge Conference on Water and Wastewater Technologies 6th-10th June, 2011.

PIOLTINE, A. **Influência do tamanho de partículas floculadas na eficiência da clarificação de águas para abastecimento por flotação.** Tese de doutorado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 120p., 2013.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica.** 3a. edição Projeto. REENGE, EESC/USP, 2004.

POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C. **Mecânica dos Fluidos.** Thompson Learning Ltda, Brasil, tradução da 3ª edição norte-americana, 2004.

REALI, M. A. P. **Concepção e Avaliação de um Sistema Compacto para Tratamento de Água de Abastecimento Utilizando o Processo de Flotação por Ar Dissolvido e Filtração com Taxa Declinante.** Tese de Doutorado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 373p, 1991. 2v.

REALI, M. A. P.; PATRIZZI, L. J. **The Influence of the Contact Zone Configuration on the Efficiency of a DAF Pilot Plant.** In: The 5 th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems, Seoul, Korea, 2007.

RICHTER, C. A.; NETTO, J. M. A. **Tratamento de água: tecnologia atualizada.** São Paulo-SP: Blucher, 1991, p.136-146.

SHAWWA, A. R.; DANIEL, W. S. **Hydrodynamics characterization in dissolved air flotation (DAF) contact zone.** Water Science and Technology, 38(6), 245-252, 1998.

SOUZA, I. M. F. **Influência do Gradiente Médio de Velocidade na Zona de Contato na Eficiência de Clarificação de Água para Abastecimento por Flotação.** Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 85p., 2012.

TA, C. T.; BECKLEY, J.; EADES, A. **Practical methods for validating a computational fluid dynamics-based dissolved air flotation model.** Proceedings Int. Conf. AWWA WQTC Boston MA, USA, 1996.

TA, C. T.; BRIGNAL, W. J. **Application of single phase Computational Fluid Dynamics techniques to Dissolved Air Flotation Tank studies.** In Dissolved air flotation, Proc. Int. Conf. Chartered Institute of Water and Environmental Management, London 471-487, 1997.

TA C. T.; BECKLEY, J.; EADES, A. **A multiphase CFD model of DAF process.** Water Science and Technology, 48(8), 153-157, 2001.

WOLS, B. **Computational Fluid Dynamics in Drinking-Water Treatment.** IWA Publishing. 141 p, 2012.

APÊNDICE A – Cálculo da massa específica do ar a 25°C, 96kPa e com 100% de saturação de vapor d'água

Cálculo da pressão de saturação de vapor:

$$e_s = 610,8 * \exp^{\frac{17,3*T}{237,3+T}} \quad (39)$$

Em que:

e_s : pressão de saturação de vapor [Pa];

T : temperatura [°C].

$$e_{s,25} = 610,8 * \exp^{\frac{17,3*25}{237,3+25}} = 3176,8 \text{ Pa}$$

Concentração de vapor de água no ar quando a pressão de vapor é igual à de saturação:

$$\frac{n_{H_2O}}{V} = \frac{e_s}{R * T} \quad (40)$$

Em que:

$\frac{n_{H_2O}}{V}$: número de moles de água por m³ de ar [mol/m³];

e_s : pressão de saturação de vapor [Pa];

R : constante dos gases;

T : temperatura [K].

$$\frac{n_{H_2O}}{V} = \frac{3176,8}{8,314 * (273,15 + 25)} = 1,282 \text{ mol/m}^3$$

Concentração de moles no ar a 25°C e 96kPa:

$$\frac{n}{V} = \frac{P}{R * T} \quad (41)$$

Onde:

$\frac{n}{V}$: número de moles por m³ de ar [mol/m³];

P : pressão [Pa];

R : constante dos gases;

T : temperatura [K].

$$\frac{n}{V} = \frac{96000}{8,314 * 298,15} = 38,728 \text{ mol/m}^3$$

Composição do ar:

$$\text{Teor de água} = \frac{1,282}{38,728} = 0,033 = 3,3\% \text{ de água no ar}$$

Considerando apenas os principais componentes do ar como Nitrogênio (78%), Oxigênio (21%) e Argônio (1%), a nova composição seria:

$$100\% - 3,3\% = 96,7\%$$

$$\text{Nitrogênio: } 78\% * 0,967 = 75,43\%$$

$$\text{Oxigênio: } 21\% * 0,967 = 20,31\%$$

$$\text{Argônio: } 1\% * 0,967 = 0,96\%$$

Portanto, o ar a 25°C, 96kPa e 100% de saturação de vapor é composto de 75,43% de

Nitrogênio, 20,31% de Oxigênio, 0,96% de Argônio e 3,3% de vapor d'água.

Cálculo da massa específica do ar:

$$\text{Nitrogênio: } 75,43\% * 38,728 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} = \frac{29,21 \text{ mol}}{\text{m}^3} * \frac{28 \text{ g}}{\text{mol}} = 817,88 \text{ g/m}^3$$

$$\text{Oxigênio: } 20,31\% * 38,728 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} = \frac{7,86 \text{ mol}}{\text{m}^3} * \frac{32 \text{ g}}{\text{mol}} = 251,52 \text{ g/m}^3$$

$$\text{Argônio: } 0,96\% * 38,728 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} = \frac{0,37 \text{mol}}{\text{m}^3} * \frac{40 \text{g}}{\text{mol}} = 14,8 \text{g/m}^3$$

$$\text{Água: } \frac{1,282 \text{mol}}{\text{m}^3} * \frac{18 \text{g}}{\text{mol}} = 23,078 \text{g/m}^3$$

$$\rho_{ar} = 817,88 + 251,52 + 14,8 + 23,076 = 1107,3 \text{g/m}^3$$

APÊNDICE B – Resultados Etapa II

As simulações desta etapa foram feitas com as geometrias II, III, IV e V e condição de contorno de superfície d'água como parede porosa sem atrito. A condição de saída foi modelada por pressão relativa igual a zero. Os resultados são analisados e apresentados brevemente a seguir, porém vale ressaltar que apresentam erro conceitual na condição de saída ao considerar a pressão relativa como zero, não sendo, portanto, confiáveis.

Figura 68 – Concentração de ar. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$, $H_{\text{água}}=1,98\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = 0 Pa. 1a) $TAS_{ZC}=125\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=8,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}= 29\text{s}$; $\frac{A}{V}=8,65\text{g/m}^3$ e $d_B=63\mu\text{m}$. 2) $TAS_{ZC}=179\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=8,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}= 34\text{s}$; $\frac{A}{V}=8,65\text{g/m}^3$. 2a) $d_B=63\mu\text{m}$; 2b) $d_B=97,3\mu\text{m}$; 2c) $d_B=55\mu\text{m}$. 3) $TAS_{ZC}=179\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}= 34\text{s}$; $\frac{A}{V}=4,36\text{g/m}^3$. 3a) $d_B=75\mu\text{m}$; 3b) $d_B=68,4\mu\text{m}$. 4a) $TAS_{ZC}=179\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}= 34\text{s}$; $\frac{A}{V}=8,65\text{g/m}^3$; $d_B=75\mu\text{m}$.

Figura 69 - Gradiente de Velocidade. Plano YZ, $x=0,01\text{m}$, $H_{\text{água}}=1,98\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = 0 Pa. 1a) $TAS_{ZC}=125\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=8,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=29\text{s}$; $\frac{A}{V}=8,65\text{g/m}^3$ e $d_B=63\mu\text{m}$. 2) $TAS_{ZC}=179\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=8,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=34\text{s}$; $\frac{A}{V}=8,65\text{g/m}^3$. 2a) $d_B=63\mu\text{m}$; 2b) $d_B=97,3\mu\text{m}$; 2c) $d_B=55\mu\text{m}$. 3) $TAS_{ZC}=179\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=34\text{s}$; $\frac{A}{V}=4,36\text{g/m}^3$. 3a) $d_B=75\mu\text{m}$; 3b) $d_B=68,4\mu\text{m}$. 4a) $TAS_{ZC}=179\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=34\text{s}$; $\frac{A}{V}=8,65\text{g/m}^3$; $d_B=75\mu\text{m}$.

Figura 70 - Gradiente de Velocidade. Plano XZ, $y=0,20\text{m}$, $H_{\text{água}}=1,98\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = 0 Pa. 1a) $TAS_{ZC}=125\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=8,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=29\text{s}$; $\frac{A}{V}=8,65\text{g/m}^3$ e $d_B=63\mu\text{m}$. 2) $TAS_{ZC}=179\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=8,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=34\text{s}$; $\frac{A}{V}=8,65\text{g/m}^3$. 2a) $d_B=63\mu\text{m}$; 2b) $d_B=97,3\mu\text{m}$; 2c) $d_B=55\mu\text{m}$. 3) $TAS_{ZC}=179\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=34\text{s}$; $\frac{A}{V}=4,36\text{g/m}^3$. 3a) $d_B=75\mu\text{m}$; 3b) $d_B=68,4\mu\text{m}$. 4a) $TAS_{ZC}=179\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=34\text{s}$; $\frac{A}{V}=8,65\text{g/m}^3$; $d_B=75\mu\text{m}$.

Figura 71 – Vetores de Velocidade. Plano XZ, $y=0,218\text{m}$. Condições das simulações: $TAS_{ZC}=125\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=8,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=34\text{s}$; $H_{\text{água}}=1,98\text{m}$; $\frac{A}{V}=8,65\text{g/m}^3$ e $d_B=63\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = 0 Pa. a) Dados obtidos numericamente, com vetores normalizados; b) dados experimentais de Patrizzi (2005) na Zona de Contato com comprimento de 10cm.

A Figura 72 foi composta pela distorção das imagens da Figura 71, a fim de igualar o nível d'água das duas imagens e facilitar a comparação. O resultado numérico apresenta clara e intensa recirculação na Zona de Contato, fato não apontado pelos vetores experimentais de Patrizzi (2005), que apesar de não estarem alinhados verticalmente, apresentam direção ascensional. O mesmo pode ser observado na Figura 73. Acredita-se que a recirculação observada na Zona de Contato também seja decorrente da condição de contorno de parede porosa sem atrito para a superfície d'água.

Figura 72 – Vetores de Velocidade. Plano XZ, $y=0,218\text{m}$. Condições das simulações: $TAS_{ZC}=125\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=8,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}= 34\text{s}$; $H_{\text{água}}=1,98\text{m}$; $\frac{A}{V}=8,65\text{g/m}^3$ e $d_B=63\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = 0 Pa. a) Dados obtidos numericamente, com vetores normalizados; b) resultado experimental de Patrizzi (2005).

Figura 73 – Vetores de Velocidade. Plano YZ, $x=0,047\text{m}$. Condições das simulações: $TAS_{ZC}=179\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=8,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=34\text{s}$; $H_{\text{água}}=1,98\text{m}$; $\frac{A}{V}=8,65\text{g/m}^3$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = 0 Pa. 2a) $d_B=63\mu\text{m}$; 2b) $d_B=97,3\mu\text{m}$; 2c) $d_B=55\mu\text{m}$. Imagem superior retirada de Patrizzi (2005). Os vetores das imagens inferiores estão normalizados.

Figura 74 – Vetores de Velocidade. Plano XZ, $y=0.24\text{m}$. Condições das simulações: $TAS_{ZC}=179\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=8.3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=34\text{s}$; $H_{\text{água}}=1.98\text{m}$; $\frac{A}{V}=8.65\text{g/m}^3$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = 0 Pa . 2a) $d_B=63\mu\text{m}$; 2b) $d_B=97.3\mu\text{m}$; 2c) $d_B=55\mu\text{m}$. Imagem superior retirada de Patrizzi (2005). Os vetores das imagens inferiores estão normalizados.

Figura 75 – Vetores de Velocidade. Plano XZ, $y=0,1999\text{m}$. Condições das simulações: $TAS_{ZC}=179\text{m/h}$; $TAS_{ZS}=12,3\text{m/h}$; $TDH_{ZC}=34\text{s}$; $H_{\text{água}}=1,98\text{m}$; $\frac{A}{V}=8,65\text{g/m}^3$; $d_B=75\mu\text{m}$. Condições de Contorno: Superfície d'água= Parede porosa sem atrito; Saída = 0 Pa. 4a) Resultado numérico, com vetores normalizados. A imagem da direita foi retirada de Patrizzi (2005).

APÊNDICE C - Outras configurações específicas do CFX utilizadas

Simulação	Default Domain				Boundary Conditions														Solver Control
	Fluid and Particle Definition>Ar>Morphology	Buoy. Ref. Density	Fluid Pair Models>Water Air		Entrada		Entrada de Recirculação					Saída			Superfície				TimeScale Control
			Particle Coupling	Drag Force	Type	Mass and Momentum>Option	Type	Mass and Momentum>Option	Fluid Values		Localização	Type	Mass and Momentum>Option	Type	Mass and Momentum>Option	Fluid Values>Ar			
									Mass and Momentum>Option	Particle Position						Number of Position	Restitution Coefficient	Mass Flow Absorption	
3.4 (Etapa III)	Dispersed Fluid	997 [kg/m³]	-	Ishii Zuber	Inlet	Mass Flow Rate	Inlet	Mass Flow Rate	-	-	-	Vertedor	Outlet	Static Pressure	Opening	Relative Pressure	-	-	Auto Timescale/Conservative/1
3.3 (Etapa III)	Dispersed Fluid	997 [kg/m³]	-	Ishii Zuber	Inlet	Mass Flow Rate	Inlet	Mass Flow Rate	-	-	-	Orifícios 3D	Outlet	Static Pressure	Outlet	Degassing Condition	-	-	Auto Timescale/Conservative/1
V6PE	Dispersed Fluid	997 [kg/m³]	-	Ishii Zuber	Inlet	Mass Flow Rate	Inlet	Mass Flow Rate	-	-	-	Vertedor	Outlet	Static Pressure	Outlet	Degassing Condition	-	-	Physical Timescale = 0,0001s
5.1 (Etapa V)	Dispersed Fluid	997 [kg/m³]	-	Ishii Zuber	Inlet	Mass Flow Rate	Inlet	Mass Flow Rate	-	-	-	Vertedor	Outlet	Static Pressure	Outlet	Degassing Condition	-	-	Auto Timescale/Conservative/1
V6PL	Particle Transport Fluid	997 [kg/m³]	Fully Coupled	Ishii Zuber	Inlet	Mass Flow Rate	Inlet	Mass Flow Rate	Zero Slip Velocity	Uniform Injection	Direct Especification =500	Vertedor	Outlet	Static Pressure	Wall	Free Slip Wall	0	1	Auto Timescale/Conservative/1
V6PL2	Particle Transport Fluid	997 [kg/m³]	Fully Coupled	Ishii Zuber	Inlet	Mass Flow Rate	Inlet	Mass Flow Rate	Zero Slip Velocity	Uniform Injection	Direct Especification =1000	Vertedor	Outlet	Static Pressure	Wall	Free Slip Wall	0	1	Physical Timescale = 0,0001s
V6PL3	Particle Transport Fluid	997 [kg/m³]	Fully Coupled	Ishii Zuber	Inlet	Mass Flow Rate	Inlet	Mass Flow Rate	Zero Slip Velocity	Uniform Injection	Direct Especification =500	Vertedor	Outlet	Static Pressure	Wall	Free Slip Wall	0	1	Physical Timescale = 1000s
V6PL4	Particle Transport Fluid	997 [kg/m³]	Fully Coupled	Ishii Zuber	Inlet	Mass Flow Rate	Inlet	Mass Flow Rate	Zero Slip Velocity	Uniform Injection	Proportional to Mass Flow Rate =10^7 [s kg^-1]	Vertedor	Outlet	Static Pressure	Wall	Free Slip Wall	0	1	Auto Timescale/Conservative/1
V6PL5	Particle Transport Fluid	997 [kg/m³]	Fully Coupled	Grace	Inlet	Mass Flow Rate	Inlet	Mass Flow Rate	Zero Slip Velocity	Uniform Injection	Proportional to Mass Flow Rate =10^7 [s kg^-1]	Vertedor	Outlet	Static Pressure	Wall	Free Slip Wall	0	1	Auto Timescale/Conservative/1
5.2 (Etapa V)	Particle Transport Fluid	997 [kg/m³]	Fully Coupled	Ishii Zuber	Inlet	Mass Flow Rate	Inlet	Mass Flow Rate	Zero Slip Velocity	Uniform Injection	Proportional to Mass Flow Rate =10^10 [s kg^-1]	Vertedor	Outlet	Static Pressure	Wall	Free Slip Wall	0	1	Auto Timescale/Conservative/1

(i) Os resultados das simulações V6PE, V6PL, V6PL2, V6PL3, V6PL4 e V6PL5 não foram apresentados no texto.